

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

## Masterthesis

Onderzoek naar een objectieve en representatieve kwantificatie en kwalificatie van scheuren in betonconstructies

PROMOTOR :

Prof. ir. Pieter BAEKELAND

PROMOTOR :

ir. Niki CAUBERG

Friedl Hulsmans, Esra Öztürk

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

De transnationale Universiteit Limburg is een uniek samenwerkingsverband van twee universiteiten in twee landen: de Universiteit Hasselt en Maastricht University.



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



2017 • 2018

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen  
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

## Masterthesis

Onderzoek naar een objectieve en representatieve kwantificatie en kwalificatie van scheuren in betonconstructies

**PROMOTOR :**

Prof. ir. Pieter BAEKELAND

**PROMOTOR :**

ir. Niki CAUBERG

**Friedl Hulsmans, Esra Öztürk**

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



**KU LEUVEN**



---

# MASTERPROEF

---

*Onderzoek naar een objectieve en representatieve  
kwantificatie en kwalificatie van scheuren in  
betonconstructies*

**Studenten:** *Friedl Hulsmans en Esra Öztürk*

**Interne promotor:** *Prof. Ir. Pieter Baekeland*

**Externe promotor:** *Ir. Niki Cauberg*

## Woord vooraf

Deze masterproef kwam tot stand in het kader van onze masteropleiding in de industriële wetenschappen, afstudeerrichting bouwkunde, aan de Universiteit Hasselt en KU Leuven.

Naar aanleiding van de weinige kennis rond hoe groot scheuren in beton op de werf mogen zijn zonder dat er structurele problemen zijn, werd deze masterproef uitgevoerd. Er werd gezocht naar een manier om de maximale scheurwijdte te bepalen zodat er op de werf bepaald kan worden welke scheuren er aanvaard mogen worden en welke afgekeurd moeten worden. Deze masterproef gaf ons de kans om ons verder te verdiepen in het vak beton en vooral de scheuren in beton.

Graag willen wij onze externe promotor ir. Niki Cauberg van het WTCB en onze interne promotor Prof. ir. Pieter Baekeland bedanken voor hun deskundig advies en hun begeleiding tijdens het realiseren van deze masterproef. Hun bijdrage, tips en hulp heeft ons op de goede weg gezet bij het ontwikkelen van onze masterproef. Door hun kennis over het onderwerp beton konden we met vragen altijd bij hen terecht.

Tot slot willen wij onze ouders bedanken voor hun steun en de vele kansen die ze ons gedurende de opleiding van industriële wetenschappen hebben gegeven. Zonder hen zou het onmogelijk zijn geweest deze opleiding tot een goed einde te brengen.

**Friedl Hulsmans en Esra Öztürk**



## Inhoud

Tabellenlijst .....	9
Figurenlijst .....	13
Verklarende woordenlijst .....	15
Abstract .....	17
Abstract in English .....	19
Inleiding.....	21
1. Flowchart .....	25
2. Literatuurstudie.....	27
2.1. Scheurvorming in beton .....	27
2.1.1. Soorten scheuren in betonconstructies.....	27
2.1.2. Autogene betonkrimp .....	28
2.1.3. Hydraulische krimp.....	29
2.1.4. Thermische krimp .....	30
2.1.5. Corrosie .....	31
2.2. Scheurbeheersing in beton .....	32
2.2.1. Algemeen.....	32
2.2.2. Minimale wapening.....	33
2.2.3. Scheurbeheersing zonder directe berekening .....	33
2.2.4. Scheurwijdte bij uitwendig belasting .....	35
2.2.5. Rekken en spanningen t.g.v. verhinderde opgelegde vervormingen .....	37
2.2.6. Scheurwijdte door verhindering van opgelegde vervormingen.....	39
2.2.7. Maximale scheurwijdte.....	42
2.3. Vloeistofdichtheid in beton.....	42
2.3.1. Algemeen vloeistofdichtheid .....	42
2.3.2. Belastingen op vloeistofdichte constructies .....	43
2.3.3. Vloeistofdichtheidsklassen .....	47
2.3.4. Scheurwijdte in vloeistofdicht beton .....	49
2.4. Kruip van beton .....	53
2.4.1. Kruip en temperatuur .....	53
2.4.2. Kruip en relaxatie.....	55
2.5. Statistische evaluatie op scheurniveau .....	56
2.5.1. Verticale doorlopende scheuren .....	56
2.5.2. Reductie meetgegevens .....	58
2.5.3. Scheurverdeling van microscheuren .....	59
2.6. Meetinstrumenten .....	61
2.6.1. Algemeen.....	61

2.6.2.	Detectie .....	61
2.6.3.	Meetmethoden .....	62
2.7.	Variatie op de inputwaarden .....	63
2.7.1.	Doorsnede wapening .....	63
2.7.2.	Moment .....	64
2.7.3.	Betonsterkte.....	66
2.7.4.	Gemiddelde waarde druksterkte beton .....	67
2.7.5.	Breedte.....	67
2.7.6.	Hoogte.....	69
2.7.7.	Betondekking .....	69
2.7.8.	Kruipfactor .....	70
2.8.	Experimenteel onderzoek scheurwijdte en scheurafstand in gewapend beton ...	71
2.8.1.	Scheurafstand .....	72
2.8.2.	Invloed van het effect van de maten in beton .....	72
2.8.3.	Invloed van het effect van de maten op scheurwijdte .....	72
2.8.4.	Gegevens experiment .....	72
2.8.5.	Test procedure.....	74
2.8.6.	Digitale beeldcorrelatie .....	75
2.8.7.	Resultaten experiment.....	75
2.9.	Numerieke modellering van diagonale scheuren .....	78
2.9.1.	Methode.....	78
2.9.2.	Resultaat .....	80
3.	Methode.....	85
4.	Resultaten .....	87
4.1.	Berekeningen .....	87
4.2.	Scheurwijdte t.g.v. buiging, balk .....	87
4.2.1.	Inputwaarden .....	87
4.2.2.	Berekening .....	87
4.2.3.	Variërende inputwaarden .....	89
4.2.4.	Berekening range scheurwijdte .....	90
4.2.5.	Controle berekening range scheurwijdte.....	92
4.3.	Scheurwijdte t.g.v. opgelegde verhinderde vervorming EC2-1, balk.....	94
4.3.1.	Inputwaarden .....	94
4.3.2.	Berekening .....	94
4.3.3.	Variërende inputwaarden .....	96
4.3.4.	Berekening range scheurwijdte .....	97
4.4.	Scheurwijdte t.g.v. opgelegde verhinderde vervorming EC2-3, balk.....	99



4.4.1.	Inputwaarden .....	99
4.4.2.	Berekening .....	99
4.4.3.	Variërende inputwaarden .....	100
4.4.4.	Berekening range scheurwijdte .....	101
4.4.5.	Controle berekening range scheurwijdte.....	102
4.5.	Scheurwijdte t.g.v. buiging, plaat.....	103
4.5.1.	Inputwaarden .....	103
4.5.2.	Berekening .....	103
4.5.3.	Variërende inputwaarden .....	105
4.5.4.	Berekening range scheurwijdte .....	105
4.5.5.	Controle berekening range scheurwijdte.....	107
4.6.	Scheurwijdte t.g.v. opgelegde verhinderde vervorming EC2-1, plaat .....	108
4.6.1.	Inputwaarden .....	108
4.6.2.	Berekening .....	108
4.6.3.	Variërende inputwaarden .....	110
4.6.4.	Berekening range scheurwijdte .....	111
4.7.	Scheurwijdte t.g.v. opgelegde verhinderde vervorming EC2-3, plaat.....	112
4.7.1.	Inputwaarden .....	112
4.7.2.	Berekening .....	113
4.7.3.	Variërende inputwaarden .....	114
4.7.4.	Berekening range scheurwijdte .....	114
5.	Discussie.....	117
5.1.	Histogram .....	117
5.1.1.	Balk.....	117
5.1.2.	Plaat.....	120
5.2.	Scheefheid .....	123
5.2.1.	Balk.....	124
5.2.2.	Plaat.....	125
5.3.	Laagste waarde range.....	126
5.3.1.	Balk.....	126
5.3.2.	Plaat.....	127
5.4.	Hoogste waarde range .....	128
5.4.1.	Balk.....	128
5.4.2.	Plaat.....	129
5.5.	Piekanalyse .....	130
5.5.1.	Trek Eurocode 2 – deel 3 trek , balk .....	130
5.5.2.	Trek Eurocode 2 – deel 1 buiging, plaat .....	132

5.5.3. Trek Eurocode 2 – deel 3 trek , plaat .....	134
5.6. Reproduceerbaarheid .....	136
5.6.1. Balk.....	136
5.6.2. Plaat.....	137
5.7. Cumulatieve frequentie .....	138
5.7.1. Balk.....	138
5.7.2. Plaat.....	143
5.8. Min – max vergelijking .....	146
5.8.1. Balk.....	146
5.8.2. Plaat.....	147
5.9. Afhangelijkheid van de parameters .....	149
5.10. Invloed gelijktijdigheid met een variërende parameter .....	150
5.10.1. Balk.....	151
5.10.2. Vergelijking maximale scheurwijdte met simulatie.....	159
5.10.3. Plaat.....	159
5.10.4. Vergelijking maximale scheurwijdte met simulatie.....	166
5.11. Vergelijking van 3 berekeningsmethoden .....	166
5.11.1. Balken .....	166
5.11.2. Plaat.....	168
5.12. Vergelijking balken en platen .....	170
5.13. Aanvaardingscriteria .....	171
6. Besluit .....	175
Bibliografie .....	177
Bijlage .....	181
A. Scheurwijdte t.g.v. buiging .....	181
A.1. Matlab code.....	181
A.2. Controle scheurwijdte t.g.v. buiging .....	184
B. Matlab code opgelegde verhinderde vervorming EC2-1, balk.....	203
C. Scheurwijdte t.g.v. opgelegde verhinderde vervorming EC2-3, balk.....	205
C.1. Matlab code.....	205
C.2. Controle scheurwijdte trek EC2-3, balk .....	207
D. Matlab code buiging, plaat.....	211
E. Matlab code opgelegde verhinderde vervorming EC2-1, plaat.....	214
F. Matlab code opgelegde verhinderde vervorming EC2-3, plaat.....	216
G. Laagste waarde range.....	218
G.1. Balk in buiging .....	218
G.2. Balk in trek Eurocode 2 deel 1 .....	220

G.3.	Balk in trek Eurocode 2 deel 3 .....	221
G.4.	Plaat in buiging .....	222
G.5.	Plaat in trek Eurocode 2 deel 1 .....	224
G.6.	Plaat in trek Eurocode 2 deel 3 .....	225
H.	Hoogste waarde range .....	226
H.1.	Balk in buiging .....	226
H.2.	Balk in trek Eurocode 2 deel 1 .....	228
H.3.	Balk in trek Eurocode 2 deel 3 .....	229
H.4.	Plaat in buiging .....	230
H.5.	Plaat in trek Eurocode 2 deel 1 .....	232
H.6.	Plaat in trek Eurocode 2 deel 3 .....	233
I.	Cumulatieve en relatieve cumulatieve frequentie.....	234
I.1.	Balk in buiging .....	234
I.2.	Balk in trek Eurocode 2 deel 1 .....	235
I.3.	Balk in trek Eurocode 2 deel 3 .....	236
I.4.	Plaat in buiging .....	237
I.5.	Plaat in trek Eurocode 2 deel 1 .....	238
I.6.	Plaat in trek Eurocode 2 deel 3 .....	239
J.	Voorbeeld min – max vergelijking.....	241
J.1.	Minimale scheurwijdte .....	241
J.2.	Maximale scheurwijdte.....	242
K.	Kolmogorov-Smirnovtoets .....	244
K.1.	Balk in buiging .....	244
K.2.	Balk in trek Eurocode 2 deel 1 .....	245
K.3.	Balk in trek Eurocode 2 deel 3 .....	246
K.4.	Plaat in buiging .....	247
K.5.	Plaat in trek Eurocode 2 deel 1 .....	248
K.6.	Plaat in trek Eurocode 2 deel 3 .....	248



## Tabellenlijst

Tabel 1: Scheurrisico in functie van het type krimp.....	28
Tabel 2: Maximale staafdiameters voor scheurbeheersing.....	34
Tabel 3: Maximale staalafstand voor scheurbeperving.....	34
Tabel 4: Verhinderingsfactoren centrale delen van de wanden op figuur 9 .....	38
Tabel 5: Aanbevolen waarden van $W_{max}$ (mm) .....	42
Tabel 6: Mogelijke belastingen op bouwwerken volgens Favre .....	44
Tabel 7: Nominale waarde voor uitdrogingskrimp .....	46
Tabel 8: Classificatie van waterdichtheid .....	48
Tabel 9: Statische waarden bij $n=186$ .....	58
Tabel 10: Statische waarden bij reductie van het aantal metingen .....	58
Tabel 11: Metingen microscheuren .....	60
Tabel 12: Controle metingen met overschrijdingspercentage .....	61
Tabel 13: Toegestane afwijking in percent .....	63
Tabel 14: Eigenschappen wapening .....	64
Tabel 15: Gebruiksgrenstoestanden .....	64
Tabel 16: ANB - $\psi$ -factoren voor de gebouwen.....	65
Tabel 17: Minimum karakteristieke waarde in situ van de druksterkte.....	66
Tabel 18: Sterkte- en vervormingseigenschappen voor beton .....	67
Tabel 19: Toegestane afwijkingen van doorsneden .....	68
Tabel 20: Toegestane afwijking van de doorsnede .....	69
Tabel 21: Vervolg toegestane afwijkingen van doorsneden .....	70
Tabel 22: Mengverhouding beton .....	72
Tabel 23: Parameters balken .....	73
Tabel 24: Inputwaarden van de balk bij EC2-1, buiging.....	87
Tabel 25: Variatie op de inputwaarden .....	89
Tabel 26: Minimum- en maximumwaarden van de inputgegevens .....	89
Tabel 27: Inputwaarden balk BM1 .....	92
Tabel 28: Inputwaarden balk BM2 .....	93
Tabel 29: Inputwaarden balk BM3 .....	93
Tabel 30: Inputwaarden van de balk bij EC2-1, trek .....	94
Tabel 31: Tabel 7.2N uit Eurocode 2 .....	94
Tabel 32: Scheurwijdte 0,3 mm .....	95
Tabel 33: Gegevens lineaire interpolatie voor $w_k$ .....	96
Tabel 34: Lineaire interpolatie.....	96
Tabel 35: Variatie op de inputwaarden .....	96
Tabel 36: Minimum- en maximumwaarden van de inputgegevens .....	97
Tabel 37: Inputwaarden bij het berekenen van de balk bij EC2-3, trek.....	99
Tabel 38: Variatie op de inputwaarden .....	100
Tabel 39: Minimum- en maximumwaarden van de inputgegevens .....	100
Tabel 40: Inputwaarden van de balk .....	103
Tabel 41: Inputwaarden bij het berekenen van de scheurwijdte .....	103
Tabel 42: Variatie op de inputwaarden .....	105
Tabel 43: Minimum- en maximumwaarden van de inputgegevens .....	105
Tabel 44: Tabel 7.2N uit Eurocode 2 .....	108
Tabel 45: Scheurwijdte 0,3 mm .....	109
Tabel 46: Gegevens lineaire interpolatie voor $w_k$ .....	110
Tabel 47: Lineaire interpolatie.....	110
Tabel 48: Variatie op de inputwaarden .....	110
Tabel 49: Minimum en maximum inputwaarden .....	111
Tabel 50: Inputwaarden berekening scheurwijdte .....	113
Tabel 51: Variatie op de inputwaarden .....	114

Tabel 52: Minimum- en maximumwaarde van de inputgegevens .....	114
Tabel 53: Berekende waarden buiging balk .....	117
Tabel 54: Berekende waarden EC2 - 1 balk .....	118
Tabel 55: Berekende waarden EC2 - 3 balk .....	119
Tabel 56: Berekende waarden buiging plaat .....	120
Tabel 57: Berekende waarden EC2 - 1 plaat .....	121
Tabel 58: Berekeningen EC2 - 3 plaat .....	122
Tabel 59: Berekening scheefheid buiging balk .....	124
Tabel 60: Berekening scheefheid EC2 - 1 balk .....	124
Tabel 61: Berekening scheefheid EC2 - 3 balk .....	124
Tabel 62: Berekening scheefheid buiging plaat .....	125
Tabel 63: Berekening scheefheid EC2-1 plaat .....	125
Tabel 64: Berekening scheefheid EC2-3 plaat .....	125
Tabel 65: Laagste waarde buiging balk .....	126
Tabel 66: Laagste waarde EC2-1 balk .....	126
Tabel 67: Laagste waarde EC2-3 balk .....	127
Tabel 68: Laagste waarde buiging plaat .....	127
Tabel 69: Laagste waarde EC2-1 plaat .....	127
Tabel 70: Laagste waarde EC2-3 plaat .....	128
Tabel 71: Hoogste waarde buiging balk .....	128
Tabel 72: Hoogste waarde EC2-1 balk .....	128
Tabel 73: Hoogste waarde EC2-3 balk .....	129
Tabel 74: Hoogste waarde buiging plaat .....	129
Tabel 75: Hoogste waarde EC2-1 plaat .....	129
Tabel 76: Hoogste waarde EC2-3 plaat .....	130
Tabel 77: Inputwaarden piek= 0,4 mm .....	131
Tabel 78: Inputwaarden piek=0,42 mm .....	131
Tabel 79: Inputwaarden piek=0,33 mm .....	133
Tabel 80: Inputwaarden piek=0,29 mm .....	134
Tabel 81: Inputwaarden piek=0,39 mm .....	135
Tabel 82: Inputwaarden piek=0,43 mm .....	135
Tabel 83: Vergelijking 1ste en 2de berekening buiging balk .....	136
Tabel 84: Vergelijking 1ste en 2de berekening EC2-1 balk .....	137
Tabel 85: Vergelijking 1ste en 2de berekening EC2-3 balk .....	137
Tabel 86: Vergelijking 1ste en 2de berekening buiging plaat .....	137
Tabel 87: Vergelijking 1ste en 2de berekening EC2-1 plaat .....	138
Tabel 88: Vergelijking 1ste en 2de berekening EC2-3 plaat .....	138
Tabel 89: Minimum- en maximumwaarden scheurwijdte bij balk, buiging .....	146
Tabel 90: Minimum- en maximumwaarden scheurwijdte bij balk, EC2 - 1 .....	147
Tabel 91: Minimum- en maximumwaarden scheurwijdte bij balk, EC2 - 3 .....	147
Tabel 92: Minimum- en maximumwaarden scheurwijdte bij plaat, buiging .....	148
Tabel 93: Minimum- en maximumwaarden bij plaat, EC2 - 1 .....	148
Tabel 94: Minimum- en maximumwaarden bij plaat EC2 - 3 .....	148
Tabel 95: Verbanden parameters .....	149
Tabel 96: Invloed van elke parameter apart bij variatie, buiging .....	151
Tabel 97: Overzicht 1a .....	151
Tabel 98: Combinatietabel 1 .....	152
Tabel 99: Combinatietabel 2 .....	152
Tabel 100: Overzicht 1b .....	153
Tabel 101: Combinatietabel 3 .....	153
Tabel 102: Invloed van elke parameter apart bij trek, EC2-1 .....	154
Tabel 103: Overzicht 2 .....	154
Tabel 104: Combinatietabel 1 .....	155

Tabel 105: Combinatietabel 2 .....	155
Tabel 106: Invloed van elke parameter apart trek, EC2-3.....	156
Tabel 107: Overzicht 3a .....	156
Tabel 108: Combinatietabel 1 .....	156
Tabel 109: Combinatietabel 2 .....	157
Tabel 110: Overzicht 3b .....	158
Tabel 111: Combinatietabel 3 .....	158
Tabel 112: Vergelijking maximale waarden buiging.....	159
Tabel 113: Vergelijking maximale waarde trek, EC1-2.....	159
Tabel 114: Vergelijking maximale waarde trek, EC1-3.....	159
Tabel 115: Invloed parameter bij buiging .....	160
Tabel 116: Overzicht 1a .....	160
Tabel 117: Combinatietabel 1 .....	160
Tabel 118: Combinatietabel 2 .....	161
Tabel 119: Overzicht 1b .....	161
Tabel 120: Combinatietabel 3 .....	162
Tabel 121: Invloed parameter bij trek, EC2-1 .....	162
Tabel 122: Overzicht 2.....	162
Tabel 123: Combinatietabel 1 .....	163
Tabel 124: Combinatietabel 2.....	163
Tabel 125: Invloed parameter bij trek, EC2-3 .....	163
Tabel 126: Overzicht 3a .....	164
Tabel 127: Combinatietabel 1 .....	164
Tabel 128: Combinatietabel 2 .....	164
Tabel 129: Overzicht 3b .....	165
Tabel 130: Combinatie 3 .....	165
Tabel 131: Vergelijking maximale waarden buiging.....	166
Tabel 132: Vergelijking maximale waarde trek, EC1-2.....	166
Tabel 133: Vergelijking maximale waarde trek, EC1-3.....	166
Tabel 134: Vergelijking berekeningsmethoden .....	167
Tabel 135: Vergelijking invloed parameters .....	168
Tabel 136: Vergelijking berekeningsmethoden .....	168
Tabel 137: Vergelijking invloed parameters .....	169
Tabel 138: Vergelijking intervallen.....	170
Tabel 139: Vergelijking gemiddelden .....	170
Tabel 140: Vergelijking kans op scheur .....	170
Tabel 141: Vergelijking invloed van de parameters .....	171
Tabel 142: Reproduceerbaarheid voor een balk bij buiging .....	171
Tabel 143: Gegevens verdeling balk .....	172
Tabel 144: Gegevens verdeling plaat .....	172
Tabel 145: Berekening gemiddelde standaarddeviatie .....	173
Tabel 146: Inputwaarde balk BM1 .....	190
Tabel 147: Inputwaarde balk BM2 .....	191
Tabel 148: Inputwaarde balk BM3 .....	193
Tabel 149: Inputwaarde EC2-1 balk.....	220
Tabel 150: Interpolatie EC2-1 balk .....	220
Tabel 151: Inputwaarde EC2-1 plaat.....	224
Tabel 152: Interpolatie EC2-1 plaat .....	224
Tabel 153: Inputwaarde EC2-1 balk.....	228
Tabel 154: Interpolatie EC2-1 balk .....	228
Tabel 155: Inputwaarde EC2-1 plaat.....	232
Tabel 156: Interpolatie EC2-1 plaat .....	232
Tabel 157: Cumulatieve en relatieve cumulatieve frequentie bij buiging balk .....	234

Tabel 158: Cumulatieve en Relatieve cumulatieve frequentie bij EC2-1 balk .....	235
Tabel 159: Cumulatieve en relatieve cumulatieve frequentie bij EC2-3 balk .....	236
Tabel 160: Cumulatieve en relatieve cumulatieve frequentie bij buiging plaat .....	237
Tabel 161: Cumulatieve en relatieve cumulatieve frequentie bij EC2-1 plaat .....	238
Tabel 162: Cumulatieve en relatieve cumulatieve frequentie bij EC2-3 plaat .....	239
Tabel 163: Kolmogorov-Smirnovtoets balk buiging .....	244
Tabel 164: Kolmogorov-Smirnovtoets balk EC2-1 .....	245
Tabel 165: Kolmogorov-Smirnovtoets balk EC2-3 .....	246
Tabel 166: Kolmogorov-Smirnovtoets plaat buiging .....	247
Tabel 167: Kolmogorov-Smirnovtoets plaat EC2-1 .....	248
Tabel 168: Kolmogorov-Smirnovtoets plaat EC2-3 .....	248



## Figurenlijst

Figuur 1: Schematische voorstelling van de soorten krimp .....	27
Figuur 2: Voornaamste types betonkrimp .....	29
Figuur 3: Krimp door uitdroging .....	29
Figuur 4: Soorten scheuren op betonconstructie .....	30
Figuur 5: Thermische krimp in jong beton .....	30
Figuur 6: Corrosie ingeleid voor carbonatatie .....	32
Figuur 7: Grafiek scheurwijdte in functie van maximale diameter en de staalspanning ..	35
Figuur 8: Scheurwijdte aan oppervlak beto .....	36
Figuur 9: Verhinderingsfactoren voor typische situaties .....	38
Figuur 10: Types van verhindering .....	39
Figuur 11: Maximale diameters voor scheurwijdtebeheersing aan axiale trek .....	40
Figuur 12: Maximale staalafstand voor scheurbeperving aan axiale trek .....	40
Figuur 13: Relatie tussen beide situaties .....	41
Figuur 14: Verdeling van de contactdruk tegen een wand .....	44
Figuur 15: De temperatuur die t.g.v. hydratatiereacties bereikt wordt.....	46
Figuur 16: Krimp t.o.v. de tijdsduur.....	47
Figuur 17: Differentiële krimp .....	47
Figuur 18: Scheurvorming door verhinderde vervorming .....	49
Figuur 19: Maximale scheurwijdte voor de dichtheidsklasse 1 .....	50
Figuur 20: Maximale staafdiameter voor beheersing scheurvorming.....	51
Figuur 21: Maximale afstand tussen staven voor beheersing scheurvorming .....	51
Figuur 22: Minimaal wapeningspercentage t.o.v. totale doorsnede.....	52
Figuur 23: Voorstelling van de kruip bij druk.....	53
Figuur 24: Temperatuurfactor voor temperatuurinvloed op de kruip .....	55
Figuur 25: Relaxatie op druk belast beton.....	55
Figuur 26: Voorbeeld van een grote scheur.....	56
Figuur 27: Scheurverdeling van een verticale scheur.....	57
Figuur 28: Scheurverdeling per segment van 50 mm .....	57
Figuur 29: Meetoppervlak microscheuren .....	59
Figuur 30: Scheurverdeling op 10 cm.....	59
Figuur 31: Scheurverdeling op tussenafstand 3,3 cm .....	60
Figuur 32: Scheurliniaal .....	62
Figuur 33: Detail scheurliniaal.....	62
Figuur 34: Micrometer.....	63
Figuur 35: Loodrecht op de scheur aflezen.....	63
Figuur 36: Drie verschillende balken .....	74
Figuur 37: Testopstelling .....	74
Figuur 38: Digitale beelden.....	75
Figuur 39: COD en scheurafstand van balk D1 .....	76
Figuur 40: Grafiek $w_k$ , experimenteel en $w_{k,max}$ (Eurocode 2) .....	76
Figuur 41: Grafiek invloed effect van de maten .....	77
Figuur 42: Grafiek scheurafstand volgens experiment en formule Eurocode .....	77
Figuur 43: Discrete model for reinforcement .....	78
Figuur 44: FEM - mesh for beams S3k and S5 .....	78
Figuur 45: The limit surface .....	79
Figuur 46: Cracking outline.....	80
Figuur 47: Strain trajectories for beams at different load level .....	81
Figuur 48: Evolutie van het scheurpatroon.....	82
Figuur 49: Scheurpatroon van numeriek en experimenteel resultaat .....	83
Figuur 50: Stappenplan berekening EC2-1 buiging.....	90
Figuur 51: Scheurwijdte bij variërende inputwaarden 1 .....	91

Figuur 52: Scheurwijdte bij variërende inputwaarden 2 .....	91
Figuur 53: Stappenplan berekening EC2-1 trek .....	97
Figuur 54: Spreidingsdiagram 1 scheurwijdte met variërende inputwaarden .....	98
Figuur 55: Spreidingsdiagram 2 scheurwijdte met variërende inputwaarden .....	98
Figuur 56: Stappenplan berekening EC2-3 trek .....	101
Figuur 57: Spreidingsdiagram 1 scheurwijdte met variërende inputwaarden .....	102
Figuur 58: Spreidingsdiagram 2 scheurwijdte met variërende inputwaarden .....	102
Figuur 59: Stappenplan berekening EC2-1 buiging.....	106
Figuur 60: Spreidingsdiagram 1 van de range van scheurwijdten.....	107
Figuur 61: Spreidingsdiagram 2 van de range van scheurwijdten.....	107
Figuur 62: Stappenplan bij berekening EC2-1 trek.....	111
Figuur 63: Spreidingsdiagram 1 van de range van scheurwijdten.....	112
Figuur 64: Spreidingsdiagram 2 van de range van scheurwijdten.....	112
Figuur 65: Stappenplan bij berekening EC-3 trek.....	115
Figuur 66: Spreidingsdiagram 1 met variërende inputwaarden .....	115
Figuur 67: Spreidingsdiagram 2 met variërende inputwaarden .....	116
Figuur 68: Grafiek van de scheurwijdte bij buiging .....	118
Figuur 69: Histogram van de rang van de scheurwijdtes bij EC2-1 .....	119
Figuur 70: Histogram range van scheurwijdtes EC2-3 .....	120
Figuur 71: Histogram range scheurwijdtes buiging plaat.....	121
Figuur 72: Histogram range scheurwijdtes EC2 - 1 plaat .....	122
Figuur 73: Histogram range scheurwijdtes EC2 - 3 plaat.....	123
Figuur 74: Piekanalyse balk, EC2-3 trek .....	130
Figuur 75: Doorsnede piek 0,4 mm.....	131
Figuur 76: Doorsnede piek 0,42 mm .....	132
Figuur 77: Piekanalyse plaat, EC2-1 buiging .....	132
Figuur 78: Doorsnede piek 0,33 mm .....	133
Figuur 79: Piekanalyse plaat, EC2-3 trek .....	134
Figuur 80: Doorsnede piek 0,290 mm .....	135
Figuur 81: Doorsnede piek 0,390 mm .....	136
Figuur 82: Doorsnede piek 0,430 mm .....	136
Figuur 83: Cumulatieve frequentie buiging balk.....	139
Figuur 84: Relatieve cumulatieve frequentie buiging balk .....	139
Figuur 85: Cumulatieve frequentie EC2 - 1 balk .....	140
Figuur 86: Relatieve cumulatieve frequentie EC2 - 1 balk.....	141
Figuur 87: Cumulatieve frequente bij EC2-3 balk.....	142
Figuur 88: Relatieve cumulatieve frequentie bij EC2-3 balk.....	142
Figuur 89: Cumulatieve frequentie buiging plaat.....	143
Figuur 90: Relatieve cumulatieve frequentie buiging plaat .....	143
Figuur 91: Cumulatieve frequentie EC2 - 1 plaat .....	144
Figuur 92: Relatieve cumulatieve frequentie EC2 - 1 plaat .....	144
Figuur 93: Cumulatieve frequentie EC2 - 1 plaat .....	145
Figuur 94: Relatieve cumulatieve frequentie EC2 - 3 plaat .....	145
Figuur 95: Doorsnede balk.....	149
Figuur 96: Grafiek vergelijking gemiddelden .....	167
Figuur 97: Grafiek vergelijking gemiddelden .....	169
Figuur 98: Grafiek verdeling .....	172
Figuur 99: Uitkomst Matlab BM1.....	197
Figuur 100: Uitkomst Matlab BM2.....	199
Figuur 101: Uitkomst Matlab BM1 .....	202
Figuur 102: Uitkomst Matlab controle EC2-3 .....	210

## Verklarende woordenlijst

Afkorting	Verklaring
<b>GB</b>	Gewapend beton
<b>OB</b>	Ongewapend beton
<b>VB</b>	Voorgespannen beton
<b>GGT</b>	Gebruiksgrenstoestand
<b>UGT</b>	Bezwijkgrenstoestand
<b><math>w_k</math></b>	Scheurwijdte
<b><math>w_{max}</math></b>	Maximale scheurwijdte
<b><math>w_{min}</math></b>	Minimale scheurwijdte
<b><math>w_i</math></b>	Gemiddelde scheurwijdte
<b>EC 2</b>	Eurocode 2
<b>EC 2 – 1</b>	Eurocode 2 deel 1
<b>EC 2 – 3</b>	Eurocode 2 deel 3
<b>w/c</b>	Watercementfactor
<b>H</b>	Hoogte
<b>B</b>	Breedte
<b>C</b>	Betondekking
<b><math>M_d</math></b>	Moment
<b><math>M_{cr}</math></b>	Scheurmoment
<b><math>f_{ck}</math></b>	Betonkwaliteit
<b><math>f_{cm}</math></b>	Gemiddelde waarde druksterkte beton
<b><math>\Phi</math></b>	Kruipfactor
<b><math>f_{yk}</math></b>	Staalkwaliteit
<b><math>E_s</math></b>	Elasticiteitsmodulus staal
<b><math>E_{cm}</math></b>	Elasticiteitsmodulus beton
<b><math>E_c</math></b>	Elasticiteitmodulus
<b><math>d_1</math></b>	Afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening $A_{s1}$
<b><math>d_2</math></b>	Afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening $A_{s2}$
<b>D</b>	Nuttige hoogte
<b><math>A_{s1}</math></b>	Trekwapening
<b><math>A_{s2}</math></b>	Drukwapening
<b><math>A_{s,tot}</math></b>	Totale wapening
<b><math>\Phi_{s1}</math></b>	Diameter trekwapening
<b><math>\Phi_{s2}</math></b>	Diameter drukwapening
<b><math>\Phi_b</math></b>	Diameter beugel
<b><math>n_{s1}</math></b>	Aantal staven trekwapeningen
<b><math>n_{s2}</math></b>	Aantal staven drukwapeningen
<b><math>A_{s,min}</math></b>	Minimum wapening
<b><math>S_{r,max}</math></b>	Maximale scheurafstand
<b><math>\epsilon_{sm}</math></b>	Gemiddelde rek in de wapening onder de van toepassing zijnde belasting combinatie
<b><math>\epsilon_{cm}</math></b>	Gemiddelde betonrek tussen de scheuren
<b>X</b>	Drukhoogte
<b><math>\sigma_c</math></b>	Betondrukhoogte
<b><math>\sigma_{s1}</math></b>	Staaldrukhoogte bij trekwapening
<b><math>\sigma_{s2}</math></b>	Staaldrukhoogte bij drukwapening
<b>I</b>	Traagheidsmoment
<b><math>f_{ctm}</math></b>	Scheurmoment
<b><math>A_{c,eff}</math></b>	Effectieve doorsnede
<b>N</b>	Hoeveel keer de Matlab berekening wordt uitgevoerd
<b>K</b>	Coëfficiënt die rekening houdt met het effect van niet-gelijkmatige eigenschappen

$k_c$	Coëfficiënt die rekening houdt met de spanningsverdeling binnen de doorsnede onmiddellijk voor het scheuren
$\mu$	Het gemiddelde
$\sigma$	Standaardafwijking of standaarddeviatie
<b>PH-waarde</b>	Waarde van de zuurtegraad
$\Phi_s$	Aangepaste staafdiameter
$\Phi_s'$	De maximale staafdiameter uit tabel 3
$h_{cr}$	De hoogte van de trekzone onmiddellijk voor het scheuren, rekening houdend met de karakteristieke waarden van de voorspanning en de normaalkracht onder quasi-blijvende belastingscombinatie
<b>COD</b>	Crack opening displacement
$s$	Afstand tussen de staven
$n$	Aantal metingen

## Abstract

### *Onderzoek naar een objectieve en representatieve kwantificatie en kwalificatie van scheuren in betonconstructies*

In betonconstructies komen vaak scheuren voor. Dat kan verklaard worden doordat beton weinig trekkrachten kan opnemen. Op het moment dat de treksterkte wordt overschreden, zal beton scheuren. Natuurlijk zijn er factoren die aanleiding geven tot scheurvorming. Het meest voorkomende probleem en de onvermijdelijke nawerking van de hydratatiereactie van beton is de krimp. De omgeving van het beton of de chemische processen in het beton zelf geven aanleiding tot scheuren van het beton. Een scheur die ontstaan in het verse beton op jonge leeftijd is bijvoorbeeld de plastische krimp en scheuren die ontstaan in het verharde beton zijn de uitdrogingskrimp en de autogene krimp. Daarnaast kan wapeningscorrosie ook aanleiding geven tot scheurvorming. Soms kunnen deze betonscheuren voorspeld worden, maar de vraag is of de voorspelling overeenkomt met de werkelijkheid op de werf. De voorspelling wordt gedaan met de berekeningen in Eurocode 2 door gebruik te maken van de karakteristieke waarde van de scheurwijdte. Eurocode 2 geeft alleen de toegelaten maximale scheurwijdtes ( $w_{max}$ ) weer. Bij deze thesis wordt onderzocht vanaf welke waarde scheuren op de werf afgekeurd moeten worden. In Eurocode 2 is er geen regel te vinden.

Deze thesis omvat het onderzoek naar een acceptatie interval van de scheurwijdtes [ $w_{min}$ ,  $w_{max}$ ] dat nog voldoet aan een gegeven maximale karakteristieke scheurwijdte in Eurocode 2. Het onderzoek wordt uitgevoerd om een drempelwaarde te bepalen zodat bepaald kan worden voor welke range de scheurwijdtes wel en niet geaccepteerd kunnen worden. De bepaling van de drempelwaarde wordt gedaan door een variatie toe te passen op de inputwaarden. De inputwaarden die nodig zijn voor de berekening van de scheurwijdte hebben een schommeling en veroorzaken ruis op de waarde van scheurwijdte. De scheurwijdtes worden op drie verschillende manieren berekend en worden uitgevoerd voor een balk en een plaat.

De eerste manier is de berekening van de scheurwijdte volgens Eurocode 2 deel 1, waarbij rekening wordt gehouden met de uitwendige belastingen. Vertrekkend van een gegeven betondoorsnede met een berekende scheurwijdte van 0,30 mm laat men eerst de inputgegevens binnen hun normatieve grenzen variëren en dan wordt de scheurwijdte opnieuw berekend met een Monte Carlo simulatie. Zo ontstaat er een set waarden van scheurwijdtes.

De tweede manier is de berekening van de scheurwijdtes t.g.v. opgelegde verhinderde vervorming volgens Eurocode 2 deel 1 door gebruik te maken van de minimale wapening in trek. Eerst wordt er een betondoorsnede bepaald waarbij een scheurwijdte van 0,30 mm berekend wordt. Hierna wordt er op dezelfde manier gewerkt als methode één.

De laatste manier is de berekening van de scheurwijdte t.g.v. de opgelegde verhinderde vervorming volgens Eurocode 2 deel 3, hierbij wordt gebruik gemaakt van de formules uit bijlage M. Dezelfde methode als bij de eerste manier wordt hier gehanteerd.

Uit deze set van verschillende scheurwijdtes kan dan een conclusie worden getrokken voor de waarden van de maximale scheuren op de werf zelf. Die waarden liggen tussen een bepaalde range, dat is dan het gezochte acceptatie interval [ $w_{min}$ ,  $w_{max}$ ].



## Abstract in English

### *Research into objective and representative quantification and qualification of cracks in concrete structures*

Cracks often occur in concrete constructions. This can be explained by the fact that concrete can absorb a few tensile forces and when the tensile strength is exceeded concrete will crack. Of course, there are factors that give rise to the cracking. The most common problem and the inevitable aftereffect of the hydration reaction of concrete is shrinkage. The environment of the concrete or the chemical processes in the concrete itself can give rise to cracking of the concrete. A crack that occurs in the fresh concrete is for example the plastic shrinkage and cracks that occur in the hardened concrete are dehydration shrinkage and autogenous shrinkage. These factors can have cracks as a result. Besides that, reinforcement corrosion can also lead to cracking. Sometimes cracks in concrete can be predicted, but the question is whether the predictions corresponds with the reality on the site. The prediction is made with the calculation in Eurocode 2 by making use of the characteristic value. Eurocode 2 only gives the maximum permissible crack widths. The research will focus on witch value of crack width should be rejected on the construction site. There is no rule found in Eurocode 2.

This research includes the study of an acceptance interval of the cracks widths [ $w_{min}$ ,  $w_{max}$ ] that meets a given maximum characteristic crack width in the Eurocode 2. This research is executed to determine the threshold value so that it can be determined for which range the crack widths can be accepted or which cracks are not approved. The determination of the threshold value is done by applying a variation to the input values. The input value that are necessary for the calculation of the crack width can have a fluctuation and cause noise on the value of the crack width. The calculation is done in three different ways. The calculations were first performed for a beam and then for a slab.

The first calculation of the crack width is done according to the Eurocode 2 part one. In this calculation the external loads are taken into account. For the calculation, they start from a given concrete section with a calculated crack width of 0,30 mm. Then the input values are varied within their normative limits and then the crack width is recalculated with a Monte Carlo simulation. This creates a set of values of the crack widths.

The second method is the calculation of the crack widths duet to imposed restrained deformation according to Eurocode 2 part one by using the minimum reinforcement in case of draft. First the concrete section is determined with a crack width of 0,30 mm. Then the same method is used as in the first calculation.

The last method is the calculation of the crack width as a result of the imposed restrained deformation according to Eurocode 2 part three, using the formula from Appendix M. The same calculation method as the first method is used here.

From the three different set of values, a conclusion can be drawn for the maximum cracks on the construction site itself. The values have a certain range, this range is the acceptance interval [ $w_{min}$ ,  $w_{max}$ ].





## Inleiding

### Situering

Als laatstejaarsstudenten van de opleiding Industrieel ingenieur bouwkunde aan de Universiteit Hasselt krijgen we de mogelijkheid om onderzoek te doen naar scheurvorming in beton. Dit gebeurt in samenwerking met het WTCB, Wetenschappelijk en technisch centrum voor het bouwbedrijf en de Universiteit van Hasselt.

Het wetenschappelijk en technisch centrum voor het bouwbedrijf is een particuliere onderzoeksinstituting die in 1960 werd opgericht. Het werd opgericht in toepassing van de Besluitwet De Grootte van 1947. Deze besluitwet zorgt ervoor dat het toegepaste onderzoek in de industrie wordt bevorderd en om het concurrentievermogen te verhogen [1].

Het WTCB heeft de volgende drie hoofdpodrachten te vervullen. Als eerste wordt er wetenschappelijk en technisch onderzoek verricht voor zijn leden. Als tweede zorgt het voor technische voorlichting, bijstand en advies aan zijn leden. Als laatste zorgt het voor een bijdrage tot de algemene innovatie en ontwikkeling in de bouwsector door middel van contractonderzoek op aanvraag van de industrie en de overheid. Hiervoor steunt het WTCB op de kennis en ervaring van hooggeschoolde en gemotiveerd medewerkers. Het WTCB heeft verschillende vestigingen in België. De maatschappelijke zetel bevindt zich in Brussel en het proefstation is gelegen in Limelette [1].

Voor deze masterproef wordt er binnen het WTCB, een onderzoek uitgevoerd naar een objectieve en representatieve kwantificatie en kwalificatie van scheuren in betonconstructies. Hierbij vormen scheuren in beton vooral een probleem bij vloeistofdichte betonconstructies en zichtbeton. Daarom omvat deze thesis een uitgebreid onderzoek naar de scheurvorming van beton. Hierbij zal er dieper ingegaan worden op de scheurwijdte van de scheuren en het opstellen van aanvaardingscriterium voor de gemeten waarden op de site, uitgaande van de rekenwaarden op basis van Eurocode 2.

### Probleemstelling

Scheurvorming bij beton is een fenomeen dat voorspeld kan worden, maar kan ook onverwachts optreden [2]. Soms kunnen deze scheuren grootschalige problemen met zich meebrengen en de constructie in gevaar brengen. Dit komt omdat beton geringe trekkracht kan opvangen. Beton zal scheuren op het moment dat de treksterkte van de betonconstructie wordt overschreden. Als het beton scheurt, is het de bedoeling dat de wapening de aanwezige trekspanningen zal opvangen. De ingenieurs maken de nodige berekeningen om te bepalen waar het wapeningsstaal aangebracht moet worden en willen op deze manier de scheurwijdtes zo beperkt mogelijk houden [3].

Er zijn een aantal factoren die aanleiding geven tot scheurvorming, zoals de omgeving van het beton of de chemische processen in het beton zelf. Door de veranderingen in het vochttransport in het beton ontstaan chemische reacties die ervoor zorgen dat het beton krimpt en de duurzame eigenschappen van het beton beïnvloedt. Er kunnen scheuren ontstaan in het verse beton op jonge leeftijd zoals de plastische krimp. Maar er kunnen ook scheuren ontstaan in het verharde beton, bekende voorbeelden zijn de uitdrogingskrimpt en de autogene krimp. In dit onderzoek wordt de nadruk gelegd op de scheuren die ontstaan op lange termijn [4].

Naast het krimpfenomeen, kan het ook zijn dat er wapeningscorrosie (roest) optreedt. Als de betonconstructie goed ontworpen en uitgevoerd is zal de betondekking de wapening voldoende beschermen. Als dat niet het geval is, waarbij de betondekking niet voldoende bescherming aanbiedt, zal er wapeningscorrosie optreden. Dit kan doordat er agressieve stoffen zoals chlorides binnendringen en in aanraking komen met de wapening. De wapeningscorrosie kan ook ontstaan doordat het beton dat de wapening bedekt, carboniseert omwille van de gaten, scheurtjes of beschadigingen in het beton. Hier zal de wapening op termijn corroderen waarbij de passiveringslaag van de wapening verloren gaat en een volumevermeerdering optreedt dat gevolgd wordt door scheurvorming [2], [5].

Er zijn verschillende discussies over scheurvorming en de maximale toelaatbare scheurwijdte. De voornaamste discussie rond scheurvorming is of de bestaande formules correct zijn of niet. Hierdoor kan het onderzoek naar scheurvorming door twee luiken behandeld worden. De eerste manier is dat de formules die gekend zijn voor het berekenen van de scheurwijdte juist zijn. De formules kunnen dan gebruikt worden voor het berekenen van de scheurwijdte. Hierbij wordt er dus uitgegaan van de juistheid van de formules. De tweede manier is dat de formules niet correct zijn. Als deze methode wordt toegepast moet er een verband worden gezocht tussen scheuren op de werf en de berekende scheuren. Hier is het scheurpatroon voltooid. Dit wil zeggen dat er toename in de trekzone is waardoor er grotere scheuren zijn maar de scheurafstand blijft wel constant. Bij deze masterproef werd er gekozen voor de eerste methode.

Maar welke waarden van scheuren mogen er afgekeurd worden en welke niet. In Eurocode 2 is er geen regel voor beschreven. Alleen de toegelaten maximale scheurwijdtes ( $w_{max}$ ) zijn weergegeven die verbonden zijn met de verschillende milieuklassen afhankelijk van de toepassing. Deze maximale scheurwijdtes worden in dit onderzoek als designwaarden gebruikt om de berekeningen uit te voeren. De onderzoeksvraag zelf gaat meer in de richting van de scheurwijdte.

**Indien de structuur correct ontworpen is met een karakteristieke waarde van de scheurwijdte in GGT-Q, wat is dan het interval van gemeten scheurwijdtes dat hier aan voldoet op de werf?**

Wanneer scheuren te groot zijn, kan er schade ontstaan. Deze schade kan constructieve problemen veroorzaken en moet onderzocht worden. Het kan ook zijn dat er doorgaande scheuren voorkomen, deze scheuren kunnen problematisch zijn voor vloeistofdichte betonconstructies, bijvoorbeeld een waterdichte kelder. Bij vloeistofdichte constructies kunnen lekkages ontstaan. Afhankelijk van de waterdichtheidsklassen worden eisen met betrekking tot lekkage vastgesteld. De grootte van de scheuren zijn dan gelinkt met de vloeistofdichtheidsklassen die in Eurocode 2 beschreven zijn. Vervolgens zal het lekdebiet met behulp van de scheurwijdte berekend worden om te controleren of deze nog voldoet aan de opgelegde eis. Er kan vastgelegd worden dat de scheurwijdte belangrijk is bij het bepalen van het lekdebiet.

**Doelstellingen**

Concreet omvat de hoofdoelstelling van deze masterproef het theoretische onderzoek naar een acceptatie interval [ $w_{min}$ ,  $w_{max}$ ] dat nog net voldoet aan een gegeven maximale karakteristieke scheurwijdte in Eurocode 2. Anders gezegd, theoretisch onderzoeken van

de drempelwaarden door spelings te doen op berekeningen van de scheurwijdtes door gebruik te maken van de designwaarden als inputwaarden. De scheurwijdte,  $w_{\max}$  ligt vast, de andere paramaters hebben een fluctuatie en veroorzaken ruis op de waarde van scheurwijdte. Deze hoofddoelstelling is uitgebreid en kan daarom onderverdeeld worden in verschillende deeldoelstellingen.

De eerste doelstelling is het beantwoorden van de vraag: **indien de structuur correct ontworpen is met een karakteristieke waarde van de scheurwijdte in GGT-Q, wat is dan het interval van gemeten scheurwijdtes dat hier aan voldoet op de werf?** De bevindingen zullen samengevoegd worden en volgens deze gegevens zal er een selectief onderzoek uitgevoerd worden om de vraag en de deelvragen correct te kunnen beantwoorden.

De tweede doelstelling bevat het uitvoeren van een literatuurstudie. Met behulp van de Eurocode zal er nagegaan worden hoe de scheuren bij beton worden gevormd en geanalyseerd. Daarna zal er een schema opgemaakt worden om het doel en de factoren die een grote invloed hebben op de scheurvorming te omkaderen. Nadien worden de berekeningen op de scheurwijdte geanalyseerd, de invloed van de parameters van deze berekeningen worden onderzocht. Daarna worden de berekeningen van de wapening geanalyseerd en de invloed van deze parameters worden onderzocht, zoals de betondekking. Zo kan er bepaald worden op welke parameter het nuttig is om een variatie toe te passen bij de latere berekeningen. Daarbij zullen de specifieke eisen die eraan verbonden zijn verder onderzocht worden. Naderhand zullen ook de meetmethoden en de meetinstrumenten aangehaald worden. Op deze manier krijgt men een beeld van hoe de scheuren in de werkelijkheid gedetecteerd en gemeten worden.

De derde doelstelling is het uitvoeren van de berekening en de analyse ervan. De berekeningen van de scheurwijdte worden uitgevoerd zoals weergegeven is in Eurocode 2. Hierbij wordt er gebruikt gemaakt van een balk en een plaat met bepaalde afmetingen breedte, hoogte, een hoeveelheid wapening en aantal wapening, de betonkwaliteit en de betondekking. Verder zullen alle variabelen aangepast worden binnen deze berekening om te werken met de nodige toleranties. Elke waarde kan een afwijking hebben. Zo kan de wapening op een afstand van 30 mm liggen van de betonrand en een stukje verder kan een volgend stuk wapening bijvoorbeeld 31 mm ver liggen van de betonrand. Verder zal er via een Excel file een iteratieproces worden uitgevoerd met de nodige toleranties.

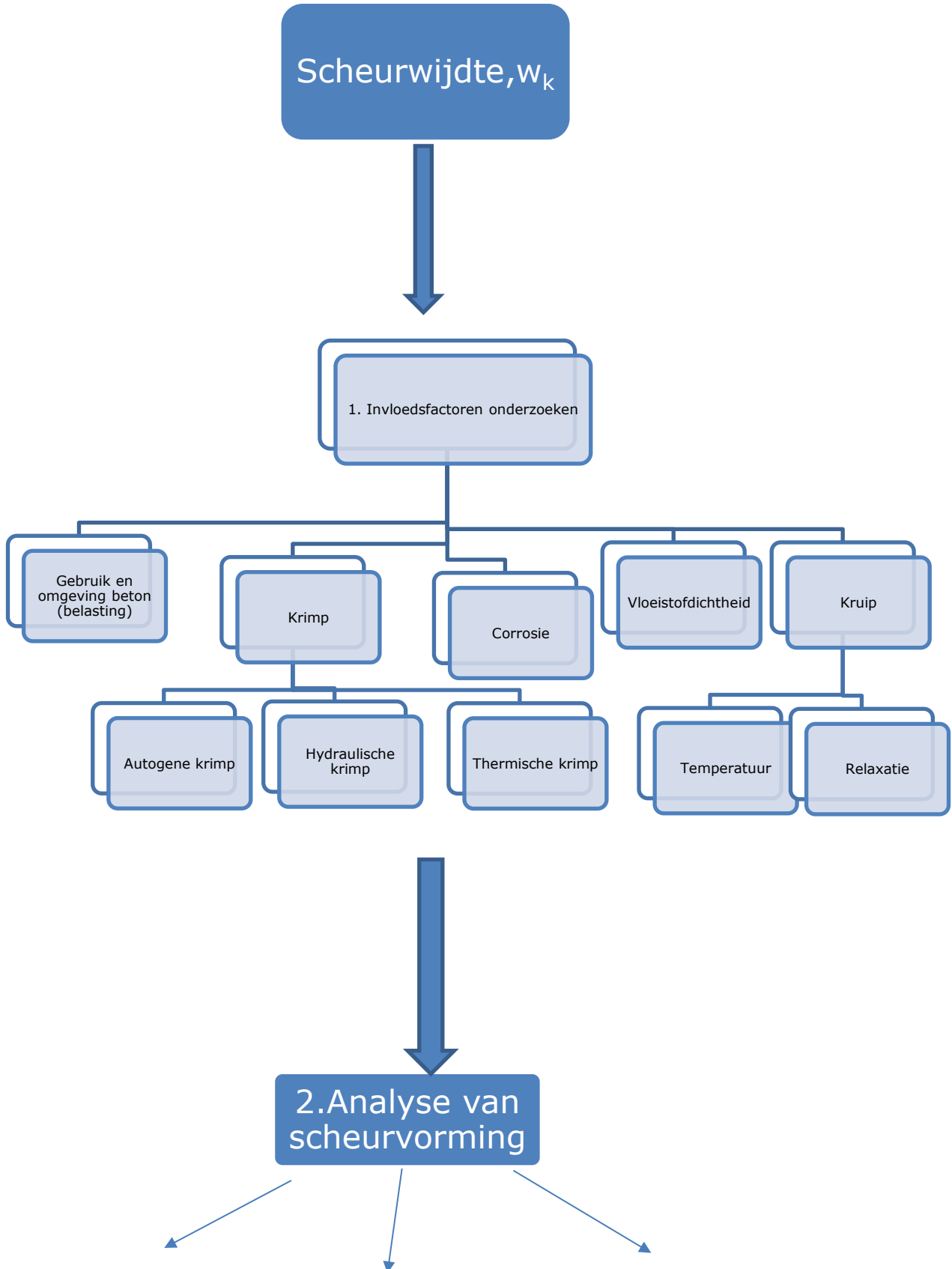
Hierbij wordt er gebruikt gemaakt van de Monte Carlo analyse. Bij de verschillende inputwaarden wordt er dan een afwijking opgegeven tussen welke waarde ze kunnen verschillen, deze waarden liggen binnen hun normatieve grenzen. Uit deze berekeningen zal een set van verschillende scheurwijdtes komen. Met deze scheurwijdtes wordt dan een vergelijking gemaakt met de maximale toegelaten scheurwijdtes, deze waarden zijn terug te vinden in Eurocode 2. De waarden uit Eurocode 2 zijn de designwaarden, voor deze masterproef worden er gezocht naar de drempelwaarden. De waarde zal nooit voor elke berekening dezelfde scheurwijdte geven. De ene zal al groter zijn dan de andere.

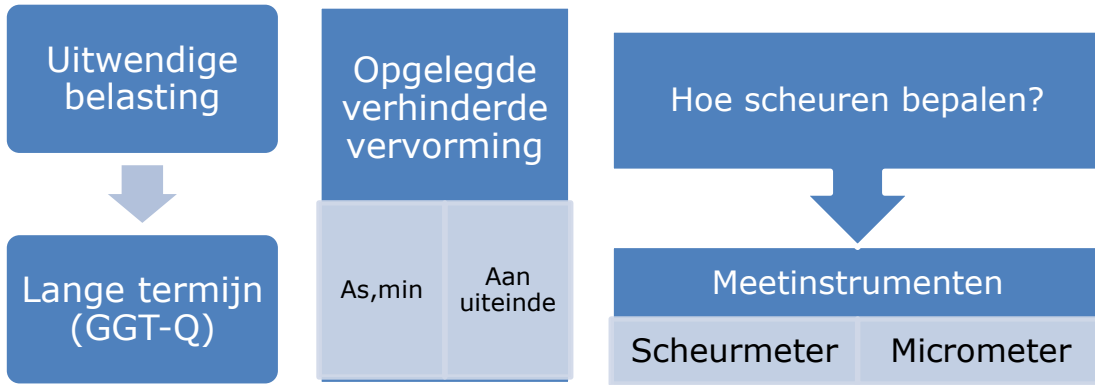
Uit deze waarde wordt dan een conclusie getrokken voor de waarden van de maximale scheuren op de werf zelf. De waarden kunnen dan liggen tussen een bepaalde range, dit is dan het acceptatie interval  $[w_{\min}, w_{\max}]$  die verkregen wordt uit de berekeningen. Uiteindelijk kan er geconcludeerd worden wat de drempelwaarden zijn die ondersteund worden door de designwaarden in Eurocode 2.



### 1. Flowchart

Het volgende stappenplan wordt gevolgd om te onderzoeken wat het interval van gemeten scheurwijdtes op de werf is, indien de structuur correct ontworpen is met de karakteristieke waarde van de scheurwijdte in GGT-Q. Elke stap wordt toegelicht in deze thesis.





$$W_k = S_{r,max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$$

3. Berekening scheurwijdte [Wmin; Wmax]

Uitwendige belasting  
Eurocode 2 - deel 1

Opgelegde verhinderde vervorming  
Eurocode 2 - deel 3

Opgelegde verhinderde vervorming  
Eurocode 2 - deel 1

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff} L_s (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{\rho_{p,eff}}}{E_s} \geq 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

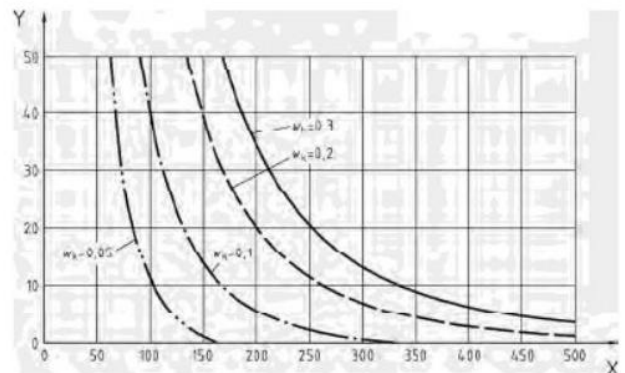
$$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = \frac{0.5 + \alpha_c \cdot k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha_c \cdot \rho}\right)}{E_s}$$

$$A_{s,min} = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$$

Staalspanning <sup>2</sup> (MPa)	Maximale staafdiameter (mm)		
	w <sub>s</sub> = 0,4 mm	w <sub>s</sub> = 0,3 mm	w <sub>s</sub> = 0,2 mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

OPMERKING 1 De waarden in de tabel zijn gebaseerd op de volgende aannamen:  
c = 25 mm; f<sub>ct,eff</sub> = 2,9 MPa; f<sub>ct</sub> = 0,5; (h-d) = 0,1h; k<sub>1</sub> = 0,8; k<sub>2</sub> = 0,5; k<sub>c</sub> = 0,4; k = 1,0;  
k<sub>t</sub> = 0,4 en k' = 1,0.

OPMERKING 2 Onder de van toepassing zijnde belastingscombinaties.



## 2. Literatuurstudie

### 2.1. Scheurvorming in beton

#### 2.1.1. Soorten scheuren in betonconstructies

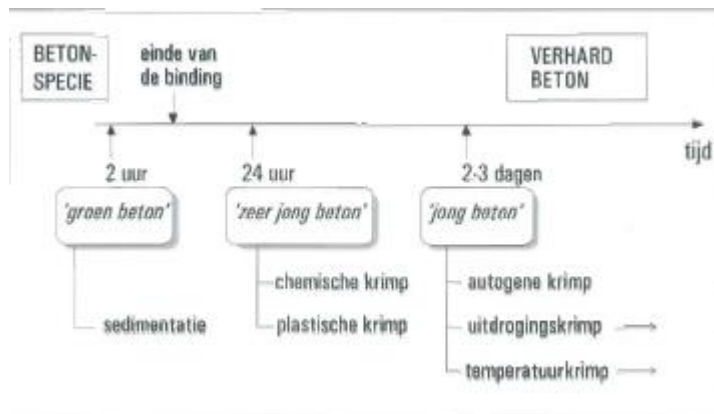
Het optreden van een scheurwijdte bij een gewapende betonnen balk is onvermijdelijk. Hierdoor is de controle van de scheurwijdte zeer belangrijk. Het is ook belangrijk voor het verkrijgen van een aanvaardbaar uiterlijk en ook voor de duurzaamheid op lange termijn van betonconstructies die zijn blootgesteld aan een agressieve omgeving. Om het gedrag van een scheur in een betonnen structuur te analyseren, is het belangrijk om de soorten scheuren te bekijken. Hierbij is het belangrijk dat de scheurpatronen in de betonnen structuur goed worden herkend en onderscheiden [6].

Wanneer het beton scheurt, is het de bedoeling dat de wapening in het beton de trekspanningen opvangt en de scheurwijdte beperkt. De vraag is of bij de correcte methode en berekening van de scheurvorming, de scheurwijdte zich zal beperken tot de waarde van de normen. Er zullen toch variaties ontstaan en deze worden verder besproken in de volgende hoofdstukken.

De soorten scheuren kunnen opgesplitst worden in [7]:

- Scheuren die ontstaan in het verse beton op jonge leeftijd, zoals de plastische krimp.
- Scheuren die na een bepaalde tijd ontstaan in het verharde beton zoals de uitdrogingskrimp en de autogene krimp op lange termijn.
- Scheuren die ontstaan na opgelegde belastingen.

De volgende figuur geeft het schematische overzicht van de soorten krimp die ontstaan door veranderingen in het vochttransport [8].



Figuur 1: Schematische voorstelling van de soorten krimp [8]

De betonspecie ontwikkelt zich in een tijdsinterval van circa twee uur van vloeibare naar thixotrope fase. Bij deze fase gaat de viscositeit afnemen door de tijd bij constante schuifspanning en wordt het beton, groen beton genoemd. Bij de volgende fase gaat de vloeibaarheid in een periode tot  $\pm 24$  uur afnemen samen met de vervormbaarheid en dit wordt zeer jong beton genoemd. Bij jong beton zal de sterkte stijgen. Na enkele dagen kan er pas gesproken worden over verhard beton [8].

In dit onderzoek wordt er gefocust op grotere scheuren die ontstaan op lange termijn. Dit omdat het onderzoek gericht is op de scheuren die na maanden tevoorschijn komen. Met

andere woorden zijn dat de scheuren die opgespoord worden na het verharden van beton. Tabel 1 geeft meer informatie over de type scheuren en de tijdstippen van het ontstaan.

*Tabel 1: Scheurrisico in functie van het type krimp [7, p. 4]*

Type krimp	Scheurrisico		Nut/doeltreffendheid van divers maatregelen		
	Tijdstip van verschijnen	Type scheuren	Beton-samenstelling	Nabe-handeling	Wapening
<b>Plastische krimp</b>	Voor of tijdens de binding	Oppervlakkig	Gering	Zeer groot	Geen
Krimp door (inwendige) droging d.w.z. opname van het aanmaakwater van het beton tijdens de verharding (autogene krimp), of verdamping uit het verharde beton (hydraulische krimp)					
Op korte termijn	Enkele dagen tot enkele weken na het betonneren	Oppervlakkige of over de volledige dikte	Zeer groot	Zeer groot	Matig
Op lange termijn	Enkele maanden tot enkele jaren na het storten	Over de volledige dikte	Zeer groot	Groot	Zeer groot
<b>Thermische krimp</b>	15 uur tot 10 dagen na storten	Oppervlakkig of over de volledige dikte	Groot	Zeer groot	Matig

Verder worden alleen de scheuren die op lange termijn ontstaan aangehaald en deze zijn volgens de bovenstaande tabel [7]:

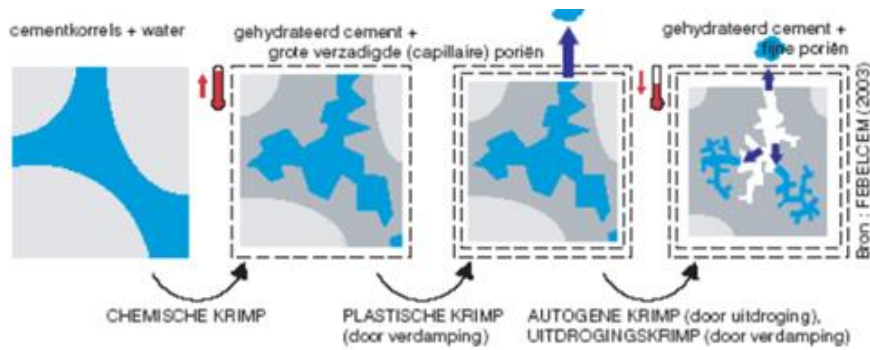
- De autogene krimp
- De hydraulische krimp
- De thermische krimp

### **2.1.2. Autogene betonkrimp**

De autogene krimp is een fysische krimp in de betonmassa, wordt ook wel de basiskrimp genoemd of soms aangeduid als krimp door interne uitdroging. Deze soort krimp ontstaat bij verdere hydratatie van het beton met lage W/C-factor ( $< 0,45$ ) en hoog cementgehalte. Het cement neemt grote waterhoeveelheden op, daardoor wordt het poriënsysteem leeggezogen en gevuld met lucht. Zo droogt het beton uit. Onderdruk in het poriënsysteem kan in dit geval leiden tot een merkbare uitwendige krimp en een volumevermindering van de cementsteen. Voor normale betonmengsels ( $W/C = 0,45$  en hoger) is de autogene krimp beperkt [9].

Deze vervorming zal zonder wateruitwisseling met de omgeving optreden. De vervorming zal groter zijn naarmate het beton een lager W/C-factor vertoont, wat op een grotere mechanische sterkte wijst [10].



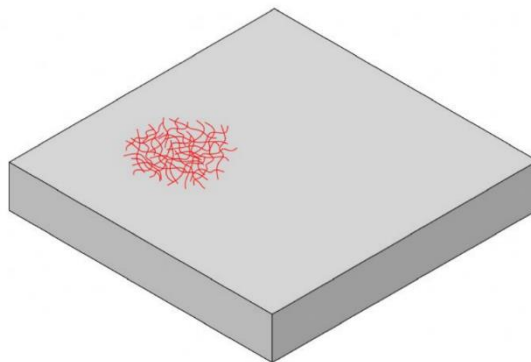


Figuur 2: Voornaamste types betonkrimp [4]

### 2.1.3. Hydraulische krimp

Deze soort krimp is het gevolg van het drogen op lange termijn van het beton en komt voor door een onevenwicht tussen het beton en zijn omgeving [7]. Wanneer de relatieve vochtigheid van de lucht kleiner is dan die van het beton (drogere omgeving) begint het droogproces met een volumevermindering tot gevolg. Bij deze verdamping die meerdere jaren kan duren, ontstaan spanningen die leiden tot vervormingen. De cementsteen (water en cement) krimpt. Deze soort krimp wordt ook de uitdrogingskrimp genoemd en is direct te zien aan het oppervlak. De poriënstructuur wordt fijner naargelang het beton ouder wordt. De fijnheid van structuur is afhankelijk van de W/C-factor. Hoe hoger de W/C-factor, hoe sneller de uitdroging zal gaan en hoe groter de krimp zal zijn. Hoe lager de relatieve vochtigheid van de lucht, hoe sneller het beton zal uitdrogen en hoe meer krimp zal ontstaan [2].

De eindwaarde voor de hydraulische krimp situeert zich tussen  $0,3$  en  $0,8 \frac{mm}{m}$  en de grootte is afhankelijk van de hoeveelheid aanmaakwater in het beton [7]. De onderstaande figuur 3 is een voorbeeld van een uitdrogingskrimp bij beton ten gevolge van verhinderde vervorming.

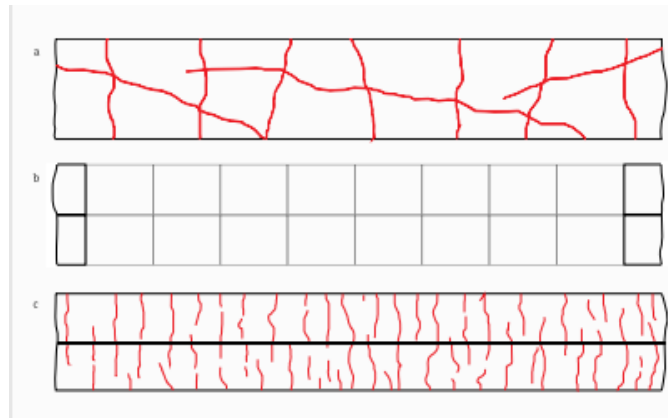


Figuur 3: Krimp door uitdroging [2]

Deze scheur kan beperkt worden door bepaalde voorzorgsmaatregelen te nemen en deze zijn zichtbaar op figuur 4 [7]:

- Krimpvoegen voorzien zodat de scheuren geconcentreerd blijven (b).
- Voldoende minimale wapening voorzien zodat de scheurvorming gespreid wordt en i.p.v. enkele openstaande scheuren microscheuren verschijnen (c).

- De situatie a is dan een betonconstructie waarbij de scheuren ongecontroleerd zijn.

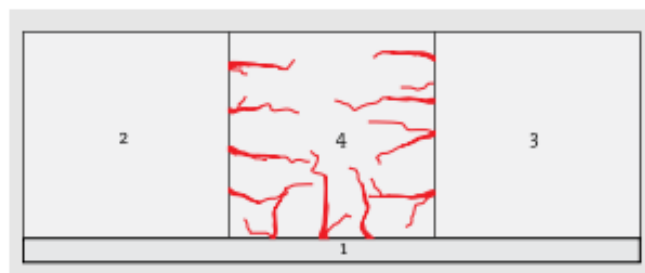


*Figuur 4: Soorten scheuren op betonconstructie [7, p. 12]*

### **2.1.4. Thermische krimp**

De thermische krimp op jonge leeftijd van beton is de oorzaak van de scheuren die later optreden in verhard beton wanneer deze gecombineerd wordt met de autogene krimp en de hydraulische krimp. Daarom is het belangrijk om te analyseren hoe de thermische krimp ontstaat.

De temperatuur in het beton dat wordt verhard stijgt, omdat er warmte vrijkomt bij de reactie van water en cement. De temperatuur kan ook stijgen doordat de omgevingstemperatuur stijgt. Hierdoor zal beton willen uitzetten en als dit niet mogelijk is, zullen drukspanningen optreden. Na een aantal dagen zal de warmte in beton afnemen. Nadien zal het beton afkoelen en willen krimpen. Wanneer deze krimp verhinderd wordt kan dit zorgen voor scheurvorming. Figuur 5 is een voorbeeld van hoe de thermische krimp kan ontstaan [2], [11].



*Figuur 5: Thermische krimp in jong beton [7, p. 19]*

Bij het betonneren van fase vier is de temperatuur in wand vier hoger dan die van de funderingsplaat één en de wanden twee en drie. Tijdens de verharding zal de temperatuur van wand vier stijgen, maar deze uitzetting wordt belemmerd door plaat één en de wanden twee en drie. Er ontstaan weinig spanningen en er is geen scheurvorming omdat wand vier niet echt stijf is. Wanneer wand vier afkoelt, wilt hij samentrekken en deze wordt verhinderd door plaat één en de wanden twee en drie. Dit verhoogt het scheurrisico omdat het beton alvast stijf is terwijl het weinig treksterkte heeft [7].

De thermische krimp kan berekend worden met de volgende formule en de thermische uitzettingscoëfficiënt varieert voor verhard beton van 7 tot  $14 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  [7]:

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T$$

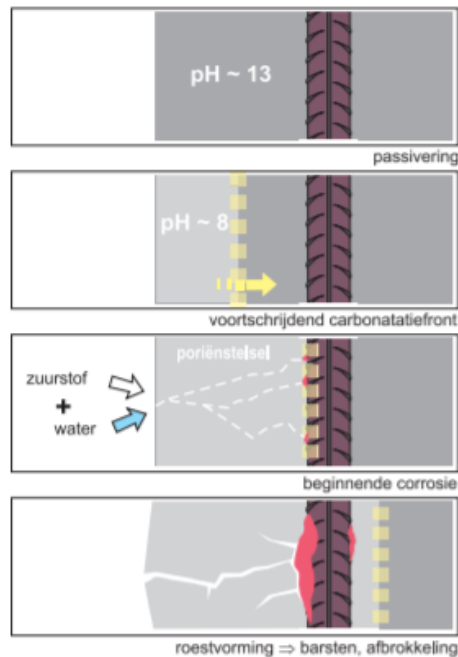
- $\alpha$  = thermische uitzettingscoëfficiënt van het beton
- $\Delta T$  = temperatuurverschil

Elk temperatuurverschil ten opzichte van het verharde beton kan aanleiding geven tot een vervorming van het materiaal. Het kan gaan over een temperaturdaling of -stijging door de omgevingsvoorwaarden. Dit temperatuurverschil kan voorkomen door de toenemende verandering van de omgevingstemperatuur (over een dag of een jaar) of differentieel doorheen het betonelement (een element met een andere temperatuur dan de temperatuur van de buitenomgeving) [10].

### **2.1.5. Corrosie**

Zoals de uitdrogingskrimp, de autogene krimp en de thermische krimp heeft corrosie van wapening een belangrijke invloed op scheurvorming. Voor corrosie zijn drie componenten nodig: ijzer, lucht en water. Beton heeft een zeer alkalisch milieu (basisch, pH hoger dan twaalf) waardoor een passiveringslaag wordt gevormd rond de wapeningsstaven. Deze passiveringslaag beschermt de wapening tegen corrosie. Door het reageren van de kooldioxide uit de lucht met de alkalische (basische) bestanddelen van het beton wordt calciumcarbonaat gevormd. Dit wordt carbonatatie genoemd. De betondekking carboniseert omwille van de gaten, scheurtjes of beschadigingen in het beton. Door de carbonatatie daalt de pH-waarde onder negen, waarbij de passiveringslaag verloren gaat en de wapening niet meer wordt beschermd. Het water zal nodig zijn voor het transport van de ionen. De wapening zal op termijn corroderen en er zal een volumevermeerdering optreden omdat er roest gevormd wordt dat een groter volume heeft dan de oorspronkelijke wapening. Uiteindelijk zal dat gevolgd worden door scheurvorming (zie figuur 6). Wanneer het roesten van de wapening lang genoeg aanhoudt, zal het niet aangetaste deel van de wapeningsstaal te dun worden en zijn constructieve waarde verliezen [2], [5], [12].

De bedoeling van een betondekking is dat deze de wapening voldoende beschermt tegen het indringen van koolstofdioxide en chloriden. Anders zal na bepaalde tijd de wapening corroderen waarbij een volumevermeerdering zal optreden en tot gevolg een scheurvorming. Om dit te voorkomen moet het juiste milieu- of omgevingsklasse gekozen worden [2]. De volgende figuur is een voorbeeld van corrosie door carbonatatie.



Figuur 6: Corrosie ingeleid voor carbonatie [12, p. 5]

## 2.2. Scheurbeheersing in beton

### 2.2.1. Algemeen

Een scheur is een barst of naad in beton die door verschillende oorzaken kan ontstaan [13]. De scheurwijdte of de scheurbreedte is de afstand tussen de wanden van de scheur gemeten op het betonoppervlak. Een scheur in het beton gaat van zeer small (0,01 mm) tot breed (0,5 mm) aan de oppervlakte van het beton en wordt de oppervlaktescheurwijdte genoemd. Wanneer de betontreksterkte van beton wordt overschreden ontstaan scheuren in de trekzone. Het beton zal scheuren en de trekbelasting wordt opgenomen door de wapening. Als de wapening in het beton juist gedimensioneerd is, zullen de scheuren zich gelijkmatig verdelen over de totale betonoppervlakte. De scheurwijdte zal ook beperkt blijven [14].

Daarnaast worden de structurele prestaties zoals stijfheid, energieabsorptie, capaciteit en ductiliteit van gewapende betonconstructies ook beïnvloed door scheuren. Daarom is de interesse in scheurbeheersing sterk toegenomen, het is even belangrijk als de regeling van de afbuiging in gewapend beton. Scheurvorming is een complex proces met veel parameters zoals gemiddelde scheurafstand, diameter van de wapening, dikte van de betondekking, betonkwaliteit en wapeningsverhouding [6]. Wanneer de scheuren en de scheurpatronen duidelijk zijn, worden deze opgemeten met verschillende meetmethoden. Deze worden vermeld in paragraaf 2.6 [14].

Er zijn benaderende formules voor de scheurwijdte en scheurafstand in de Eurocode terug te vinden. Vanwege de ingewikkeldheid van het probleem, zijn in het verleden een aantal methoden ontwikkeld om de breedte en de afstanden van de scheuren te schatten. Deze methoden zijn gedeeltelijk gebaseerd op theoretische voorspelling en gedeeltelijk op testresultaten [6].

De algemene beschouwing van de scheurwijdte in de Eurocode 2 ziet er als volgt uit [15]:

- Scheurvorming moet zijn beperkt tot een omvang die het goed functioneren of de duurzaamheid van de constructie niet nadelig beïnvloedt en die niet tot een onaanvaardbaar uiterlijk leidt.
- De scheurvorming is normaal voor in gewapende betonconstructies die ten gevolge van directe of verhinderde belasting op opgelegde vervormingen op buiging, dwarskracht, wrijving of trek worden belast.
- De berekende oppervlaktescheurwijdte,  $w_{max}$ , moet beperkt worden, rekening houdend met de voorziene functie, de aard van de constructie en met de kosten van het beperken van de scheurvorming.

### 2.2.2. Minimale wapening

Voor de beheersing van de scheurvorming in gebieden waar trekspanning te verwachten is, is er een minimale hoeveelheid hechtende wapening nodig. De berekening van de minimale wapening voor de beheersing van de scheuropeningen in de Eurocode 2 deel 1 gebeurt als volgt [15]:

$$A_{s,min} = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot \frac{A_{ct}}{\sigma_s} \quad [15, p. 128]$$

- $A_{s,min}$ : Minimum wapening te plaatsen in de trekzone
- $\sigma_s$ : De absolute waarde van de maximale toelaatbare spanning in de wapening onmiddellijk na het ontstaan van de scheur.
- $k_c$ : Een coëfficiënt die rekening houdt met de spanningsverdeling binnen de doorsnede onmiddellijk voor het scheuren.
  - Voor zuivere trek = 1
  - Buiging = 0.4
- $k$ : Coëfficiënt die rekening houdt met het effect van niet-gelijkmatige eigenspanningen, die leiden tot een reductie van de krachten ten gevolge van de verhinderde vervormingen.
  - $h \leq 300$  mm       $k = 1.0$
  - $300 < h < 800$        $k = 1.21 - 0.7 * \frac{h}{1000}$
  - $h \geq 800$        $k = 0.65$
- $f_{ct,eff}$ :  $0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$
- $A_{ct}$ : Getrokken zone net voor het scheuren

De minimale wapening voor vermijden van brosse breuk en grote scheuren wordt als volgt berekend:

$$A_{s,min} = 0.26 * f_{ctm} * \frac{b_t}{f_{yk}} \quad [15, p. 128]$$

### 2.2.3. Scheurbeheersing zonder directe berekening

Zonder een directe berekening van de scheurwijdte te maken kan de scheurwijdte berekend worden door de tabellen te gebruiken die in Eurocode 2 deel 1 weergegeven zijn. Afhankelijk van de staalspanning en staafdiameters kan de scheurwijdte worden bepaald. Tabel 2 geeft de maximale staafdiameter weer en tabel 3 de maximale staafafstand bij een gegeven staalspanning en scheurwijdte [15].

Tabel 2: Maximale staafdiameters voor scheurbeheersing [15, p. 131]

Staalspanning <sup>2</sup> (MPa)	Maximale staafdiameter (mm)		
	w <sub>k</sub> = 0,4 mm	w <sub>k</sub> = 0,3 mm	w <sub>k</sub> = 0,2 mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

Opmerking 1: De waarden in de tabel zijn gebaseerd op de volgende aannamen: c = 25 mm; f<sub>ct,eff</sub> = 2,9 MPa; h<sub>cr</sub> = 0,5; (h-d) = 0,1 \* h; k<sub>c</sub> = 0,5; k = 1,0; k<sub>t</sub> = 0,4 en k' = 1,0.

Opmerking 2: Onder de van toepassing zijnde belastingscombinaties.

Tabel 3: Maximale staafafstand voor scheurbeperving [15, p. 132]

Staalspanning (MPa)	Maximale staafafstand (mm)		
	w <sub>k</sub> = 0,4 mm	w <sub>k</sub> = 0,3 mm	w <sub>k</sub> = 0,2 mm
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

Voor de opmerkingen zie tabel 7.2 N

De maximale staafdiameter wordt aangepast door een correctie toe te passen op de diameter. Deze wordt voor buiging als volgt gedaan:

$$\phi_s = \phi'_s * \frac{f_{ct,eff}}{2.9} * \frac{k_c * h_{cr}}{2 * (h-d)} \quad [15, p. 132]$$

En voor de centrische axiale trek:

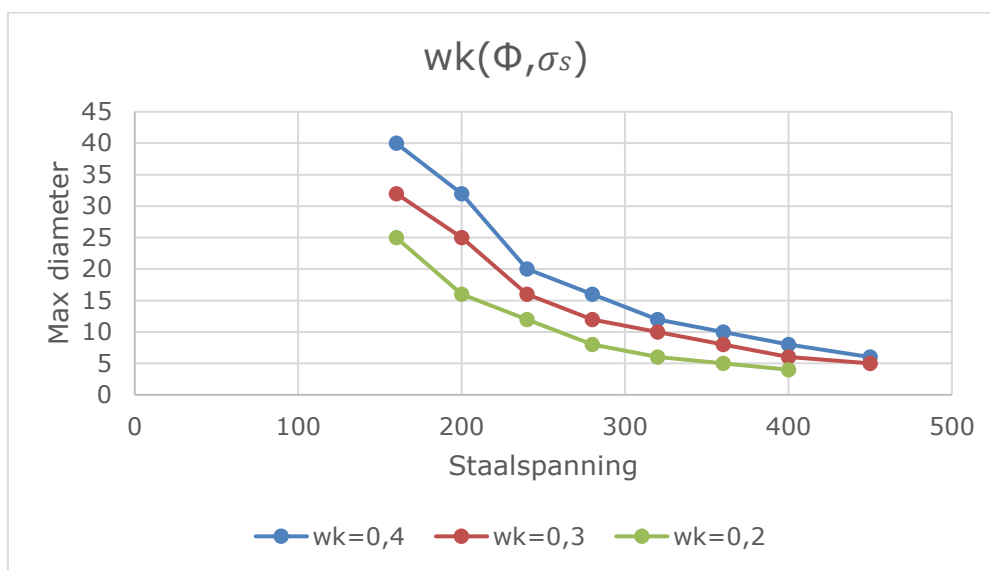
$$\phi_s = \phi'_s * \frac{f_{ct,eff}}{2.9} * \frac{h_{cr}}{8 * (h-d)} \quad [15, p. 132]$$

- $\phi_s$ : De aangepaste maximumstaafdiameter
- $\phi'_s$ : De maximumstaafdiameter gegeven in tabel 3
- $h$ : De totale hoogte van de doorsnede
- $h_{cr}$ : De hoogte van de trekzone onmiddellijk voor het scheuren, rekening houdend met de karakteristieke waarden van de voorspanning en de normaalkracht onder quasi-blijvende belastingscombinatie.
- $d$ : De meerwerkende hoogte betrokken op het zwaartepunt van de buitenste wapeningslaag.

Er moet aandacht besteed worden aan specifieke risico's voor het optreden van grote scheuren in doorsneden waarin plotselinge spanningsveranderingen optreden, zoals [15]:

- Verandering dwarsdoorsnede
- Dichtbij geconcentreerde belastingen
- Plaatsen waar staven zijn beëindigd
- Gebieden met hoge aanhechtspanning, aan het einde van de overlappingslassen

Bij zulke situaties moet zorg besteed worden om waar mogelijke spanningsveranderingen te minimaliseren. De volgende grafiek geeft samenhang van de scheurwijdte in functie van de maximale staafdiameter en de staalspanning.



Figuur 7: Grafiek scheurwijdte in functie van maximale diameter en de staalspanning

#### 2.2.4. Scheurwijdte bij uitwendig belasting

De scheurwijdte  $W_k$  mag volgens Eurocode 2 berekend worden met de formule [15]:

$$W_k = S_{r,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad [15, p. 133]$$

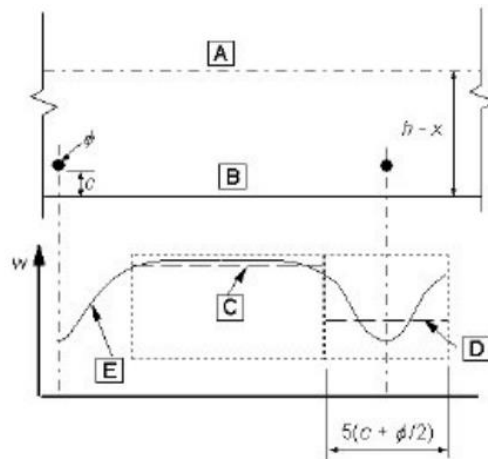
- $S_{r,max}$ : Maximale scheurafstand
- $\varepsilon_{sm}$ : De gemiddelde rek in de wapening onder de van toepassing zijnde belastingscombinatie
- $\varepsilon_{cm}$ : De gemiddelde betonrek tussen de scheuren

De eerste factor voor het berekenen van de scheurwijdte  $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$  wordt berekend met behulp van de volgende formule [15]:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad [15, p. 133]$$

- $\sigma_s$ : De spanning in de trekwapening, uitgaande van een gescheurde doorsneden
- $\alpha_e$ : De verhouding  $\frac{E_s}{E_{cm}}$
- $k_t$ : 0,6 voor kortdurende belasting
- $k_t$ : 0,4 voor langdurende belasting
- $\rho_{p,eff}$ : De verhouding  $\frac{A_s}{A_{c,eff}}$
- $f_{ct,eff}$ :  $0,3 * f_{ck}^{2/3}$

De scheurwijdte berekening is niet geldig indien beton niet gescheurd is. Het beton is gescheurd indien de betontrekspanning gelijk is aan  $f_{ctm}$ . Waarbij  $f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{2/3}$  [15, p. 133].



Figuur 8: Scheurwijdte aan oppervlak beton [15, p. 134]

Op de bovenstaande figuur is de scheurwijdte aan het oppervlak van het beton weergegeven. Deze staat in relatie tot de afstand tot de wapeningsstaaf. Op de figuur zijn de volgende elementen aangeduid [15]:

- A: De neutrale as
- B: Betonoppervlak aan de trekzijde
- C: Scheurafstand voorspeld door formule:  $S_{r,max} = 1,3 * (h - x)$
- D: Scheurafstand voorspeld door formule:  $S_{r,max} = \frac{k_3 * c + (k_1 * k_2 * k_4 * \phi)}{\rho_{p,eff}}$
- E: Werkelijke scheurwijdte



De tweede factor voor de scheurwijdte is  $S_{r,max}$  en wordt met de volgende formule berekend [15]:

$$S_{r,max} = \max \left( \frac{k_3 * c + (k_1 * k_2 * k_4 * \phi)}{\rho_{p,eff}}; 1,3 * (h - x) \right) [15, p. 134]$$

- $\phi$  : Staafdiameter van de wapening
- $c$  : Betondekking op de langswapening
- $k_1$  : Coëfficiënt die rekening houdt met de aanhechtingeigenschappen van de hechtende wapening. Deze heeft een waarde van 0,8 voor staven met een hoge aanhechting en een waarde van 1,6 voor staven met een feitelijk glad oppervlak.
- $k_2$  : Coëfficiënt die rekening houdt met de rekverdeling. Deze heeft een waarde van 0,5 bij buiging en 1,0 bij zuivere trek.
- $k_3$  : Deze waarde is afhankelijk van het land en wordt gevonden in de nationale bijlage. Voor België heeft deze een waarde van 3,4.
- $k_4$  : Deze waarde is afhankelijk van het land en wordt gevonden in de nationale bijlage. Voor België heeft deze een waarde van 0,425.
- $\rho_{p,eff}$  : De verhouding  $\frac{A_s}{A_{c,eff}}$
- $h$  : De hoogte
- $x$  : Betondrukhoogte

### 2.2.5. **Rekenen en spanningen t.g.v. verhinderde opgelegde vervormingen**

De berekening van de vervorming op een willekeurige hoogte van een niet gescheurde betondoorsnede kan volgens de Eurocode 2 deel 3, bijlage L als volgt worden berekend:

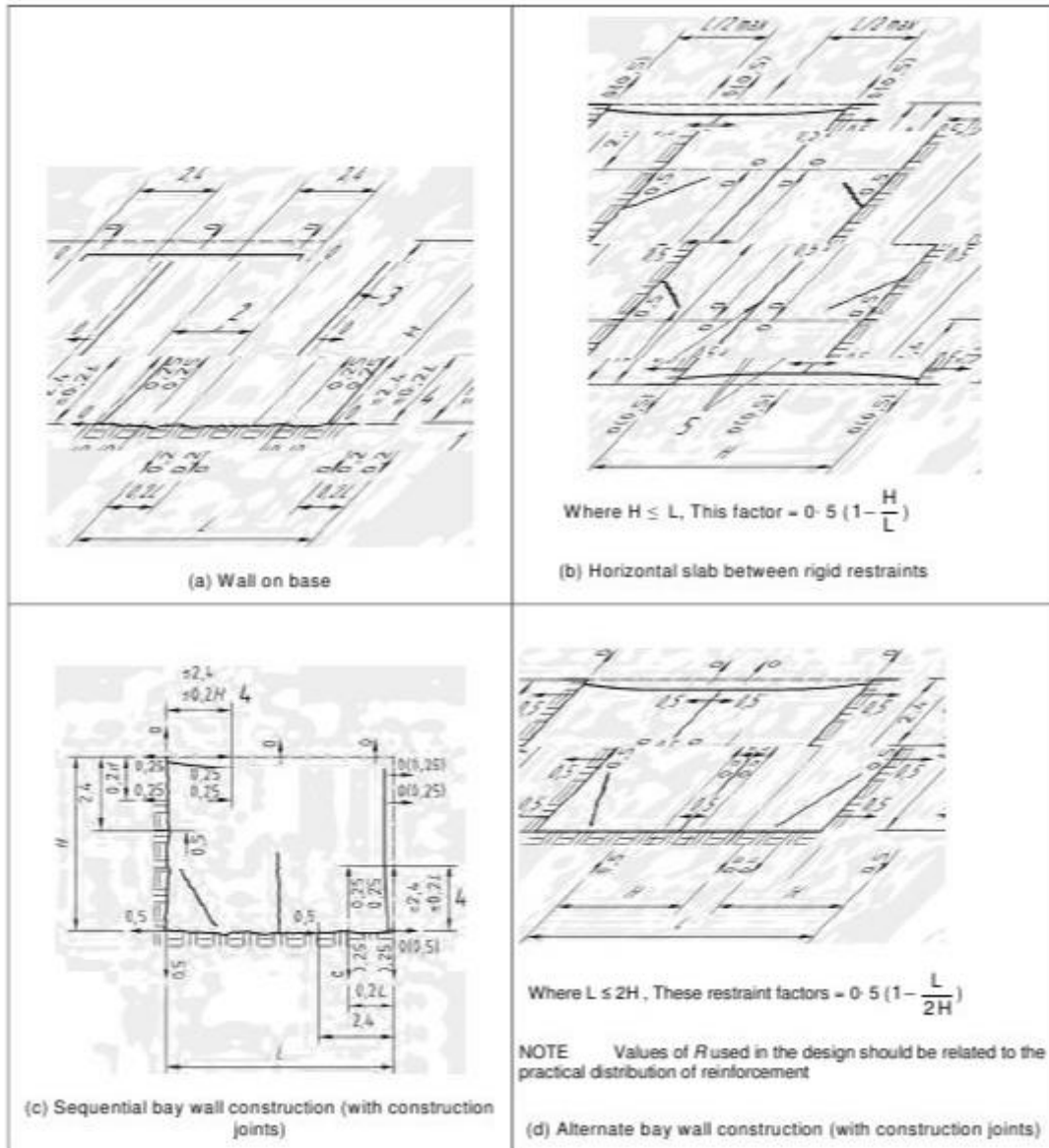
$$\varepsilon_{az} = (1 - R_{ax}) * \varepsilon_{iav} + (1 - R_m) * \left(\frac{1}{r}\right) * (z - \zeta) [16, p. 18]$$

Daarna wordt de spanning in het beton berekend met de volgende formule:

$$\sigma_z = E_{c,eff} * (\varepsilon_{iz} - \varepsilon_{az}) [16, p. 18]$$

- $R_{ax}$ : Factor voor uitwendige axiale vervormingsverhindering geleverd door elementen verbonden met het beschouwde element.
- $R_m$ : Factor voor bepaling van de graad van de van rotatieverhindering, in meeste gevallen is deze 1,0.
- $E_{c,eff}$ : Effectieve elasticiteitsmodulus van het beton
- $\varepsilon_{iav}$ : Gemiddelde opgelegde vervorming
- $\varepsilon_{iz}$ : Opgelegde rek op niveau  $z$
- $\varepsilon_{az}$ : Werkelijke rek op niveau  $z$
- $z$ : Coördinaat van de sectie
- $\zeta$ : Coördinaat van het zwaartepunt van de sectie
- $\frac{1}{r}$ : De kromming

De verhinderingsfactoren kunnen worden berekend op basis van kennis van de stijfheid van het beschouwde element en de delen die eraan gekoppeld zijn. De praktische axiale verhinderingsfactoren voor veel komende situaties wordt gehaald uit de volgende figuur en tabel. In meeste gevallen zal er geen significante kromming ontstaan en de momentverhinderingsfactor zal gelijk zijn aan 1,0 [16].



Figuur 9: Verhinderingsfactoren voor typische situaties [16, p. 19]

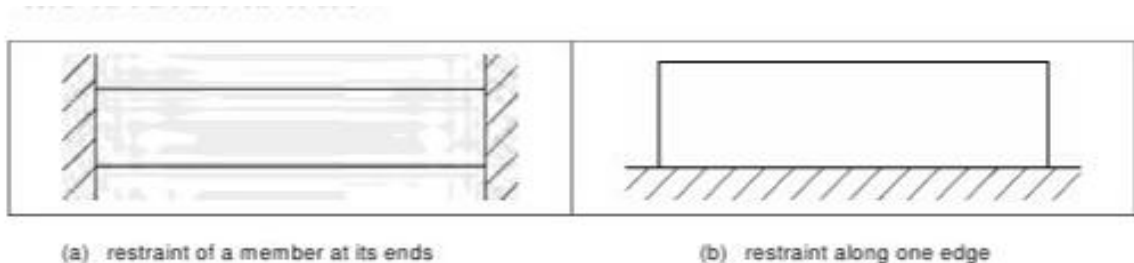
- 1: Verticale verhinderingsfactoren
- 2: Horizontale verhinderingsfactoren
- 3: Uitzettingsvoegen of vrije krimpvoegen
- 4: De grootste van de twee waarden
- 5: Mogelijke primaire scheuren

Tabel 4: Verhinderingsfactoren centrale delen van de wanden op figuur 9 [16, p. 19]

Ratio L/H (see fig L.1)	Restraint factor at base	Restraint factor at top
1	0,5	0
2	0,5	0
3	0,5	0,05
4	0,5	0,3
>8	0,5	0,5

### 2.2.6. Scheurwijdte door verhindingering van opgelegde vervormingen

De vormen ten gevolge van de opgelegde verhinderde vervormingen in dit deel zijn afkomstig van krimp en de vroege thermische bewegingen als gevolg van de afkoeling van de onderdelen tijdens de dagen onmiddellijk na het storten van beton [16].



Figuur 10: Types van verhindingering [16, p. 21]

Er kunnen twee praktische basisproblemen worden aangehaald zie de bovenstaande figuren [16].

- Figuur 10a: Vervormingsverhindingering van de doorsnede aan zijn uiteinden. Het treedt op wanneer nieuw betondeel wordt gestort tussen twee reeds bestaande delen [16].
- Figuur 10b: Vervormingsverhindingering van de doorsnede langsheen een rand. Het is in het bijzonder gebruikelijk en ontstaat wanneer een wand wordt gestort op een reeds bestaande stijve vloerplaat [16].

#### 2.2.6.1. Verhindingering van sectie aan uiteinde

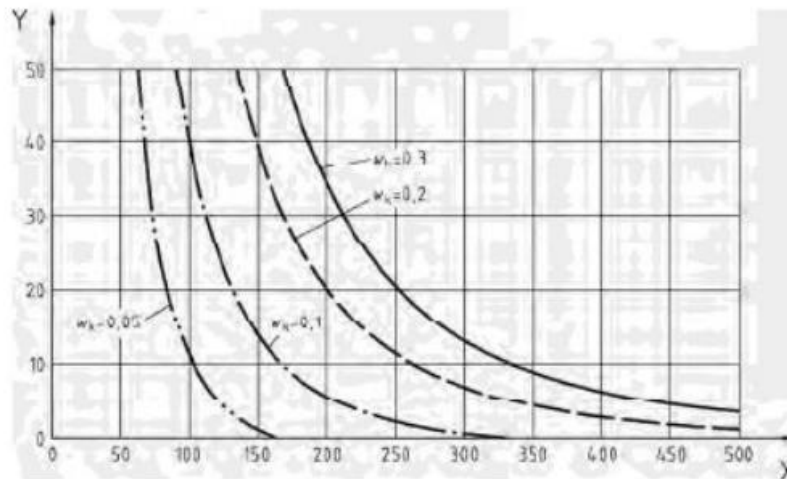
De verhindingering van de sectie aan het uiteinde wordt volgens de Eurocode 2, deel 3 en bijlage M berekend [16]:

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{0.5 * \alpha_c * k_c * k * f_{ct,eff} * \left(1 + \frac{1}{\alpha_c * \rho}\right)}{E_s} \quad [16, p. 21]$$

- $E_s$ : Elasticiteitsmodulus van de staal
- $k_c$ : Een coëfficiënt die rekening houdt met de spanningsverdeling binnen de doorsnede onmiddellijk voor het scheuren.
  - Voor zuivere trek = 1
  - Buiging = 0.4
- $k$ : Coëfficiënt die rekening houdt met het effect van niet-gelijkmatige eigenspanningen, die leiden tot een reductie van de krachten ten gevolge van de verhinderde vervormingen.
  - $h \leq 300$  mm       $k = 1.0$
  - $300 < h < 800$        $k = 1.21 - 0.7 * \frac{h}{1000}$
  - $h \geq 800$        $k = 0.65$
- $f_{ct,eff}$ :  $0,3 * f_{ck}^{2/3}$
- $\rho$ : De verhouding  $\frac{A_s}{A_c}$

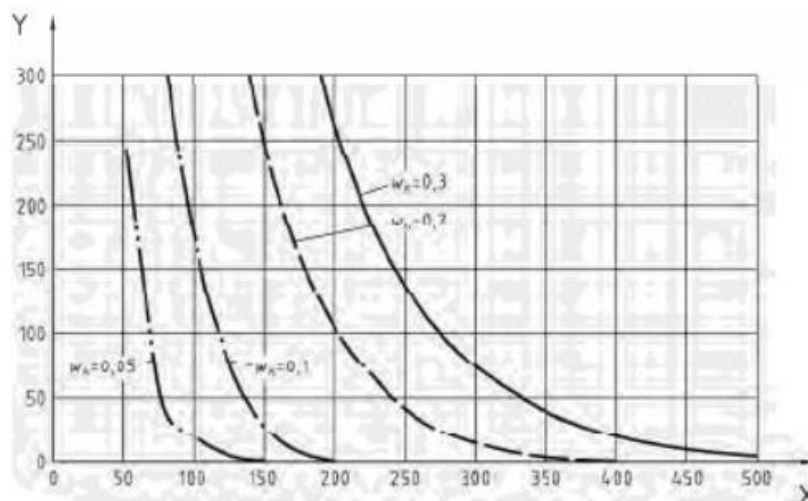
Om de scheurwijdte te controleren zonder directe berekeningen wordt de volgende formule gebruikt, waarbij gebruik gemaakt wordt van figuur 11 en 12 om een geschikte wapeningschikking te verkrijgen [16].

$$\sigma_s = \frac{k_c * k * f_{ct,eff}}{\rho} \quad [16, p. 21]$$



*Figuur 11: Maximale diameters voor scheurwijdtebeheersing aan axiale trek [16, p. 13]*

De y-as geeft de maximale staafdiameters in mm weer en de x-as geeft de staalspanning weer in N/mm<sup>2</sup> [16].



*Figuur 12: Maximale staafafstand voor scheurbeperving aan axiale trek [16, p. 13]*

De y-as geeft de maximale staafafstand tussen de wapeningen in mm weer en de x-as geeft de staalspanning weer in N/mm<sup>2</sup> [16].

### 2.2.6.2. Verhinderig van sectie langsheen een rand

In dit geval zal de vorming van de scheur alleen invloed hebben op de verdeling van de spanningen en de scheurwijdte is in functie van de beperkte spanning in plaats van de trekkrachtcapaciteit van het beton [16].

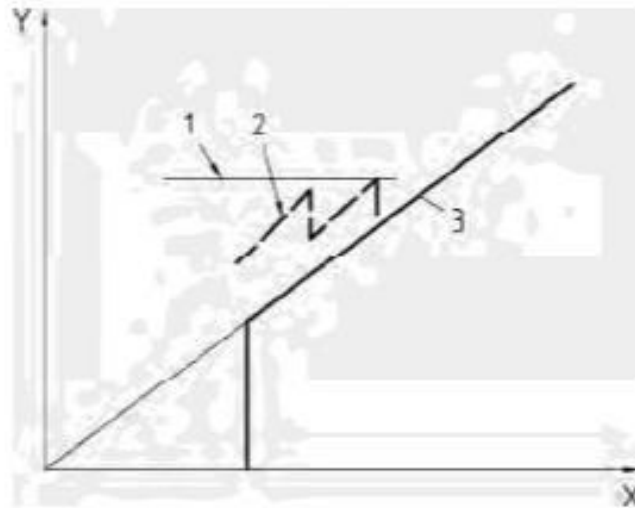
De factor  $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$  wordt berekend met behulp van de volgende formule:

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = R_{ax} * \varepsilon_{free} \text{ [16, p. 22]}$$

- $R_{ax}$  : Factor voor uitwendige axiale vervormingsverhinderig
- $\varepsilon_{free}$  : Vervorming die zou optreden als het element vrij zou kunnen vervormen

De volgende figuur illustreert het verschil tussen beide situaties. De relatie tussen de scheurbreedte en de opgelegde vervormingen wordt weergegeven voor de rand en aan het uiteinde bevestigde wanden. De y- as geeft de scheurwijdte weer en de x-as de opgelegde vervorming [16].

- 1: Formule bij geval verhinderig aan uiteinden
- 2: Scheurvorming ten gevolge van vervormingsverhinderig aan uiteinden
- 3: Scheurvorming ten gevolge van vervormingsverhinderig langs de rand



Figuur 13: Relatie tussen beide situaties [16, p. 22]

## 2.2.7. Maximale scheurwijdte

Tabel 5: Aanbevolen waarden van  $W_{max}$  (mm) [15, p. 127]

Milieuklasse	Gewapende en voorgespannen elementen met voorspanning zonder aanhechting	Voorgespannen element met voorspanning met aanhechting
	Quasi-blijvende belastingscombinatie	Vaak voorkomende belastingscombinatie
<b>X0, XC1</b>	0,4 <sup>1</sup>	0,2
<b>XC2, XC3, XC4</b>	0,3	0,2 <sup>2</sup>
<b>XD1, XD2, XS1, XS2, XS3</b>		Decompressie

Opmerking 1: Voor de milieuklassen X0 en XC1 heeft de scheurwijdte geen invloed op de duurzaamheid, deze grens is gesteld om een acceptabel uiterlijk te verzekeren. Bij afwezigheid van voorwaarden ten aanzien van het uiterlijk mag deze beperking zijn afgezwakt.

Opmerking 2: voor deze milieuklassen behoort, aanvullend, decompressie onder de quasi-blijvende belastingscombinatie te zijn gecontroleerd.

De bovenstaande tabel 5 geeft de theoretische maximale scheurwijdte weer volgens de EN 1992-1-1: 2005 die in dit onderzoek als designwaarden gebruikt worden om de berekeningen uit te voeren. Voor de verschillende milieuklassen zijn de bijhorende maximale scheurwijdtes in de tabel af te lezen. Voor de meest gebruikelijke omgevingsklassen voor gewapend beton wordt de waarde 0,30 mm aanbevolen. Deze keuze toont aan dat de scheuren met kleine openingen geen enkele invloed hebben op de duurzaamheid van de betonconstructie. Dit wil zeggen dat de invloed van de scheurwijdtes (< 0,40 mm) op de corrosie van de wapening nagenoeg verwaarloosbaar is op voorwaarde dat de betondekking voldoende groot is. Bij scheuren met grotere openingen kunnen natuurlijk problemen ontstaan [10].

## 2.3. Vloeistofdichtheid in beton

### 2.3.1. Algemeen vloeistofdichtheid

Bij vloeistofdichte constructies zijn er geen scheuren toegelaten. Omdat de constructies geen lekken mogen hebben. Door de scheuren die zich toch voordoen in de constructies worden de vloeistofdichtheidsklassen opgesteld. Deze klassen maken gebruik van de scheurwijdte om te kijken welke grootte van scheuren in de constructie mogen zijn.

Een constructie waarvan het beton alleen vloeistofdicht is volstaat niet, de hele constructie moet waterdicht zijn om van een waterdichte betonconstructie te spreken. Dit betekent dat zowel de voegen, de scheuren als het beton waterdicht moeten zijn. Dit wordt toegepast op twee manieren: een constructie die verhindert dat er vloeistoffen wegvloeien of één die verhindert dat er vloeistoffen binnendringen. Bij de eerste manier wordt de constructie meestal uitgegraven. De delen die zich onder de grondwaterlaag bevinden of waar permanent vloeistofdruk op wordt uitgevoerd worden uitgegraven. Voorbeelden hiervan zijn een kelder, een tunnel en grondkerende muren. Hierbij moet er rekening worden gehouden dat het waterniveau in de grond kan stijgen en dat er sommige delen daardoor onder water komen te staan [10].

Als tweede moet er worden vermeden dat er water uit de constructie ontsnapt. Voorbeelden hiervan zijn een zwembad, een zuiveringsstation en sluizen. Hierbij wordt er water opgeslagen maar beton kan ook gebruikt worden om andere vloeistoffen op te slaan, bijvoorbeeld brandstoffen. Meestal moet het bouwwerk in drie dimensies ondoordringbaar zijn maar in sommige gevallen kan het zijn dat één dimensie genoeg is. Hierbij is meestal het horizontaal vlak vloeistofdicht. Dit is meestal voor milieuoverwegingen zodat stoffen die gevaarlijk zijn voor het milieu niet in de grond kunnen dringen. Om aan de eisen van vloeistofdichtheid te voldoen moet er aan bepaalde criteria worden voldaan, deze zijn afhankelijk van de uiteindelijk bestemming van de constructie en de gevolgen van een lekkage. Deze lekken kunnen vier mogelijke oorzaken hebben [10]:

- Door scheuren in het beton
- Het gebruik van een permeabel of poreus beton
- De voegen van het bouwwerk
- Openingen in het bouwwerk of doorvoering van kabels en andere leidingen

Het is dan ook vanzelfsprekend dat als er voegen worden voorzien om scheuren te voorkomen, er extra punten worden gemaakt waar lekkages kunnen voorkomen [10].

Natuurlijk kan er een vloeistofdicht constructie worden gebouwd maar hoe kan deze nu bewaard blijven? Dit kan aan de hand van drie manieren. De eerste is door gebruik te maken van gewapend beton. Als tweede door het toepassen van een bekleding, een bepleistering of een ondoordringbaar makende oppervlaktebehandeling. Deze kunnen soepel of stijf zijn. Als laatste door het voorzien van een dubbele-envelopsysteem. Hierbij wordt niet enkel het beton waterdicht gemaakt maar de hele constructie met inbegrip van de scheuren en de voegen. Dit zorgt voor extra zwakke plekken in de constructie [10].

### **2.3.2. Belastingen op vloeistofdichte constructies**

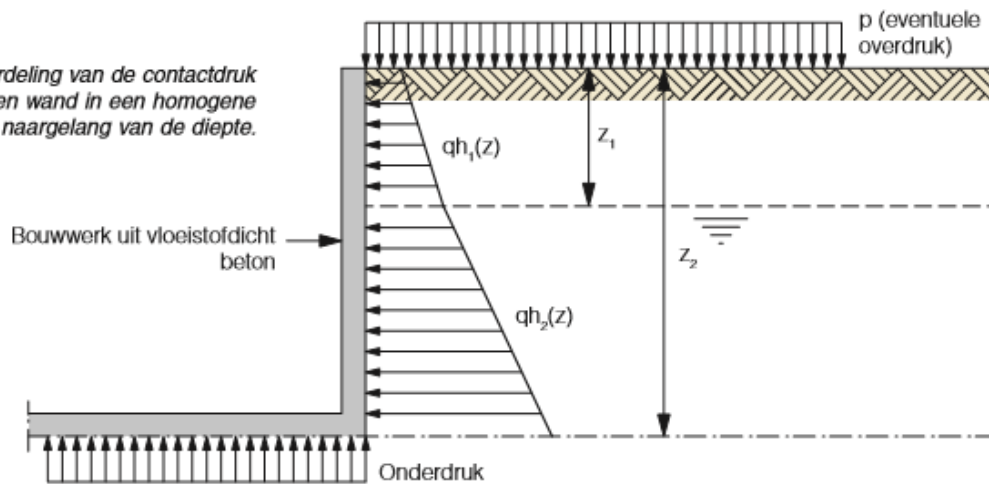
Deze betonconstructies worden blootgesteld aan talloze gelijktijdig optredende belastingen die zowel van binnenuit als van buitenaf kunnen aangrijpen en hierdoor kunnen vervormen met scheuren als gevolg [10].

#### *2.3.2.1. Druk op de bodem*

Op de bodem kan zowel druk worden uitgeoefend door de vloeistoffen als door de onderliggende grond. Elke soort vloeistof of verpoederd materiaal die in contact komt met de constructie oefent een contactdruk uit met de constructie en zorgt voor inwendige druk. Een voorbeeld van de berekening is de berekening op een buffervat. Als deze niet in contact komt met de grond kan de vloeistofdruk als volgt berekend worden:  $q_w = \gamma_l * z$ . Hierbij is  $\gamma_l$  het volumegewicht van de vloeistof in kilonewton per kubieke meter en  $z$  de hoogte ten opzichte van de voet van het bouwwerk in meter [10].

Als voorbeeld van hoe de gronddruk verloopt is hieronder te zien op figuur 16. Dit is voor een homogene bodem en is afhankelijk naargelang de diepte van de constructie. Indien er op het bouwwerk grondwaterdruk staat moet er een stabiliseringssysteem worden voorzien. Dit wordt onder de vloerplaat voorzien om de drukopbouw tegen te gaan. Deze druk is aangeduid als onderdruk op de tekening [10].

Afb. 4 Verdeling van de contactdruk tegen een wand in een homogene bodem, naargelang van de diepte.



Figuur 14: Verdeling van de contactdruk tegen een wand [10, p. 20]

De onderstaande tabel geeft de mogelijke belastingen weer op buffervaten. Hierbij wordt er een onderscheid gemaakt tussen vers beton en hard beton. Daarbij wordt er weer gegeven wat de invloed is van de verschillende oorzaken zoals krimp en zetting [10].

Tabel 6: Mogelijke belastingen op bouwwerken volgens Favre [10, p. 19]

Oorsprong	Verschijningsfase	Belastingstype dat aanleiding kan geven tot scheurvorming		Doeltreffendheid van de maatregelen ter preventie van scheurvorming (*)		
				Beton-samenstelling	Nabehandeling	Nut van wapening en andere methoden
Van fysische-chemische oorsprong	Verse Beton	Krimp	Uitdrogingskrimp in de plastische fase	xx	xxx	-
			Autogene krimp	xxx	-	-
		Zetting (bv. Onder de wapening)		x	-	Geschikte stortsnelheid, fasering en verdichting
		Extreme temperaturen (T < 0°C of T > 30°C)		xx	xxx	-
	Verhard beton	Intrinsieke opgelegde vervorming	Thermische krimp op jonge leeftijd	xxx	xx	Niet nuttig voor de intrinsieke krimp, maar wel voor de scheurvorming
			Uitdrogingskrimp	xxx	xx	
			Autogene krimp	xxx	-	
		Extrinsieke opgelegde vervormingen	Thermische vervorming (klimatologische belastingen)	x	-	Ja
		Corrosie van de wapening		xxx	xx	Toereikende betondekking
		Chemisch reactie (alkali-silicareactie, sulfaten,...)		xxx	xx	Alkalibalans, gebruik van HRS-cement (LA)
Van mechanische oorsprong	Verhard beton	Vorst-dooicycli	xxx	xx	Luchtbelvormers	
		Extrinsieke opgelegde vervormingen	Differentiële zetting van de fundering	x	-	Ja



		Permanente belastingen	Druk van de bodem, eigengewicht,..	x	-	Ja
		Belastingen van buitenaf en opgelegde belastingen	Vloeistofdruk, andere opgelegde belastingen, sneeuw, wind, verkeer,...	x	-	Ja
(*) X = beperkte invloed		XX = gemiddelde invloed		XXX = belangrijke invloed		

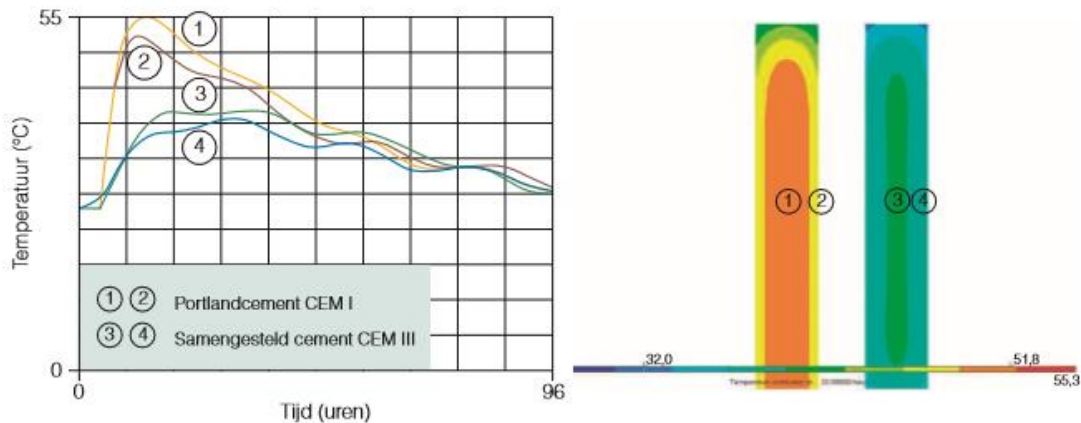
### 2.3.2.2. Opgelegde vervormingen

Aan beton worden bepaalde vervormingen opgelegd. Zodanig dat hiermee rekening kan gehouden worden bij het uitvoeren van de constructie. Deze vervormingen zijn zettingen, vervormingen door thermische oorsprong en bijvoorbeeld betonkrimp. Deze vervormingen zijn afhankelijk van een aantal factoren zoals de manier van inbouw van de constructie en de dikte van het beton. Door het verhinderen van de vervormingen zullen er spanningen ontstaan [10].

Bij de thermische vervorming van beton wordt er gekeken naar de verandering van het materiaal met de verandering van de temperatuur. Beton gaat namelijk uitzetten als de temperatuur stijgt. Hierbij varieert de thermische uitzettingscoëfficiënt,  $\alpha$ , van  $10 \cdot 10^{-6}$  tot  $12 \cdot 10^{-6}$ . Dit verschil is te wijten aan het gebruik van de types van granulaten. De temperatuursverandering kan komen van externe bronnen, hiermee wordt bedoeld dat de verandering plaatsvindt langs één of meerdere zijde van het element of van interne bronnen [10].

Hierbij wordt bedoeld dat er een hydratatiereactie van het cement plaatsvindt. Daarnaast kan deze verandering uniform of differentieel gebeuren over de dikte. Dit wil zeggen dat de temperatuur aan beide kanten op dezelfde wijze varieert of dat er een temperatuurgradiënt over de dikte van het element is [10].

De hydratatiereactie zorgt voor de creatie van de cementmatrix. Dit zijn exotherme reacties. De snelheid waarmee de warmte vrijkomt is afhankelijk van verschillende factoren. Deze factoren zijn: de fijnheid van het cement, de chemische samenstelling ervan, de water-cementfactor, de gebruikte hulpstoffen en als laatste de temperatuur tijdens de verharding. Deze laatste factor is afhankelijk van de omgevingsvoorwaarden en de geometrie van het element. Als het element een grote oppervlakte-volumeverhouding heeft zal de temperatuur van het beton bijna dezelfde evolueren als dat van de omgeving. Als de elementen een dikte hebben die groter zijn dan 50 centimeter, wordt de uitwisseling van de warmte met de omgeving vertraagd. Hierdoor vindt er een warmteaccumulatie plaats in het beton. Deze warmteaccumulatie zorgt voor een verhoging van de inwendige temperatuur en tot een versnelling van de hydratatiereactie. Dit wil zeggen dat er een temperatuurverschil is tussen het binnenste van het element en de randen. Dit kan leiden tot scheuren in de constructie. Als men in de winter of wanneer het koud is deze reactie krijgt, heeft dit echter een positieve kant, want hierdoor verhard het beton trager [10].



Figuur 15: De temperatuur die t.g.v. hydratatiereacties bereikt wordt [10, p. 21]

Als tweede moet er rekening gehouden worden met de krimpvervorming van het beton. De totale krimp van het element bestaat uit drie verschillende soorten: de autogene krimp, de drogingskrimp en de thermische krimp. Deze soorten krimp worden uitgelegd in paragraaf 2.1. Deze krimp wordt berekend volgens beïnvloeding van verschillende factoren [10]:

- Het cementtype: trage, snelle of normale verharding
- De druksterkte van het beton,  $f_{cm}$ , na 28 dagen
- De blootstellingsduur:  $t - t_{cure}$
- De geometrie van de constructie: de gemiddelde straal of effectieve dikte
- De bijzondere beschermingen, bijvoorbeeld een PE-film tegen de snellen uitdroging.

De totale krimpvervorming wordt als volgt berekend:

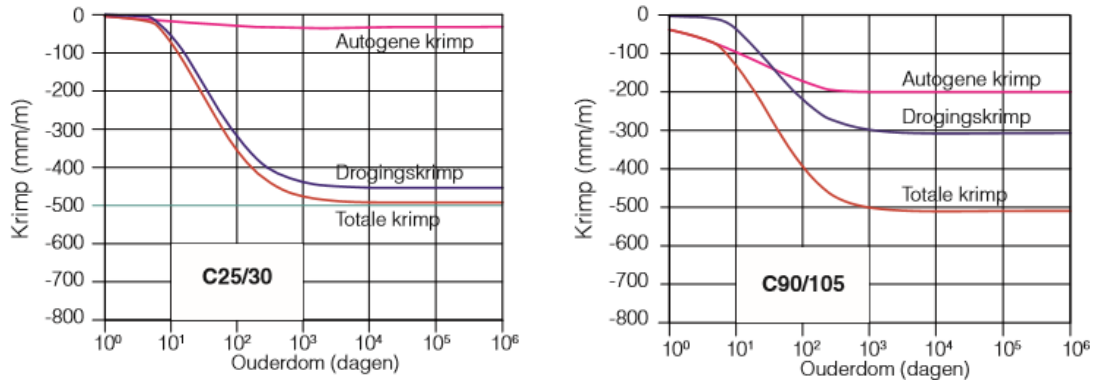
$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad [10, p. 22]$$

Daarbij is  $\varepsilon_{cd}$  de vervorming t.g.v. drogingskrimp en  $\varepsilon_{ca}$  de vervorming t.g.v. autogene krimp. De eerste evolueert langzaam. Dit komt doordat er water emigreert doorheen het verharde beton. Tabel 7 geeft de uiteindelijke nominale waarde weer van drogingskrimp bij cement van de klasse N. De tweede komt er pas tijdens de verhardingsfase en vindt bijna enkel plaats tijdens de eerst twee dagen na het storten van het beton. Deze vervorming is groter als de betonsterkte hoger is. Er moet ook voldoende aandacht aan worden besteed als er verse beton op reeds verharde beton wordt gestort [10].

Tabel 7: Nominale waarde voor uitdrogingskrimp [10, p. 22]

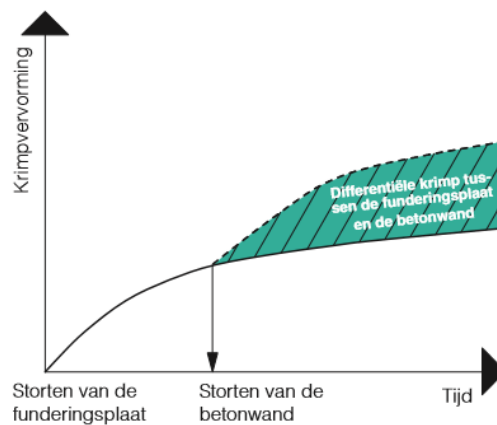
Druksterkte $f_{ck} / f_{ck,cube}$ (MPa)	Relatieve vochtigheid (%)					
	20	40	60	80	90	100
	Krimp (‰)					
<b>20/25</b>	0,62	0,58	0,49	0,30	0,17	0
<b>25/30</b>	0,58	0,55	0,46	0,29	0,16	0
<b>30/37</b>	0,55	0,52	0,43	0,27	0,15	0
<b>35/45</b>	0,51	0,49	0,41	0,25	0,14	0

Op de volgende figuren wordt een voorbeeld gegeven van de invloed van de druksterkte van het beton t.o.v. de autogene krimp en de drogingskrimp. Daarnaast wordt ook de totale krimp weergegeven om de verhouding te zien van de twee soorten krimp t.o.v. de totale krimp. Als voorbeeld wordt er gekozen voor twee verschillende soorten beton te gebruiken [10].



Figuur 16: Krimp t.o.v. de tijdsduur [10, p. 23]

Krimpvervormingen zullen over het algemeen geen probleem opleveren zolang ze vrij kunnen optreden. De scheuren die het gevolg zijn van krimp komen voort uit het feit dat de krimp wordt verhinderd. Een voorbeeld hiervan is een betonnen wand die op een reeds vloerplaat wordt gestort. Hierbij treedt er spanning op tussen de plaat en de wand, waar deze met elkaar verbonden zijn. Hierdoor wordt de krimp voor een deel verhinderd. De fasering, in welke volgorde delen worden gestort, is dus van grootst belang voor het krimpmechanisme en hun drogingsvoorwaarde [10].



Figuur 17: Differentiële krimp [10, p. 22]

### 2.3.3. Vloeistofdichtheidsklassen

De vloeistofdichtheidsklassen van het beton zijn een onderdeel van de bruikbaarheidsgrenstoestand van het beton of BBG. Hierin wordt gekeken naar de scheurbeheersing van het beton. Bij constructie is het gebruikelijk om deze onder te verdelen in functie van de vereiste beschermingsgraad tegen lekken. In tabel 8 wordt de klasse opdeling gegeven. Wel dient men er attent op gemaakt te worden dat er bij beton kleine hoeveelheden vloeistoffen of gassen door diffusie een doorgang vinden [17].

Tabel 8: Classificatie van waterdichtheid [17, p. 12]

Waterdichtheidsklasse	Eisen met betrekking tot lekkage
<b>0</b>	Een zeker lekdebiet is toelaatbaar of de lekkage van vloeistof heeft geen gevolgen.
<b>1</b>	Lekkage moet beperkt worden tot een klein lekdebiet. Enkel oppervlakkige vochtplekken zijn toelaatbaar.
<b>2</b>	Minimaal lekdebiet. Vochtplekken doen geen afbreuk aan het zicht
<b>3</b>	Geen lekdebiet toelaatbaar.

Naargelang van de begrenzing van de scheurwijdte die al gekozen zijn, kan dan een geschikte waterdichtheidsklasse worden bepaald. Als er naar de scheurwijdte geen andere specifieke eisen zijn, mogen de klassen als volgt worden toegepast [17].

- Waterdichtheidsklasse 0: als de bepaling van 7.3.1 van EN 1993-1-1 mogen worden toegepast. Met de bepaling 7.3.1 wordt verwezen door de Eurocode 2, EN 1992-1-1 op pagina 127, naar de algemene beschouwing van de scheurbeheersing. Dit wordt behandeld in paragraaf 1.3 scheurbeheersing in beton. De beheersing van de scheurvorming in de dimensionering gebeurt in de bruikbaarheidsgrenstoestand. Hierbij wordt er een maximale scheurwijdte gegeven volgens de verschillende milieuklassen [10], [17].
- Waterdichtheidsklasse 1: de wijdte van alle scheuren waarvan kan verwacht worden dat ze doorlopen over de volledige dikte van het element behoort te zijn begrensd tot  $w_{k1}$ . De bepaling van 7.3.1 van EN 1992-1-1 zijn van toepassing wanneer de doorsnede niet over de volledige dikte gescheurd is. De uitleg over de bepaling van 7.3.1 is terug te vinden in paragraaf 2.2 scheurbeheersing. Deze dichtheidsklasse wordt gebruikt wanneer er aan de volgende voorwaarde is voldaan. Indien aan deze bepaling is voldaan, kan er aangenomen worden dat scheuren waar het water doorloopt zullen helen. Als de scheuren helen mag de constructie niet onderworpen worden aan significante wijzigingen van de belasting of de temperatuur gedurende het gebruik. Als hier geen betrouwbare informatie over is, mag er worden aangenomen dat zelfheling optreedt als de verwachte grootte van de vervorming van de doorsnede beperkt blijft tot  $150 \cdot 10^{-6}$  bij de gebruiksomstandigheden. Als tweede voorwaarde moet er verzekerd kunnen worden dat de constructie voor klasse 2 en 3 scheuren voorkomen die niet over de volledige dikte van het element doorlopen. Hierbij behoort de rekenwaarde van de hoogte van de drukzone gelijk te zijn aan  $x_{min}$  onder de quasi-blijvende belastingscombinatie. De aanbevolen waarde voor  $x_{min}$  is de kleinste waarde van 50 mm en  $0,2 \cdot h$ , hierbij is  $h$  de dikte van het element. Als de doorsnede wisselende belasting ondervindt, wordt er aangenomen dat de scheuren volledig doorlopen. Dit kan worden weerlegd als er kan worden aangetoond dat een deel van de doorsnede steeds onder druk blijft. Dit deel moet gelijk zijn aan  $x_{min}$  of groter en onder alle te beschouwen belastingscombinaties. Hierbij worden de belasting effecten berekend voor een lineair-elastisch materiaal en moet bij de spanningen de treksterkte worden verwaarloosd [17].
- Waterdichtheidsklasse 2: scheuren waarvan kan verwacht worden dat ze doorlopen over de volledige dikte van de doorsnede behoren over het algemeen te worden vermeden tenzij gepaste maatregelen genomen zijn. Een voorbeeld van deze

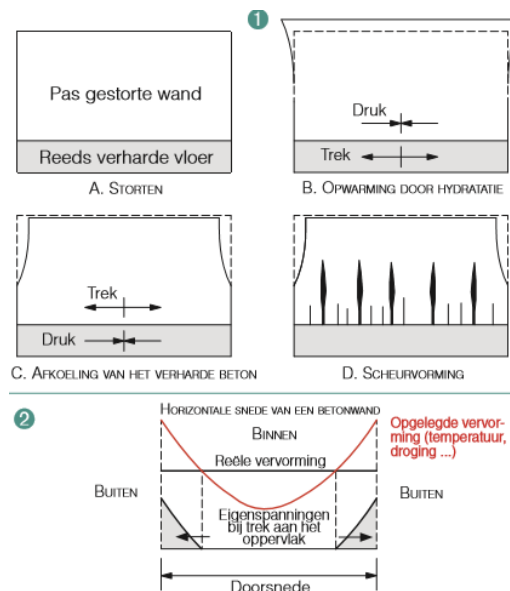
maatregelen zijn het voorzien van bekleding of een voeg voorzien van een waterdichtheidsprofiel [17].

- Waterdichtheidsklasse 3: er zullen speciale maatregelen nodig zijn om de waterdichtheid te verzekeren. Dit kan door het voorzien van bekleding of door het beton voor te spannen [17].

Om terug te komen op de zelfhelling die bij waterdichtheidsklasse 1 wordt aangehaald, kan er gezegd worden dat als zelfhelling niet altijd mogelijk is. Indien dit niet gebeurt kan bij iedere scheur die over de volledige dikte doorloopt een lekkage ontstaan. Dit is niet afhankelijk van de scheurwijdte en kan bij elke doorlopende scheur gebeuren [17].

### 2.3.4. Scheurwijdte in vloeistofdicht beton

Beton gaat scheuren als gevolg van vloeistofdruk, druk die wordt uitgeoefend op de bodem of door de opgelegde vervorming. De scheuren ontstaan enkel als de treksterkte van het element wordt overschreden zoals weergegeven in onderstaande figuur. Deze figuur toont de scheurvorming als de vervorming van een vloerplaat wordt verhinderd [14], [10].



Figuur 18: Scheurvorming door verhinderde vervorming [10, p. 27]

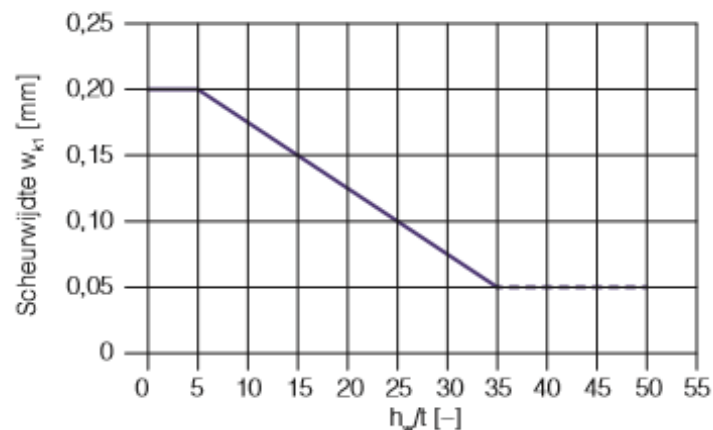
Als dit gebeurt bij constructies die vloeistofdicht moeten zijn, zullen er lekkages ontstaan. Het lekdebiet zal berekend moeten worden. In de norm ENV 1992 – 4 is er een formule terug te vinden die het lekdebiet berekent voor buffervaten. Deze formule heeft gelijkenissen met de formule van Darcy [10], [18] :

$$Q = \frac{K'}{\eta} * w_{eff}^3 * L_c * \rho * g * \frac{\Delta P}{\Delta h} \quad [18, p. 27]$$

Waarbij:

- Q: de lekkage in  $m^3/s$
- K: coëfficiënt afhankelijk van de oppervlaktekarakteristieken van de scheur
- $\eta$ : de dynamische viscositeit van de vloeistof in  $kg/m * s$
- $w_{eff}$ : de effectieve scheurwijdte in m, deze wordt berekend door:
 
$$w_{eff} = \frac{(2 * w_i * w_o)^2}{w_i + w_o}^{1/3} \quad [18, p. 27]$$
  - $w_o$ : de scheurwijdte aan de buitenzijde van het element
  - $w_i$ : de scheurwijdte aan de binnenzijde van het element
- $L_c$ : de scheurlengte in m
- $\Delta P$ : het ladingsverlies doorheen het element in Pa
- h: de dikte van het element in m

Met deze formule wordt het debiet van één scheur bepaald. Om het totale debiet te bepalen moet deze waarde vermenigvuldigd worden met het aantal geschatte scheuren. Er kan vastgesteld worden dat de scheurwijdte van groot belang is bij het bepalen van het lekdebet. De toepassing van deze formule is niet eenvoudig omdat de scheurlengte niet altijd gekend is en de drukgradiënt is ook niet uniform verdeeld over het volledige element. Echter werd deze formule uit de Europese norm verwijderd omdat er nog verder onderzoek naar nodig is [10], [18].

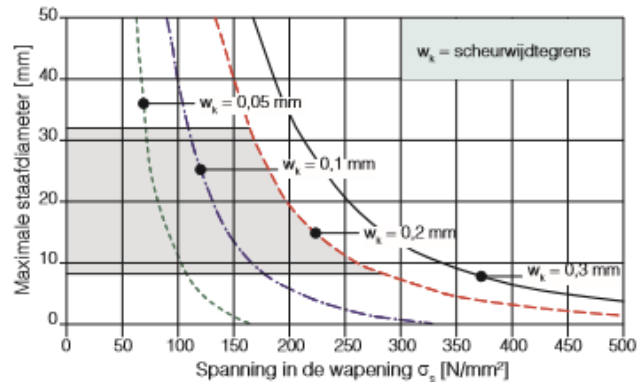


Figuur 19: Maximale scheurwijdte voor de dichtheidsklasse 1 [10, p. 42]

De scheurwijdte en de dichtheidsklassen staan met elkaar in verband. De vloeistofdichtheidsklassen zijn terug te vinden in paragraaf 2.3.3. De bovenstaande figuur geeft de maximale scheurwijdte weer voor de dichtheidsklasse 1 naargelang de drukgradiënt. Hierbij wordt weergegeven dat de maximale scheurwijdte van potentiële scheuren voor klasse 1 als volgt gebeurt: een maximale scheurwijdte van 0,2 mm als  $\frac{h_w}{t} \leq 5$  en bij een scheurwijdte van 0,05 mm als  $\frac{h_w}{t} \leq 35$ . Hierbij is  $h_w$  de waterhoogte en t de dikte van de wand. Beide variabelen worden uitgedrukt in meter [10].

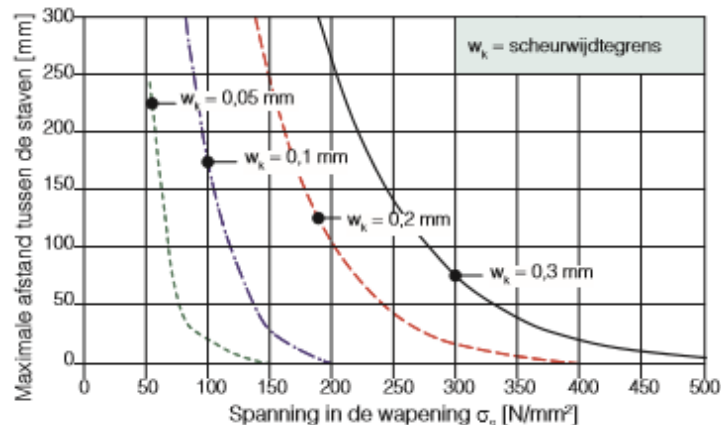
Als er een constructie wordt gebouwd die moet voldoen aan klasse 0 of 1 met een minimale hoeveelheid wapening kan de scheurwijdte binnen de perken blijven als er rekening wordt gehouden met een aantal aanbevelingen [10]:

- Bij scheuren die te wijten zijn aan verhinderding van de vervorming, hierbij wordt er best gekozen voor de maximale staafdiameter. De onderstaande figuur geeft het gebruik ervan weer bij elke maximale scheurwijdte. Hierbij wordt het element onderhevig aan axiale trek.



Figuur 20: Maximale staafdiameter voor beheersing scheurvorming [10, p. 44]

- Bij scheuren die veroorzaakt worden door belasting van buitenaf worden ofwel de maximale diameter gebruikt of moet de maximale afstand tussen de wapeningsstaven gerespecteerd worden. De figuur voor de maximale scheurwijdte is hierboven weergegeven. De volgende afbeelding geeft de maximale afstand tussen de staven. De afbeelding geeft de scheurvorming voor elementen die belast zijn op axiale trek.



Figuur 21: Maximale afstand tussen staven voor beheersing scheurvorming [10, p. 44]

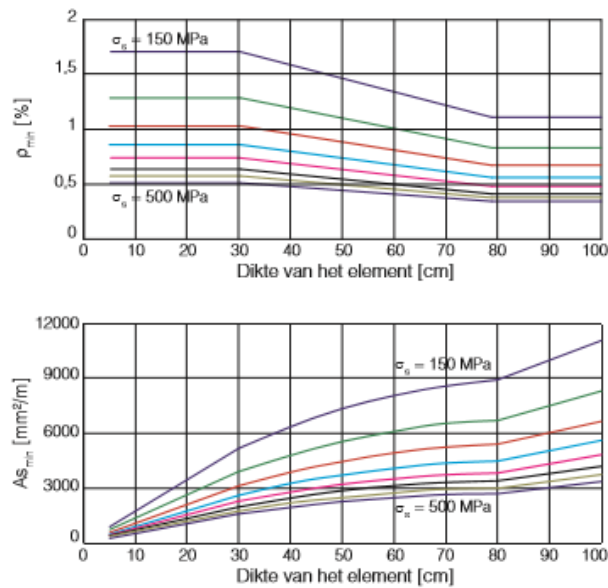
Voor de berekening van de scheurwijdte van klasse 0 en 1 is er een vereenvoudigde methode. De bepaling van de maximale toelaatbare scheurwijdte,  $w_{max}$ , is altijd afhankelijk van de gewenste dichtheidsklassen. Bij klasse 0 is de maximale toelaatbare scheurwijdte gelijk aan 0,30 mm en bij klasse 1 wordt deze bepaald door  $w_{max} = -0,005 * \frac{h_w}{t} + 0,225$ . Hierbij is  $t$  de wanddikte in meter en  $h_w$  de waterhoogte in meter. Na de bepaling van de maximale scheurwijdte wordt de maximale diameter bepaald. Dit gebeurt aan de hand van figuur 20. Hieruit wordt met de scheurwijdte, de spanning van de wapening en de maximale staafdiameter de maximale aangepaste diameter berekend [10], [17]:

$$\theta_s = \theta_s^* * \frac{f_{ct,eff}}{2,9} * \frac{h}{10*(h-d)} \quad [17, p. 14]$$

Hierbij is:

- $\theta_s$ : De maximale aangepaste diameter van de staven in mm
- $\theta_s^*$ : De maximale staafdiameter in mm, deze wordt uit figuur 22 gehaald
- h: De dikte van het element in mm
- d: De afstand tussen het zwaartepunt van de buitenste laag van de wapening en de tegenoverliggende zijde van het beton in mm
- $f_{ct,eff}$ : De gemiddelde effectieve waarde van de treksterkte van het beton in MPa. Deze wordt gelijkgesteld aan de gemiddelde treksterkte  $f_{ctm}$ .

Deze formule wordt hoofdzakelijk gebruikt voor het berekenen van scheurvorming veroorzaakt door verhinderde vervorming. Hierbij horen de staafdiameter die zijn aangegeven in figuur 22 en deze mogen niet worden overschreden. De staalspanning is hierbij gelijk aan de waarde die is verkregen onmiddellijk na het scheuren [10], [17].



Figuur 22: Minimaal wapeningspercentage t.o.v. totale doorsnede [10, p. 44]

Daarna wordt de minimale hoeveelheid langswapening,  $A_{s,min}$ , aan de hand van figuur 22 bepaald. Figuur 22 geeft het minimale wapeningspercentage ten opzichte van de totale doorsnede van het betonelement. De soort beton die is gebruikt is C25/30 en heeft een beperkte spanning in het staal. Dit is met het oog op de beheersing van de scheurwijdte in geval van zuivere trek. Als laatste wordt dan de volgende berekening nagekeken:  $A_{s,prov} > A_{s,min}$  naargelang de maximale reële einddiameter [10], [17].

Voor beton van vloeistofdichtheidsklasse 2 moet er rekening gehouden worden met scheuren die niet doorgaand zijn en bij klasse 3 mogen er geen scheuren voorkomen als het beton op zich vloeistofdichtheid moet waarborgen [10], [17].



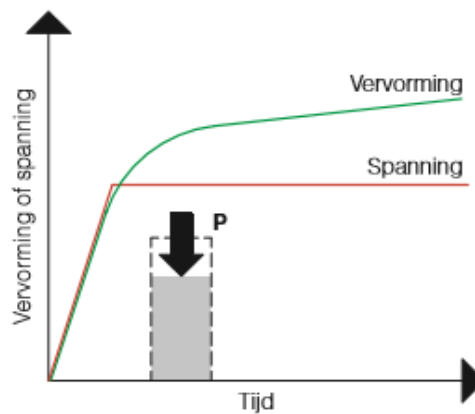
## 2.4. Kruip van beton

Bij deze masterproef moet er gekeken worden naar scheuren die op lange termijn worden veroorzaakt. Kruip kan over de volledige levensduur van het beton plaatsvinden. Door kruip kunnen er scheuren in beton ontstaan omdat de constructie door de kruip zal vervormen.

Kruip wordt gedefinieerd als de toename van vervorming in de tijd en dit ten opzichte van de directe optredende vervorming bij belasting. Anders gezegd is kruip de geleidelijke toename van vervorming in de tijd van een element en dit bij constante spanning. Bij de kruip van beton speelt de betonsoort, de ouderdom en de temperatuur een belangrijke rol. De kruip is namelijk afhankelijk van de ouderdom en de temperatuur. De totale vervorming is afhankelijk van de kruip van beton [19]:

$$\varepsilon_c(\tau, t) = (1 + \phi(\tau, t)) * \varepsilon_{c0}(\tau) \quad [19, p. 45]$$

- $\varepsilon_{c0}(\tau)$ : elastische rek bij belasting op tijdstip  $t = \tau$
- $\varepsilon_c(\tau, t)$ : totale beton rek op tijdstip  $t$
- $\phi(\tau, t)$ : kruipfactor
- $\tau$ : ouderdom bij belasting



Figuur 23: Voorstelling van de kruip bij druk [10, p. 13]

### 2.4.1. Kruip en temperatuur

De waarde van kruip bij beton is afhankelijk van de temperatuur van het beton en de omgeving. Hierbij wordt er een onderscheid gemaakt tussen cryogene temperaturen en hoge temperaturen [19].

Bij cryogene temperatuur, hierbij wordt er gewerkt met zeer lage en koude temperaturen, is de kruip 60 à 80 % van de kruip bij een temperatuur van 20°C. Hierbij is de kruip onder -20°C verwaarloosbaar en het grootste deel van de kruip is tussen de 0 en de 20 °C [19].

Daarnaast is er ook kruip bij hoge temperaturen. Dit werd bestudeerd toen beton werd toegepast voor relatief warme olie, meestal offshore en als beschermingsconstructies in nucleaire industrie. Bij het algemeen beschrijven van temperatuureffecten op chemische of fysische processen kan het activeringsenergieconcept gebruikt worden. Hierbij wordt de volgende formule gebruikt [19]:

$$V(T) = A * e^{-E_A/R*T} \quad [19, p. 47]$$

Waarin:

- $V(T)$ : Snelheid van een proces bij Temperatuur  $T$
- $T$ : De temperatuur
- $A$ : Experimenteel te bepalen grootheid
- $E_A$ : (schijnbare) activeringsenergie
- $R$ : Universele gasconstante

De formule van de snelheid van het proces kan in kruipsnelheid worden uitgedrukt:  $V(T) = d\varepsilon/dt$ . Hiermee kan er dan een verhouding gemaakt worden van de kruipsnelheden:  $V(T_1) = d\varepsilon(T_1)/dt$  en  $V(T_2) = d\varepsilon(T_2)/dt$ .  $T_1$  en  $T_2$  zijn de temperatuur en worden als volgt gebruikt in de temperatuurfunctie:

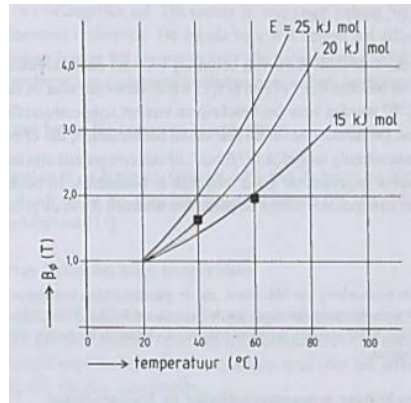
$$\beta_\phi(T) = \frac{V(T_2)}{V(T_1)} = \frac{\frac{d\varepsilon(T_2)}{dt}}{\frac{d\varepsilon(T_1)}{dt}} = e^{\frac{E_A}{R} \frac{T_2 - T_1}{T_2 * T_1}} \quad [19, p. 47]$$

Om de formule te vereenvoudigen kan worden aangenomen dat de grootte van de kruip dezelfde is als die van de temperatuurafhankelijkheid. Als temperatuur voor  $T_2$  wordt er aangenomen dat deze 20 °C is of 293 K. Voor temperatuur  $T_1$  wordt er een waarde gekozen tussen de 20°C en de 70°C zoals gevonden door Nasser. Nasser nam aan dat de krimpsnelheid toeneemt tot 70°C met een waarde die 3,5 maal zo groot is als deze bij 21°C. Als de temperatuur nog verder stijgt tot 96°C neemt de kruipsnelheid weer af en bedraagt dan 1,7 maal de waarde van bij 21°C. Dit verschil wordt waargenomen gedurende een periode van 15 maanden. Dit wil zeggen dat de kruipsnelheid en de kruipvervorming eenvoudig afgeleid kunnen worden van het kruipgedrag bij 20°C. Hieruit volgt dat de formule als volgt wordt vereenvoudigd [19]:

$$\beta_\theta(T) = \frac{\phi(T)}{\phi(293\text{ K})} = e^{\frac{E_A}{R} \frac{T - 293}{293 * T}} \quad [19, p. 47]$$

- $\beta_\phi(T)$ : de temperatuurfunctie
- $E_A$ : activeringsenergie
- $R$ : universele gasconstante
- $T$ : de temperatuur

De grootte van de temperatuurinvloed op de kruipsnelheid wordt bepaald door de activeringsenergie. Hierbij wordt activeringenergie rond de 20 kJ/mol gebruikt omdat hierbij goede resultaten worden geboekt in verband met de temperatuurinvloed op het kruipproces. In onderstaand figuur kan je de temperatuurfunctie zien voor de volgende activeringenergie: 15, 20 en 25 kJ/mol.



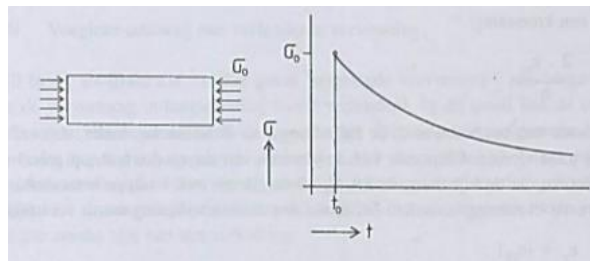
Figuur 24: Temperatuurfactor voor temperatuurinvloed op de kruip [19, p. 48]

### 2.4.2. Kruip en relaxatie

Relaxatie zorgt net zoals kruip en scheuren voor een reductie van het effect van opgelegde vervorming bij beton. Op onderstaande figuur is een betonelement weergegeven op tijdstip  $t$  gelijk aan 0 die aan een drukspanning,  $\sigma_0$ , is onderworpen. Hierbij wordt de lengte van het element constant gehouden. Door relaxatie van het element gaat er een deel van de spanning verloren. Met de relaxatie kan het verloop van de betonspanning als volgt worden berekend, volgens Trost [19]:

$$\sigma(t) = \sigma_0 * \left(1 - \frac{\phi}{1 + \rho * \phi}\right) \text{ [19, p. 12]}$$

Waarbij  $\rho$  de verouderingsfactor in verhard beton, meestal gelijk aan 0,8 en  $\phi$  de kruipfactor [19].



Figuur 25: Relaxatie op druk belast beton [19, p. 12]

Bij temperatuur en krimp geïnduceerde spanningen zijn deze altijd onderhevig aan relaxatie. De relaxatie wordt groter naarmate de temperatuur stijgt. De spanning bij opgelegde vervorming bij relaxatie wordt als volgt berekend [19]:

$$\sigma_c(\tau, t) = \psi(\tau, t, T) * \sigma_c(\tau) \text{ [19, p. 49]}$$

In deze formule geeft  $\psi(\tau, t, T)$  de relaxatiefactor weer. Met deze factor kan de relatie tussen kruip en relaxatie geformuleerd worden [19]:

$$\psi(\tau, t) = \frac{1}{1 + \phi(\tau, t, T)} \text{ of } \psi(\tau, t) = e^{-\phi(\tau, t, T)} \text{ [19, p. 49]}$$

Uit deze formules kan er afgeleid worden dat net als bij de relaxatie de kruip ook afneemt bij daling van de temperatuur. Als de temperatuur stijgt dan stijgt de kruip en de relaxatie ook [19].

## 2.5. Statistische evaluatie op scheurniveau

Om bij een betonnen constructie een evaluatie te maken of de constructie niet te grote scheuren heeft of te veel scheuren heeft, moet er gekend zijn wat er zich op scheurniveau voordoet. Hierbij worden zowel grote als microscheuren besproken. Deze analyse van beide soorten scheuren is nodig om te kunnen bepalen welke scheuren doorslaggevend zijn [20].

Volgens Jeroen Heremans en Sam Joossen wordt er een statistische evaluatie op het scheurniveau uitgevoerd. De scheuren worden loodrecht op de oppervlakte opgemeten. Om een representatief resultaat te verkrijgen worden er genoeg metingen gedaan. Deze metingen worden gebruikt om een verdeling op te stellen. Hierbij worden de scheuren opgedeeld per scheurwijdte. Voor de grote scheuren wordt er geen normale verdeling verwacht. Maar er wordt een blokverdeling verwacht waarbij een maximumwaarde bereikt wordt rond de gemiddelde scheurwijdte [20].

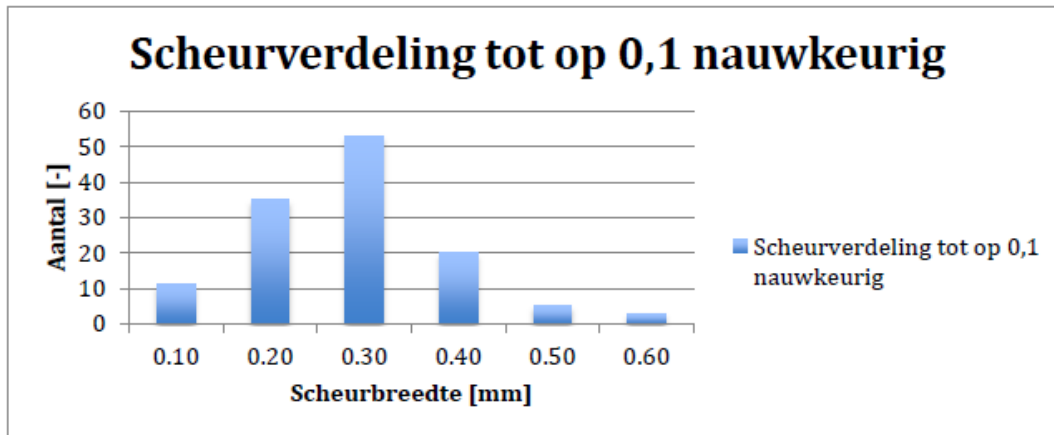
### 2.5.1. Verticale doorlopende scheuren

Er worden grote scheuren op een betonnen muur met een hoogte van 1,10 meter en een lengte van 80 meter opgemeten. Hoe een scheur opgemeten kan worden is in de volgende paragraaf 2.6 te lezen. Op de onderstaande figuur is een voorbeeld van een grote scheur weergegeven [20].



*Figuur 26: Voorbeeld van een grote scheur [20, p. 33]*

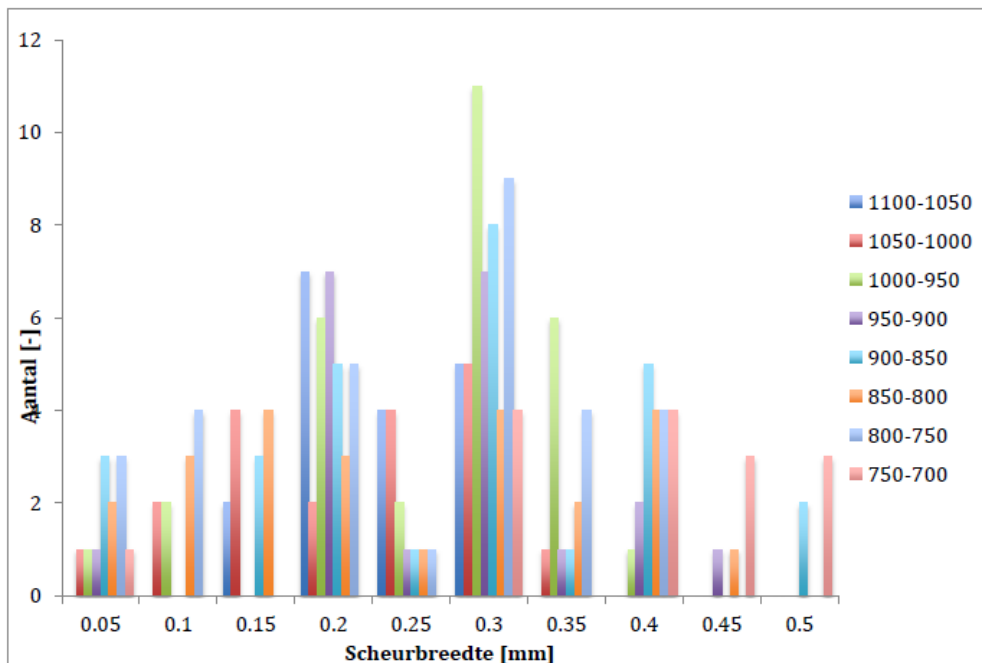
Met de opgemeten waarden wordt een verdeling opgesteld waarbij op de x-as de scheurwijdte en op de y-as het aantal keer dat een scheur voorkomt weergegeven wordt. Er wordt aandacht besteden aan de meetfouten, er kunnen luchtballen aan het oppervlak of onzuiverheden in het beton voorkomen die voor zeer kleine scheurwijdtes zorgen. Daarom wordt de nauwkeurigheid verminderd tot op 0,1 mm [20].



Figuur 27: Scheurverdeling van een verticale scheur [20, p. 34]

Op de bovenstaande grafiek worden 186 metingen weergegeven van de verticale scheuren. De blokverdeling kent een piek tussen 0,2 mm en 0,3 mm. Vanaf scheurwijdte 0,3 mm wordt de blokverdeling afgeknot omdat het aantal gemeten scheurwijdten bij 0,4 mm minder zijn dan bij 0,2 mm en 0,3 mm. De gemiddelde scheurwijdte is gelijk aan 0,27 mm [20].

Er worden metingen gereduceerd omdat het niet praktisch is om zoveel metingen uit te voeren. Hiervoor wordt de verdeling van de scheur per segment van 50 mm gekozen. Op de onderstaande grafiek worden de verdelingen van de scheurwijdten per segment van 50 mm weergegeven waarbij telkens 20 scheurwijdten gemeten worden [20].



Figuur 28: Scheurverdeling per segment van 50 mm [20, p. 35]

### 2.5.2. Reductie meetgegevens

Om de statistische toetsingen uit te voeren wordt er gewerkt met een gemiddelde scheurwijdte. Deze wordt als volgt berekend, de som van de gemeten waarden gedeeld door het aantal metingen  $n$ . Daarna wordt dit berekende gemiddelde, het meetgemiddelde genoemd. Daarnaast wordt ook de standaarddeviatie  $s$  van de normale verdeling berekend. Bij grote scheuren is er geen normale verdeling maar de standaarddeviatie wordt toch gebruikt omdat het een goed uitgangspunt is. Met het aantal metingen en de standaarddeviatie wordt de ruis berekend,  $\sigma = s/\sqrt{n}$ . Deze ruis is het interval waarbinnen elke meting ligt. Wanneer deze berekende ruis van het gemiddelde opgeteld of afgetrokken wordt, wordt de gemiddelde scheurwijdte gevonden. Op de onderstaande tabel zijn de gegevens weergegeven [20].

Tabel 9: Statistische waarden bij  $n=186$  [20, p. 36]

<b>n</b>	<b>Meetgemiddelde (mm)</b>	<b>S</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Gemiddelde + (mm)</b>	<b>Gemiddelde - (mm)</b>
<b>186</b>	0,27	0,12	0,01	0,28	0,26

Tabel 10: Statistische waarden bij reductie van het aantal metingen [20, p. 36]

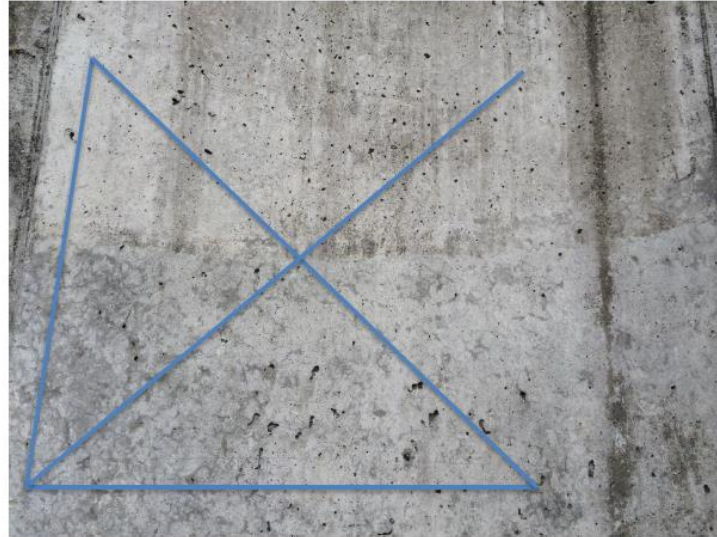
<b>n</b>	<b>Meetgemiddelde (mm)</b>	<b>S</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Gemiddelde + (mm)</b>	<b>Gemiddelde - (mm)</b>
<b>94</b>	0,25	0,10	0,010	0,26	0,24
<b>49</b>	0,25	0,08	0,011	0,26	0,24
<b>24</b>	0,25	0,05	0,011	0,26	0,24
<b>13</b>	0,21	0,04	0,012	0,22	0,20

Uit tabel 10 kan er vastgesteld worden dat bij de reductie van het aantal metingen, waarbij  $n$  aantal metingen worden gekozen over de volledige lengte van de scheur, de statistische waarden in dezelfde grootteorde blijven tot aan  $n$  is gelijk aan 24. Wanneer naar de beide tabellen wordt gekeken voor  $n$  is gelijk aan 186 en  $n$  is gelijk aan 24 is te zien dat de standaarddeviatie nagenoeg hetzelfde is. De ruis  $\sigma$  gaat van 0,01 naar 0,0225. De ruis verschilt, maar is nog altijd acceptabel. Wanneer minder metingen dan 24 worden uitgevoerd, is het te zien dat de waarden voor de standaarddeviatie en de ruis niet meer binnen de vooropgestelde grootteordes vallen [20].

Hieruit kan besloten worden dat de reductie van het aantal metingen toegestaan is, indien het aantal waarden voor de statistische evaluatie over de volledige scheur worden geselecteerd. Er wordt ook aangeraden dat er minstens 25 à 50 metingen per strekkende meter uitgevoerd worden. In dit onderzoek worden de metingen verricht om de 3,3 cm en dit wil zeggen dat er 30 metingen worden uitgevoerd voor een doorlopende scheur van 1 m [20].

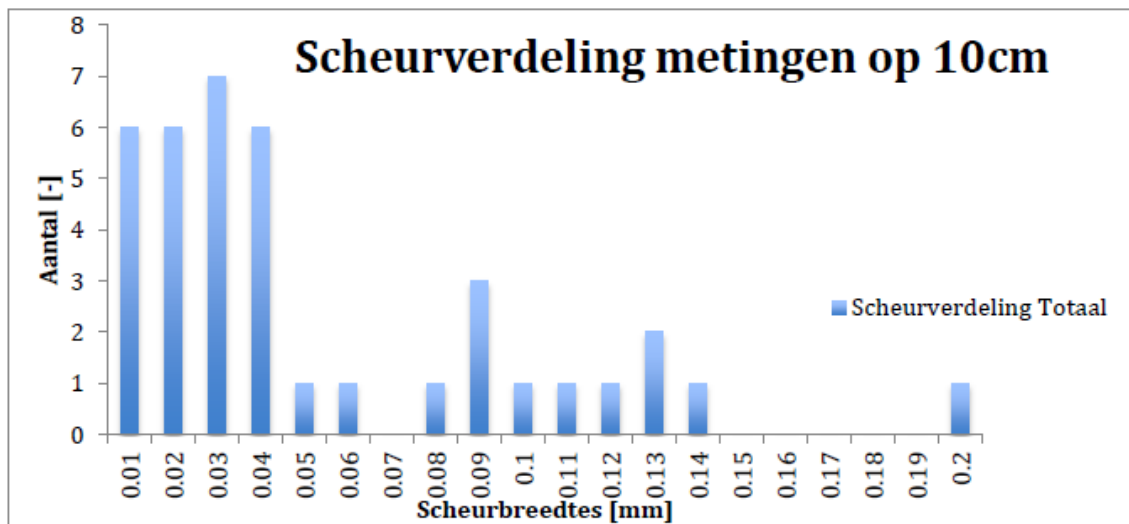
### 2.5.3. Scheurverdeling van microscheuren

Bij de microscheuren wordt er per 10 cm een scheur opgemeten. Als er geen scheur aanwezig is, zal deze als niet bestaande ingegeven worden. Op de onderstaande figuur is het meetoppervlak van de microscheuren weergegeven [20].



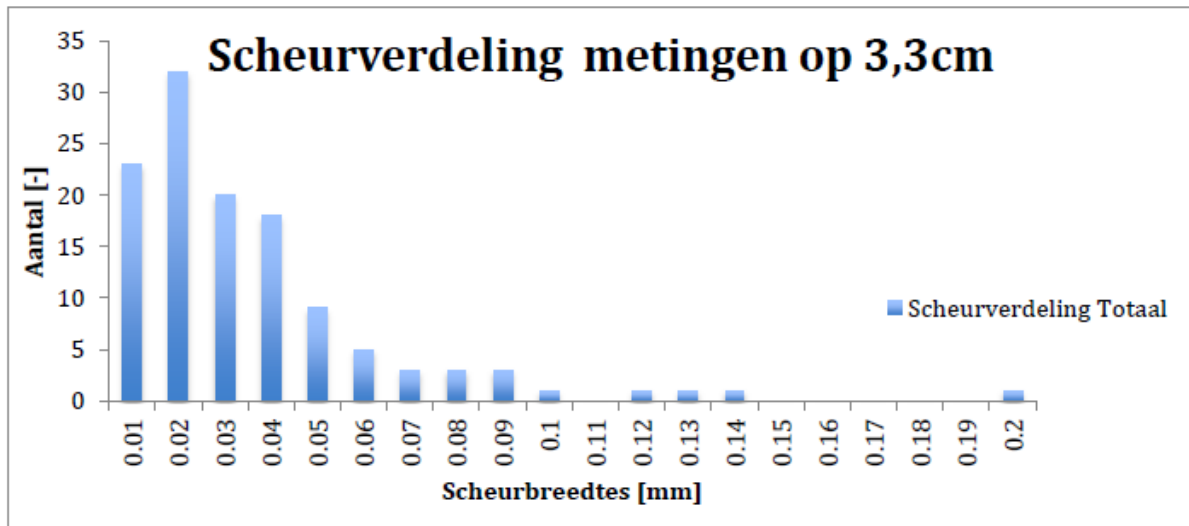
Figuur 29: Meetoppervlak microscheuren [20, p. 38]

Er wordt een afgeknotte normaalverdeling verwacht omdat de microscheuren geen onderling verband hebben met elkaar en de scheurwijdte. De gedachte van dat de verdeling afgeknot verwacht wordt hangt samen met het feit dat de scheuren niet negatief kunnen zijn en de normaalverdeling bij 0 afgeknot zal zijn [20].



Figuur 30: Scheurverdeling op 10 cm [20, p. 38]

Op de grafiek is het zichtbaar dat de scheurverdeling zeker geen normaalverdeling is. Dit kan verklaard worden doordat er te weinig metingen uitgevoerd zijn [20]. Dezelfde oppervlakte wordt opnieuw gemeten met een tussenafstand van 3,3 cm. Deze afstand is gekozen omdat dit de grens is bij de grote scheuren waarbij het gemiddelde en de standaarddeviatie nauwelijks afwijkt. Dit zorgt ervoor dat er geen onnodige metingen uitgevoerd worden. Op de onderstaande grafiek zijn de nieuwe metingen terug te vinden. Nu is er een afgeknotte normaalverdeling te zien. Deze verdeling heeft een piek bij 0,02 mm [20].



Figuur 31: Scheurverdeling op tussenafstand 3,3 cm [20, p. 40]

Wanneer hetzelfde onderzoek op een andere structuur of een andere plaats wordt uitgevoerd, levert dit een andere verdeling op. Het probleem is dat er bij microscheuren nooit een constante is in de verdeling. Dus de veronderstelling dat de scheuren een afgeknotte normaalverdeling leveren klopt niet altijd. Hieruit kan besloten worden dat de microscheuren geen rol gaan spelen in de uiteindelijke opmetingen van de structuur [20].

Wanneer alle microscheuren opgemeten zijn, worden deze getoetst aan de gegeven criteria. Op vijf verschillende oppervlaktes worden de scheuren opgemeten met een tussenafstand van 3,3 cm van de metingen. De structuur wordt gecontroleerd waarbij gekeken wordt of de microscheuren het overschrijdingspercentage uit Merkblatt Rissbildung overschrijden of niet. De resultaten zijn op de onderste tabel weergegeven [20].

Tabel 11: Metingen microscheuren [20, p. 42]

Toetsing	Totaal	Groter dan toetsing
<b>0,4</b>	44	0
<b>0,3</b>	44	0
<b>0,2</b>	44	3



Het is duidelijk dat er van alle scheuren maar drie zijn die groter zijn dan 0,2 mm. Dit resultaat voldoet aan het overschrijdingspercentage die in de volgende tabel weergegeven is [20].

*Tabel 12: Controle metingen met overschrijdingspercentage [20, p. 42]*

<b>Toetsing</b>	<b>Overschrijdingspercentage</b>	<b>Maximaal overschrijdingspercentage</b>
<b>0,4</b>	0,00	< 5
<b>0,3</b>	0,00	< 10
<b>0,2</b>	6,82	< 20

Er kan geconcludeerd worden dat de microscheuren geen rol spelen in de beoordeling van de structuur. De microscheuren overschrijden de vastgelegde percentages niet doordat de grootteorde van de microscheuren kleiner zijn dan de toetsingswaarden [20].

Uit dit onderzoek kan er besloten worden dat alleen grote scheuren een invloed hebben op de beoordeling van een betonnen structuur. De microscheuren vormen geen probleem en de verdeling is willekeurig. Dit zorgt ervoor dat de evaluatie ook moeilijker wordt [20].

## **2.6. Meetinstrumenten**

### **2.6.1. Algemeen**

Het is belangrijk om te weten dat er een verschil is tussen de detectie en de meting van de scheur. Er kunnen scheuren voorkomen die met het blote oog waargenomen kunnen worden, maar er kunnen ook scheuren voorkomen die onzichtbaar zijn zoals bijvoorbeeld bij vloeistofdichtheidsklasse 2 en 3. Om de scheur te ontdekken is het goed om te weten welke technieken al bestaan, nadien kan de scheur opgemeten worden. Een bepaalde scheurmeter wordt op de opening geplaatst en de scheurbreedte wordt loodrecht op de oppervlakte van de betonconstructie gemeten. Indien nodig kan na verloop van tijd nog eens gemeten worden. De scheuren kunnen zowel verticaal als horizontaal op de oppervlakte gemeten worden [20].

### **2.6.2. Detectie**

De scheuren moeten eerst gedetecteerd worden. Dit kan in eerste instantie met het blote oog gebeuren en als het nodig is kan er lichtversterking gebruikt worden. Het gaat vooral over de kleine en onzichtbare scheurtjes, deze zijn de microscheuren [20].

Zoals het in de vorige hoofdstukken vermeld staat, kunnen scheuren verschillende oorzaken hebben. Deze kunnen ontstaan door krimp (hydraulische, autogene of thermische krimp), optredende belastingen of door slecht onderhoud. De scheuren kunnen het uiterlijk van beton verslechteren waarbij een esthetisch probleem ontstaat, maar er kunnen ook structurele problemen voorkomen waarbij de gevormde scheuren gevaarlijk zijn [20].

De inspectie van de scheuren kan gebeuren met beelden. Door gebruik te maken van de beelden kunnen al heel wat scheuren opgespoord worden. Dit is een visuele inspectie, maar heeft struikelpunten. De vorm van de scheur kan onvoorspelbaar zijn of er kunnen schaduwen voorkomen die voor probleem zorgen. Omdat er alleen aan de oppervlakte gemeten wordt kan niet ingeschat worden of de scheur echt doorloopt over de hele structuur [20].

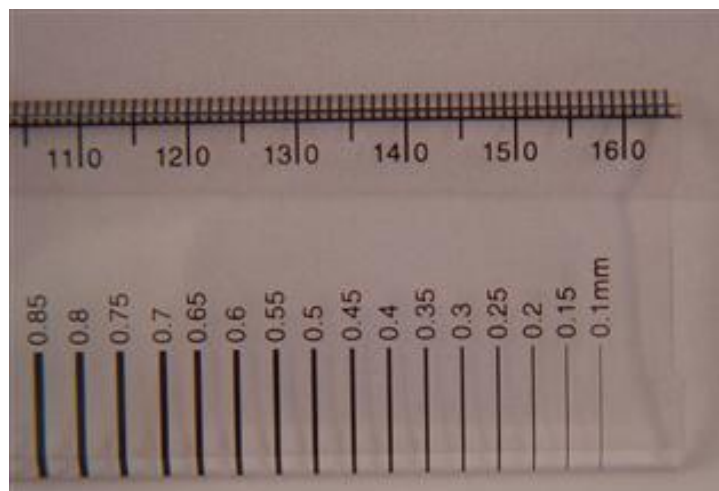
### 2.6.3. Meetmethoden

#### 2.6.3.1. Scheurmeter

Om de scheuren gemakkelijk vast te stellen wordt een scheurmeter geplaatst. Dit is een transparant liniaal. De grootte is gelijk met een naamkaartje en wordt toegepast om manuele metingen uit te voeren. De meting kan uitgevoerd worden door het transparant liniaaltje op de opening te plaatsen, op deze manier wordt de breedte van de opening gemeten. Zoals op figuur 32 zichtbaar is, is de schaalverdeling van 0 tot en met 165 mm. De scheurbreedtes zijn aangeduid als strepen die variëren in diktes van 0,03 mm tot 7 mm. Er bestaan ook scheurlinialen met andere schaalverdelingen, de keuze is zelfbepalend waarbij best rekening wordt gehouden met de grootte van de scheuren [20] , [21].



Figuur 32: Scheurliniaal [21]



Figuur 33: Detail scheurliniaal [21]

#### 2.6.3.2. Micrometer

Er kan ook een micrometer gebruikt worden om de scheuren af te lezen met een precisie van 0,01 mm. Deze is eenvoudig om te gebruiken en wordt ook aangeraden omdat er minder kans is op fouten en afwijkingen. Er kan met heel kleine toleranties gewerkt worden. De scheurbreedte zal loodrecht op de scheur afgelezen worden zoals te zien op de onderstaande figuur, waarbij geen rekening wordt gehouden met de diepte van de scheur [20].



Figuur 34: Micrometer [20]



Figuur 35: Loodrecht op de scheur aflezen [20]

## 2.7. Variatie op de inputwaarden

Voor de berekening van de scheurwijdtes zijn er verschillende inputwaarden. Deze waarden kunnen variëren of een afwijking hebben omdat het op de werf niet goed wordt uitgevoerd of omdat er een fout wordt gemaakt in de fabriek. Hieronder worden de inputwaarden weergegeven die kunnen variëren en wat hun afwijking kan zijn.

### 2.7.1. Doorsnede wapening

Bij de doorsnede van de wapening kan de diameter afwijken van de gekozen diameter. Hierbij mag de afwijking volgens norm NBN A 24 -302 maximaal 4,5 % zijn. Deze waarde kan uit onderstaande tabel worden gehaald [22], [23].

Tabel 13: Toegestane afwijking in percent [23, p. 4]

Nominale diameter (mm)	Op de nominale doorsnede	Op de massa van de wapening met zelfde diameter van bestelling	
		≤ 5*t	> 5 *t
<b>6</b>	± 12	± 10	± 8
<b>8 tot 12</b>	± 10	± 8	± 6
<b>14 tot 40</b>	± 6	± 6	± 4

Tabel 14: Eigenschappen wapening [15, p. 219]

Productvorm	Staven en gerichte draden			Wapeningsnetten			Eis of onder-schrijdingkans (%)
Klasse	A	B	C	A	B	C	-
Karakteristieke waarde vloeigrens $f_{yk}$ of $f_{0,2k}$ (Mpa)	400 tot 500						5,0
Minimumwaarde van $k = (f_t/f_y)_k$	$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$	$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$	10,0
Karakteristieke vervorming bij maximale kracht $\epsilon_{uk}$ (%)	$\geq 2,5$	$\geq 5,0$	$\geq 7,5$	$\geq 2,5$	$\geq 5,0$	$\geq 7,5$	10,0
Buigbaarheid	Heen- en terugbuigproef			Heen- en terugbuigproef			-
Afschuifsterkte	-			$0,25 * A * f_{yk}$			Minimum
Maximale afwijking van de nominale massa (afzonderlijke staaf of draad) (%)	Nominale afmeting (mm) :						
	$\leq 8$			$\pm 6,0$			
	$> 8$			$\pm 4,5$			5,0

Bij de bovenstaand tabel is er een begrenzing opgelegd. Deze begrenzing geldt voor de staalspanning. De tabel mag enkel gebruikt worden bij een staalspanning tot 500 MPa. De waarde van de wapening gaat dus 4,5 % verschillen. Dit wil zeggen dat de wapening 4,5% groter kan zijn of 4,5 % kleiner kan zijn [22], [15].

- $0,955 * \phi_{s1} \leq \phi_{s1i} \leq 1,045 * \phi_{s1}$
- $0,955 * \phi_{s2} \leq \phi_{s2i} \leq 1,045 * \phi_{s2}$
- $0,955 * \phi_b \leq \phi_{bi} \leq 1,045 * \phi_b$

### 2.7.2. Moment

Bij het bepalen van het moment dat op een balk of plaat maximaal mag komen, is er niet bekend welke belasting er effectief gebruikt wordt. Daarom wordt er gekozen om bij het verschil in moment te werken met de verschillende belasting toestanden voor GGT. De verschillende soorten gevallen zijn weergegeven in de onderstaande tabel 15.

Tabel 15: Gebruiksgrenstoestanden [24]

Gebruiksgrenstoestand	GGT
karakteristiek	GGT-K
Frequent	GGT-F
Quasi-blijvende	GGT-Q

Om de berekening te kunnen uitvoeren wordt er gebruik gemaakt van de  $\psi$ -factoren. Deze factoren worden uit Eurocode 0 gehaald [25]. De  $\psi$ -factoren voor woon- en verblijfsruimtes worden gebruikt.

Tabel 16: ANB -  $\psi$ -factoren voor de gebouwen [25, p. 10]

Belasting	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
<b>Opgelegde belastingen voor gebouwen volgens categorie (zie EN 1991-1-1)<sup>(1)</sup></b>			
• Categorie A: woon-, verblijfsruimtes	0,7	0,5	0,3
• Categorie B: kantoorruimtes	0,7	0,5	0,3
• Categorie C: vergaderruimtes (uitgezonderd ruimtes van categorie A,B en D)	0,7	0,7	0,6
• Categorie D: winkelruimtes	0,7	0,7	0,6
• Categorie E: opslagruimtes	1,0	0,9	0,8
• Categorie F: verkeersruimte/parking voor lichte voertuigen (gewicht in beweging $\leq 30$ kN; aantal plaatsen $< 8$ bestuurder uitgezonderd)	0,7	0,7	0,6
• Categorie G: verkeersruimte/parking voor middelzware voertuigen ( $30$ kN $<$ gewicht in beweging $\leq 160$ kN)	0,7	0,5	0,3
• Categorie H: daken	0	0	0
<b>Sneeuw- en ijsbelastingen (zie EN 1991-1-3)</b> Voor gans België (hoogte $H \leq 1000$ m)	0,5 <sup>(3)</sup>	0 <sup>(4)</sup>	0
<b>Windbelasting op gebouwen (zie EN 1991-1-4)</b>	0,6 <sup>(3)</sup>	0,2 <sup>(5)</sup>	0
<b>Temperatuurbelastingen (uitgezonderd brandgeval) (zie EN 1991-1-5)</b>	0,6	0,5	0
<b>Zettingen (zie EN 1997)</b>	1,0	1,0	1,0
<b>Bijzondere belastingen tijdens de uitvoering<sup>(2)</sup> (zie EN 1991-1-6)</b>	1,0	-	0,2
<p>(1) Voor machines dienen de <math>\psi</math>-factoren geval per geval bepaald te worden. Voor de drukken door in het gebouw opgeslagen vloeistoffen of goederen wordt verwezen naar de bijlage A4 van de EN 1991. Tot de publicatie van de aangevulde nationale bijlage dienen de factoren van categorie E te worden gebruikt.</p> <p>(2) De <math>\psi</math>-factoren voor de belasting tijdens de uitvoering dienen, indien nodig, geval per geval te worden bepaald.</p> <p>(3) Wanneer een veranderlijke belasting van korte duur – minder dan één maand – (bijvoorbeeld een sneeuwbelasting of een windbelasting) in een combinatie samengaat met een andere belasting van korte duur (overheersende veranderlijke belasting of belangrijkste gelijktijdige veranderlijke belasting), <math>\psi_0 = 0,3</math>.</p> <p>De achtergrond van deze maatregel is dat het samenkomen van de verschillende effecten van korte duur (korter dan 1 maand, bijv. gebruiksbelasting, sneeuwbelasting, windbelasting, thermische belasting) zeer onwaarschijnlijk is, zodat de probabilistische opsomming ervan met kleinere partiële factoren kan gebeuren. De maatregel was al opgenomen in de NBN B 03-101 van 1994, op basis van een artikel "Principes généraux de détermination de la sécurité" van de heren D'Havé en Spehl in het tijdschrift der Openbare Werken van België, nr. 1 van 1984.</p> <p>(4) De frequente waarde van de belasting is praktisch nul volgens de berekeningen van het Koninklijk Meteorologisch instituut.</p> <p>(5) Voor de bruikbaarheidsgrenstoestanden kunnen de waarden <math>\psi_0</math> en <math>\psi_1</math> afhangen van het gebruikscriterium (zie A1.4.2(2)).</p>			

Voor de berekening van de verschillende gebruikstoestanden wordt de cursus van beton gebruikt [24]:

- GGT-K:  $p + q$
- GGT-F:  $p + \psi_1 * q = p + 0,5 * q$
- GGT-Q:  $p + \psi_2 * q = p + 0,3 * q$

Met  $\psi_1$  gelijk aan 0,5 en  $\psi_2$  gelijk aan 0,3. Voor de berekening wordt  $p$  en  $q$  gelijk aan elkaar genomen met een waarde van 50 kN. Om na te gaan welk verschil er in deze drie methode zit, worden GGT-K en GGT-F gedeeld door GGT-Q.

- $\frac{p+q}{p+0,3*q} = \frac{50+50}{50+0,3*50} = \frac{100}{65} = 1,54$
- $\frac{p+0,5*q}{p+0,3*q} = \frac{50+0,5*50}{50+0,3*50} = \frac{75}{65} = 1,15$

Uit deze berekening kan besloten worden dat er een verschil op het moment zit. Het verschil bevindt zich tussen de 1,54 en 1,15. Nu moet er een keuze worden gemaakt welk verschil er gebruikt gaat worden binnen de verder berekeningen. Er wordt gekozen om te rekenen met een verschil van 1,2 of 20%. Dit zowel voor de boven als ondergrens van het moment.

### 2.7.3. Betonsterkte

Bij het maken van het beton kan er een verschil in kwaliteit van het beton optreden. Hierbij kan de betonsterkte beter zijn dan de voorop gekozen waarde of de betonsterkte kan slechter zijn. Om de variatie op deze factor te bekijken wordt de norm NBN EN 13791 gebruikt. Uit de onderstaande tabel kan afgeleid worden hoe de minimumwaarde van de betonsterkte moet worden geïnterpreteerd [26].

Tabel 17: Minimum karakteristieke waarde in situ van de druksterkte [26, p. 12]

Compressive strength class according to EN 206-1	Minimum characteristic in-situ strength N/mm <sup>2</sup>	
	$f_{ck,i,cyl}$	$f_{ck,i,cube}$
<b>C8/10</b>	7	9
<b>C12/15</b>	10	13
<b>C16/20</b>	14	17
<b>C20/25</b>	17	21
<b>C25/30</b>	21	26
<b>C30/37</b>	26	31
<b>C35/45</b>	30	38
<b>C40/50</b>	34	43
<b>C45/55</b>	38	47
<b>C50/60</b>	43	51
<b>C55/67</b>	47	57
<b>C60/75</b>	51	64
<b>C70/85</b>	60	72
<b>C80/95</b>	68	81
<b>C90/105</b>	77	89
<b>C100/115</b>	85	98

Voor de maximum waarde van de betonsterkte wordt hetzelfde principe gebruikt als bij de minimum waarde, enkel wordt hierbij de waarde erbij opgeteld en niet afgetrokken. Voor de betonklasse C25/30 wordt de maximum waarde dan 34 voor  $f_{ck,i,cube}$  [26].

### 2.7.4. Gemiddelde waarde druksterkte beton

Voor de waarde van de gemiddelde druksterkte van het beton wordt de volgende formule gebruikt:  $f_{cm} = f_{ck} + 8$  [15], p35. De waarde van de gemiddelde druksterkte van het beton is terug te vinden in de onderstaande tabel.

Tabel 18: Sterkte- en vervormingseigenschappen voor beton [15, p. 29]

Strength classes for concrete														
$f_{ck}$	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
$f_{cm}$	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
$f_{ctm}$	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk,0.05}$	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk,0.95}$	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
$E_{cm}$	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
$\epsilon_{c1}$	1,8	1,9	2,0	2,1	2,1	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
$\epsilon_{cu1}$	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
$\epsilon_{c2}$	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
$\epsilon_{cu2}$	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
$n$	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
$\epsilon_{c3}$	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
$\epsilon_{cu3}$	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

De waarde  $\epsilon_{c1}$ ,  $\epsilon_{cu1}$ ,  $\epsilon_{c2}$ ,  $\epsilon_{cu2}$ ,  $\epsilon_{c3}$  en  $\epsilon_{cu3}$  worden uitgedrukt in ‰ en de waarde van  $f_{ck}$ ,  $f_{ck,cube}$ ,  $f_{cm}$ ,  $f_{ctm}$ ,  $f_{ctk,0.05}$  en  $f_{ctk,0.95}$  worden uitgedrukt in MPa [15] .

Voor het berekenen van de waarden van de gemiddelde druksterkte worden de variatie van de inputwaarde van de betonsterkte toegepast. Hierbij worden de volgende waarden verkregen.

- Minimum:  $f_{cm} = f_{ck} - 4 + 8 = f_{ck} + 4$
- Maximum:  $f_{cm} = f_{ck} + 4 + 8 = f_{ck} + 12$

### 2.7.5. Breedte

Voor de afwijking op de breedte wordt er gekeken in de norm van uitvoering van betonconstructies. Hierin staat met welke waarde de breedte mag afwijken. De breedte mag geen grotere afwijking hebben dan de onderstaande waarde [27]. De onderstaande tabel wordt gebruikt om de mogelijke afwijking van de breedte weer te geven:

Tabel 19: Toegestane afwijkingen van doorsneden [27, p. 38]

N°	Type van afwijking	Beschrijving	Toegestane afwijking $\Delta$	
			Tolerantieklasse 1	Tolerantieklasse 2
a	<p><math>\delta</math>: lengte van een dwarsmaat</p>	<p>Dwarsmaten van de doorsnede van toepassing op balken, platen en kolommen</p> <p>Voor <math>h &lt; 150</math> mm  <math>h = 400</math> mm  <math>h \geq 2500</math> mm</p> <p>met lineaire interpolatie voor de tussenliggende waarde</p>	<p><math>\pm 10</math> mm  <math>\pm 15</math> mm  <math>\pm 30</math> mm</p>	<p><math>\pm 5</math> mm  <math>\pm 10</math> mm  <math>\pm 30</math> mm</p>

Voor de breedte wordt er gerekend met tolerantieklasse 1. De breedte kan dan als volgt afwijken [27]:

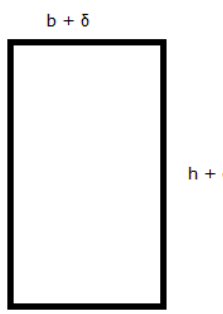
- $b < 150 \text{ mm} : b - 10 \leq b_i \leq b + 10$
- $150 \text{ mm} \leq b \leq 400 \text{ mm} : b - \left(\frac{b}{50} + 7\right) \leq b_i \leq b + \left(\frac{b}{50} + 7\right)$
- $400 \text{ mm} \leq b \leq 2500 \text{ mm} : b - \left(\frac{b}{140} + \frac{85}{7}\right) \leq b_i \leq b + \left(\frac{b}{140} + \frac{85}{7}\right)$
- $b > 2500 \text{ mm} : b - 30 \leq b_i \leq b + 30$



### 2.7.6. Hoogte

Bij de hoogte kan er dezelfde afwijking zijn als bij de breedte. In de onderstaande tabel zijn de afwijkingen van de hoogte weergegeven.

Tabel 20: Toegestane afwijking van de doorsnede [27, p. 38]

N°	Type van afwijking	Beschrijving	Toegestane afwijking $\Delta$	
			Tolerantieklasse 1	Tolerantieklasse 2
a	 <p><math>\delta</math>: lengte van een dwarsmaat</p>	<p>Dwarsmaten van de doorsnede van toepassing op balken, platen en kolommen</p> <p>Voor <math>h &lt; 150</math> mm  <math>h = 400</math> mm  <math>h \geq 2500</math> mm</p> <p>met lineaire interpolatie voor de tussenliggende waarde</p>	<p><math>\pm 10</math> mm  <math>\pm 15</math> mm  <math>\pm 30</math> mm</p>	<p><math>\pm 5</math> mm  <math>\pm 10</math> mm  <math>\pm 30</math> mm</p>
<p>Noot 1: Voor de funderingen moeten de uitvoeringsspecificaties indien nodig positieve afwijkingen definiëren. De negatieve afwijkingen komen overeen met de tabel.</p> <p>Noot 2: Deze norm heeft geen betrekking op toleranties voor elementen in stortbeton dat direct contact met de grond maakt zoals diepwanden, boorpalen, enz. De norm betreft wel normale funderingen die direct op de grond gegoten worden (bv. op zuiveringsbeton, enzo.)</p>				

Voor de hoogte wordt er gerekend met tolerantieklasse 1. De hoogte kan dan als volgt afwijken [27]:

- $h < 150 \text{ mm} : h - 10 \leq h_i \leq h + 10$
- $150 \text{ mm} \leq h \leq 400 \text{ mm} : h - \left(\frac{h}{50} + 7\right) \leq h_i \leq h + \left(\frac{h}{50} + 7\right)$
- $400 \text{ mm} \leq h \leq 2500 \text{ mm} : h - \left(\frac{h}{140} + \frac{85}{7}\right) \leq h_i \leq h + \left(\frac{h}{140} + \frac{85}{7}\right)$
- $h > 2500 \text{ mm} : h - 30 \leq h_i \leq h + 30$

### 2.7.7. Betondekking

De afwijking van de betondekking kan worden teruggevonden in de NBN EN 13670. Deze afwijking is afhankelijk van de hoogte van de betonnen balk. Door de afwijking van de betondekking gaan de waarden van de nuttige hoogte en de afstand van de getrokken rand tot het zwaartepunt van de trekwapening en drukwapening verschillen. In onderstaande tabel kan de afwijking van de betondekking worden teruggevonden [27].

Tabel 21: Vervolg toegestane afwijkingen van doorsneden [27, p. 39]

N°	Type van afwijking	Beschrijving	Toegestane afwijking $\Delta$	
			Tolerantie-klasse 1	Tolerantie-klasse 2
b	<p>Eis:  <math display="block">c_{nom} + \Delta_{C(plus)} &gt; c &gt; c_{nom} -  \Delta_{C(minus)} </math></p>	Positie van de betonwapening $\Delta_{C(plus)}$		
		$h \leq 150 \text{ mm}$ $h = 400 \text{ mm}$ $h \geq 2500 \text{ mm}$	$\pm 10 \text{ mm}$ $\pm 15 \text{ mm}$ $\pm 20 \text{ mm}$	$\pm 5 \text{ mm}$ $\pm 10 \text{ mm}$ $\pm 20 \text{ mm}$
	$c_{min}$ = minimaal vereiste dekking $c_{nom}$ = nominale dekking = $c_{min} +  \Delta_{C(minus)} $ $c$ = reële dekking $\Delta c$ = toegestane afwijking vanaf $c_{nom}$ $h$ = hoogte van de doorsnede	$\Delta_{C(minus)}$	$\Delta_{Cdev^*}$	$\Delta_{Cdev^*}$

Net als bij de hoogte en de breedte wordt er gerekend met de tolerantieklasse 1. De afwijking van de betondekking kan op de volgende manier worden berekend [27]:

- $h < 150 \text{ mm} : c - 10 \leq c_i \leq c + 10$
- $150 \text{ mm} \leq h \leq 400 \text{ mm} : c - 10 \leq c_i \leq c + \left(\frac{h}{50} + 7\right)$
- $400 \text{ mm} \leq h \leq 2500 \text{ mm} : c - 10 \leq c_i \leq c + \left(\frac{h}{210} + \frac{275}{21}\right)$
- $h > 2500 \text{ mm} : c - 10 \leq c_i \leq c + 25$

### 2.7.8. Kruipfactor

Om de afwijking van de kruipfactor te bepalen worden de formules gebruikt in Eurocode 2, bijlage B. De afwijking is afhankelijk van de relatieve vochtigheid, de betonkwaliteit en de theoretische dikte van het element. Dit kan ook gezien worden op de onderstaande formules [15].

$$\varphi = (\infty, t_0) = \varphi_{RH} * \beta_{fcm} * \beta_{to} \text{ [15, p. 213]}$$

- $\varphi_{RH}$  : Een factor die rekening houdt met het effect van de relatieve vochtigheid op de theoretische kruipcoëfficiënt.
- $\beta_{fcm}$  : Een factor die rekening houdt met het effect van de betondruksterkte op de theoretische kruipcoëfficiënt.
- $\beta_{to}$  : Een factor die rekening houdt met het effect van de ouderdom van het beton op het tijdstip van belasten op de theoretische kruipcoëfficiënt.

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.3333 + 0,1 * h_0} \quad \text{met} \quad h_0 = 2 * \frac{A_c}{u} \quad [15, \text{p. 213}]$$

- u: Blootgestelde buitenomtrek balk
- $h_0$ : Theoretische dikte van het element
- $A_c$ : Betondoorsnede

$$\beta_{fcm} = \frac{16,8}{(f_{ck} + 8)^{0,5}} \quad [15, \text{p. 213}]$$

- $f_{ck}$ : Betonkwaliteit

$$\beta_{t0} = \frac{1}{0,1 + (t_0)^{0,2}} \quad [15, \text{p. 213}]$$

- $t_0$ : Belasting toegepast na  $t_0$  dagen

Door de bovenstaande formules te gebruiken worden verschillende berekeningen uitgevoerd om de variatie te bepalen. Bij de berekening wordt er rekening gehouden met de vochtigheidsgraad. Dit kan 50 % zijn voor binnenmilieu en 80 % zijn voor buitenmilieu.

De kruipfactor met relatieve vochtigheid 50 % voor een doorsnede van 500 x 300 mm<sup>2</sup> met een  $f_{ck}$  gelijk aan 25 N/mm<sup>2</sup> bedraagt 2,676. Wanneer de relatieve vochtigheid verandert naar 80 % bedraagt de kruipfactor 1,928.

Wanneer de betonkwaliteit vermeerderd tot 30 N/mm<sup>2</sup> met dezelfde doorsnede en relatieve vochtigheid van 50 % is de kruipfactor 2,494. Wanneer de relatieve vochtigheid verandert naar 80 % bedraagt de kruipfactor 1,796.

Dus wanneer bepaalde belangrijke parameters zoals de betonkwaliteit en de relatieve vochtigheid variëren voor dezelfde doorsnede hebben deze invloed op de kruipfactor. Om deze variatie te verantwoorden wordt er een interval gekozen van  $0,80 * \varphi \leq \varphi_i \leq 1,40 * \varphi$ . Dit wil zeggen dat de minimale waarde 0,8 keer de kruipfactor is dus 20 % afwijkt t.o.v. de oorspronkelijke kruipfactor. De maximale kruipfactor 1,4 keer groter is dan de oorspronkelijke kruipfactor, dit is dan 40 %.

## 2.8. Experimenteel onderzoek scheurwijdte en scheurafstand in gewapend beton

Er wordt een experimenteel onderzoek uitgevoerd op de scheurwijdte en de scheurafstand door S. Yasir Alam, T. Lenormand, A. Loukili & J.P. Regoin. Het doel van deze studie is om de concrete scheurwijdten en scheurafstand die aanwezig zijn in Eurocode 2 te vergelijken/evalueren met de experimenteel gemeten scheurwijdte en scheurafstand. Het doel van deze studie is vergelijkbaar met onze masterproef en kan onze studie vooruithelpen bij het bespreken van de resultaten. Er wordt nagegaan of Eurocode 2 rekening houdt met alle aspecten tijdens de berekening van de scheurwijdte en de scheurafstand en of er nog variaties kunnen voorkomen [28].

Er worden drie verschillende balken met geometrisch vergelijkbare lengte en hoogte, maar met constante dikte getest op buiging (driepunt buigproef) om de experimentele scheurwijdte en scheurafstand te verkrijgen wanneer de constructie onderworpen is aan belastingen [28].

### 2.8.1. Scheurafstand

Bij de berekening van  $S_{r,max}$  wordt de betondekking expliciet geïntroduceerd. Deze formule en formule voor de scheurwijdte in Eurocode 2 wordt weergegeven bij paragraaf 2.2.4. Er werd een onderzoek naar de scheurafstand gedaan en de invloed van de betondekking over de overdrachtslengte werd bestudeerd. De overdrachtslengte neemt monotoon toe met de toename van de betondekking. Dit effect wordt geïntroduceerd bij de berekening van de scheurafstand. De spanning rond de wapening in het beton is direct afhankelijk van de lengte van de spanningsoverdracht tussen beton en staal [28].

### 2.8.2. Invloed van het effect van de maten in beton

Bij de voorspelling van de scheur is het structurele effect van de maten het centrale probleem. De scheurtesten worden normaal uitgevoerd op kleinere betonelementen en dan geëxtrapoleerd naar grotere structuren. Voor brosse materialen zoals beton wordt de breuk voorafgegaan door een geleidelijk verspreid microscheuren. Wanneer een betonnen constructie wordt belast, wordt de spanningsenergie die door de toegepaste belasting wordt geproduceerd, omgezet in energie die wordt gebruikt om nieuwe scheuren te creëren aan het oppervlak. Deze energie wordt geabsorbeerd in de zone van het breukproces. Voor grote structuren is deze verwaarloosbaar. Hoe groter de structuurgrootte, hoe lager de nominale sterkte. De betonsterkte nadert echter een constante wanneer de afmeting van de betonconstructie erg groot wordt [28].

### 2.8.3. Invloed van het effect van de maten op scheurwijdte

Het scheurgedrag wordt beïnvloed door de structurele afmetingen. Een recente studie heeft aangetoond dat het scheuren in gewoon beton afhankelijk is van de grootte van de mechanisme. Er is waargenomen dat wanneer geometrisch vergelijkbare monsters worden getest onder dezelfde belastings- en grensomstandigheden, de voortplanting van scheuren in grote balken niet dezelfde is als in kleine balken. Een numerieke studie van gewapend beton op basis van scheuren in mechanica regels hebben aangetoond dat het scheurgedrag afhankelijk is van de grootte. De scheurwijdte werd berekend in trekelementen met constante centrale wapening en staaflengte maar met variërende dwarsdoorsnede. Er werd ondervonden dat de scheurbreedte afneemt naarmate de breedte van de balk toeneemt [28].

### 2.8.4. Gegevens experiment

#### 2.8.4.1. Materialen

Het beton dat gebruikt is om de balken te maken, is gemaakt van Portlandcement type 52.5, zand, aggregaat en water met de mengverhoudingen. Zie onderstaande tabel [28].

Tabel 22: Mengverhouding beton [28, p. 3]

Cement (Portland 52.5)	312 kg/m <sup>3</sup>
Sand	818 kg/m <sup>3</sup>
Coarse aggregate (5 -12,5 mm)	936 kg/m <sup>3</sup>
Water	219 kg/m <sup>3</sup>

De druksterkte van beton wordt na 28 dagen getest met cilindrische monsters met een diameter van 10 cm en een hoogte van 20 cm en blijkt 40 N/mm<sup>2</sup> te zijn. De balken zijn versterkt met wapening. De langswapening van balken is samengesteld uit vervormde staven met een diameter van 10, 14 en 20 mm, terwijl de dwarsversterking is aangebracht door vervormde staven met een diameter van 6 mm. De stalen staven zijn in beide gevallen type  $f_{yk} \geq 500$  MPa [28].

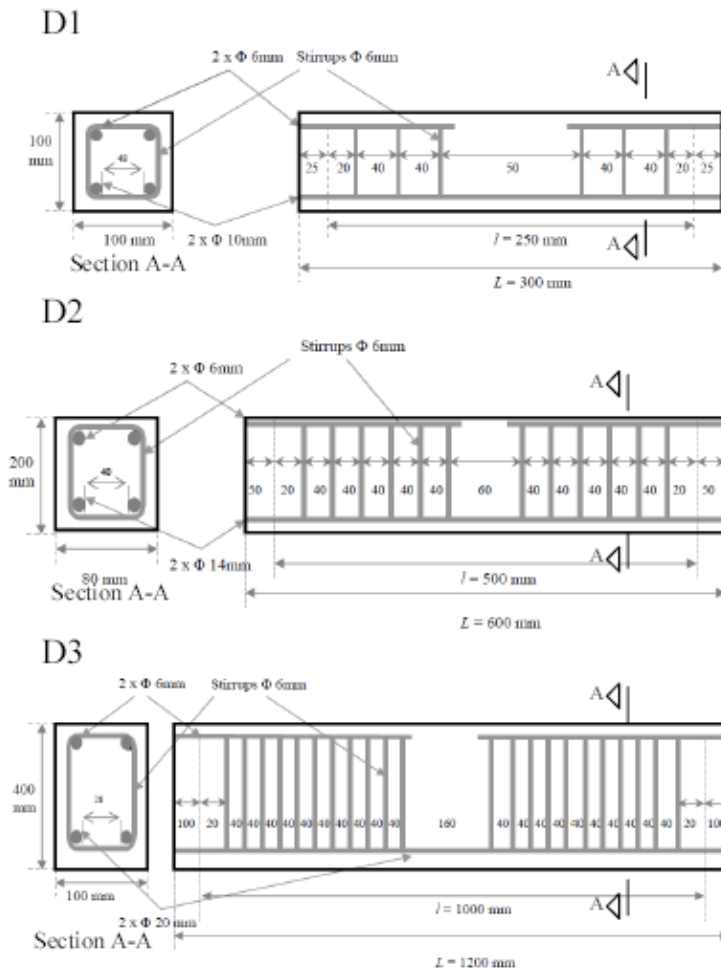
#### 2.8.4.2. Balken

Er worden drie verschillende balken getest. De balken hebben een constante breedte van 100 mm, en de andere parameters worden in de volgende tabel weergegeven [28].

*Tabel 23: Parameters balken [28, p. 3]*

Beam		b (mm)	h (mm)	L (mm)	l (mm)	$\rho$ (%)	Cover (mm)
<b>Small</b>	D1	100	100	400	300	1,99	10
<b>Medium</b>	D2	100	200	800	600	1,84	20
<b>Large</b>	D3	100	400	1600	1200	1,83	40

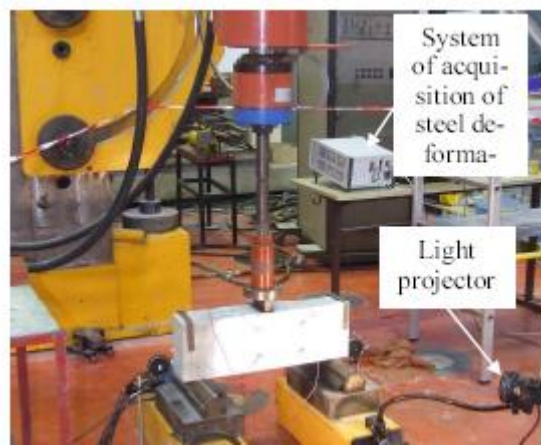
De balken zijn versterkt met een constante wapeningsverhouding door de diameter van de staven te variëren, het aantal balken wordt echter constant gehouden. Stalen beugels worden gebruikt in het gebied van hoge afschuiving. Er worden twee hangerstangen met een diameter van 6 mm gebruikt om stalen beugels te ondersteunen. Deze staven worden gesneden waar de beugels niet voorzien zijn [28].



Figuur 36: Drie verschillende balken [28, p. 3]

**2.8.5. Test procedure**

Alle experimenten worden uitgevoerd met behulp van dezelfde testmachine met gecontroleerde verplaatsing. De testopstelling wordt op de onderstaande figuur getoond [28].



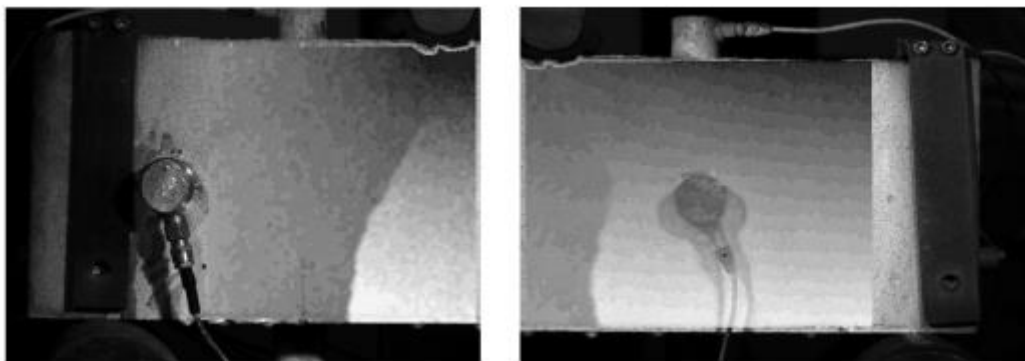
Figuur 37: Testopstelling [28, p. 4]

De belasting wordt in het midden van de overspanning toegepast met een cilindrische vijzel, waardoor de puntbelasting gegarandeerd wordt. De belasting wordt overgebracht naar de balk. De test wordt uitgevoerd met een constante verticale verplaatsingsnelheid van 0,5 mm/min. De verplaatsing wordt gemeten met behulp van een lasersensor. Deze meet de verplaatsing in het midden van de balk onder de opgelegde belasting. De sensor is bevestigd aan een stalen hanger, die wordt ondersteund om rekening te houden met de afwikkeling van de balk op steunen [28].

Voor elke balken zijn twee elektrische rekstrookjes bevestigd aan het ondervlak van de spanningsstaal, in het midden van de overspanning om de longitudinale spanning in staal te meten tijdens de test [28].

### **2.8.6. Digitale beeldcorrelatie**

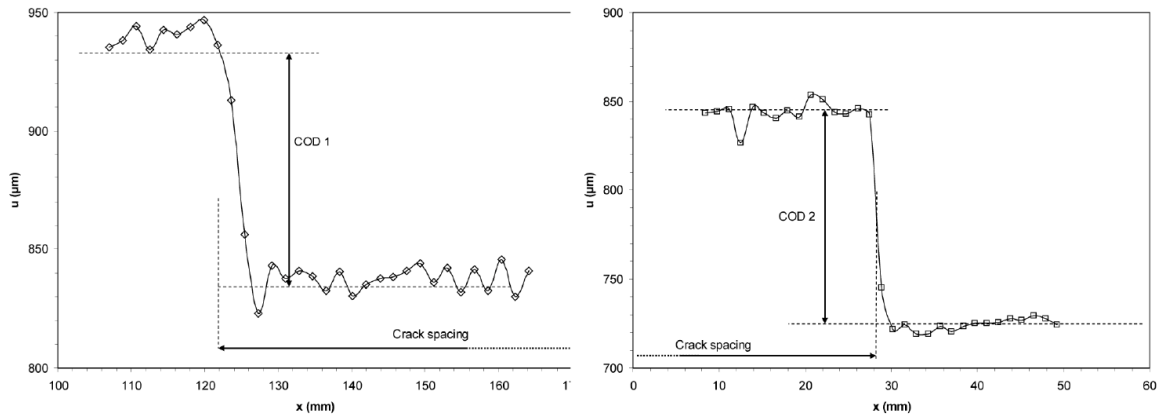
De meting van scheurbreedte en scheurafstand wordt uitgevoerd met behulp van een digitaal beeldcorrelatiesysteem. De digitale beeldcorrelatie is een optische methode om het oppervlakverplaatsingsveld tussen twee tijdstippen te meten. Het is gebaseerd op de vergelijking van twee afbeeldingen op grijswaarden die zijn opgenomen voor en na vervorming. De eerste afbeelding wordt de referentie genoemd en de tweede afbeelding is de vervormde afbeelding. Het verplaatsingsveld wordt dan bepaald door de beweging van de sub-afbeelding in een gebied dat is gedefinieerd als de correlatie zone. De correlatie bestaat uit het overwegen van een segment (sub-beeld) in de referentie afbeelding en het lokaliseren van dat segment (sub-beeld) in het vervormde beeld, waar de maximale waarschijnlijkheid wordt bereikt [28].



*Figuur 38: Digitale beelden [28, p. 5]*

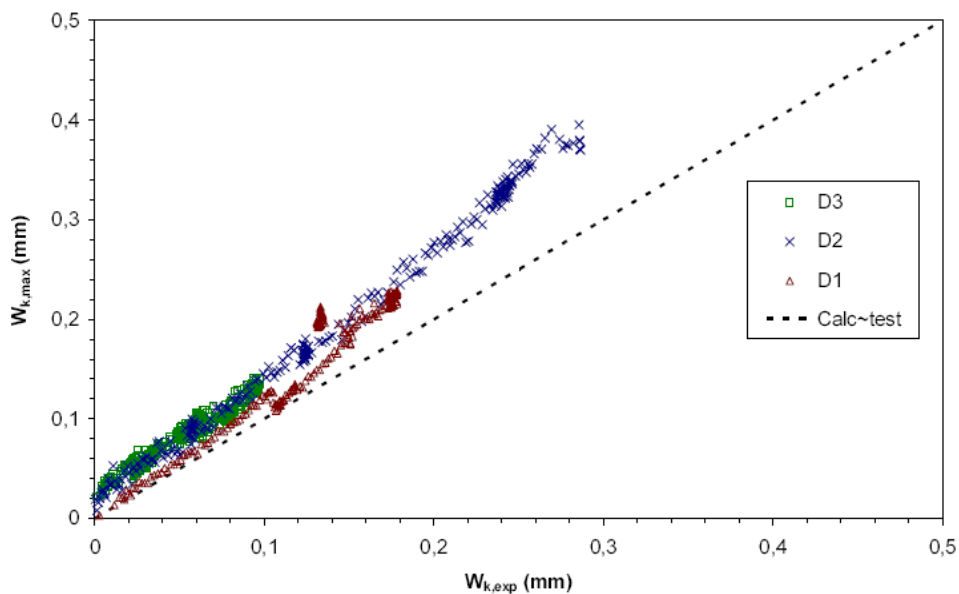
### **2.8.7. Resultaten experiment**

De meting van de verplaatsing van de scheuropening en de scheurafstand door digitale beeldcorrelatie is weergegeven op de volgende grafiek. COD (crack opening displacement) wordt gemeten als verplaatsingsprong op het oppervlak van de balk. Meerdere scheuren worden gevonden, maar alleen de maximale COD wordt in de verdere analyse beschouwd [28].



Figuur 39: COD en scheurafstand van balk D1 [28, p. 5]

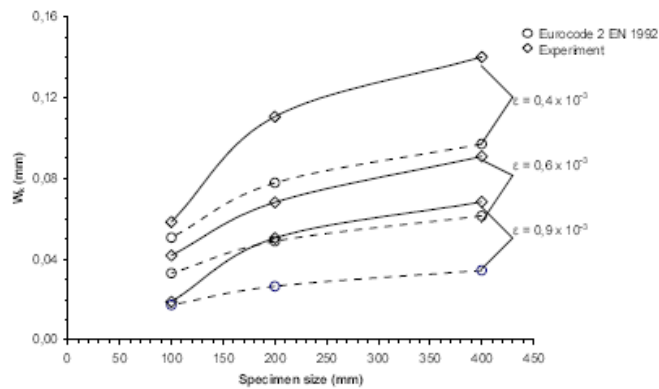
De scheurwijdte gemeten met behulp van digitale beeldcorrelatietechniek wordt uitgezet met de formule van de scheurwijdte in Eurocode 2. De scheurwijdte wordt gemeten aan de onderste vezel van de balk, waar de scheurbreedte maximaal is. De resultaten worden in de onderstaande grafiek weergegeven. Het is duidelijk dat de formule in Eurocode 2 de scheurwijdte voor de drie grootte onderschat. Het verschil tussen gemeten en berekende waarde overschrijdt wanneer de spanning hoger is [28].



Figuur 40: Grafiek  $w_k$ , experimenteel en  $w_{k,max}$  (Eurocode 2) [28, p. 5]

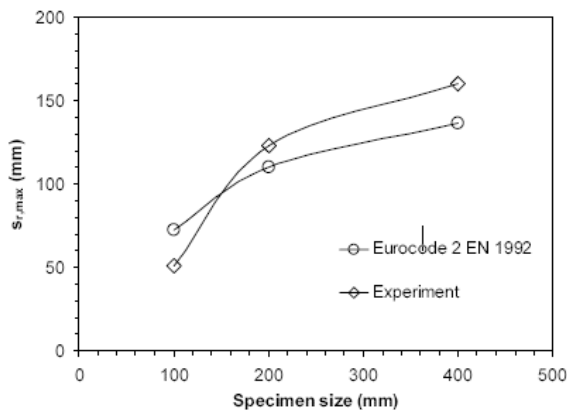
Een gedetailleerde observatie van het effect van de maten op de scheurwijdte die door Eurocode 2 berekend wordt, wordt weergegeven op de volgende figuur. Het is duidelijk dat de berekende scheurwijdte min of meer vergelijkbaar is voor een balk met een kleine afmeting, maar de fout overschrijdt met toenemende afmetingen [28].





Figuur 41: Grafiek invloed effect van de maten [28, p. 6]

De scheurwijdte verkregen met de formule van Eurocode 2 houdt geen rekening met het effect van de maten. De verkregen waarden zijn verschillend voor de drie balken met drie verschillende groottes. Maar dit moet niet worden beschouwd als het effect van de maten omdat de formule in Eurocode 2 alleen afhankelijk is van de betondekking en diameter van de staven. Maar het werkelijke effect van de maten is het effect van de afmetingen van de staven in de structuur van het totale scheurmechanisme [28].



Figuur 42: Grafiek scheurafstand volgens experiment en formule Eurocode 2 [28, p. 6]

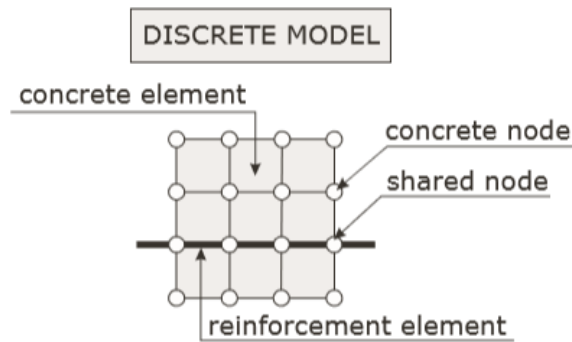
De maximale afstand tussen scheuren wordt ook gemeten bij staalspanning gelijk aan 300 N/mm<sup>2</sup>. Op de bovenstaande figuur wordt de experimentele scheurafstand vergeleken met de afstand verkregen uit de formule van Eurocode 2. Het is duidelijk zichtbaar dat voor de middelgrote balk, D2 en grote balk, D3, de scheurafstand wordt onderschat [28].

Uiteindelijk kan er gezegd worden dat dit experimenteel onderzoek heeft aangetoond dat het effect van de structurele afmeting op scheurbreedte en scheurafstand in gewapend beton groot is. De resultaten laten zien dat de gemeten waarden min of meer overeenstemmen met de berekende waarden wanneer de spanning laag is en de balk klein is. Maar er is een belangrijk aspect, namelijk het effect van de maten (zie de experimentele scheurbreedte en scheurafstand). Deze is niet opgenomen in de huidige ontwerpformules van Eurocode 2 [28].

## 2.9. Numerieke modellering van diagonale scheuren

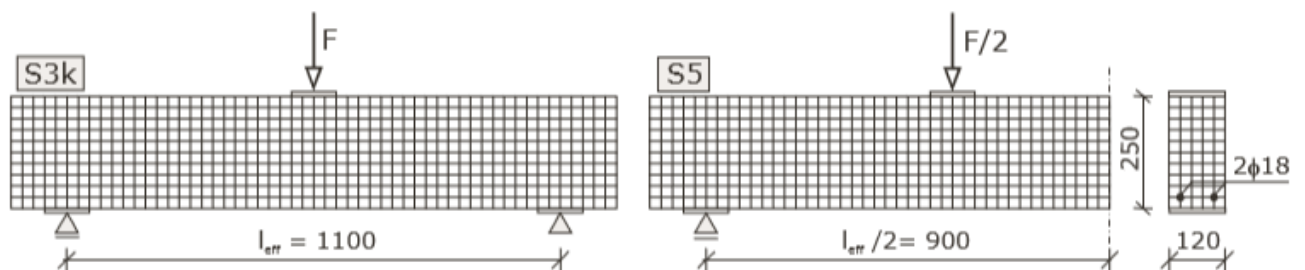
### 2.9.1. Methode

In dit deel van de literatuurstudie wordt het numeriek modeleren van diagonale scheuren in betonnen balken besproken. Deze studie geeft weer welke scheuren er op de werf kunnen verwacht worden als er een bepaalde kracht op de balk wordt uitgeoefend. De balken die werden gebruikt zijn in lengte richting versterkt maar zijn niet versterkt voor de dwarskracht [29].



Figuur 43: Discrete model for reinforcement [29, p. 309]

Voor de numerieke simulatie werden er twee balken getest. De eerste balk, S5, heeft een lengte van 1,8 m en hierop werden de testen op een halve balk uitgevoerd. Bij de tweede balk, S3k, werden de proeven uitgevoerd over de volledige lengte van 1,1 m. De balken hebben een doorsnede met de breedte gelijk aan 0,12 m, de hoogte gelijk aan 0,25 m en de diepte gelijk aan 0,22m [29].



Figuur 44: FEM - mesh for beams S3k and S5 [29, p. 309]

Voor de eindige elementenanalyse wordt er gebruik gemaakt van het ANSYS programma. Hierbij werd er een acht knopen element gebruikt. Deze knopen worden uit de bibliotheek van het programma gehaald. Elke knoop van het element heeft 3 vrijheidsgraden: de x-richting, de y-richting en de z-richting. Hiermee kan het programma het plastisch gedrag, de scheuren en het pletten van het beton in de drie assen beschrijven. Bij het inbrengen van de balken in het programma werd er een rechthoekige verdeling gebruikt. Deze verdeling is te zien op figuur 44. De verbinding tussen het staal en het beton wordt gedaan door de verplaatsing van de knopen. De balken worden bij de eindige elementen methode onderverdeeld in vele kleine rechthoekige blokjes, dit is nodig om de balk te kunnen

modelleren. Deze mazen wordt aanbevolen bij het maken van een simulatie als het om een vast element gaat [29].

Voor het modelleren van het falen van beton werd de volgende formule gebruikt:

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad [29, \text{p. 310}]$$

Waarbij

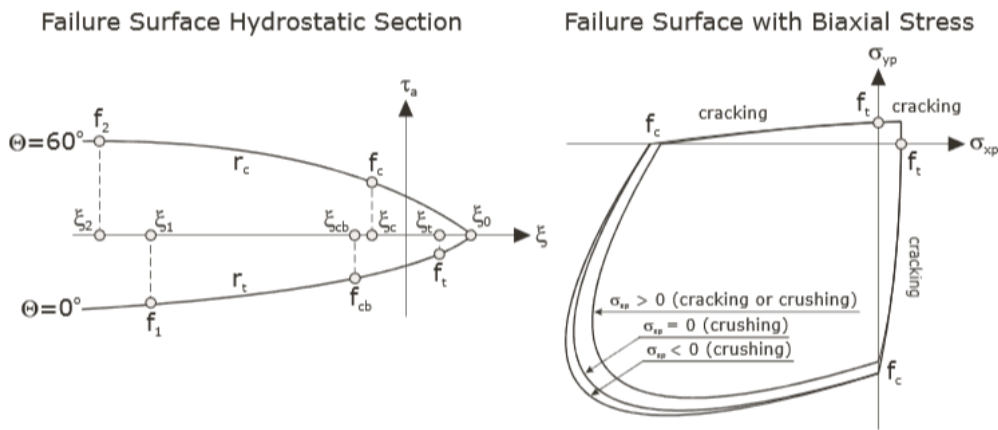
- F : de functie van de stress omstandigheden :  $\sigma_{xp}$ ,  $\sigma_{yp}$  en  $\sigma_{zp}$ , deze lopen in de richting van het coördinaten systeem x, y en z.
- S : het faaloppervlak
- $f_c$  : uni-axiale druksterkte die verbrijzeling veroorzaakt

Bij dit criterium kan de niet-lineaire respons van het beton op tri-axiaal gedrag worden toegepast. Bij het faaloppervlak moet er gekeken worden naar de hoofdspanning. Het faaloppervlak is afhankelijk van de hoofdspanning:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  en  $\sigma_3$ . Hierbij is  $\sigma_1$  de grootste spanning en  $\sigma_3$  de kleinste spanning. De spanning worden als volgt berekent [29]:

$$\sigma_1 = \max(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \quad [29, \text{p. 310}]$$

$$\sigma_3 = \min(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \quad [29, \text{p. 310}]$$

Daarnaast is het faaloppervlak afhankelijk van de sterkte parameters zoals de ultieme bi-axiale druksterkte die verbrijzeling veroorzaakt, de uiterst druksterkte voor een toestand van bi-axiale compressie en de ultieme druksterkte voor een toestand van uni-axiale compressie. De geometrische interpretatie is terug te vinden in de onderstaand figuur [29].



Figuur 45: The limit surface [29, p. 310]

Het falen van beton kan worden onderscheden wanneer de scheurvorming zich voordoet door trek of druk. De trek of druk wordt dan beschouwd als hoofdspanning. Als de berekening wordt gedaan op basis van scheurvorming door druk dan wordt de onderstaande formule gebruikt. De functie F correspondeert met de gemiddelde tangentiële spanning die recht evenredig is met de tweede invariant van de deviator [29].

$$F = F_1 = \frac{1}{\sqrt{15}} * ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)^{1/2} \quad [29, \text{p. 311}]$$

Voor het faaloppervlak wordt er een elliptisch oppervlak gebruikt. Hierbij wordt dan de volgende berekening gebruikt om het faaloppervlak te bepalen [29]:

$$S = S_1 = \frac{2 * r_c * (r_c^2 - r_t^2) * \cos \theta + r_c * (2 * r_t - r_c) * (4 * (r_c^2 - r_t^2) * \cos^2 \theta + 5 * r_t^2 - 4 * r_t * r_c)^{1/2}}{4 * (r_c^2 - r_t^2) * \cos^2 \theta + (r_c - 2 * r_t)^2} \quad [29, p. 311]$$

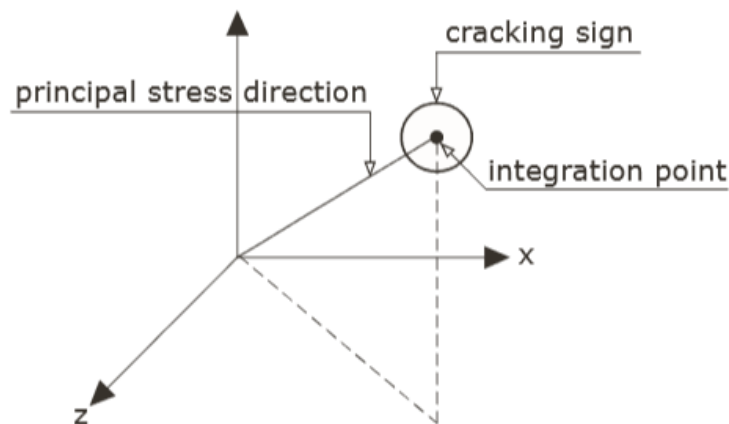
Dit is enkel geldig als er in de drie richtingen druk is. Als er in één van de drie richtingen geen druk is maar trek, worden andere formules gebruikt. Dit is ook zo wanneer er in twee van de drie richting trek is of wanneer er in drie richting trek is [29].

Voor trek in de drie richtingen worden de volgende formules gebruikt [29]:

$$F = F_A = \sigma_i, i = 1,2,3 \quad [29, p. 312]$$

$$S = S_4 = \frac{f_t}{f_c} \quad [29, p. 312]$$

Bij het ingeven van de formules in het FEM-model of berekening werden er scheuren opgemerkt als er trekspanning was in elke richting. Deze trekspanning lag dan buiten het bezwijkoppervlak. Bij het scheuren viel de elasticiteitsmodulus evenwijdig aan de hoofdtrekspanningsrichting en de drie hoofddrukspanningscomponenten zich buiten het oppervlak bevinden. Een scheur wordt in het model weergegeven door een cirkel zoals op onderstaande figuur 46 is te zien. De scheur doet zich voor als de limiet van de treksterkte wordt bereikt. De scheur wordt altijd aangeduid met een cirkel of deze nu openstaat of gesloten is [29].



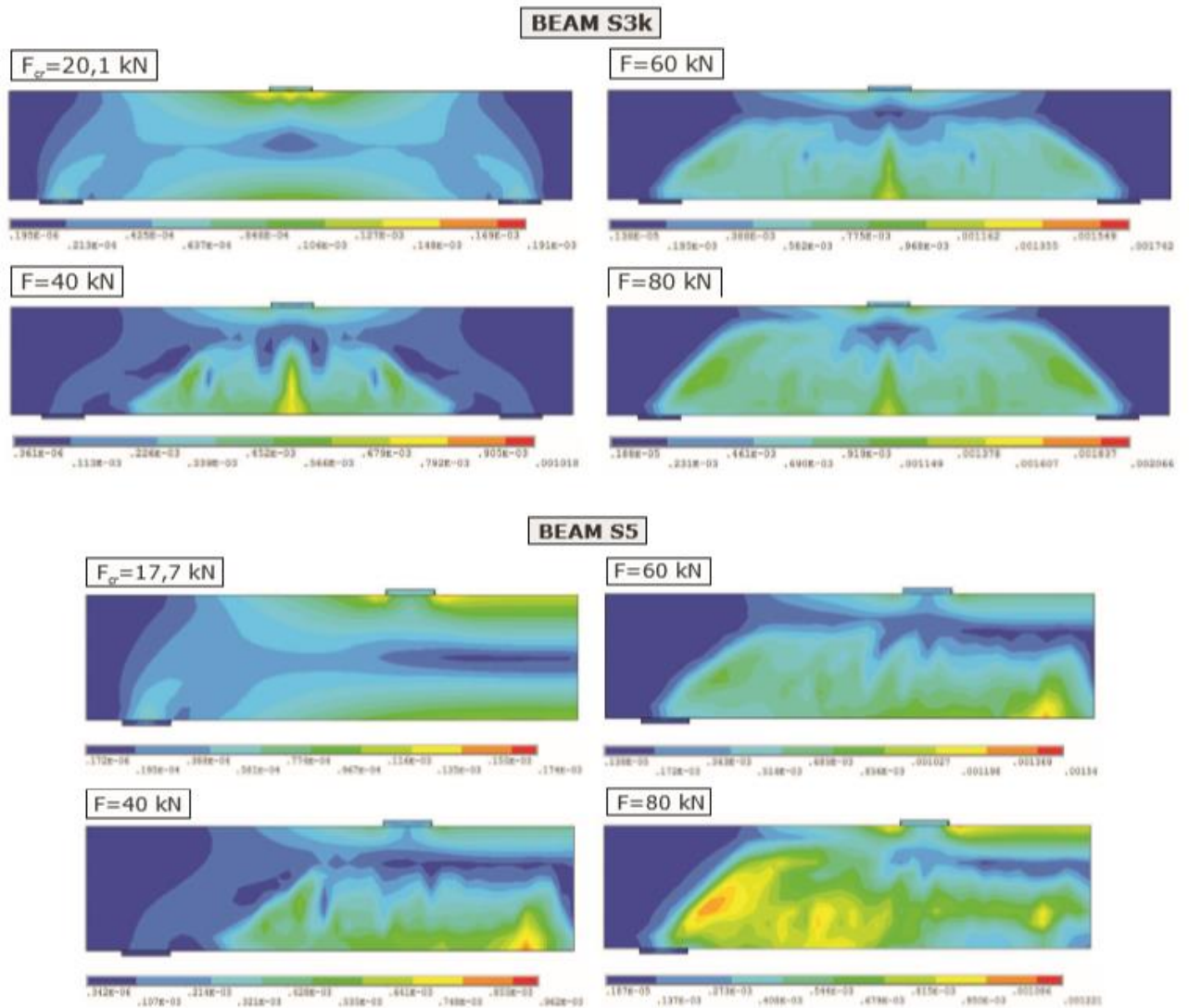
Figuur 46: Cracking outline [29, p. 312]

Om een onderscheid te maken tussen verschillende scheuren worden er kleuren gebruikt. Een rode cirkel is de eerste scheur, een groene cirkel is een tweede scheur en een blauwe cirkel is de derde scheur [29].

### 2.9.2. Resultaat

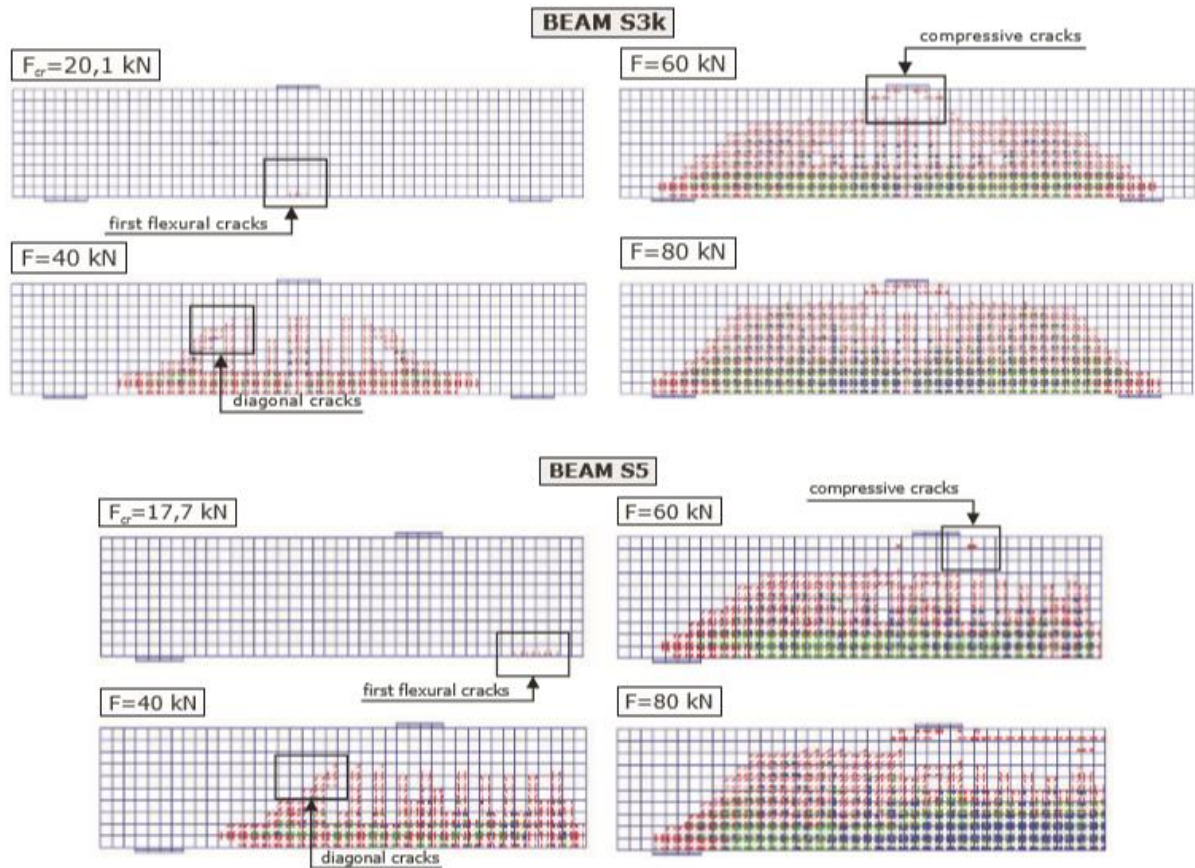
Als resultaat van de berekening met de eindige elementen methode wordt er een dislocatie van de knooppunten bekomen en van de stresscomponenten langs drie assen van het globale coördinatensysteem. Op basis van het resultaat werd er met het ANSYS-programma een figuur met scheuren op uitgetekend. De volgende figuur geeft de scheuren weer voor de 2 balken. S3k met een effectieve lengte van 1,1 meter en S5 met een

effectieve lengte van 1,8 m. De onderstaande figuur geeft verschillende scheurvelden weer als de belasting van buitenaf verandert. De kracht wordt systematisch verhoogd. Er wordt vertrokken van een kracht van 20 kN en wordt verhoogd tot een kracht van 80 kN [29].



Figuur 47: Strain trajectories for beams at different load levels [29, p. 318]

Op de onderstaande figuur is de evolutie van de scheuren beter zichtbaar. De rode kleur is de eerste scheur, de groene kleur is de tweede keer dat het scheurt en de blauwe kleur is de derde scheur. Het is goed zichtbaar dat bij 20 kN bijna nog geen scheur is maar dat de eerste scheuren zich stilaan beginnen te vormen. Bij 40 kN worden de scheuren al wat groter en dit zet zich verder tot 80 kN. De grootte van de scheuren blijft toenemen [29].



Figuur 48: Evolutie van het scheurpatroon [29, p. 319]

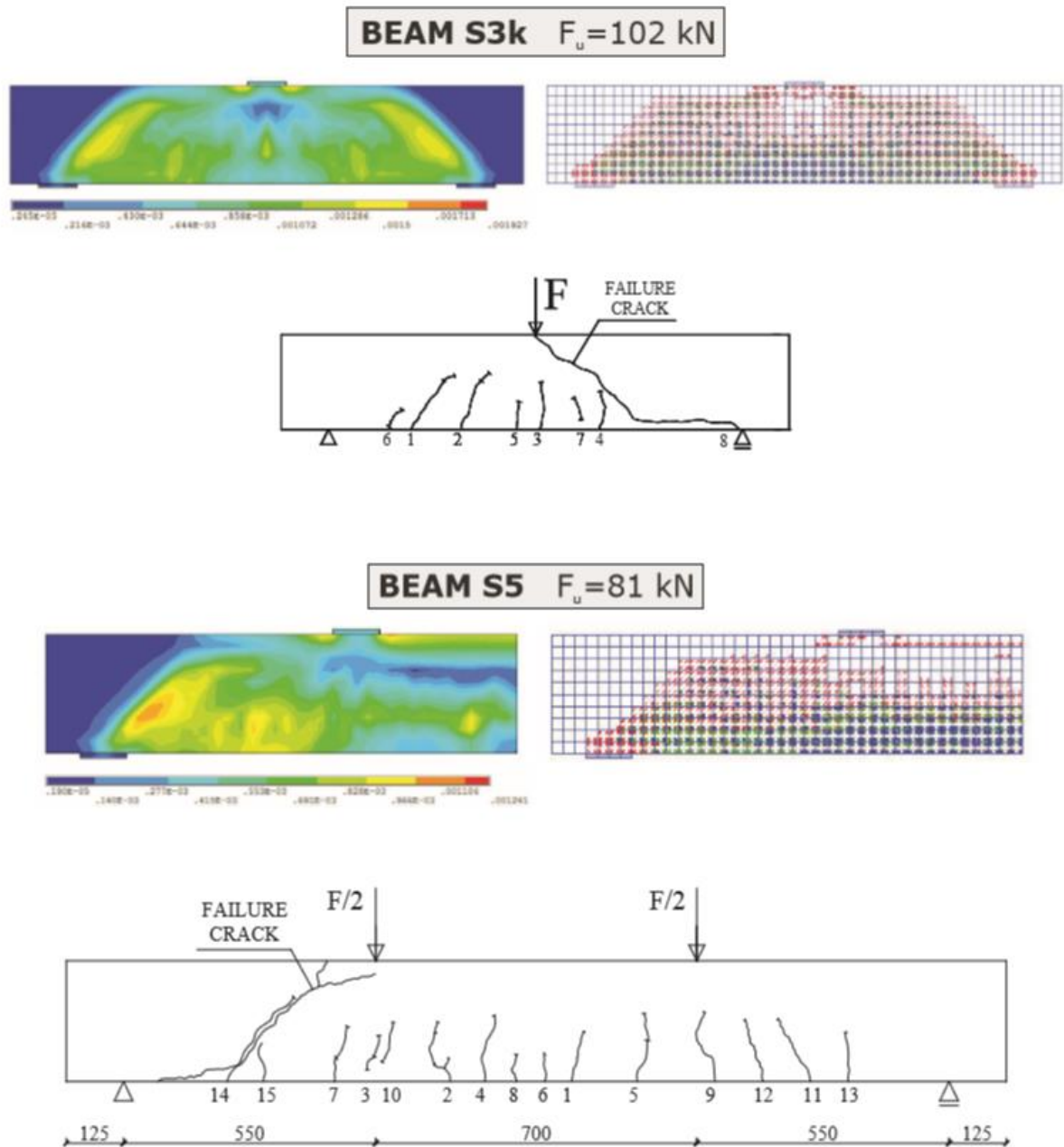
Tussen beide balken is er een verschil waarneembaar. De balk S3k is een korte balk en de balk S5 is een lange balk. De schade van de balk is dus afhankelijk van de lengte van de balk. Het verschil tussen de balken is vooral op de figuur 48 zichtbaar [29].

De evaluatie van de scheur kan bij deze figuur geanalyseerd worden. Op de figuur is zichtbaar dat er in het midden van de balk de eerste scheuren optreden en deze verspreiden zich in verticale richting. Als de belasting 40 kN bereikte, veroorzaakte de afschuifspanning een verandering bij de scheuren in het afschuifgebied. Deze verandering doet de oriëntatie van de scheuren veranderen en worden de scheuren diagonale scheuren. Als de belasting verder wordt verhoogd ontstaan er compressie scheuren. Een gelijkaardige scheurevaluatie wordt waargenomen tijdens het testen van de balken [29].

Volgens de rekverdelingen kunnen de volgende spanningstoestanden worden onderscheiden: buigzone in het midden van de balk en schuifspanning in de compressie zone aan het bovenste deel van de balk. Die vindt plaats dichtbij de plaats waar de kracht wordt uitgeoefend. De intensiteit van de rek in de voorgaande zone gaf aan welk soort schadeproces er heerste. Bij toename van spanning in de afschuivende en buigende zone was er een grotere intensiteit in balk S5. Dit duidt op een plotselinge breuk. Dezelfde waarnemingen werden gedaan bij het testen van de balk zelf. Er was een breuk van brosse aard waarneembaar bij balk S5. Tussen beide balk kan er een verschil worden waargenomen. In de numeriek simulatie van balk S5 is er in het midden van de balk een lagere afname dan bij balk S3k. Dit kan verklaard worden door de lagere stijfheid in de

grotere balk S5, door het grotere aantal verticale scheuren die dieper in balk S5 gaan dan bij de kortere balk S3k [29].

Een goede overeenkomst wordt gezien bij het vergelijken van de numerieke beelden en de barsten in de balk als deze werd belast met de kracht zoals weergegeven bij het numeriek model. Op onderstaande figuur zijn de overeenkomsten tussen beide modellen goed zichtbaar. Door de goede overeenkomst tussen het numerieke beeld en de rekverdeling onder uiteindelijke belasting kan geconcludeerd worden dat het numerieke model dat werd gebruikt kan worden toegepast voor de analyse van diagonale scheuren in gewapende betonnen elementen [29].



Figuur 49: Scheurpatroon van numeriek en experimenteel resultaat [29, p. 320]

Als conclusie kan er gezegd worden dat de modellen zeer goed overeenkomen. Zowel voor balk S5 als voor balk S3k. De scheurmodellen van de numeriek analyse komt goed overeen met de scheuren die door het experimenteel werden gemeten [29].



### 3. Methode

Om deze masterproef uit te voeren, werd het onderwerp theoretisch benaderd. Welke masterproeven of onderzoeken werden er al uitgevoerd rond dit thema, hoe werden de onderwerpen aangepakt en wat konden wij gebruiken voor onze thesis. Al deze informatie werd verzameld om goed te starten aan het onderzoek.

Nadat voldoende informatie voor de literatuurstudie gevonden werd, gingen we een stappenplan opstellen om de maximale scheurwijdte te berekenen. Door een Matlab berekening op te stellen konden we de berekeningen rond scheurvorming in beton in kaart brengen. Deze berekeningen werden opgesteld voor een balk en een plaat.

De berekeningen van de scheurwijdtes werden uitgevoerd door 3 verschillende berekeningsmethodes. Als eerst werd de berekening van de scheurwijdte gedaan met de formule voor de uitwendige belasting in Eurocode 2 deel 1, als tweede werd de scheurwijdte berekend door middel van de formules van opgelegde verhinderde vervorming in Eurocode 2 deel 1 door gebruik te maken van de formule voor minimale wapening en als laatste werd dit berekend met de formules van de opgelegde verhinderde vervorming in Eurocode 2 deel 3, bijlage M.

De eerste methode was de berekening van de scheurwijdte volgens Eurocode 2 deel 1. Bij deze berekening werd er rekening gehouden met de uitwendige belastingen, namelijk de buiging. We vertrokken van een gegeven betondoorsnede waarbij we na het berekenen een scheurwijdte van 0,30 mm kregen. Daarna gingen we de inputgegevens, die gebruikt werden voor de scheurwijdte van 0,30 mm, laten variëren binnen hun normatieve grenzen door gebruik te maken van de Monte Carlo simulatie. Een voorbeeld van een variërende inputwaarde is de betondekking. Met deze variërende inputwaarden gingen we de scheurwijdte opnieuw berekenen. Deze berekening voerden we dan 100 000 keren uit met de variërende inputwaarden in Matlab. Uit deze berekening kwamen dan verschillende scheurwijdtes. Deze verschillende scheurwijdtes noemden we een range van waarden. Deze range was dan een indicatie van welke waarde van scheuren op de werf kunnen voorkomen en welke waarde aanvaard konden worden.

De tweede methode was de berekening van de scheurwijdtes door middel van de formules van opgelegde verhinderde vervorming in Eurocode 2 deel 1, waarbij gebruik gemaakt werd van de formule voor de minimale wapening met centrische trek. Hierbij werden eerst de inputwaarden gekozen zodat de staalspanning, de gecorrigeerde diameter en een scheurwijdte gelijk aan 0,30 mm berekend werd. Op deze inputwaarden werd dan de variatie uitgevoerd, bijvoorbeeld op de minimale wapening. Vertrekkend van de berekende staalspanning en de gecorrigeerde diameter werd er verder gerekend naar de scheurwijdte. De variaties op de inputwaarden werden toegepast in Matlab. Hierop werd de Monte Carlo simulatie op toegepast, waarbij de inputgegevens varieerden binnen hun normatieve grenzen. Daarna werd de staalspanning en de gecorrigeerde diameter als input gebruikt om de scheurwijdte te bepalen. Als uitkomst kregen we dan verschillende scheurwijdtes.

Als derde werd de scheurwijdte ten gevolge van de opgelegde verhinderde vervormingen berekend volgens de formules in Eurocode 2 deel 3 met trek. Hierbij werd er gebruik gemaakt van bijlage M. De scheurwijdte werd berekend met dezelfde methode als de eerste berekening, vertrekkend van een gegeven betondoorsnede die als resultaat een scheurwijdte gelijk aan 0,30 mm gaf. Daarna lieten we de inputgegevens variëren binnen

hun normatieve grenzen. De variatie op inputwaarden werd gedaan in Matlab door een Monte Carlo simulatie op toe te passen. Als outputwaarden werd er dan een range van scheurwijdtes verkregen. Dit was dan de derde range van scheurwijdtes.

Daarna konden de drie verkregen intervallen met elkaar vergeleken worden waarbij het gezochte acceptatie interval  $[w_{min}, w_{max}]$  verkregen werd. Daarnaast werd er gekeken of er een samenhang is tussen de drie verschillende berekeningsmethodes. Op deze manier konden we toetsen of er een samenhang te vinden was tussen de verkregen resultaten en de waarden uit Eurocode 2. Nadien kon dan gekeken worden op de werf of de scheuren ook binnen die range van waarden vallen. Indien mogelijk, konden de waarden dan ook vergeleken worden met de waarden die op de werf gemeten werden. Afhankelijk van de berekende waarden kon er een conclusie getrokken worden in verband met de toelaatbare scheurwijdte in betonnen constructies.

## 4. Resultaten

### 4.1. Berekeningen

Als eerste wordt er gekozen om de drie berekeningsmethoden toe te passen op een balk. Hiervoor wordt er een hoogte en een breedte gekozen zodat er een scheurwijdte uitgerekend kan worden die ongeveer gelijk is aan 0,30 mm zoals vermeld in Eurocode 2. De gekozen hoogte is gelijk aan 600 mm en de breedte is 300 mm. Daarna worden de andere inputwaarden gekozen om de scheurwijdten opnieuw te berekenen en het interval te bepalen.

Als tweede wordt er een plaat gekozen en worden de drie berekeningen opnieuw uitgevoerd. Hiervoor wordt opnieuw een hoogte en een breedte gekozen waarbij de scheurwijdte ongeveer gelijk is aan 0,30 mm. De gekozen hoogte is 250 mm en de breedte is 1 m of 1000 mm. De breedte is per lopende meter en deze inputwaarde blijft constant. Bij balk varieert deze waarde wel.

### 4.2. Scheurwijdte t.g.v. buiging, balk

Als eerst worden de inputwaarden gekozen zodat een scheurwijdte van 0,3 mm wordt uitgerekend. Hieronder is de berekening hiervan terug te vinden. De berekening van deze scheurwijdte wordt gedaan zoals vermeld in Eurocode 2 en is terug te vinden in de literatuurstudie: 2.2.4 Berekening scheurwijdte.

#### 4.2.1. Inputwaarden

Tabel 24: Inputwaarden van de balk bij EC2-1, buiging

	Afkorting	Waarde
<b>Betondekking</b>	c	40 mm
<b>Betonsterkte</b>	$f_{ck}$	30 N/mm <sup>2</sup>
<b>Kruip coëfficiënt</b>	$\varphi$	1,50
<b>Hoogte</b>	h	600 mm
<b>Breedte</b>	b	300 mm
<b>Diameter beugel</b>	$\Phi_b$	10 mm
<b>Trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	25 mm
<b>Aantal trekstaven</b>	$n_{s1}$	2
<b>Drukwapening</b>	$\Phi_{s2}$	14 mm
<b>Aantal drukstaven</b>	$n_{s2}$	2
<b>Buigmoment SLS-Q</b>	$M_{Ed}$	120 kNm
<b>Elasticiteitsmodulus staal</b>	$E_s$	200000 N/mm <sup>2</sup>
<b>Staalsterkte</b>	$f_{yk}$	500 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.2.2. Berekening

- $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 30 + 8 = 38 \text{ N/mm}^2$
- $E_{cm} = 22000 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} = 22000 * \left(\frac{38}{10}\right)^{0,3} = 32836,57 \frac{N}{mm^2}$
- $E_c = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi} = \frac{32836,57}{1 + 1,5} = 13134,63 \frac{N}{mm^2}$
- $\alpha = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{13134,63} = 15,23$
- $d_1 = c + \phi_b + \frac{\phi_{s1}}{2} = 40 + 10 + \frac{25}{2} = 62,50 \text{ mm}$

- $d_2 = c + \phi_b + \frac{\phi_{s2}}{2} = 40 + 10 + \frac{14}{2} = 57.00 \text{ mm}$
- $d = h - d_1 = 600 - 62.50 = 537.50 \text{ mm}$
- $A_{s1} = \pi * n_{s1} * \frac{\phi_{s1}^2}{4} = \pi * 2 * \frac{25^2}{4} = 981.75 \text{ mm}^2$
- $A_{s2} = \pi * n_{s2} * \frac{\phi_{s2}^2}{4} = \pi * 2 * \frac{14^2}{4} = 307.88 \text{ mm}^2$
- $A_{stot} = A_{s1} + A_{s2} = 981.75 + 307.88 = 1289.62 \text{ mm}^2$
- $x = \frac{-\alpha * A_{stot}}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha * A_{stot}}{b}\right)^2 + \frac{2 * \alpha * (A_{s1} * d + A_{s2} * d_2)}{b}} = \frac{-15.23 * 1289.62}{300} + \sqrt{\left(\frac{15.23 * 1289.62}{300}\right)^2 + \frac{2 * 15.23 * (981.75 * 537.50 + 307.88 * 57.00)}{300}} = 178.74 \text{ mm}$
- $\sigma_c = \frac{M_{ed} * x}{\frac{b * x^3}{3} + \alpha * (A_{s1} * (d-x)^2 + A_{s2} * (x-d_2)^2)} = \frac{120 * 10^6 * 178.74}{\frac{300 * 178.74^3}{3} + 15.23 * (981.75 * (537.5 - 178.74)^2 + 307.88 * (178.74 - 57)^2)} = 8.4 \frac{N}{\text{mm}^2}$
- $\sigma_{s1} = \frac{\alpha * \sigma_c * (d-x)}{x} = \frac{15.23 * 8.36 * (537.50 - 178.74)}{178.74} = 255.61 \frac{N}{\text{mm}^2}$
- $\sigma_{s2} = \frac{\alpha * \sigma_c * (x-d_2)}{x} = \frac{15.23 * 8.36 * (178.74 - 57.00)}{178.74} = 87 \frac{N}{\text{mm}^2}$
- $f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 0,3 * 30^{\frac{2}{3}} = 2.90 \frac{N}{\text{mm}^2}$
- $x_2 = \frac{\frac{b * h^2}{2} + \alpha * (A_{s1} * d + A_{s2} * d_2)}{A_{s1} * \alpha + A_{s2} * \alpha + b * h} = \frac{\frac{300 * 600^2}{2} + 15.23 * (981.75 * 537.5 + 307.88 * 57.00)}{981.75 * 15.23 + 307.88 * 15.23 + 300 * 600} = 312 \text{ mm}$
- $I = \frac{b * x^3}{3} + \frac{b * (h-x)^3}{3} + \alpha * (A_{s1} * (d-x)^2 + A_{s2} * (x-d_2)^2) = \frac{300 * 312^3}{3} + \frac{300 * (600-312)^3}{3} + 15.23 * (981.75 * (537.5 - 312)^2 + 307.88 * (312 - 57.00)^2) = 6.49 * 10^9 \text{ mm}^4$
- $v = h - x_2 = 600 - 312 = 288 \text{ mm}$
- $W = \frac{I}{v} = \frac{6.49 * 10^9}{288} = 2.25 * 10^7$
- $M_{cr} = W * f_{ctm} = 2.25 * 10^7 * 2.896 = 65 \text{ kNm}$
- $A_{ceff} = b * \min\left(\frac{h-x}{3}; 2.5 * (h-d); \frac{h}{2}\right) = 300 * \min\left(\frac{600-178.74}{3}; 2.5 * (600 - 537.50); \frac{600}{2}\right) = 300 * \min(140.42; 156.25; 300) = 300 * 140.42 = 42125.74 \text{ mm}^2$
- $\rho_{eff} = \frac{A_{s1}}{A_{ceff}} = \frac{981.75}{42125.74} = 0.02$
- $S_{rmax} = \min(3.4 * c + 0.17 * \frac{\phi_{s1}}{\rho_{eff}}; 1.3 * (h-x)) = \min(3.4 * 40 + 0.17 * \frac{25}{0.02}; 1.3 * (600 - 178.74)) = \min(318.36; 548) = 318.36 \text{ mm}$
- $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \max\left(\frac{0.6 * \sigma_c}{200000}; \frac{\sigma_c}{200000} - 0.4 * f_{ctm} * \frac{1 + \alpha * \rho_{eff}}{\rho_{eff} * 200000}\right) = \max\left(\frac{0.6 * 8.36}{200000}; \frac{8.36}{200000} - 0.4 * 2.9 * \frac{1 + 15.23 * 0.02}{0.02 * 200000}\right) = \max(0.00767; 0.000941) = 0.000941$
- $w_k = S_{rmax} * (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 318.36 * 0.000941 = 0,30 \text{ mm}$

### 4.2.3. Variërende inputwaarden

Voor de berekening van de verschillende scheurwijdtes variëren sommige inputwaarden. De variatie van de scheurwijdtes worden uit de literatuurstudie gehaald, deze zijn terug te vinden bij paragraaf 2.7. De variatie die gebruikt wordt voor het berekenen van de range van scheurwijdtes is afhankelijk van de beginwaarden die worden gebruikt. De beginwaarden zijn de waarden van de berekening van de scheurwijdtes die in het vorige hoofdstuk bij paragraaf 4.2.1 als inputwaarden zijn gebruikt. De variatie wordt op deze waarden toegepast.

Tabel 25: Variatie op de inputwaarden

	Afkorting	Waarde	Variatie
<b>Betondekking</b>	c	40	$c - 10 \leq c_i \leq c + \left(\frac{h}{210} + \frac{275}{21}\right)$
<b>Betonkwaliteit</b>	f <sub>ck</sub>	30	$f_{ck} - 4 \leq f_{cki} \leq f_{ck} + 4$
<b>Breedte</b>	b	300	$b - \left(\frac{b}{50} + 7\right) \leq b_i \leq b + \left(\frac{b}{50} + 7\right)$
<b>Hoogte</b>	h	600	$h - \left(\frac{h}{140} + \frac{85}{7}\right) \leq h_i \leq h + \left(\frac{h}{140} + \frac{85}{7}\right)$
<b>Diameter beugel</b>	Φ <sub>b</sub>	10	$0.955 * \phi_b \leq \phi_{bi} \leq 1.045 * \phi_b$
<b>Diameter trekwapening</b>	Φ <sub>s1</sub>	25	$0.955 * \phi_{s1} \leq \phi_{s1i} \leq 1.045 * \phi_{s1}$
<b>Diameter drukwapening</b>	Φ <sub>s2</sub>	14	$0.955 * \phi_{s2} \leq \phi_{s2i} \leq 1.045 * \phi_{s2}$
<b>Kruipfactor</b>	φ	1,5	$0.80 * \varphi \leq \varphi_i \leq 1.40 * \varphi$
<b>Moment</b>	M <sub>ed</sub>	120	$0.80 * M_{ed} \leq M_{edi} \leq 1.20 * M_{ed}$
<b>Gemiddelde druksterkte beton</b>	f <sub>cm</sub>	38	$f_{ck} + 4 \leq f_{cmi} \leq f_{ck} + 12$

Als deze variaties op de waarden worden toegepast komen er minimum- en maximumwaarden uit. Deze waarden zijn nodig om de variatie te kunnen programmeren in Matlab. Bij deze gegevens worden de volgende minimum- en maximumwaarden gebruikt.

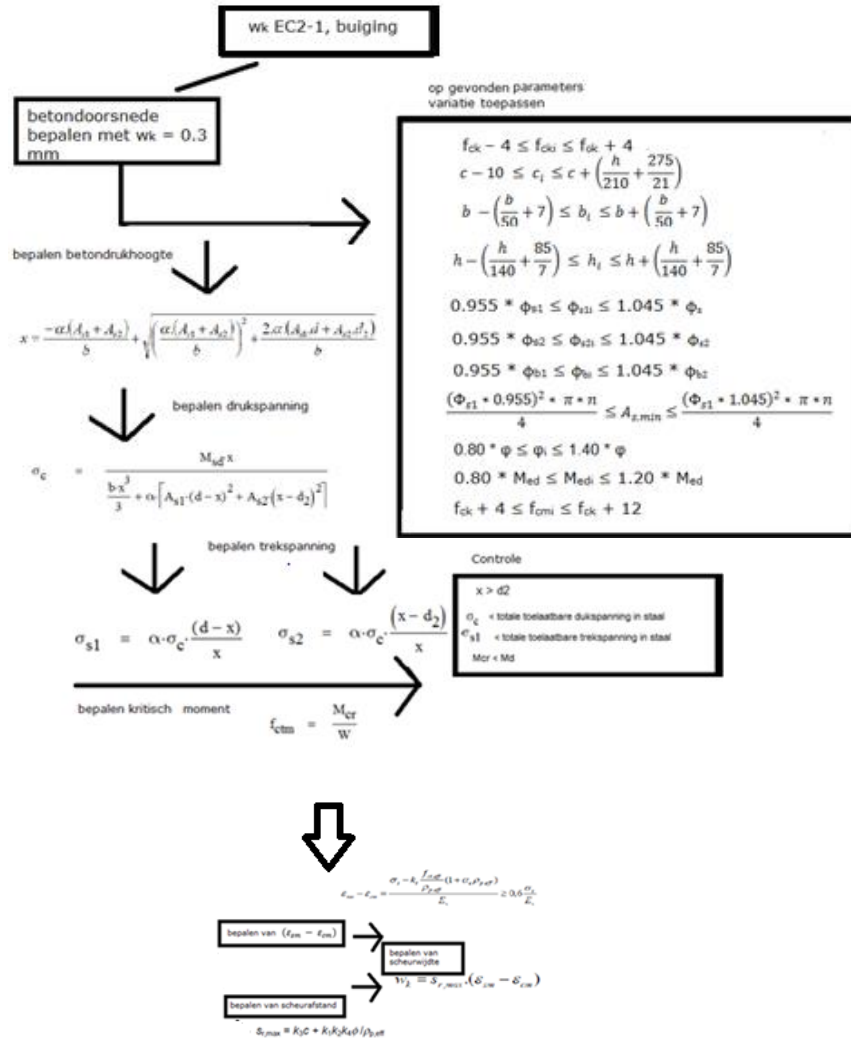
Tabel 26: Minimum- en maximumwaarden van de inputgegevens

	Afkorting	Minimum	Maximum
<b>Betondekking</b>	c	30	55,95
<b>Betonkwaliteit</b>	f <sub>ck</sub>	26	34
<b>Breedte</b>	b	287	313
<b>Hoogte</b>	h	583,57	616,43
<b>Diameterbeugel</b>	Φ <sub>b</sub>	9,55	10,45
<b>Diameter trekwapening</b>	Φ <sub>s1</sub>	23,875	26,125
<b>Diameter drukwapening</b>	Φ <sub>s2</sub>	13,37	14,63
<b>Kruipfactor</b>	φ	1,2	2,1
<b>Moment</b>	M <sub>ed</sub>	96	144
<b>Gemiddelde druksterkte beton</b>	f <sub>cm</sub>	34	42

### 4.2.4. Berekening range scheurwijdte

De berekening van de range van scheurwijdtes wordt gedaan in Matlab. Voor deze berekening worden dezelfde formules gebruikt als bij het berekenen van de scheurwijdte bij paragraaf 4.2.2 berekening. De Matlab code is uitgeschreven in bijlage A.1.

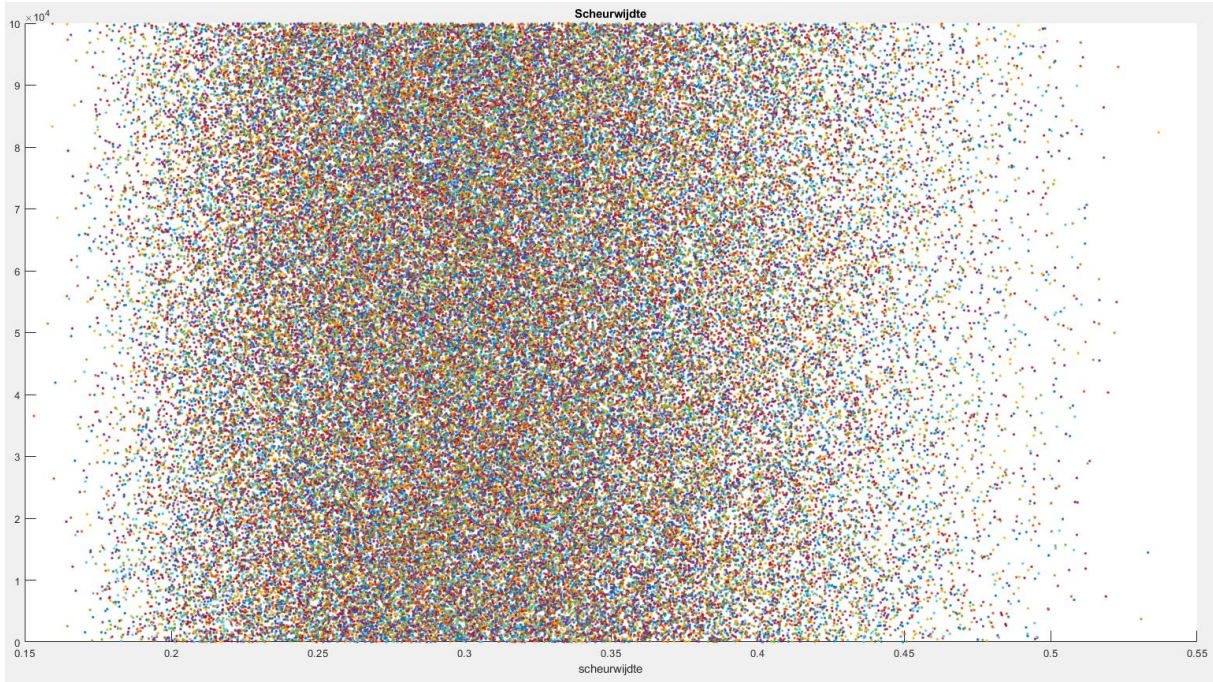
#### 4.2.4.1. Flowchart



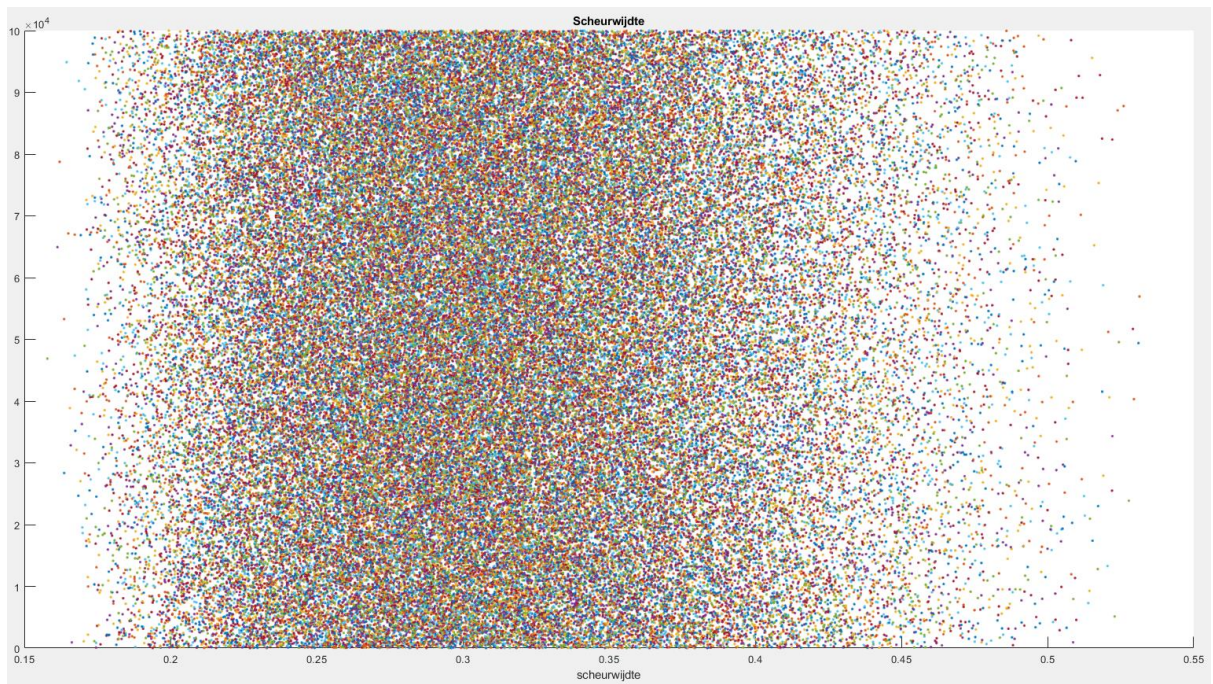
Figuur 50: Stappenplan berekening EC2-1 buiging

#### 4.2.4.2. Grafiek van Matlab

Bij elke berekening die in Matlab wordt uitgevoerd wordt de waarde voor de scheurwijdte opgeslagen en uitgetekend in een grafiek. Afhankelijk van hoeveel keer de berekening gegenereerd wordt, wordt er een andere grafiek met scheurwijdtes verkregen. De grafiek is voor elke keer dat de volledige Matlab code wordt doorlopen anders, omdat er gewerkt wordt met variabele waardes. Hieronder zijn twee grafieken weergegeven die uit een volledige Matlab berekening kwam.



*Figuur 51: Scheurwijdte bij variërende inputwaarden 1*



*Figuur 52: Scheurwijdte bij variërende inputwaarden 2*

#### 4.2.5. Controle berekening range scheurwijdte

Om na te gaan of er geen fouten werden gemaakt bij het programmeren van de berekening voor de range van scheurwijdtes in Matlab, werden er een paar controles uitgevoerd. Dit gebeurde aan de hand van een Excel file uit de lessen van beton en door de oefening met de hand uit te voeren. Hieronder zijn twee controles terug te vinden. De controle werd uitgevoerd voor vier verschillende balken. Hieronder zijn de drie balken en de uitkomsten terug te vinden. De volledige berekeningen zijn terug te vinden in bijlage A.2.

##### 4.2.5.1. Balk BM1

Voor de eerste balk werd een doorsnede van 300 mm op 600 mm gebruikt. De andere inputwaarden zijn in de onderstaande tabel terug te vinden.

Tabel 27: Inputwaarden balk BM1

	Afkorting	Waarde
<b>Betondekking</b>	c	40 mm
<b>Betonsterkte</b>	$f_{ck}$	30 N/mm <sup>2</sup>
<b>Kruip coëfficiënt</b>	$\phi$	2
<b>Hoogte</b>	h	600 mm
<b>Breedte</b>	b	300 mm
<b>Diameter beugel</b>	$\Phi_b$	10 mm
<b>Trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	20 mm
<b>Aantal trekstaven</b>	$n_{s1}$	3
<b>Drukwapening</b>	$\Phi_{s2}$	10 mm
<b>Aantal drukstaven</b>	$n_{s2}$	2
<b>Buigmoment SLS-Q</b>	$M_{Ed}$	90 kNm
<b>Elasticiteitsmodulus staal</b>	$E_s$	200000 N/mm <sup>2</sup>
<b>Staalsterkte</b>	$f_{yk}$	500 N/mm <sup>2</sup>

Voor de scheurwijdte werd er een waarde van 0,1828 mm berekend met Matlab, met Excel en met de handberekening. Voor deze balk klopt de berekening die in Matlab werd uitgevoerd.

##### 4.2.5.2. Balk BM2

Voor de tweede balk werd dezelfde doorsnede gebruikt als bij de eerste balk. De waarde van het buigmoment werd veranderd. Hierdoor wordt er een andere waarde van de scheurwijdte berekend.



Tabel 28: Inputwaarden balk BM2

Afkorting	Waarde
<b>Betondekking</b>	C
<b>Betonsterkte</b>	$f_{ck}$
<b>Kruip coëfficiënt</b>	$\Phi$
<b>Hoogte</b>	H
<b>Breedte</b>	B
<b>Diameter beugel</b>	$\Phi_b$
<b>Trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$
<b>Aantal trekstaven</b>	$n_{s1}$
<b>Drukwapening</b>	$\Phi_{s2}$
<b>Aantal drukstaven</b>	$n_{s2}$
<b>Buigmoment SLS-Q</b>	$M_{Ed}$
<b>Elasticiteitsmodulus staal</b>	$E_s$
<b>Staalsterkte</b>	$f_{yk}$

Voor de scheurwijdte werd er berekend dat de balk niet gescheurd was, met Excel en met de handberekening. Voor deze balk klopt de berekening die in Matlab werd uitgevoerd.

#### 4.2.5.3. Balk BM3

Voor de laatste controle werd dezelfde doorsnede gebruikt als bij de derde balk. De trek- en drukwapening werden weer aangepast. Hierbij werden 10 staven met een diameter van 12 mm voor de trekwapening gebruikt en voor de drukwapening werden er 10 staven met een diameter van 10 mm gebruikt. Daarnaast werd het moment verhoogd tot 100 kNm en de kruipfactor verlaagd naar 2.

Tabel 29: Inputwaarden balk BM3

Afkorting	Waarde
<b>Betondekking</b>	C
<b>Betonsterkte</b>	$f_{ck}$
<b>Kruip coëfficiënt</b>	$\Phi$
<b>Hoogte</b>	h
<b>Breedte</b>	b
<b>Diameter beugel</b>	$\Phi_b$
<b>Trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$
<b>Aantal trekstaven</b>	$n_{s1}$
<b>Drukwapening</b>	$\Phi_{s2}$
<b>Aantal drukstaven</b>	$n_{s2}$
<b>Buigmoment SLS-Q</b>	$M_{Ed}$
<b>Elasticiteitsmodulus staal</b>	$E_s$
<b>Staalsterkte</b>	$f_{yk}$

Voor de scheurwijdte werd er een waarde van 0,2829 mm berekend met Matlab, met Excel en met de handberekening. Voor deze balk klopt de berekening die in Matlab werd uitgevoerd.

### 4.3. Scheurwijdte t.g.v. opgelegde verhinderde vervorming EC2-1, balk

Bij het berekenen van de scheurwijdte ten gevolge van de opgelegde verhinderde vervorming met trek wordt er eerst met de gekozen hoogte en breedte een scheurwijdte berekend die ongeveer gelijk is aan 0,30 mm. Daarna wordt de staalspanning, de gecorrigeerde diameter en de scheurwijdte bepaald. Nadat alle parameters gekend zijn kan de variatie op de inputwaarden uitgevoerd worden waarbij verder gerekend wordt naar de range van scheurwijdten.

#### 4.3.1. Inputwaarden

Tabel 30: Inputwaarden van de balk bij EC2-1, trek

	Afkorting	Waarde
<b>Betondekking</b>	c	40 mm
<b>Betonsterkte</b>	$f_{ck}$	30 N/mm <sup>2</sup>
<b>Hoogte</b>	h	600 mm
<b>Breedte</b>	b	300 mm
<b>Wapening keuze</b>	$\Phi_s$	20 mm
<b>Diameter beugel</b>	$\Phi_b$	8 mm
<b>Aantal staven</b>	n	3
<b>Staalsterkte</b>	$f_{yk}$	500 N/mm <sup>2</sup>
<b>Scheurwijdtebeperking</b>	$w_k$	0,30 mm

Tabel 31: Tabel 7.2N uit Eurocode 2 [15, p. 131]

Staalspanning (MPa)	$w_k=0,4$	$w_k=0,3$	$w_k=0,2$
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

#### 4.3.2. Berekening

De berekening van de scheurwijdte wordt gedaan in Excel door eerst een doorsnede te kiezen met scheurwijdte ongeveer gelijk aan 0,30 mm. Hierbij wordt er ook een correctie op de diameter toegepast waarbij tabel 7.2N uit de Eurocode 2 gebruikt wordt. De berekeningen komen uit de literatuurstudie paragraaf 2.2.2 en 2.2.3. Nadat de staalspanning en gecorrigeerde diameter gekend zijn wordt de scheurwijdte bepaald.

Tabel 32: Scheurwijdte 0,3 mm

Parameters met $w_k=0,3$	
c	40
$f_{ck}$	30
$f_{yk}$	500
$f_{ct,eff}$	2,896
Breedte	300
Hoogte	600
$A_{ct}$	90000
$k_c$ (trek)	1
k	0,790
$h_{crit}$	600
$d_1$	58
d	542
$\Phi_{S,keuze}$	20
$w_k$	0,3
N	3
$A_{s,min}$	3 $\Phi$ 20 (942,48)
$\phi_b$	8
$\sigma_s$	<b>218,54</b>
$\phi'_s$	15,5
$\Phi_{Scorr}$	<b>20,02</b>
$w_k$	0,316

De berekening van staalspanning wordt als volgt uitgevoerd:

$$\sigma_s = \frac{k \cdot k_c \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{A_{s,min}} = \frac{0,79 \cdot 1 \cdot 2,896 \cdot 90000}{942,48} = 214 \text{ MPa}$$

Daarna wordt de gecorrigeerde diameter bepaald:

- $\Phi_s = \frac{\phi'_s \cdot k_c \cdot f_{ct,eff} \cdot h_{crit}}{2,9 \cdot (8 \cdot (h-d))} = \phi'_s \cdot \frac{2,896 \cdot 1 \cdot 600}{2,9 \cdot (8 \cdot (600-542))} = \phi'_s \cdot \frac{1737,6}{1345,6}$
- $\phi'_s = \frac{\Phi_s}{1,29} = \frac{20}{1,29} = 15,5 \text{ mm}$
- $\Phi_{Scorr} = 15,5 \cdot \frac{2,896 \cdot 1 \cdot 600}{2,9 \cdot (8 \cdot (600-542))} = 20,0 \text{ mm}$

Met behulp van interpolatie kan voor diameter 20 mm en staalspanning 218,5 MPa een scheurwijdte van de tabel afgelezen worden.

Tabel 33: Gegevens lineaire interpolatie voor  $w_k$

Lin. Interpolatie	
diam 20	$w_k$
153	0,1
182	0,2
222	0,3
240	0,4
275	0,5
305	0,6
335	0,7
366	0,8
396	0,9

Tabel 34: Lineaire interpolatie

Interpolatie					
$\sigma_s$	153	y1	0,1	x1	$w_k$
	218,5	y	0,316	x	
	396	y2	0,9	x2	

Met interpolatie geeft de berekening een scheurwijdte gelijk aan 0,316 mm.

### 4.3.3. Variërende inputwaarden

De gekozen inputwaarden die weergegeven zijn in paragraaf 4.3.1 zullen variëren. Deze worden uit de literatuurstudie gehaald en zijn terug te vinden bij paragraaf 2.7. Hierbij wordt er ook een correctie op de diameter toegepast. Nadat de staalspanning en gecorrigeerde diameter gekend zijn wordt de scheurwijdte bepaald. Uiteindelijk ontstaat er een range van scheurwijdtes.

Tabel 35: Variatie op de inputwaarden

	Afkorting	Waarde	Variatie
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	30	$f_{ck} - 4 \leq f_{cki} \leq f_{ck} + 4$
<b>Betondekking</b>	c	40	$c - 10 \leq c_i \leq c + \left(\frac{h}{210} + \frac{275}{21}\right)$
<b>Breedte</b>	b	300	$b - \left(\frac{b}{50} + 7\right) \leq b_i \leq b + \left(\frac{b}{50} + 7\right)$
<b>Hoogte</b>	h	600	$h - \left(\frac{h}{140} + \frac{85}{7}\right) \leq h_i \leq h + \left(\frac{h}{140} + \frac{85}{7}\right)$
<b>Diameter wapening</b>	$\Phi_{s1}$	20	$0.955 * \Phi_{s1} \leq \Phi_{s1i} \leq 1.045 * \Phi_{s1}$
<b>Diameter beugel</b>	$\Phi_b$	8	$0.955 * \Phi_b \leq \Phi_{bi} \leq 1.045 * \Phi_b$
<b>Minimum wapening</b>	$A_{s,min}$	942,48	$\frac{(\Phi_{s1} * 0.955)^2 * \pi * n}{4} \leq A_{s,min}$ $\leq \frac{(\Phi_{s1} * 1.045)^2 * \pi * n}{4}$

Als de variaties worden toegepast op de bovenstaande inputwaarden komen er minimum- en maximumwaarden uit. Deze waarden zijn nodig om de variatie te kunnen programmeren in Matlab. Bij deze gegevens worden de volgende minimum- en maximumwaarden gebruikt.

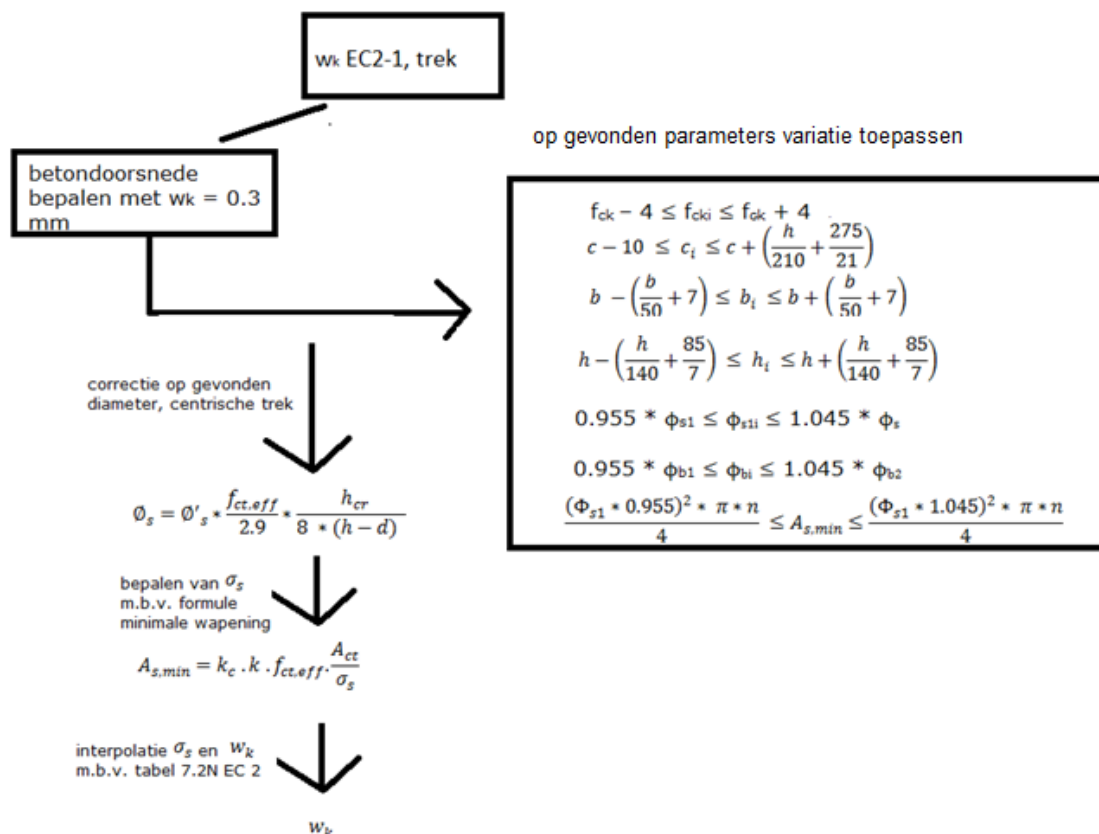
Tabel 36: Minimum- en maximumwaarden van de inputgegevens

	Afkorting	Minimum	Maximum
<b>Betondekking</b>	c	30	55,95
<b>Betonkwaliteit</b>	f <sub>ck</sub>	26	34
<b>Breedte</b>	b	287	313
<b>Hoogte</b>	h	583,57	616,43
<b>Diameter trekwapening</b>	Φ <sub>s1</sub>	19,1	20,9
<b>Diameter beugel</b>	Φ <sub>b</sub>	7,64	8,36
<b>Minimumwapening</b>	A <sub>s,min</sub>	859,56	1029,21

### 4.3.4. Berekening range scheurwijdte

De berekening wordt gedaan in Matlab, dezelfde formules worden gebruikt als bij het berekenen van de scheurwijdte bij paragraaf 4.3.2 berekening. De Matlab code is uitgeschreven in bijlage B.

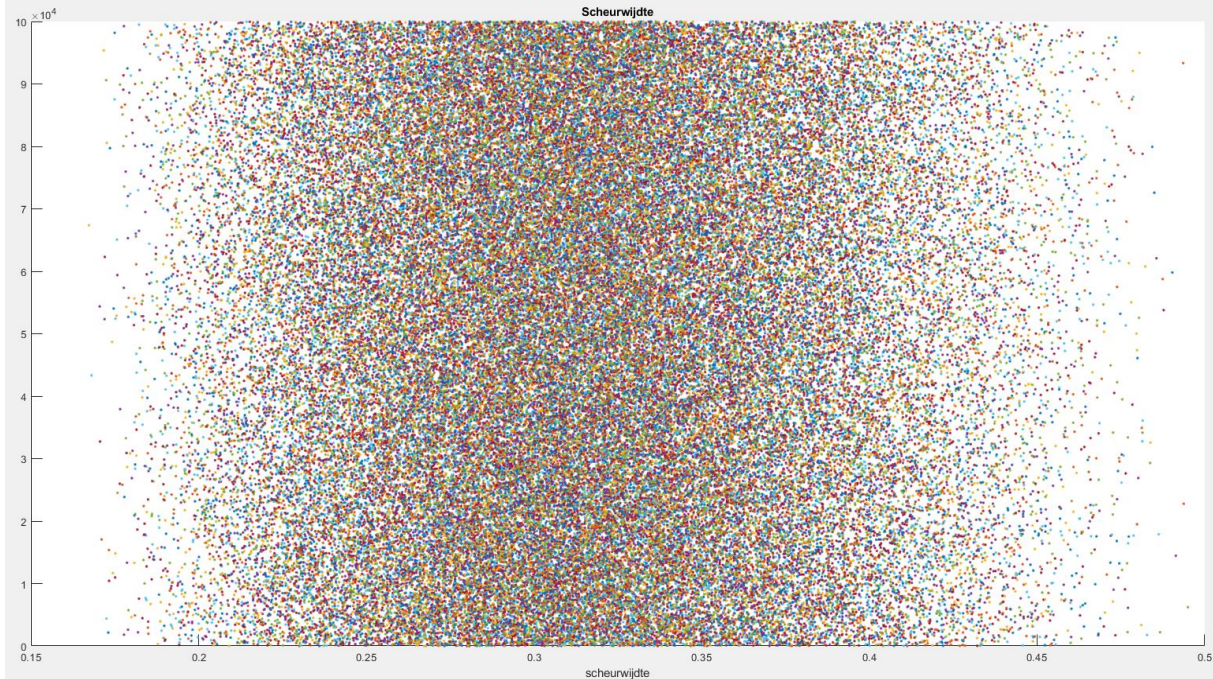
#### 4.3.4.1. Flowchart



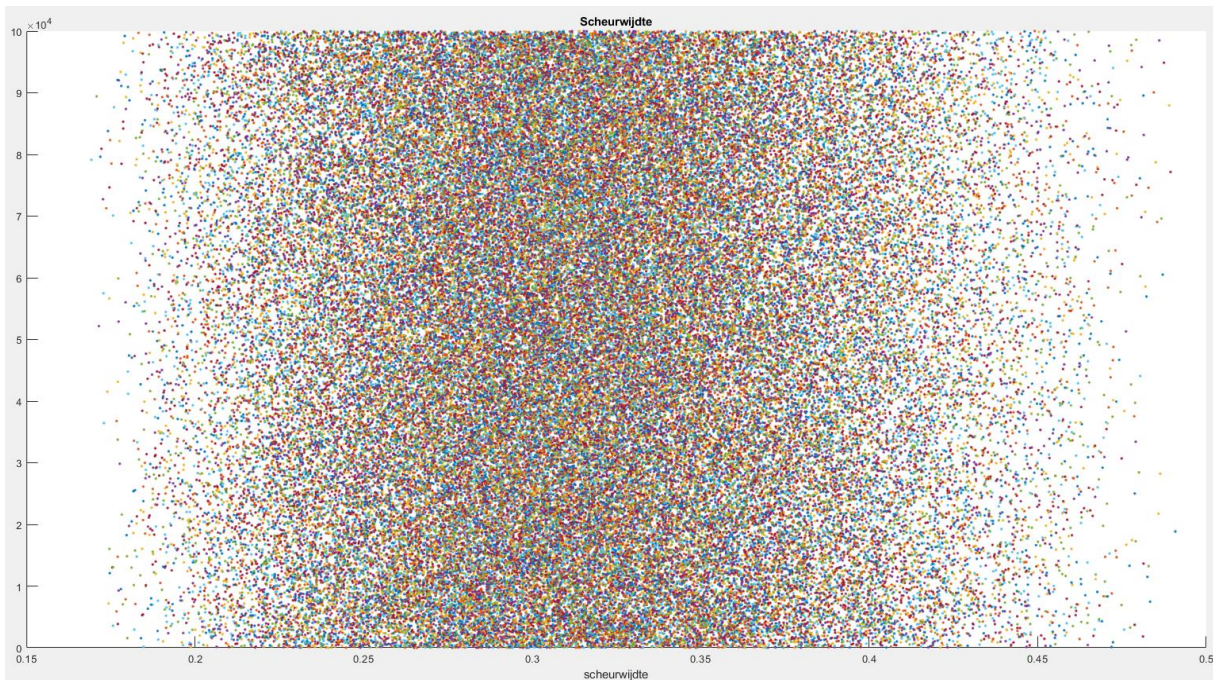
Figuur 53: Stappenplan berekening EC2-1 trek

#### 4.3.4.2. Grafiek Matlab

De waarde voor de scheurwijdte wordt uitgezet in een grafiek met behulp van het programma Matlab. Op de x-as wordt de scheurwijdte en op de y-as wordt het aantal keer dat de berekening wordt uitgevoerd weergegeven. De inputwaarden variëren waardoor de grafiek ook bij elke uitvoering variërend zal zijn.



*Figuur 54: Spreidingsdiagram 1 scheurwijdte met variërende inputwaarden*



*Figuur 55: Spreidingsdiagram 2 scheurwijdte met variërende inputwaarden*

#### 4.4. Scheurwijdte t.g.v. opgelegde verhinderde vervorming EC2-3, balk

Voor deze berekening wordt gebruik gemaakt van de formules uit Eurocode 2, deel 3 bijlage M met trek. Als eerste worden de inputwaarden gekozen zodat een scheurwijdte van ongeveer 0,30 mm wordt uitgerekend. In paragraaf 4.4.2 is de berekening terug te vinden. De berekening van deze scheurwijdte wordt gedaan zoals vermeld in Eurocode 2 en is terug te vinden in de literatuurstudie bij paragraaf 2.2.6.

##### 4.4.1. Inputwaarden

Tabel 37: Inputwaarden bij het berekenen van de balk bij EC2-3, trek

	Afkorting	Waarde
<b>Betondekking</b>	c	40 mm
<b>Betonsterkte</b>	$f_{ck}$	30 N/mm <sup>2</sup>
<b>Kruip coëfficiënt</b>	$\Phi$	1,50
<b>Hoogte</b>	h	600 mm
<b>Breedte</b>	b	300 mm
<b>Trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	20 mm
<b>Aantal trekstaven</b>	$n_{s1}$	2
<b>Diameter beugel</b>	$\Phi_b$	10 mm
<b>Elasticiteitsmodulus staal</b>	$E_s$	200000 N/mm <sup>2</sup>
<b>Staalsterkte</b>	$f_{yk}$	400 N/mm <sup>2</sup>

##### 4.4.2. Berekening

- $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 30 + 8 = 38 \frac{N}{mm^2}$
- $E_{cm} = 22000 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} = 22000 * \left(\frac{38}{10}\right)^{0,3} = 32836,57 \frac{N}{mm^2}$
- $E_c = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi} = \frac{32836,57}{1 + 1,5} = 13134,63 \frac{N}{mm^2}$
- $f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 0,3 * 30^{\frac{2}{3}} = 2,896 \frac{N}{mm^2}$
- $\alpha = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{13134,63} = 15,23$
- $d_1 = c + \phi_b + \frac{\phi_{s1}}{2} = 40 + 10 + 10 = 60 \text{ mm}$
- $d = h - d_1 = 600 - 60 = 540 \text{ mm}$
- $A_{s1} = \pi * n_{s1} * \frac{\phi_{s1}^2}{4} = \pi * 2 * \frac{20^2}{4} = 628,32 \text{ mm}^2$
- $A_{ceff} = b * \min\left(2,5 * (h - d); \frac{h}{2}\right) = 300 * \min\left(2,5 * (600 - 540); \frac{600}{2}\right) = 300 * \min(150; 300) = 300 * 150 = 4500 \text{ mm}^2$
- $\rho_{eff} = \frac{A_{s1}}{A_{ceff}} = \frac{628,32}{4500} = 0,01$
- $S_{rmax} = 3,4 * c + 0,8 * 1 * 0,425 * \frac{\phi_{s1}}{\rho_{eff}} = 3,4 * 40 + 0,8 * 1 * 0,425 * \frac{20}{0,01} = 623 \text{ mm}$
- kc = 1 (zuivere trek)

- $h = 600 \rightarrow k = 1.21 - 0.7 * \frac{600}{1000} = 0.8$
- $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{0.5 * \alpha * kc * k * f_{ct,eff} * (1 + \frac{1}{\alpha * \rho_{eff}})}{E_s} = \frac{0.5 * 15.23 * 1 * 0.8 * 2.9 * (1 + \frac{1}{15.23 * 0.01})}{200000} = 4,968 * 10^{-4}$
- $w_k = S_{rmax} * (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 623 * 4,968 * 10^{-4} = 0,3095 \text{ mm}$

### 4.4.3. Variërende inputwaarden

Voor de berekening van de range van scheurwijdtes variëren sommige inputwaarden. De variatie van de scheurwijdtes worden uit de literatuurstudie gehaald, deze zijn terug te vinden in paragraaf 2.7. De variatie die gebruikt wordt voor het berekenen van de range van scheurwijdtes is afhankelijk van de beginwaarden die worden gebruikt. De beginwaarden zijn weergegeven in paragraaf 4.4.1.

Tabel 38: Variatie op de inputwaarden

	Afkorting	Waarde	Variatie
<b>Betondekking</b>	c	40	$c - 10 \leq c_i \leq c + \left(\frac{h}{210} + \frac{275}{21}\right)$
<b>Betonkwaliteit</b>	f <sub>ck</sub>	30	$f_{ck} - 4 \leq f_{cki} \leq f_{ck} + 4$
<b>Breedte</b>	b	300	$b - \left(\frac{b}{50} + 7\right) \leq b_i \leq b + \left(\frac{b}{50} + 7\right)$
<b>Hoogte</b>	h	600	$h - \left(\frac{h}{140} + \frac{85}{7}\right) \leq h_i \leq h + \left(\frac{h}{140} + \frac{85}{7}\right)$
<b>Diameter trekwapening</b>	Φ <sub>s1</sub>	20	$0,955 * \phi_{s1} \leq \phi_{si} \leq 1,045 * \phi_{s1}$
<b>Diameter beugel</b>	Φ <sub>b</sub>	10	$0,955 * \Phi_{b1} \leq \Phi_{bi} \leq 1,045 * \Phi_{b2}$
<b>Kruipfactor</b>	φ	1,5	$0.80 * \varphi \leq \varphi_i \leq 1.40 * \varphi$
<b>Gemiddelde druksterkte beton</b>	f <sub>cm</sub>	38	$f_{ck} + 4 \leq f_{cmi} \leq f_{ck} + 12$

Als de variatie uit de bovenstaande tabel wordt toegepast op de beginwaarden dan kan de minimum- en maximumwaarden van de inputwaarden worden berekend. In de onderstaande tabel zijn de waarden weergegeven.

Tabel 39: Minimum- en maximumwaarden van de inputgegevens

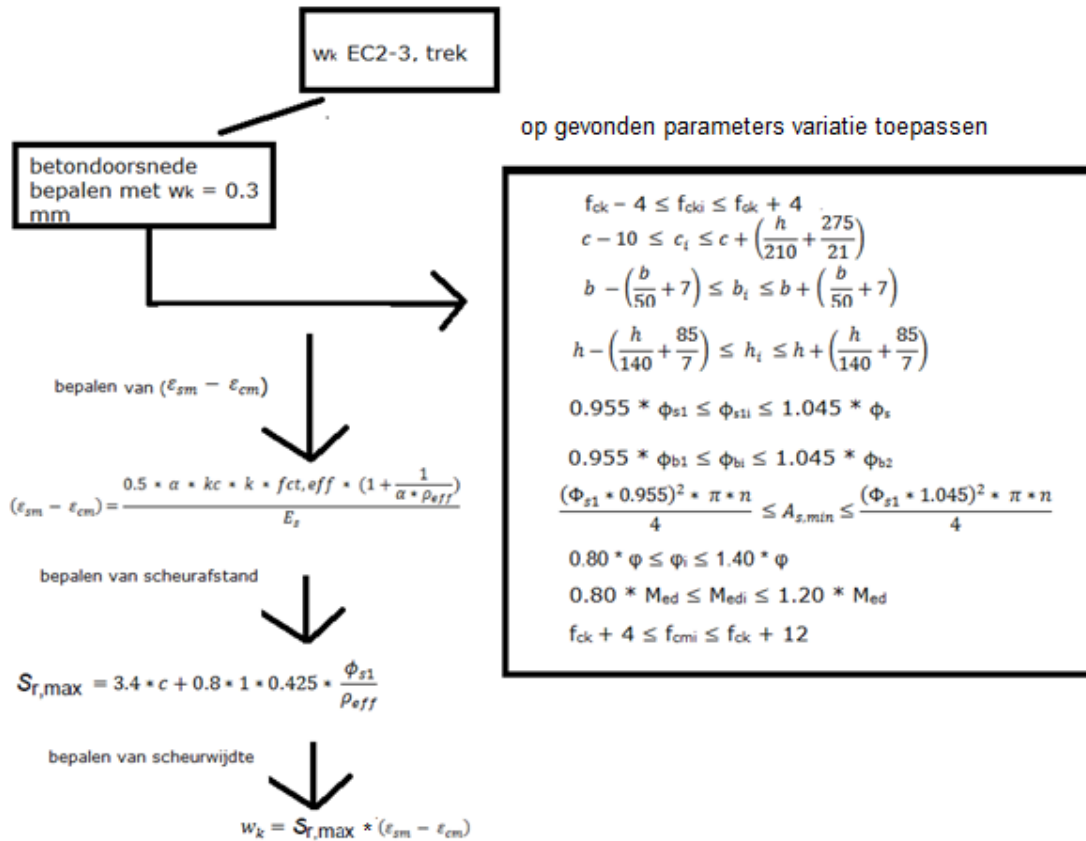
	Afkorting	Minimum	Maximum
<b>Betondekking</b>	c	30	55.95
<b>Betonkwaliteit</b>	f <sub>ck</sub>	26	34
<b>Breedte</b>	b	287	313
<b>Hoogte</b>	h	583,57	616,43
<b>Diameter trekwapening</b>	Φ <sub>s1</sub>	19,1	20,9
<b>Diameter beugel</b>	Φ <sub>b</sub>	9,55	10,45
<b>Kruipfactor</b>	φ	1,2	2,1
<b>Gemiddelde druksterkte beton</b>	f <sub>cm</sub>	34	42



#### 4.4.4. Berekening range scheurwijdte

De berekening van de range van scheurwijdtes wordt gedaan in Matlab. Voor deze berekening worden dezelfde formules gebruikt als bij het berekenen van de scheurwijdte in paragraaf 4.4.2. De Matlab code die gebruikt wordt voor het berekenen van de range van scheurwijdtes is terug te vinden in bijlage C.1.

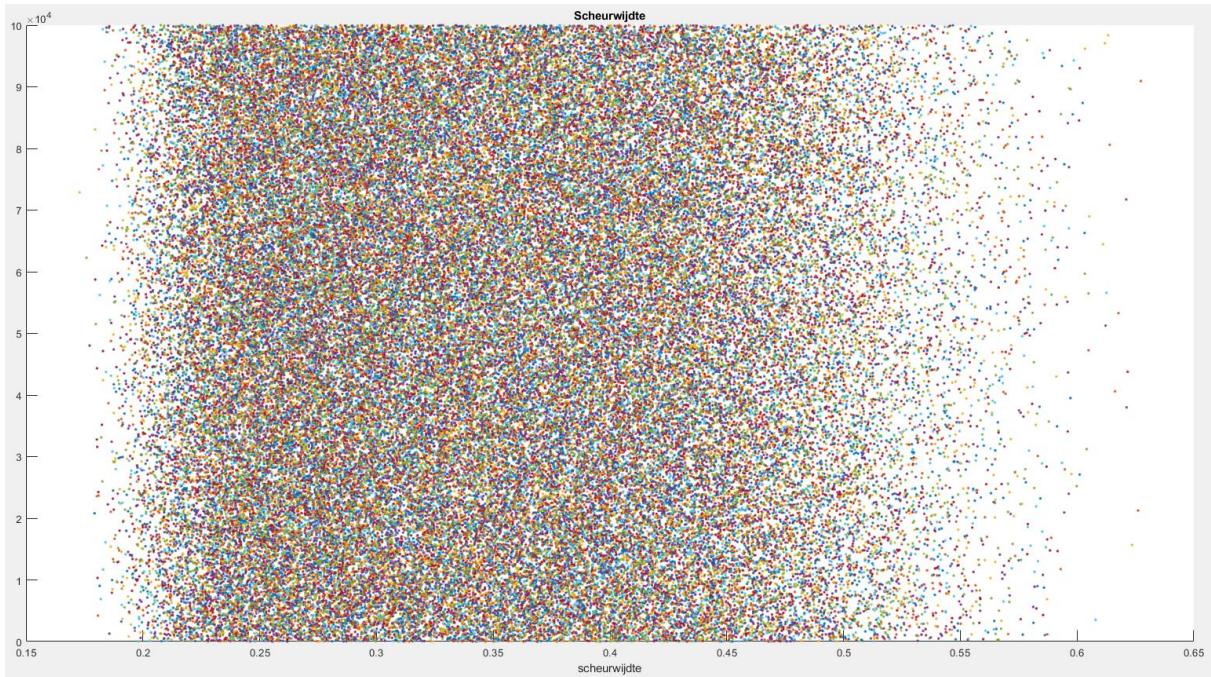
##### 4.4.4.1. Flowchart



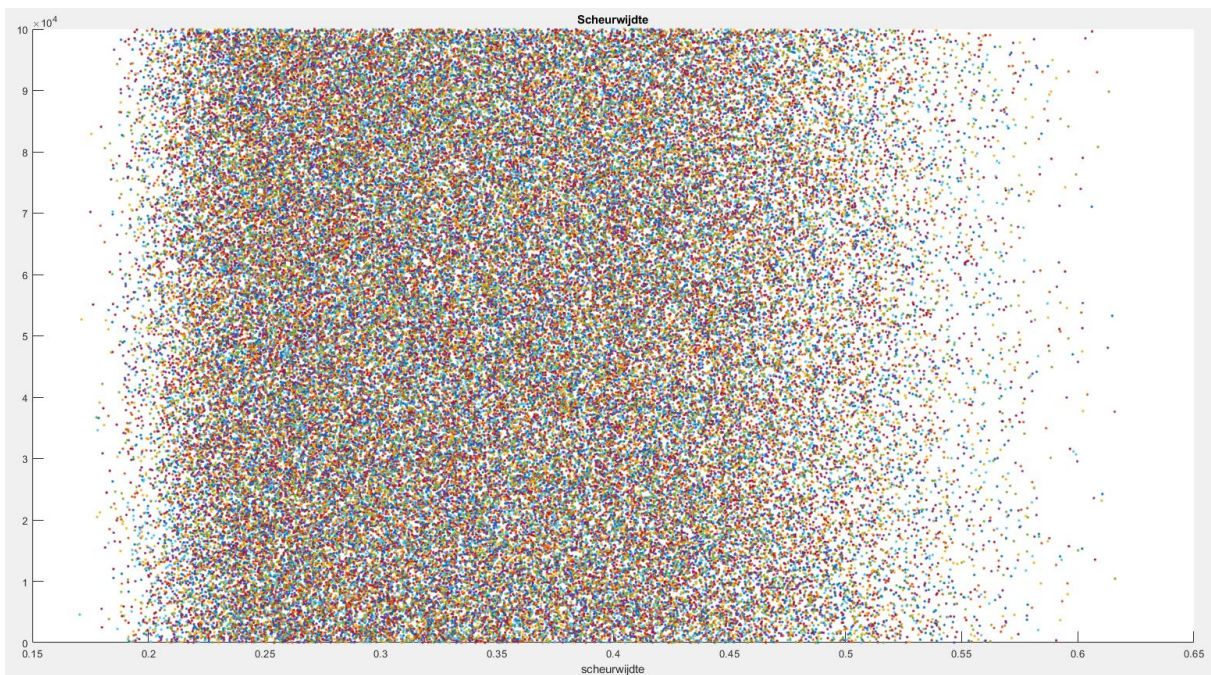
Figuur 56: Stappenplan berekening EC2-3 trek

##### 4.4.4.2. Grafiek Matlab

De waarde voor de scheurwijdte wordt uitgezet in een grafiek met behulp van het programma Matlab. Op de x-as wordt de scheurwijdte en op de y-as wordt het aantal keer dat de berekening wordt uitgevoerd weergegeven. De inputwaarden variëren waardoor de grafiek ook bij elke uitvoering variërend zal zijn.



*Figuur 57: Spreidingsdiagram 1 scheurwijdte met variërende inputwaarden*



*Figuur 58: Spreidingsdiagram 2 scheurwijdte met variërende inputwaarden*

#### **4.4.5. Controle berekening range scheurwijdte**

Om zeker te zijn dat de berekeningen correct zijn uitgevoerd en geen fouten werden gemaakt bij het programmeren van de berekening van scheurwijdtes in Matlab wordt er een controle uitgevoerd. Dit wordt gedaan met behulp van het Excel formulier uit de lessen van beton en de oefening met de hand uit te voeren. De controle wordt uitgevoerd op een balk. De volledige berekening is in bijlage C.2 terug te vinden. Voor deze balk wordt een doorsnede van 300 mm op 1000 mm gebruikt. De andere inputwaarden zijn in de onderstaande tabel terug te vinden.

Tabel 40: Inputwaarden van de balk

	Afkorting	Waarde
<b>Betondekking</b>	c	40 mm
<b>Betonsterkte</b>	$f_{ck}$	30 N/mm <sup>2</sup>
<b>Kruip coëfficiënt</b>	$\varphi$	1.50
<b>Hoogte</b>	h	300 mm
<b>Breedte</b>	b	1000 mm
<b>Trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	20 mm
<b>Aantal trekstaven</b>	$n_{s1}$	5
<b>Elasticiteitsmodulus staal</b>	$E_s$	200000 N/mm <sup>2</sup>
<b>Staalsterkte</b>	$f_{yk}$	500 N/mm <sup>2</sup>

De bedoeling is dat voor deze betondoorsnede met de bovenstaande gegevens een scheurwijdte van 0,30 mm moet uitkomen. Met Matlab, handberekening en met Excel file wordt er een waarde van 0,30 mm berekend. Dus voor deze balk klopt de berekening in Matlab.

## 4.5. Scheurwijdte t.g.v. buiging, plaat

Als vierde berekening wordt een plaat berekend waarbij een scheurwijdte van 0,30 mm bekomen wordt. Hieronder is de berekening hiervan terug te vinden. De berekening van deze scheurwijdte wordt gedaan zoals vermeld in Eurocode 2 en is terug te vinden in de literatuurstudie: 2.2.4 Berekening scheurwijdte.

### 4.5.1. Inputwaarden

Voor het bereken van een scheurwijdte van 0,30 mm bij een plaat in buiging worden de volgende inputwaarden gebruikt.

Tabel 41: Inputwaarden bij het berekenen van de scheurwijdte

	Afkorting	Waarde
<b>Betondekking</b>	c	30 mm
<b>Betonsterkte</b>	$f_{ck}$	30 N/mm <sup>2</sup>
<b>Kruip coëfficiënt</b>	$\varphi$	2
<b>Hoogte</b>	h	250 mm
<b>Breedte</b>	b	1000 mm
<b>Trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	12 mm
<b>Aantal trekstaven</b>	$n_{s1}$	6
<b>Buigmoment SLS-Q</b>	$M_{Ed}$	49 kNm
<b>Elasticiteitsmodulus staal</b>	$E_s$	200000 N/mm <sup>2</sup>
<b>Staalsterkte</b>	$f_{yk}$	500 N/mm <sup>2</sup>

### 4.5.2. Berekening

- $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 30 + 8 = 38 \frac{N}{mm^2}$
- $E_{cm} = 22000 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} = 22000 * \left(\frac{38}{10}\right)^{0,3} = 32836,57 \frac{N}{mm^2}$
- $E_c = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi} = \frac{32836,57}{1 + 2} = 10946 \frac{N}{mm^2}$
- $\alpha = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{10946} = 18,27$

- $d_1 = c + \phi_b + \frac{\phi_{s1}}{2} = 30 + \frac{12}{2} = 36 \text{ mm}$
- $d = h - d_1 = 300 - 36 = 214 \text{ mm}$
- $A_{s1} = \pi * n_{s1} * \frac{\phi_{s1}^2}{4} = \pi * 6 * \frac{12^2}{4} = 678,58 \text{ mm}^2$
- $A_{stot} = A_{s1} + A_{s2} = 678,58 + 0 = 678,58 \text{ mm}^2$
- $x = \frac{-\alpha * A_{stot}}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha * A_{stot}}{b}\right)^2 + \frac{2 * \alpha * (A_{s1} * d + A_{s2} * d_2)}{b}} = \frac{-18,27 * 678,58}{1000} + \sqrt{\left(\frac{18,27 * 678,58}{1000}\right)^2 + \frac{2 * 18,27 * (678,58 * 214 + 0)}{1000}} = 61,497 \text{ mm}$
- $\sigma_c = \frac{M_{ed} * x}{\frac{b * x^3}{3} + \alpha * (A_{s1} * (d-x)^2 + A_{s2} * (x-d_2)^2)} = \frac{49 * 10^6 * 61,497}{\frac{1000 * 61,497^3}{3} + 18,27 * (678,58 * (214 - 61,497)^2 + 0)} = 8,2 \frac{N}{\text{mm}^2}$
- $\sigma_{s1} = \frac{\alpha * \sigma_c * (d-x)}{x} = \frac{18,27 * 6,5 * (264 - 69,458)}{69,458} = 330,41 \frac{N}{\text{mm}^2}$
- $\sigma_{s2} = \frac{\alpha * \sigma_c * (x-d_2)}{x} = \frac{18,27 * 82 * (61,497 - 0)}{61,497} = 373,17 \frac{N}{\text{mm}^2}$
- $f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 0,3 * 30^{\frac{2}{3}} = 2.896 \frac{N}{\text{mm}^2}$
- $x_2 = \frac{\frac{b * h^2}{2} + \alpha * (A_{s1} * d + A_{s2} * d_2)}{A_{s1} * \alpha + A_{s2} * \alpha + b * h} = \frac{\frac{1000 * 250^2}{2} + 18,27 * (678,58 * 214 + 0)}{678,58 * 18,27 + 0 + 1000 * 250} = 129 \text{ mm}$
- $I = \frac{b * x^3}{3} + \frac{b * (h-x)^3}{3} + \alpha * (A_{s1} * (d-x)^2 + A_{s2} * (x-d_2)^2) = \frac{1000 * 129^3}{3} + \frac{1000 * (250-129)^3}{3} + 18,27 * (678,58 * (214 - 129)^2 + 0) = 1,396 * 10^9 \text{ mm}^4$
- $v = h - x_2 = 250 - 129 = 121 \text{ mm}$
- $W = \frac{I}{v} = \frac{1,396 * 10^9}{121} = 1,155 * 10^7$
- $M_{cr} = W * f_{ctm} = 1,155 * 10^7 * 2.896 = 33 \text{ kNm}$
- $A_{ceff} = b * \min\left(\frac{h-x}{3}; 2,5 * (h-d); \frac{h}{2}\right) = 1000 * \min\left(\frac{250-129}{3}; 2,5 * (250 - 214); \frac{250}{2}\right) = 300 * \min(63; 90; 125) = 300 * 63 = 62834 \text{ mm}^2$
- $\rho_{eff} = \frac{A_{s1}}{A_{ceff}} = \frac{678,58}{62834} = 0.01$
- $S_{rmax} = \min\left(3,4 * c + 0,17 * \frac{\phi_{s1}}{\rho_{eff}}; 1,3 * (h-x)\right) = \min\left(3,4 * 30 + 0,17 * \frac{12}{0,01}; 1,3 * (250 - 129)\right) = \min(245; 291) = 245 \text{ mm}$
- $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \max\left(\frac{0,6 * \sigma_c}{200000}; \frac{\sigma_c}{200000} - 0,4 * f_{ctm} * \frac{1 + \alpha * \rho_{eff}}{\rho_{eff} * 200000}\right) = \max\left(\frac{0,6 * 8,2}{200000}; \frac{8,2}{200000} - 0,4 * 2,9 * \frac{1 + 18,27 * 0,01}{0,01 * 200000}\right) = \max(0,00112; 0,001224) = 0,001224$
- $w_k = S_{rmax} * (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 245 * 0,001224 = 0,30 \text{ mm}$

### 4.5.3. Variërende inputwaarden

Bij de berekening van de range van scheurwijdtes wordt er een variatie op de inputwaardes toegepast. Deze variatie is weergegeven in de literatuurstudie bij paragraaf 2.7. De variatie is afhankelijk van de gebruikte beginwaarden. Deze beginwaarden zijn de waarden die gebruikt zijn om de berekening van de scheurwijdte van 0,30 mm te berekenen. In de onderstaande tabel is de variatie op de inputwaarden terug te vinden.

Tabel 42: Variatie op de inputwaarden

	Afkorting	Waarde	Variatie
<b>Betondekking</b>	c	30	$c - 10 \leq c_i \leq c + \left(\frac{h}{50} + 7\right)$
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	30	$f_{ck} - 4 \leq f_{cki} \leq f_{ck} + 4$
<b>Hoogte</b>	h	250	$h - \left(\frac{h}{50} + 7\right) \leq h_i \leq h + \left(\frac{h}{50} + 7\right)$
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	12	$0.955 * \Phi_{s1} \leq \Phi_{s1i} \leq 1.045 * \Phi_{s1}$
<b>Kruipfactor</b>	$\varphi$	2	$0.80 * \varphi \leq \varphi_i \leq 1.40 * \varphi$
<b>Moment</b>	$M_{ed}$	49	$0.80 * M_{ed} \leq M_{edi} \leq 1.20 * M_{ed}$
<b>Gemiddelde druksterkte beton</b>	$f_{cm}$	38	$f_{ck} + 4 \leq f_{cmi} \leq f_{ck} + 12$

Deze variaties worden op de beginwaarden toegepast en hieruit worden dan de minimum- en de maximumwaarden van die inputwaarden berekend. Deze waardes zijn weergegeven in de onderstaande tabel.

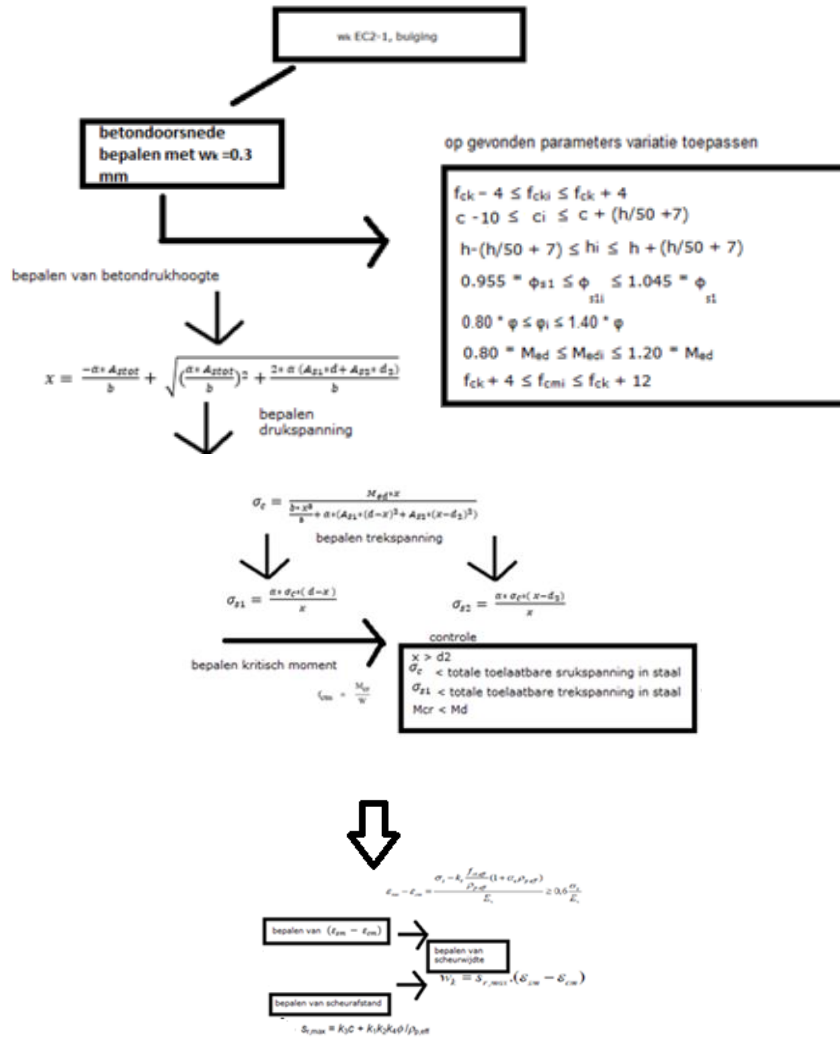
Tabel 43: Minimum- en maximumwaarden van de inputgegevens

	Afkorting	Minimum	Maximum
<b>Betondekking</b>	c	20	42
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	26	34
<b>Hoogte</b>	h	238	262
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	11,46	12,54
<b>Kruipfactor</b>	$\varphi$	1,60	2,8
<b>Moment</b>	$M_{ed}$	39,20	58,80
<b>Gemiddelde druksterkte beton</b>	$f_{cm}$	34	42

### 4.5.4. Berekening range scheurwijdte

Voor het berekenen van de scheurwijdte wordt er gebruik gemaakt van Matlab. Hierin wordt de berekening van de plaat met de variërende inputwaarden geprogrammeerd. Deze Matlab code is terug te vinden in bijlage D. Een flowchart van de berekeningen is hieronder toegevoegd.

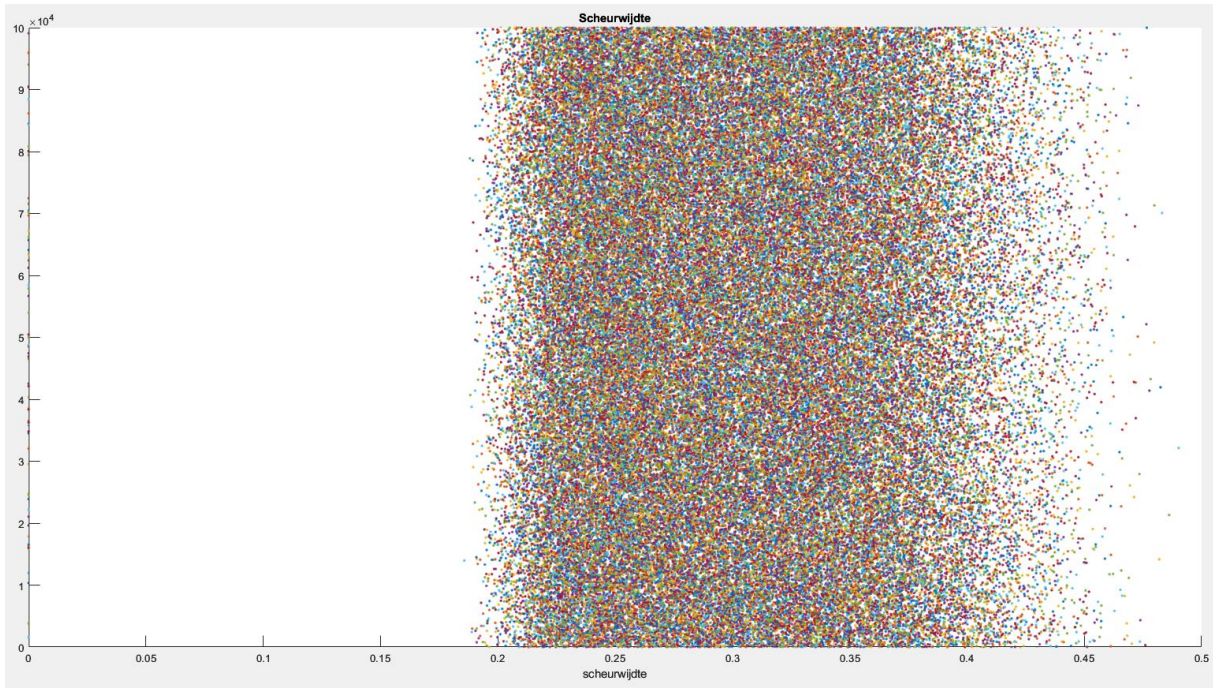
4.5.4.1. Flowchart



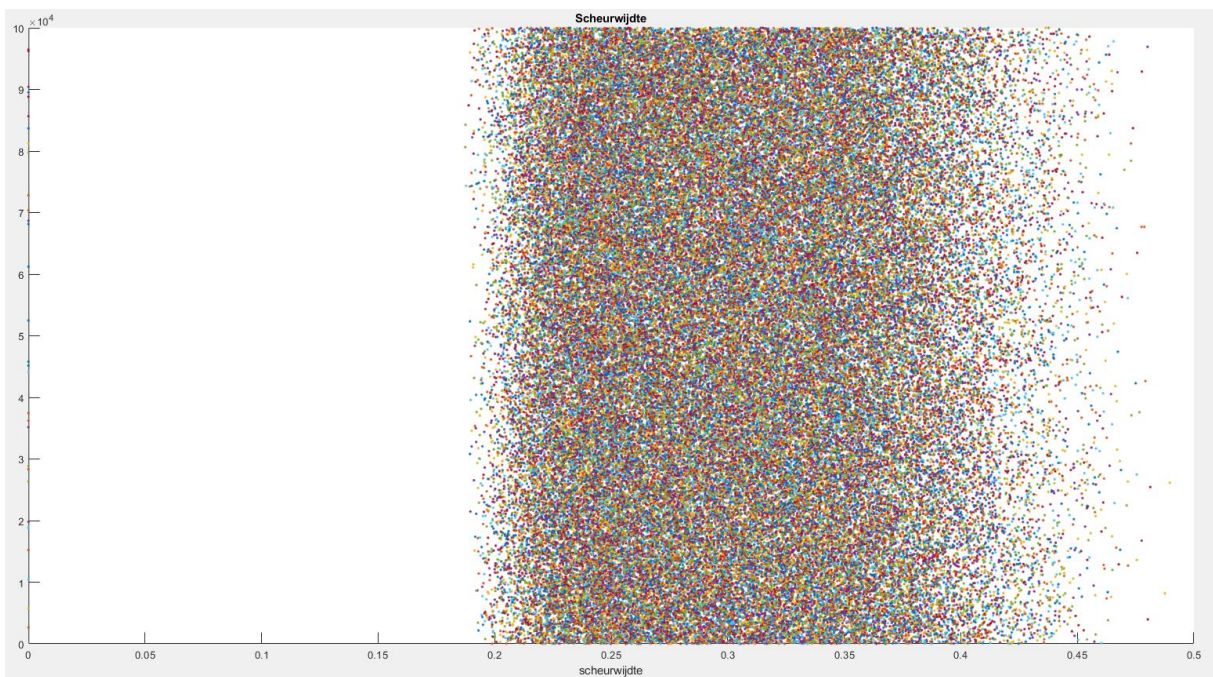
Figuur 59: Stappenplan berekening EC2-1 buiging

4.5.4.2. Grafiek van Matlab

Uit de Matlab berekening komt een spreidingsdiagram voort. Deze grafiek geeft weer welke scheurwijdte er berekend is. De onderstaande twee grafieken geven deze waarden weer. Uit deze grafiek kan er al een ruwe schatting bepaald worden van de range van scheurwijdten.



*Figuur 60: Spreidingsdiagram 1 van de range van scheurwijdten*



*Figuur 61: Spreidingsdiagram 2 van de range van scheurwijdten*

#### **4.5.5. Controle berekening range scheurwijdte**

Bij deze berekening werd dezelfde controle gedaan als bij de eerst berekening met de plaat. Dezelfde drie balken werden gebruikt omdat hierbij het berekenen van de scheurwijdte dezelfde Excel file werd gebruikt.

## 4.6. Scheurwijdte t.g.v. opgelegde verhinderde vervorming EC2-1, plaat

De vijfde berekening is de berekening van de scheurwijdte ten gevolge van de opgelegde verhinderde vervorming met trek voor een plaat. Bij deze berekening wordt er met dezelfde hoogte en breedte gewerkt als de vierde berekening.

Bij het berekenen van de scheurwijdte ten gevolge van de opgelegde verhinderde vervorming met trek wordt er eerst met de gekozen hoogte en breedte een scheurwijdte berekend die ongeveer gelijk is aan 0,30 mm. Daarna wordt de staalspanning, de gecorrigeerde diameter en de scheurwijdte bepaald. Nadat alle parameters gekend zijn kan de variatie op de inputwaarden uitgevoerd worden waarbij verder gerekend wordt naar de range van scheurwijdten.

### 4.6.1. Inputwaarden

	Afkorting	Waarde
<b>Betondekking</b>	C	30 mm
<b>Betonsterkte</b>	$f_{ck}$	30 N/mm <sup>2</sup>
<b>Hoogte</b>	H	250 mm
<b>Breedte</b>	B	1000 mm
<b>Wapening keuze</b>	$\Phi_s$	25 mm
<b>Diameter beugel</b>	$\Phi_b$	8 mm
<b>Aantal staven</b>	N	4
<b>Staalsterkte</b>	$f_{yk}$	500 N/mm <sup>2</sup>
<b>Scheurwijdtebeperking</b>	$w_k$	0,30 mm

Tabel 44: Tabel 7.2N uit Eurocode 2 [15, p. 131]

Staalspanning (MPa)	$w_k=0,4$	$w_k=0,3$	$w_k=0,2$
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

### 4.6.2. Berekening

Voor het uitvoeren van de berekening van de scheurwijdte wordt er gekozen om met Excel te werken. Hierbij kunnen de waardes snel aangepast worden tot er een scheurwijdte van ongeveer 0,30 mm wordt berekend. De correctie op de diameter wordt toegepast met tabel 7.2N uit Eurocode 2.



Tabel 45: Scheurwijdte 0,3 mm

Parameters met $w_k=0,3$	
c	30
$f_{ck}$	30
$f_{yk}$	500
$f_{ct,eff}$	2,896
Breedte	1000
Hoogte	250
$A_{ct}$	125000
$k_c$ (trek)	1
k	1,035
$h_{crit}$	250
$d_1$	42,5
d	207,5
$\Phi_{S,keuze}$	25
$w_k$	0,3
N	4
$A_{s,min}$	5 $\Phi$ 25 (1963,495)
$\phi_b$	0
$\sigma_s$	<b>190,85</b>
$\phi'_s$	34,0
$\Phi_{Scorr}$	<b>24,97</b>
$w_k$	0,30

De berekening van staalspanning wordt als volgt uitgevoerd:

$$\sigma_s = \frac{k \cdot k_c \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{A_{s,min}} = \frac{1,035 \cdot 1 \cdot 2,896 \cdot 125000}{1963,495} = 190,85 \text{ MPa}$$

Daarna wordt de gecorrigeerde diameter bepaald:

- $\Phi_s = \frac{\phi'_s \cdot k_c \cdot f_{ct,eff} \cdot h_{crit}}{2,9 \cdot (8 \cdot (h-d))} = \phi'_s \cdot \frac{2,896 \cdot 1 \cdot 250}{2,9 \cdot (8 \cdot (250-207,5))} = \phi'_s \cdot \frac{724,117}{986}$
- $\phi'_s = \frac{\Phi_s}{0,734} = \frac{25}{10,734} = 34 \text{ mm}$
- $\Phi_{Scorr} = 34 \cdot \frac{2,896 \cdot 1 \cdot 250}{2,9 \cdot (8 \cdot (250-207,5))} = 24,97 \text{ mm} = 25 \text{ mm}$

Met behulp van interpolatie kan voor diameter 25 mm en staalspanning 190,8 MPa een scheurwijdte van de tabel afgelezen worden.

Tabel 46: Gegevens lineaire interpolatie voor  $w_k$

Lin. Interpolatie	
diam 25	$w_k$
129	0,1
160	0,2
200	0,3
223,33	0,4
258	0,5
290	0,6
323	0,7
355	0,8
387	0,9

Tabel 47: Lineaire interpolatie

Interpolatie			
$\sigma_s$			$w_k$
	129	y1	0,1
	190,8	y	0,292
	387	y2	0,9

Met interpolatie geeft de berekening een scheurwijdte gelijk aan 0,292 mm.

### 4.6.3. Variërende inputwaarden

Op bepaalde inputwaarden worden variaties toegepast. De variaties zijn in de onderstaande tabel terug te vinden en worden berekend met de gekozen inputwaarden die bij het berekenen de scheurwijdte een waarde van ongeveer 0,30 mm uitkomt.

Tabel 48: Variatie op de inputwaarden

	Afkorting	Waarde	Variatie
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	30	$f_{ck} - 4 \leq f_{cki} \leq f_{ck} + 4$
<b>Betondekking</b>	c	40	$c - 10 \leq c_i \leq c + \left(\frac{h}{50} + 7\right)$
<b>Hoogte</b>	h	600	$h - \left(\frac{h}{50} + 7\right) \leq h_i \leq h + \left(\frac{h}{50} + 7\right)$
<b>Diameter wapening</b>	$\Phi_{s1}$	20	$0.955 * \Phi_{s1} \leq \Phi_{s1i} \leq 1.045 * \Phi_{s1}$
<b>Minimum wapening</b>	$A_{s,min}$	942,48	$\frac{(\Phi_{s1} * 0.955)^2 * \pi * n}{4} \leq A_{s,min}$ $\leq \frac{(\Phi_{s1} * 1.045)^2 * \pi * n}{4}$

Na het invullen van de beginwaarden van de inputwaarden kan de variatie berekend worden. Deze variaties staan in tabel 49.

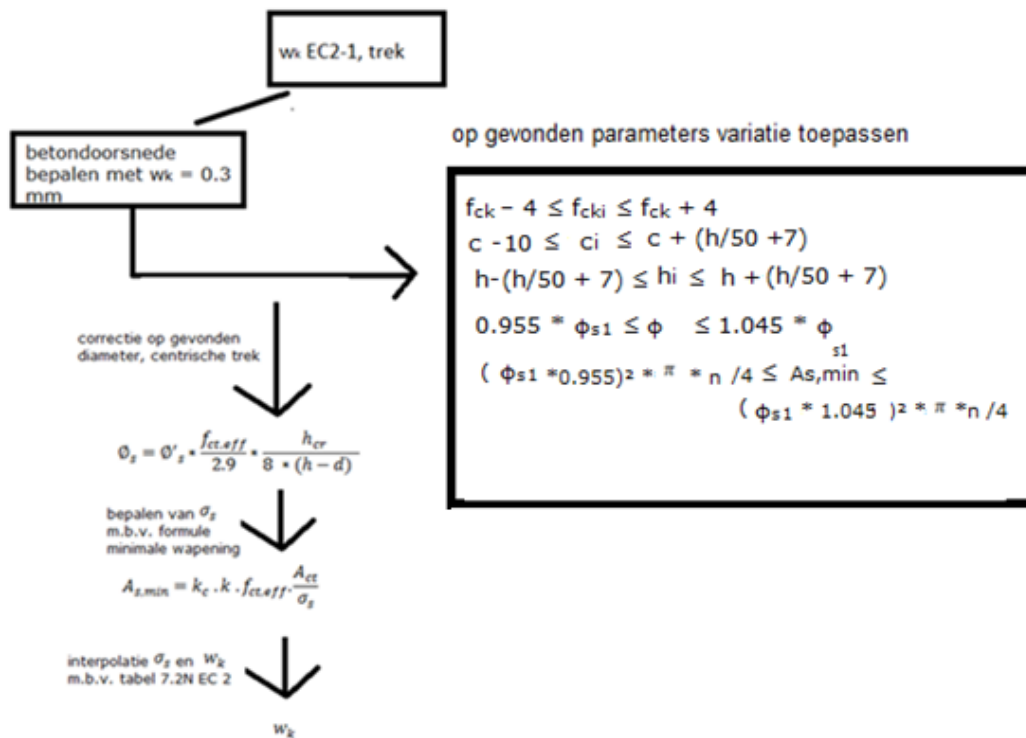
Tabel 49: Minimum en maximum inputwaarden

	Afkorting	Minimum	Maximum
<b>Betondekking</b>	c	20	42
<b>Betonkwaliteit</b>	f <sub>ck</sub>	26	34
<b>Hoogte</b>	h	238	262
<b>Diameter trekwapening</b>	Φ <sub>s1</sub>	23,875	26,125
<b>Minimumwapening</b>	A <sub>s,min</sub>	1790,757	2144,186

#### 4.6.4. Berekening range scheurwijdte

Voor het berekenen van de range van de scheurwijdtes wordt er gebruik gemaakt van Matlab. Hierin wordt de berekening geprogrammeerd zodat de variatie op de inputwaarden automatisch gebeurt en dat er een willekeurige keuze wordt gemaakt tussen de minimum- en de maximumwaarden. De Matlab code is terug te vinden in bijlage E.

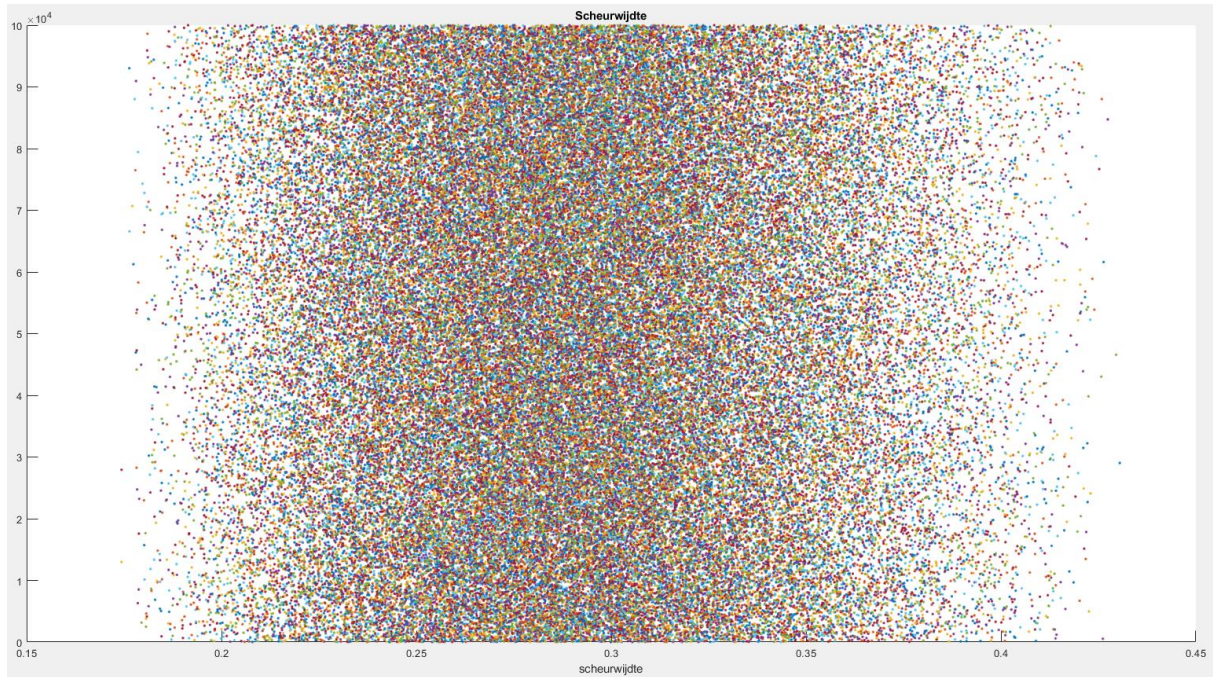
##### 4.6.4.1. Flowchart



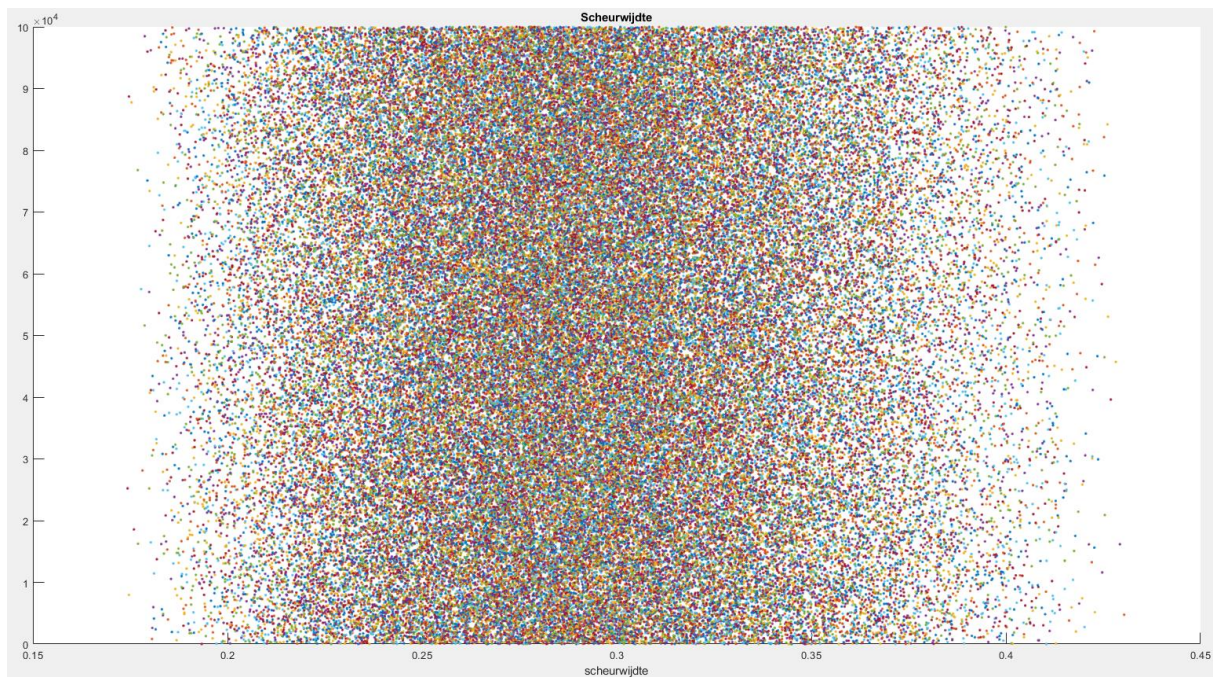
Figuur 62: Stappenplan bij berekening EC2-1 trek

##### 4.6.4.2. Grafiek Matlab

Uit de Matlab code wordt er een spreidingsdiagram verkregen. Met deze grafiek kan er al een ruwe schatting gemaakt worden tussen welke waarde de scheurwijdtes variëren.



*Figuur 63: Spreidingsdiagram 1 van de range van scheurwijdten*



*Figuur 64: Spreidingsdiagram 2 van de range van scheurwijdten*

## **4.7. Scheurwijdte t.g.v. opgelegde verhinderde vervorming EC2-3, plaat**

### **4.7.1. Inputwaarden**

Voor het berekenen van de scheurwijdtes worden de betondekking, de betonsterkte, de trekwapening en het aantal staven van de trekwapening gekozen zodat er een scheurwijdte berekend wordt van ongeveer 0,30 mm. Deze waarden worden gekozen met een breedte van 1000 mm of 1 m en een hoogte van 250 mm.

Tabel 50: Inputwaarden berekening scheurwijdte

	Afkorting	Waarde
<b>Betondekking</b>	C	30 mm
<b>Betonsterkte</b>	$f_{ck}$	25 N/mm <sup>2</sup>
<b>Kruip coëfficiënt</b>	$\Phi$	1,00
<b>Hoogte</b>	H	250 mm
<b>Breedte</b>	B	1000 mm
<b>Trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	12 mm
<b>Aantal trekstaven</b>	$n_{s1}$	9
<b>Elasticiteitsmodulus staal</b>	$E_s$	200000 N/mm <sup>2</sup>
<b>Staalsterkte</b>	$f_{yk}$	500 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.7.2. Berekening

- $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 25 + 8 = 33 \frac{N}{mm^2}$
- $E_{cm} = 22000 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} = 22000 * \left(\frac{33}{10}\right)^{0,3} = 31475,81 \frac{N}{mm^2}$
- $E_c = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi} = \frac{31475,81}{1 + 1,0} = 15737,90 \frac{N}{mm^2}$
- $f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 0,3 * 25^{\frac{2}{3}} = 2.565 \frac{N}{mm^2}$
- $\alpha = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{15737,9} = 12,708$
- $d_1 = c + \frac{\phi_{s1}}{2} = 30 + 6 = 36 \text{ mm}$
- $d = h - d_1 = 250 - 36 = 214 \text{ mm}$
- $A_{s1} = \pi * n_{s1} * \frac{\phi_{s1}^2}{4} = \pi * 9 * \frac{12}{4} = 1017,88 \text{ mm}^2$
- $A_{ceff} = b * \min\left(2.5 * (h - d); \frac{h}{2}\right) = 1000 * \min\left(2.5 * (250 - 214); \frac{250}{2}\right) = 1000 * \min(90; 125) = 1000 * 90 = 90000 \text{ mm}^2$
- $\rho_{eff} = \frac{A_{s1}}{A_{ceff}} = \frac{1017,88}{90000} = 0.01$
- $S_{rmax} = 3.4 * c + 0.8 * 1 * 0.425 * \frac{\phi_{s1}}{\rho_{eff}} = 3.4 * 30 + 0.8 * 1 * 0.425 * \frac{12}{0.01} = 463 \text{ mm}$
- $kc = 1$  (zuivere trek)
- $h = 250 \rightarrow k = 1,00$
- $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{0.5 * \alpha * kc * k * f_{ct,eff} * \left(1 + \frac{1}{\alpha * \rho_{eff}}\right)}{E_s} = \frac{0.5 * 12,708 * 1 * 1 * 2.565 * \left(1 + \frac{1}{12,708 * 0.01}\right)}{200000} = 6,485 * 10^{-4}$
- $w_k = S_{rmax} * (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 463 * 6,485 * 10^{-4} = 0,30 \text{ mm}$

### 4.7.3. Variërende inputwaarden

Voor de inputwaarden wordt er gekozen om een variatie toe te passen zoals weergegeven is in de literatuurstudie variatie op de inputwaarde. De variatie die bij deze berekening wordt gebruikt is terug te vinden in de onderstaande tabel.

Tabel 51: Variatie op de inputwaarden

	Afkorting	Waarde	Variatie
<b>Betondekking</b>	c	30	$c - 10 \leq c_i \leq c + \left(\frac{h}{50} + 7\right)$
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	25	$f_{ck} - 4 \leq f_{cki} \leq f_{ck} + 4$
<b>Hoogte</b>	h	250	$h - \left(\frac{h}{50} + 7\right) \leq h_i \leq h + \left(\frac{h}{50} + 7\right)$
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	12	$0,955 * \Phi_{s1} \leq \Phi_{s1i} \leq 1,045 * \Phi_{s1}$
<b>Gemiddelde druksterkte beton</b>	$f_{cm}$	33	$f_{ck} + 4 \leq f_{cmi} \leq f_{ck} + 12$
<b>Kruipfactor</b>	$\Phi$	1	$0.80 * \Phi \leq \Phi_i \leq 1.40 * \Phi$

De variatie wordt toegepast op de inputwaarden die worden gebruikt om een scheurwijdte rond de 0,30 mm te berekenen. De minimum- en maximumwaarden die uit deze berekening volgen zijn in tabel 52 weergegeven.

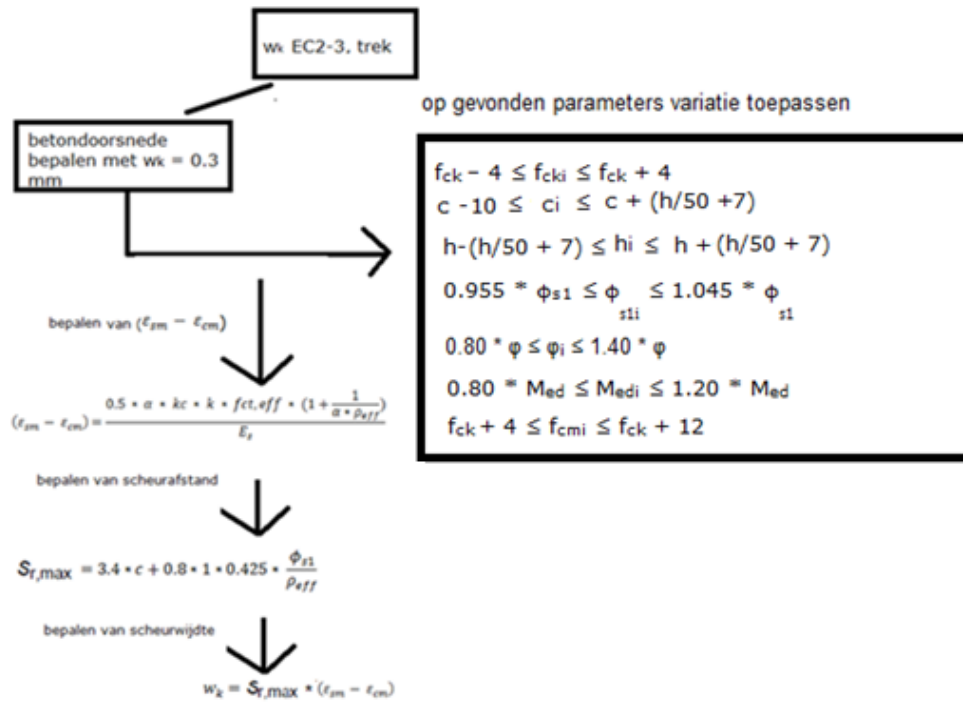
Tabel 52: Minimum- en maximumwaarde van de inputgegevens

	Afkorting	Minimum	Maximum
<b>Betondekking</b>	c	20	42
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	21	29
<b>Hoogte</b>	h	238	262
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	11,46	12,45
<b>Gemiddelde druksterkte beton</b>	$f_{cm}$	29	37
<b>Kruipfactor</b>	$\Phi$	0,80	1,40

### 4.7.4. Berekening range scheurwijdte

Voor het berekenen van de scheurwijdte van de trek wordt er gebruik gemaakt van de formule uit Eurocode 2 deel 3 bijlage M. De formules worden ingegeven in Matlab om de range van scheurwijdtes te bepalen. De Matlab code is terug te vinden in bijlage F.

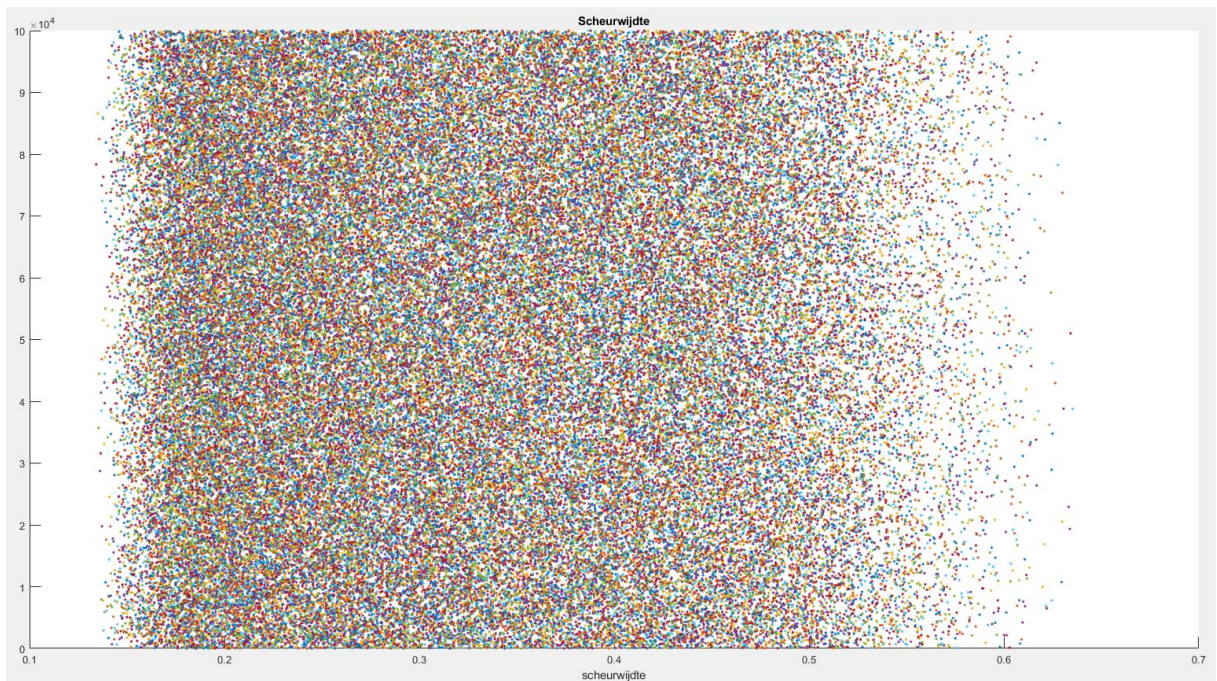
4.7.4.1. Flowchart



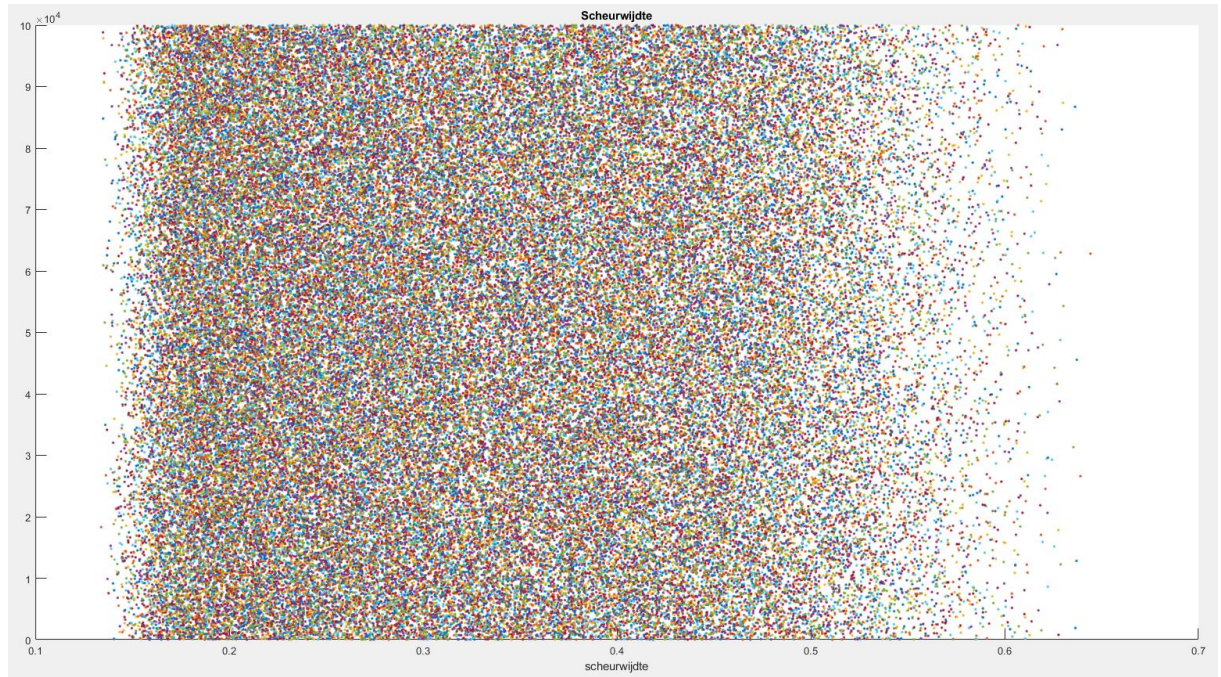
Figuur 65: Stappenplan bij berekening EC-3 trek

4.7.4.2. Grafiek Matlab

Na het ingegeven van de berekening in Matlab met de variatie op de inputwaarde wordt er een spreidingsdiagram weergegeven van de berekende waarde. Deze waarden geven de scheurwijdtes weer die berekend zijn. De berekende waarden geven samen de range weer waar tussen de scheurwijdtes kunnen liggen. Deze scheurwijdte kan op de spreidingsdiagram afgelezen worden en ruw geschat worden.



Figuur 66: Spreidingsdiagram 1 met variërende inputwaarden



*Figuur 67: Spreidingsdiagram 2 met variërende inputwaarden*



## 5. Discussie

### 5.1. Histogram

Om de data ordelijk en duidelijk weer te geven wordt er gebruik gemaakt van een histogram. Hierbij wordt de berekening 100 000 maal doorlopen en de verkregen waarden worden volgens frequentie gesorteerd. De verkregen frequenties worden doormiddel van kolommen in het histogram weergegeven. Elke kolom geeft weer hoeveel keer één bepaalde frequentie voorkomt.

Daarna wordt uit de verkregen waarden het minimum, het maximum, het gemiddelde en de standaarddeviatie berekend. Met de minimum- en maximumwaarde wordt de range van de scheurwijdtes vastgelegd. De standaarddeviatie wordt berekend om na te gaan of het histogram normaal verdeeld is of niet. Een histogram is normaal verdeeld als de waarde van de standaarddeviatie zich tussen de -1,0 en 1,0 bevindt. Als de waarden niet binnen dit interval liggen wordt de verdeling niet als normaal beschouwd. Om na te gaan verdeling normaal verdeeld is, wordt er gebruik gemaakt van de Kolmogorov-Smirnovtoets. Deze berekeningen zijn te vinden in bijlage K. Voor de zes berekeningen kwam de Kolmogorov-Smirnovtoets normaal verdeeld uit.

Als het gemiddelde, de mediaan en de modus gelijk zijn aan elkaar wordt het histogram als normaal verdeeld beschouwd. Als deze waarden niet gelijk zijn aan elkaar kan een verdeling nog normaal verdeeld zijn maar heeft de verdeling een scheefheid. Daarnaast toont de standaarddeviatie de variabiliteit aan van de range van scheurwijdtes.

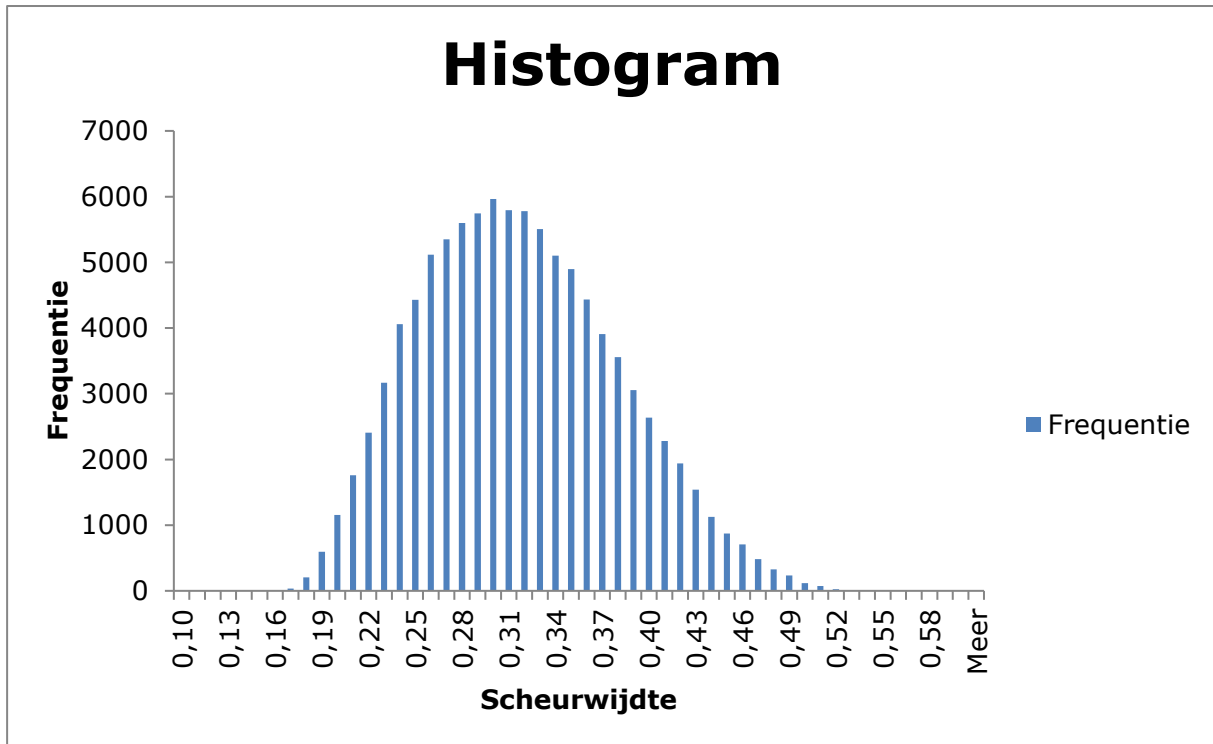
#### 5.1.1. Balk

##### 5.1.1.1. Buiging

Het onderstaande histogram heeft een normale verdeling met een scheefheid naar rechts. Als er een scheefheid naar rechts is wordt dit een rechts-scheve verdeling genoemd. De waarde van het gemiddelde, de mediaan en de modus komen niet overeen, dit wil zeggen dat de verdeling normaal verdeeld is met een scheefheid. Bij dit histogram is de verkregen range van scheurwijdte gelijk aan [0,153 mm; 0,537 mm]. De standaarddeviatie is gelijk aan 0,063 dit geeft weer dat het histogram normaal verdeeld is. Als laatste wordt het gemiddelde weergegeven in de tabel, het gemiddelde heeft een waarde van 0,312 mm. Deze waarde verschilt 0,012 mm van de originele berekening. Bij de originele berekening is de scheurwijdte gelijk aan 0,30 mm en is gelijk aan de waarde die terug te vinden is in Eurocode 2.

Tabel 53: Berekende waarden buiging balk

	Waarde
<b>Minimum</b>	0,153
<b>Maximum</b>	0,537
<b>Gemiddelde</b>	0,312
<b>Standaarddeviatie</b>	0,063
<b>Mediaan</b>	0,308
<b>Modus</b>	0,295



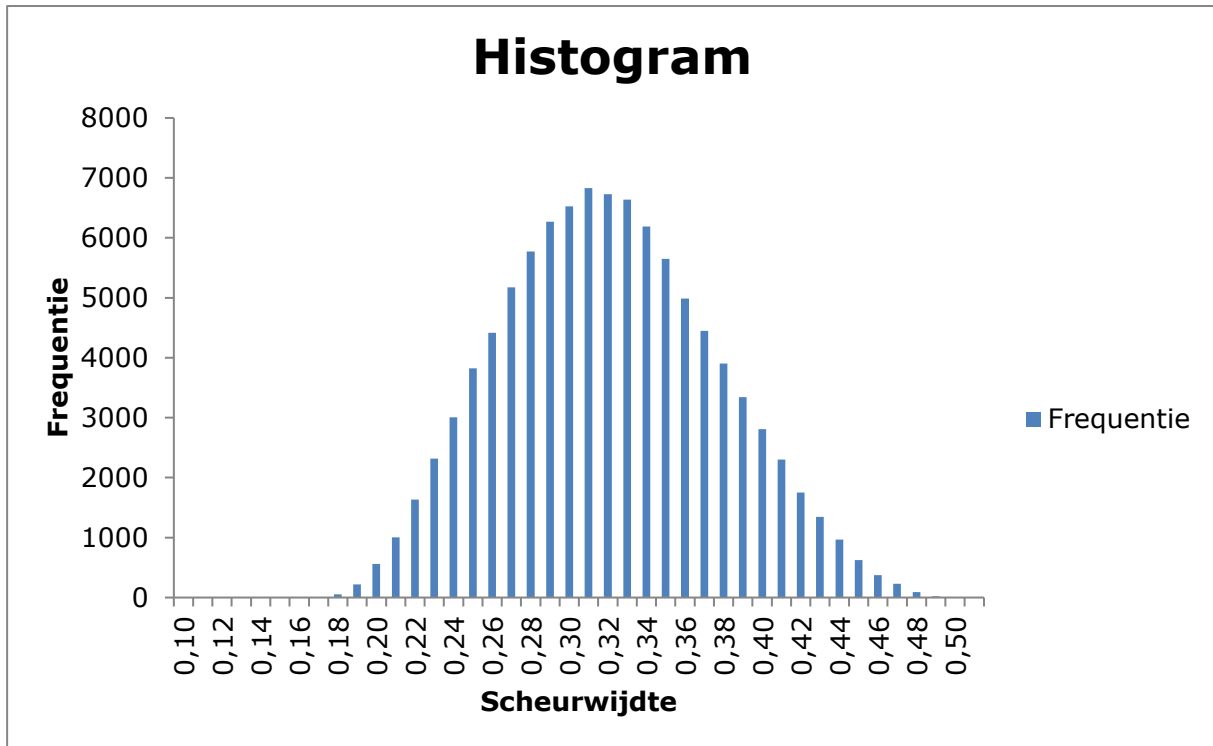
Figuur 68: Grafiek van de scheurwijdte bij buiging

5.1.1.2. Trek Eurocode 2 – deel 1

Voor de tweede berekening van de balk wordt het volgende interval van scheurwijdtes berekend [0,170; 0,494]. Bij dit interval is het gemiddelde gelijk aan 0,316 mm. De waarde van het gemiddelde is gelijk aan de waarde van de oorspronkelijke berekening. Bij de oorspronkelijke berekening is de scheurwijdte ongeveer gelijk is aan 0,30 mm en dat is de waarde die terug te vinden is in Eurocode 2. De laatste parameter die wordt berekend is de standaarddeviatie. De standaarddeviatie heeft een waarde van 0,056. Deze waarde geeft weer dat het histogram normaal is verdeeld en een scheefheid heeft naar rechts omdat de waarde positief is. Op het onderstaande histogram is te zien dat er een goede normale verdeling is met een kleine scheefheid naar rechts. De modus, het gemiddelde en de mediaan zijn niet gelijk aan elkaar, dit geeft weer dat er een scheefheid is op de verdeling.

Tabel 54: Berekende waarden EC2 - 1 balk

	Waarde
<b>Minimum</b>	0,170
<b>Maximum</b>	0,494
<b>Gemiddelde</b>	0,316
<b>Standaarddeviatie</b>	0,056
<b>Mediaan</b>	0,314
<b>Modus</b>	0,309



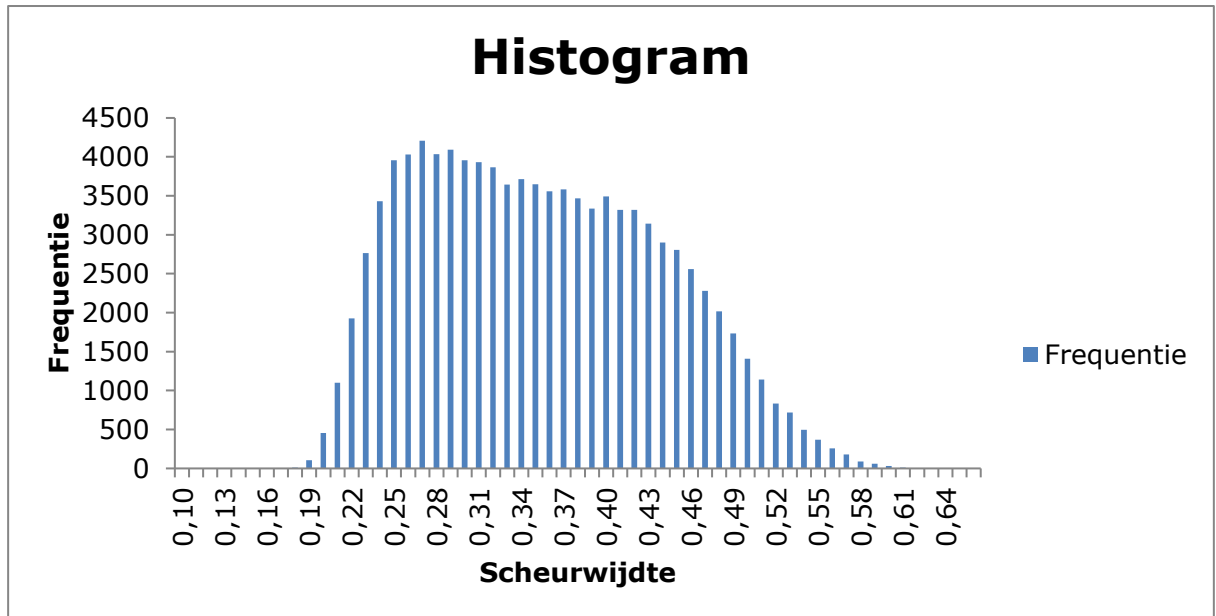
Figuur 69: Histogram van de rang van de scheurwijdtes bij EC2-1

### 5.1.1.3. Trek Eurocode 2 – deel 3

Voor de laatste berekening van de balk met Eurocode 2 deel 3 wordt er een normaal verdeeld histogram uitgetekend met de berekende waarde. Dit wordt afgeleid uit de standaarddeviatie die een waarde van 0,085 heeft. De waarde is positief en ligt tussen het interval van -1,0 en 1,0. Dit verwijst naar een normale verdeling met een scheefheid. Deze scheefheid kan afgeleid worden uit de mediaan, het gemiddelde en de modus. Deze drie factor verschillen van elkaar, dus er is een scheefheid op het histogram. Uit het histogram wordt de range van scheurwijdtes gehaald, deze range van scheurwijdtes ligt tussen 0,174 mm en de 0,629 mm met een gemiddelde van 0,349 mm. De waarde van het gemiddelde ligt redelijk hoog en verschilt het meeste van de drie berekeningen met de gevonden waarde in Eurocode 2 voor de maximale scheurwijdte.

Tabel 55: Berekende waarden EC2 - 3 balk

	Waarde
<b>Minimum</b>	0,174
<b>Maximum</b>	0,629
<b>Gemiddelde</b>	0,349
<b>Standaarddeviatie</b>	0,085
<b>Mediaan</b>	0,342
<b>Modus</b>	0,290



*Figuur 70: Histogram range van scheurwijdtes EC2-3*

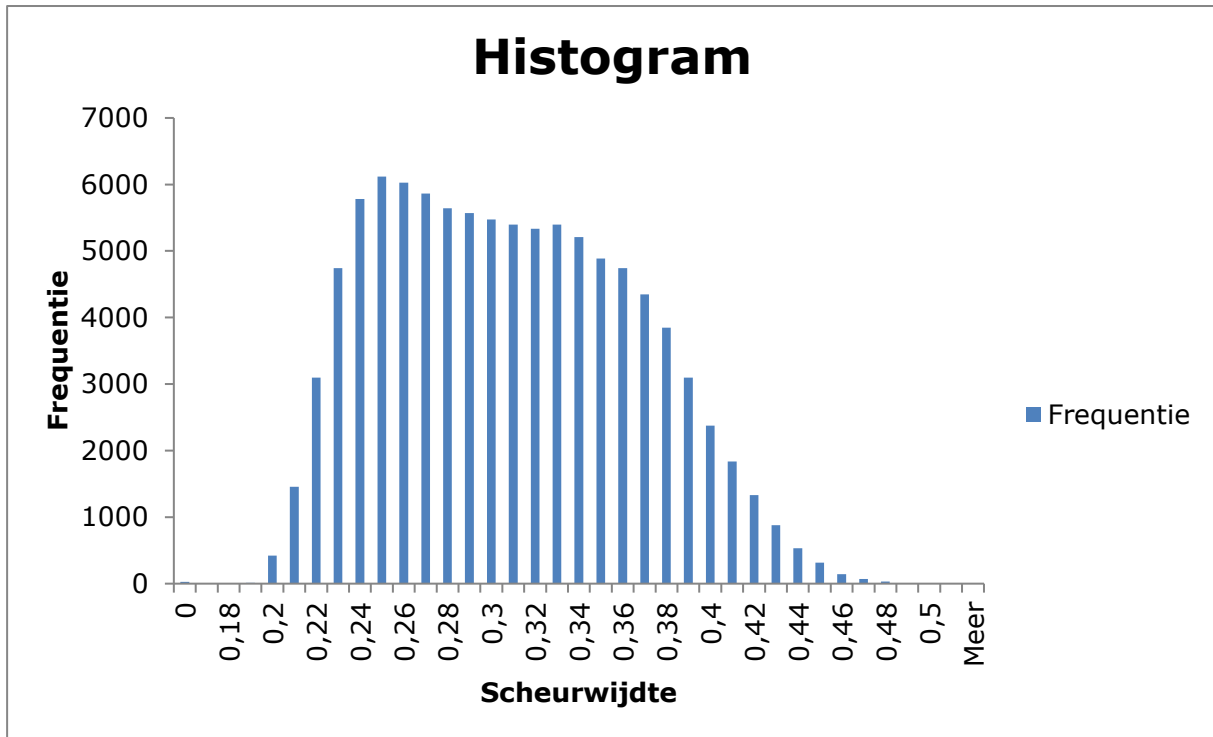
### 5.1.2. **Plaat**

#### 5.1.2.1. *Buiging*

Voor de berekening van buiging bij een plaat is het histogram normaal verdeeld met een scheefheid. Om te zien of het histogram normaal verdeeld is wordt het gemiddelde, de mediaan en de modus uitgerekend. Deze waarden zijn niet aan elkaar gelijk dus heeft de verdeling een scheefheid naar links of rechts. Daarnaast wordt de standaarddeviatie gebruikt om af te leiden of een histogram normaal verdeeld is. De standaarddeviatie heeft een waarde van 0,057. Daarnaast wordt er met de berekende waarden een gemiddelde uitgerekend, deze waarde is gelijk aan 0,303 mm. Deze waarde ligt dichtbij de waarde van Eurocode 2. De range van waarden voor de scheurwijdten bevindt zich tussen de 0,00 mm en 0,488 mm. Deze waarden zijn af te lezen op het histogram.

*Tabel 56: Berekende waarden buiging plaat*

	<b>Waarde</b>
<b>Minimum</b>	0,000
<b>Maximum</b>	0,488
<b>Gemiddelde</b>	0,303
<b>Standaarddeviatie</b>	0,057
<b>Mediaan</b>	0,300
<b>Modus</b>	0,254



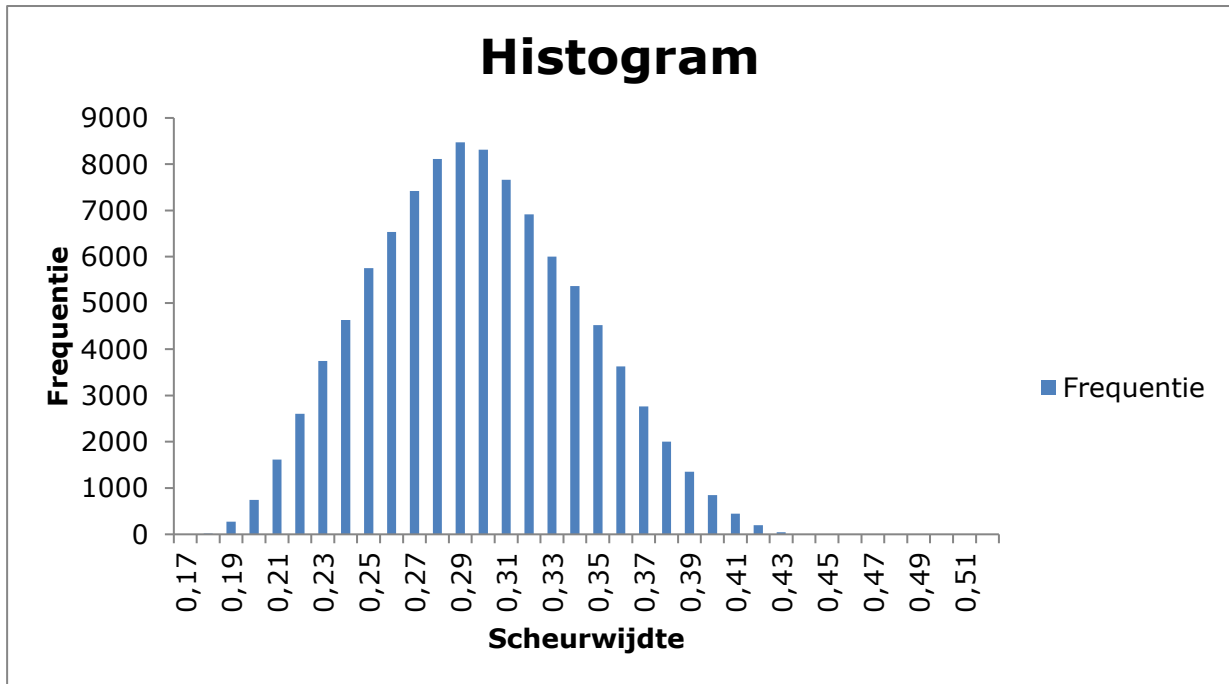
*Figuur 71: Histogram range scheurwijdtes buiging plaat*

**5.1.2.2. Trek Eurocode 2 – deel 1**

Bij de berekening van trek uit Eurocode 2 deel 1 wordt de volgende range van scheurwijdtes bekomen [0,174; 0,430]. Het gemiddelde van de range is gelijk aan 0,292 mm. Deze waarde ligt 0,008 mm onder de waarde die terug te vinden is in Eurocode 2 voor de maximale scheurwijdte. Daarnaast wordt de standaarddeviatie berekend, deze waarde wordt berekend om na te gaan of het histogram normaal verdeeld is. Bij dit histogram is er een normale verdeling. Om te weten of het histogram normaal verdeeld is of een scheefheid heeft worden de modus, de mediaan en het gemiddelde met elkaar vergeleken. Deze waarde zijn niet gelijk aan elkaar en dus heeft de verdeling een scheefheid. De waarde van de standaarddeviatie, 0,045 mm, ligt tussen het interval van [-0,5; 0,5] om een goede normale verdeling in het histogram te verkrijgen.

*Tabel 57: Berekende waarden EC2 – 1 plaat*

	<b>Waarde</b>
<b>Minimum</b>	0,174
<b>Maximum</b>	0,430
<b>Gemiddelde</b>	0,292
<b>Standaarddeviatie</b>	0,045
<b>Mediaan</b>	0,290
<b>Modus</b>	0,293



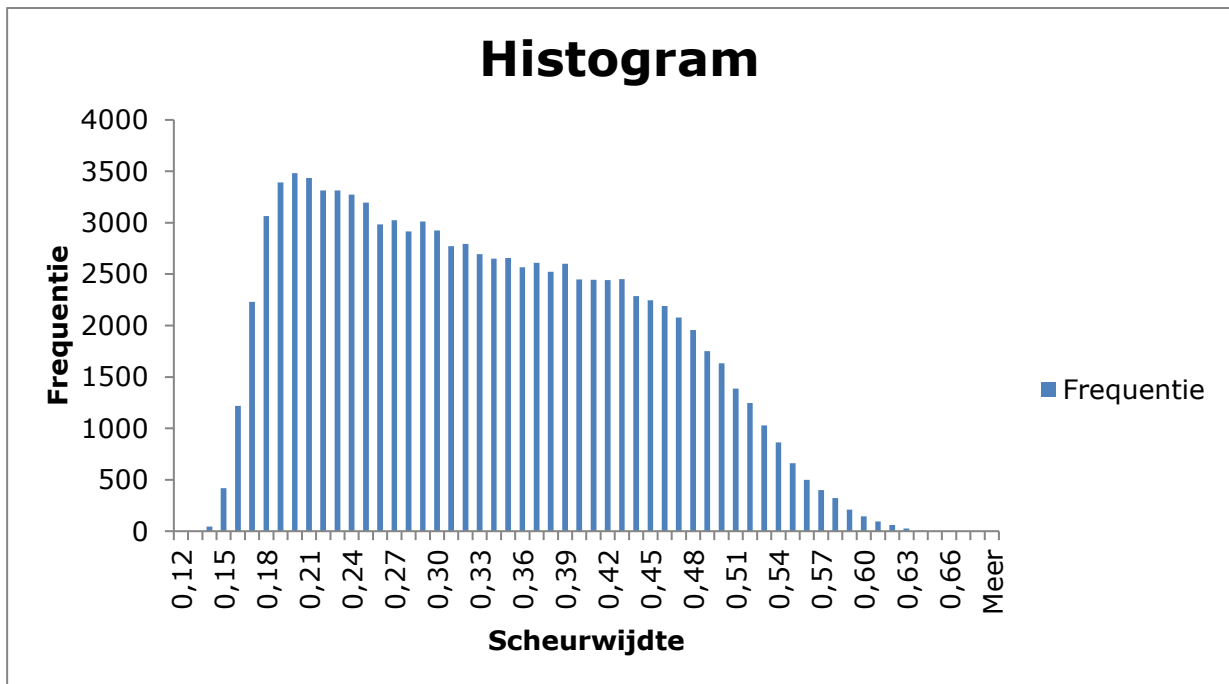
Figuur 72: Histogram range scheurwijdtes EC2 - 1 plaat

### 5.1.3. Trek Eurocode 2 – deel 3

Het histogram bij de laatste berekening van de plaat is normaal verdeeld. Dit wordt afgeleid uit de standaarddeviatie die gelijk is aan 0,109 mm. Deze waarde geeft weer dat het histogram normaal verdeeld is met een scheefheid. Deze scheefheid wordt afgeleid uit het feit dat de mediaan, de modus en het gemiddelde niet gelijk zijn aan elkaar. Uit de berekeningen wordt een range van waarden gehaald, tussen deze range kan de scheurwijdte liggen. Het interval is gelijk aan [0,134; 0,647]. Bij dit interval wordt er een gemiddelde van 0,328 berekend. Deze waarde verschilt het meeste van de drie berekeningen met de waarde die in de Eurocode 2 terug te vinden is voor de maximale scheurwijdte.

Tabel 58: Berekeningen EC2 - 3 plaat

	Waarde
<b>Minimum</b>	0,134
<b>Maximum</b>	0,647
<b>Gemiddelde</b>	0,328
<b>Standaarddeviatie</b>	0,109
<b>Mediaan</b>	0,317
<b>Modus</b>	0,185



*Figuur 73: Histogram range scheurwijdten EC2 – 3 plaat*

## 5.2. Scheefheid

Een histogram kan een scheefheid hebben. Deze scheefheid kan naar links of naar rechts zijn en is afhankelijk van de mediaan en het gemiddelde. Als de mediaan groter is als het gemiddelde is er een links-scheve verdeling. Als de mediaan kleiner is dan het gemiddelde is de verdeling rechtsscheef. Deze verdeling geeft weer aan welke kant van de verdeling er meer waarden zijn. Als het linksscheef is zijn er meer waarden kleiner als het gemiddelde en bij een rechts-scheve verdeling zijn er meer waarde groter als het gemiddelde.

Naast de vergelijking van de mediaan en het gemiddelde kan er een scheefheidsfactor worden berekend. Voor het berekenen ervan wordt de volgende formule gebruikt:

$$\text{Scheefheid} = \left( \frac{\frac{\sum(x-\mu)^3}{n}}{\left(\frac{\sum(x-\mu)^2}{n}\right)^{\frac{3}{2}}} \right)$$

- X : De gebruikt waarde van de berekening
- $\mu$  : Het gemiddelde
- n : De totale hoeveelheid berekende waarde, bij deze berekeningen 100 000.

Deze factor geeft de grootte van de scheefheid weer. Voor het bereken van de scheefheid wordt gebruik gemaakt van Excel. Als de scheefheid positief is, is de verdeling rechtsscheef. Als de scheefheid negatief is, is de verdeling linksscheef.

## 5.2.1. Balk

### 5.2.1.1. Buiging

Bij een balk in buiging is de berekende waarde van de mediaan gelijk aan 0,312 mm en het gemiddelde 0,308 mm. De waarde van het gemiddelde is kleiner dan mediaan dus is het histogram linksscheef. De waarde van de scheefheidsfactor is 0,315. Dit geeft aan dat de verdeling rechtsscheef is. Beide methoden geven een andere scheefheid weer. De vuistregel dat een histogram linksscheef is als het gemiddelde kleiner is als de mediaan faalt frequent. Dit kan komen doordat ene staart langer is en de andere zwaarder [30]. Er kan dus enkel een besluit worden getrokken door naar het histogram te kijken en rekening te houden met de scheefheid. Hieruit kan besloten worden dat de verdeling rechtsscheef is.

Tabel 59: Berekening scheefheid buiging balk

	Waarde
<b>Gemiddelde</b>	0,308
<b>Mediaan</b>	0,312
<b>Scheefheid</b>	0,315

### 5.2.1.2. Trek Eurocode 2 – deel 1

Bij de berekening van trek volgens Eurocode 2 deel 1 is de scheefheid 0,176. Dit is de laagste scheefheidsfactor voor de drie berekeningen van de balk. Dit wil zeggen dat het histogram maar een kleine scheefheid heeft. Voor de bepaling van de scheurwijdte wordt de mediaan berekend, deze heeft een waarde van 0,314 mm. De waarde van de mediaan is kleiner dan het gemiddelde. Bij deze berekening is de scheefheid naar rechts.

Tabel 60: Berekening scheefheid EC2 - 1 balk

	Waarde
<b>Gemiddelde</b>	0,316
<b>Mediaan</b>	0,314
<b>Scheefheid</b>	0,176

### 5.2.1.3. Trek Eurocode 2 – deel 3

Bij de derde en laatste berekening van de balk wordt er een mediaan van 0,342 mm berekend. Deze waarde is kleiner dan het gemiddelde van 0,349 mm. Dit wil zeggen dat de grafiek rechtsscheef is. De waarde van de scheefheid is gelijk aan 0,290 mm en geeft weer dat het histogram recht scheef is. Deze berekening heeft de grootste scheefheid voor de drie berekeningen van de balk.

Tabel 61: Berekening scheefheid EC2 - 3 balk

	Waarde
<b>Gemiddelde</b>	0,349
<b>Mediaan</b>	0,342
<b>Scheefheid</b>	0,290



## 5.2.2. *Plaat*

### 5.2.2.1. *Buiging*

Als de factor van de scheefheid voor een plaat onder buiging wordt berekend, wordt er een waarde van 0,254 bekomen. Deze waarde geeft weer dat de verdeling rechtsscheef is. Als de mediaan en het gemiddelde met elkaar worden vergeleken, geeft dit weer dat de verdeling rechtsscheef is omdat het gemiddelde groter is dan de mediaan. Hieruit kan er besloten worden dat de verdeling rechtsscheef is.

*Tabel 62: Berekening scheefheid buiging plaat*

	<b>Waarde</b>
<b>Gemiddelde</b>	0,303
<b>Mediaan</b>	0,300
<b>Scheefheid</b>	0,254

### 5.2.2.2. *Trek Eurocode 2 – deel 3*

Bij deze berekening is de mediaan kleiner dan het gemiddelde, dit wijst op een recht-scheve verdeling. Daarnaast wordt er naar de scheefheidsfactor van de berekening gekeken. Deze waarde is gelijk aan 0,161. De waarde is positief en dit geeft aan dat de vergelijking rechtsscheef is. De twee methodes geven beide weer dat de verdeling rechtsscheef is.

*Tabel 63: Berekening scheefheid EC2-1 plaat*

	<b>Waarde</b>
<b>Gemiddelde</b>	0,292
<b>Mediaan</b>	0,290
<b>Scheefheid</b>	0,154

### 5.2.2.3. *Trek Eurocode 2 – deel 3*

Voor de berekening van een plaat in trek volgens Eurocode 2 deel 3 wordt er een scheefheid van 0,305 berekend. Deze waarde geeft weer dat de verdeling rechtsscheef is. Daarnaast is de mediaan kleiner dan het gemiddelde dit duidt op een rechts-scheve verdeling. De verdeling is dus rechtsscheef.

*Tabel 64: Berekening scheefheid EC2-3 plaat*

	<b>Waarde</b>
<b>Gemiddelde</b>	0,328
<b>Mediaan</b>	0,317
<b>Scheefheid</b>	0,305

### 5.3. Laagste waarde range

Bij de berekeningen voor de range van scheurwijdtes is er telkens een minimale waarde en een maximale waarde. Voor de minimale waarden worden de inputwaarden gezocht. De inputwaarden worden voor elke berekening in een tabel gezet. De tabellen met de inputwaarden zijn voor elke berekening apart weergegeven in dit hoofdstuk. De berekeningen zijn toegevoegd in bijlage G.

#### 5.3.1. Balk

##### 5.3.1.1. Buiging

Voor het berekenen van de laagste waarde, 0,153 mm, in de range van de scheurwijdtes worden de volgende inputwaarden gebruikt.

Tabel 65: Laagste waarde buiging balk

	Afkorting	Waarde
<b>Betondekking</b>	c	30,5 mm
<b>Betonsterkte</b>	$f_{ck}$	33,50 N/mm <sup>2</sup>
<b>Kruip coëfficiënt</b>	$\Phi$	1,268
<b>Hoogte</b>	h	615,95 mm
<b>Breedte</b>	b	287 mm
<b>Diameter beugel</b>	$\Phi_b$	10,0079 mm
<b>Trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	26,125 mm
<b>Aantal trekstaven</b>	$n_{s1}$	2
<b>Drukwapening</b>	$\Phi_{s2}$	14,63 mm
<b>Aantal drukstaven</b>	$n_{s2}$	2
<b>Buigmoment SLS-Q</b>	$M_{Ed}$	96 kNm
<b>Elasticiteitsmodulus staal</b>	$E_s$	200000 N/mm <sup>2</sup>
<b>Staalsterkte</b>	$f_{yk}$	500 N/mm <sup>2</sup>

##### 5.3.1.2. Trek Eurocode 2 – deel 1

Voor de laagste waarde van de berekening, 0,170 mm, wordt er gezocht naar de gebruikte inputwaarden. In de onderstaande tabel zijn de gevonden inputwaarden weergegeven.

Tabel 66: Laagste waarde EC2-1 balk

	Afkorting	Inputwaarde
<b>Betondekking</b>	C	40 mm
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	26 N/mm <sup>2</sup>
<b>Breedte</b>	B	287 mm
<b>Hoogte</b>	H	583,57 mm
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	20,9 mm
<b>Diameter beugel</b>	$\Phi_b$	7,64 mm
<b>Minimumwapening</b>	$A_{s,min}$	1014 mm <sup>2</sup>

##### 5.3.1.3. Trek Eurocode 2 – deel 3

Voor de laagste waarde van de range te berekenen wordt er gekeken naar welke inputwaarden er gebruikt worden. Voor de waarde van 0,174 worden de onderstaande inputwaarden gebruikt.

Tabel 67: Laagste waarde EC2-3 balk

	Afkorting	Inputwaarde
<b>Betondekking</b>	C	30 mm
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	28 N/mm <sup>2</sup>
<b>Breedte</b>	B	287 mm
<b>Hoogte</b>	H	616,43 mm
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	20,9 mm
<b>Diameter beugel</b>	$\Phi_b$	10,45 mm
<b>Kruipfactor</b>	$\Phi$	1,3
<b>Gemiddelde druksterkte beton</b>	$f_{cm}$	36 N/mm <sup>2</sup>

### 5.3.2. Plaat

#### 5.3.2.1. Buiging

De laagste waarde van de scheurwijdte range is gelijk aan 0,00. Dit wil zeggen dat er geen scheur is in de plaat. De volgende inputwaarden worden gebruikt voor het berekenen van deze plaat zonder scheur.

Tabel 68: Laagste waarde buiging plaat

	Afkorting	Waarde
<b>Betondekking</b>	C	20 mm
<b>Betonsterkte</b>	$f_{ck}$	34 N/mm <sup>2</sup>
<b>Kruip coëfficiënt</b>	$\Phi$	2,1
<b>Hoogte</b>	H	262 mm
<b>Breedte</b>	B	1000 mm
<b>Trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	11,46 mm
<b>Aantal trekstaven</b>	$n_{s1}$	6
<b>Buigmoment SLS-Q</b>	$M_{Ed}$	39,2 kNm
<b>Elasticiteitsmodulus staal</b>	$E_s$	200000 N/mm <sup>2</sup>
<b>Staalsterkte</b>	$f_{yk}$	500 N/mm <sup>2</sup>

#### 5.3.2.2. Trek Eurocode 2 – deel 1

De laagste waarde voor een plaat in trek volgens de berekening van Eurocode 2 deel 1 is 0,174 mm. De inputwaarden uit tabel 69 worden gebruikt om deze waarde te berekenen.

Tabel 69: Laagste waarde EC2-1 plaat

	Afkorting	Inputwaarde
<b>Betondekking</b>	C	30 mm
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	26 N/mm <sup>2</sup>
<b>Hoogte</b>	H	239 mm
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	26,125 mm
<b>Minimumwapening</b>	$A_{s,min}$	2144,19 mm <sup>2</sup>

#### 5.3.2.3. Trek Eurocode 2 – deel 3

De laagste waarde 0,134 mm wordt berekend met de onderstaande inputwaarden. Deze inputwaarden zijn voor een plaat onder trek berekend volgens Eurocode 2 deel 3.

Tabel 70: Laagste waarde EC2-3 plaat

	Afkorting	Inputwaarde
<b>Betondekking</b>	C	20 mm
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	21 N/mm <sup>2</sup>
<b>Hoogte</b>	H	250 mm
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	12,40 mm
<b>Kruipfactor</b>	$\Phi$	1
<b>Gemiddelde druksterkte beton</b>	$f_{cm}$	29 N/mm <sup>2</sup>

## 5.4. Hoogste waarde range

Bij het voorgaande hoofdstuk wordt de laagste waarde van het interval berekend. In dit hoofdstuk wordt er dieper ingegaan op de maximumwaarde van de scheurwijdte. Net als bij de laagste waarde worden de inputwaarden in een tabel gezet en per geometrie en berekening gesorteerd. De berekening is toegevoegd in bijlage H.

### 5.4.1. Balk

#### 5.4.1.1. Buiging

Voor het berekenen van de hoogste waarde, 0,537 mm, in de range worden de volgende inputwaarden gebruikt.

Tabel 71: Hoogste waarde buiging balk

	Afkorting	Waarde
<b>Betondekking</b>	C	55,9524 mm
<b>Betonsterkte</b>	$f_{ck}$	28 N/mm <sup>2</sup>
<b>Kruip coëfficiënt</b>	$\Phi$	1,792
<b>Hoogte</b>	H	585 mm
<b>Breedte</b>	B	302,4216 mm
<b>Diameter beugel</b>	$\Phi_b$	10,0061 mm
<b>Trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	24,05 mm
<b>Aantal trekstaven</b>	$n_{s1}$	2
<b>Drukwapening</b>	$\Phi_{s2}$	13,9975 mm
<b>Aantal drukstaven</b>	$n_{s2}$	2
<b>Buigmoment SLS-Q</b>	$M_{Ed}$	144 kNm
<b>Elasticiteitsmodulus staal</b>	$E_s$	200000 N/mm <sup>2</sup>
<b>Staalsterkte</b>	$f_{yk}$	500 N/mm <sup>2</sup>

#### 5.4.1.2. Trek Eurocode 2 – deel 1

De onderstaande tabel geeft de inputwaarden weer die gebruikt worden voor het berekenen van de hoogste waarde 0,494 mm van de scheurwijdte.

Tabel 72: Hoogste waarde EC2-1 balk

	Afkorting	Inputwaarde
<b>Betondekking</b>	C	40 mm
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	34 N/mm <sup>2</sup>
<b>Breedte</b>	B	310 mm
<b>Hoogte</b>	H	616,43 mm
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	19,1 mm
<b>Diameter beugel</b>	$\Phi_b$	8,36 mm
<b>Minimumwapening</b>	$A_{s,min}$	859 mm <sup>2</sup>

### 5.4.1.3. Trek Eurocode 2 – deel 3

Voor de hoogste waarde van de range wordt dezelfde methode gebruikt als bij de laagste waarde. De inputwaarden voor deze hoogste waarde 0,629 mm worden gezocht en zijn weergegeven in de onderstaande tabel.

Tabel 73: Hoogste waarde EC2-3 balk

	Afkorting	Inputwaarde
<b>Betondekking</b>	C	55,95 mm
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	34 N/mm <sup>2</sup>
<b>Breedte</b>	B	308 mm
<b>Hoogte</b>	H	595 mm
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	19,10 mm
<b>Diameter beugel</b>	$\Phi_b$	9,55 mm
<b>Kruipfactor</b>	$\Phi$	2,1
<b>Gemiddelde druksterkte beton</b>	$f_{cm}$	42 N/mm <sup>2</sup>

## 5.4.2. Plaat

### 5.4.2.1. Buiging

De hoogste waarde van de scheurwijdte bij een plaat in buiging is 0,488 mm. De inputwaarden voor deze berekening zijn terug te vinden in onderstaande tabel.

Tabel 74: Hoogste waarde buiging plaat

	Afkorting	Waarde
<b>Betondekking</b>	C	42 mm
<b>Betonsterkte</b>	$f_{ck}$	26 N/mm <sup>2</sup>
<b>Kruip coëfficiënt</b>	$\Phi$	1,9
<b>Hoogte</b>	H	238 mm
<b>Trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	11,46 mm
<b>Aantal trekstaven</b>	$n_{s1}$	6
<b>Buigmoment SLS-Q</b>	$M_{Ed}$	56,8 kNm
<b>Elasticiteitsmodulus staal</b>	$E_s$	200000 N/mm <sup>2</sup>
<b>Staalsterkte</b>	$f_{yk}$	500 N/mm <sup>2</sup>

### 5.4.2.2. Trek Eurocode 2 – deel 1

De maximumwaarde van de scheurwijdte bij een plaat volgens de berekening in Eurocode 2 deel 1 is 0,430 mm. Deze waarde wordt berekend met Excel en de volgende inputwaarden worden hiervoor gebruikt.

Tabel 75: Hoogste waarde EC2-1 plaat

	Afkorting	Inputwaarde
<b>Betondekking</b>	C	30 mm
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	34 N/mm <sup>2</sup>
<b>Hoogte</b>	H	262 mm
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	23,875 mm
<b>Minimumwapening</b>	$A_{s,min}$	1798 mm <sup>2</sup>

### 5.4.2.3. Trek Eurocode 2 – deel 3

De scheurwijdte van 0,647 mm is het maximum van het interval. Deze waarde wordt met de volgende inputwaarden berekend volgens de berekening van Eurocode 2 deel 3.

Tabel 76: Hoogste waarde EC2-3 plaat

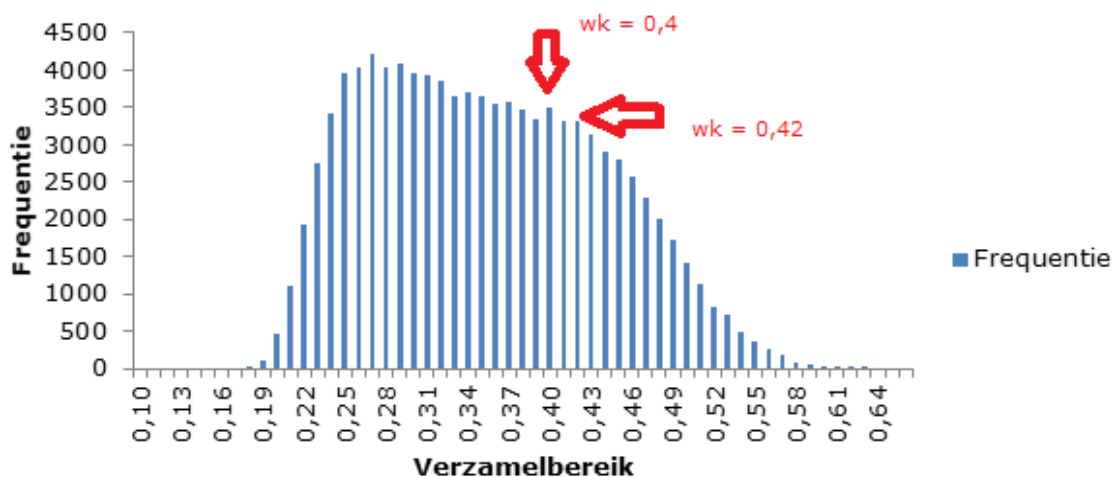
	Afkorting	Inputwaarde
<b>Betondekking</b>	C	42 mm
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	29 N/mm <sup>2</sup>
<b>Hoogte</b>	H	238 mm
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	11,46 mm
<b>Kruipfactor</b>	$\Phi$	1,3
<b>Gemiddelde druksterkte beton</b>	$f_{cm}$	37 N/mm <sup>2</sup>

## 5.5. Piekanalyse

Bij deze paragraaf worden de pieken in de histogrammen behandeld. Bij paragraaf histogram was duidelijk te zien er pieken voorkomen in drie histogrammen. Deze histogrammen worden onderaan weergegeven.

### 5.5.1. Trek Eurocode 2 – deel 3 trek , balk

#### Histogram



Figuur 74: Piekanalyse balk, EC2-3 trek

Het histogram stijgt aan de linkerkant en daalt aan de rechterkant maar stijgt dan weer terug op bepaalde plaatsen waarbij pieken ontstaan. Er zijn twee pieken te zien aan de rechterkant van het histogram. De scheurwijdte bij de eerste piek bedraagt 0,400 mm en bij de tweede piek 0,420 mm. Om een beter beeld te krijgen van de pieken worden de mogelijke inputwaarden opgezocht.

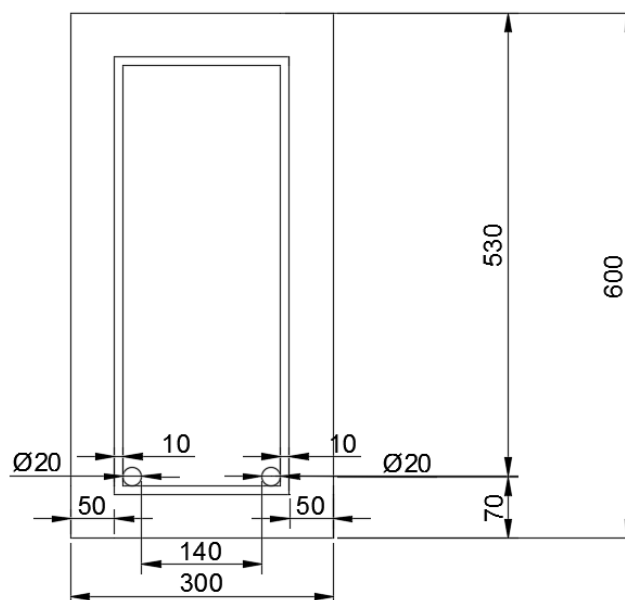
Tabel 77: Inputwaarden piek= 0,4 mm

	Afkorting	Inputwaarde
<b>Betondekking</b>	C	50 mm
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	29 N/mm <sup>2</sup>
<b>Hoogte</b>	H	600 mm
<b>Breedte</b>	B	300 mm
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	20 mm
<b>Diameter beugelwapening</b>	$\Phi_b$	10 mm
<b>Kruipfactor</b>	$\Phi$	1,2

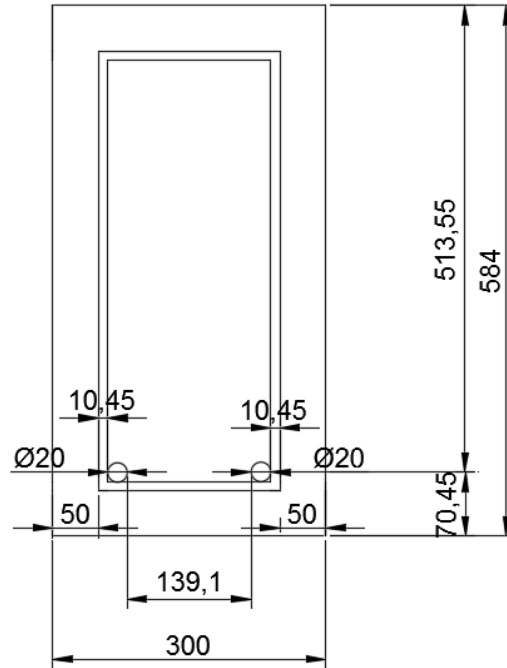
Tabel 78: Inputwaarden piek=0,42 mm

	Afkorting	Inputwaarde
<b>Betondekking</b>	c	50 mm
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	30 N/mm <sup>2</sup>
<b>Hoogte</b>	h	584 mm
<b>Breedte</b>	b	300 mm
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	20 mm
<b>Diameter beugelwapening</b>	$\Phi_b$	10,45 mm
<b>Kruipfactor</b>	$\varphi$	1,2

Uit de tabel wordt afgeleid dat de eerste piek wordt bereikt met de maximale betondekking en een lagere betonkwaliteit dan de oorspronkelijke waarde 30 N/mm<sup>2</sup>. De tweede tabel geeft weer dat er een maximale betondekking, maximale beugeldiameter is en de hoogte varieert. De oorspronkelijke betondekking bedraagt 40 mm, de beugeldiameter is 10 mm en de hoogte is 600 mm. Nadat de inputwaarden gevonden zijn wordt er een doorsnede geschetst om meer inzicht op te krijgen. Uit de schetsen wordt gezien dat de doorsneden realistisch zijn en de parameters van de balken normaal zijn.

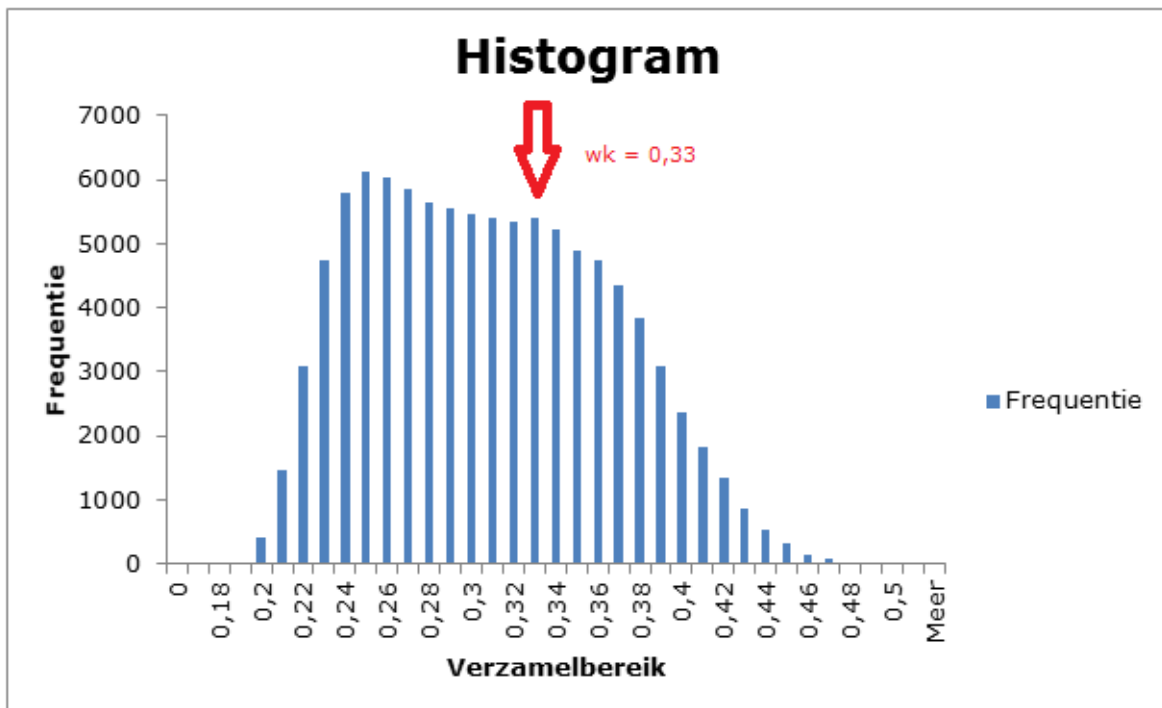


Figuur 75: Doorsnede piek 0,4 mm



Figuur 76: Doorsnede piek 0,42 mm

### 5.5.2. Trek Eurocode 2 – deel 1 buiging, plaat



Figuur 77: Piekanalyse plaat, EC2-1 buiging

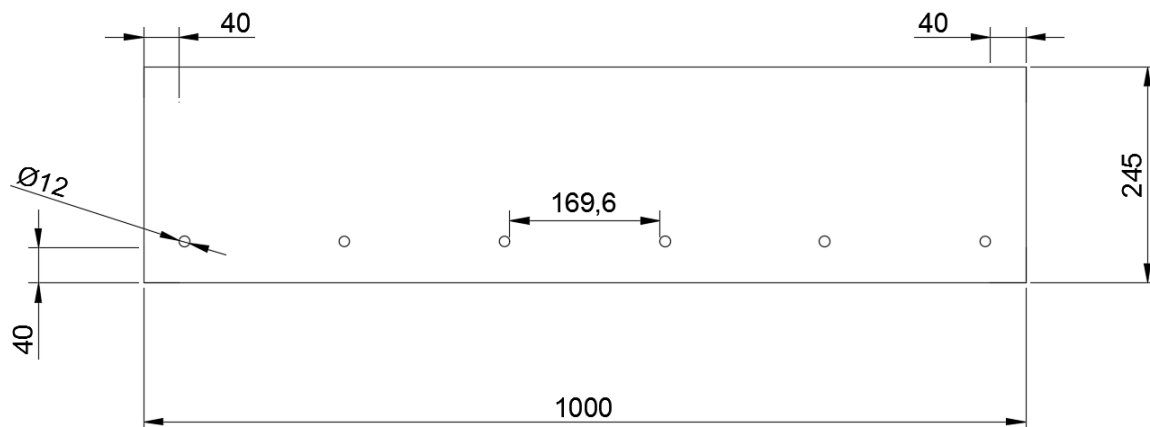
Bij dit histogram is er één piek te zien aan de rechterkant. De scheurwijdte bij deze piek bedraagt 0,330 mm. De inputwaarden van deze piek worden geanalyseerd en weergegeven op de onderstaande tabel.



Tabel 79: Inputwaarden piek=0,33 mm

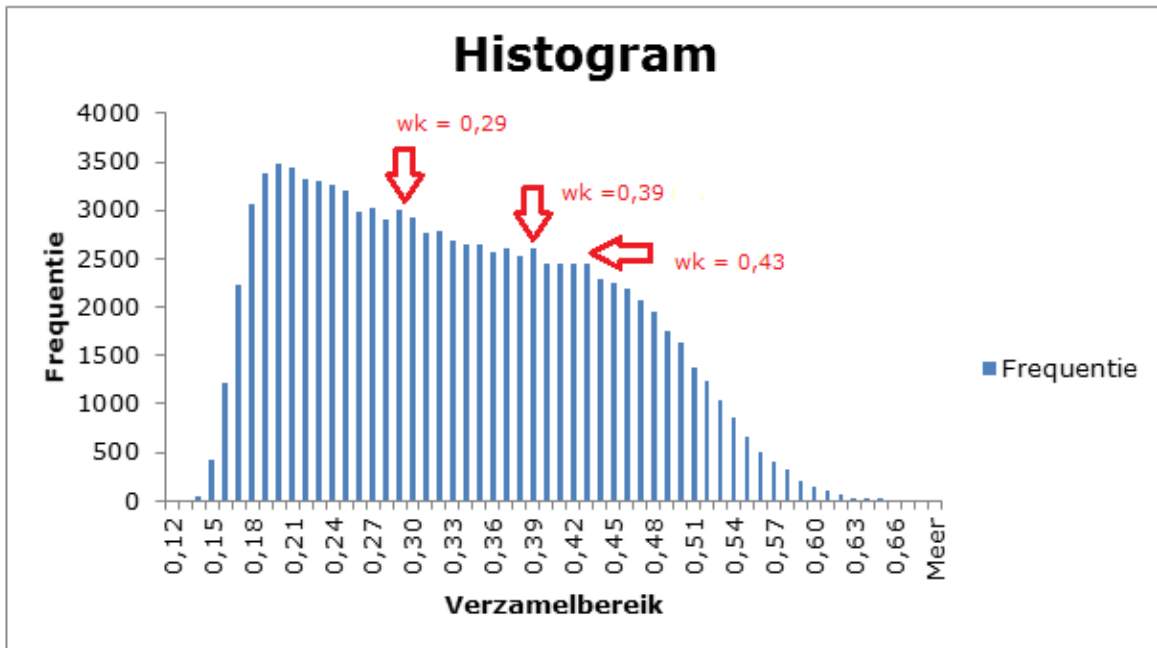
	Afkorting	Inputwaarde
<b>Betondekking</b>	c	40 mm
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	32 N/mm <sup>2</sup>
<b>Hoogte</b>	h	245 mm
<b>Breedte</b>	b	1000 mm
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	12 mm
<b>Moment</b>	M	49 kNm
<b>Kruipfactor</b>	$\varphi$	1,7

Uit de tabel kan afgeleid worden dat de piek wordt gevormd met de variatie van de betondekking, hoogte en de kruipfactor. De oorspronkelijke betondekking is 30 mm, de hoogte is 250 mm en de kruipfactor bedraagt 2,0. Daarna wordt de doorsnede van de plaat geschetst. Aan de hand van schets kan gezegd worden de doorsnede realistisch is.



Figuur 78: Doorsnede piek 0,33 mm

5.5.3. *Trek Eurocode 2 – deel 3 trek , plaat*



*Figuur 79: Piekanalyse plaat, EC2-3 trek*

Dit histogram bevat veel pieken aan de rechterkant. De verschillende pieken worden onderzocht.

- Eerste gekozen piek bedraagt 0,290 mm
- Tweede gekozen piek bedraagt 0,390 mm
- Derde gekozen piek bedraagt 0,430 mm

De inputwaarden van de pieken worden onderzocht. De gevonden gegevens zijn in de onderste tabellen weergegeven.

*Tabel 80: Inputwaarden piek=0,29 mm*

	<b>Afkorting</b>	<b>Inputwaarde</b>
<b>Betondekking</b>	c	30 mm
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	23 N/mm <sup>2</sup>
<b>Hoogte</b>	h	250 mm
<b>Breedte</b>	b	1000 mm
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	12 mm
<b>Kruipfactor</b>	$\phi$	1,3

De eerste piek wordt gevormd met een lagere waarde van de betonkwaliteit en een hogere waarde van de kruipfactor. De oorspronkelijke betonkwaliteit bedraagt 25 N/mm<sup>2</sup> en de kruipfactor bedraagt 1,0.

Tabel 81: Inputwaarden piek=0,39 mm

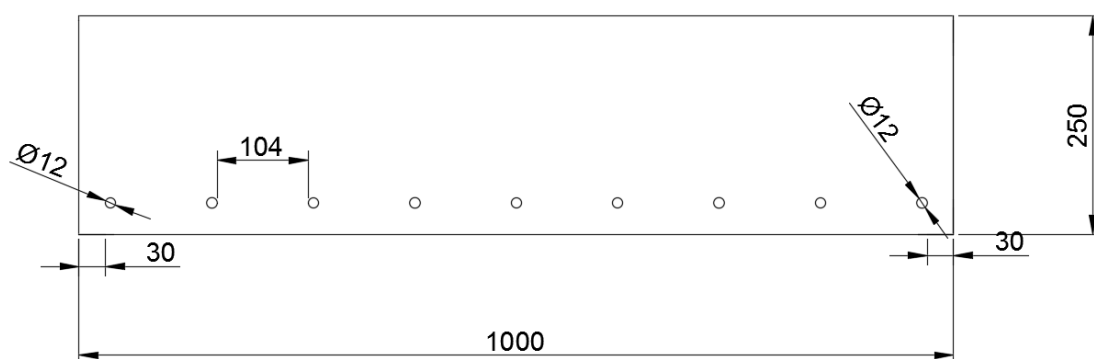
	Afkorting	Inputwaarde
<b>Betondekking</b>	c	33 mm
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	29 N/mm <sup>2</sup>
<b>Hoogte</b>	h	250 mm
<b>Breedte</b>	b	1000 mm
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	12 mm
<b>Kruipfactor</b>	$\phi$	1,25

Uit de bovenstaande tabel wordt afgeleid dat de tweede piek wordt gevormd met een hogere waarde van betondekking, maximale betonkwaliteit en een hogere waarde van de kruipfactor. De oorspronkelijke betondekking is 30 mm, de betonkwaliteit is 25 N/mm<sup>2</sup> en de kruipfactor is 1,0.

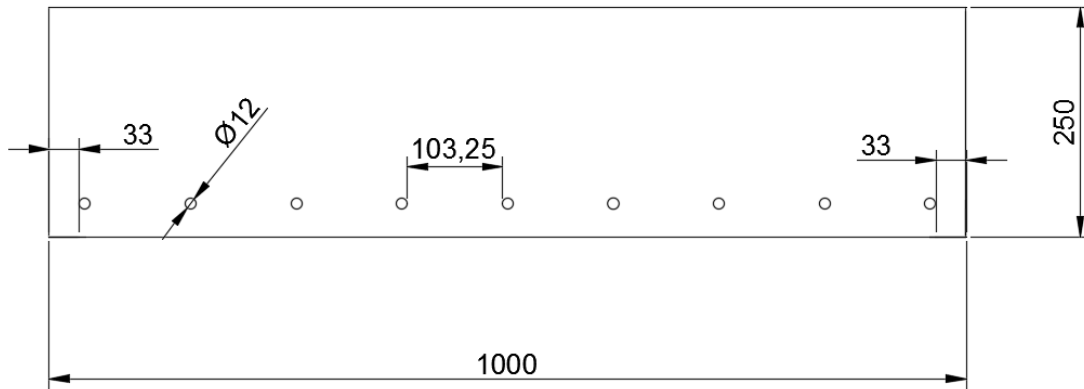
Tabel 82: Inputwaarden piek=0,43 mm

	Afkorting	Inputwaarde
<b>Betondekking</b>	c	37 mm
<b>Betonkwaliteit</b>	$f_{ck}$	25 N/mm <sup>2</sup>
<b>Hoogte</b>	h	250 mm
<b>Breedte</b>	b	1000 mm
<b>Diameter trekwapening</b>	$\Phi_{s1}$	12 mm
<b>Kruipfactor</b>	$\phi$	1,3

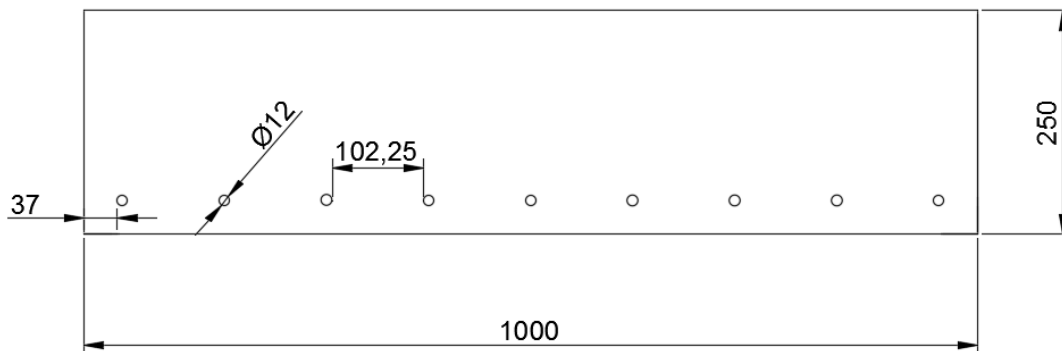
De laatste tabel laat zien dat de piek wordt gevormd met een hoge waarde van de betondekking en een hogere waarde van de kruipfactor. De oorspronkelijke waarden van deze parameters zijn bij de vorige piek weergegeven. De doorsneden van de drie piekwaarden worden geschetst en hieronder weergegeven. Uit de schetsen wordt gezien dat de deze doorsneden realistisch zijn en de parameters van de platen goed zijn.



Figuur 80: Doorsnede piek 0,290 mm



Figuur 81: Doorsnede piek 0,390 mm



Figuur 82: Doorsnede piek 0,430 mm

## 5.6. Reproduceerbaarheid

Om na te kijken of de berekende waarden reproduceerbaar zijn wordt de berekening een twee maal uitgevoerd. Hierbij worden de 100 000 waarden voor een tweede keer berekend op dezelfde wijze als bij de eerste berekening. Uit deze berekeningen worden telkens het minimum, het maximum, de standaarddeviatie en het gemiddelde berekend zodat de twee berekeningen met elkaar vergeleken kunnen worden. De berekening is reproduceerbaar als dezelfde waarden bij de twee berekeningen worden uitgerekend.

### 5.6.1. Balk

#### 5.6.1.1. Buiging

Uit de onderstaande tabel wordt afgeleid dat bij de tweede simulatie van de berekeningen dezelfde waarden opnieuw verkregen wordt. Dit toont aan dat de waarden uit de berekening van scheurwijdte met buiging reproduceerbaar zijn. De waarden zijn allemaal gelijk voor de eerste en de tweede berekening.

Tabel 83: Vergelijking 1ste en 2de berekening buiging balk

	1 <sup>ste</sup> berekening	2 <sup>de</sup> berekening
<b>Minimum</b>	0,153	0,153
<b>Maximum</b>	0,537	0,537
<b>Gemiddelde</b>	0,312	0,312
<b>Standaarddeviatie</b>	0,063	0,063

### 5.6.1.2. Trek Eurocode 2 – deel 1

Zoals bij de eerste berekeningsmethode wordt er hier nagegaan of de waarden uit de berekening van scheurwijdte met Eurocode 2 deel 1 trek reproduceerbaar zijn. In de onderstaande tabel zijn de waarden van de twee berekeningen terug te vinden. Het gemiddelde en de standaarddeviatie komen overeen. De waarde voor het minimum en het maximum komen niet overeen. Hier zit een klein verschil op van 0,001 mm. Dit komt door de variatie op de inputwaarden. De variatie is afhankelijk van de gebruikte inputwaarden bij de berekening van de scheurwijdte.

Tabel 84: Vergelijking 1ste en 2de berekening EC2-1 balk

	1 <sup>ste</sup> berekening	2 <sup>de</sup> berekening
<b>Minimum</b>	0,170	0,169
<b>Maximum</b>	0,494	0,492
<b>Gemiddelde</b>	0,316	0,316
<b>Standaarddeviatie</b>	0,056	0,056

### 5.6.1.3. Trek Eurocode 2 – deel 3

Bij deze berekening met Eurocode 2 deel 3 trek wordt er onderzocht of bij een andere simulatie dezelfde range verkregen wordt. De twee berekeningen geven dezelfde waarde voor het minimum, het maximum, het gemiddelde en de standaarddeviatie. Er kan dus besloten worden dat de waarden voor deze berekening reproduceerbaar zijn.

Tabel 85: Vergelijking 1ste en 2de berekening EC2-3 balk

	1 <sup>ste</sup> berekening	2 <sup>de</sup> berekening
<b>Minimum</b>	0,174	0,174
<b>Maximum</b>	0,629	0,629
<b>Gemiddelde</b>	0,349	0,349
<b>Standaarddeviatie</b>	0,085	0,085

## 5.6.2. Plaat

### 5.6.2.1. Buiging

Voor de berekening van een plaat onder buiging kan er gezegd worden dat de waarden reproduceerbaar zijn. De vier berekende variabelen hebben voor de twee berekeningen dezelfde waarde.

Tabel 86: Vergelijking 1ste en 2de berekening buiging plaat

	1 <sup>ste</sup> berekening	2 <sup>de</sup> berekening
<b>Minimum</b>	0,000	0,000
<b>Maximum</b>	0,488	0,488
<b>Gemiddelde</b>	0,303	0,303
<b>Standaarddeviatie</b>	0,057	0,057

### 5.6.2.2. Trek Eurocode 2 – deel 1

De waarden van een plaat onder trek zijn reproduceerbaar. Dit is berekend door twee keer de berekening uit te voeren. Het minimum, het maximum en de standaarddeviatie zijn voor de twee berekeningen gelijk. Het gemiddelde verschilt 0,001 mm. Dit komt door de variatie op de inputwaarden die verschillende scheurwijdten berekend met een willekeurige waarde van de inputwaarden tussen hun normatieve grenzen.

Tabel 87: Vergelijking 1ste en 2de berekening EC2-1 plaat

	1 <sup>ste</sup> berekening	2 <sup>de</sup> berekening
<b>Minimum</b>	0,174	0,174
<b>Maximum</b>	0,430	0,430
<b>Gemiddelde</b>	0,292	0,291
<b>Standaarddeviatie</b>	0,045	0,045

### 5.6.2.3. Trek Eurocode 2 – deel 3

De waarde van het maximum en de standaarddeviatie zijn gelijk voor de twee berekening. Het minimum en het gemiddelde verschilt met 0,001 mm. Dit komt door de variatie die op de inputwaarden wordt toegepast. Deze rekt verschillende scheurwijdtes uit waardoor er een verschil kan zijn op de minimum- of maximumwaarde. Een verschil op het gemiddelde is ook mogelijk omdat er telkens andere waarden willekeurig worden uitgerekend. Ondanks het verschil kan er toch besloten worden dat de berekening reproduceerbaar is omdat het om kleine verschillen gaat tussen de twee berekeningen.

Tabel 88: Vergelijking 1ste en 2de berekening EC2-3 plaat

	1 <sup>ste</sup> berekening	2 <sup>de</sup> berekening
<b>Minimum</b>	0,134	0,135
<b>Maximum</b>	0,647	0,647
<b>Gemiddelde</b>	0,328	0,327
<b>Standaarddeviatie</b>	0,109	0,109

## 5.7. Cumulatieve frequentie

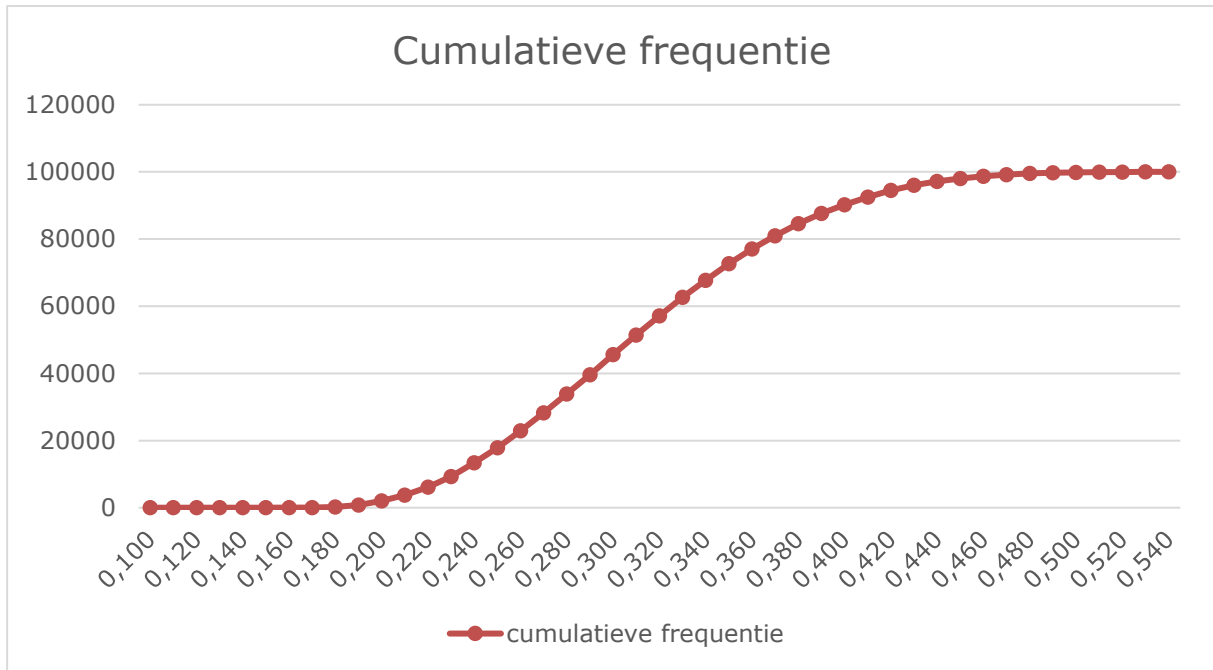
De cumulatieve en relatieve cumulatieve frequentie worden berekend met de 100 000 gegenereerde waarden. De waarden worden gesorteerd per frequentie en de hoeveelheid wordt per frequentie berekend. Daarna wordt de cumulatieve frequentie berekend. De waarde van de frequentie wordt opgeteld met de voorgaande waarden van de voorgaande frequenties. Bij de laatste cumulatieve frequentie wordt er een waarde van 100 000 berekend. Voor de relatieve cumulatieve frequentie wordt het procent van de cumulatieve frequentie berekend. De laatste waarde moet bij deze berekening 100 % zijn.

De eerste grafiek bevat telkens de cumulatieve frequentie. Hier wordt er afgelezen hoeveel keer een bepaalde scheurwijdte en de vorige scheurwijdtes berekend zijn. Op de tweede grafiek is de relatieve cumulatieve frequentie af te lezen. Hier worden de scheurwijdten en de voorgaande scheurwijdtes erbij opgeteld in procent weergegeven.

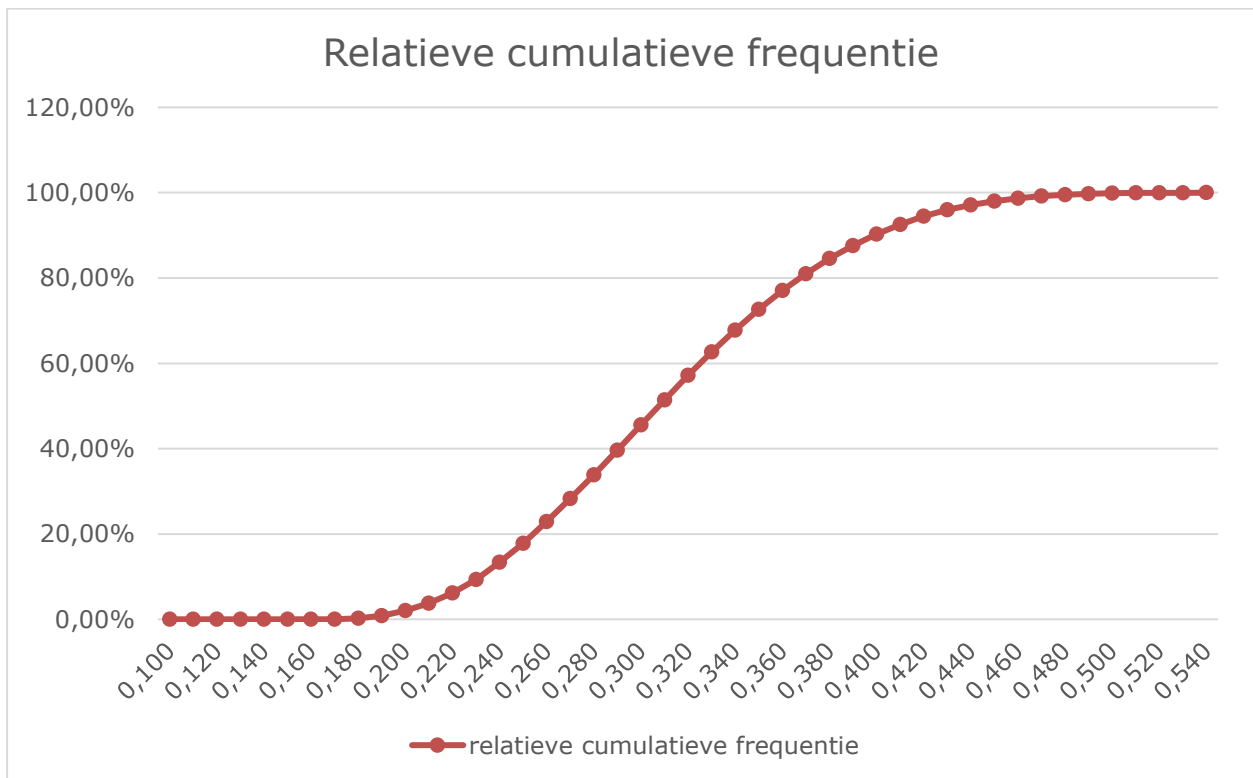
### 5.7.1. Balk

#### 5.7.1.1. Buiging

Op de tabel, die in de bijlage I.1 terug te vinden is, kan er afgelezen worden hoeveel keer een bepaalde waarde van de scheurwijdte voorkomt en wat de exacte waarde van de cumulatieve frequentie is. De waarden die kleiner zijn dan 0,30 mm en de waarden die gelijk zijn aan 0,30 mm komen 45 583 keer voor in de berekening. Een scheurwijdte groter dan 0,30 mm komt 54 417 keer voor. De kans dat de scheur kleiner of gelijk is aan 0,30 mm is ongeveer 45,58 %.



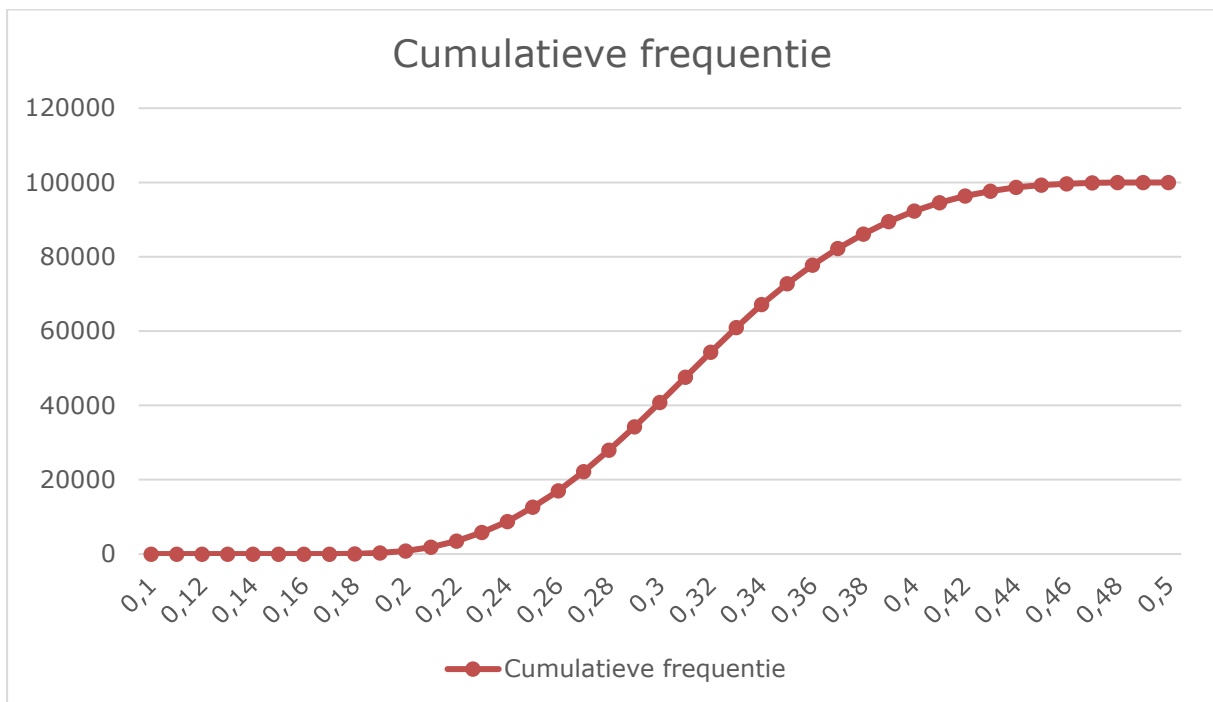
Figuur 83: Cumulatieve frequentie buiging balk



Figuur 84: Relatieve cumulatieve frequentie buiging balk

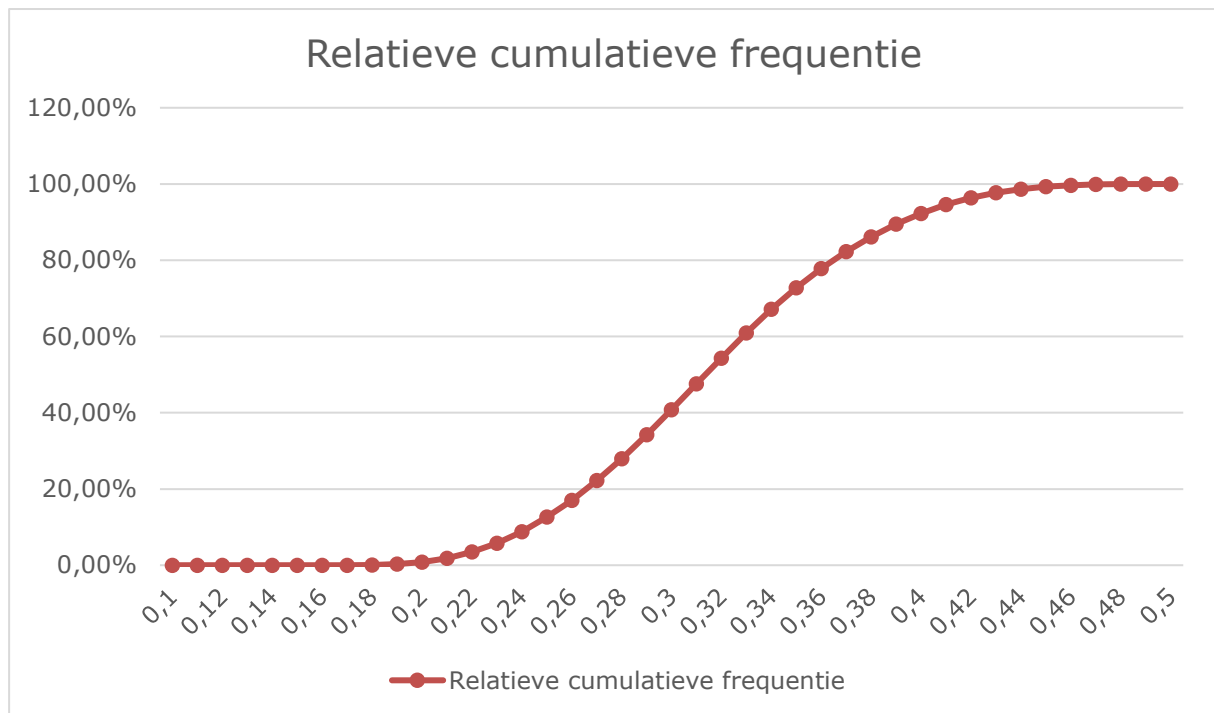
5.7.1.2. *Trek Eurocode 2 – deel 1*

Bij het berekenen van de cumulatieve frequentie en de relatieve cumulatieve frequentie van de scheurwijdte ten gevolge van opgelegde verhinderde vervorming Eurocode 2 deel 1 met trek zijn de waarden berekend die in bijlage I.2 terug te vinden zijn. Voor een scheurwijdte kleiner dan of gelijk aan 0,30 mm is er een waarde van 40 770 af te lezen op de grafiek. Dit wil zeggen dat er 40 770 keer een scheurwijdte is berekend die kleiner of gelijk aan 0,30 mm is. Bij de relatieve cumulatieve frequentie komt dit overeen 40,77 %. Een scheurwijdte die groter is dan 0,30 mm komt 59 230 keer voor en dit is gelijk aan 59,23%.



Figuur 85: *Cumulatieve frequentie EC2 – 1 balk*

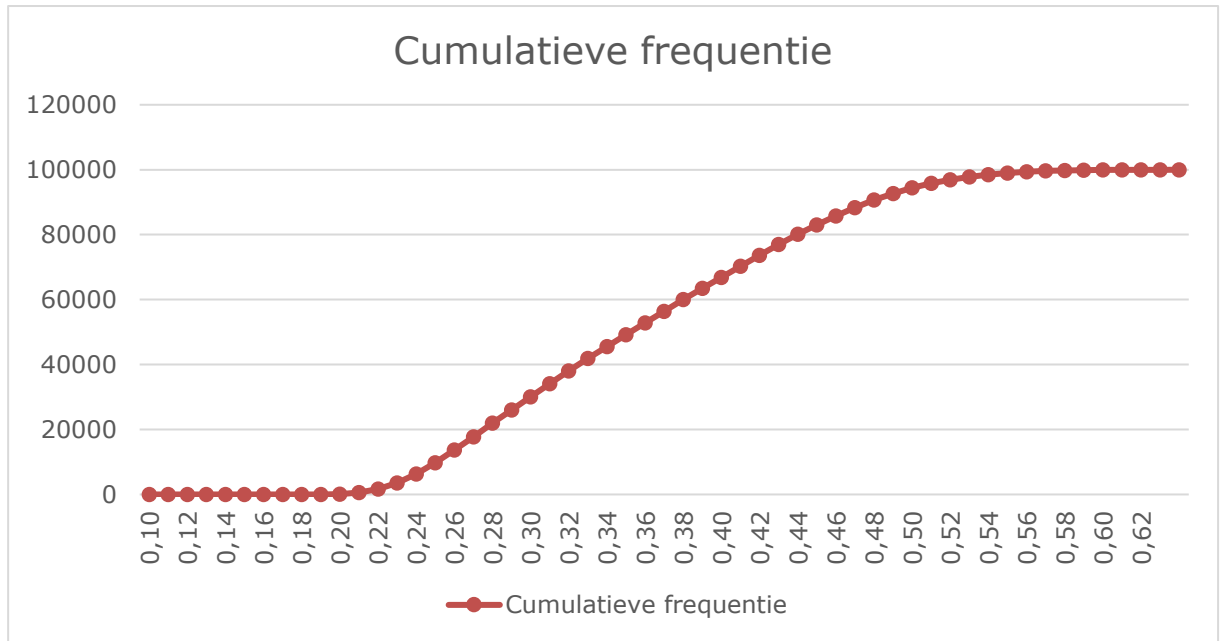




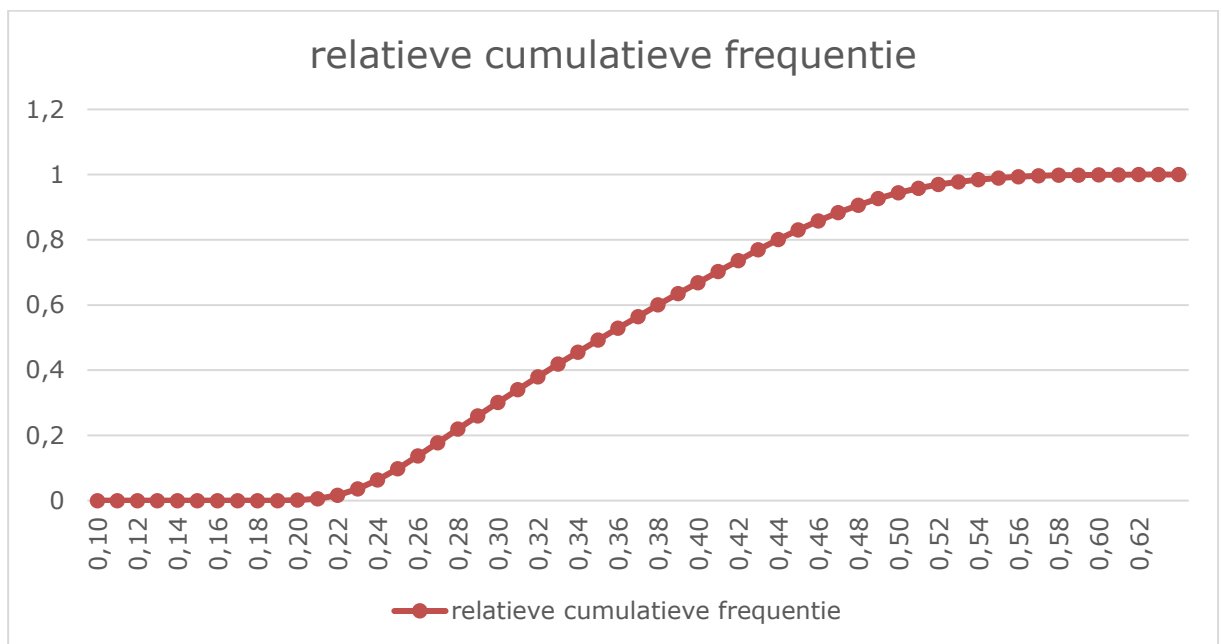
Figuur 86: Relatieve cumulatieve frequentie EC2 – 1 balk

### 5.7.1.3. Trek Eurocode 2 – deel 3

In bijlage I.3 is de berekening van de cumulatieve en relatieve cumulatieve frequentie weergegeven voor de scheurwijdte ten gevolge van opgelegde verhinderde vervorming Eurocode 2 deel 3 met trek. Voor een scheurwijdte van 0,30 mm is er een waarde van 35 122 gekomen. Deze waarde geeft weer dat er 35 122 keer een scheurwijdte wordt berekend die kleiner dan of gelijk is aan 0,30 mm. Dit komt overeen met 35,12 %. Een scheurwijdte die groter is als 0,30 mm komt 64 878 keer voor. Deze waarde komt overeen met 64,88 %. Voor de andere scheurwijdtes kan de waarden uit de tabel worden afgeleid.



Figuur 87: Cumulatieve frequente bij EC2-3 balk

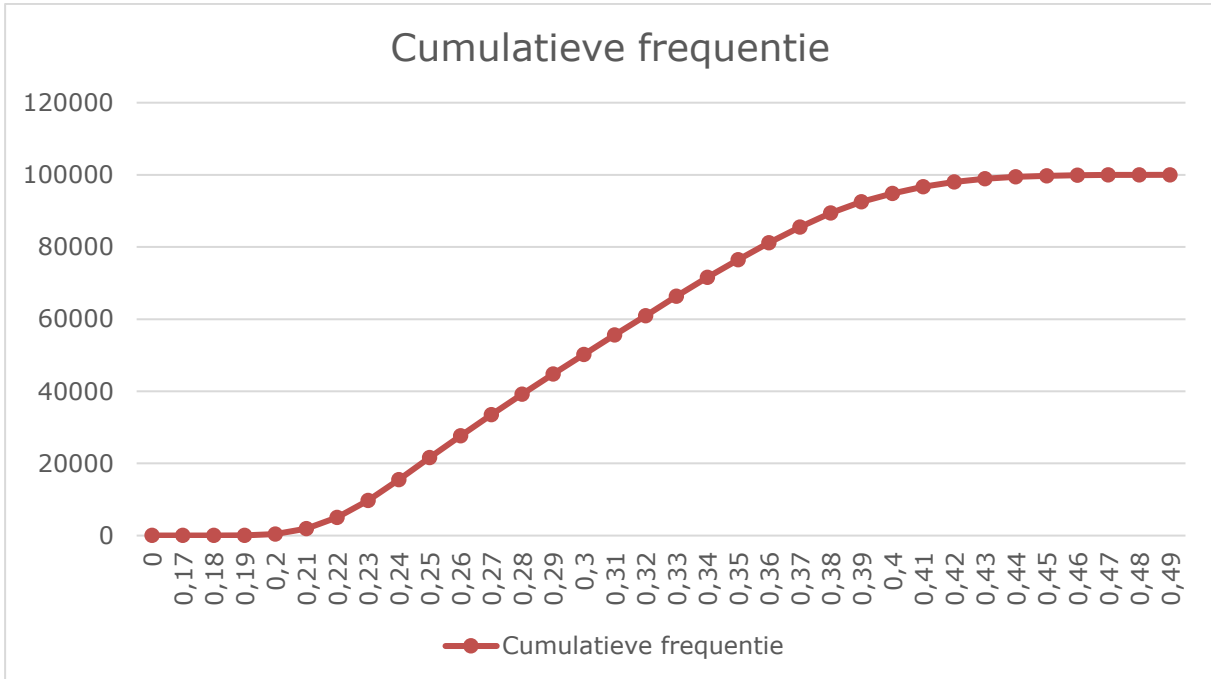


Figuur 88: Relatieve cumulatieve frequentie bij EC2-3 balk

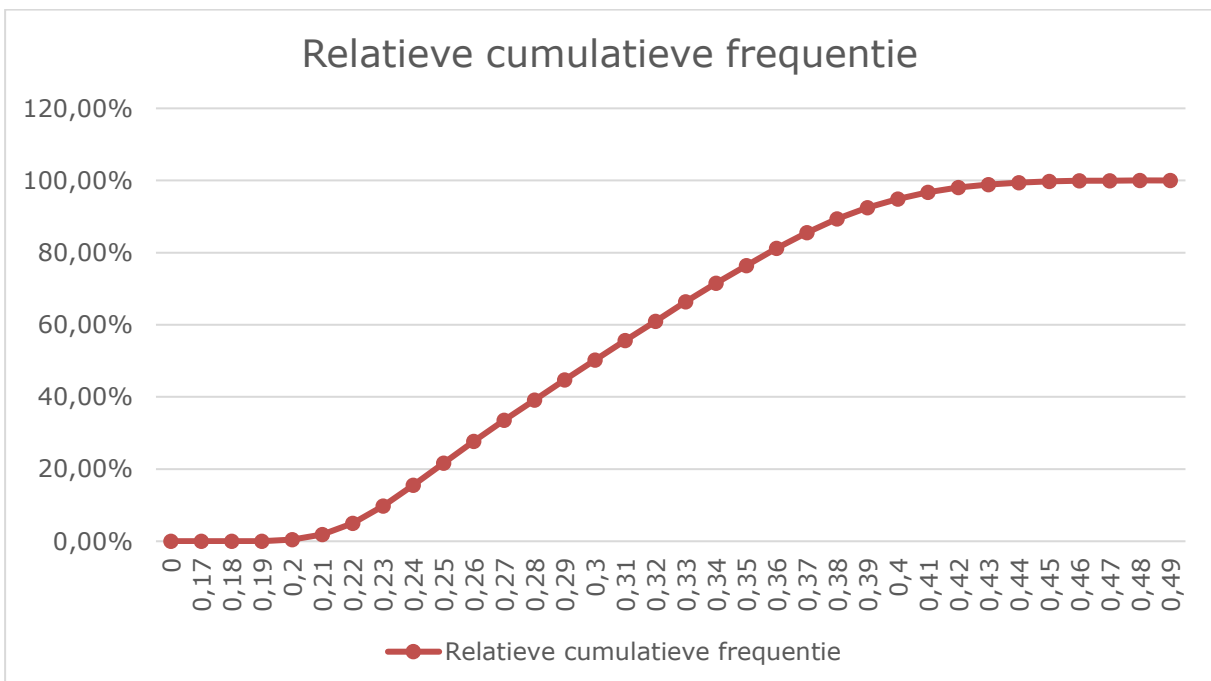
**5.7.2. Plaat**

*5.7.2.1. Buiging*

Op de grafiek kan afgelezen worden dat bij 0,30 mm ongeveer de helft van de gegenereerde waarden worden berekend. Op de tabel in de bijlage I.4 kan de exacte waarden afgelezen worden. De waarden kleiner of gelijk aan 0,30 mm komen 50228 keer voor. Dit is 50,23 % van de berekende waarde. De kans dat de scheur groter is dan 0,30 mm is ongeveer 49,77 %.



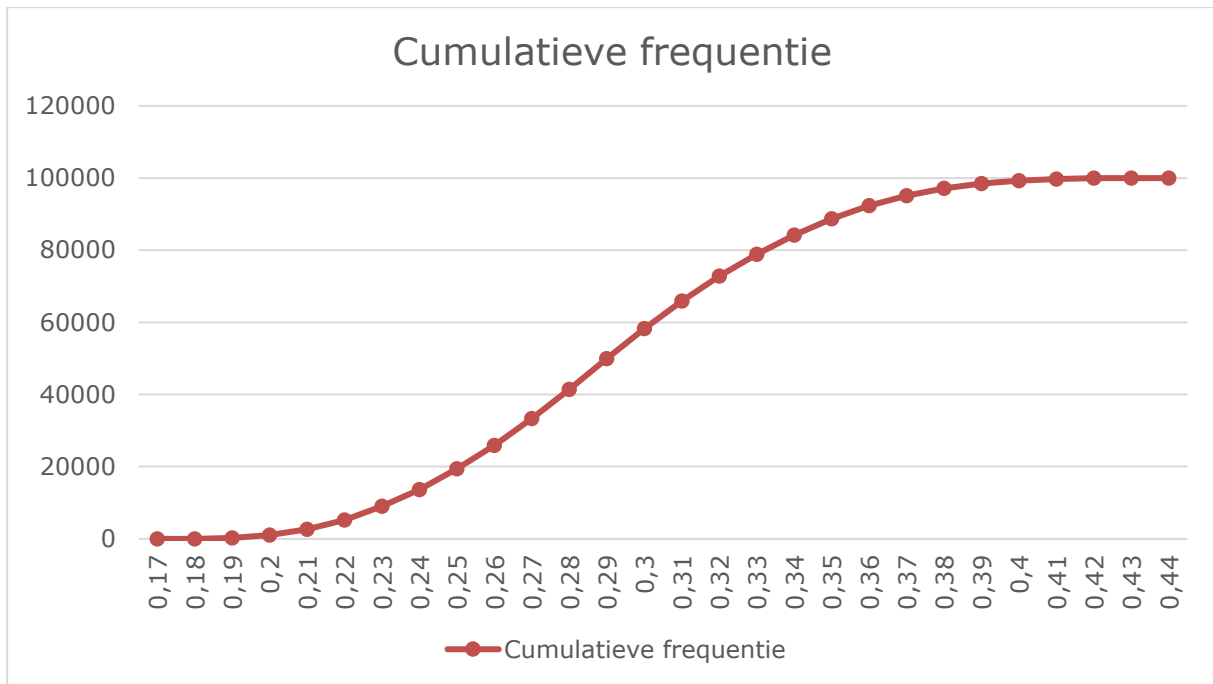
*Figuur 89: Cumulatieve frequentie buiging plaat*



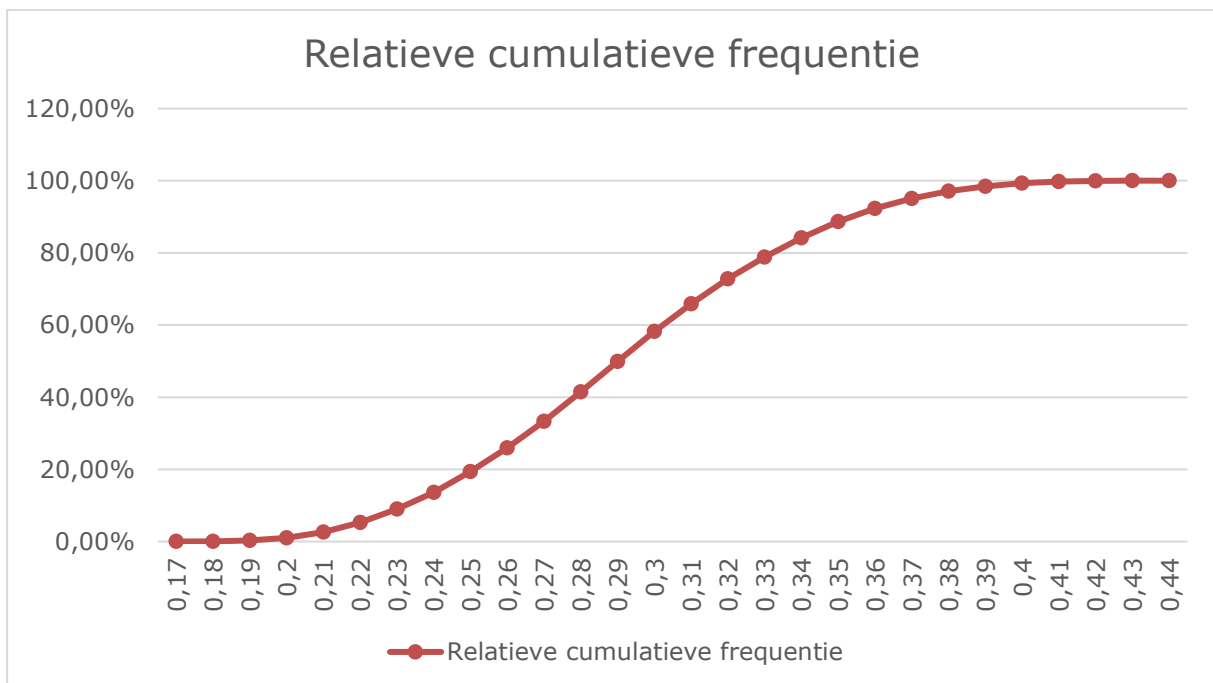
*Figuur 90: Relatieve cumulatieve frequentie buiging plaat*

### 5.7.2.2. Trek Eurocode 2 – deel 1

Voor het berekenen van de trek op een plaat met de opgelegde verhinderde vervorming volgens Eurocode 2 deel 3 worden de cumulatieve en relatieve cumulatieve frequentie uitgetekend op de onderstaande twee lijngrafieken. De berekende waarden zijn terug te vinden in bijlage I.5. De scheurwijdten die kleiner zijn dan 0,30 mm of gelijk aan 0,30 mm worden 58 244 keer berekend, dit is 58,24 % van alle berekende waarden. Een scheurwijdte die groter is dan 0,30 mm komt 41 756 keer voor en dit is gelijk aan 41,76 %.



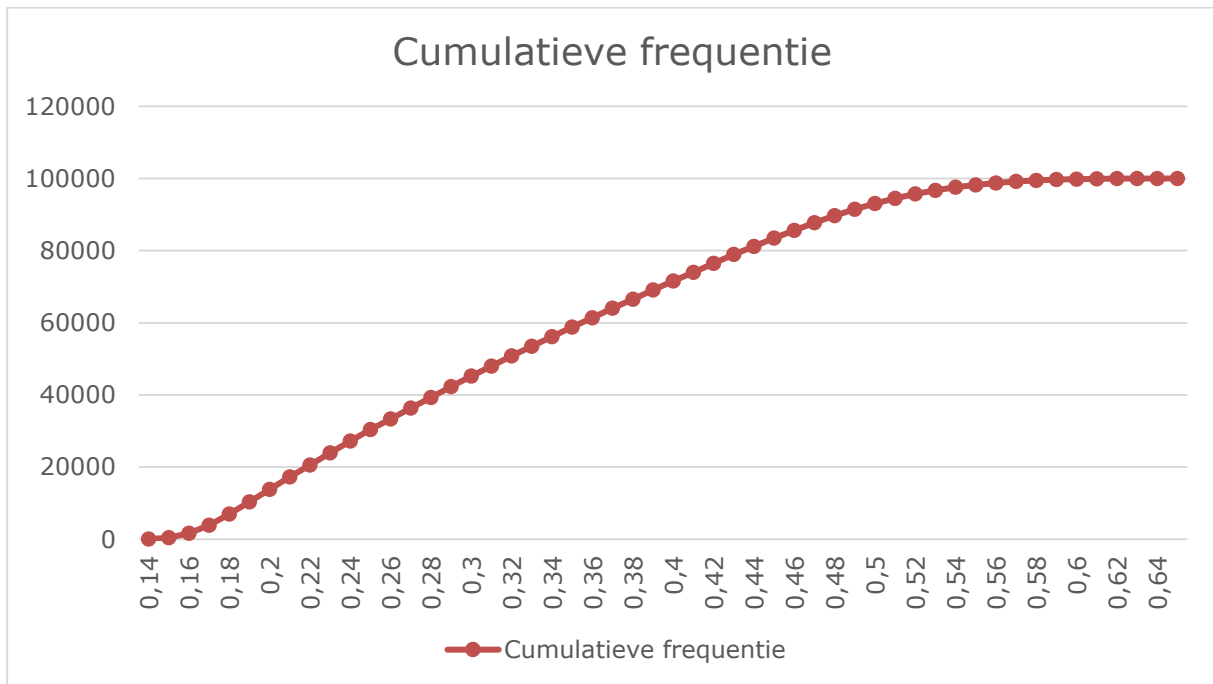
Figuur 91: Cumulatieve frequentie EC2 - 1 plaat



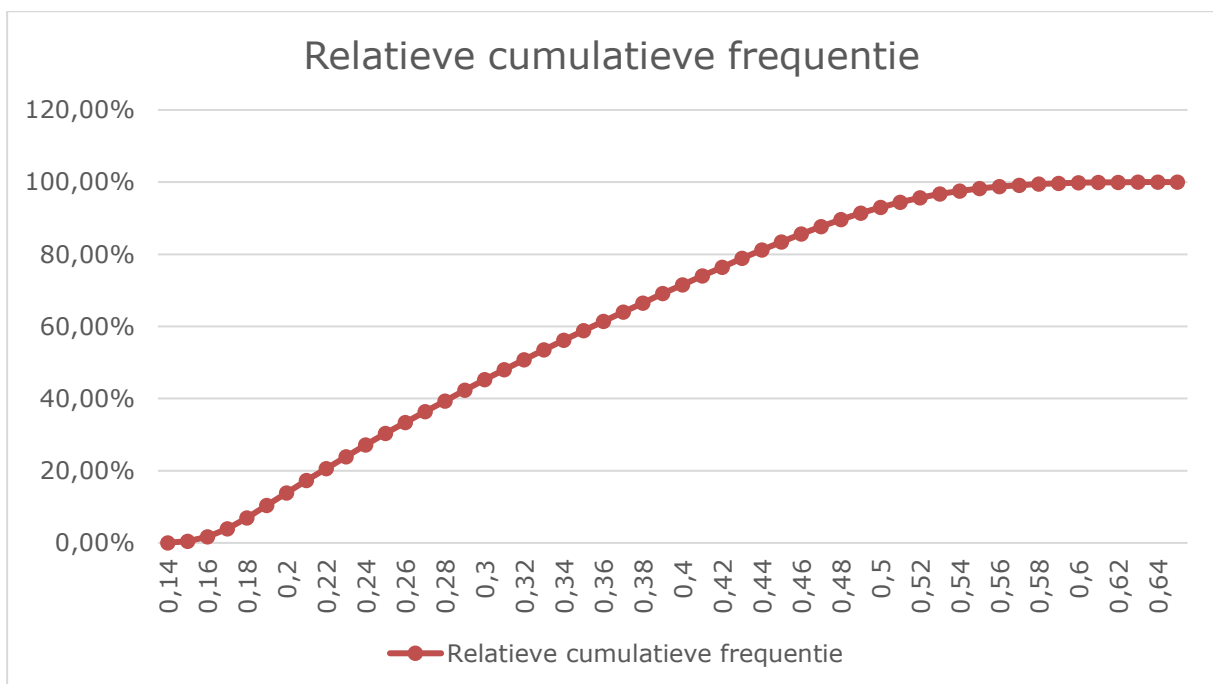
Figuur 92: Relatieve cumulatieve frequentie EC2 - 1 plaat

### 5.7.2.3. Trek Eurocode 2 – deel 3

Bij het berekenen van trek volgens Eurocode 2 deel 3 voor een balk worden de volgende twee grafieken uitgetekend. In de tabel van de cumulatieve frequentie, in bijlage I.6, kan worden afgelezen dat een scheurwijdte gelijk aan 0,30 mm of kleiner dan 0,30 mm 45 248 keer wordt berekend. De waarden die groter zijn dan 0,30 mm werden 54 752 maal berekend. Dit komt overeen met 54,75%.



Figuur 93: Cumulatieve frequentie EC2 - 1 plaat



Figuur 94: Relatieve cumulatieve frequentie EC2 - 3 plaat

## 5.8. Min – max vergelijking

In de literatuurstudie wordt aangehaald dat verschillende inputwaarden kunnen variëren binnen hun normatieve grenzen. Deze variatie wordt in Matlab ingegeven en er wordt een interval van scheurwijdtes berekend. De variatie op de inputwaarden staat beschreven in de literatuurstudie paragraaf 2.7. Bij de min - max vergelijking wordt er telkens één variabele uitgekozen en deze variabele gaat binnen zijn grens veranderen. Er wordt gekozen om met Excel te werken. In Excel wordt dan een keer de berekening uitgevoerd met de minimumwaarde van de inputwaarde en een tweede berekening met de maximumwaarde van de inputwaarde. Door deze berekeningen kon het verschil in scheurwijdte berekend worden als er één variabele verandert. De min - max vergelijking wordt toegepast omdat niet altijd alle variaties gelijktijdig kunnen optreden en zo kan er een beeld gevormd worden van wat er gebeurt als er maar één variabele verandert en welke variabele de meeste invloed heeft op de scheurwijdte.

### 5.8.1. Balk

#### 5.8.1.1. Buiging

Voor de min - max vergelijking van een balk in buiging heeft het moment en de betondekking de grootste invloed op de scheurwijdte. Deze parameters geven een verschil van 16,27 % voor het moment en 11,53 % voor de betondekking. Het verschil wordt berekend door de maximumwaarde met de minimumwaarde te verminderen. De diameter van de trekwapening heeft een verschil van 7,35 %, deze inputwaarde heeft het derde meeste invloed op de scheurwijdte. De diameter van de drukwapening heeft geen invloed op de scheurwijdte. Daarnaast worden de andere variërende inputwaarden zoals de hoogte en de breedte in de tabel weergegeven. Deze inputwaarden vertonen een klein effect op de berekening van de scheurwijdte.

Tabel 89: Minimum- en maximumwaarden scheurwijdte bij balk, buiging

	Minimale inputwaarde	Maximale inputwaarde	Minimale scheurwijdte	Maximale scheurwijdte	Vershil in %
<b>c</b>	30	55,95	0,2532	0,3685	11,53 %
<b>f<sub>ck</sub></b>	26	34	0,2911	0,3086	1,75 %
<b>b</b>	287	313	0,2956	0,3035	0,79 %
<b>h</b>	583,57	616,43	0,2896	0,3101	2,05 %
<b>Φ<sub>b</sub></b>	9,55	10,45	0,2992	0,3001	0,09 %
<b>Φ<sub>s1</sub></b>	23,875	26,125	0,2660	0,3395	7,35 %
<b>Φ<sub>s2</sub></b>	13,37	14,63	0,2997	0,2997	0 %
<b>φ</b>	1,2	2,1	0,2933	0,3028	0,95 %
<b>M<sub>ed</sub></b>	96	144	0,2183	0,3810	16,27 %
<b>f<sub>cm</sub></b>	34	42	0,2988	0,3004	0,16 %

#### 5.8.1.2. Trek Eurocode 2 – deel 1

Uit de resultaten voor de berekening van trek uit Eurocode 2 deel 1 bij een balk heeft de variatie op de diameter van de trekwapening, de minimum wapening en de betonkwaliteit de meeste invloed op de scheurwijdte. Deze inputvariabelen geven alle drie een verschil van ongeveer 13 %. Naast deze inputparameters geeft de breedte een verschil van 6,24 % dit is een groot verschil met de hoogte, die maar voor een verschil van 1,84% zorgt. Opmerkelijk is ook dat de diameter van de beugel en de betondekking geen effect hebben op de scheurwijdte bij deze berekening.

Tabel 90: Minimum- en maximumwaarden scheurwijdte bij balk, EC2 - 1

	Minimale inputwaarde	Maximale inputwaarde	Minimale scheurwijdte	Maximale scheurwijdte	Verskil in %
<b>c</b>	30	55,95	0,3157	0,3157	0 %
<b>f<sub>ck</sub></b>	26	34	0,2502	0,3783	12,81 %
<b>b</b>	287	313	0,2845	0,3468	6,23 %
<b>h</b>	583,57	616,43	0,3062	0,3246	1,84 %
<b>Φ<sub>s1</sub></b>	19,1	20,9	0,2550	0,3851	13,01 %
<b>Φ<sub>b</sub></b>	7,64	8,36	0,3157	0,3157	0 %
<b>A<sub>s,min</sub></b>	859,56	1029,21	0,2550	0,3851	13,01 %

### 5.8.1.3. Trek Eurocode 2 – deel 3

Er is een minimaal verschil bij de hoogte, de diameter van de beugel en de gemiddelde druksterkte van beton voor de scheurwijdte bij het berekenen van een balk volgens de berekening van trek in Eurocode 2 deel 3. De betondekking heeft het grootste verschil van 27,1 %. Deze factor heeft het meeste invloed op de scheurwijdte. Daarnaast hebben de betonkwaliteit, de breedte, de diameter van de trekwapening en de kruipfactor ook invloed op de scheurwijdte. De invloed van deze parameters ligt tussen de 2 % en de 5%.

Tabel 91: Minimum- en maximumwaarden scheurwijdte bij balk, EC2 - 3

	Minimale inputwaarde	Maximale inputwaarde	Minimale scheurwijdte	Maximale scheurwijdte	Verskil in %
<b>c</b>	30	55,95	0,2176	0,4886	27,1 %
<b>f<sub>ck</sub></b>	26	34	0,2830	0,3347	5,17 %
<b>b</b>	287	313	0,2883	0,3314	4,32 %
<b>h</b>	583,57	616,43	0,3050	0,3140	0,9 %
<b>Φ<sub>s1</sub></b>	19,1	20,9	0,2816	0,3422	6,06 %
<b>Φ<sub>b</sub></b>	9,55	10,45	0,3058	0,3133	0,75 %
<b>Φ</b>	1,2	2,1	0,3030	0,3225	1,95 %
<b>f<sub>cm</sub></b>	34	42	0,3079	0,3114	0,35 %

## 5.8.2. Plaat

### 5.8.2.1. Buiging

Voor de berekening van de scheurwijdte bij een plaat in buiging heeft het moment de grootste invloed. Deze heeft een verschil in scheurwijdte van 17,18 %. De tweede meeste invloed wordt uitgeoefend door de betondekking en de diameter van de trekwapening. Het verschil in scheurwijdte ligt hier tussen de 5,30 % en 5,80 %. Het is opmerkelijk dat bij deze berekening alle factoren een invloed hebben op de scheurwijdte. De gemiddelde druksterkte van het beton heeft de laagste invloed.

Tabel 92: Minimum- en maximumwaarden scheurwijdte bij plaat, buiging

	Minimale inputwaarde	Maximale inputwaarde	Minimale scheurwijdte	Maximale scheurwijdte	Vershil in %
<b>c</b>	20	42	0,2773	0,3304	5,31 %
<b>f<sub>ck</sub></b>	26	34	0,2870	0,3132	2,62 %
<b>h</b>	238	262	0,2818	0,3175	3,57 %
<b>Φ<sub>s1</sub></b>	11,46	12,54	0,2728	0,3308	5,80 %
<b>φ</b>	1,6	2,8	0,2822	0,3037	1,15 %
<b>F<sub>cm</sub></b>	34	42	0,2989	0,3007	0,18 %

### 5.8.2.2. Trek Eurocode 2 – deel 1

Bij de berekening van een plaat onder trek volgens Eurocode 2 deel 1 heeft de betonkwaliteit, de diameter van de trekwapening en de minimum wapening de meeste invloed op de scheurwijdte. De scheurwijdte verschilt ongeveer 11 %. Daarnaast heeft de breedte en de hoogte een effect op de scheurwijdte. De betondekking heeft net zoals bij de berekening van de balk geen invloed op de scheurwijdte.

Tabel 93: Minimum- en maximumwaarden bij plaat, EC2 – 1

	Minimale inputwaarde	Maximale inputwaarde	Minimale scheurwijdte	Maximale scheurwijdte	Vershil in %
<b>c</b>	20	42	0,2916	0,2916	0 %
<b>f<sub>ck</sub></b>	26	34	0,2378	0,3431	10,56 %
<b>h</b>	238	262	0,2678	0,3150	4,72 %
<b>Φ<sub>s1</sub></b>	23,875	26,125	0,2417	0,3488	10,71 %
<b>A<sub>s,min</sub></b>	1790,757	2144,186	0,2417	0,3488	10,71 %

### 5.8.2.3. Trek Eurocode 2 – deel 3

De scheurwijdte wordt het minst beïnvloed door de kruipfactor, de breedte en de gemiddelde druksterkte bij de berekening van trek uit Eurocode 2 deel 3 bij een plaat. Hierbij ligt het verschil in scheurwijdte tussen de 0,42 % en 1,91 %. Het grootste verschil van 22,23 % wordt berekend bij de betondekking. Daarnaast heeft de betonkwaliteit en de diameter van de trekwapening een redelijk effect op de scheurwijdte. De hoogte heeft geen invloed op de scheurwijdte.

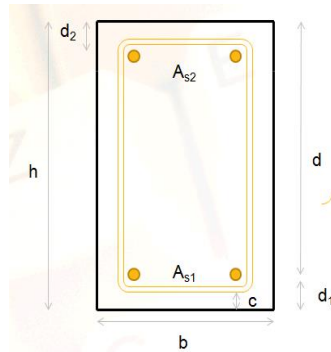
Tabel 94: Minimum- en maximumwaarden bij plaat EC2 – 3

	Minimale inputwaarde	Maximale inputwaarde	Minimale scheurwijdte	Maximale scheurwijdte	Vershil in %
<b>c</b>	20	42	0,3001	0,5224	22,23 %
<b>f<sub>ck</sub></b>	21	29	0,2685	0,3299	6,14 %
<b>h</b>	238	262	0,3001	0,3001	0 %
<b>Φ<sub>s1</sub></b>	11,4	12,45	0,2763	0,3331	5,68 %
<b>φ</b>	0,80	1,40	0,2963	0,3076	1,13 %
<b>f<sub>cm</sub></b>	29	37	0,2974	0,3016	0,42 %



### 5.9. Afhankelijkheid van de parameters

Het is belangrijk in het onderzoek om te weten of de parameters een relatie hebben of niet. Als de parameters onafhankelijk zijn van elkaar dan is elke combinatie een mogelijke combinatie in de berekening. Maar als ze afhankelijk zijn dan is niet elke combinatie mogelijk. Deze informatie is nodig om te onderzoeken of de extreme waarden die voorkomen in de berekeningen realistisch of onrealistisch zijn. De afhankelijkheid wordt geanalyseerd en de verbanden worden opgezocht en hieronder in de tabel weergegeven. De eerste kolom bevat de parameter die zal veranderen en de eerste rij bevat de parameter die moet volgen als de parameter in de eerste kolom verandert.



Figuur 95: Doorsnede balk

Tabel 95: Verbanden parameters

	<b>h</b>	<b>b</b>	<b>f<sub>ck</sub></b>	<b>φ<sub>s</sub></b>	<b>Φ<sub>b</sub></b>	<b>c</b>	<b>M</b>	<b>φ</b>
<b>h</b>	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
<b>b</b>	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	X
<b>f<sub>ck</sub></b>	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	X
<b>φ<sub>s</sub></b>	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓
<b>Φ<sub>b</sub></b>	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
<b>c</b>	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓
<b>M</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓
<b>φ</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X

- X : Afhankelijk
- ✓ : Onafhankelijk

Uit de tabel kan afgeleid worden dat de variatie van de eerste parameter hoogte geen verband heeft met de breedte, de betonkwaliteit en het buigmoment, dus onafhankelijk zijn van elkaar. De variatie van de hoogte kan onafhankelijk van de betondekking, wapening en beugelwapening gebeuren. Het verschil wordt opgevangen door de nuttige hoogte,  $d$ . Dit is ook zichtbaar op de bovenstaande figuur. Dit wil zeggen dat de nuttige hoogte uitgerekend moet worden met de betondekking, de wapening en de beugelwapening door middel van de volgende formule,  $d = h - (c + \varphi_s / 2 + \varphi_b)$ . Het is ook duidelijk dat bij de variatie alleen de kruipfactor afhankelijk is.

Daarna wordt de tweede parameter, de breedte geanalyseerd. De hoogte, de betonkwaliteit en het buigmoment hebben geen relatie met de breedte. De variatie van de betondekking, wapening en beugelwapening kan onafhankelijk van de breedte gebeuren. Het verschil zal opgevangen worden door de tussenafstand van de staven,  $s$ . Dus zijn deze parameters onafhankelijk van elkaar. Dit kan op de bovenstaande figuur afgeleid worden

en is weergegeven in de formule van de breedte,  $b = s + 2 \cdot c + 2 \cdot \varphi_{s1} + 2 \cdot \varphi_b$ . Op de tabel kan afgelezen worden dat bij deze variatie alleen de kruipfactor afhankelijk is.

De derde parameter is de betonkwaliteit. Deze parameter heeft geen samenhang met de hoogte, de breedte, de beugelwapening, de wapening en het buigmoment. Alleen de kruipfactor wordt beïnvloed bij de variatie van de betonkwaliteit. Dan wordt de vierde parameter de wapening geanalyseerd. Deze parameter is onafhankelijk van de parameters die in de tabel vermeld zijn. Dezelfde geldt voor de beugelwapening. Deze parameter is ook onafhankelijk van de hoogte, de breedte, de betondekking, de kruipfactor, de betonkwaliteit, de wapening en het buigmoment. De betondekking en het buigmoment zijn de volgende parameters die onderzocht worden en uit de analyse blijkt dat deze parameters ook onafhankelijk zijn van de opgesomde parameters in de tabel.

Als laatste wordt de kruipfactor geanalyseerd. De kruipfactor kan veranderen door bijvoorbeeld het tijdstip van de belasting of de vochtigheidsgraad. Zoals eerder vermeld zal de variatie van de kruipfactor sommige parameters zoals de hoogte, de breedte en de betonkwaliteit in de tabel beïnvloeden. Dit komt omdat deze parameter afhankelijk is van de betonkwaliteit en de geometrie, breedte en hoogte. Maar de kruipfactor kan soms toenemen of afnemen zonder de andere parameters te beïnvloeden. Er is dus een gedeeltelijke afhankelijkheid.

Nadat alle parameters geanalyseerd zijn en de afhankelijkheid ervan besproken is, kan er geconcludeerd worden dat alle parameters onafhankelijk van elkaar variëren met de uitzondering van de kruipfactor. Zoals eerder vermeld zal de kruipfactor gedeeltelijk variëren.

## **5.10. Invloed gelijktijdigheid met een variërende parameter**

Bij paragraaf afhankelijkheid wordt vermeld dat elke combinatie mogelijk is als de parameters onafhankelijk zijn van elkaar. Uiteindelijk werd er besloten dat alle parameters onafhankelijk zijn met uitzondering van de kruipfactor. De kruipfactor is gedeeltelijk afhankelijk. Dus elke combinatie zou mogelijk zijn. Hierbij wordt de invloed van de gelijktijdigheid van de parameters onderzocht om te kijken of de extreme waarden bij de simulatie realistisch zijn.

Dit wordt gedaan door eerst twee parameters te combineren met de grootste scheurwijdten  $[w_{min}, w_{max}]$ . Daarna wordt er gekeken welke scheurwijdte verkregen worden als deze twee parameters gecombineerd worden met derde parameter. Bij de derde parameter wordt de minimale en de maximale waarde toegepast. Wanneer de combinatie geen voldoende informatie geeft over de maximale scheurwijdte bij de simulatie, wordt de combinatie nog eens uitgevoerd door drie parameters samen met de toevoeging van een vierde minimale en maximale parameter. Eerst worden de tabellen van de invloed van de parameters weergegeven bij de variatie van elke parameter apart. Daarna worden deze waarden omgezet in een overzichtstabel met  $[w_{min}, w_{max}]$ . Als laatste worden de combinatietabellen weergegeven waarin de grootste scheurwijdte van de combinatie wordt gevormd en uiteindelijk de grootste scheurwijdte afgelezen kan worden.

### 5.10.1. Balk

#### 5.10.1.1. Buiging

Tabel 96: Invloed van elke parameter apart bij variatie, buiging

	Minimale inputwaarde	Maximale inputwaarde	Minimale scheurwijdte	Maximale scheurwijdte	Vershil in %
<b>c</b>	30	55,95	0,2532	0,3685	11,53 %
<b>f<sub>ck</sub></b>	26	34	0,2911	0,3086	1,75 %
<b>b</b>	287	313	0,2956	0,3035	0,79 %
<b>h</b>	583,57	616,43	0,2896	0,3101	2,05 %
<b>Φ<sub>b</sub></b>	9,55	10,45	0,2992	0,3001	0,09 %
<b>Φ<sub>s1</sub></b>	23,875	26,125	0,2660	0,3395	7,35 %
<b>Φ<sub>s2</sub></b>	13,37	14,63	0,2997	0,2997	0 %
<b>φ</b>	1,2	2,1	0,2933	0,3028	0,95 %
<b>M<sub>ed</sub></b>	96	144	0,2183	0,3810	16,27 %
<b>f<sub>cm</sub></b>	34	42	0,2988	0,3004	0,16 %

Eerst worden de combinaties gevormd met de grootste scheurwijdten van twee parameters.

Tabel 97: Overzicht 1a

w <sub>k</sub>	h	b	f <sub>ck</sub>	Φ <sub>s</sub>	Φ <sub>b</sub>	c	M	φ
1	0,2896							
2	0,3101							
3		0,2956						
4		0,3035						
5			0,2911					
6			0,3086					
7				0,2660				
8				0,3395				
9					0,2992			
10					0,3001			
11						0,2532		
12						0,3685		
13							0,2183	
14							0,3810	
15								0,2933
16								0,3028

Bij deze berekening wordt de combinatie met de grootste scheurwijdten gevormd door de minimale waarde van de wapening en de maximale waarde van de betondekking. In de volgende tabel zijn de scheurwijdten van de combinatie zichtbaar.

Tabel 98: Combinatietabel 1

$w_k$	$h$	$b$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$\Phi_b$	$c$	$M$	$\varphi$
1	0,4001			0,266		0,3685		
2	0,4309			0,266		0,3685		
3		0,4111		0,266		0,3685		
4		0,4192		0,266		0,3685		
5			0,4037	0,266		0,3685		
6			0,4273	0,266		0,3685		
7				0,266		0,3685		
8				0,266		0,3685		
9				0,266	0,4147	0,3685		
10				0,266	0,4158	0,3685		
11				0,266		0,3685	0,3040	
12				0,266		0,3685	0,5265	
13				0,266		0,3685		0,4091
14				0,266		0,3685		0,4181

Wanneer de maximale waarde van de betondekking en de minimale waarde van de wapening gelijktijdig voorkomen in de berekening waarbij continu de minimum- en maximumwaarden van de andere parameters gebruikt worden die in de eerste rij terug te vinden zijn, worden de scheurwijdten berekend die in de tabel weergegeven zijn. De berekende scheurwijdten zijn bijna allemaal groter dan 0,4 mm. Er wordt opgemerkt dat bij de maximale waarde van het buigmoment samen met de minimale wapening en de maximale betondekking een scheurwijdte ontstaat van 0,5265 mm.

Daarna wordt er een andere combinatie gekozen met de grootste scheurwijdte. Bijvoorbeeld de minimale waarde van de betondekking en maximale waarde van het buigmoment.

Tabel 99: Combinatietabel 2

$w_k$	$h$	$b$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$\Phi_b$	$c$	$M$	$\varphi$
1	0,3088					0,2532	0,3810	
2	0,3346					0,2532	0,3810	
3		0,3160				0,2532	0,3810	
4		0,3266				0,2532	0,3810	
5			0,3188			0,2532	0,3810	
6			0,3347			0,2532	0,3810	
7				0,2875		0,2532	0,3810	
8				0,3610		0,2532	0,3810	
9					0,3197	0,2532	0,3810	
10					0,3229	0,2532	0,3810	
11						0,2532	0,3810	
12						0,2532	0,3810	
13						0,2532	0,3810	0,3189
14						0,2532	0,3810	0,3223
15						0,2532	0,3810	

Wanneer de minimale betondekking en het maximale buigmoment gelijktijdig optreden met de minimum- en maximumwaarden van de andere parameters, dan kan op de tabel de scheurwijdten afgelezen worden. De kleinste scheurwijdte komt voor bij de minimale waarde van de wapening en de maximale scheurwijdte wordt bereikt bij de maximale waarde van de wapening, namelijk 0,3610 mm.

Uit de analyse van de combinatie met twee parameters blijkt dat de gewenste informatie over de scheurwijdte niet gevonden kan worden omdat de gevonden maximale scheurwijdten, kleiner zijn dan de maximale scheurwijdte van de simulatie, 0,537 mm. Daarom wordt er nog een combinatie gevormd met drie parameters. Er wordt een combinatietabel gevormd met de grootste scheurwijdten. Hierbij wordt de volgende combinatie gevormd door de maximale betondekking, de minimale wapening en het maximale buigmoment.

Tabel 100: Overzicht 1b

$w_k$	$h$	$b$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$\Phi_b$	$c$	$M$	$\varphi$
1	0,2896							
2	0,3101							
3		0,2956						
4		0,3035						
5			0,2911					
6			0,3086					
7				0,2660				
8				0,3395				
9					0,2992			
10					0,3001			
11						0,2532		
12						0,3685		
13							0,2183	
14							0,3810	
15								0,2933
16								0,3028

Tabel 101: Combinatietabel 3

$w_k$	$h$	$b$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$\Phi_b$	$c$	$M$	$\varphi$
1	0,5442			0,2660		0,3685	0,3810	
2	0,5095			0,2660		0,3685	0,3810	
3		0,5197		0,2660		0,3685	0,3810	
4		0,5330		0,2660		0,3685	0,3810	
5			0,5384	0,2660		0,3685	0,3810	
6			0,5151	0,2660		0,3685	0,3810	
7				0,2660		0,3685	0,3810	
8				0,2660		0,3685	0,3810	
9				0,2660	0,5258	0,3685	0,3810	
10				0,2660	0,5272	0,3685	0,3810	
11				0,2660		0,3685	0,3810	
12				0,2660		0,3685	0,3810	
13				0,2660		0,3685	0,3810	0,5298
14				0,2660		0,3685	0,3810	0,5196

Wanneer de maximale waarde van de betondekking en de minimale waarde van de wapening samen met het maximale buigmoment gelijktijdig voorkomen in de berekening met de minimum- en maximumwaarden van de andere parameters worden de scheurwijdten in de combinatietabel 3 berekend. De berekende scheurwijdten zijn bijna allemaal groter dan 0,5 mm. Er wordt opgemerkt dat bij de minimale hoogte samen met de minimale wapening, maximale buigmoment en de maximale betondekking een scheurwijdte ontstaat van 0,5442 mm.

#### 5.10.1.2. Trek Eurocode 2 – deel 1

Dezelfde methode wordt toegepast op de tweede berekening van de scheurwijdte bij trek uit Eurocode 2 deel 1. De combinaties worden gevormd met de grootste scheurwijdten van twee parameters.

Tabel 102: Invloed van elke parameter apart bij trek, EC2-1

	Minimale inputwaarde	Maximale inputwaarde	Minimale scheurwijdte	Maximale scheurwijdte	Verskil in %
<b>c</b>	30	55,95	0,3157	0,3157	0 %
<b>f<sub>ck</sub></b>	26	34	0,2502	0,3783	12,81 %
<b>b</b>	287	313	0,2845	0,3468	6,23 %
<b>h</b>	583,57	616,43	0,3062	0,3246	1,84 %
<b>Φ<sub>s1</sub></b>	19,1	20,9	0,2550	0,3851	13,01 %
<b>Φ<sub>b</sub></b>	7,64	8,36	0,3157	0,3157	0 %
<b>A<sub>s,min</sub></b>	859,56	1029,21	0,2550	0,3851	13,01 %

Tabel 103: Overzicht 2

w <sub>k</sub>	h	b	f <sub>ck</sub>	Φ <sub>s</sub>	Φ <sub>b</sub>	c
<b>1</b>	0,3062					
<b>2</b>	0,3246					
<b>3</b>		0,2845				
<b>4</b>		0,3468				
<b>5</b>			0,2502			
<b>6</b>			0,3783			
<b>7</b>				0,2551		
<b>8</b>				0,385		
<b>9</b>					0,3157	
<b>10</b>					0,3157	
<b>11</b>						0,3157
<b>12</b>						0,3157

De combinatie met de grootste scheurwijdten wordt gevormd door de min-max vergelijking. De eerste combinatie die gekozen wordt is de minimale waarde van de wapening en de maximale waarde van de breedte.

Tabel 104: Combinatietabel 1

$w_k$	$h$	$b$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$\Phi_b$	$c$
1	0,410	0,3468		0,2551		
2	0,429	0,3468		0,2551		
3		0,3468	0,344	0,2551		
4		0,3468	0,491	0,2551		
5		0,3468		0,2551	0,419	
6		0,3468		0,2551	0,419	
7		0,3468		0,2551		0,419
8		0,3468		0,2551		0,419
9		0,3468		0,2551		
10		0,3468		0,2551		
11		0,3468		0,2551		
12		0,3468		0,2551		

De maximale waarde van de breedte en de minimale waarde van de wapening komen gelijktijdig voor met de minimum- en maximumwaarden van de andere parameters in de berekening. De berekende scheurwijdten zijn bijna allemaal groter dan 0,40 mm. Er wordt opgemerkt dat bij de maximale waarde van de betonkwaliteit samen met de minimale wapening en de maximale breedte een scheurwijdte ontstaat van 0,491 mm.

Dan wordt er een andere combinatie toegepast. De minimale waarde van de wapening en maximale waarde van de betonkwaliteit.

Tabel 105: Combinatietabel 2

$w_k$	$h$	$b$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$\Phi_b$	$c$
1	0,375		0,3783	0,2551		
2	0,395		0,3783	0,2551		
3		0,351	0,3783	0,2551		
4		0,419	0,3783	0,2551		
5			0,3783	0,2551		
6			0,3783	0,2551		
7			0,3783	0,2551		
8			0,3783	0,2551		
9			0,3783	0,2551	0,385	
10			0,3783	0,2551	0,385	
11			0,3783	0,2551		0,385
12			0,3783	0,2551		0,385

Als de minimale wapening en de maximale betonkwaliteit tegelijkertijd met de minimum- en maximumwaarden van de andere parameters optreden, worden verschillende scheurwijdten berekend. De kleinste scheurwijdte komt voor bij de minimale waarde van de breedte en de maximale scheurwijdte wordt bereikt bij de maximale waarde van de breedte, 0,419 mm.

### 5.10.1.3. Trek Eurocode 2 – deel 3

Als laatste wordt er op deze berekening ook een combinatie uitgevoerd. Dezelfde methode als de twee vorige worden gehanteerd. Eerst worden de combinaties gevormd met de grootste scheurwijdten van twee parameters.

Tabel 106: Invloed van elke parameter apart trek, EC2-3

	Minimale inputwaarde	Maximale inputwaarde	Minimale scheurwijdte	Maximale scheurwijdte	Vershil in %
<b>c</b>	30	55,95	0,2176	0,4886	27,1 %
<b>f<sub>ck</sub></b>	26	34	0,2830	0,3347	5,17 %
<b>b</b>	287	313	0,2883	0,3314	4,32 %
<b>h</b>	583,57	616,43	0,3050	0,3140	0,9 %
<b>Φ<sub>s1</sub></b>	19,1	20,9	0,2816	0,3422	6,06 %
<b>Φ<sub>b</sub></b>	9,55	10,45	0,3058	0,3133	0,75 %
<b>φ</b>	1,2	2,1	0,3030	0,3225	1,95 %
<b>f<sub>cm</sub></b>	34	42	0,3079	0,3114	0,35 %

Tabel 107: Overzicht 3a

w <sub>k</sub>	h	b	f <sub>ck</sub>	Φ <sub>s</sub>	Φ <sub>b</sub>	c	φ
<b>1</b>	0,3050						
<b>2</b>	0,3140						
<b>3</b>		0,2883					
<b>4</b>		0,3314					
<b>5</b>			0,2830				
<b>6</b>			0,3347				
<b>7</b>				0,2816			
<b>8</b>				0,3422			
<b>9</b>					0,3058		
<b>10</b>					0,3133		
<b>11</b>						0,2176	
<b>12</b>						0,4886	
<b>13</b>							0,3030
<b>14</b>							0,3225

De eerste combinatie wordt gedaan met de minimale breedte en de maximale betondekking.

Tabel 108: Combinatietabel 1

w <sub>k</sub>	h	b	f <sub>ck</sub>	Φ <sub>s</sub>	Φ <sub>b</sub>	c	φ
<b>1</b>	0,4483	0,2883				0,4886	
<b>2</b>	0,4603	0,2883				0,4886	
<b>3</b>		0,2883				0,4886	
<b>4</b>		0,2883				0,4886	
<b>5</b>		0,2883	0,4156			0,4886	
<b>6</b>		0,2883	0,4923			0,4886	
<b>7</b>		0,2883		0,4124		0,4886	
<b>8</b>		0,2883		0,5049		0,4886	
<b>9</b>		0,2883			0,4506	0,4886	
<b>10</b>		0,2883			0,4593	0,4886	
<b>11</b>		0,2883				0,4886	
<b>12</b>		0,2883				0,4886	
<b>13</b>		0,2883				0,4886	0,4468
<b>14</b>		0,2883				0,4886	0,4712



Bij deze combinatie komt de minimale breedte en de maximale betondekking samen voor met de minimum- en maximumwaarden van de andere parameters. De berekende scheurwijdten zijn allemaal groter dan 0,40 mm. Bij de maximale waarde van de betondekking samen met de minimale breedte en de maximale wapening wordt een scheurwijdte berekend van 0,5049 mm. De tweede combinatie gebeurt met de minimale wapening en de maximale betondekking.

Tabel 109: Combinatietabel 2

$w_k$	$h$	$b$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$\Phi_b$	$c$	$\varphi$
1	0,5506			0,2816		0,4886	
2	0,5348			0,2816		0,4886	
3		0,5049		0,2816		0,4886	
4		0,5819		0,2816		0,4886	
5			0,4956	0,2816		0,4886	
6			0,5876	0,2816		0,4886	
7				0,2816		0,4886	
8				0,2816		0,4886	
9				0,2816	0,5374	0,4886	
10				0,2816	0,5480	0,4886	
11				0,2816		0,4886	
12				0,2816		0,4886	
13				0,2816		0,4886	0,5340
14				0,2816		0,4886	0,5601

Bij deze combinatie komt de minimale wapening en de maximale betondekking gelijktijdig met de minimum- en maximumwaarden van de andere parameters. De berekende scheurwijdten zijn bijna allemaal groter dan 0,50 mm. Bij de maximale waarde van de betonkwaliteit samen met de minimale wapening en de maximale betondekking wordt een scheurwijdte berekend van 0,5876 mm.

Uit de analyse van de combinatie met twee parameters blijkt dat de gewenste informatie over de scheurwijdte niet gevonden kan worden omdat de gevonden maximale scheurwijdte, 0,5876 mm, kleiner is dan de maximale scheurwijdte van de simulatie, 0,619 mm. Daarom wordt er nog een combinatie gevormd met drie parameters. Er wordt een combinatietabel gevormd met de grootste scheurwijdten.

Tabel 110: Overzicht 3b

$w_k$	$h$	$b$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$\Phi_b$	$c$	$\varphi$
1	0,3050						
2	0,3140						
3		0,2883					
4		0,3314					
5			0,2830				
6			0,3347				
7				0,2816			
8				0,3422			
9					0,3058		
10					0,3133		
11						0,2176	
12						0,4886	
13							0,3030
14							0,3225

Bij de volgende combinatie wordt de maximale betondekking, de minimale wapening en de maximale betonkwaliteit genomen.

Tabel 111: Combinatietabel 3

$w_k$	$h$	$b$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$\Phi_b$	$c$	$\varphi$
1	0,5962		0,3347	0,2816		0,4886	
2	0,5791		0,3347	0,2816		0,4886	
3		0,5466	0,3347	0,2816		0,4886	
4		0,6302	0,3347	0,2816		0,4886	
5			0,3347	0,2816		0,4886	
6			0,3347	0,2816		0,4886	
7			0,3347	0,2816		0,4886	
8			0,3347	0,2816		0,4886	
9			0,3347	0,2816	0,5819	0,4886	
10			0,3347	0,2816	0,5934	0,4886	
11			0,3347	0,2816		0,4886	
12			0,3347	0,2816		0,4886	
13			0,3347	0,2816		0,4886	0,5785
14			0,3347	0,2816		0,4886	0,6060

Bij deze combinatie komt de minimale wapening, maximale betonkwaliteit en de maximale betondekking gelijktijdig met de minimum- en maximumwaarden van de andere parameters. De berekende scheurwijdten zijn allemaal groter dan 0,50 mm. Bij de maximale waarde van de betonkwaliteit, de minimale wapening, de maximale betondekking en maximale breedte wordt een scheurwijdte berekend van 0,6302 mm.

### 5.10.2. *Vergelijking maximale scheurwijdte met simulatie*

Bij deze paragraaf worden de maximale scheurwijdten verkregen van de combinaties en de simulatie vergeleken. Op deze manier kan er gekeken worden of de waarden ongeveer overeenkomen en realistisch zijn.

De stimulatie die wordt uitgevoerd op Matlab geeft voor de berekening van de balk met buiging een interval van [0,153 mm; 0,537 mm]. De maximale waarde die voorkomt in de simulatie is 0,537 mm. Bij de derde combinatie met de minimale hoogte, de minimale wapening, het maximale buigmoment en de maximale betondekking geeft dit een maximale scheurwijdte van 0,544 mm. Deze maximale scheurwijdte is groter dan de waarde in de simulatie, dit wil zeggen dat de extreme waarde in de simulatie realistisch is.

*Tabel 112: Vergelijking maximale waarden buiging*

	<b>Combinatie 1</b>	<b>Combinatie 2</b>	<b>Combinatie 3</b>	<b>Simulatie</b>
<b>Max waarde</b>	0,527	0,361	0,544	0,537

De stimulatie met balk in trek, Eurocode 2 deel 1 is er een interval van [0,170; 0,494] bekomen. De maximale waarde die voorkomt in de simulatie is 0,494 mm. De eerste en de tweede combinatie geeft een maximale scheurwijdte van 0,491 mm. Beide waarden liggen dichtbij elkaar, ze verschillen maar 0,30 %, dit verschil is zeer klein. Er kan dus gezegd worden dat de extreme waarde bij deze simulatie realistisch is.

*Tabel 113: Vergelijking maximale waarde trek, EC1-2*

	<b>Combinatie 1</b>	<b>Combinatie 2</b>	<b>Simulatie</b>
<b>Max waarde</b>	0,491	0,491	0,494

De stimulatie die wordt uitgevoerd met trek, Eurocode 2 deel 3 geeft een interval van [0,174; 0,619]. De maximale waarde die voorkomt in de simulatie is 0,619 mm. De derde combinatie geeft een maximale scheurwijdte van 0,630 mm. Dit komt door de maximale betonkwaliteit, de minimale wapening, de maximale betondekking en de maximale breedte. Het is duidelijk dat deze waarde groter is dan de maximale scheurwijdte in de simulatie. Dus de extreme waarde in de simulatie is realistisch.

*Tabel 114: Vergelijking maximale waarde trek, EC1-3*

	<b>Combinatie 1</b>	<b>Combinatie 2</b>	<b>Combinatie 3</b>	<b>Simulatie</b>
<b>Max waarde</b>	0,505	0,588	0,630	0,619

### 5.10.3. *Plaat*

Zoals bij de balken wordt er voor de platen op dezelfde manier combinaties gemaakt met de parameters om de gelijktijdigheid te analyseren. De combinaties worden gevormd met de grootste scheurwijdten van twee parameters. Als deze combinaties geen voldoende informatie geven over de maximale scheurwijdten wordt de combinatie nog eens uitgevoerd door drie parameters.

### 5.10.3.1. Buiging

Tabel 115: Invloed parameter bij buiging

	Minimale inputwaarde	Maximale inputwaarde	Minimale scheurwijdte	Maximale scheurwijdte	Vershil in %
<b>c</b>	20	42	0,2773	0,3304	5,31 %
<b>f<sub>ck</sub></b>	26	34	0,2870	0,3132	2,62 %
<b>h</b>	238	262	0,2818	0,3175	3,57 %
<b>Φ<sub>s1</sub></b>	11,46	12,54	0,2728	0,3308	5,80 %
<b>φ</b>	1,6	2,8	0,2822	0,3037	1,15 %
<b>F<sub>cm</sub></b>	34	42	0,2989	0,3007	0,18 %

Tabel 116: Overzicht 1a

w <sub>k</sub>	h	f <sub>ck</sub>	Φ <sub>s</sub>	c	M	φ
1	0,2818					
2	0,3175					
3		0,2870				
4		0,3132				
5			0,2728			
6			0,3308			
7				0,2773		
8				0,3304		
9					0,2195	
10					0,3913	
11						0,2922
12						0,3037

De combinatie met de grootste scheurwijdten wordt gevormd door de min-max vergelijking. De eerste combinatie die gekozen wordt is de minimale waarde van de wapening en de maximale waarde van betondekking.

Tabel 117: Combinatietabel 1

w <sub>k</sub>	h	f <sub>ck</sub>	Φ <sub>s</sub>	c	M	φ
1	0,3867		0,2728	0,3304		
2	0,3418		0,2728	0,3304		
3		0,3794	0,2728	0,3304		
4		0,3497	0,2728	0,3304		
5			0,2728	0,3304		
6			0,2728	0,3304		
7			0,2728	0,3304		
8			0,2728	0,3304		
9			0,2728	0,3304	0,2599	
10			0,2728	0,3304	0,4726	
11			0,2728	0,3304		0,3682
12			0,2728	0,3304		0,3564

Bij deze combinatie komt de minimale wapening en de maximale betondekking gelijktijdig met de minimum- en maximumwaarden van de andere parameters. Bij de maximale waarde van het buigmoment samen met de minimale wapening en de maximale betondekking wordt een scheurwijdte berekend van 0,4726 mm.

Daarna wordt er een andere combinatie gekozen met de grootste scheurwijdte. Bijvoorbeeld de minimale waarde van de betondekking en maximale waarde van het buigmoment.

Tabel 118: Combinatietabel 2

$w_k$	$h$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$c$	$M$	$\varphi$
1	0,3621			0,2773	0,3913	
2	0,3972			0,2773	0,3913	
3		0,3674		0,2773	0,3913	
4		0,3928		0,2773	0,3913	
5			0,3455	0,2773	0,3913	
6			0,4193	0,2773	0,3913	
7				0,2773	0,3913	
8				0,2773	0,3913	
9				0,2773	0,3913	
10				0,2773	0,3913	
11				0,2773	0,3913	0,3703
12				0,2773	0,3913	0,3849

De tweede combinatie bevat de minimale betondekking en het maximale buigmoment samen met de minimum- en maximumwaarden van de andere parameters. Deze waarden zijn in de bovenstaande tabel weergegeven. Bij de maximale waarde van de wapening samen met de minimale betondekking en het maximale buigmoment wordt een scheurwijdte berekend van 0,4193 mm.

Uit de analyse van de combinatie met twee parameters blijkt dat de gewenste informatie over de scheurwijdte niet gevonden kan worden omdat de gevonden maximale scheurwijdten kleiner zijn dan de maximale scheurwijdte van de simulatie, 0,488 mm. Daarom wordt er nog een combinatie gevormd met drie parameters. Er wordt een combinatietabel gevormd met de grootste scheurwijdten. De volgende combinatie wordt gevormd met de maximale betondekking, de minimale wapening en het maximale buigmoment.

Tabel 119: Overzicht 1b

$w_k$	$h$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$c$	$M$	$\varphi$
1	0,2818					
2	0,3175					
3		0,2870				
4		0,3132				
5			0,2728			
6			0,3308			
7				0,2773		
8				0,3304		
9					0,2195	
10					0,3913	
11						0,2922
12						0,3037

Tabel 120: Combinatietabel 3

$w_k$	$h$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$c$	$M$	$\varphi$
1	0,4961		0,2728	0,3304	0,3913	
2	0,4491		0,2728	0,3304	0,3913	
3		0,4874	0,2728	0,3304	0,3913	
4		0,4582	0,2728	0,3304	0,3913	
5			0,2728	0,3304	0,3913	
6			0,2728	0,3304	0,3913	
7			0,2728	0,3304	0,3913	
8			0,2728	0,3304	0,3913	
9			0,2728	0,3304	0,3913	
10			0,2728	0,3304	0,3913	
11			0,2728	0,3304	0,3913	0,4777
12			0,2728	0,3304	0,3913	0,4626

Bij deze combinatie komt de minimale wapening, de maximale betondekking en het maximale buigmoment gelijktijdig met de minimum- en maximumwaarden van de andere parameters. Bij de minimale wapening, de maximale betondekking, het maximale buigmoment en de minimale hoogte wordt een scheurwijdte berekend van 0,4961 mm.

#### 5.10.3.2. Trek Eurocode 2 – deel 1

Tabel 121: Invloed parameter bij trek, EC2-1

	Minimale inputwaarde	Maximale inputwaarde	Minimale scheurwijdte	Maximale scheurwijdte	Vershil in %
$c$	20	42	0,2916	0,2916	0 %
$f_{ck}$	26	34	0,2378	0,3431	10,56 %
$h$	238	262	0,2678	0,3150	4,72 %
$\Phi_{s1}$	23,875	26,125	0,2417	0,3488	10,71 %
$A_{s,min}$	1790,757	2144,186	0,2417	0,3488	10,71 %

Tabel 122: Overzicht 2

$w_k$	$h$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$c$
1	0,2678			
2	0,3150			
3		0,2378		
4		0,3431		
5			0,2417	
6			0,3488	
7				0,2916
8				0,2916

De eerste combinatie die gevormd wordt is de minimale wapening en de maximale hoogte.

Tabel 123: Combinatietabel 1

$w_k$	$h$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$c$
1	0,3150		0,2417	
2	0,3150		0,2417	
3	0,3150	0,3131	0,2417	
4	0,3150	0,4332	0,2417	
5	0,3150		0,2417	
6	0,3150		0,2417	
7	0,3150		0,2417	0,3745
8	0,3150		0,2417	0,3745

De eerste combinatie met de minimale wapening en de maximale hoogte samen met de minimum- en maximumwaarden van de andere parameters wordt op de bovenstaande tabel getoond. Bij de maximale waarde van de betonkwaliteit samen met de minimale wapening en de maximale hoogte wordt er een scheurwijdte berekend van 0,4332 mm. De tweede combinatie wordt gevormd door de minimale wapening en de maximale betonkwaliteit.

Tabel 124: Combinatietabel 2

$w_k$	$h$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$c$
1	0,3769	0,3431	0,2417	
2	0,4332	0,3431	0,2417	
3		0,3431	0,2417	
4		0,3431	0,2417	
5		0,3431	0,2417	
6		0,3431	0,2417	
7		0,3431	0,2417	0,4053
8		0,3431	0,2417	0,4053

Als de minimale wapening en de maximale betonkwaliteit tegelijkertijd met de minimum- en maximumwaarden van de parameters optreden, worden verschillende scheurwijdten berekend. De kleinste scheurwijdte komt voor bij de minimale waarde van de hoogte en de maximale scheurwijdte wordt bereikt bij de maximale waarde van de breedte, 0,4189 mm.

### 5.10.3.3. Trek Eurocode 2 – deel 3

Tabel 125: Invloed parameter bij trek, EC2-3

	Minimale inputwaarde	Maximale inputwaarde	Minimale scheurwijdte	Maximale scheurwijdte	Vershil in %
$c$	20	42	0,3001	0,5224	22,23 %
$f_{ck}$	21	29	0,2685	0,3299	6,14 %
$h$	238	262	0,3001	0,3001	0 %
$\Phi_{s1}$	11,4	12,45	0,2763	0,3331	5,68 %
$\varphi$	0,80	1,40	0,2963	0,3076	1,13 %
$f_{cm}$	29	37	0,2974	0,3016	0,42 %

Tabel 126: Overzicht 3a

$w_k$	$h$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$c$	$\varphi$
1	0,3001				
2	0,3001				
3		0,2685			
4		0,3299			
5			0,2763		
6			0,3331		
7				0,3001	
8				0,5224	
9					0,2963
10					0,3076

De eerste combinatie wordt uitgevoerd door de minimale waarde van de betonkwaliteit en de maximale waarde van de betondekking.

Tabel 127: Combinatietabel 1

$w_k$	$h$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$c$	$\varphi$
1	0,4604	0,2685		0,5224	
2	0,4669	0,2685		0,5224	
3		0,2685		0,5224	
4		0,2685		0,5224	
5		0,2685	0,4282	0,5224	
6		0,2685	0,5208	0,5224	
7		0,2685		0,5224	
8		0,2685		0,5224	
9		0,2685		0,5224	0,4622
10		0,2685		0,5224	0,4763

Als de minimale betonkwaliteit en de maximale betondekking tegelijkertijd met de min en max waarden van de parameters optreden, worden verschillende scheurwijdten berekend. De maximale scheurwijdte wordt uitgerekend bij de maximale waarde van de wapening, 0,5208 mm. Daarna wordt de tweede combinatie gedaan door de minimale wapening en maximale betonkwaliteit.

Tabel 128: Combinatietabel 2

$w_k$	$h$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$c$	$\varphi$
1	0,3663	0,3299	0,2763		
2	0,3663	0,3299	0,2763		
3		0,3299	0,2763		
4		0,3299	0,2763		
5		0,3299	0,2763		
6		0,3299	0,2763		
7		0,3299	0,2763	0,1952	
8		0,3299	0,2763	0,6416	
9		0,3299	0,2763		0,3622
10		0,3299	0,2763		0,3746



Wanneer de maximale betonkwaliteit en de minimale waarde van de wapening gelijktijdig voorkomen in de berekening, worden de scheurwijdten berekend die in de tabel weergegeven zijn. De maximale waarde van de betondekking samen met de minimale wapening en de maximale betonkwaliteit geeft een scheurwijdte van 0,6416 mm.

Uit de analyse van de combinatie met twee parameters blijkt dat de gewenste informatie over de scheurwijdte niet gevonden kan worden omdat de gevonden maximale scheurwijdte, 0,642 mm, kleiner is dan de maximale scheurwijdte van de simulatie, 0,647 mm. Daarom wordt er nog een combinatie gevormd met drie parameters. Er wordt een combinatietabel gevormd met de grootste scheurwijdten. Bij de volgende combinatie wordt de maximale betondekking, de minimale wapening en de maximale betonkwaliteit genomen.

Tabel 129: Overzicht 3b

$w_k$	$h$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$c$	$\varphi$
1	0,3001				
2	0,3001				
3		0,2685			
4		0,3299			
5			0,2763		
6			0,3331		
7				0,3001	
8				0,5224	
9					0,2963
10					0,3076

Tabel 130: Combinatie 3

$w_k$	$h$	$f_{ck}$	$\Phi_s$	$c$	$\varphi$
1	0,6387	0,3299	0,2763	0,5224	
2	0,6416	0,3299	0,2763	0,5224	
3		0,3299	0,2763	0,5224	
4		0,3299	0,2763	0,5224	
5		0,3299	0,2763	0,5224	
6		0,3299	0,2763	0,5224	
7		0,3299	0,2763	0,5224	
8		0,3299	0,2763	0,5224	
9		0,3299	0,2763	0,5224	0,6360
10		0,3299	0,2763	0,5224	0,6528

Bij deze combinatie komt de minimale wapening, maximale betonkwaliteit en de maximale betondekking gelijktijdig met de minimum- en maximumwaarden van de andere parameters voor. De berekende scheurwijdten zijn allemaal groter dan 0,60 mm. Bij de maximale waarde van de betonkwaliteit, de minimale wapening, de maximale betondekking en maximale kruipfactor wordt een scheurwijdte berekend van 0,6528 mm.

#### 5.10.4. *Vergelijking maximale scheurwijdte met simulatie*

Bij deze paragraaf worden de maximale verkregen scheurwijdtes van de combinaties en de simulatie vergeleken voor de platen. Op deze manier kan er gezien worden of de waarden overeenkomen en realistisch zijn.

De stimulatie die wordt uitgevoerd door Matlab geeft voor de berekening van de plaat met buiging een maximale waarde van 0,488 mm. Bij de derde combinatie komt de minimale wapening, de maximale betondekking, het maximale buigmoment en de minimale hoogte gelijktijdig en geeft een maximale scheurwijdte van 0,496 mm. De waarde is groter dan de maximale scheurwijdte in de simulatie en duidt aan dat de extreme scheurwijdte in de simulatie realistisch is.

*Tabel 131: Vergelijking maximale waarden buiging*

	<b>Combinatie 1</b>	<b>Combinatie 2</b>	<b>Combinatie 3</b>	<b>Simulatie</b>
<b>Max waarde</b>	0,473	0,419	0,496	0,488

De stimulatie met plaat in trek, Eurocode 2 deel 1 geeft een interval van [0,169; 0,430]. De maximale waarde die voorkomt in de simulatie is 0,430 mm. De berekening samen met de minimale wapening en de maximale hoogte geeft een maximale scheurwijdte van 0,433 mm. Ook hier is de maximale scheurwijdte van de combinatie groter dan die van de simulatie. Dus de extreme scheurwijdte in de simulatie is realistisch.

*Tabel 132: Vergelijking maximale waarde trek, EC1-2*

	<b>Combinatie 1</b>	<b>Combinatie 2</b>	<b>Simulatie</b>
<b>Max waarde</b>	0,433	0,419	0,430

De stimulatie die wordt uitgevoerd met trek, Eurocode 2 deel 3 geeft een interval van [0,132; 0,647]. De maximale waarde die voorkomt in de simulatie is 0,647 mm. De derde combinatie met de maximale betonkwaliteit, de minimale wapening, de maximale betondekking en maximale kruipfactor geeft een maximale scheurwijdte van 0,653 mm. De maximale scheurwijdte van de combinatie is groter dan die van de simulatie, dus de extreme waarde in de simulatie is realistisch.

*Tabel 133: Vergelijking maximale waarde trek, EC1-3*

	<b>Combinatie 1</b>	<b>Combinatie 2</b>	<b>Combinatie 3</b>	<b>Simulatie</b>
<b>Max waarde</b>	0,521	0,642	0,653	0,647

### 5.11. **Vergelijking van 3 berekeningsmethoden**

#### 5.11.1. *Balken*

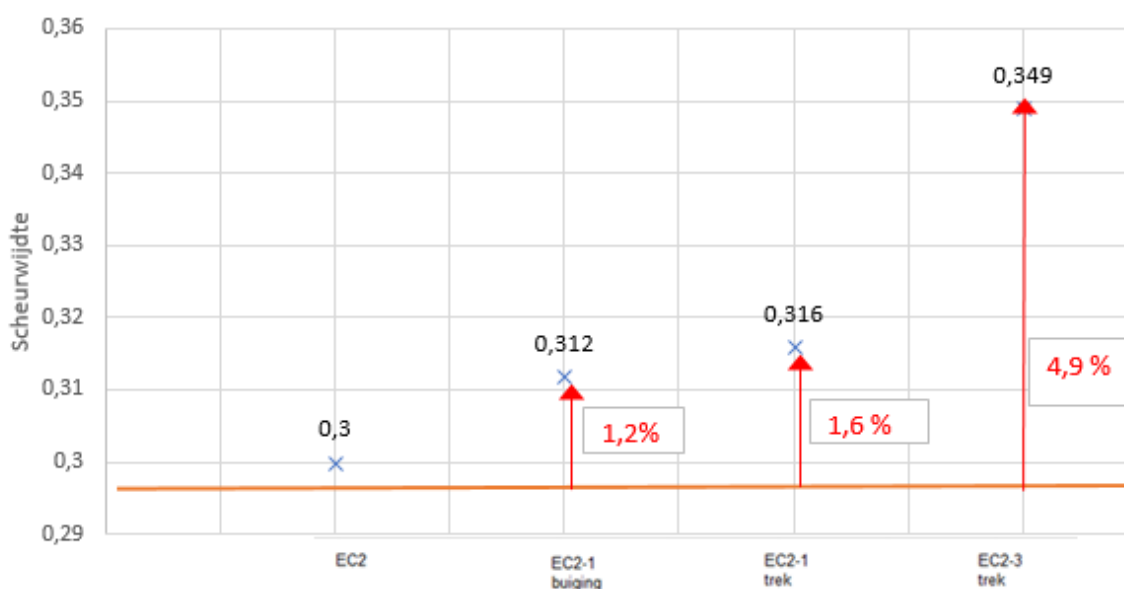
De scheurwijdte wordt zoals eerder vermeld berekend volgens de drie verschillende methodes. De resultaten worden vermeld in de onderstaande tabel. Voor de eerste berekeningsmethode Eurocode 2 deel 1 op buiging wordt er een interval van [0,153; 0,537] berekend. Dit verklaart dat er op de werf scheuren voorkomen met een minimumwaarde van 0,153 mm en een maximumwaarde van 0,537 mm. Het gemiddelde van de berekende waarde is 0,312 mm. De tweede berekeningsmethode Eurocode 2 deel 1 op trek bevat de volgende range van scheurwijdtes [0,170; 0,494]. De gemiddelde

scheurwijdte bedraagt 0,316 mm. Voor de derde berekeningsmethode Eurocode 2 deel 3 op trek wordt het volgende interval berekend [0,174; 0,629]. Het gemiddelde van deze berekening is 0,349 mm. Deze berekening bevat het grootste interval waarbij de maximale scheurwijdte kan gaan tot 0,637 mm.

Tabel 134: Vergelijking berekeningsmethoden

Berekeningsmethode	Interval	Gemiddelde	Vershil EC2 - gemiddelde %	Kans % $w_k > 0,30$
<b>EC 2 -1: Buiging</b>	[0,153; 0,537]	0,312	1,2 %	54 %
<b>EC 2 -1: Trek</b>	[0,170; 0,494]	0,316	1,6 %	59,23 %
<b>EC 2 -3: Trek</b>	[0,174; 0,629]	0,349	4,9 %	64,88 %

De gemiddelde waarden van de drie berekeningen van scheurwijdte verschillen van de maximale weergegeven waarde van 0,30 mm in Eurocode 2. Deze waarden worden op de onderstaande grafiek uitgezet. Uit de cumulatieve frequentie blijkt dat de kans op een scheurvorming groter dan de maximale scheurwijdte, 0,3 mm afkomstig van Eurocode 2 voor de eerste berekeningsmethode 54 % bedraagt. Voor de tweede berekeningsmethode is de kans 59,23 % en voor de derde berekeningsmethode 64,88 %.



Figuur 96: Grafiek vergelijking gemiddelden

Als de gemiddelde waarde van drie berekeningsmethoden vergeleken worden met elkaar is het merkbaar dat de eerste en de tweede berekeningen een realistisch verschil tussen de maximale waarde in Eurocode 2. De laatste berekeningsmethode met Eurocode 2 deel 3 trek vertoont het grootste interval. Het gemiddelde wijkt af met 4,9 % van de maximale scheurwijdte en dit verschil is groot. Deze berekeningsmethode bevat ook de grootste kans op de scheurvorming, dit kan ook op tabel 134 gezien worden.

Om de afwijking op te sporen wordt er gekeken naar de invloed van de parameters bij de drie berekeningsmethoden. Op de onderstaande tabel worden de parameters die het grootste effect vertonen op de berekening van de scheurwijdte weergegeven.

Tabel 135: Vergelijking invloed parameters

Invloed grootste parameter	EC 2 -1: Buiging	EC 2 -1: Trek	EC 2 -3: Trek
<b>Moment</b>	16,27 %	/	/
<b>Betondekking</b>	11,53 %	0 %	27,1 %
<b>Trekwapening</b>	7,35 %	13,01 %	6,06 %
<b>Betonkwaliteit</b>	1,75 %	12,81 %	5,17 %

Met behulp van de tabel kan geïnterpreteerd worden dat de bij de eerste berekeningsmethode het moment de grootste invloed heeft, bij de tweede methode de trekwapening en bij de derde berekening de betondekking. De laatste twee berekeningsmethoden zijn gebaseerd op trek en er ontstaat een afwijking bij de intervallen. De afwijking ontstaat door het toepassen van verschillende formules. Het grootste verschil in de berekening ontstaat door de variatie van de betondekking. Bij de tweede methode heeft deze parameter totaal geen invloed terwijl het bij de derde berekening een invloed heeft van ongeveer 27 %. Deze invloed is zeer groot. Dit komt omdat de betondekking een direct verband heeft met de scheurafstand  $S_{r,max}$  bij de berekening van de scheurwijdte.

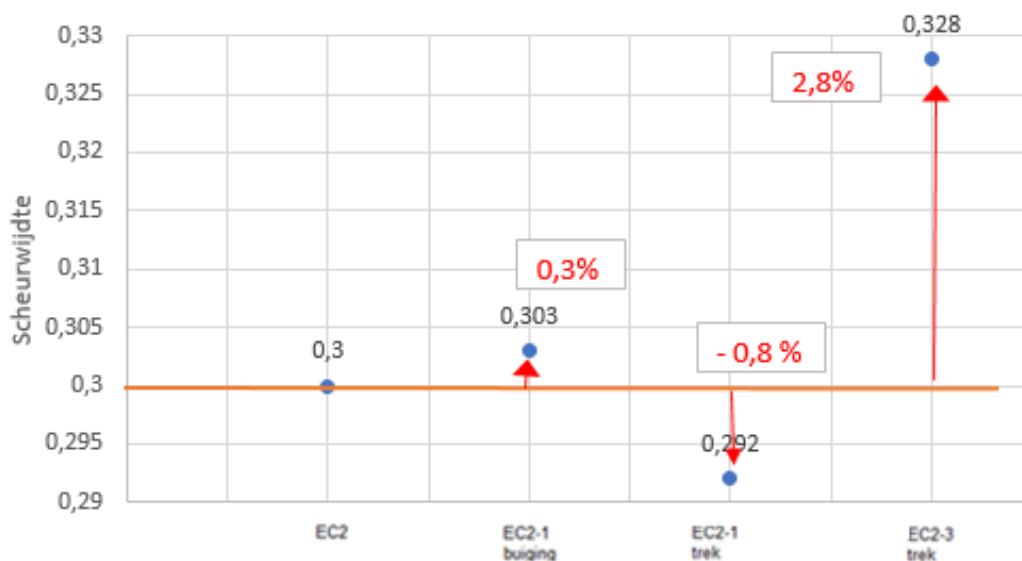
### 5.11.2. Plaat

Bij de platen wordt de scheurwijdte berekend volgens de drie verschillende methodes. De resultaten worden vermeld in de onderstaande tabel. Voor de eerste berekeningsmethode Eurocode 2 deel 1 met buiging wordt er een interval van [0,0; 0,488] berekend. Dit wil zeggen dat er bij de platen voor sommige inputwaarden geen scheuren voorkomen vandaar de waarde 0. De maximale scheurwijdte bedraagt 0,488. Het gemiddelde van de berekende waarde is 0,303 mm. De tweede berekeningsmethode Eurocode 2 deel 1 met trek bevat de volgende range van scheurwijdtes [0,174; 0,430]. De gemiddelde scheurwijdte bedraagt 0,292 mm. Voor de derde berekeningsmethode Eurocode 2 deel 3 met trek wordt het volgende interval berekend [0,134; 0,647]. Het gemiddelde van deze berekening is 0,328 mm. Deze berekening bevat het grootse interval waarbij de maximale scheurwijdte kan gaan tot 0,647 mm.

Tabel 136: Vergelijking berekeningsmethoden

Berekeningsmethode	Interval	Gemiddelde	Vershil EC2 - gemiddelde %	Kans % $w_k > 0,3$
<b>EC 2 -1: Buiging</b>	[0;0,488]	0,303	0,3 %	49,77 %
<b>EC 2 -1: Trek</b>	[0,174;0,430]	0,292	-0,8 %	41,76 %
<b>EC 2 -3: Trek</b>	[0,134;0,647]	0,328	2,8 %	54,75 %

De gemiddelde waarden van de drie berekeningen van scheurwijdte verschillen met de weergegeven maximale waarde van 0,30 mm in Eurocode 2. Dit verschil wordt op de onderstaande grafiek aangetoond. Uit de cumulatieve frequentie blijkt dat de kans op een scheurvorming groter dan de maximale scheurwijdte, 0,30 mm afkomstig van Eurocode 2 voor de eerste berekeningsmethode 49,77 % bedraagt. Voor de tweede berekeningsmethode is de kans 41,76 % en voor de derde berekeningsmethode 54,75 %.



Figuur 97: Grafiek vergelijking gemiddelden

Als de drie berekeningsmethoden voor de platen worden vergeleken, is het merkbaar dat de eerste berekening met buiging een realistisch verschil toont tussen de maximale waarde in Eurocode 2 en het berekende gemiddelde. De tweede berekening laat duidelijk zien dat het gemiddelde onder de maximale scheurwijdte van Eurocode 2 valt, dit komt omdat er met een oorspronkelijke scheurwijdte kleiner dan 0,30 mm wordt berekend. De laatste berekeningsmethode met Eurocode 2 deel 3 trek vertoont het grootste interval. Het gemiddelde wijkt af met 2,8 % van de maximale scheurwijdte en dit verschil is groot. Deze berekeningsmethode bevat ook de grootste kans op de scheurvorming die groter zijn dan 0,30 mm zoals het op tabel 136 weergegeven is.

Om de afwijking te vinden wordt er gekeken naar de invloed van de parameters bij de drie berekeningsmethoden. Op de onderstaande tabel zijn deze weergegeven.

Tabel 137: Vergelijking invloed parameters

Invloed grootste parameter	EC 2 -1: Buiging	EC 2 -1: Trek	EC 2 -3: Trek
<b>Moment</b>	17,18 %	/	/
<b>Betondekking</b>	5,31 %	0 %	22,23 %
<b>Trekwapening</b>	5,80 %	10,71 %	5,68 %
<b>Hoogte</b>	3,75 %	4,72 %	0 %
<b>Betonkwaliteit</b>	2,62 %	10,56 %	6,14 %

Uit de tabel kan afgeleid worden dat bij de eerste berekeningsmethode het moment de grootste invloed heeft, bij de tweede methode de trekwapening en bij de derde berekening de betondekking. De laatste twee berekeningsmethoden zijn gebaseerd op trek en er ontstaat een afwijking bij de intervallen. De afwijking ontstaat door het toepassen van verschillende formules. Het grootste verschil in de berekening ontstaat door de variatie van de betondekking. Bij de tweede methode heeft deze parameter totaal geen invloed terwijl het bij de derde berekening een invloed heeft van ongeveer 22 %. Dit omdat de betondekking een direct verband heeft met de scheurafstand  $S_{r,max}$  bij de berekening van de scheurwijdte.

## 5.12. Vergelijking balken en platen

Nadat de drie berekeningsmethoden vergeleken zijn, kan de vergelijking van de balken en platen uitgevoerd worden. Op de onderstaande tabel zijn de intervallen te vinden voor beide doorsneden.

Tabel 138: Vergelijking intervallen

	Balk	Plaat	Vershil %
<b>EC 2 -1: Buiging</b>	[0,153 ; 0,537]	[0,000 ; 0,488]	4,9 %
<b>EC 2 -1: Trek</b>	[0,170 ; 0,494]	[0,174 ; 0,430]	6,4 %
<b>EC 2 -3: Trek</b>	[0,174 ; 0,629]	[0,134 ; 0,647]	-1,8 %

De tabel geeft duidelijk aan dat de intervallen voor de beide doorsneden anders zijn. Als er naar de maximale scheurwijdten gekeken wordt, is bij de eerste en tweede berekening de waarden van de balken groter dan die van de platen. Bij de eerste berekening verschillen de maximale waarden 4,9 % en bij de tweede 6,4 %. Alleen bij de derde berekening is de maximale scheurwijdte bij de plaat groter dan de scheurwijdte van de balk, het verschil bedraagt 1,8 %.

Tabel 139: Vergelijking gemiddelden

	Balk	Vershil EC2 - gemiddelde %	Plaat	Vershil EC2 - gemiddelde %
<b>EC 2 -1: Buiging</b>	0,312	1,2 %	0,303	0,3 %
<b>EC 2 -1: Trek</b>	0,316	1,6 %	0,292	-0,8 %
<b>EC 2 -3: Trek</b>	0,349	4,9 %	0,328	2,8 %

De bovenstaande tabel drukt de gemiddelde waarden uit en de gemiddelde scheurwijdten van de balken liggen hoger dan de gemiddelden van de platen.

Tabel 140: Vergelijking kans op scheur

	Kans % $w_k > 0,3$ Balk	Kans % $w_k > 0,3$ Plaat
<b>EC 2 -1: Buiging</b>	54 %	49,77 %
<b>EC 2 -1: Trek</b>	59,23 %	41,76 %
<b>EC 2 -3: Trek</b>	64,88 %	54,75 %

Aangezien de gemiddelde waarden van balken hoger zijn dan de platen, zal de kans op de scheur groter dan 0,3 mm bij de balken ook hoger zijn dan de platen. Bij paragraaf min-max vergelijking wordt aangehaald hoe groot de invloed van de parameters is op de scheurwijdte. Er wordt aangetoond dat de hoogte en de breedte een invloed hebben op de scheurwijdte, dit is terug te vinden in tabel 141. Als ze alleen variëren is de invloed niet zo groot. Maar bij paragraaf invloed gelijktijdigheid wordt de gelijktijdigheid van de verschillende parameters uitgelegd. Als de maximale hoogte van de balk bij doorbuiging, Eurocode 2 deel 1 optreedt met de maximale betondekking en minimale wapening kan de scheurwijdte van de balk oplopen tot 0,431 mm. Maar als er bij platen met doorbuiging, Eurocode 2 deel 1 een maximale hoogte voorkomt met de minimale wapening en de maximale betondekking wordt een scheurwijdte van 0,342 mm berekend.

Tabel 141: Vergelijking invloed van de parameters

	Hoogte balk	Hoogte plaat	Breedte balk	Breedte plaat
<b>EC 2 -1: Buiging</b>	2,05 %	3,57 %	0,79 %	0 %
<b>EC 2 -1: Trek</b>	1,84 %	4,72 %	6,23 %	0 %
<b>EC 2 -3: Trek</b>	0,9 %	0 %	4,32 %	0 %

In de tabel is de invloed van de hoogte en de breedte bij platen en balken weergegeven. De hoogte bij de platen ( $h \ll b$ ) heeft meer invloed op de scheurwijdte dan bij de balken. Bij de platen kan de breedte geen invloed hebben omdat de breedte niet varieert, er wordt gerekend per lopende meter. Dit is ook weergegeven in de tabel. Hieruit kan besloten worden dat de berekeningen van de scheurwijdten geometrieafhankelijk zijn.

### 5.13. Aanvaardingscriteria

Bij de aanvaardingscriteria moet er rekening gehouden worden met de reproduceerbaarheid van de berekeningen, de scheefheid van het histogram, de geometrie en de waarden van de range van de scheurwijdtes. Als eerst wordt de reproduceerbaarheid behandeld. De reproduceerbaarheid wordt nagekeken door de volledige berekening een tweede maal uit te voeren. Bij beide berekeningen wordt het minimum, het maximum, het gemiddelde en de standaarddeviatie bepaald. Als deze waarden overeenkomen zijn de berekeningen reproduceerbaar. Dit wil zeggen dat er bij een andere berekening dezelfde resultaten zullen verschijnen. Een voorbeeld van de reproduceerbaarheid voor een balk onder buiging is weergegeven in de onderstaande tabel. Bij deze tabel komen de vier berekende waarden overeen voor de twee berekeningen. Dit wil zeggen dat de berekening reproduceerbaar is. Voor de andere berekeningen van de balk en de plaat wordt er op dezelfde manier gewerkt. Alle berekeningen zijn reproduceerbaar. De vier berekende waarden komen overeen. Soms verschilt het minimum of maximum met 0,001 mm. Dit komt door de variatie op de inputwaarde die willekeurig wordt gekozen.

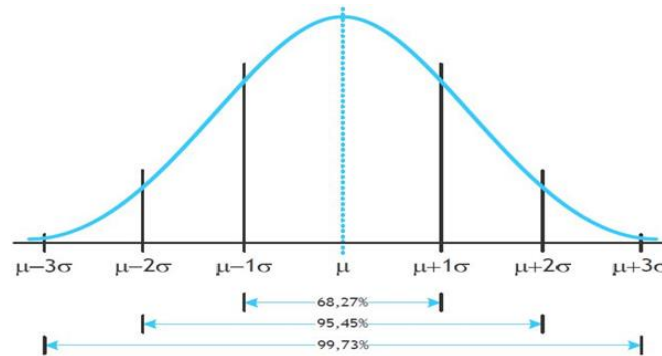
Tabel 142: Reproduceerbaarheid voor een balk bij buiging

	1 <sup>ste</sup> berekening	2 <sup>de</sup> berekening
<b>Minimum</b>	0,153	0,153
<b>Maximum</b>	0,537	0,537
<b>Gemiddelde</b>	0,312	0,312
<b>Standaarddeviatie</b>	0,063	0,063

Scheefheid wordt berekend door de scheefheidfactor te berekenen en naar het verschil tussen de mediaan en het gemiddelde te kijken. Als de mediaan groter is als het gemiddelde is de verdeling linksscheef en als de mediaan kleiner is als het gemiddelde is de verdeling rechtsscheef. Bij de scheefheidfactor is een positieve waarde rechtsscheef en een negatieve waarde linksscheef. Bij onze berekeningen is de scheefheid altijd naar rechts dit wil zeggen dat er meer waarde groter zijn dan het gemiddelde.

Naast de scheefheid van de waarden is het belangrijk om de geometrie aan te halen. Uit de studie blijkt dat er bij balken grotere scheuren voorkomen dan bij de platen, dit duidt aan de berekeningen van de scheurwijdten geometrieafhankelijk zijn. Dit is een punt dat meegenomen moet worden bij het opstellen van een criterium.

Daarnaast is bij paragraaf vergelijking balken en platen vermeld dat de variatie van de scheurwijdten zeer groot is. Dit kan geanalyseerd worden door de intervallen van de scheurwijdten te bestuderen. Omdat de variatie groot is, kan er geen specifiek getal voor scheurwijdte vastgesteld worden als een criterium, maar wel een interval. Om een criterium vast te stellen wordt rekening gehouden met de gemiddelde waarden, de standaarddeviatie en de verdeling. De standaarddeviatie geeft de variabiliteit aan in de verdeling. De verdelingen die voorkomen zijn goed normaal verdeeld. Daarbij worden de afwijkingen van de gemiddelden geanalyseerd, deze worden in de onderstaande grafiek en tabel weergegeven.



Figuur 98: Grafiek verdeling

Tabel 143: Gegevens verdeling balk

	Balk	$\sigma$	$\mu$	$\mu-\sigma$ en $\mu+\sigma$	$\mu-2\sigma$ en $\mu+2\sigma$
<b>EC 2 -1: Buiging</b>	[0,153; 0,537]	0,063	0,312	[0,249; 0,375]	[0,186; 0,438]
<b>EC 2 -1: Trek</b>	[0,170; 0,494]	0,056	0,316	[0,260; 0,372]	[0,204; 0,428]
<b>EC 2 -3: Trek</b>	[0,174; 0,629]	0,085	0,349	[0,264; 0,434]	[0,176; 0,519]

Tabel 144: Gegevens verdeling plaat

	Plaat	$\sigma$	$\mu$	$\mu-\sigma$ en $\mu+\sigma$	$\mu-2\sigma$ en $\mu+2\sigma$
<b>EC 2 -1: Buiging</b>	[0,000; 0,489]	0,057	0,303	[0,246; 0,360]	[0,189; 0,417]
<b>EC 2 -1: Trek</b>	[0,169; 0,433]	0,046	0,292	[0,246; 0,338]	[0,200; 0,384]
<b>EC 2 -3: Trek</b>	[0,132; 0,656]	0,109	0,327	[0,218; 0,436]	[0,109; 0,545]

Een vuistregel in de statistiek is dat ongeveer 68 % van het gebied onder de kromme ligt tussen  $\mu-\sigma$  en  $\mu+\sigma$  en dat ongeveer 95 % van het gebied ligt tussen  $\mu-2\sigma$  en  $\mu+2\sigma$ . Dit is ook op de bovenstaande grafiek weergegeven. In de bovenstaande tabellen is te zien dat een afwijking van het gemiddelde van 2 keer standaarddeviatie een groot interval vertoont waarbij de maximale scheurwijdten zeer groot zijn. Een afwijking van het gemiddelde van meer dan 2 keer de standaardafwijking is zeer zeldzaam (< 5%). Als er naar de afwijking van het gemiddelde van 1 keer standaarddeviatie gekeken wordt zijn de maximale scheurwijdten kleiner. Er wordt vastgesteld dat voor een criterium van scheurwijdte gelijk aan 0,30 mm een eenmalige afwijking van 1 standaarddeviatie aanvaardbaar is.



Bij het opstellen van een mogelijk criterium wordt er vooral gekeken naar scheuren die groter zijn dan de opgegeven waarde van 0,30 mm in Eurocode 2. Scheuren die kleiner zijn als 0,30 mm worden geaccepteerd. Zoals in de bovenstaande tekst wordt vermeld is een criterium geometrieafhankelijk. Het criterium wordt opgebouwd met de standaarddeviatie. Door het verschil in de standaarddeviatie van een plaat en een balk, verschilt het criterium voor beide doorsneden.

Eerst wordt er een algemeen criterium opgesteld dat gebruikt wordt. Daarna wordt het verder uitgewerkt voor de waarde die in deze masterproef zijn berekend voor een plaat en een balk. Het volgende criterium wordt toegepast:

- $w_{max} \leq w_k + l_1 * \sigma$
- $w_{i,gem} \leq w_k + l_3 * \sigma$

Dit criterium kan worden omgevormd naar vergelijking met alleen  $w_k$  omdat er in de berekening wordt gewerkt met een scheurwijdte van 0,30 mm. Als er een criterium voor een andere scheurwijdte moet worden opgesteld, moeten de berekeningen opnieuw worden gedaan en de standaarddeviatie worden bepaald. De volgende formules worden gebruikt om het criterium om te vormen:

- $\sigma = l_2 * w_k$
- $l_1 * l_2 = k_1$
- $l_2 * l_3 = k_2$
- $k_2 < k_1$

Hierbij wordt het algemene criterium:

- $w_{max} \leq w_k + k_1 * w_k$
- $w_{i,gem} \leq w_k + k_2 * w_k$

Hierbij is

- $w_{max}$  : De grootste scheurwijdte die de werf gemeten wordt
- $w_k$  : De scheurwijdte gelijk aan 0,30 uit Eurocode 2
- $\sigma$  : De standaarddeviatie
- $w_{i,gem}$  : De gemiddelde gemeten scheur op de werk
- $l_1$  en  $l_3$  : Zijn factoren die gekozen kunnen worden

Voor het aanvaardingscriterium wordt het gemiddelde van de standaarddeviatie van de verschillende berekeningen voor een balk en een plaat berekend. Deze waarden worden in het criterium gebruikt.

Tabel 145: Berekening gemiddelde standaarddeviatie

	Balk	Plaat
	$\sigma$	$\sigma$
<b>Buiging</b>	0,063	0,057
<b>Trek EC2-1</b>	0,056	0,045
<b>Trek EC2-3</b>	0,085	0,109
<b>Gemiddelde</b>	0,068	0,070

Na het berekenen van de gemiddelde standaarddeviatie kan de factor  $l_2$  worden uitgerekend. Deze waarde wordt uitgerekend met een scheurwijdte die gelijk is aan 0,30 mm. Hiervoor wordt de volgende formule gebruikt:

- $\sigma = l_2 * w_k \Rightarrow l_2 = \frac{\sigma}{w_k}$ 
  - $w_k = 0,30 \text{ mm}$
  - $\sigma_{balk} = 0,068 \text{ mm}$
  - $\sigma_{plaat} = 0,070 \text{ mm}$

Voor een balk is  $l_2$  gelijk aan 0,227 en voor een plaat 0,233. Daarna moet er nog een keuze worden gemaakt voor de waarde van  $l_1$  en  $l_3$ . Voor de factor van  $l_1$  wordt gekozen om 1,64 te gebruiken. Er wordt gekozen voor deze waarde omdat dit het 95% betrouwbaarheidsinterval is. Alle waarden die buiten het betrouwbaarheidsinterval liggen, worden niet geaccepteerd en komen zelden voor. Voor de waarde van  $l_3$  wordt er gekozen om 1 te gebruiken, de waarde verschilt dan 1 maal de standaarddeviatie.

- $k_{1,balk} = l_1 * l_{2,balk} = 1,64 * 0,227 = 0,372$
- $k_{1,plaat} = l_1 * l_{2,plaat} = 1,64 * 0,233 = 0,382$
- $k_{2,balk} = l_3 * l_{2,balk} = 1,0 * 0,227 = 0,227$
- $k_{2,plaat} = l_3 * l_{2,plaat} = 1,0 * 0,233 = 0,233$
- $w_k = 0,30 \text{ mm}$

Het gekozen criterium voor scheuren in een betonnen balk wordt:

- $w_{max} \leq 0,30 + 0,372 * 0,30$   
 $\Rightarrow w_{max} \leq 0,412$
- $w_{i,gem} \leq 0,30 + 0,227 * 0,30$   
 $\Rightarrow w_{i,gem} \leq 0,368$

Het gekozen criterium voor scheuren in een betonnen plaat wordt:

- $w_{max} \leq 0,30 + 0,382 * 0,30$   
 $\Rightarrow w_{max} \leq 0,415$
- $w_{i,gem} \leq 0,30 + 0,233 * 0,30$   
 $\Rightarrow w_{i,gem} \leq 0,370$

## 6. Besluit

Onze onderzoeksvraag is : indien de structuur correct ontworpen is met een karakteristieke waarde van de scheurwijdte in GGT-Q, wat is dan het interval van gemeten scheurwijdtes dat hier aan voldoet op de werf?. Er wordt een theoretisch onderzoek uitgevoerd naar een acceptatie interval  $[w_{min}, w_{max}]$ . Vertrekkend van de scheurwijdte,  $w_{max}, 0,30$  mm worden drie berekeningen voor de balk en de plaat uitgevoerd door de designwaarden in de Eurocode 2 als inputwaarden te gebruiken.

Er worden drie berekeningsmethoden gehanteerd: buiging volgens Eurocode 2 deel 1, trek volgens Eurocode 2 deel 1 en nogmaals trek volgens Eurocode 2 deel 3. Er wordt aangetoond dat de inputparameters kunnen variëren en ruis veroorzaken op de waarde van scheurwijdte. Op deze manier worden de drempelwaarden berekend. Ook al doet een ingenieur en een aannemer hun werk perfect volgens de voorschriften van Eurocode 2, de kans dat er een grotere scheurwijdte ontstaat dan de maximale scheurwijdte van 0,30 mm in Eurocode 2 bestaat. Dit wordt ook duidelijk gemaakt met de berekeningen.

Uit de vorige studies blijkt dat Eurocode 2 de berekende scheurwijdtes altijd onderschat. Deze studie toont aan dat er ook scheuren groter dan 0,30 mm kunnen voorkomen. De intervallen van de drie berekeningen van balken en platen geven bijna allemaal een maximale scheurwijdte groter dan 0,30 mm weer en de gemiddelden schommelen tussen 0,30 en 0,40 mm. Daarnaast wordt de invloed van de gelijktijdigheid van de parameters onderzocht door een combinatie met de grootste scheurwijdten te vormen. Zo wordt het duidelijk gemaakt of de extreme waarden van de simulatie realistisch zijn of niet. Uit de analyse blijkt dat de meeste extreme punten realistisch zijn. Er wordt ook vermeld dat er bij platen minder scheuren ontstaan dan de balken en er met de geometrie van de doorsneden rekening moet gehouden worden.

Voor het criteria wordt gebruik gemaakt van de standaarddeviatie. De volgende algemene formules worden gebruikt:

- $w_{max} \leq w_k + k_1 * w_k$
- $w_{i,gem} \leq w_k + k_2 * w_k$

Bij deze formules wordt  $k_1$  berekend door  $l_1$  te vermenigvuldigen met  $l_2$  en voor  $k_2$  wordt  $l_2$  vermenigvuldigd met  $l_3$ . De waarde van  $l_2$  wordt verkregen door de scheurwijdte te delen door de standaarddeviatie. De waarden voor  $l_1$  en  $l_3$  worden gekozen.  $l_1$  is hierbij gelijk aan 1,64 en  $l_3$  is gelijk aan 1.

- $w_{max,balk} \leq 0,412$
- $w_{i,gem,balk} \leq 0,368$
- $w_{max,plaat} \leq 0,415$
- $w_{i,gem,plaat} \leq 0,370$

Als er op de werf aan deze criteria wordt voldaan, dan zal er besloten worden of de scheurwijdten gekeurd of afgekeurd moeten worden. De inputparameters worden theoretisch benaderd. Een verder onderzoek zou kunnen zijn om de inputparameters statistisch te onderzoeken.



## Bibliografie

- [1] WTCB, „WTCB,” [Online]. Available:  
] <http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=bbri&sub=presentation>. [Geopend 5 oktober 2017].
- [2] M. V. D. BOSCH, „Architectura,” 28 april 2016. [Online]. Available:  
] <http://www.architectura.be/nl/nieuws/13697/wat-met-scheuren-in-beton>. [Geopend 29 september 2017].
- [3] Cement&BetonCentrum, „Cementbeton,” [Online]. Available:  
] <http://www.cementenbeton.nl/materiaal/betontechnologie/scheurvorming-in-jong-beton>. [Geopend 6 oktober 2017].
- [4] WTCB, „WTCB/Krimptypes,” 2 februari 2004. [Online]. Available:  
] <http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact2&art=20>. [Geopend 2 oktober 2017].
- [5] Joostdevree, „Joostdevree/Betoncorrosie,” [Online]. Available:  
] <http://www.joostdevree.nl/shtmls/betoncorrosie.shtml>. [Geopend 6 oktober 2017].
- [6] M. S. J. K. S. Lekshmi U, „ProQuest,” [Online]. Available: <https://search-proquest-com.bib-proxy.uhasselt.be/docview/1872251100?pq-origsite=summon>. [Geopend november 2017].
- [7] Febelcem, „Febelcem, scheurvorming,” [Online]. Available:  
] [http://www.febelcem.be/fileadmin/user\\_upload/dossiers-ciment-2008/nl/T3-NL-Scheurvorming.pdf](http://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-2008/nl/T3-NL-Scheurvorming.pdf).
- [8] Febelcem, *Krimp in jong verhardend beton*, p. 8.  
]
- [9] Febelcem, „Febelcem,” [Online]. Available:  
] [http://www.febelcem.be/fileadmin/user\\_upload/dossiers-ciment-94-08/nl/34\\_nl\\_prescription.pdf](http://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-94-08/nl/34_nl_prescription.pdf).
- [1] „TV 247 Ontwerp en uitvoering van vloeistofdichte betonconstructies,” 2012.  
0]
- [1] WTCB, „WTCB,” 2 februari 2004. [Online]. Available:  
1] <http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact2&art=20>. [Geopend 2 oktober 2017].
- [1] Febelcem, „CORROSIE VAN WAPENINGEN,” [Online]. Available:  
2] [http://www.febelcem.be/fileadmin/user\\_upload/dossiers-ciment-2008/nl/T1\\_NL\\_Corrosie.pdf](http://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-2008/nl/T1_NL_Corrosie.pdf). [Geopend 25 Oktober 2017].

- [1 Encyclo, „Encyclo,” [Online]. Available: <http://www.encyclo.nl/begrip/scheur>.  
3] [Geopend 8 november 2017].
- [1 Betonlexicon, „Betonlexicon,” [Online]. Available:  
4] <http://betonlexicon.nl/S/Scheurwijdte/>. [Geopend 2 oktober 2017].
- [1 N. E. 1992-1-1, „Eurocode 2,” februari 2005. [Online]. Available:  
5] <https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/readonly/261904?l=N>.  
[Geopend 09 25 2017].
- [1 N. E. 1992-3, „Eurocode 2- deel3,” november 2006. [Online]. Available:  
6] <https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/readonly/281177?l=E>.  
[Geopend donderdag november 2017].
- [1 E. 1.-3. NL, „NBN,” Bureau voor de normalisatie, 2011. [Online]. Available:  
7] <https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/readonly/391181?l=N>.  
[Geopend 2 10 2017].
- [1 N. E. 1992-4, „NBN ENV 1992-4,” 19 februari 1999. [Online]. Available:  
8] <https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/readonly/106701?l=N>.  
[Geopend 02 10 2017].
- [1 K. v. Breugel, Temperatuur- en krimpvervormingen, ENCI Media, 2006.  
9]
- [2 J. H. e. S. JOOSSEN, „Statistische evaluatie van scheurvorming in vloeistofdichte,”  
0] 2015.
- [2 M. webwinkel. [Online]. Available:  
1] <https://www.mijnwebwinkel.nl/winkel/scheurmeter/a-39094219/a500-scheurwijdte-meters-en-scheurlinialen/a501-scheurliniaal-transparant/>. [Geopend 5 oktober 2017].
- [2 O. Benor, „Tech,” 25 februari 2015. [Online]. Available: <http://www.ocab-ocbs.com/302n.pdf>. [Geopend 10 november 2017].
- [2 N. A. 24-302, „Staalprodukten bestonstaal,” december 1986. [Online]. Available:  
3] <https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/readonly/97171?l=N>.  
[Geopend 10 november 2017].
- [2 P. Baekeland, *Beton*.  
4]
- [2 N. E. 1. ANB, „Eurocode 0 - Grondslagen voor het constructief ontwerp - Nationale  
5] bijlage,” Bureau voor Normalisatie, Brussel, 2013.
- [2 NBN, „NBN EN 13791,” 2007. [Online]. Available:  
6] <https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/readonly/291393?l=E>.  
[Geopend 5 December 2017].

- [2 N. E. 13670, „Uitvoering van betonconstructie,“ 19 februari 2010. [Online].  
7] Available:  
<https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/readonly/341052?l=N>.  
[Geopend 10 november 2017].
- [2 T. L. A. L. & J. R. S. Yasir Alam, „framcos,“ [Online]. Available:  
8] <http://framcos.org/FraMCoS-8/p459.pdf>. [Geopend november 2017].
- [2 M. S. e. P. Smarzewski, „Numerical modeling of diagonal cracks in concrete beams,“  
9] archives of civil engineering, 2014.
- [3 P. T. V. Hippel, „Mean, Median and Skew: Correcting a Textbook Rule,“ Journal of  
0] Statistics Education , Columbus, USA, 2005.
- [3 [Online]. Available:  
1] [http://www.gloetzl.de/fileadmin/produkte/1%20Messwertaufnehmer/5%20Weg%20und%20Dehnung/P\\_64.02\\_Fissurometer\\_3D\\_de.pdf](http://www.gloetzl.de/fileadmin/produkte/1%20Messwertaufnehmer/5%20Weg%20und%20Dehnung/P_64.02_Fissurometer_3D_de.pdf). [Geopend 17 oktober 2017].
- [3 [Online]. Available:  
2] [http://www.sommer.at/en/component/contented\\_pdf?view=contented\\_pdf&layout=printpdfdirect&format=pdf&id=44](http://www.sommer.at/en/component/contented_pdf?view=contented_pdf&layout=printpdfdirect&format=pdf&id=44). [Geopend 17 oktober 2017].
- [3 N. B15-001, „NBN B 15-001,“ 2004. [Online]. Available:  
3] <https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/readonly/127544?l=N>.  
[Geopend 2 oktober 2017].





## Bijlage

### A. Scheurwijdte t.g.v. buiging

#### A.1. Matlab code

```
% Hoeveel keer de berekening moet worden uitgevoerd
N = 100000;

axes('Nextplot' , 'add');

for i = 1 : N

% Betondekking
c1 = 40 - 10;
c2 = 40 + ((600/210) + (275/21));
c = c1 + rand * (c2 - c1);

% Betonkwaliteit
fck = 26 + rand * (34-26);

% Breedte
b1 = 300 - ((300/50)+7);
b2 = 300 + ((300/50)+7);
b = b1 + rand * (b2 - b1);

% Hoogte
h1 = 600 - ((600/140)+(85/7));
h2 = 600 + ((600/140) + (85/7));
h = h1 + rand * (h2 - h1);

% Diameter beugels
qb1 = 10 * 0.955;
qb2 = 10 * 1.045;
qb = qb1 + rand * (qb2 - qb1);

% Diameter trekwapening
qs11 = 25 * 0.955;
qs12 = 25 * 1.045;
qs1 = qs11 + rand * (qs12 - qs11);

% Aantal staven trekwapening
ns1 = 2;

% Diameter drukwapening
qs21 = 14 * 0.955;
qs22 = 14 * 1.045;
qs2 = qs21 + rand * (qs22 - qs21);

% Aantal staven drukwapening
ns2 = 2;

% Kruipfactor
q1 = 0.8*1.5;
q2 = 1.4 * 1.5;
q = q1 + rand * (q2 - q1);

% Moment in GGT-Q
med = 96 * (10^6)+ rand * (144 * (10^6) - 96 * (10^6));
```

```

% Elasticiteitsmodulus staal
Es = 200000;

% Staalkwaliteit
fyk = 500;

% Gemiddelde waarde van de drukstrekte van beton
fcm = fck + 4 * rand * (12 - 4) ;

% Elasticiteitsmodulus beton
Ecm = 22000 * ((fcm/10)^0,3);

% Elasticiteitsmodulus
Ec = Ecm / (1 + q);

% Alpha
alpha = Es / Ec;

% Afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening As1
d1 = c + qb + (qs1/2);

% Afstand gedrukte rand tot zwaartepunt wapening As2
d2 = c + qb + (qs2/2);

% Nuttige hoogte
d = h - d1;

% Trekwapening
As1 = (pi * ns1 * (qs1^2))/4;

% Drukwapening
As2 = (pi * ns2 * (qs2^2))/4;

% Totale wapening
Astot = As1 + As2;

% Drukhoogte
x = ((-alpha * Astot)/b) +
sqrt(((alpha * Astot/b)^2) + ((2 * alpha * (As1 * d + As2 * d2))/b));

% Betondrukhoogte
sigmac = (med * x) / (((b * (x^3))/3) + alpha * ((As1 * ((d-x)^2)) + (As2 *
((x - d2)^2))));

% Staaldrukhoogte 1
sigmas1 = alpha * sigmac * (d-x)/x;

% Staaldrukhoogte 2
sigmas2 = alpha * sigmac * (x - d2)/ x;

% Scheurmoment
fctm = 0,3 * (fck ^ (2/3));

% Betondrukhoogte 2
x2 = (((b * (h^2))/2) + alpha * (As1 * d + As2 * d2)) / (As1 * alpha + As2 *
alpha + b * h);

```

```

% Traagheidsmoment
I = ((b*(x2^3)/3)) + (b* ((h - x2)^3))/3+ alpha * As1*((d-x2)^2)+ alpha *
As2*((x2-d2)^2);

% Berekening voor scheurmoment
v = h - x2;
W = I / v;

% Scheurmoment
Mcr = W * fctm;

% Effectieve doorsnede
h1 = (h-x)/3;
h2 = 2.5*(h-d);
h3 = h/2;
H = [h1 h2 h3];
Aceff = b*min(H);

% Effectieve Rho
rhoeff = As1/Aceff;

% Sr max
Srmax1 = 3.4 * c + 0.17* qs1 / rhoeff;
Srmax2 = 1.3 * (h - x);
Srmax = min(Srmax1 , Srmax2);

% Epsilon
epsilon1 = 0.6*sigmas1/200000;
epsilon2 = (sigmas1 / 200000)-(0.4*fctm*(1+alpha*rhoeff)/(rhoeff*200000));
epsilon = max(epsilon1,epsilon2);

% Scheurwijdte
wk = Srmax*epsilon;
if Mcr < med
    wk = wk;
elseif Mcr > med
    wk = 0;
end

if x > d2
    wk = wk
elseif x < d2
    wk = 0
end

% Grafiek
plot(wk,i,'.')
end

xlabel('scheurwijdte')
title('Scheurwijdte')

```

## A.2. Controle scheurwijdte t.g.v. buiging

### A.2.1. Excel

#### A.2.1.1. Balk BM1

**BALKEN DUBBEL GEWAPEND GGT**

NBN EN 1992-1-1 ANB 2010

versie 2

geldig tot

Taal : NL

grenstoestand

GGT Q

= in te vullen

minimum betondekking voor de scheurwijdte

betonkwaliteit

gemiddelde waarde druksterkte beton

kruihfactor

staalkwaliteit

elasticiteitsmodulus staal

elasticiteitsmodulus beton

hoogte van de doorsnede

breedte van de doorsnede

afstand getrokken rand tot zwpt wap As1

afstand gedrukte rand tot zwpt wap As2

nuttige hoogte

Moment in GGT-Q

afstand tussen staven kleiner dan (\*)

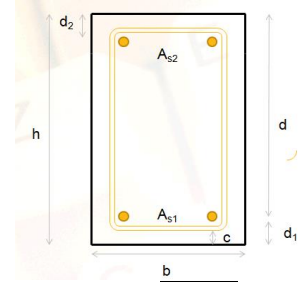
trekwapening

drukwapening

$f_{ck}$	40	mm
$f_{cm}$	30	N/mm <sup>2</sup>
$\varphi$	38	
$f_{yk}$	500	N/mm <sup>2</sup>
$E_s$	200000	N/mm <sup>2</sup>
$E_{cm}$	32837	N/mm <sup>2</sup>
$h$	600	mm
$b$	300	mm
$d_1$	60,0	mm
$d_2$	55,0	mm
$d$	540,0	mm
$M_d$	90	kNm
	250	mm
$A_{s1}$	942	mm <sup>2</sup>
$A_{s2}$	157	mm <sup>2</sup>

$$f_{cm} := f_{ck} + 8$$

$$E_{cm} := 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.30}$$



toelaatbare drukspanning in het beton

toelaatbare trekspanning in het staal

afstand tussen de staven hoh

$\phi_{s1}$

$\phi_{s2}$

$Q_m$

$b$	13,5	N/mm <sup>2</sup>
	400,0	N/mm <sup>2</sup>
	90	mm

$\eta_1$	3,00
$\eta_2$	2,00

$Q_p$	1	kN
-------	---	----

mm, mm<sup>2</sup>, kNm, MPa

$$k := \frac{Q_p}{Q_m + Q_p}$$

$$E_c := \frac{E_{cm}}{1 + k \cdot \varphi}$$

$$\alpha := \frac{E_s}{E_c}$$

$k$  1

$E_c$  10946 N/mm<sup>2</sup>

$\alpha$  18,2723

$$x = \frac{-\alpha \cdot (A_{s1} + A_{s2})}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha \cdot (A_{s1} + A_{s2})}{b}\right)^2 + \frac{2 \cdot \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{b}}$$

betondrukhoogte

$$\sigma_c = \frac{M_{sd} \cdot x}{\frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha \cdot [A_{s1} \cdot (d - x)^2 + A_{s2} \cdot (x - d_2)^2]}$$

$$\sigma_{s1} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(d - x)}{x}$$

$$\sigma_{s2} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(x - d_2)}{x}$$

bepalen van het scheurmoment (ongescheurde sectie)

$$x = \frac{\frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{A_{s1} \cdot \alpha + A_{s2} \cdot \alpha + b \cdot h}$$

$$I_1 = \frac{b \cdot x^3}{3} + \frac{b \cdot (h - x)^3}{3} + \alpha \cdot A_{s1} \cdot (d - x)^2 + \alpha \cdot A_{s2} \cdot (x - d_2)^2$$

$x$	192,902	mm	>?	55
$\sigma_c$	6,1	N/mm <sup>2</sup>	<?	13,5
$\sigma_{s1}$	200	N/mm <sup>2</sup>	<?	400
$\sigma_{s2}$	80	N/mm <sup>2</sup>	<?	400
$f_{ctm}$	2,896	N/mm <sup>2</sup>		
$x$	317	mm		
$I_1$	6,50543E+09	mm <sup>4</sup>		

$$v = h - x$$

$$W = \frac{I}{v}$$

$$f_{ctm} = \frac{M_{cr}}{W}$$

$$\frac{(h-x)^3}{3}$$

$$2,5 \cdot (h-d)$$

$$h/2$$

korte termijn 0,6 / lange termijn 0,4

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

ruw = 0,8 ; glad = 1,6  
buiging = 0,5 ; trek = 1,0

$$S_{r,max} = k_3 C + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$$

keuze (\*)

$$w_k = S_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

v 283 mm

W 2,29989E+07 mm<sup>3</sup>

M<sub>cr</sub> 67 kNm

h<sub>1</sub> 136 mm

h<sub>2</sub> 150 mm

h<sub>3</sub> 300 mm

A<sub>ceff</sub> 40710 mm min (bh<sub>1</sub>, bh<sub>2</sub>, bh<sub>3</sub>)

$\frac{A_s}{A_{c,eff}}$  ρ<sub>p,eff</sub> 0,02

k<sub>t</sub> 0,4

$0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$  6,014E-04

6,463E-04

k<sub>1</sub> 0,80

k<sub>2</sub> 0,5

k<sub>3</sub> 3,4

k<sub>4</sub> 0,425

1,3 (h-x) 529

S<sub>r,max</sub> 283 mm

283

w<sub>k</sub> 0,1828 mm

<?

M<sub>d</sub>

90

### A.2.1.2. Balk BM2

#### BALKEN DUBBEL GEWAPEND GGT

NBN EN 1992-1-1 ANB 2010

versie 2

grenstoestand

GGT Q

= in te vullen

geldig tot

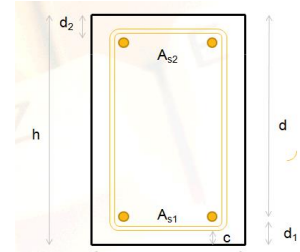
Taal :

minimum betondekking voor de scheurwijdte  
 betonkwaliteit  
 gemiddelde waarde druksterkte beton  
 kruipfactor  
 staalkwaliteit  
 elasticiteitsmodulus staal  
 elasticiteitsmodulus beton  
 hoogte van de doorsnede  
 breedte van de doorsnede  
 afstand getrokken rand tot zwpt wap As1  
 afstand gedrukte rand tot zwpt wap As2  
 nuttige hoogte  
 Moment in GGT- Q  
 afstand tussen staven kleiner dan (\*)  
 trekwapening  
 drukwapening

|                 |                                |                   |
|-----------------|--------------------------------|-------------------|
| f <sub>ck</sub> | 40                             | N/mm <sup>2</sup> |
| f <sub>cm</sub> | 30                             | N/mm <sup>2</sup> |
| φ               | 2                              |                   |
| f <sub>yk</sub> | 500                            | N/mm <sup>2</sup> |
| E <sub>s</sub>  | 200000                         | N/mm <sup>2</sup> |
| E <sub>cm</sub> | 32837                          | N/mm <sup>2</sup> |
| h               | 600                            | mm                |
| b               | 300                            | mm                |
| d <sub>1</sub>  | 60,0                           | mm                |
| d <sub>2</sub>  | 55,0                           | mm                |
| d               | 540,0                          | mm                |
| M <sub>d</sub>  | 60                             | kNm               |
|                 | 250                            | mm                |
| A <sub>s1</sub> | 942                            | mm <sup>2</sup>   |
| A <sub>s2</sub> | 157                            | mm <sup>2</sup>   |
| k               | <input type="text" value="1"/> |                   |
| E <sub>c</sub>  | 10946                          | N/mm <sup>2</sup> |
| α               | 18.27                          |                   |

$$f_{cm} := f_{ck} + 8$$

$$E_{cm} := 22000 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.30}$$



toelaatbare drukspanning in het beton

toelaatbare trekspanning in het staal  
 afstand tussen de staven hoh

|   |       |                   |
|---|-------|-------------------|
| b | 13,5  | N/mm <sup>2</sup> |
|   | 400,0 | N/mm <sup>2</sup> |
|   | 90    | mm                |

|                 |                                |                 |                                |                |      |                |      |
|-----------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|------|----------------|------|
| φ <sub>s1</sub> | 20                             | φ <sub>s2</sub> | 10                             | ρ <sub>1</sub> | 3,00 | ρ <sub>2</sub> | 2,00 |
| Q <sub>m</sub>  | <input type="text" value="0"/> | Q <sub>p</sub>  | <input type="text" value="1"/> | kN             |      |                |      |

$$k := \frac{Q_p}{Q_m + Q_p}$$

$$E_c := \frac{E_{cm}}{1 + k \cdot \varphi}$$

$$\alpha := \frac{E_s}{E_c}$$

mm, mm<sup>2</sup>, kNm, MPa

$$x = \frac{-\alpha(A_{s1} + A_{s2})}{b} + \sqrt{\left( \frac{\alpha(A_{s1} + A_{s2})}{b} \right)^2 + \frac{2\alpha(A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{b}}$$

betondrukhoogte

$$\sigma_c = \frac{M_{sd} x}{\frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha [A_{s1} \cdot (d-x)^2 + A_{s2} \cdot (x-d_2)^2]}$$

$$\sigma_{s1} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(d-x)}{x}$$

$$\sigma_{s2} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(x-d_2)}{x}$$

epalen van het scheurmoment (ongescheurde sectie

$$x = \frac{\frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{A_{s1} \cdot \alpha + A_{s2} \cdot \alpha + b \cdot h}$$

$$I_1 = \frac{b \cdot x^3}{3} + \frac{b \cdot (h-x)^3}{3} + \alpha \cdot A_{s1} \cdot (d-x)^2 + \alpha \cdot A_{s2} \cdot (x-d_2)^2$$

|                  |             |                   |    |      |
|------------------|-------------|-------------------|----|------|
| x                | 193         | mm                | >? | 55   |
| σ <sub>c</sub>   | 4,1         | N/mm <sup>2</sup> | <? | 13,5 |
| σ <sub>s1</sub>  | 134         | N/mm <sup>2</sup> | <? | 400  |
| σ <sub>s2</sub>  | 53          | N/mm <sup>2</sup> | <? | 400  |
| f <sub>ctm</sub> | 2,896       | N/mm <sup>2</sup> |    |      |
| x                | 317         | mm                |    |      |
| I <sub>1</sub>   | 6,50543E+09 | mm <sup>4</sup>   |    |      |

$$v = h - x$$

$$W = \frac{I}{v}$$

$$f_{ctm} = \frac{M_{cr}}{W}$$

$$\frac{(h-x)^3}{3}$$

$$2,5 \cdot (h-d)$$

$$h/2$$

korte termijn 0,6 / lange termijn 0,4

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

ruw = 0,8 ; glad = 1,6  
 buiging = 0,5 ; trek = 1,0

$$S_{r,max} = k_3 C + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$$

keuze (\*)

$$w_k = S_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

|                                       |             |                 |  |
|---------------------------------------|-------------|-----------------|--|
| v                                     | 283         | mm              |  |
| W                                     | 2,29989E+07 | mm <sup>3</sup> |  |
| M <sub>cr</sub>                       | 67          | kNm             | <? M <sub>d</sub> 60                                       |
| h <sub>1</sub>                        | 136         | mm              |  |
| h <sub>2</sub>                        | 150         | mm              |  |
| h <sub>3</sub>                        | 300         | mm              |  |
| A <sub>ceff</sub>                     | 40710       | mm              | min (bh <sub>1</sub> , bh <sub>2</sub> , bh <sub>3</sub> ) |
| $\frac{A_s}{A_{c,eff}}$               | 0,02        | $\rho_{peff}$   |  |
| k <sub>t</sub>                        | 0,4         |                 |  |
| $0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$            | 4,010E-04   |                 |  |
| $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ | 4,010E-04   |                 |  |
| k <sub>1</sub>                        | 0,80        |                 |  |
| k <sub>2</sub>                        | 0,5         |                 |  |
| k <sub>3</sub>                        | 3,4         |                 |  |
| k <sub>4</sub>                        | 0,425       |                 |  |
| 1,3 (h-x)                             | 529         |                 |  |
| S <sub>r,max</sub>                    | 283         | mm              |  |
|                                       | 283         |                 |  |
| w <sub>k</sub>                        | /           | mm              | Niet gescheurd   |

### A.2.1.3. Balk BM3

#### BALKEN DUBBEL GEWAPEND GGT

NBN EN 1992-1-1 ANB 2010

versie 2

grenstoestand

GGT Q

= in te vullen

geldig tot

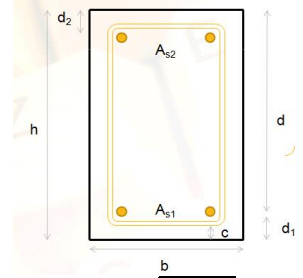
Taal :

minimum betondekking voor de scheurwijdte  
 betonkwaliteit  
 gemiddelde waarde druksterkte beton  
 kruipfactor  
 staalkwaliteit  
 elasticiteitsmodulus staal  
 elasticiteitsmodulus beton  
 hoogte van de doorsnede  
 breedte van de doorsnede  
 afstand getrokken rand tot zwpt wap As1  
 afstand gedrukte rand tot zwpt wap As2  
 nuttige hoogte  
 Moment in GGT- Q  
 afstand tussen staven kleiner dan (\*)  
 trekwapening  
 drukwapening

|                 |                                |                   |
|-----------------|--------------------------------|-------------------|
| f <sub>ck</sub> | 30                             | mm                |
| f <sub>cm</sub> | 50                             | N/mm <sup>2</sup> |
| f <sub>yk</sub> | 58                             | N/mm <sup>2</sup> |
| φ               | 2                              |                   |
| f <sub>yk</sub> | 500                            | N/mm <sup>2</sup> |
| E <sub>s</sub>  | 200000                         | N/mm <sup>2</sup> |
| E <sub>cm</sub> | 37278                          | N/mm <sup>2</sup> |
| h               | 300                            | mm                |
| b               | 1000                           | mm                |
| d <sub>1</sub>  | 36,0                           | mm                |
| d <sub>2</sub>  | 35,0                           | mm                |
| d               | 264,0                          | mm                |
| M <sub>d</sub>  | 100                            | kNm               |
| A <sub>s1</sub> | 1131                           | mm <sup>2</sup>   |
| A <sub>s2</sub> | 785                            | mm <sup>2</sup>   |
| k               | <input type="text" value="1"/> |                   |
| E <sub>c</sub>  | 12426                          | N/mm <sup>2</sup> |
| α               | 16,10                          |                   |

$$f_{cm} := f_{ck} + 8$$

$$E_{cm} := 22000 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,30}$$



toelaatbare drukspanning in het beton  N/mm<sup>2</sup>  
 toelaatbare trekspanning in het staal  N/mm<sup>2</sup>  
 afstand tussen de staven hoh  mm

|                 |                                 |                |                                    |
|-----------------|---------------------------------|----------------|------------------------------------|
| φ <sub>s1</sub> | <input type="text" value="12"/> | η <sub>1</sub> | <input type="text" value="10,00"/> |
| φ <sub>s2</sub> | <input type="text" value="10"/> | η <sub>2</sub> | <input type="text" value="10,00"/> |
| Q <sub>m</sub>  | <input type="text" value="0"/>  | Q <sub>p</sub> | <input type="text" value="1"/> kN  |

$$k := \frac{Q_p}{Q_m + Q_p}$$

$$E_c := \frac{E_{cm}}{1 + k \cdot \varphi}$$

$$\alpha := \frac{E_s}{E_c}$$

mm, mm<sup>2</sup>, kNm, MPa

$$x = \frac{-\alpha(A_{s1} + A_{s2}) + \sqrt{\left(\frac{\alpha(A_{s1} + A_{s2})}{b}\right)^2 + \frac{2\alpha(A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{b}}}{1}$$

|  |                  |  |                   |    |                                   |
|--|------------------|--|-------------------|----|-----------------------------------|
| betondrukhoogte  | x                | <input type="text" value="76"/>          | mm                | >? | <input type="text" value="35"/>   |
| $\sigma_c = \frac{M_{sd} x}{\frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha [A_{s1} \cdot (d-x)^2 + A_{s2} \cdot (x-d_2)^2]}$                                 | σ <sub>c</sub>   | <input type="text" value="9,4"/>         | N/mm <sup>2</sup> | <? | <input type="text" value="22,5"/> |
| $\sigma_{s1} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(d-x)}{x}$  | σ <sub>s1</sub>  | <input type="text" value="373"/>         | N/mm <sup>2</sup> | <? | <input type="text" value="400"/>  |
| $\sigma_{s2} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(x-d_2)}{x}$  | σ <sub>s2</sub>  | <input type="text" value="82"/>          | N/mm <sup>2</sup> | <? | <input type="text" value="400"/>  |
| oepalen van het scheurmoment (ongescheurde sectie)   | f <sub>ctm</sub> | <input type="text" value="4,072"/>       | N/mm <sup>2</sup> |    |                                   |
| $x = \frac{\frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{A_{s1} \cdot \alpha + A_{s2} \cdot \alpha + b \cdot h}$ | x                | <input type="text" value="152"/>         | mm                |    |                                   |
| $I_1 = \frac{b \cdot x^3}{3} + \frac{b \cdot (h-x)^3}{3} + \alpha \cdot A_{s1} \cdot (d-x)^2 + \alpha \cdot A_{s2} \cdot (x-d_2)^2$          | I                | <input type="text" value="2,65258E+09"/> | mm <sup>4</sup>   |    |                                   |



$$v = h - x$$

$$W = \frac{I}{v}$$

$$f_{ctm} = \frac{M_{cr}}{W}$$

$$\frac{(h-x)^3}{3}$$

$$2,5 \cdot (h-d)$$

$$h/2$$

korte termijn 0,6 / lange termijn 0,4

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

ruw = 0,8 ; glad = 1,6  
 buiging = 0,5 ; trek = 1,0

$$S_{r,max} = k_3 C + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$$

keuze (\*)

$$w_k = S_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

|                            |             |                 |  |
|----------------------------|-------------|-----------------|--|
| v                          | 148         | mm              |  |
| W                          | 1,79082E+07 | mm <sup>3</sup> |  |
| M <sub>cr</sub>            | 73          | kNm             | <? M <sub>d</sub> 100                                      |
| h <sub>1</sub>             | 75          | mm              |  |
| h <sub>2</sub>             | 90          | mm              |  |
| h <sub>3</sub>             | 150         | mm              |  |
| A <sub>ceff</sub>          | 74617       | mm              | min (bh <sub>1</sub> , bh <sub>2</sub> , bh <sub>3</sub> ) |
| $\frac{A_s}{A_{c,eff}}$    | 0,02        | $\rho_{p,eff}$  |  |
| k <sub>t</sub>             | 0,4         |                 |  |
| $0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$ | 1,119E-03   |                 |  |
|                            | 1,196E-03   |                 |  |
| k <sub>1</sub>             | 0,80        |                 |  |
| k <sub>2</sub>             | 0,5         |                 |  |
| k <sub>3</sub>             | 3,4         |                 |  |
| k <sub>4</sub>             | 0,425       |                 |  |
| 1,3 (h-x)                  | 291         |                 |  |
| S <sub>r,max</sub>         | 237         | mm              |  |
|                            | 237         |                 |  |
| w <sub>k</sub>             | 0,2829      | mm              |  |

## A.2.2. Berekening met de hand

### A.2.2.1. Balk BM1

Tabel 146: Inputwaarde balk BM1

|                                   | Afkorting   | Waarde                   |
|-----------------------------------|-------------|--------------------------|
| <b>Betondekking</b>               | c           | 40 mm                    |
| <b>Betonsterkte</b>               | $f_{ck}$    | 30 N/mm <sup>2</sup>     |
| <b>Kruip coëfficiënt</b>          | $\varphi$   | 2                        |
| <b>Hoogte</b>                     | h           | 600 mm                   |
| <b>Breedte</b>                    | b           | 300 mm                   |
| <b>Diameter beugel</b>            | $\Phi_b$    | 10 mm                    |
| <b>Trekwapening</b>               | $\Phi_{s1}$ | 20 mm                    |
| <b>Aantal trekstaven</b>          | $n_{s1}$    | 3                        |
| <b>Drukwapening</b>               | $\Phi_{s2}$ | 10 mm                    |
| <b>Aantal drukstaven</b>          | $n_{s2}$    | 2                        |
| <b>Buigmoment SLS-Q</b>           | $M_{Ed}$    | 90 kNm                   |
| <b>Elasticiteitsmodulus staal</b> | $E_s$       | 200000 N/mm <sup>2</sup> |
| <b>Staalsterkte</b>               | $f_{yk}$    | 500 N/mm <sup>2</sup>    |

- $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 30 + 8 = 38 \frac{N}{mm^2}$
- $E_{cm} = 22000 * (\frac{f_{cm}}{10})^{0,3} = 22000 * (\frac{38}{10})^{0,3} = 32836.57 \frac{N}{mm^2}$
- $E_c = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi} = \frac{32836.57}{1 + 2} = 10946 \frac{N}{mm^2}$
- $\alpha = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{10946} = 18.27$
- $d_1 = c + \phi_b + \frac{\phi_{s1}}{2} = 40 + 10 + \frac{20}{2} = 60 \text{ mm}$
- $d_2 = c + \phi_b + \frac{\phi_{s2}}{2} = 40 + 10 + \frac{10}{2} = 55.00 \text{ mm}$
- $d = h - d_1 = 600 - 60 = 540 \text{ mm}$
- $A_{s1} = \pi * n_{s1} * \frac{\phi_{s1}^2}{4} = \pi * 3 * \frac{20^2}{4} = 942 \text{ mm}^2$
- $A_{s2} = \pi * n_{s2} * \frac{\phi_{s2}^2}{4} = \pi * 2 * \frac{10^2}{4} = 157 \text{ mm}^2$
- $A_{stot} = A_{s1} + A_{s2} = 942 + 157 = 1100 \text{ mm}^2$
- $x = \frac{-\alpha * A_{stot}}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha * A_{stot}}{b}\right)^2 + \frac{2 * \alpha * (A_{s1} * d + A_{s2} * d_2)}{b}} = \frac{-18.27 * 1100}{300} + \sqrt{\left(\frac{18.27 * 1100}{300}\right)^2 + \frac{2 * 18.27 * (942 * 540 + 157 * 55)}{300}} = 192.902 \text{ mm}$
- $\sigma_c = \frac{M_{ed} * x}{\frac{b * x^3}{3} + \alpha * (A_{s1} * (d - x)^2 + A_{s2} * (x - d_2)^2)} = \frac{90 * 10^6 * 192.902}{\frac{300 * 192.902^3}{3} + 18.27 * (942 * (540 - 192.902)^2 + 157 * (192.902 - 55)^2)} = 6.1 \frac{N}{mm^2}$
- $\sigma_{s1} = \frac{\alpha * \sigma_c * (d - x)}{x} = \frac{18.27 * 6.1 * (540 - 192.902)}{192.902} = 200 \frac{N}{mm^2}$

- $\sigma_{s2} = \frac{\alpha \cdot \sigma_c \cdot (x - d_2)}{x} = \frac{18.27 \cdot 6.1 \cdot (192.902 - 55.00)}{192.902} = 80 \frac{N}{mm^2}$
- $f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 0,3 * 30^{\frac{2}{3}} = 2.896 \frac{N}{mm^2}$
- $x_2 = \frac{\frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{A_{s1} \cdot \alpha + A_{s2} \cdot \alpha + b \cdot h} = \frac{\frac{300 \cdot 600^2}{2} + 18.27 \cdot (942 \cdot 540 + 157 \cdot 55.00)}{942 \cdot 18.27 + 157 \cdot 18.27 + 300 \cdot 600} = 317 \text{ mm}$
- $I = \frac{b \cdot x^3}{3} + \frac{b \cdot (h-x)^3}{3} + \alpha \cdot (A_{s1} \cdot (d-x)^2 + A_{s2} \cdot (x-d_2)^2) = \frac{300 \cdot 317^3}{3} + \frac{300 \cdot (600-317)^3}{3} + 18.27 \cdot (942 \cdot (540-317)^2 + 157 \cdot (317-55.00)^2) = 6.505 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$
- $v = h - x_2 = 600 - 317 = 283 \text{ mm}$
- $W = \frac{I}{v} = \frac{6.505 \cdot 10^9}{282} = 2.2998 \cdot 10^7$
- $M_{cr} = W \cdot f_{ctm} = 2.2998 \cdot 10^7 \cdot 2.896 = 67 \text{ kNm}$
- $A_{ceff} = b \cdot \min\left(\frac{h-x}{3}; 2.5 \cdot (h-d); \frac{h}{2}\right) = 300 \cdot \min\left(\frac{600-192.902}{3}; 2.5 \cdot (600-540); \frac{600}{2}\right) = 300 \cdot \min(136; 150; 300) = 300 \cdot 136 = 40710 \text{ mm}^2$
- $\rho_{eff} = \frac{A_{s1}}{A_{ceff}} = \frac{942}{40710} = 0.02$
- $S_{rmax} = \min\left(3.4 \cdot c + 0.17 \cdot \frac{\phi_{s1}}{\rho_{eff}}; 1.3 \cdot (h-x)\right) = \min\left(3.4 \cdot 40 + 0.17 \cdot \frac{20}{0.02}; 1.3 \cdot (600 - 192.902)\right) = \min(283; 529) = 283 \text{ mm}$
- $(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = \max\left(\frac{0.6 \cdot \sigma_c}{200000}; \frac{\sigma_c}{200000} - 0.4 \cdot f_{ctm} \cdot \frac{1 + \alpha \cdot \rho_{eff}}{\rho_{eff} \cdot 200000}\right) = \max\left(\frac{0.6 \cdot 6.1}{200000}; \frac{6.1}{200000} - 0.4 \cdot 2.896 \cdot \frac{1 + 18.27 \cdot 0.02}{0.02 \cdot 200000}\right) = \max(6.014 \cdot 10^{-4}; 6.4363 \cdot 10^{-4}) = 6.4363 \cdot 10^{-4}$
- $w_k = S_{rmax} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = 283 \cdot 6.4363 \cdot 10^{-4} = 0.1828 \text{ mm}$

#### A.2.2.2. Balk BM2

Tabel 147: Inputwaarde balk BM2

|                                   | Afkorting       | Waarde                   |
|-----------------------------------|-----------------|--------------------------|
| <b>Betondekking</b>               | c               | 40 mm                    |
| <b>Betonsterkte</b>               | f <sub>ck</sub> | 30 N/mm <sup>2</sup>     |
| <b>Kruip coëfficiënt</b>          | φ               | 2                        |
| <b>Hoogte</b>                     | h               | 600 mm                   |
| <b>Breedte</b>                    | b               | 300 mm                   |
| <b>Diameter beugel</b>            | Φ <sub>b</sub>  | 10 mm                    |
| <b>Trekwapening</b>               | Φ <sub>s1</sub> | 20 mm                    |
| <b>Aantal trekstaven</b>          | n <sub>s1</sub> | 3                        |
| <b>Drukwapening</b>               | Φ <sub>s2</sub> | 10 mm                    |
| <b>Aantal drukstaven</b>          | n <sub>s2</sub> | 2                        |
| <b>Buigmoment SLS-Q</b>           | M <sub>Ed</sub> | 60 kNm                   |
| <b>Elasticiteitsmodulus staal</b> | E <sub>s</sub>  | 200000 N/mm <sup>2</sup> |
| <b>Staalsterkte</b>               | f <sub>yk</sub> | 500 N/mm <sup>2</sup>    |

- $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 30 + 8 = 38 \frac{N}{mm^2}$

- $E_{cm} = 22000 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} = 22000 * \left(\frac{38}{10}\right)^{0,3} = 32836.57 \frac{N}{mm^2}$
- $E_c = \frac{E_{cm}}{1+\varphi} = \frac{32836.57}{1+2} = 10946 \frac{N}{mm^2}$
- $\alpha = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{10946} = 18.27$
- $d_1 = c + \phi_b + \frac{\phi_{s1}}{2} = 40 + 10 + \frac{20}{2} = 60 \text{ mm}$
- $d_2 = c + \phi_b + \frac{\phi_{s2}}{2} = 40 + 10 + \frac{10}{2} = 55.00 \text{ mm}$
- $d = h - d_1 = 600 - 60 = 540 \text{ mm}$
- $A_{s1} = \pi * n_{s1} * \frac{\phi_{s1}^2}{4} = \pi * 3 * \frac{20^2}{4} = 942 \text{ mm}^2$
- $A_{s2} = \pi * n_{s2} * \frac{\phi_{s2}^2}{4} = \pi * 2 * \frac{10^2}{4} = 157 \text{ mm}^2$
- $A_{stot} = A_{s1} + A_{s2} = 942 + 157 = 1100 \text{ mm}^2$
- $x = \frac{-\alpha * A_{stot}}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha * A_{stot}}{b}\right)^2 + \frac{2 * \alpha * (A_{s1} * d + A_{s2} * d_2)}{b}} = \frac{-18.27 * 1100}{300} + \sqrt{\left(\frac{18.27 * 1100}{300}\right)^2 + \frac{2 * 18.27 * (942 * 540 + 157 * 55)}{300}} = 192.902 \text{ mm}$
- $\sigma_c = \frac{M_{ed} * x}{\frac{b * x^3}{3} + \alpha * (A_{s1} * (d-x)^2 + A_{s2} * (x-d_2)^2)} = \frac{60 * 10^6 * 192.902}{\frac{300 * 192.902^3}{3} + 18.27 * (942 * (540 - 192.902)^2 + 157 * (192.902 - 55)^2)} = 4.1 \frac{N}{mm^2}$
- $\sigma_{s1} = \frac{\alpha * \sigma_c * (d-x)}{x} = \frac{18.27 * 4.1 * (540 - 192.902)}{192.902} = 134 \frac{N}{mm^2}$
- $\sigma_{s2} = \frac{\alpha * \sigma_c * (x-d_2)}{x} = \frac{18.27 * 4.1 * (192.902 - 55.00)}{192.902} = 53 \frac{N}{mm^2}$
- $f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 0,3 * 30^{\frac{2}{3}} = 2.896 \frac{N}{mm^2}$
- $x_2 = \frac{\frac{b * h^2}{2} + \alpha * (A_{s1} * d + A_{s2} * d_2)}{A_{s1} * \alpha + A_{s2} * \alpha + b * h} = \frac{\frac{300 * 600^2}{2} + 18.27 * (942 * 540 + 157 * 55.00)}{942 * 18.27 + 157 * 18.27 + 300 * 600} = 317 \text{ mm}$
- $I = \frac{b * x^3}{3} + \frac{b * (h-x)^3}{3} + \alpha * (A_{s1} * (d-x)^2 + A_{s2} * (x-d_2)^2) = \frac{300 * 317^3}{3} + \frac{300 * (600-317)^3}{3} + 18.27 * (942 * (540 - 317)^2 + 157 * (317 - 55.00)^2) = 6.505 * 10^9 \text{ mm}^4$
- $v = h - x_2 = 600 - 317 = 283 \text{ mm}$
- $W = \frac{I}{v} = \frac{6.505 * 10^9}{282} = 2.2998 * 10^7$
- $M_{cr} = W * f_{ctm} = 2.2998 * 10^7 * 2.896 = 67 \text{ kNm} > M_d \Rightarrow \text{Niet gescheurd}$

### A.2.2.3. Balk BM3

Tabel 148: Inputwaarde balk BM3

| Afkorting                  | Waarde      |
|----------------------------|-------------|
| Betondekking               | c           |
| Betonsterkte               | $f_{ck}$    |
| Kruip coëfficiënt          | $\varphi$   |
| Hoogte                     | h           |
| Breedte                    | b           |
| Diameter beugel            | $\Phi_b$    |
| Trekwapening               | $\Phi_{s1}$ |
| Aantal trekstaven          | $n_{s1}$    |
| Drukwapening               | $\Phi_{s2}$ |
| Aantal drukstaven          | $n_{s2}$    |
| Buigmoment SLS-Q           | $M_{Ed}$    |
| Elasticiteitsmodulus staal | $E_s$       |
| Staalsterkte               | $f_{yk}$    |

- $= f_{ck} + 8 = 50 + 8 = 58 \frac{N}{mm^2}$
- $E_{cm} = 22000 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} = 22000 * \left(\frac{58}{10}\right)^{0,3} = 37278 \frac{N}{mm^2}$
- $E_c = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi} = \frac{37278}{1 + 2} = 12425.96 \frac{N}{mm^2}$
- $\alpha = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{12425.96} = 16.10$
- $d_1 = c + \phi_b + \frac{\phi_{s1}}{2} = 30 + \frac{12}{2} = 36.00 \text{ mm}$
- $d_2 = c + \phi_b + \frac{\phi_{s2}}{2} = 30 + \frac{10}{2} = 35.00 \text{ mm}$
- $d = h - d_1 = 300 - 36 = 264 \text{ mm}$
- $A_{s1} = \pi * n_{s1} * \frac{\phi_{s1}^2}{4} = \pi * 10 * \frac{12^2}{4} = 1130.97 \text{ mm}^2$
- $A_{s2} = \pi * n_{s2} * \frac{\phi_{s2}^2}{4} = \pi * 10 * \frac{10^2}{4} = 785.40 \text{ mm}^2$
- $A_{stot} = A_{s1} + A_{s2} = 1130.97 + 785.40 = 1916.37 \text{ mm}^2$
- $x = \frac{-\alpha * A_{stot}}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha * A_{stot}}{b}\right)^2 + \frac{2 * \alpha * (A_{s1} * d + A_{s2} * d_2)}{b}} = \frac{-16.10 * 1916.37}{1000} + \sqrt{\left(\frac{16.10 * 1916.37}{1000}\right)^2 + \frac{2 * 16.10 * (1130.97 * 264 + 785.40 * 35)}{1000}} = 76.15 \text{ mm}$
- $\sigma_c = \frac{M_{ed} * x}{\frac{b * x^3}{3} + \alpha * (A_{s1} * (d-x)^2 + A_{s2} * (x-d_2)^2)} = \frac{100 * 10^6 * 76.15}{\frac{1000 * 76.15^3}{3} + 16.10 * (1130.97 * (264 - 76.15)^2 + 785.40 * (76.15 - 35)^2)} = 9.39 \frac{N}{mm^2}$
- $\sigma_{s1} = \frac{\alpha * \sigma_c * (d-x)}{x} = \frac{16.10 * 9.39 * (264 - 76.15)}{76.15} = 372.84 \frac{N}{mm^2}$
- $\sigma_{s2} = \frac{\alpha * \sigma_c * (x-d_2)}{x} = \frac{16.10 * 9.39 * (76.15 - 35)}{76.15} = 81.67 \frac{N}{mm^2}$
- $f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 0,3 * 50^{\frac{2}{3}} = 4.072 \frac{N}{mm^2}$

- $x_2 = \frac{\frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{A_{s1} \cdot \alpha + A_{s2} \cdot \alpha + b \cdot h} = \frac{\frac{1000 \cdot 300^2}{2} + 16.10 \cdot (1130.97 \cdot 264 + 785.40 \cdot 35.00)}{1130.97 \cdot 16.10 + 785.40 \cdot 16.10 + 1000 \cdot 300} = 151.88 \text{ mm}$
- $I = \frac{b \cdot x^3}{3} + \frac{b \cdot (h-x)^3}{3} + \alpha \cdot (A_{s1} \cdot (d-x)^2 + A_{s2} \cdot (x-d_2)^2) = \frac{1000 \cdot 151.88^3}{3} + \frac{1000 \cdot (300-151.88)^3}{3} + 16.10 \cdot (1130.97 \cdot (264-151.88)^2 + 785.40 \cdot (151.88-35)^2) = 2.6525 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$
- $v = h - x_2 = 300 - 151.88 = 148.12 \text{ mm}$
- $W = \frac{I}{v} = \frac{2.6525 \cdot 10^9}{148.12} = 1.79 \cdot 10^7$
- $M_{cr} = W \cdot f_{ctm} = 1.79 \cdot 10^7 \cdot 4.072 = 72.92 \text{ kNm}$
- $A_{ceff} = b \cdot \min\left(\frac{h-x}{3}; 2.5 \cdot (h-d); \frac{h}{2}\right) = 1000 \cdot \min\left(\frac{300-76.15}{3}; 2.5 \cdot (300-264); \frac{300}{2}\right) = 1000 \cdot \min(74.62; 90; 150) = 1000 \cdot 75 = 74617 \text{ mm}^2$
- $\rho_{eff} = \frac{A_{s1}}{A_{ceff}} = \frac{1130.97}{74617} = 0.02$
- $S_{rmax} = \min\left(3.4 \cdot c + 0.17 \cdot \frac{\phi_{s1}}{\rho_{eff}}; 1.3 \cdot (h-x)\right) = \min\left(3.4 \cdot 30 + 0.17 \cdot \frac{12}{0.02}; 1.3 \cdot (300 - 76.15)\right) = \min(291.01; 236.59) = 236.59 \text{ mm}$
- $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \max\left(\frac{0.6 \cdot \sigma_c}{200000}; \frac{\sigma_c}{200000} - 0.4 \cdot f_{ctm} \cdot \frac{1 + \alpha \cdot \rho_{eff}}{\rho_{eff} \cdot 200000}\right) = \max\left(\frac{0.6 \cdot 9.39}{200000}; \frac{9.39}{200000} - 0.4 \cdot 4.072 \cdot \frac{1 + 16.10 \cdot 0.02}{0.02 \cdot 200000}\right) = \max(1.119 \cdot 10^{-3}; 1.196 \cdot 10^{-3}) = 1.196 \cdot 10^{-3}$
- $w_k = S_{rmax} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 236.59 \cdot 1.196 \cdot 10^{-3} = 0.2829 \text{ mm}$

### A.2.3. Matlab berekening

#### A.2.3.1. Balk BM1

```
% Betondekking
```

```
c = 40;
```

```
% Betonkwaliteit
```

```
fck = 30;
```

```
% Breedte
```

```
b = 300;
```

```
% Hoogte
```

```
h = 600;
```

```
% Diameter beugel
```

```
qb = 10;
```

```
% Diameter trekwapening
```

```
qs1 = 20;
```

```
% Aantal staven trekwapening
```

```
ns1 = 3;
```

```

% Diameter drukwapening
qs2 = 10;

% Aantal staven drukwapening
ns2 = 2;

% Kruipfactor
q = 2;

% Moment in GGT-Q
med = 90 * (10^6);

% Elasticiteitsmodulus staal
Es = 200000;

% Staalkwaliteit
fyk = 500;

% Gemiddelde waarde druksterkte beton
fcm = fck + 8 ;

% Elasticiteitsmodulus beton
Ecm = 22000*((fcm/10)^0,3);

% Elasticiteitsmodulus
Ec = Ecm / (1 + q);

% Alpha
alpha = Es / Ec;

% Afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening As1
d1 = c + qb + (qs1/2);

% Afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening As2
d2 = c + qb + (qs2/2);

% Nuttige hoogte
d = h - d1;

% Trekwapening
As1 = (pi * ns1 * (qs1^2))/4;

% Drukwapening
As2 = (pi * ns2 * (qs2^2))/4;

% Totale wapening
Astot = As1 + As2;

% Drukhoogte
x = ((-alpha *Astot)/b)+
sqrt(((alpha*Astot/b)^2)+((2*alpha*(As1*d+As2*d2))/b));

% Betondrukhoogte
sigmac =( med*x) /(((b * (x^3))/3) + alpha * ( (As1 * ((d-x)^2))+ (As2 *
((x - d2)^2))));

% Staaldrukhoogte 1

```

```

sigmas1 = alpha * sigmac * (d-x)/x;

% Staaldrukhoogte 2
sigmas2 = alpha * sigmac * (x - d2)/ x;

% Scheurmoment
fctm = 0,3 * (fck ^ (2/3));

% Betondrukhoogte 2
x2 = ((b * (h^2))/2)+ alpha * (As1 * d + As2 * d2)/(As1 * alpha + As2 *
alpha + b * h);

% Traagheidsmoment
I = ((b*(x2^3)/3)) + (b* ((h - x2)^3))/3+ alpha * As1*((d-x2)^2)+ alpha *
As2*((x2-d2)^2);

% Berekeningen voor het scheurmoment
v = h - x2;
W = I / v;

% Scheurmoment
Mcr = W * fctm;

% Effectieve doorsnede
h1 = (h-x)/3;
h2 = 2.5*(h-d);
h3 = h/2;
H = [h1 h2 h3];
Aceff = b*min(H);

% Effectieve Rho
rhoeff = As1/Aceff;

% Sr max
Srmax1 = 3.4 * c + 0.17* qs1 / rhoeff;
Srmax2 = 1.3 * (h - x);
Srmax = min(Srmax1 , Srmax2);

% Epsilon
epsilon1 = 0.6*sigmas1/200000;
epsilon2 = (sigmas1 / 200000)-(0.4*fctm*(1+alpha*rhoeff)/(rhoeff*200000));
epsilon = max(epsilon1,epsilon2);

% Scheurwijdte
wk = Srmax*epsilon;
if Mcr < med
    wk = wk;
elseif Mcr > med
    wk = 0;
end
if x > d2
    wk = wk
elseif x < d2
    wk = 0
end

```



```

Command Window
>> BM1

wk =

    0.1828
    
```

*Figuur 99: Uitkomst Matlab BM1*

#### A.2.3.2. Balk BM2

```

% Betondekking
c = 40;

% Betonkwaliteit
fck = 30;

% Breedte
b = 300;

% Hoogte
h = 600;

% Diameter beugel
qb = 10;

% Diameter trekwapening
qs1 = 20;

% Aantal staven trekwapening
ns1 = 3;

% Diameter drukwapening
qs2 = 10;

% Aantal staven drukwapening
ns2 = 2;

% Kruipfactor
q = 2;

% Moment in GGT-Q
med = 60 * (10^6);

% Elasticiteitsmodulus staal
Es = 200000;

% Staalkwaliteit
fyk = 500;

% Gemiddelde waarde druksterkte beton
fcm = fck + 8 ;

% Elasticiteitsmodulus beton
Ecm = 22000*((fcm/10)^0,3);

% Elasticiteitsmodulus
    
```

```

Ec = Ecm / (1 + q);

% Alpha
alpha = Es / Ec;

% Afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening As1
d1 = c + qb + (qs1/2);

% Afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening As2
d2 = c + qb + (qs2/2);

% Nuttige hoogte
d = h - d1;

% Trekwapening
As1 = (pi * ns1 * (qs1^2))/4;

% Drukwapening
As2 = (pi * ns2 * (qs2^2))/4;

% Totale wapening
Astot = As1 + As2;

% Drukhoogte
x = ((-alpha *Astot)/b)+
sqrt(((alpha*Astot/b)^2)+((2*alpha*(As1*d+As2*d2))/b));

% Betondrukhoogte
sigmac =( med*x) /(((b * (x^3))/3) + alpha * ( (As1 * ((d-x)^2))+ (As2 *
((x - d2)^2))));

% Staaldrukhoogte 1
sigmas1 = alpha * sigmac * (d-x)/x;

% Staaldrukhoogte 2
sigmas2 = alpha * sigmac * (x - d2)/ x;

% Scheurmoment
fctm = 0,3 * (fck ^ (2/3));

% Betondrukhoogte 2
x2 = ((b * (h^2))/2)+ alpha * (As1 * d + As2 * d2))/(As1 * alpha + As2 *
alpha + b * h);

% Traagheidsmoment
I = ((b*(x2^3)/3)) + (b* ((h - x2)^3))/3+ alpha * As1*((d-x2)^2)+ alpha *
As2*((x2-d2)^2);

% Berekening voor scheurmoment
v = h - x2;
W = I / v;

% Scheurmoment
Mcr = W * fctm;

% Effectieve doorsnede
h1 = (h-x)/3;
h2 = 2.5*(h-d);

```

```

h3 = h/2;
H = [h1 h2 h3];
Aceff = b*min(H);

% Effectieve Rho
rhoeff = As1/Aceff;

% Sr max
Srmax1 = 3.4 * c + 0.17* qs1 / rhoeff;
Srmax2 = 1.3 * (h - x);
Srmax = min(Srmax1 , Srmax2);

% Epsilon
epsilon1 = 0.6*sigmas1/200000;
epsilon2 = (sigmas1 / 200000)-(0.4*fctm*(1+alpha*rhoeff)/(rhoeff*200000));
epsilon = max(epsilon1,epsilon2);

% Scheurwijdte
wk = Srmax*epsilon;
if Mcr < med
    wk = wk;
elseif Mcr > med
    wk = 0;
end
if x > d2
    wk = wk
elseif x < d2
    wk = 0
end

```



Figuur 100: Uitkomst Matlab BM2

#### A.2.3.3. Balk BM3

```

% Betondekking
c = 30;

% Betonkwaliteit
fck = 50;

% Breedte
b = 1000;

% Hoogte
h = 300;

% Diameter beugel
qb = 0;

```

```

% Diameter trekwapening
qs1 = 12;

% Aantal staven trekwapening
ns1 = 10;

% Diameter drukwapening
qs2 = 10;

% Aantal staven drukwapening
ns2 = 10;

% Kruipfactor
q = 2;

% Moment in GGT-Q
med = 100 * (10^6);

% Elasticiteitsmodulus staal
Es = 200000;

% Staalkwaliteit
fyk = 500;

% Gemiddelde waarde druksterkte beton
fcm = fck + 8 ;

% Elasticiteitsmodulus beton
Ecm = 22000*((fcm/10)^0,3);

% Elasticiteitsmodulus
Ec = Ecm / (1 + q);

% Alpha
alpha = Es / Ec;

% Afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening As1
d1 = c + qb + (qs1/2);
% Afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening As2
d2 = c + qb + (qs2/2);

% Nuttige hoogte
d = h - d1;

% Trekwapening
As1 = (pi * ns1 * (qs1^2))/4;

% Drukwapening
As2 = (pi * ns2 * (qs2^2))/4;

% Totale wapening
Astot = As1 + As2;

% Drukhoogte
x = ((-alpha *Astot)/b)+
sqrt(((alpha*Astot/b)^2)+((2*alpha*(As1*d+As2*d2))/b));

```

```

% Betondrukhoogte
sigmac = (med*x) / (((b * (x^3))/3) + alpha * ( (As1 * ((d-x)^2)) + (As2 *
((x - d2)^2))));

% Staaldrukhoogte 1
sigmas1 = alpha * sigmac * (d-x)/x;

% Staaldrukhoogte 2
sigmas2 = alpha * sigmac * (x - d2)/ x;

% Scheurmoment
fctm = 0,3 * (fck ^ (2/3));

% Betondrukhoogte 2
x2 = ((b * (h^2))/2) + alpha * (As1 * d + As2 * d2) / (As1 * alpha + As2 *
alpha + b * h);

% Traagheidsmoment
I = ((b*(x2^3)/3) + (b* ((h - x2)^3))/3 + alpha * As1*((d-x2)^2) + alpha *
As2*((x2-d2)^2);

% Berekeningen voor het scheurmoment
v = h - x2;
W = I / v;

% Scheurmoment
Mcr = W * fctm;

% Effectieve doorsnede
h1 = (h-x)/3;
h2 = 2.5*(h-d);
h3 = h/2;
H = [h1 h2 h3];
Aceff = b*min(H);

% Effectieve Rho
rhoeff = As1/Aceff;

% Sr max
Srmax1 = 3.4 * c + 0.17* qs1 / rhoeff;
Srmax2 = 1.3 * (h - x);
Srmax = min(Srmax1 , Srmax2);

% Epsilon
epsilon1 = 0.6*sigmas1/200000;
epsilon2 = (sigmas1 / 200000) - (0.4*fctm*(1+alpha*rhoeff) / (rhoeff*200000));
epsilon = max(epsilon1,epsilon2);

% Scheurwijdte
wk = Srmax*epsilon;
if Mcr < med
    wk = wk;
elseif Mcr > med
    wk = 0;
end
if x > d2
    wk = wk

```

```
elseif x < d2  
    wk = 0  
end
```



```
Command Window  
>> BM3  
  
wk =  
  
    0.2829
```

*Figuur 101: Uitkomst Matlab BM1*

## B. Matlab code opgelegde verhinderde vervorming EC2-1, balk

```
N = 100000;
```

```
axes('Nextplot' , 'add');
```

```
for i = 1 : N
```

```
    % Betondekking
```

```
    c1 = 40 - 10;
```

```
    c2 = 40 + ((450/210) + (275/21));
```

```
    c = c1 + rand * (c2 - c1);
```

```
    % Betonkwaliteit
```

```
    fck = 26 + rand * (34-26);
```

```
    % Breedte
```

```
    b1 = 300 - ((300/50)+7);
```

```
    b2 = 300 + ((300/50)+7);
```

```
    b = b1 + rand * (b2 - b1);
```

```
    % Hoogte
```

```
    h1 = 600 - ((600/140)+(85/7));
```

```
    h2 = 600 + ((600/140) + (85/7));
```

```
    h = h1 + rand * (h2 - h1);
```

```
    % Diameter trekwapening
```

```
    qs11 = 20 * 0.955;
```

```
    qs12 = 20 * 1.045;
```

```
    qs1 = qs11 + rand * (qs12 - qs11);
```

```
    % Aantal staven trekwapening
```

```
    n = 3;
```

```
    % Diameter beugel
```

```
    qb1 = 8 * 0.955;
```

```
    qb2 = 8 * 1.045;
```

```
    qb = qb1 + rand * (qb2 - qb1);
```

```
    % Staalkwaliteit
```

```
    fyk = 500;
```

```
    % Afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening As1
```

```
    d1 = c + (qs1/2) + qb;
```

```
    % Nuttige hoogte
```

```
    d = h - d1 ;
```

```
    % Getrokken zone net voor scheuren
```

```
    Act = (b * h) / 2;
```

```
    % Coëfficiënt die rekening houdt met het effect van niet-gelijkmatige  
    eigenspanningen
```

```
    k = (1.21 - (0.7*h)/1000);
```

```
    % zuivere trek
```

```
    kc = 1;
```

```

% Fct
fct = 0.3 * (fck ^ (2/3));

% Minimumwapening
As1 = ((20 * 0.955)^2)*pi* n) / 4;
As2 = ((20 * 1.045)^2)*pi* n) / 4;
Asmin = As1 + rand * (As2 - As1);

% Sigma staal
y = (kc * k * fct * Act)/Asmin ;

% keuze diameter
diamkeuze = sqrt((Asmin*4)/(pi*n));

% h-d
t = h - d;

% correctie diameter
diamster = (diamkeuze*23.2*t)/(fct*kc*h);

% Diameter van de wapening
diam = (diamster*fct * kc * h)/(23.2*t);

% min spanning
y1 = 153;

% max spanning
y2 = 396;

% scheurwijdte bij spanning 153
x1 = 0.1;

% scheurwijdte bij spanning 396
x2 = 0.9 ;

% gezochte scheurwijdte
wk = (((x1-x2) * y) - (x1*y2) + (x2*y1)) / (y1-y2)

% Grafiek
plot(wk,i, '.')

end

xlabel('scheurwijdte')
title('Scheurwijdte')

```



## C. Scheurwijdte t.g.v. opgelegde verhinderde vervorming EC2-3, balk

### C.1. Matlab code

```
% Hoeveel keer de berekening moet worden uitgevoerd
N = 100000;

axes('Nextplot' , 'add');

for i = 1 : N

% Betondekking
c1 = 40 - 10;
c2 = 40 + ((300/210) + (275/21));
c = c1 + rand * (c2 - c1);

% Betonkwaliteit
fck = 26 + rand * (34-26);

% Breedte
b1 = 300 - ((300/50)+7);
b2 = 300 + ((300/50)+7);
b = b1 + rand * (b2 - b1);

% Hoogte
h1 = 600 - ((600/140)+(85/7));
h2 = 600 + ((600/140) + (85/7));
h = h1 + rand * (h2 - h1);

% Diameter trekwapening
qs11 = 20 * 0.955;
qs12 = 20 * 1.045;
qs1 = qs11 + rand * (qs12 - qs11);

% Aantal staven trekwapening
ns1 = 2;

% Diameter beugel
qb1 = 10 * 0.955;
qb2 = 10 * 1.045;
qb = qb1 + rand * (qb2 - qb1);

% Kruipfactor
q1 = 0.8*1.5;
q2 = 1.4 * 1.5;
q = q1 + rand * (q2 - q1);

% Moment in GGT-Q
med = 50 * (10^6)+ rand * (60 * (10^6) - 40 * (10^6));

% Elasticiteitsmodulus staal
Es = 200000;

% Staalkwaliteit
fyk = 400;

% Gemiddelde waarde van de druksterkte van beton
```

```

fcm = fck + 4 * rand * (12 - 4) ;

% Elasticiteitsmodulus beton
Ecm = 22000 * ((fcm/10)^0.3);

% Elasticiteitsmodulus
Ec = Ecm / (1 + q);

% Alpha
alpha = Es / Ec;

% Afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening As1
d1 = c + (qs1/2) + qb;

% Nuttige hoogte
d = h - d1;

% Trekwapening
As1 = (pi * ns1 * (qs1^2))/4;

% Totale wapening
Astot = As1;

% Scheurmoment
fctm = 0.3 * (fck ^ (2/3));

% Effectieve doorsnede
h1 = 2.5 * (h - d);
h2 = h/2;
H = [h1 h2];
Aceff = b * min(H);

% Effectieve Rho
rhoeff = As1/Aceff;

% Sr max
Srmax = 3.4 * c + 0.34 * qs1 / rhoeff;

% zuivere trek
kc = 1;

% k
if h < 300
    k = 1;
elseif h > 300
    k = 1.21 - (0.7 * h / 1000);
end

% Epsilon
epsilon = (0.5 * alpha * kc * k * fctm * (1 + (1 / (alpha * rhoeff)))) / (200000);

% Scheurwijdte
wk = Srmax * epsilon

% Grafiek
Plot(wk, i, ' . ' )
end

```

```
xlabel('scheurwijdte')
title('Scheurwijdte')
```

## C.2. Controle scheurwijdte trek EC2-3, balk

### C.2.1. Excel

| grenstoestand   | GGT Q                                       |                                       | = in te vullen  | Taal :                                | NL   |
|---|---|---------------------------------------|---|---------------------------------------|--|
| minimum betondekking voor de scheurwijdte               |   | 40                                    | mm  |                                       |  |
| betonkwaliteit  | $f_{ck}$                                    | 30                                    | N/mm <sup>2</sup>   |                                       |  |
| gemiddelde waarde druksterkte beton                     | $f_{cm}$                                    | 38                                    | $f_{cm} := f_{ck} + 8$  |                                       |  |
| kruiplfactor  | $\varphi$                                   | 1,5                                   |   |                                       |  |
| staalkwaliteit  | $f_{yk}$                                    | 500                                   | N/mm <sup>2</sup>   |                                       |  |
| elasticiteitsmodulus staal                              | $E_s$                                       | 200000                                | N/mm <sup>2</sup>   |                                       |  |
| elasticiteitsmodulus beton                              | $E_{cm}$                                    | 32837                                 | $E_{cm} := 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.30}$ |                                       |  |
| hoogte van de doorsnede                                 | $h$   | 300                                   | mm  |                                       |  |
| breedte van de doorsnede                                | $b$   | 1000                                  | mm  |                                       |  |
| afstand getrokken rand tot zwpt wap As1                 | $d_1$                                       | 40,0                                  | mm  |                                       |  |
| afstand gedrukte rand tot zwpt wap As2                  | $d_2$                                       | 0,0                                   | mm  |                                       |  |
| nuttige hoogte  | $d$   | 260,0                                 | mm  | toelaatbare drukspanning in het beton | 13,5 N/mm <sup>2</sup>                                     |
| Moment in GGT- Q  | $M_d$                                       |                                       | kNm   | toelaatbare trekspanning in het staal | 400,0 N/mm <sup>2</sup>                                    |
| trekwapening  | $A_{s1}$                                    | 1569                                  | mm <sup>2</sup>   | $\phi_{s1}$                           | 20   |
|   |   |                                       |   | $\rho_1$                              | 5,00   |
| drukwapening  | $A_{s2}$                                    | 0                                     | mm <sup>2</sup>   | $\phi_{s2}$                           | 0  |
|   |   |                                       |   | $\rho_2$                              | 0,00   |
|   | $k := \frac{Q_p}{Q_m + Q_p}$                |                                       |   | $\phi_B$                              | 0  |
|   |   | 1                                     |   | $Q_m$                                 | 0  |
|   |   |                                       |   | $Q_p$                                 | 2 kN   |
|   | $E_c := \frac{E_{cm}}{1 + k \cdot \varphi}$ | 13135                                 | N/mm <sup>2</sup>   |                                       |  |
|   | $\alpha := \frac{E_s}{E_c}$                 | 15,2269                               |   |                                       |  |
|   |   |                                       |   | mm, mm <sup>2</sup> , kNm, MPa        |  |
|   |   | $f_{ctm}$                             | 2,896   | N/mm <sup>2</sup>                     |  |
|   |   | $h_1$                                 | 100   | mm                                    |  |
|   | $2,5 \cdot (h-d)$                           | $h_2$                                 | 150   | mm                                    |  |
|   | $h/2$                                       |                                       |   |                                       |  |
|   |   | $A_{ceff}$                            | 100000  | mm                                    | min (bh <sub>1</sub> , bh <sub>2</sub> , bh <sub>3</sub> ) |
|   | $\frac{A_s}{A_{c,eff}}$                     | $\rho_{p,eff}$                        | 0,02  | 0,016                                 |  |
| zuivere trek = 1  |   | $k_c$                                 | 1   |                                       |  |
|   | $h \leq 300$ mm                             | $k$                                   | 1   |                                       |  |
|   | $300 < h < 800$                             | $k = 1,21 - 0,7 \cdot \frac{h}{1000}$ | 5,718E-04   |                                       |  |
|   | $h \geq 800$                                | $k = 0,65$                            |   |                                       |  |
| ruw = 0,8 ; glad = 1,6                                  |   | $k_1$                                 | 0,80  |                                       |  |
| buiging = 0,5 ; trek = 1,0                              |   | $k_2$                                 | 1   | trek                                  |  |
|   |   | $k_3$                                 | 3,4   |                                       |  |
|   |   | $k_4$                                 | 0,425   |                                       |  |
| $S_{r,max} = k_3 C + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$   |   | $S_{r,max}$                           | 569   | mm                                    |  |
|   | keuze (*)                                   |                                       |   |                                       |  |
|   |   | $w_k$                                 | 0,3   | mm                                    |  |
| $w_k = S_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$ |   |                                       |   |                                       |  |

### C.2.2. Handberekening

- $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 30 + 8 = 38 \frac{N}{mm^2}$
- $E_{cm} = 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} = 22000 \cdot \left(\frac{38}{10}\right)^{0.3} = 32836.57 \frac{N}{mm^2}$
- $E_c = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi} = \frac{32836.57}{1 + 1.5} = 13134.63 \frac{N}{mm^2}$
- $f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 0,3 \cdot 30^{\frac{2}{3}} = 2.90 \frac{N}{mm^2}$
- $\alpha = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{13134.63} = 15.23$
- $d_1 = c + \phi_b + \frac{\phi_{s1}}{2} = 40mm$

- $d = h - d_1 = 260 \text{ mm}$
- $A_{s1} = \pi * n_{s1} * \frac{\phi_{s1}^2}{4} = \pi * 5 * \frac{20^2}{4} = 1569 \text{ mm}^2$
- $A_{ceff} = b * \min\left(2.5 * (h - d); \frac{h}{2}\right) = 1000 * \min\left(2.5 * (300 - 260); \frac{300}{2}\right) = 1000 * \min(100; 150) = 100000 \text{ mm}^2$
- $\rho_{eff} = \frac{A_{s1}}{A_{ceff}} = \frac{1569}{100000} = 0.02$
- $S_{rmax} = 3.4 * c + 0.8 * 1 * 0.425 * \frac{\phi_{s1}}{\rho_{eff}} = 3.4 * 40 + 0.8 * 1 * 0.425 * \frac{20}{0.02} = 569 \text{ mm}$
- $kc = 1$  (zuivere trek)
- $h = 300 \rightarrow k = 1$
- $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{0.5 * \alpha * kc * k * f_{ct,eff} * \left(1 + \frac{1}{\alpha * \rho_{eff}}\right)}{E_s} = \frac{0.5 * 15.23 * 1 * 1 * 2.9 * \left(1 + \frac{1}{15.23 * 0.02}\right)}{200000} = 5.72 * 10^{-4}$
- $w_k = S_{rmax} * (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 569 * 5.72 * 10^{-4} = 0,3 \text{ mm}$

### C.2.3. Matlab

```

% Betondekking
c = 40;

% Betonkwaliteit
fck = 30;

% Breedte
b = 1000;

% Hoogte
h = 300;

% Diameter trekwapening
qs1 = 20;

% Aantal staven trekwapening
ns1 = 5;

% Kruipfactor
q = 1.5;

% Moment in GGT-Q
med = 43 * (10^6);

% Elasticiteitsmodulus staal
Es = 200000;

% Staalkwaliteit
fyk = 500;

% Gemiddelde waarde druksterkte beton
fcm = fck + 8 ;

% Elasticiteitsmodulus beton

```

```

Ecm = 22000*((fcm/10)^0,3);

% Elasticiteitsmodulus
Ec = Ecm / (1 + q);

% Alpha
alpha = Es / Ec;

% Afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening As1
d1 = 40;

% Nuttige hoogte
d = 260;

% Trekwapening
As1 = (pi * ns1 * (qs1^2))/4;

% Totale wapening
Astot = As1;

% Scheurmoment
fctm = 0,3 * (fck ^ (2/3));

% Effectieve doorsnede

h1 = 2.5*(h-d);
h2 = h/2;
H = [h1 h2];
Aceff = b*min(H);

% Effectieve Rho
rhoeff = As1/Aceff;

% Sr max
Srmax = 3.4 * c + 0,34 * qs1 / rhoeff;

%kc
kc = 1;

%k
k = 1;

% Epsilon
epsilon = (0.5*alpha*kc*k*fctm*(1+(1/(alpha*rhoeff)))/(200000));

% Scheurwijdte
wk = Srmax * epsilon

```

```
Command Window
>> Controle
wk =
    0.3250
fx >> |
```

Figuur 102: Uitkomst Matlab controle EC2-3

## D. Matlab code buiging, plaat

```

% Hoeveel keer de berekening moet worden uitgevoerd
N = 100000;

axes('Nextplot' , 'add');

for i = 1 : N

% Betondekking
c1 = 30 - 10;
c2 = 30 + ((250/50) + 7);
c = c1 + rand * (c2 - c1);

% Betonkwaliteit
fck = 26 + rand * (34-26);

% Breedte
b = 1000;

% Hoogte
h1 = 250 - ((250/50) + 7);
h2 = 250 + ((250/50) + 7);
h = h1 + rand * (h2 - h1);

% Diameter trekwapening
qs11 = 12 * 0.955;
qs12 = 12 * 1.045;
qs1 = qs11 + rand * (qs12 - qs11);

% Aantal staven trekwapening
ns1 = 6;

% Kruipfactor
q1 = 0.8 * 2;
q2 = 1.4 * 2;
q = q1 + rand * (q2 - q1);

% Moment in GGT-Q
med1 = 0.8 * 49;
med2 = 1.2 * 49;
med = med1* (10^6)+ rand * (med2 * (10^6) - med1 * (10^6));

% Elasticiteitsmodulus staal
Es = 200000;

% Staalkwaliteit
fyk = 500;

% Gemiddelde waarde van de drukstrekste van beton
fcm = fck + 4 + rand * (12 - 4) ;

% Elasticiteitsmodulus beton
Ecm = 22000*((fcm/10)^0.3);

% Elasticiteitsmodulus
Ec = Ecm / (1 + q);

```

```

% Alpha
alpha = Es / Ec;

% Afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening As1
d1 = c + (qs1/2);

% Nuttige hoogte
d = h - d1;

% Trekwapening
As1 = (pi * ns1 * (qs1^2))/4;

% Totale wapening
Astot = As1 ;

% Drukhoogte
x = ((-alpha *Astot)/b)+ sqrt(((alpha*Astot/b)^2)+((2*alpha*(As1*d))/b));

% Betondrukhoogte
sigmac =( med*x) /(((b * (x^3))/3) + alpha * ( (As1 * ((d-x)^2))));

% Staaldrukhoogte 1
sigmas1 = alpha * sigmac * (d-x)/x;

% Staaldrukhoogte 2
sigmas2 = alpha * sigmac * (x)/ x;

% Scheurmoment
fctm = 0.3 * (fck ^ (2/3));

% Betondrukhoogte 2
x2 = (((b * (h^2))/2)+ alpha * (As1 * d))/(As1 * alpha + b * h);

% Traagheidsmoment
I = ((b*(x2^3)/3)) + (b* ((h - x2)^3))/3+ alpha * As1*((d-x2)^2);

% Berekening voor scheurmoment
v = h - x2;
W = I / v;

% Scheurmoment
Mcr = W * fctm;

% Effectieve doorsnede
h1 = (h-x)/3;
h2 = 2.5*(h-d);
h3 = h/2;
H = [h1 h2 h3];
Aceff = b*min(H);

% Effectieve Rho
rhoeff = As1/Aceff;

% Sr max
Srmax1 = 3.4 * c + 0.17* qs1 / rhoeff;
Srmax2 = 1.3 * (h - x);

```



```
Srmax = min(Srmax1 , Srmax2);

% Epsilon
epsilon1 = 0.6*sigmas1/200000;
epsilon2 = (sigmas1 / 200000)-(0.4*fctm*(1+alpha*rhoeff)/(rhoeff*200000));
epsilon = max(epsilon1,epsilon2);

% Scheurwijdte
wk = Srmax*epsilon;
if Mcr < med
    wk = wk
elseif Mcr > med
    wk = 0
end

% Grafiek
plot(wk,i, '.')
end

xlabel('scheurwijdte')
title('Scheurwijdte')
```

## E. Matlab code opgelegde verhinderde vervorming EC2-1, plaat

```

N = 100000;

axes('Nextplot' , 'add');

for i = 1 : N

% Betondekking
c1 = 30 - 10;
c2 = 30 + ((250/50) + 7);
c = c1 + rand * (c2 - c1);

% Betonkwaliteit
fck = 26 + rand * (34-26);

% Breedte
b = 1000;

% Hoogte
h1 = 250 - ((250/50)+7);
h2 = 250 + ((250/50) + 7);
h = h1 + rand * (h2 - h1);

% Diameter trekwapening
qs11 = 25 * 0.955;
qs12 = 25 * 1.045;
qs1 = qs11 + rand * (qs12 - qs11);

% Aantal staven trekwapening
n = 4;

% Diameter beugel
qb = 0;

% Staalkwaliteit
fyk = 500;

% Afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening As1
d1 = c + (qs1/2) + qb;

% Nuttige hoogte
d = h - d1 ;

% Getrokken zone net voor scheuren
Act = (b * h) / 2;

% Coëfficiënt die rekening houdt met het effect van niet-gelijkmatige
eigenspanningen
k = (1.21 - (0.7*h)/1000);

% zuivere trek
kc = 1;

% Fct
fct = 0.3 * (fck ^ (2/3));

```

```

% Minimumwapening
As1 = (((25 * 0.955)^2)*pi* n) / 4;
As2 = (((25 * 1.045)^2)*pi* n) / 4;
Asmin = As1 + rand * (As2 - As1);

% Sigma staal
y = (kc * k * fct * Act)/Asmin ;

% keuze diameter
diamkeuze = sqrt((Asmin*4)/(pi*n));

% h-d
t = h - d;

% correctie diameter
diamster = (diamkeuze*23.2*t)/(fct*kc*h);

% Diameter van de wapening
diam = (diamster*fct * kc * h)/(23.2*t);

% min spanning
y1 = 129;

% max spanning
y2 = 387;

% scheurwijdte bij spanning 153
x1 = 0.1;

% scheurwijdte bij spanning 396
x2 = 0.9 ;

% gezochte scheurwijdte
wk = (((x1-x2)* y) - (x1*y2) + (x2*y1)) / (y1-y2)

% Grafiek
plot(wk,i, '.')
end

xlabel('scheurwijdte')
title('Scheurwijdte')

```

## F. Matlab code opgelegde verhinderde vervorming EC2-3, plaat

```
% Hoeveel keer de berekening moet worden uitgevoerd
N = 100000;
```

```
axes('Nextplot' , 'add');
```

```
for i = 1 : N
```

```
    % Betondekking
```

```
    c1 = 30 - 10;
    c2 = 30 + ((250/50) + 7);
    c = c1 + rand * (c2 - c1);
```

```
    % Betonkwaliteit
```

```
    fck = 21 + rand * (29-21);
```

```
    % Breedte
```

```
    b = 1000;
```

```
    % Hoogte
```

```
    h1 = 250 - ((250/50) + 7);
    h2 = 250 + ((250/50) + 7);
    h = h1 + rand * (h2 - h1);
```

```
    % Diameter trekwapening
```

```
    qs11 = 12 * 0.955;
    qs12 = 12 * 1.045;
    qs1 = qs11 + rand * (qs12 - qs11);
```

```
    % Aantal staven trekwapening
```

```
    ns1 = 9;
```

```
    % Diameter beugel
```

```
    qb = 0;
```

```
    % Kruipfactor
```

```
    q1 = 0.8*1;
    q2 = 1.4 * 1;
    q = q1 + rand * (q2 - q1);
```

```
    % Elasticiteitsmodulus staal
```

```
    Es = 200000;
```

```
    % Staalkwaliteit
```

```
    fyk = 500;
```

```
    % Gemiddelde waarde van de druksterkte van beton
```

```
    fcm = fck + 4 +rand * (12 - 4) ;
```

```
    % Elasticiteitsmodulus beton
```

```
    Ecm = 22000*((fcm/10)^0.3);
```

```
    % Elasticiteitsmodulus
```

```
    Ec = Ecm / (1 + q);
```

```
    % Alpha
```

```

alpha = Es / Ec;

% Afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening As1
d1 = c + (qs1/2) + qb;

% Nuttige hoogte
d = h - d1;

% Trekwapening
As1 = (pi * ns1 * (qs1^2))/4;

% Totale wapening
Astot = As1;

% Scheurmoment
fctm = 0.3 * (fck ^ (2/3));

% Effectieve doorsnede
h1 = 2.5*(h-d);
h2 = h/2;
H = [h1 h2];
Aceff = b*min(H);

% Effectieve Rho
rhoeff = As1/Aceff;

% Sr max
Srmax = 3.4 * c + 0.34* qs1 / rhoeff;

% zuivere trek
kc = 1;

% k
if h < 300
    k = 1;
elseif h > 300
    k = 1.21-(0.7*h/1000);
end

% Epsilon
epsilon = (0.5*alpha*kc*k*fctm*(1+(1/(alpha*rhoeff)))/(200000));

% Scheurwijdte
wk = Srmax * epsilon

% Grafiek
plot(wk,i, '.');
end

xlabel('scheurwijdte')
title('Scheurwijdte')

```

# G. Laagste waarde range

## G.1. Balk in buiging

BALKEN DUBBEL GEWAPEND GGT

NBN EN 1992-1-1 ANB 2010

versie 2

geldig tot

grenstoestand

GGT Q

= in te vullen

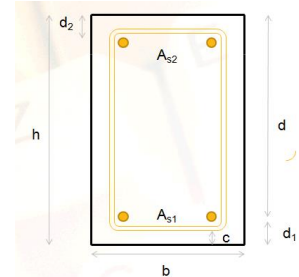
Taal : NL

minimum betondekking voor de scheurwijdte  
 betonkwaliteit  
 gemiddelde waarde druksterkte beton  
 kruipfactor  
 staalkwaliteit  
 elasticiteitsmodulus staal  
 elasticiteitsmodulus beton  
 hoogte van de doorsnede  
 breedte van de doorsnede  
 afstand getrokken rand tot zwpt wap As1  
 afstand gedrukte rand tot zwpt wap As2  
 nuttige hoogte  
 Moment in GGT-Q  
 afstand tussen staven kleiner dan (\*)  
 trekwapening  
 drukwapening

|                 |            |                   |
|-----------------|------------|-------------------|
| f <sub>ck</sub> | 30,5       | mm                |
| f <sub>cm</sub> | 33,5009    | N/mm <sup>2</sup> |
| φ               | 1,268      |                   |
| f <sub>yk</sub> | 500        | N/mm <sup>2</sup> |
| E <sub>s</sub>  | 200000     | N/mm <sup>2</sup> |
| E <sub>cm</sub> | 32862      | N/mm <sup>2</sup> |
| h               | 615,952381 | mm                |
| b               | 287        | mm                |
| d <sub>1</sub>  | 53,5704    | mm                |
| d <sub>2</sub>  | 47,8229    | mm                |
| d               | 562,4      | mm                |
| M <sub>d</sub>  | 96         | kNm               |
| A <sub>s1</sub> | 1072       | mm <sup>2</sup>   |
| A <sub>s2</sub> | 336        | mm <sup>2</sup>   |
| k               | 1          |                   |
| E <sub>c</sub>  | 14489      | N/mm <sup>2</sup> |
| α               | 13,8034    |                   |

$$f_{cm} := f_{ck} + 8$$

$$E_{cm} := 22000 \cdot \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.30}$$



|                                       |       |                   |
|---------------------------------------|-------|-------------------|
| toelaatbare drukspanning in het beton | 13,5  | N/mm <sup>2</sup> |
| toelaatbare trekspanning in het staal | 400,0 | N/mm <sup>2</sup> |
| afstand tussen de staven hoh          | 90    | mm                |

|                 |    |                |      |    |
|-----------------|----|----------------|------|----|
| φ <sub>s1</sub> | 26 | n <sub>1</sub> | 2,00 |    |
| φ <sub>s2</sub> | 15 | n <sub>2</sub> | 2,00 |    |
| Q <sub>m</sub>  | 0  | Q <sub>p</sub> | 1    | kN |

$$k := \frac{Q_p}{Q_m + Q_p}$$

$$E_c := \frac{E_{cm}}{1 + k \cdot \varphi}$$

$$\alpha := \frac{E_s}{E_c}$$

mm, mm<sup>2</sup>, kNm, MPa

$$x = \frac{-\alpha \cdot (A_{s1} + A_{s2})}{b} + \sqrt{\left( \frac{\alpha \cdot (A_{s1} + A_{s2})}{b} \right)^2 + \frac{2 \cdot \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{b}}$$

betondrukhoogte

$$\sigma_c = \frac{M_{sd} \cdot x}{\frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha \cdot [A_{s1} \cdot (d - x)^2 + A_{s2} \cdot (x - d_2)^2]}$$

$$\sigma_{s1} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(d - x)}{x}$$

$$\sigma_{s2} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(x - d_2)}{x}$$

oepalen van het scheurmoment (ongescheurde sectie)

$$x = \frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2) \div (A_{s1} \cdot \alpha + A_{s2} \cdot \alpha + b \cdot h)$$

|                  |         |                   |    |      |
|------------------|---------|-------------------|----|------|
| x                | 185,507 | mm                | >? | 48   |
| σ <sub>c</sub>   | 6,4     | N/mm <sup>2</sup> | <? | 13,5 |
| σ <sub>s1</sub>  | 178     | N/mm <sup>2</sup> | <? | 400  |
| σ <sub>s2</sub>  | 65      | N/mm <sup>2</sup> | <? | 400  |
| f <sub>ctm</sub> | 3,118   | N/mm <sup>2</sup> |    |      |
| x                | 321     | mm                |    |      |

$$I_1 = \frac{b \cdot x^3}{3} + \frac{b \cdot (h-x)^3}{3} + \alpha \cdot A_{s1} \cdot (d-x)^2 + \alpha \cdot A_{s2} \cdot (x-d_2)^2$$

I 6,82765E+09 mm<sup>4</sup>

v = h - x

W =  $\frac{I}{v}$

|                   |             |                 |
|-------------------|-------------|-----------------|
| v                 | 295         | mm              |
| W                 | 2,31491E+07 | mm <sup>3</sup> |
| M <sub>cr</sub>   | 72          | kNm             |
| h <sub>1</sub>    | 143         | mm              |
| h <sub>2</sub>    | 134         | mm              |
| h <sub>3</sub>    | 307,9761905 | mm              |
| A <sub>ceff</sub> | 38437       | mm              |

f<sub>ctm</sub> =  $\frac{M_{cr}}{W}$

$(h-x)/3$

2,5 · (h-d)

h/2

M<sub>d</sub> 96 <?

$\frac{A_s}{A_{c,eff}}$

ρ<sub>peff</sub> 0,03

korte termijn 0,6 / lange termijn 0,4

k<sub>1</sub> 0,4

$0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$

5,350E-04

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_1 \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

5,820E-04

ruw = 0,8 ; glad = 1,6  
buijing = 0,5 ; trek = 1,0

|    |       |
|----|-------|
| k1 | 0,80  |
| k2 | 0,5   |
| k3 | 3,4   |
| k4 | 0,425 |

S<sub>r,max</sub> = k<sub>3</sub>C + k<sub>1</sub>k<sub>2</sub>k<sub>4</sub>φ / ρ<sub>p,eff</sub>

1,3 (h-x) 560  
S<sub>r,max</sub> 263 mm

keuze (\*)

263

w<sub>k</sub> = S<sub>r,max</sub> · (ε<sub>sm</sub> - ε<sub>cm</sub>)

w<sub>k</sub> 0,153 mm

## G.2. Balk in trek Eurocode 2 deel 1

Tabel 149: Inputwaarde EC2-1 balk

| Variërende inputwaarden   |               |
|---------------------------|---------------|
| c                         | 40            |
| fck                       | 26            |
| fyk                       | 500           |
| fct,eff                   | 2,6           |
| breedte                   | 287           |
| $\Phi b$                  | 7,64          |
| d1                        | 58,09         |
| d                         | 525,48        |
| hoogte                    | 583,57        |
| Act                       | 83742,295     |
| kc (trek)                 | 1             |
| k                         | 0,802         |
| aantal staven             | 3             |
| As,min                    | 1014          |
| staalspanning             | <b>174,30</b> |
| $\Phi s$ keuze            | <b>20,90</b>  |
| $\Phi' s$                 | 18,3          |
| $\Phi scorr$              | <b>20,9</b>   |
| Gebruik tabel EC2 voor wk |               |
| $\Phi scorr$              | 21,0          |
| staalspanning             | 174,3         |
| wk                        | 0,170         |

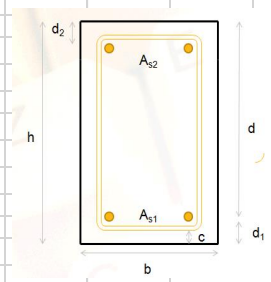
Tabel 150: Interpolatie EC2-1 balk

| interpolatie |         |         |    |
|--------------|---------|---------|----|
| sigma        | 153 y1  | 0,1 x1  | wk |
|              | 174,3 y | 0,170 x |    |
|              | 396 y2  | 0,9 x2  |    |



### G.3. Balk in trek Eurocode 2 deel 3

| grenstoestand   | GGT Q   |              | = in te vullen    | geldig tot   | Taal :   | NL    |      |
|---|---|--------------|-------------------|--|--|-------|------|
| minimum betondekking voor de scheurwijdte               | c   | 30           | mm                |  |  |       |      |
| betonkwaliteit  | $f_{ck}$  | 28           | N/mm <sup>2</sup> |  |  |       |      |
| gemiddelde waarde druksterkte beton                     | $f_{cm}$  | 36           |                   | $f_{cm} := f_{ck} + 8$   |  |       |      |
| kruipfactor   | $\varphi$   | 1,3          |                   |  |  |       |      |
| staalkwaliteit  | $f_{yk}$  | 400          | N/mm <sup>2</sup> |  |  |       |      |
| elasticiteitsmodulus staal                              | $E_s$   | 200000       | N/mm <sup>2</sup> |  |  |       |      |
| elasticiteitsmodulus beton                              | $E_{cm}$  | 32308        | N/mm <sup>2</sup> | $E_{cm} := 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.30}$  |  |       |      |
| hoogte van de doorsnede                                 | h   | 616,43       | mm                |  |  |       |      |
| breedte van de doorsnede                                | b   | 287          | mm                |  |  |       |      |
| afstand getrokken rand tot zwpt wap As1                 | $d_1$   | 50,9         | mm                |  |  |       |      |
| afstand gedrukte rand tot zwpt wap As2                  | $d_2$   | 0,0          | mm                |  |  |       |      |
| nuttige hoogte  | d   | 565,5        | mm                |  |  |       |      |
| Moment in GGT- Q  | $M_d$   | 50           | kNm               |  |  |       |      |
| trekwapening  | $A_{s1}$  | 686,14       | mm <sup>2</sup>   | $\phi_{s1}$  | 21   | $n_1$ | 2,00 |
| drukwapening  | $A_{s2}$  | 0            | mm <sup>2</sup>   | $\phi_{s2}$  | 0  | $n_2$ | 0,00 |
|   |   | 686          |                   | $\phi\beta$  | 10   |       |      |
|   | $k := \frac{Q_p}{Q_m + Q_p}$  | 1            |                   | $Q_m$  | 0  | $Q_p$ | 2 kN |
|   | $E_c := \frac{E_{cm}}{1 + k \cdot \varphi}$   | 14047        | N/mm <sup>2</sup> |  |  |       |      |
|   | $\alpha := \frac{E_s}{E_c}$   | 14,2378      |                   |  |  |       |      |
|   | $f_{ctm}$   | 2,766        | N/mm <sup>2</sup> |  |  |       |      |
|   |   |              |                   |  |  |       |      |
|   | $2,5 \cdot (h-d)$   | h1           | 127               | mm   |  |       |      |
|   | $h/2$   | h2           | 308,215           | mm   |  |       |      |
|   | $\frac{A_s}{A_{c,eff}}$   | $A_{ceff}$   | 36521             | mm   | min (bh <sub>1</sub> , bh <sub>2</sub> , bh <sub>3</sub> ) |       |      |
|   |   | $\rho_{eff}$ | 0,02              |  |  |       |      |
| zuivere trek = 1  |   | $k_c$        | 1,0               |  |  |       |      |
|   | $\begin{matrix} h \leq 300 \text{ mm} & k = 1,0 \\ 300 < h < 800 & k = 1,21 - 0,7 \cdot \frac{h}{1000} \\ h \geq 800 & k = 0,65 \end{matrix}$ | k            | 0,8               |  |  |       |      |
|   |   |              | 3,632E-04         | $(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = \frac{0,5 \cdot \alpha_c \cdot k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha_c \cdot \rho}\right)}{E_s}$ |  |       |      |
| ruw = 0,8 ; glad = 1,6                                  |   | k1           | 0,8               |  |  |       |      |
| buiging = 0,5 ; trek = 1,0                              |   | k2           | 1,0               |  |  |       |      |
|   |   | k3           | 3,4               |  |  |       |      |
|   |   | k4           | 0,4               |  |  |       |      |
| $S_{r,max} = k_3 C + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$   |   | $S_{max}$    | 480               | mm   |  |       |      |
|   | keuze (*)   | $w_k$        | 0,174             | mm   |  |       |      |
| $w_k = S_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$ |   |              |                   |  |  |       |      |



## G.4. Plaat in buiging

### BALKEN DOUBBEL GEWAPEND GGT

NBN EN 1992-1-1 ANB 2010

versie 2

geldig tot

grenstoestand

GGT Q

= in te vullen

Taal :

NL

minimum betondekking voor de scheurwijdte

betonkwaliteit

gemiddelde waarde druksterkte beton

kruipfactor

staalkwaliteit

elasticiteitsmodulus staal

elasticiteitsmodulus beton

hoogte van de doorsnede

breedte van de doorsnede

afstand getrokken rand tot zwpt wap As1

afstand gedrukte rand tot zwpt wap As2

nuttige hoogte

Moment in GGT-Q

afstand tussen staven kleiner dan (\*)

trekwapening

drukwapening

$$k := \frac{Q_p}{Q_m + Q_p}$$

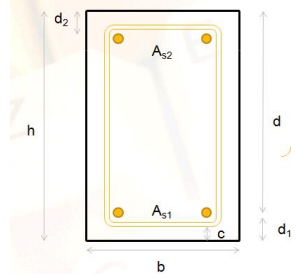
$$E_c := \frac{E_{cm}}{1 + k \cdot \varphi}$$

$$\alpha := \frac{E_s}{E_c}$$

|           |          |                   |
|-----------|----------|-------------------|
| $f_{ck}$  | 20       | mm                |
| $f_{cm}$  | 34       | N/mm <sup>2</sup> |
| $f_{cm}$  | 42       | N/mm <sup>2</sup> |
| $\varphi$ | 2,1      |                   |
| $f_{yk}$  | 500      | N/mm <sup>2</sup> |
| $E_s$     | 200000   | N/mm <sup>2</sup> |
| $E_{cm}$  | 33837,44 | N/mm <sup>2</sup> |
| $h$       | 262      | mm                |
| $b$       | 1000     | mm                |
| $d_1$     | 25,7     | mm                |
| $d_2$     | 0,0      | mm                |
| $d$       | 236,3    | mm                |
| $M_d$     | 39,2     | kNm               |
|           | 128,65   | mm                |
| $A_{s1}$  | 618,89   | mm <sup>2</sup>   |
| $A_{s2}$  | 0,00     | mm <sup>2</sup>   |
|           | 618,89   |                   |
| $k$       | 1        |                   |
| $E_c$     | 10915    | N/mm <sup>2</sup> |
| $\alpha$  | 18,3229  |                   |

$$f_{cm} := f_{ck} + 8$$

$$E_{cm} := 22000 \cdot \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.30}$$



toelaatbare drukspanning in het beton

toelaatbare trekspanning in het staal

afstand tussen de staven hoh

$\phi_{s1}$

$\phi_{s2}$

$Q_m$

13,5 N/mm<sup>2</sup>

400,0 N/mm<sup>2</sup>

90 mm

6,00

0,00

0

1 kN

mm, mm<sup>2</sup>, kNm, MPa

$$x = \frac{-\alpha \cdot (A_{s1} + A_{s2}) + \sqrt{\left( \frac{\alpha \cdot (A_{s1} + A_{s2})}{b} \right)^2 + \frac{2 \cdot \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{b}}}{\alpha}$$

betondrukhoogte

$$\sigma_c = \frac{M_{sd} \cdot x}{\frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha \cdot [A_{s1} \cdot (d-x)^2 + A_{s2} \cdot (x-d_2)^2]}$$

$$\sigma_{s1} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(d-x)}{x}$$

$$\sigma_{s2} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(x-d_2)}{x}$$

oepalen van het scheurmoment (ongescheurde sectie)

$$x = \frac{\frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{A_{s1} \cdot \alpha + A_{s2} \cdot \alpha + b \cdot h}$$

$$I_1 = \frac{b \cdot x^3}{3} + \frac{b \cdot (h-x)^3}{3} + \alpha \cdot A_{s1} \cdot (d-x)^2 + \alpha \cdot A_{s2} \cdot (x-d_2)^2$$

|               |             |                   |    |      |
|---------------|-------------|-------------------|----|------|
| $x$           | 62,735      | mm                | >? | 0    |
| $\sigma_c$    | 5,8         | N/mm <sup>2</sup> | <? | 13,5 |
| $\sigma_{s1}$ | 294,11      | N/mm <sup>2</sup> | <? | 400  |
| $\sigma_{s2}$ | 106,33      | N/mm <sup>2</sup> | <? | 400  |
| $f_{ctm}$     | 3,149       | N/mm <sup>2</sup> |    |      |
| $x$           | 135         | mm                |    |      |
| $I_1$         | 1,61918E+09 | mm <sup>4</sup>   |    |      |

$$v = h - x \quad W = \frac{I}{v}$$

$$f_{ctm} = \frac{M_{cr}}{W}$$

$$\frac{(h-x)^3}{2,5 \cdot (h-d)}$$

$$h/2$$

korte termijn 0,6 / lange termijn 0,4

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

ruw = 0,8 ; glad = 1,6  
buijing = 0,5 ; trek = 1,0

$$s_{r,max} = k_3 C + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$$

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$$

|                                   |             |                 |
|-----------------------------------|-------------|-----------------|
| v                                 | 127         | mm              |
| W                                 | 1,27864E+07 | mm <sup>3</sup> |
| M <sub>cr</sub>                   | 40,26       | kNm             |
| h <sub>1</sub>                    | 66          | mm              |
| h <sub>2</sub>                    | 64          | mm              |
| h <sub>3</sub>                    | 131         | mm              |
| A <sub>ceff</sub>                 | 64325       | mm              |
| ρ <sub>p,eff</sub>                | 0,01        |                 |
| k <sub>t</sub>                    | 0,4         |                 |
| 0,6 $\frac{\sigma_s}{E_s}$        | 8,823E-04   |                 |
| ε <sub>sm</sub> - ε <sub>cm</sub> | 8,823E-04   |                 |
| k <sub>1</sub>                    | 0,80        |                 |
| k <sub>2</sub>                    | 0,5         |                 |
| k <sub>3</sub>                    | 3,4         |                 |
| k <sub>4</sub>                    | 0,425       |                 |
| 1,3 (h-x)                         | 259         |                 |
| s <sub>r,max</sub>                | 270         | mm              |
| keuze (*)                         | 259         |                 |
| w <sub>k</sub>                    | 0,00        | mm              |

<? M<sub>d</sub>

39,2

min (bh<sub>1</sub>, bh<sub>2</sub>, bh<sub>3</sub>)

**G.5. Plaat in trek Eurocode 2 deel 1**

Tabel 151: Inputwaarde EC2-1 plaat

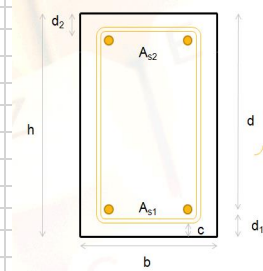
| Variërende inputwaarden   |               |
|---------------------------|---------------|
| c                         | 30            |
| fck                       | 26            |
| fyk                       | 500           |
| fct,eff                   | 2,6           |
| breedte                   | 1000          |
| Φb                        | 0             |
| d1                        | 43,06         |
| d                         | 195,94        |
| hoogte                    | 239           |
| Act                       | 119500        |
| kc (trek)                 | 1             |
| k                         | 1,043         |
| aantal staven             | 4             |
| As,min                    | 2144,19       |
| staalspanning             | <b>153,00</b> |
| Φs keuze                  | <b>26,13</b>  |
| Φ' s                      | 41,5          |
| Φscorr                    | <b>26,1</b>   |
| Gebruik tabel EC2 voor wk |               |
| Φscorr                    | 26,0          |
| staalspanning             | 153,0         |
| wk                        | <b>0,174</b>  |

Tabel 152: Interpolatie EC2-1 plaat

| interpolatie |         |          |    |
|--------------|---------|----------|----|
| sigma        | 129 y1  | 0,1 x1   | wk |
|              | 153,0 y | 0,1744 x |    |
|              | 387 y2  | 0,9 x2   |    |

### G.6. Plaat in trek Eurocode 2 deel 3

| grenstoestand   | GGT Q                                       |           | = in te vullen    | Taal :   | NL                      |
|---|---|-----------|-------------------|--|-------------------------|
| minimum betondekking voor de scheurwijdte   | c   | 20        | mm                |  |                         |
| betonkwaliteit  | f <sub>ck</sub>                             | 21        | N/mm <sup>2</sup> |  |                         |
| gemiddelde waarde druksterkte beton   | f <sub>cm</sub>                             | 29        |                   | $f_{cm} := f_{ck} + 8$   |                         |
| kruiplfactor  | φ   | 1         |                   |  |                         |
| staalkwaliteit  | f <sub>yk</sub>                             | 500       | N/mm <sup>2</sup> |  |                         |
| elasticiteitsmodulus staal  | E <sub>s</sub>                              | 200000    | N/mm <sup>2</sup> |  |                         |
| elasticiteitsmodulus beton  | E <sub>cm</sub>                             | 30279,04  | N/mm <sup>2</sup> | $E_{cm} := 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.30}$  |                         |
| hoogte van de doorsnede   | h   | 250       | mm                |  |                         |
| breedte van de doorsnede  | b   | 997       | mm                |  |                         |
| afstand getrokken rand tot zwpt wap As1   | d <sub>1</sub>                              | 26,2      | mm                |  |                         |
| afstand gedrukte rand tot zwpt wap As2  | d <sub>2</sub>                              | 0,0       | mm                |  |                         |
| nuttige hoogte  | d   | 223,8     | mm                |  |                         |
| Moment in GGT- Q  | M <sub>d</sub>                              |           | kNm               | toelaatbare drukspanning in het beton  | 13,5 N/mm <sup>2</sup>  |
| trekwapening  | A <sub>s1</sub>                             | 1086,87   | mm <sup>2</sup>   | toelaatbare trekspanning in het staal  | 400,0 N/mm <sup>2</sup> |
| drukwapening  | A <sub>s2</sub>                             | 0         | mm <sup>2</sup>   | φ <sub>s1</sub>  | 12,40                   |
|   |   |           |                   | φ <sub>s2</sub>  | 0                       |
|   |   |           |                   | φβ   | 0                       |
|   |   |           |                   | Q <sub>m</sub>   | 0                       |
|   |   |           |                   | Q <sub>p</sub>   | 2 kN                    |
|   | $k := \frac{Q_p}{Q_m + Q_p}$                | 1087      |                   |  |                         |
|   |   | 1         |                   |  |                         |
|   | $E_c := \frac{E_{cm}}{1 + k \cdot \varphi}$ | 15139,52  | N/mm <sup>2</sup> |  |                         |
|   | $\alpha := \frac{E_s}{E_c}$                 | 13,2105   |                   | mm, mm <sup>2</sup> , kNm, MPa   |                         |
|   | f <sub>ctm</sub>                            | 2,283     | N/mm <sup>2</sup> |  |                         |
|   |   | 66        | mm                |  |                         |
|   |   | 125       | mm                |  |                         |
|   |   | 65304     | mm                | min (bh <sub>1</sub> , bh <sub>2</sub> , bh <sub>3</sub> )   |                         |
|   |   | 0,02      |                   |  |                         |
| zuivere trek = 1  | kc  | 1,0       |                   |  |                         |
|   | k   | 1,0       |                   |  |                         |
|   |   | 4,184E-04 |                   | $(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = \frac{0.5 \cdot \alpha_c \cdot k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha_c \cdot \rho}\right)}{E_s}$ |                         |
| ruw = 0,8 ; glad = 1,6  | k1  | 0,8       |                   |  |                         |
| buiiging = 0,5 ; trek = 1,0   | k2  | 1,0       |                   |  |                         |
|   | k3  | 3,4       |                   |  |                         |
|   | k4  | 0,4       |                   |  |                         |
| S <sub>r,max</sub> = k <sub>3</sub> C + k <sub>1</sub> k <sub>2</sub> k <sub>4</sub> φ/ρ <sub>p,eff</sub> | S <sub>max</sub>                            | 321       | mm                |  |                         |
|   | keuze (*)                                   |           |                   |  |                         |
|   | w <sub>k</sub>                              | 0,134     | mm                |  |                         |
|   |   |           |                   |  |                         |



# H. Hoogste waarde range

## H.1. Balk in buiging

BALKEN DUBBEL GEWAPEND GGT

NBN EN 1992-1-1 ANB 2010

versie 2

geldig tot

grenstoestand

GGT Q

= in te vullen

Taal :

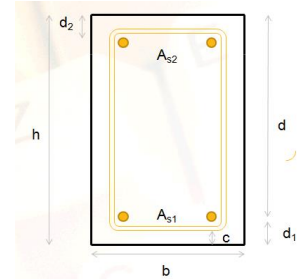
NL

minimum betondekking voor de scheurwijdte  
 betonkwaliteit  
 gemiddelde waarde druksterkte beton  
 kruipfactor  
 staalkwaliteit  
 elasticiteitsmodulus staal  
 elasticiteitsmodulus beton  
 hoogte van de doorsnede  
 breedte van de doorsnede  
 afstand getrokken rand tot zwpt wap As1  
 afstand gedrukte rand tot zwpt wap As2  
 nuttige hoogte  
 Moment in GGT-Q  
 afstand tussen staven kleiner dan (\*)  
 trekwapening  
 drukwapening

|                 |          |                   |
|-----------------|----------|-------------------|
| f <sub>ck</sub> | 55,9524  | mm                |
| f <sub>cm</sub> | 28       | N/mm <sup>2</sup> |
| φ               | 38,4709  |                   |
| f <sub>yk</sub> | 1,792    |                   |
| E <sub>s</sub>  | 500      | N/mm <sup>2</sup> |
| E <sub>cm</sub> | 20000    | N/mm <sup>2</sup> |
| h               | 32958    | N/mm <sup>2</sup> |
| b               | 585      | mm                |
| d <sub>1</sub>  | 302,4216 | mm                |
| d <sub>2</sub>  | 77,9835  | mm                |
| d               | 72,9573  | mm                |
| M <sub>d</sub>  | 507,017  | mm                |
| A <sub>s1</sub> | 144      | kNm               |
| A <sub>s2</sub> | 250      | mm                |
| k               | 1        |                   |
| E <sub>c</sub>  | 11804    | N/mm <sup>2</sup> |
| α               | 16,9427  |                   |

$$f_{cm} := f_{ck} + 8$$

$$E_{cm} := 22000 \cdot \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.30}$$



toelaatbare drukspanning in het beton 13,5 N/mm<sup>2</sup>  
 toelaatbare trekspanning in het staal 400,0 N/mm<sup>2</sup>  
 afstand tussen de staven hoh 90 mm

|                 |    |                |      |
|-----------------|----|----------------|------|
| φ <sub>s1</sub> | 24 | n <sub>1</sub> | 2,00 |
| φ <sub>s2</sub> | 14 | n <sub>2</sub> | 2,00 |
| Q <sub>m</sub>  | 0  | Q <sub>p</sub> | 1 kN |

mm, mm<sup>2</sup>, kNm, MPa

$$x = \frac{-\alpha \cdot (A_{s1} + A_{s2})}{b} + \sqrt{\left( \frac{\alpha \cdot (A_{s1} + A_{s2})}{b} \right)^2 + \frac{2 \cdot \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{b}}$$

betondrukhoogte

$$\sigma_c = \frac{M_{sd} \cdot x}{\frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha \cdot [A_{s1} \cdot (d - x)^2 + A_{s2} \cdot (x - d_2)^2]}$$

$$\sigma_{s1} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(d - x)}{x}$$

$$\sigma_{s2} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(x - d_2)}{x}$$

oepalen van het scheurmoment (ongescheurde sectie)

$$x = \frac{\frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{A_{s1} \cdot \alpha + A_{s2} \cdot \alpha + b \cdot h}$$

|                  |         |                   |    |      |
|------------------|---------|-------------------|----|------|
| x                | 174,291 | mm                | >? | 73   |
| σ <sub>c</sub>   | 11,0    | N/mm <sup>2</sup> | <? | 13,5 |
| σ <sub>s1</sub>  | 354     | N/mm <sup>2</sup> | <? | 400  |
| σ <sub>s2</sub>  | 108     | N/mm <sup>2</sup> | <? | 400  |
| f <sub>ctm</sub> | 2,766   | N/mm <sup>2</sup> |    |      |
| x                | 303     | mm                |    |      |

$$I_1 = \frac{b \cdot x^3}{3} + \frac{b \cdot (h-x)^3}{3} + \alpha \cdot A_{s1} \cdot (d-x)^2 + \alpha \cdot A_{s2} \cdot (x-d_2)^2$$

I 5,98157E+09 mm<sup>4</sup>

$$v = h - x$$

$$W = \frac{I}{v}$$

v 282 mm

W 2,12430E+07 mm<sup>3</sup>

$$f_{ctm} = \frac{M_{cr}}{W}$$

$$(h-x)/3$$

$$2,5 \cdot (h-d)$$

$$h/2$$

M<sub>cr</sub> 59 kNm

<? M<sub>d</sub>

144

h<sub>1</sub> 137 mm

h<sub>2</sub> 195 mm

h<sub>3</sub> 292,5 mm

A<sub>ceff</sub> 41402 mm min (bh<sub>1</sub>, bh<sub>2</sub>, bh<sub>3</sub>)

$$\frac{A_s}{A_{c,eff}} \rho_{peff}$$

0,02

korte termijn 0,6 / lange termijn 0,4

k<sub>t</sub> 0,4

$$0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

1,063E-03

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_1 \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

1,425E-03

ruw = 0,8 ; glad = 1,6  
buiging = 0,5 ; trek = 1,0

k<sub>1</sub> 0,80

k<sub>2</sub> 0,5

k<sub>3</sub> 3,4

k<sub>4</sub> 0,425

$$s_{r,max} = k_3 C + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$$

1,3 (h-x) 534

S<sub>r,max</sub> 377 mm

keuze (\*) 377

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

w<sub>k</sub> 0,537 mm

**H.2. Balk in trek Eurocode 2 deel 1**

Tabel 153: Inputwaarde EC2-1 balk

| Variërende inputwaarden   |               |
|---------------------------|---------------|
| c                         | 40            |
| fck                       | 34            |
| fyk                       | 500           |
| fct,eff                   | 3,1           |
| breedte                   | 310           |
| Φb                        | 8,36          |
| d1                        | 57,91         |
| d                         | 558,52        |
| hoogte                    | 616,43        |
| Act                       | 95546,65      |
| kc (trek)                 | 1             |
| k                         | 0,778         |
| aantal staven             | 3             |
| As,min                    | 859           |
| staalspanning             | <b>272,60</b> |
| Φs keuze                  | <b>19,10</b>  |
| Φ' s                      | 13,2          |
| Φscorr                    | <b>19,1</b>   |
| Gebruik tabel EC2 voor wk |               |
| Φscorr                    | 19,0          |
| staalspanning             | 272,6         |
| wk                        | 0,494         |

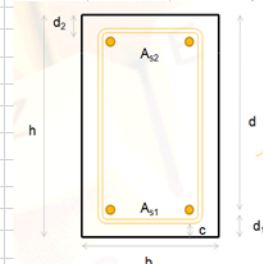
Tabel 154: Interpolatie EC2-1 balk

| interpolatie |         |         |    |
|--------------|---------|---------|----|
| sigma        | 153 y1  | 0,1 x1  | wk |
|              | 272,6 y | 0,494 x |    |
|              | 396 y2  | 0,9 x2  |    |



### H.3. Balk in trek Eurocode 2 deel 3

| grenstoestand   | GGT Q  |                   | = in te vullen    | geldig tot  | Taal :   | NL             |      |
|---|--|-------------------|-------------------|---|--|----------------|------|
| minimum betondekking voor de scheurwijdte   | c  | 55,95             | mm                |   |  |                |      |
| betonkwaliteit  | f <sub>ck</sub>  | 34                | N/mm <sup>2</sup> |   |  |                |      |
| gemiddelde waarde druksterkte beton   | f <sub>cm</sub>  | 42                |                   | f <sub>cm</sub> := f <sub>ck</sub> + 8  |  |                |      |
| kruiptfactor  | φ  | 2,1               |                   |   |  |                |      |
| staalkwaliteit  | f <sub>yk</sub>  | 400               | N/mm <sup>2</sup> |   |  |                |      |
| elasticiteitsmodulus staal  | E <sub>s</sub>   | 200000            | N/mm <sup>2</sup> |   |  |                |      |
| elasticiteitsmodulus beton  | E <sub>cm</sub>  | 33837             | N/mm <sup>2</sup> | E <sub>cm</sub> := 22000 · (f <sub>cm</sub> /10) <sup>0.30</sup>  |  |                |      |
| hoogte van de doorsnede   | h  | 595               | mm                |   |  |                |      |
| breedte van de doorsnede  | b  | 305               | mm                |   |  |                |      |
| afstand getrokken rand tot zwpt wap As1   | d <sub>1</sub>   | 75,1              | mm                |   |  |                |      |
| afstand gedrukte rand tot zwpt wap As2  | d <sub>2</sub>   | 0,0               | mm                |   |  |                |      |
| nuttige hoogte  | d  | 520,0             | mm                |   |  |                |      |
| Moment in GGT- Q  | M <sub>d</sub>   | 50                | kNm               |   |  |                |      |
| trekwapening  | A <sub>s1</sub>  | 573,04            | mm <sup>2</sup>   | φ <sub>s1</sub>   | 19   | n <sub>1</sub> | 2,00 |
| drukwapening  | A <sub>s2</sub>  | 0                 | mm <sup>2</sup>   | φ <sub>s2</sub>   | 0  | n <sub>2</sub> | 0,00 |
|   |  | 573               |                   | φ <sub>β</sub>  | 10   |                |      |
|   | k := $\frac{Q_p}{Q_m + Q_p}$   | 1                 |                   | Q <sub>m</sub>  | 0  | Q <sub>p</sub> | 2    |
|   |  | 1                 |                   |   |  |                |      |
|   | E <sub>c</sub> := $\frac{E_{cm}}{1 + k \cdot \varphi}$                     | 10915             | N/mm <sup>2</sup> |   |  |                |      |
|   | α := $\frac{E_s}{E_c}$   | 18,3229           |                   |   |  |                |      |
|   | f <sub>ctm</sub>   | 3,149             | N/mm <sup>2</sup> |   |  |                |      |
|   |  |                   |                   |   |  |                |      |
|   | 2,5 · (h-d)  | h1                | 188               | mm  |  |                |      |
|   | h/2  | h2                | 297,5             | mm  |  |                |      |
|   | $\frac{A_s}{A_{c,eff}}$  | A <sub>ceff</sub> | 57226             | mm  | min (bh <sub>1</sub> , bh <sub>2</sub> , bh <sub>3</sub> ) |                |      |
|   |  | p <sub>peff</sub> | 0,01              |   |  |                |      |
| zuivere trek = 1  |  | k <sub>c</sub>    | 1,0               |   |  |                |      |
|   | $\frac{h \leq 300 \text{ mm}}{300 < h < 800}$                              | k                 | 0,8               |   |  |                |      |
|   | $\frac{k = 1.0}{k = 1.21 - 0.7 \cdot \frac{h}{1000}}$                      |                   |                   |   |  |                |      |
|   | $\frac{h \geq 800}{k = 0.65}$  |                   |                   |   |  |                |      |
|   |  |                   | 7,382E-04         | (ε <sub>sm</sub> - ε <sub>cm</sub> ) = $\frac{0.5 \cdot \alpha_c \cdot k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha_c \cdot \rho}\right)}{E_s}$ |  |                |      |
| ruw = 0,8 ; glad = 1,6  |  | k1                | 0,8               |   |  |                |      |
| buiiging = 0,5 ; trek = 1,0   |  | k2                | 1,0               |   |  |                |      |
|   |  | k3                | 3,4               |   |  |                |      |
|   |  | k4                | 0,4               |   |  |                |      |
| S <sub>r,max</sub> = k <sub>3</sub> C + k <sub>1</sub> k <sub>2</sub> k <sub>4</sub> φ/ρ <sub>p,eff</sub> |  | S <sub>max</sub>  | 839               | mm  |  |                |      |
|   | keuze (*)  | w <sub>k</sub>    | 0,619             | mm  |  |                |      |
|   |  |                   |                   |   |  |                |      |
|   | w <sub>k</sub> = S <sub>r,max</sub> · (ε <sub>sm</sub> - ε <sub>cm</sub> ) |                   |                   |   |  |                |      |



### H.4. Plaat in buiging

BALKEN DUBBEL GEWAPEND GGT

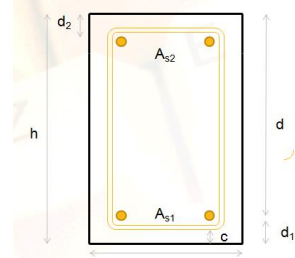
NBN EN 1992-1-1 ANB 2010 versie 2  
 grenstoestand GGT Q = in te vullen Taal : NL

minimum betondekking voor de scheurwijdte  
 betonkwaliteit  
 gemiddelde waarde druksterkte beton  
 kruipfactor  
 staalkwaliteit  
 elasticiteitsmodulus staal  
 elasticiteitsmodulus beton  
 hoogte van de doorsnede  
 breedte van de doorsnede  
 afstand tussen staven tot zwpt wap As1  
 afstand gedrukte rand tot zwpt wap As2  
 nuttige hoogte  
 Moment in GGT-Q  
 afstand tussen staven kleiner dan (\*)  
 trekwapening  
 drukwapening

|          |                   |
|----------|-------------------|
| 42       | mm                |
| 26       | N/mm <sup>2</sup> |
| 34       |                   |
| 1.9      |                   |
| 500      | N/mm <sup>2</sup> |
| 200000   | N/mm <sup>2</sup> |
| 31758,97 | N/mm <sup>2</sup> |
| 238      | mm                |
| 1000     | mm                |
| 47,7     | mm                |
| 0,0      | mm                |
| 190,3    | mm                |
| 56,6     | kNm               |
| 238,65   | mm                |
| 618,89   | mm <sup>2</sup>   |
| 0,00     | mm <sup>2</sup>   |
| 618,89   |                   |
| 1        |                   |
| 10951    | N/mm <sup>2</sup> |
| 18,2626  |                   |

$$f_{cm} := f_{ck} + 8$$

$$E_{cm} := 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.30}$$



|                                       |       |                   |
|---------------------------------------|-------|-------------------|
| toelaatbare drukspanning in het beton | 13,5  | N/mm <sup>2</sup> |
| toelaatbare trekspanning in het staal | 400,0 | N/mm <sup>2</sup> |
| afstand tussen de staven hoh          | 90    | mm                |
| φs1                                   | 11,46 |                   |
| φs2                                   | 0     |                   |
| ρ1                                    | 6,00  |                   |
| ρ2                                    | 0,00  |                   |
| Qm                                    | 0     |                   |
| Qp                                    | 1     | kN                |

$$k := \frac{Q_p}{Q_m + Q_p}$$

$$E_c := \frac{E_{cm}}{1 + k \cdot \varphi}$$

$$\alpha := \frac{E_s}{E_c}$$

mm, mm<sup>2</sup>, kNm, MPa

$$x = \frac{-\alpha \cdot (A_{s1} + A_{s2})}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha \cdot (A_{s1} + A_{s2})}{b}\right)^2 + \frac{2 \cdot \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{b}}$$

|  |      |             |                   |    |      |
|--|------|-------------|-------------------|----|------|
| betondrukhoogte  | x    | 55,247      | mm                | >? | 0    |
| $\sigma_c = \frac{M_{sd} \cdot x}{\frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha \cdot [A_{s1} \cdot (d-x)^2 + A_{s2} \cdot (x-d_2)^2]}$                     | σc   | 12,0        | N/mm <sup>2</sup> | <? | 13,5 |
| $\sigma_{s1} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(d-x)}{x}$  | σs1  | 534,04      | N/mm <sup>2</sup> | <? | 400  |
| $\sigma_{s2} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(x-d_2)}{x}$  | σs2  | 218,51      | N/mm <sup>2</sup> | <? | 400  |
| epalen van het scheurmoment (ongescheurde sectie)  | fctm | 2,633       | N/mm <sup>2</sup> |    |      |
| $x = \frac{\frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{A_{s1} \cdot \alpha + A_{s2} \cdot \alpha + b \cdot h}$ | x    | 122         | mm                |    |      |
| $I_1 = \frac{b \cdot x^3}{3} + \frac{b \cdot (h-x)^3}{3} + \alpha \cdot A_{s1} \cdot (d-x)^2 + \alpha \cdot A_{s2} \cdot (x-d_2)^2$          | I    | 1,17825E+09 | mm <sup>4</sup>   |    |      |

$$v = h - x \quad W = \frac{I}{v}$$

$$f_{ctm} = \frac{M_{cr}}{W}$$

$$\frac{(h-x)^3}{2,5 \cdot (h-d)}$$

$$h/2$$

korte termijn 0,6 / lange termijn 0,4

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_1 \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

ruw = 0,8 ; glad = 1,6  
buijing = 0,5 ; trek = 1,0

$$s_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$$

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$$

|                            |             |                 |
|----------------------------|-------------|-----------------|
| v                          | 116         | mm              |
| W                          | 1,01776E+07 | mm <sup>3</sup> |
| M <sub>cr</sub>            | 26,80       | kNm             |
| h <sub>1</sub>             | 61          | mm              |
| h <sub>2</sub>             | 119         | mm              |
| h <sub>3</sub>             | 119         | mm              |
| A <sub>ceff</sub>          | 60918       | mm              |
| ρ <sub>p,eff</sub>         | 0,01        |                 |
| k <sub>1</sub>             | 0,4         |                 |
| 0,6 $\frac{\sigma_s}{E_s}$ | 1,602E-03   |                 |
|                            | 2,056E-03   |                 |
| k <sub>1</sub>             | 0,80        |                 |
| k <sub>2</sub>             | 0,5         |                 |
| k <sub>3</sub>             | 3,4         |                 |
| k <sub>4</sub>             | 0,425       |                 |
| 1,3 (h-x)                  | 238         | mm              |
| s <sub>r,max</sub>         | 335         | mm              |
| keuze (*)                  | 238         |                 |
| w <sub>k</sub>             | 0,488       | mm              |

<? M<sub>d</sub>

56,8

min (bh<sub>1</sub>, bh<sub>2</sub>, bh<sub>3</sub>)

### H.5. Plaat in trek Eurocode 2 deel 1

Tabel 155: Inputwaarde EC2-1 plaat

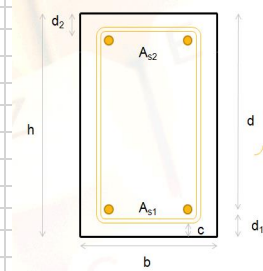
| Variërende inputwaarden   |               |
|---------------------------|---------------|
| c                         | 30            |
| fck                       | 34            |
| fyk                       | 500           |
| fct,eff                   | 3,1           |
| breedte                   | 1000          |
| $\Phi_b$                  | 0             |
| d1                        | 41,94         |
| d                         | 220,06        |
| hoogte                    | 262           |
| Act                       | 131000        |
| kc (trek)                 | 1             |
| k                         | 1,027         |
| aantal staven             | 4             |
| As,min                    | 1798,00       |
| staalspanning             | <b>235,50</b> |
| $\Phi_s$ keuze            | <b>23,88</b>  |
| $\Phi' s$                 | 28,2          |
| $\Phi_{scorr}$            | <b>23,875</b> |
| Gebruik tabel EC2 voor wk |               |
| $\Phi_{scorr}$            | 23,9          |
| staalspanning             | 235,5         |
| wk                        | 0,430         |

Tabel 156: Interpolatie EC2-1 plaat

| interpolatie |         |          |    |
|--------------|---------|----------|----|
| sigma        | 129 y1  | 0,1 x1   | wk |
|              | 235,5 y | 0,4302 x |    |
|              | 387 y2  | 0,9 x2   |    |

## H.6. Plaat in trek Eurocode 2 deel 3

| grenstoestand   | GGT Q   |                    | = in te vullen    | Taal :   | NL   |
|---|---|--------------------|-------------------|--|--|
| minimum betondekking voor de scheurwijdte               | c   | 42                 | mm                |  |  |
| betonkwaliteit  | $f_{ck}$  | 29                 | N/mm <sup>2</sup> |  |  |
| gemiddelde waarde druksterkte beton                     | $f_{cm}$  | 37                 |                   | $f_{cm} := f_{ck} + 8$   |  |
| kruiplfactor  | $\varphi$   | 1,3                |                   |  |  |
| staalkwaliteit  | $f_{yk}$  | 500                | N/mm <sup>2</sup> |  |  |
| elasticiteitsmodulus staal                              | $E_s$   | 200000             | N/mm <sup>2</sup> |  |  |
| elasticiteitsmodulus beton                              | $E_{cm}$  | 32574,91           | N/mm <sup>2</sup> | $E_{cm} := 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.30}$  |  |
| hoogte van de doorsnede                                 | h   | 238                | mm                |  |  |
| breedte van de doorsnede                                | b   | 1000               | mm                |  |  |
| afstand getrokken rand tot zwpt wap As1                 | d <sub>1</sub>  | 47,7               | mm                |  |  |
| afstand gedrukte rand tot zwpt wap As2                  | d <sub>2</sub>  | 0,0                | mm                |  |  |
| nuttige hoogte  | d   | 190,3              | mm                | toelaatbare drukspanning in het beton  | 13,5 N/mm <sup>2</sup>                                     |
| Moment in GGT- Q  | M <sub>d</sub>  |                    | kNm               | toelaatbare trekspanning in het staal  | 400,0 N/mm <sup>2</sup>                                    |
| trekwapening  | A <sub>s1</sub>                                       | 928,33             | mm <sup>2</sup>   | $\phi_{s1}$  | 11,46  |
| drukwapening  | A <sub>s2</sub>                                       | 0                  | mm <sup>2</sup>   | $\phi_{s2}$  | 0  |
|   |   | 928                |                   | $\phi\phi$   | 0  |
|   | k := $\frac{Q_p}{Q_m + Q_p}$                          |                    |                   | Q <sub>m</sub>   | 0  |
|   |   | 1                  |                   | Q <sub>p</sub>   | 2 kN   |
| $E_c := \frac{E_{cm}}{1 + k \cdot \varphi}$             | E <sub>c</sub>  | 14163,00           | N/mm <sup>2</sup> |  |  |
| $\alpha := \frac{E_s}{E_c}$                             | $\alpha$  | 14,1213            |                   |  |  |
|   | $f_{ctm}$   | 2,832              | N/mm <sup>2</sup> |  |  |
|   |   |                    |                   |  |  |
|   | $2,5 \cdot (h-d)$                                     | h1                 | 119               | mm   |  |
|   | $h/2$   | h2                 | 119               | mm   |  |
|   | $\frac{A_s}{A_{c,eff}}$                               | A <sub>ceff</sub>  | 119000            | mm   | min (bh <sub>1</sub> , bh <sub>2</sub> , bh <sub>3</sub> ) |
|   |   | $\rho_{p,eff}$     | 0,01              |  |  |
| zuivere trek = 1  |   | k <sub>c</sub>     | 1,0               |  |  |
|   | $\frac{h \leq 300 \text{ mm}}{300 < h < 800}$         | k                  | 1,0               |  |  |
|   | $\frac{k = 1.0}{k = 1.21 - 0.7 \cdot \frac{h}{1000}}$ |                    |                   |  |  |
|   | $\frac{h \geq 800}{k = 0.65}$                         |                    | 1,007E-03         | $(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = \frac{0.5 \cdot \alpha_c \cdot k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha_c \cdot \rho}\right)}{E_s}$ |  |
| ruw = 0,8 ; glad = 1,6                                  |   | k1                 | 0,8               |  |  |
| buiiging = 0,5 ; trek = 1,0                             |   | k2                 | 1,0               |  |  |
|   |   | k3                 | 3,4               |  |  |
|   |   | k4                 | 0,4               |  |  |
| $S_{r,max} = k_3 C + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$   |   | S <sub>r,max</sub> | 642               | mm   |  |
|   | keuze (*)   |                    |                   |  |  |
| $w_k = S_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$ |   | w <sub>k</sub>     | 0,647             | mm   |  |



## I. Cumulatieve en relatieve cumulatieve frequentie

### I.1. *Balk in buiging*

Tabel 157: Cumulatieve en relatieve cumulatieve frequentie bij buiging balk

| Verzamelbereik | Frequentie | Cumulatieve frequentie | Relatieve cumulatieve frequentie |
|----------------|------------|------------------------|----------------------------------|
| 0,100          | 0          | 0                      | 0,00%                            |
| 0,110          | 0          | 0                      | 0,00%                            |
| 0,120          | 0          | 0                      | 0,00%                            |
| 0,130          | 0          | 0                      | 0,00%                            |
| 0,140          | 0          | 0                      | 0,00%                            |
| 0,150          | 0          | 0                      | 0,00%                            |
| 0,160          | 3          | 3                      | 0,00%                            |
| 0,170          | 33         | 36                     | 0,04%                            |
| 0,180          | 206        | 242                    | 0,24%                            |
| 0,190          | 595        | 837                    | 0,84%                            |
| 0,200          | 1157       | 1994                   | 1,99%                            |
| 0,210          | 1759       | 3753                   | 3,75%                            |
| 0,220          | 2408       | 6161                   | 6,16%                            |
| 0,230          | 3165       | 9326                   | 9,33%                            |
| 0,240          | 4059       | 13385                  | 13,39%                           |
| 0,250          | 4428       | 17813                  | 17,81%                           |
| 0,260          | 5115       | 22928                  | 22,93%                           |
| 0,270          | 5348       | 28276                  | 28,28%                           |
| 0,280          | 5598       | 33874                  | 33,87%                           |
| 0,290          | 5745       | 39619                  | 39,62%                           |
| 0,300          | 5964       | 45583                  | 45,58%                           |
| 0,310          | 5794       | 51377                  | 51,38%                           |
| 0,320          | 5780       | 57157                  | 57,16%                           |
| 0,330          | 5508       | 62665                  | 62,67%                           |
| 0,340          | 5104       | 67769                  | 67,77%                           |
| 0,350          | 4897       | 72666                  | 72,67%                           |
| 0,360          | 4433       | 77099                  | 77,10%                           |
| 0,370          | 3907       | 81006                  | 81,01%                           |
| 0,380          | 3555       | 84561                  | 84,56%                           |
| 0,390          | 3055       | 87616                  | 87,62%                           |
| 0,400          | 2634       | 90250                  | 90,25%                           |
| 0,410          | 2283       | 92533                  | 92,53%                           |
| 0,420          | 1938       | 94471                  | 94,47%                           |
| 0,430          | 1539       | 96010                  | 96,01%                           |
| 0,440          | 1128       | 97138                  | 97,14%                           |
| 0,450          | 874        | 98012                  | 98,01%                           |
| 0,460          | 706        | 98718                  | 98,72%                           |
| 0,470          | 485        | 99203                  | 99,20%                           |
| 0,480          | 329        | 99532                  | 99,53%                           |

|       |     |        |         |
|-------|-----|--------|---------|
| 0,490 | 236 | 99768  | 99,77%  |
| 0,500 | 119 | 99887  | 99,89%  |
| 0,510 | 72  | 99959  | 99,96%  |
| 0,520 | 27  | 99986  | 99,99%  |
| 0,530 | 10  | 99996  | 100,00% |
| 0,540 | 4   | 100000 | 100,00% |

## I.2. Balk in trek Eurocode 2 deel 1

Tabel 158: Cumulatieve en Relatieve cumulatieve frequentie bij EC2-1 balk

| Verzamelbereik | Frequentie | Cumulatieve frequentie | Relatieve cumulatieve frequentie |
|----------------|------------|------------------------|----------------------------------|
| 0,10           | 0          | 0                      | 0,00%                            |
| 0,11           | 0          | 0                      | 0,00%                            |
| 0,12           | 0          | 0                      | 0,00%                            |
| 0,13           | 0          | 0                      | 0,00%                            |
| 0,14           | 0          | 0                      | 0,00%                            |
| 0,15           | 0          | 0                      | 0,00%                            |
| 0,16           | 0          | 0                      | 0,00%                            |
| 0,17           | 0          | 0                      | 0,00%                            |
| 0,18           | 51         | 51                     | 0,05%                            |
| 0,19           | 220        | 271                    | 0,27%                            |
| 0,20           | 558        | 829                    | 0,83%                            |
| 0,21           | 1005       | 1834                   | 1,83%                            |
| 0,22           | 1634       | 3468                   | 3,47%                            |
| 0,23           | 2317       | 5785                   | 5,79%                            |
| 0,24           | 3006       | 8791                   | 8,79%                            |
| 0,25           | 3824       | 12615                  | 12,62%                           |
| 0,26           | 4418       | 17033                  | 17,03%                           |
| 0,27           | 5172       | 22205                  | 22,21%                           |
| 0,28           | 5771       | 27976                  | 27,98%                           |
| 0,29           | 6270       | 34246                  | 34,25%                           |
| 0,30           | 6524       | 40770                  | 40,77%                           |
| 0,31           | 6829       | 47599                  | 47,60%                           |
| 0,32           | 6729       | 54328                  | 54,33%                           |
| 0,33           | 6638       | 60966                  | 60,97%                           |
| 0,34           | 6191       | 67157                  | 67,16%                           |
| 0,35           | 5650       | 72807                  | 72,81%                           |
| 0,36           | 4988       | 77795                  | 77,80%                           |
| 0,37           | 4446       | 82241                  | 82,24%                           |
| 0,38           | 3906       | 86147                  | 86,15%                           |
| 0,39           | 3343       | 89490                  | 89,49%                           |
| 0,40           | 2809       | 92299                  | 92,30%                           |
| 0,41           | 2299       | 94598                  | 94,60%                           |
| 0,42           | 1750       | 96348                  | 96,35%                           |

|             |      |        |         |
|-------------|------|--------|---------|
| <b>0,43</b> | 1347 | 97695  | 97,70%  |
| <b>0,44</b> | 964  | 98659  | 98,66%  |
| <b>0,45</b> | 625  | 99284  | 99,28%  |
| <b>0,46</b> | 372  | 99656  | 99,66%  |
| <b>0,47</b> | 231  | 99887  | 99,89%  |
| <b>0,48</b> | 90   | 99977  | 99,98%  |
| <b>0,49</b> | 22   | 99999  | 100,00% |
| <b>0,50</b> | 1    | 100000 | 100,00% |

### I.3. Balk in trek Eurocode 2 deel 3

Tabel 159: Cumulatieve en relatieve cumulatieve frequentie bij EC2-3 balk

| <b>Verzamelbereik</b> | <b>Frequentie</b> | <b>Cumulatieve frequentie</b> | <b>Relatieve cumulatieve frequentie</b> |
|-----------------------|-------------------|-------------------------------|---|
| <b>0,10</b>           | 0                 | 0                             | 0,00%                                   |
| <b>0,11</b>           | 0                 | 0                             | 0,00%                                   |
| <b>0,12</b>           | 0                 | 0                             | 0,00%                                   |
| <b>0,13</b>           | 0                 | 0                             | 0,00%                                   |
| <b>0,14</b>           | 0                 | 0                             | 0,00%                                   |
| <b>0,15</b>           | 0                 | 0                             | 0,00%                                   |
| <b>0,16</b>           | 0                 | 0                             | 0,00%                                   |
| <b>0,17</b>           | 0                 | 0                             | 0,00%                                   |
| <b>0,18</b>           | 13                | 13                            | 0,01%                                   |
| <b>0,19</b>           | 127               | 140                           | 0,14%                                   |
| <b>0,20</b>           | 455               | 595                           | 0,60%                                   |
| <b>0,21</b>           | 1102              | 1697                          | 1,70%                                   |
| <b>0,22</b>           | 2116              | 3813                          | 3,81%                                   |
| <b>0,23</b>           | 2950              | 6763                          | 6,76%                                   |
| <b>0,24</b>           | 3525              | 10288                         | 10,29%                                  |
| <b>0,25</b>           | 3907              | 14195                         | 14,20%                                  |
| <b>0,26</b>           | 4243              | 18438                         | 18,44%                                  |
| <b>0,27</b>           | 4258              | 22696                         | 22,70%                                  |
| <b>0,28</b>           | 4211              | 26907                         | 26,91%                                  |
| <b>0,29</b>           | 4103              | 31010                         | 31,01%                                  |
| <b>0,30</b>           | 4112              | 35122                         | 35,12%                                  |
| <b>0,31</b>           | 3955              | 39077                         | 39,08%                                  |
| <b>0,32</b>           | 4013              | 43090                         | 43,09%                                  |
| <b>0,33</b>           | 3882              | 46972                         | 46,97%                                  |
| <b>0,34</b>           | 3843              | 50815                         | 50,82%                                  |
| <b>0,35</b>           | 3665              | 54480                         | 54,48%                                  |
| <b>0,36</b>           | 3618              | 58098                         | 58,10%                                  |
| <b>0,37</b>           | 3683              | 61781                         | 61,78%                                  |
| <b>0,38</b>           | 3619              | 65400                         | 65,40%                                  |
| <b>0,39</b>           | 3519              | 68919                         | 68,92%                                  |



|             |      |        |         |
|-------------|------|--------|---------|
| <b>0,40</b> | 3479 | 72398  | 72,40%  |
| <b>0,41</b> | 3426 | 75824  | 75,82%  |
| <b>0,42</b> | 3327 | 79151  | 79,15%  |
| <b>0,43</b> | 3067 | 82218  | 82,22%  |
| <b>0,44</b> | 2858 | 85076  | 85,08%  |
| <b>0,45</b> | 2738 | 87814  | 87,81%  |
| <b>0,46</b> | 2462 | 90276  | 90,28%  |
| <b>0,47</b> | 2083 | 92359  | 92,36%  |
| <b>0,48</b> | 1770 | 94129  | 94,13%  |
| <b>0,49</b> | 1486 | 95615  | 95,62%  |
| <b>0,50</b> | 1230 | 96845  | 96,85%  |
| <b>0,51</b> | 920  | 97765  | 97,77%  |
| <b>0,52</b> | 723  | 98488  | 98,49%  |
| <b>0,53</b> | 530  | 99018  | 99,02%  |
| <b>0,54</b> | 390  | 99408  | 99,41%  |
| <b>0,55</b> | 257  | 99665  | 99,67%  |
| <b>0,56</b> | 151  | 99816  | 99,82%  |
| <b>0,57</b> | 96   | 99912  | 99,91%  |
| <b>0,58</b> | 48   | 99960  | 99,96%  |
| <b>0,59</b> | 27   | 99987  | 99,99%  |
| <b>0,60</b> | 10   | 99997  | 100,00% |
| <b>0,61</b> | 2    | 99999  | 100,00% |
| <b>0,62</b> | 1    | 100000 | 100,00% |

#### I.4. *Plaat in buiging*

Tabel 160: *Cumulatieve en relatieve cumulatieve frequentie bij buiging plaat*

| Verzamelbereik | Frequentie | Cumulatieve frequentie | Relatieve cumulatieve frequentie |
|----------------|------------|------------------------|----------------------------------|
| <b>0</b>       | 25         | 25                     | 0,03%                            |
| <b>0,17</b>    | 0          | 25                     | 0,03%                            |
| <b>0,18</b>    | 0          | 25                     | 0,03%                            |
| <b>0,19</b>    | 11         | 36                     | 0,04%                            |
| <b>0,2</b>     | 421        | 457                    | 0,46%                            |
| <b>0,21</b>    | 1458       | 1915                   | 1,92%                            |
| <b>0,22</b>    | 3099       | 5014                   | 5,01%                            |
| <b>0,23</b>    | 4740       | 9754                   | 9,75%                            |
| <b>0,24</b>    | 5782       | 15536                  | 15,54%                           |
| <b>0,25</b>    | 6118       | 21654                  | 21,65%                           |
| <b>0,26</b>    | 6028       | 27682                  | 27,68%                           |
| <b>0,27</b>    | 5864       | 33546                  | 33,55%                           |
| <b>0,28</b>    | 5640       | 39186                  | 39,19%                           |
| <b>0,29</b>    | 5569       | 44755                  | 44,76%                           |
| <b>0,3</b>     | 5473       | 50228                  | 50,23%                           |
| <b>0,31</b>    | 5396       | 55624                  | 55,62%                           |

|      |      |        |         |
|------|------|--------|---------|
| 0,32 | 5336 | 60960  | 60,96%  |
| 0,33 | 5399 | 66359  | 66,36%  |
| 0,34 | 5209 | 71568  | 71,57%  |
| 0,35 | 4887 | 76455  | 76,46%  |
| 0,36 | 4741 | 81196  | 81,20%  |
| 0,37 | 4346 | 85542  | 85,54%  |
| 0,38 | 3848 | 89390  | 89,39%  |
| 0,39 | 3097 | 92487  | 92,49%  |
| 0,4  | 2376 | 94863  | 94,86%  |
| 0,41 | 1835 | 96698  | 96,70%  |
| 0,42 | 1333 | 98031  | 98,03%  |
| 0,43 | 877  | 98908  | 98,91%  |
| 0,44 | 531  | 99439  | 99,44%  |
| 0,45 | 314  | 99753  | 99,75%  |
| 0,46 | 143  | 99896  | 99,90%  |
| 0,47 | 68   | 99964  | 99,96%  |
| 0,48 | 31   | 99995  | 100,00% |
| 0,49 | 5    | 100000 | 100,00% |

### 1.5. *Plaat in trek Eurocode 2 deel 1*

Tabel 161: Cumulatieve en relatieve cumulatieve frequentie bij EC2-1 plaat

| Verzamelbereik | Frequentie | Cumulatieve frequentie | Relatieve cumulatieve frequentie |
|----------------|------------|------------------------|----------------------------------|
| 0,17           | 0          | 0                      | 0,00%                            |
| 0,18           | 15         | 15                     | 0,02%                            |
| 0,19           | 273        | 288                    | 0,29%                            |
| 0,2            | 747        | 1035                   | 1,04%                            |
| 0,21           | 1615       | 2650                   | 2,65%                            |
| 0,22           | 2606       | 5256                   | 5,26%                            |
| 0,23           | 3750       | 9006                   | 9,01%                            |
| 0,24           | 4634       | 13640                  | 13,64%                           |
| 0,25           | 5756       | 19396                  | 19,40%                           |
| 0,26           | 6534       | 25930                  | 25,93%                           |
| 0,27           | 7420       | 33350                  | 33,35%                           |
| 0,28           | 8111       | 41461                  | 41,46%                           |
| 0,29           | 8470       | 49931                  | 49,93%                           |
| 0,3            | 8313       | 58244                  | 58,24%                           |
| 0,31           | 7665       | 65909                  | 65,91%                           |
| 0,32           | 6915       | 72824                  | 72,82%                           |
| 0,33           | 6005       | 78829                  | 78,83%                           |
| 0,34           | 5363       | 84192                  | 84,19%                           |
| 0,35           | 4522       | 88714                  | 88,71%                           |
| 0,36           | 3630       | 92344                  | 92,34%                           |

|             |      |        |         |
|-------------|------|--------|---------|
| <b>0,37</b> | 2764 | 95108  | 95,11%  |
| <b>0,38</b> | 2003 | 97111  | 97,11%  |
| <b>0,39</b> | 1355 | 98466  | 98,47%  |
| <b>0,4</b>  | 848  | 99314  | 99,31%  |
| <b>0,41</b> | 446  | 99760  | 99,76%  |
| <b>0,42</b> | 196  | 99956  | 99,96%  |
| <b>0,43</b> | 43   | 99999  | 100,00% |
| <b>0,44</b> | 1    | 100000 | 100,00% |

### **I.6.      *Plaat in trek Eurocode 2 deel 3***

*Tabel 162: Cumulatieve en relatieve cumulatieve frequentie bij EC2-3 plaat*

| <b>Verzamelbereik</b> | <b>Frequentie</b> | <b>Cumulatieve frequentie</b> | <b>Relatieve cumulatieve frequentie</b> |
|-----------------------|-------------------|-------------------------------|---|
| <b>0,14</b>           | 44                | 44                            | 0,04%                                   |
| <b>0,15</b>           | 418               | 462                           | 0,46%                                   |
| <b>0,16</b>           | 1220              | 1682                          | 1,68%                                   |
| <b>0,17</b>           | 2231              | 3913                          | 3,91%                                   |
| <b>0,18</b>           | 3064              | 6977                          | 6,98%                                   |
| <b>0,19</b>           | 3391              | 10368                         | 10,37%                                  |
| <b>0,2</b>            | 3482              | 13850                         | 13,85%                                  |
| <b>0,21</b>           | 3436              | 17286                         | 17,29%                                  |
| <b>0,22</b>           | 3315              | 20601                         | 20,60%                                  |
| <b>0,23</b>           | 3313              | 23914                         | 23,91%                                  |
| <b>0,24</b>           | 3273              | 27187                         | 27,19%                                  |
| <b>0,25</b>           | 3197              | 30384                         | 30,38%                                  |
| <b>0,26</b>           | 2985              | 33369                         | 33,37%                                  |
| <b>0,27</b>           | 3025              | 36394                         | 36,39%                                  |
| <b>0,28</b>           | 2916              | 39310                         | 39,31%                                  |
| <b>0,29</b>           | 3013              | 42323                         | 42,32%                                  |
| <b>0,3</b>            | 2925              | 45248                         | 45,25%                                  |
| <b>0,31</b>           | 2773              | 48021                         | 48,02%                                  |
| <b>0,32</b>           | 2795              | 50816                         | 50,82%                                  |
| <b>0,33</b>           | 2695              | 53511                         | 53,51%                                  |
| <b>0,34</b>           | 2652              | 56163                         | 56,16%                                  |
| <b>0,35</b>           | 2656              | 58819                         | 58,82%                                  |
| <b>0,36</b>           | 2568              | 61387                         | 61,39%                                  |
| <b>0,37</b>           | 2611              | 63998                         | 64,00%                                  |
| <b>0,38</b>           | 2523              | 66521                         | 66,52%                                  |
| <b>0,39</b>           | 2600              | 69121                         | 69,12%                                  |
| <b>0,4</b>            | 2449              | 71570                         | 71,57%                                  |
| <b>0,41</b>           | 2445              | 74015                         | 74,02%                                  |
| <b>0,42</b>           | 2442              | 76457                         | 76,46%                                  |
| <b>0,43</b>           | 2452              | 78909                         | 78,91%                                  |

|             |      |        |         |
|-------------|------|--------|---------|
| <b>0,44</b> | 2288 | 81197  | 81,20%  |
| <b>0,45</b> | 2246 | 83443  | 83,44%  |
| <b>0,46</b> | 2190 | 85633  | 85,63%  |
| <b>0,47</b> | 2079 | 87712  | 87,71%  |
| <b>0,48</b> | 1955 | 89667  | 89,67%  |
| <b>0,49</b> | 1752 | 91419  | 91,42%  |
| <b>0,5</b>  | 1633 | 93052  | 93,05%  |
| <b>0,51</b> | 1386 | 94438  | 94,44%  |
| <b>0,52</b> | 1247 | 95685  | 95,69%  |
| <b>0,53</b> | 1030 | 96715  | 96,72%  |
| <b>0,54</b> | 863  | 97578  | 97,58%  |
| <b>0,55</b> | 660  | 98238  | 98,24%  |
| <b>0,56</b> | 499  | 98737  | 98,74%  |
| <b>0,57</b> | 401  | 99138  | 99,14%  |
| <b>0,58</b> | 321  | 99459  | 99,46%  |
| <b>0,59</b> | 210  | 99669  | 99,67%  |
| <b>0,6</b>  | 143  | 99812  | 99,81%  |
| <b>0,61</b> | 96   | 99908  | 99,91%  |
| <b>0,62</b> | 61   | 99969  | 99,97%  |
| <b>0,63</b> | 26   | 99995  | 100,00% |
| <b>0,64</b> | 4    | 99999  | 100,00% |
| <b>0,65</b> | 1    | 100000 | 100,00% |

# J. Voorbeeld min – max vergelijking

## J.1. Minimale scheurwijdte

NBN EN 1992-1-1 ANB 2010

versie 2

geldig tot

grenstoestand

GGT Q

= in te vullen

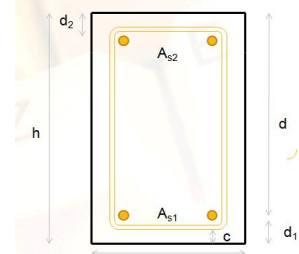
Taal :

minimum betondekking voor de scheurwijdte  
 betonkwaliteit  
 gemiddelde waarde druksterkte beton  
 kruipfactor  
 staalkwaliteit  
 elasticiteitsmodulus staal  
 elasticiteitsmodulus beton  
 hoogte van de doorsnede  
 breedte van de doorsnede  
 afstand getrokken rand tot zwpt wap As1  
 afstand gedrukte rand tot zwpt wap As2  
 nuttige hoogte  
 Moment in GGT- Q  
 afstand tussen staven kleiner dan (\*)  
 trekwapening  
 drukwapening

|                 |         |                   |
|-----------------|---------|-------------------|
| f <sub>ck</sub> | 30      | mm                |
| f <sub>cm</sub> | 30      | N/mm <sup>2</sup> |
| f <sub>cm</sub> | 38      | N/mm <sup>2</sup> |
| φ               | 1,5     |                   |
| f <sub>yk</sub> | 500     | N/mm <sup>2</sup> |
| E <sub>s</sub>  | 200000  | N/mm <sup>2</sup> |
| E <sub>cm</sub> | 32837   | N/mm <sup>2</sup> |
| h               | 600     | mm                |
| b               | 300     | mm                |
| d <sub>1</sub>  | 52,5    | mm                |
| d <sub>2</sub>  | 47,0    | mm                |
| d               | 547,5   | mm                |
| M <sub>d</sub>  | 120     | kNm               |
|                 | 250     | mm                |
| A <sub>s1</sub> | 982     | mm <sup>2</sup>   |
| A <sub>s2</sub> | 308     | mm <sup>2</sup>   |
| k               | 1       |                   |
| E <sub>c</sub>  | 13135   | N/mm <sup>2</sup> |
| α               | 15,2269 |                   |

$$f_{cm} := f_{ck} + 8$$

$$E_{cm} := 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,30}$$



|                                       |       |                   |
|---------------------------------------|-------|-------------------|
| toelaatbare drukspanning in het beton | 13,5  | N/mm <sup>2</sup> |
| toelaatbare trekspanning in het staal | 400,0 | N/mm <sup>2</sup> |
| afstand tussen de staven hoh          | 90    | mm                |
| φ <sub>s1</sub>                       | 25    | mm                |
| φ <sub>s2</sub>                       | 14    | mm                |
| diameter beugel                       | 10    | mm                |
| Q <sub>m</sub>                        | 0     |                   |
| Q <sub>p</sub>                        | 1     | kN                |

$$k := \frac{Q_p}{Q_m + Q_p}$$

$$E_c := \frac{E_{cm}}{1 + k \cdot \varphi}$$

$$\alpha := \frac{E_s}{E_c}$$

mm, mm<sup>2</sup>, kNm, MPa

$$x = \frac{-\alpha \cdot (A_{s1} + A_{s2})}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha \cdot (A_{s1} + A_{s2})}{b}\right)^2 + \frac{2 \cdot \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{b}}$$

betondrukhoogte

|                |         |                   |    |      |
|----------------|---------|-------------------|----|------|
| x              | 180,139 | mm                | >? | 47   |
| σ <sub>c</sub> | 8,1     | N/mm <sup>2</sup> | <? | 13,5 |

$$\sigma_c = \frac{M_{sd} x}{\frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha [A_{s1} \cdot (d-x)^2 + A_{s2} \cdot (x-d_2)^2]}$$

$$\sigma_{s1} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(d-x)}{x}$$

|                 |     |                   |    |     |
|-----------------|-----|-------------------|----|-----|
| σ <sub>s1</sub> | 250 | N/mm <sup>2</sup> | <? | 400 |
|-----------------|-----|-------------------|----|-----|

$$\sigma_{s2} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(x-d_2)}{x}$$

|                 |    |                   |    |     |
|-----------------|----|-------------------|----|-----|
| σ <sub>s2</sub> | 91 | N/mm <sup>2</sup> | <? | 400 |
|-----------------|----|-------------------|----|-----|

oepalen van het scheurmoment (ongescheurde sectie)

|                  |       |                   |
|------------------|-------|-------------------|
| f <sub>ctm</sub> | 2,896 | N/mm <sup>2</sup> |
| x                | 313   | mm                |

$$x = \frac{\frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot d_2)}{A_{s1} \cdot \alpha + A_{s2} \cdot \alpha + b \cdot h}$$

$$I_1 = \frac{b \cdot x^3}{3} + \frac{b \cdot (h-x)^3}{3} + \alpha \cdot A_{s1} \cdot (d-x)^2 + \alpha \cdot A_{s2} \cdot (x-d_2)^2$$

6,58414E+09 mm<sup>4</sup>

$$v = h - x \quad W = \frac{I}{v}$$

$$f_{ctm} = \frac{M_{cr}}{W}$$

$$\frac{(h-x)^3}{2,5 \cdot (h-d)}$$

$$\cdot \frac{h}{2}$$

korte termijn 0,6 / lange termijn 0,4

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_1 \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

ruw = 0,8 ; glad = 1,6  
buiging = 0,5 ; trek = 1,0

$$s_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$$

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$$

|                            |             |     |
|----------------------------|-------------|-----|
| v                          | 287         | mm  |
| W                          | 2,29087E+07 | mm³ |
| M <sub>cr</sub>            | 66          | kNm |
| h <sub>1</sub>             | 140         | mm  |
| h <sub>2</sub>             | 131         | mm  |
| h <sub>3</sub>             | 300         | mm  |
| A <sub>ceff</sub>          | 39375       | mm  |
| ρ <sub>p,eff</sub>         | 0,02        |     |
| k <sub>1</sub>             | 0,4         |     |
| 0,6 $\frac{\sigma_s}{E_s}$ | 7,500E-04   |     |
| 9,294E-04                  |             |     |
| k1                         | 0,80        |     |
| k2                         | 0,5         |     |
| k3                         | 3,4         |     |
| k4                         | 0,425       |     |
| 1,3 (h-x)                  | 546         | mm  |
| S <sub>max</sub>           | 272         | mm  |
| keuze (*)                  | 272         |     |
| w <sub>k</sub>             | 0,2532      | mm  |

M<sub>d</sub> 120

## J.2. Maximale scheurwijdte

### BALKEN DUBBEL GEWAPEND GGT

NBN EN 1992-1-1 ANB 2010

versie 2

geldig tot

grenstoestand

GGT Q

= in te vullen

Taal :

NL

minimum betondekking voor de scheurwijdte

betonkwaliteit

gemiddelde waarde druksterkte beton

kruihfactor

staalkwaliteit

elasticiteitsmodulus staal

elasticiteitsmodulus beton

hoogte van de doorsnede

breedte van de doorsnede

afstand getrokken rand tot zwpt wap As1

afstand gedrukte rand tot zwpt wap As2

nuttige hoogte

Moment in GGT-Q

afstand tussen staven kleiner dan (\*)

trekwapening

drukwapening

$$k := \frac{Q_p}{Q_m + Q_p}$$

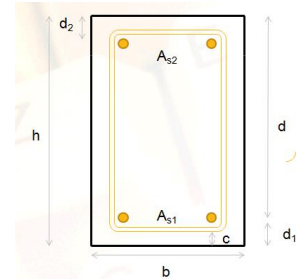
$$E_c := \frac{E_{cm}}{1 + k \cdot \varphi}$$

$$\alpha := \frac{E_s}{E_c}$$

|                 |              |
|-----------------|--------------|
| 55,95           | mm           |
| f <sub>ck</sub> | 30 N/mm²     |
| f <sub>cm</sub> | 38           |
| φ               | 1,5          |
| f <sub>yk</sub> | 500 N/mm²    |
| E <sub>s</sub>  | 200000 N/mm² |
| E <sub>cm</sub> | 32837 N/mm²  |
| h               | 600 mm       |
| b               | 300 mm       |
| d <sub>1</sub>  | 78,5 mm      |
| d <sub>2</sub>  | 73,0 mm      |
| d               | 521,6 mm     |
| M <sub>d</sub>  | 120 kNm      |
| As1             | 250 mm²      |
| As2             | 982 mm²      |
| As2             | 308 mm²      |
| k               | 1            |
| E <sub>c</sub>  | 13135 N/mm²  |
| α               | 15,2269      |

$$f_{ctm} := f_{ck} + 8$$

$$E_{cm} := 22000 \cdot \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,30}$$



toelaatbare drukspanning in het beton

13,5 N/mm²

toelaatbare trekspanning in het staal

400,0 N/mm²

afstand tussen de staven hoh

90 mm

φ<sub>s1</sub>

25

n<sub>1</sub>

2,00

diameter beugel

14

n<sub>2</sub>

2,00

Q<sub>m</sub>

0

Q<sub>p</sub>

1 kN

mm, mm², kNm, MPa

$$x = \frac{-\alpha(A_{s1} + A_{s2})}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha(A_{s1} + A_{s2})}{b}\right)^2 + \frac{2\alpha(A_{s1}d + A_{s2}d_2)}{b}}$$

|  |               |         |                   |    |      |
|--|---------------|---------|-------------------|----|------|
| betondrukhoogte  | x             | 176,498 | mm                | >? | 73   |
| $\sigma_c = \frac{M_{sd}x}{\frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha[A_{s1}(d-x)^2 + A_{s2}(x-d_2)^2]}$ | $\sigma_c$    | 8,9     | N/mm <sup>2</sup> | <? | 13,5 |
| $\sigma_{s1} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(d-x)}{x}$                                  | $\sigma_{s1}$ | 265     | N/mm <sup>2</sup> | <? | 400  |
| $\sigma_{s2} = \alpha \cdot \sigma_c \cdot \frac{(x-d_2)}{x}$                                | $\sigma_{s2}$ | 80      | N/mm <sup>2</sup> | <? | 400  |

|   |           |       |                   |  |  |
|---|-----------|-------|-------------------|--|--|
| oepalen van het scheurmoment (ongescheurde sectie)  | $f_{ctm}$ | 2,896 | N/mm <sup>2</sup> |  |  |
| $x = \frac{\frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha(A_{s1}d + A_{s2}d_2)}{A_{s1} \cdot \alpha + A_{s2} \cdot \alpha + b \cdot h}$ | x         | 311   | mm                |  |  |

$$I_1 = \frac{b \cdot x^3}{3} + \frac{b \cdot (h-x)^3}{3} + \alpha \cdot A_{s1} \cdot (d-x)^2 + \alpha \cdot A_{s2} \cdot (x-d_2)^2$$

|   |             |                 |
|---|-------------|-----------------|
| I | 6,35013E+09 | mm <sup>4</sup> |
|---|-------------|-----------------|

|                              |             |             |                 |  |           |
|------------------------------|-------------|-------------|-----------------|--|-----------|
| $v = h - x$                  | v           | 289         | mm              |  |           |
| $W = \frac{I}{v}$            | W           | 2,19924E+07 | mm <sup>3</sup> |  |           |
| $f_{ctm} = \frac{M_{cr}}{W}$ | $M_{cr}$    | 64          | kNm             | <?   | $M_d$ 120 |
| $(h-x)/3$                    | $h_1$       | 141         | mm              |  |           |
| $2,5 \cdot (h-d)$            | $h_2$       | 196         | mm              |  |           |
| $h/2$                        | $h_3$       | 300         | mm              |  |           |
|                              | $A_{c,eff}$ | 42350       | mm              | min (bh <sub>1</sub> , bh <sub>2</sub> , bh <sub>3</sub> ) |           |

|                                       |                |           |  |  |  |
|---------------------------------------|----------------|-----------|--|--|--|
| $\frac{A_s}{A_{c,eff}}$               | $\rho_{p,eff}$ | 0,02      |  |  |  |
| korte termijn 0,6 / lange termijn 0,4 | $k_t$          | 0,4       |  |  |  |
| $0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$            |                | 7,948E-04 |  |  |  |

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

|  |           |
|--|-----------|
|  | 9,865E-04 |
|--|-----------|

|   |             |        |    |
|---|-------------|--------|----|
| ruw = 0,8 ; glad = 1,6                                  | k1          | 0,80   |    |
| buiging = 0,5 ; trek = 1,0                              | k2          | 0,5    |    |
|   | k3          | 3,4    |    |
|   | k4          | 0,425  |    |
| $S_{r,max} = k_3 C + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$   | 1,3 (h-x)   | 551    |    |
|   | $S_{r,max}$ | 374    |    |
| keuze (*)   |             | 374    |    |
| $W_k = S_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$ | $W_k$       | 0,3685 | mm |

## K. Kolmogorov-Smirnovtoets

### K.1. *Balk in buiging*

Tabel 163: Kolmogorov-Smirnovtoets balk buiging

| Verzamelbereik | Frequentie | cumul  | Sn (x)  | Z-score  | F(x)     | Difference |
|----------------|------------|--------|---------|----------|----------|------------|
| 0,16           | 3          | 3      | 0,00003 | -2,39422 | 0,008328 | 0,0082979  |
| 0,17           | 33         | 36     | 0,00036 | -2,23658 | 0,012657 | 0,012297   |
| 0,18           | 206        | 242    | 0,00242 | -2,07893 | 0,018812 | 0,0163917  |
| 0,19           | 595        | 837    | 0,00837 | -1,92129 | 0,027347 | 0,0189774  |
| 0,20           | 1157       | 1994   | 0,01994 | -1,76365 | 0,038895 | 0,0189554  |
| 0,21           | 1759       | 3753   | 0,03753 | -1,60601 | 0,054136 | 0,016606   |
| 0,22           | 2408       | 6161   | 0,06161 | -1,44837 | 0,073757 | 0,0121473  |
| 0,23           | 3165       | 9326   | 0,09326 | -1,29072 | 0,0984   | 0,0051397  |
| 0,24           | 4059       | 13385  | 0,13385 | -1,13308 | 0,12859  | 0,0052601  |
| 0,25           | 4428       | 17813  | 0,17813 | -0,97544 | 0,164671 | 0,0134589  |
| 0,26           | 5115       | 22928  | 0,22928 | -0,8178  | 0,206736 | 0,0225437  |
| 0,27           | 5348       | 28276  | 0,28276 | -0,66016 | 0,254577 | 0,028183   |
| 0,28           | 5598       | 33874  | 0,33874 | -0,50251 | 0,307653 | 0,0310868  |
| 0,29           | 5745       | 39619  | 0,39619 | -0,34487 | 0,365096 | 0,0310945  |
| 0,30           | 5964       | 45583  | 0,45583 | -0,18723 | 0,42574  | 0,0300895  |
| 0,31           | 5794       | 51377  | 0,51377 | -0,02959 | 0,488198 | 0,0255718  |
| 0,32           | 5780       | 57157  | 0,57157 | 0,128055 | 0,550947 | 0,0206227  |
| 0,33           | 5508       | 62665  | 0,62665 | 0,285697 | 0,612445 | 0,014205   |
| 0,34           | 5104       | 67769  | 0,67769 | 0,443339 | 0,67124  | 0,0064502  |
| 0,35           | 4897       | 72666  | 0,72666 | 0,600981 | 0,726074 | 0,0005862  |
| 0,36           | 4433       | 77099  | 0,77099 | 0,758624 | 0,775961 | 0,0049711  |
| 0,37           | 3907       | 81006  | 0,81006 | 0,916266 | 0,820236 | 0,0101762  |
| 0,38           | 3555       | 84561  | 0,84561 | 1,073908 | 0,858568 | 0,012958   |
| 0,39           | 3055       | 87616  | 0,87616 | 1,23155  | 0,890941 | 0,0147814  |
| 0,40           | 2634       | 90250  | 0,9025  | 1,389192 | 0,917613 | 0,0151128  |
| 0,41           | 2283       | 92533  | 0,92533 | 1,546834 | 0,939048 | 0,0137184  |
| 0,42           | 1938       | 94471  | 0,94471 | 1,704476 | 0,955854 | 0,0111439  |
| 0,43           | 1539       | 96010  | 0,9601  | 1,862119 | 0,968707 | 0,0086068  |
| 0,44           | 1128       | 97138  | 0,97138 | 2,019761 | 0,978296 | 0,0069159  |
| 0,45           | 874        | 98012  | 0,98012 | 2,177403 | 0,985275 | 0,0051547  |
| 0,46           | 706        | 98718  | 0,98718 | 2,335045 | 0,990229 | 0,0030495  |
| 0,47           | 485        | 99203  | 0,99203 | 2,492687 | 0,993661 | 0,001631   |
| 0,48           | 329        | 99532  | 0,99532 | 2,650329 | 0,995979 | 0,0006593  |
| 0,49           | 236        | 99768  | 0,99768 | 2,807971 | 0,997507 | 0,0001727  |
| 0,50           | 119        | 99887  | 0,99887 | 2,965614 | 0,99849  | 0,0003804  |
| 0,51           | 72         | 99959  | 0,99959 | 3,123256 | 0,999106 | 0,0004843  |
| 0,52           | 27         | 99986  | 0,99986 | 3,280898 | 0,999483 | 0,0003774  |
| 0,53           | 10         | 99996  | 0,99996 | 3,43854  | 0,999708 | 0,0002524  |
| 0,54           | 4          | 100000 | 1       |          | 1,0      | 0          |



## K.2. Balk in trek Eurocode 2 deel 1

Tabel 164: Kolmogorov-Smirnovtoets balk EC2-1

| Verzamelbereik | Frequentie | cumul  | Sn(x)   | Z-score  | F(x)     | Difference |
|----------------|------------|--------|---------|----------|----------|------------|
| 0,18           | 51         | 51     | 0,00051 | -2,41891 | 0,007784 | 0,007274   |
| 0,19           | 220        | 271    | 0,00271 | -2,24062 | 0,012525 | 0,009815   |
| 0,20           | 558        | 829    | 0,00829 | -2,06233 | 0,019588 | 0,011298   |
| 0,21           | 1005       | 1834   | 0,01834 | -1,88405 | 0,029779 | 0,011439   |
| 0,22           | 1634       | 3468   | 0,03468 | -1,70576 | 0,044026 | 0,009346   |
| 0,23           | 2317       | 5785   | 0,05785 | -1,52748 | 0,063321 | 0,005471   |
| 0,24           | 3006       | 8791   | 0,08791 | -1,34919 | 0,088637 | 0,000727   |
| 0,25           | 3824       | 12615  | 0,12615 | -1,17091 | 0,120818 | 0,005332   |
| 0,26           | 4418       | 17033  | 0,17033 | -0,99262 | 0,160447 | 0,009883   |
| 0,27           | 5172       | 22205  | 0,22205 | -0,81434 | 0,207726 | 0,014324   |
| 0,28           | 5771       | 27976  | 0,27976 | -0,63605 | 0,262371 | 0,017389   |
| 0,29           | 6270       | 34246  | 0,34246 | -0,45777 | 0,32356  | 0,0189     |
| 0,30           | 6524       | 40770  | 0,4077  | -0,27948 | 0,389938 | 0,017762   |
| 0,31           | 6829       | 47599  | 0,47599 | -0,1012  | 0,459698 | 0,016292   |
| 0,32           | 6729       | 54328  | 0,54328 | 0,07709  | 0,530724 | 0,012556   |
| 0,33           | 6638       | 60966  | 0,60966 | 0,255375 | 0,600783 | 0,008877   |
| 0,34           | 6191       | 67157  | 0,67157 | 0,43366  | 0,667732 | 0,003838   |
| 0,35           | 5650       | 72807  | 0,72807 | 0,611946 | 0,729713 | 0,001643   |
| 0,36           | 4988       | 77795  | 0,77795 | 0,790231 | 0,785304 | 0,007354   |
| 0,37           | 4446       | 82241  | 0,82241 | 0,968517 | 0,833607 | 0,011197   |
| 0,38           | 3906       | 86147  | 0,86147 | 1,146802 | 0,874268 | 0,012798   |
| 0,39           | 3343       | 89490  | 0,8949  | 1,325087 | 0,907429 | 0,012529   |
| 0,40           | 2809       | 92299  | 0,92299 | 1,503373 | 0,933629 | 0,010639   |
| 0,41           | 2299       | 94598  | 0,94598 | 1,681658 | 0,953682 | 0,007702   |
| 0,42           | 1750       | 96348  | 0,96348 | 1,859943 | 0,968553 | 0,005073   |
| 0,43           | 1347       | 97695  | 0,97695 | 2,038229 | 0,979236 | 0,002286   |
| 0,44           | 964        | 98659  | 0,98659 | 2,216514 | 0,986672 | 8,18E-05   |
| 0,45           | 625        | 99284  | 0,99284 | 2,3948   | 0,991685 | 0,001155   |
| 0,46           | 372        | 99656  | 0,99656 | 2,573085 | 0,99496  | 0,0016     |
| 0,47           | 231        | 99887  | 0,99887 | 2,75137  | 0,997033 | 0,001837   |
| 0,48           | 90         | 99977  | 0,99977 | 2,929656 | 0,998303 | 0,001467   |
| 0,49           | 22         | 99999  | 0,99999 | 3,107941 | 0,999058 | 0,000932   |
| 0,50           | 1          | 100000 | 1       |          | 1        | 0          |

### K.3. Balk in trek Eurocode 2 deel 3

Tabel 165: Kolmogorov-Smirnovtoets balk EC2-3

| Verzamelbereik | Frequentie | cumul | Sn(x)   | Z-score  | F(x)      | Difference |
|----------------|------------|-------|---------|----------|-----------|------------|
| 0,18           | 10         | 10    | 0,0001  | -1,98011 | 0,0238453 | 0,0237453  |
| 0,19           | 106        | 116   | 0,00116 | -1,86277 | 0,0312476 | 0,0300876  |
| 0,20           | 454        | 570   | 0,0057  | -1,74542 | 0,0404562 | 0,0347562  |
| 0,21           | 1102       | 1672  | 0,01672 | -1,62807 | 0,0517552 | 0,0350352  |
| 0,22           | 1926       | 3598  | 0,03598 | -1,51072 | 0,06543   | 0,02945    |
| 0,23           | 2763       | 6361  | 0,06361 | -1,39337 | 0,0817539 | 0,0181439  |
| 0,24           | 3429       | 9790  | 0,0979  | -1,27602 | 0,1009739 | 0,0030739  |
| 0,25           | 3955       | 13745 | 0,13745 | -1,15867 | 0,1232947 | 0,0141553  |
| 0,26           | 4032       | 17777 | 0,17777 | -1,04132 | 0,1488625 | 0,0289075  |
| 0,27           | 4209       | 21986 | 0,21986 | -0,92398 | 0,1777495 | 0,0421105  |
| 0,28           | 4035       | 26021 | 0,26021 | -0,80663 | 0,2099407 | 0,0502693  |
| 0,29           | 4093       | 30114 | 0,30114 | -0,68928 | 0,2453241 | 0,0558159  |
| 0,30           | 3958       | 34072 | 0,34072 | -0,57193 | 0,2836849 | 0,0570351  |
| 0,31           | 3932       | 38004 | 0,38004 | -0,45458 | 0,3247054 | 0,0553346  |
| 0,32           | 3866       | 41870 | 0,4187  | -0,33723 | 0,367971  | 0,050729   |
| 0,33           | 3644       | 45514 | 0,45514 | -0,21988 | 0,412981  | 0,042159   |
| 0,34           | 3714       | 49228 | 0,49228 | -0,10253 | 0,4591662 | 0,0331138  |
| 0,35           | 3649       | 52877 | 0,52877 | 0,014814 | 0,5059098 | 0,0228602  |
| 0,36           | 3557       | 56434 | 0,56434 | 0,132163 | 0,5525722 | 0,0117678  |
| 0,37           | 3584       | 60018 | 0,60018 | 0,249512 | 0,5985174 | 0,0016626  |
| 0,38           | 3467       | 63485 | 0,63485 | 0,36686  | 0,6431384 | 0,0082884  |
| 0,39           | 3338       | 66823 | 0,66823 | 0,484209 | 0,6858812 | 0,0176512  |
| 0,40           | 3493       | 70316 | 0,70316 | 0,601558 | 0,7262657 | 0,0231057  |
| 0,41           | 3320       | 73636 | 0,73636 | 0,718906 | 0,7639007 | 0,0275407  |
| 0,42           | 3319       | 76955 | 0,76955 | 0,836255 | 0,7984943 | 0,0289443  |
| 0,43           | 3143       | 80098 | 0,80098 | 0,953604 | 0,8298579 | 0,0288779  |
| 0,44           | 2901       | 82999 | 0,82999 | 1,070953 | 0,8579046 | 0,0279146  |
| 0,45           | 2807       | 85806 | 0,85806 | 1,188301 | 0,8826427 | 0,0245827  |
| 0,46           | 2561       | 88367 | 0,88367 | 1,30565  | 0,9041642 | 0,0204942  |
| 0,47           | 2281       | 90648 | 0,90648 | 1,422999 | 0,9226318 | 0,0161518  |
| 0,48           | 2015       | 92663 | 0,92663 | 1,540348 | 0,9382622 | 0,0116322  |
| 0,49           | 1732       | 94395 | 0,94395 | 1,657696 | 0,9513106 | 0,0073606  |
| 0,50           | 1407       | 95802 | 0,95802 | 1,775045 | 0,9620548 | 0,0040348  |
| 0,51           | 1142       | 96944 | 0,96944 | 1,892394 | 0,9707807 | 0,0013407  |
| 0,52           | 833        | 97777 | 0,97777 | 2,009742 | 0,9777708 | 7,733E-07  |
| 0,53           | 716        | 98493 | 0,98493 | 2,127091 | 0,9832937 | 0,0016363  |
| 0,54           | 497        | 98990 | 0,9899  | 2,24444  | 0,9875979 | 0,0023021  |
| 0,55           | 368        | 99358 | 0,99358 | 2,361789 | 0,9909065 | 0,0026735  |
| 0,56           | 258        | 99616 | 0,99616 | 2,479137 | 0,993415  | 0,002745   |
| 0,57           | 178        | 99794 | 0,99794 | 2,596486 | 0,9952909 | 0,0026491  |
| 0,58           | 90         | 99884 | 0,99884 | 2,713835 | 0,9966745 | 0,0021655  |

|      |    |        |         |          |           |           |
|------|----|--------|---------|----------|-----------|-----------|
| 0,59 | 62 | 99946  | 0,99946 | 2,831184 | 0,9976812 | 0,0017788 |
| 0,60 | 33 | 99979  | 0,99979 | 2,948532 | 0,9984036 | 0,0013864 |
| 0,61 | 13 | 99992  | 0,99992 | 3,065881 | 0,9989149 | 0,0010051 |
| 0,62 | 4  | 99996  | 0,99996 | 3,18323  | 0,9992718 | 0,0006882 |
| 0,63 | 4  | 100000 | 1       |          | 1         | 0         |

#### K.4. *Plaat in buiging*

Tabel 166: Kolmogorov-Smirnovtoets plaat buiging

| Verzamelbereik | Frequentie | cumul  | Sn(x)   | Z-score  | F(x)     | Difference |
|----------------|------------|--------|---------|----------|----------|------------|
| 0              | 25         | 25     | 0,00025 | -5,28854 | 6,16E-08 | 0,0002499  |
| 0,17           | 0          | 25     | 0,00025 | -2,32396 | 0,010064 | 0,0098138  |
| 0,18           | 0          | 25     | 0,00025 | -2,14957 | 0,015794 | 0,0155445  |
| 0,19           | 11         | 36     | 0,00036 | -1,97519 | 0,024123 | 0,0237635  |
| 0,2            | 421        | 457    | 0,00457 | -1,8008  | 0,035867 | 0,0312972  |
| 0,21           | 1458       | 1915   | 0,01915 | -1,62641 | 0,051931 | 0,0327809  |
| 0,22           | 3099       | 5014   | 0,05014 | -1,45203 | 0,073247 | 0,0231072  |
| 0,23           | 4740       | 9754   | 0,09754 | -1,27764 | 0,100688 | 0,0031484  |
| 0,24           | 5782       | 15536  | 0,15536 | -1,10325 | 0,134959 | 0,0204012  |
| 0,25           | 6118       | 21654  | 0,21654 | -0,92887 | 0,176479 | 0,0400606  |
| 0,26           | 6028       | 27682  | 0,27682 | -0,75448 | 0,225281 | 0,051539   |
| 0,27           | 5864       | 33546  | 0,33546 | -0,58009 | 0,280926 | 0,0545336  |
| 0,28           | 5640       | 39186  | 0,39186 | -0,4057  | 0,34248  | 0,0493803  |
| 0,29           | 5569       | 44755  | 0,44755 | -0,23132 | 0,408534 | 0,0390161  |
| 0,3            | 5473       | 50228  | 0,50228 | -0,05693 | 0,4773   | 0,02498    |
| 0,31           | 5396       | 55624  | 0,55624 | 0,117456 | 0,546751 | 0,0094895  |
| 0,32           | 5336       | 60960  | 0,6096  | 0,291842 | 0,614796 | 0,0051965  |
| 0,33           | 5399       | 66359  | 0,66359 | 0,466229 | 0,679474 | 0,0158843  |
| 0,34           | 5209       | 71568  | 0,71568 | 0,640616 | 0,739114 | 0,023434   |
| 0,35           | 4887       | 76455  | 0,76455 | 0,815003 | 0,792465 | 0,0279147  |
| 0,36           | 4741       | 81196  | 0,81196 | 0,98939  | 0,838764 | 0,0268038  |
| 0,37           | 4346       | 85542  | 0,85542 | 1,163777 | 0,877743 | 0,0223227  |
| 0,38           | 3848       | 89390  | 0,8939  | 1,338164 | 0,909578 | 0,0156784  |
| 0,39           | 3097       | 92487  | 0,92487 | 1,51255  | 0,934803 | 0,009933   |
| 0,4            | 2376       | 94863  | 0,94863 | 1,686937 | 0,954192 | 0,0055623  |
| 0,41           | 1835       | 96698  | 0,96698 | 1,861324 | 0,968651 | 0,0016708  |
| 0,42           | 1333       | 98031  | 0,98031 | 2,035711 | 0,97911  | 0,0011997  |
| 0,43           | 877        | 98908  | 0,98908 | 2,210098 | 0,986451 | 0,0026292  |
| 0,44           | 531        | 99439  | 0,99439 | 2,384485 | 0,991448 | 0,0029415  |
| 0,45           | 314        | 99753  | 0,99753 | 2,558871 | 0,994749 | 0,0027806  |
| 0,46           | 143        | 99896  | 0,99896 | 2,733258 | 0,996864 | 0,0020956  |
| 0,47           | 68         | 99964  | 0,99964 | 2,907645 | 0,998179 | 0,0014608  |
| 0,48           | 31         | 99995  | 0,99995 | 3,082032 | 0,998972 | 0,000978   |
| 0,49           | 5          | 100000 | 1       |          | 1        | 0          |

### K.5. Plaat in trek Eurocode 2 deel 1

Tabel 167: Kolmogorov-Smirnovtoets plaat EC2-1

| Verzamelbereik | Frequentie | cumul  | Sn(x)   | Z-score  | F(x)     | Difference |
|----------------|------------|--------|---------|----------|----------|------------|
| 0,18           | 15         | 15     | 0,00015 | -2,45285 | 0,007086 | 0,0069364  |
| 0,19           | 273        | 288    | 0,00288 | -2,23329 | 0,012765 | 0,0098849  |
| 0,20           | 747        | 1035   | 0,01035 | -2,01372 | 0,022019 | 0,0116692  |
| 0,21           | 1615       | 2650   | 0,0265  | -1,79416 | 0,036394 | 0,0098938  |
| 0,22           | 2606       | 5256   | 0,05256 | -1,5746  | 0,057675 | 0,0051149  |
| 0,23           | 3750       | 9006   | 0,09006 | -1,35503 | 0,087704 | 0,0023562  |
| 0,24           | 4634       | 13640  | 0,1364  | -1,13547 | 0,12809  | 0,00831    |
| 0,25           | 5756       | 19396  | 0,19396 | -0,9159  | 0,179859 | 0,0141008  |
| 0,26           | 6534       | 25930  | 0,2593  | -0,69634 | 0,243109 | 0,0161911  |
| 0,27           | 7420       | 33350  | 0,3335  | -0,47677 | 0,316762 | 0,0167379  |
| 0,28           | 8111       | 41461  | 0,41461 | -0,25721 | 0,398509 | 0,0161008  |
| 0,29           | 8470       | 49931  | 0,49931 | -0,03764 | 0,484986 | 0,0143239  |
| 0,30           | 8313       | 58244  | 0,58244 | 0,181921 | 0,572178 | 0,0102622  |
| 0,31           | 7665       | 65909  | 0,65909 | 0,401486 | 0,655969 | 0,0031212  |
| 0,32           | 6915       | 72824  | 0,72824 | 0,621051 | 0,732717 | 0,0044768  |
| 0,33           | 6005       | 78829  | 0,78829 | 0,840615 | 0,799718 | 0,0114282  |
| 0,34           | 5363       | 84192  | 0,84192 | 1,06018  | 0,855469 | 0,0135486  |
| 0,35           | 4522       | 88714  | 0,88714 | 1,279744 | 0,899682 | 0,0125425  |
| 0,36           | 3630       | 92344  | 0,92344 | 1,499309 | 0,933103 | 0,0096633  |
| 0,37           | 2764       | 95108  | 0,95108 | 1,718874 | 0,957181 | 0,0061013  |
| 0,38           | 2003       | 97111  | 0,97111 | 1,938438 | 0,973715 | 0,0026051  |
| 0,39           | 1355       | 98466  | 0,98466 | 2,158003 | 0,984536 | 0,0001238  |
| 0,40           | 848        | 99314  | 0,99314 | 2,377568 | 0,991286 | 0,0018536  |
| 0,41           | 446        | 99760  | 0,9976  | 2,597132 | 0,9953   | 0,0023003  |
| 0,42           | 196        | 99956  | 0,99956 | 2,816697 | 0,997574 | 0,001986   |
| 0,43           | 43         | 99999  | 0,99999 | 3,036261 | 0,998802 | 0,0011877  |
| 0,44           | 1          | 100000 | 1       |          | 1        | 0          |

### K.6. Plaat in trek Eurocode 2 deel 3

Tabel 168: Kolmogorov-Smirnovtoets plaat EC2-3

| Verzamelbereik | Frequentie | cumul | Sn(x)   | Z-score  | F(x)     | Difference |
|----------------|------------|-------|---------|----------|----------|------------|
| 0,14           | 44         | 44    | 0,00044 | -1,71668 | 0,043019 | 0,0425789  |
| 0,15           | 418        | 462   | 0,00462 | -1,62515 | 0,052065 | 0,0474449  |
| 0,16           | 1220       | 1682  | 0,01682 | -1,53363 | 0,062561 | 0,0457406  |
| 0,17           | 2231       | 3913  | 0,03913 | -1,4421  | 0,074637 | 0,0355067  |
| 0,18           | 3064       | 6977  | 0,06977 | -1,35058 | 0,088415 | 0,0186454  |
| 0,19           | 3391       | 10368 | 0,10368 | -1,25905 | 0,104006 | 0,0003258  |
| 0,20           | 3482       | 13850 | 0,1385  | -1,16753 | 0,121499 | 0,0170011  |
| 0,21           | 3436       | 17286 | 0,17286 | -1,076   | 0,140963 | 0,0318967  |
| 0,22           | 3315       | 20601 | 0,20601 | -0,98448 | 0,162441 | 0,0435692  |

|      |      |        |         |          |          |           |
|------|------|--------|---------|----------|----------|-----------|
| 0,23 | 3313 | 23914  | 0,23914 | -0,89295 | 0,185942 | 0,0531981 |
| 0,24 | 3273 | 27187  | 0,27187 | -0,80142 | 0,211443 | 0,0604272 |
| 0,25 | 3197 | 30384  | 0,30384 | -0,7099  | 0,238883 | 0,0649568 |
| 0,26 | 2985 | 33369  | 0,33369 | -0,61837 | 0,268164 | 0,0655256 |
| 0,27 | 3025 | 36394  | 0,36394 | -0,52685 | 0,299149 | 0,0647907 |
| 0,28 | 2916 | 39310  | 0,3931  | -0,43532 | 0,331664 | 0,0614361 |
| 0,29 | 3013 | 42323  | 0,42323 | -0,3438  | 0,365499 | 0,0577308 |
| 0,30 | 2925 | 45248  | 0,45248 | -0,25227 | 0,400415 | 0,0520648 |
| 0,31 | 2773 | 48021  | 0,48021 | -0,16075 | 0,436146 | 0,0440637 |
| 0,32 | 2795 | 50816  | 0,50816 | -0,06922 | 0,472407 | 0,0357534 |
| 0,33 | 2695 | 53511  | 0,53511 | 0,022304 | 0,508897 | 0,0262128 |
| 0,34 | 2652 | 56163  | 0,56163 | 0,113829 | 0,545313 | 0,0163166 |
| 0,35 | 2656 | 58819  | 0,58819 | 0,205355 | 0,581352 | 0,0068375 |
| 0,36 | 2568 | 61387  | 0,61387 | 0,29688  | 0,616721 | 0,002851  |
| 0,37 | 2611 | 63998  | 0,63998 | 0,388406 | 0,651142 | 0,011162  |
| 0,38 | 2523 | 66521  | 0,66521 | 0,479931 | 0,684362 | 0,0191518 |
| 0,39 | 2600 | 69121  | 0,69121 | 0,571456 | 0,716155 | 0,0249448 |
| 0,40 | 2449 | 71570  | 0,7157  | 0,662982 | 0,746329 | 0,0306289 |
| 0,41 | 2445 | 74015  | 0,74015 | 0,754507 | 0,774728 | 0,0345776 |
| 0,42 | 2442 | 76457  | 0,76457 | 0,846033 | 0,801233 | 0,0366627 |
| 0,43 | 2452 | 78909  | 0,78909 | 0,937558 | 0,825764 | 0,0366742 |
| 0,44 | 2288 | 81197  | 0,81197 | 1,029083 | 0,84828  | 0,0363098 |
| 0,45 | 2246 | 83443  | 0,83443 | 1,120609 | 0,868773 | 0,0343428 |
| 0,46 | 2190 | 85633  | 0,85633 | 1,212134 | 0,88727  | 0,0309395 |
| 0,47 | 2079 | 87712  | 0,87712 | 1,30366  | 0,903825 | 0,0267052 |
| 0,48 | 1955 | 89667  | 0,89667 | 1,395185 | 0,91852  | 0,02185   |
| 0,49 | 1752 | 91419  | 0,91419 | 1,486711 | 0,931454 | 0,0172644 |
| 0,50 | 1633 | 93052  | 0,93052 | 1,578236 | 0,942744 | 0,0122243 |
| 0,51 | 1386 | 94438  | 0,94438 | 1,669761 | 0,952517 | 0,0081367 |
| 0,52 | 1247 | 95685  | 0,95685 | 1,761287 | 0,960905 | 0,0040551 |
| 0,53 | 1030 | 96715  | 0,96715 | 1,852812 | 0,968045 | 0,0008954 |
| 0,54 | 863  | 97578  | 0,97578 | 1,944338 | 0,974073 | 0,0017074 |
| 0,55 | 660  | 98238  | 0,98238 | 2,035863 | 0,979118 | 0,0032621 |
| 0,56 | 499  | 98737  | 0,98737 | 2,127389 | 0,983306 | 0,0040639 |
| 0,57 | 401  | 99138  | 0,99138 | 2,218914 | 0,986754 | 0,0046263 |
| 0,58 | 321  | 99459  | 0,99459 | 2,310439 | 0,989568 | 0,0050219 |
| 0,59 | 210  | 99669  | 0,99669 | 2,401965 | 0,991846 | 0,0048436 |
| 0,60 | 143  | 99812  | 0,99812 | 2,49349  | 0,993675 | 0,0044447 |
| 0,61 | 96   | 99908  | 0,99908 | 2,585016 | 0,995131 | 0,0039487 |
| 0,62 | 61   | 99969  | 0,99969 | 2,676541 | 0,996281 | 0,0034093 |
| 0,63 | 26   | 99995  | 0,99995 | 2,768067 | 0,997181 | 0,0027695 |
| 0,64 | 4    | 99999  | 0,99999 | 2,859592 | 0,997879 | 0,0021109 |
| 0,65 | 1    | 100000 | 1       | 2,951117 | 1        | 0         |

# Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:  
**Onderzoek naar een objectieve en representatieve kwantificatie en kwalificatie van scheuren in betonconstructies**

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,

**Hulsmans, Friedl**

**Öztürk, Esra**

Datum: **15/01/2018**