

**Het voorkomen of uitstellen van concrete rip-off en peeling  
door bijkomende verankering bij balken in gewapend  
beton, versterkt met opgelijmde multidirectionele  
koolstofvezelwapening**

**The prevention or delay of concrete rip-off and peeling by  
additional anchoring at beams in reinforced concrete,  
strengthened by externally bonded multidirectional carbon  
composites**

Scriptie voorgedragen tot het bekomen van de graad van

**Master in de toegepaste ingenieurswetenschappen: bouwkunde**

**Dieter VANHAEGENBERG**

**David D'HESPEEL**

**Thomas COOREVITS**

**Promotor Hogeschool Gent**

**Hendrik VAN HOECKE**

*Deze Masterproef kon niet tot stand komen zonder de hulp van enkele personen en instanties. Elkeen heeft op zijn manier ervoor gezorgd dat wij in de beste omstandigheden dit onderzoek konden uitvoeren.*

*Onze dank gaat uit naar*

***ir. Hendrik Van Hoecke***

*voor zijn begeleiding van onze Masterproef, zijn sturende hand en zijn goede raad*

***dhr. Lucien Van Boxtael***

*voor zijn hulp bij de praktische uitwerking van de proeven en  
voor zijn aangenaam gezelschap tijdens de vaak lange labosessies*

***het bedrijf ECC nv***

*voor het aanbrengen van deze Masterproef en de technische ondersteuning*

***prof. dr. ir. Stijn Matthys en ir. Lander Vasseur***

*voor de theoretische ondersteuning*

***Thomas Desmarez en Wim Van Audenhove***

*voor een samenwerking bij enkele labosessies*

***het onderwijzend en ondersteunend personeel van de Hogeschool Gent,  
Vakgroep Bouwkunde – Landmeten***

***onze familie en vrienden en alle anderen die op één of andere manier  
bijgedragen hebben tot deze Masterproef***

Dieter Vanhaegenberg

David D'Hespeel

Thomas Coorevits

Gent, mei 2008

### Nederlands

---

Deze masterproef handelt over het voorkomen of uitstellen van concrete rip-off en peeling door gebruik te maken van bijkomende verankeringen bij balken in gewapend beton, die versterkt zijn met opgelijmde multidirectionele koolstofvezelwapening. Hiertoe worden twee reeksen balken in gewapend beton, versterkt met opgelijmde multidirectionele koolstofvezelwapening en bijkomende verankering, onderworpen aan een vierpuntsbuigproef. Van de vele parameters die een invloed kunnen hebben op het voorkomen of uitstellen van concrete-rip off en peeling worden de volgende onderzocht: het type anker (chemische ankers, mechanische ankers, nagels), de ankerdiameter, de verankeringslengte, de tussenafstand tussen de ankers en het al dan niet verlijmen van de verdeelplaatjes op de koolstofvezelwapening. De aldus bekomen meetresultaten worden nadien ook vergeleken met theoretisch berekende waarden die berekend zijn m.b.v. formules uit de vakliteratuur, al dan niet aangevuld met eventuele correctiefactoren.

### English

---

This thesis concerns the prevention or delay of concrete rip-off and peeling by using additional anchoring at beams in reinforced concrete, strengthened by externally bonded multidirectional carbon composites. For this purpose two sets of beams in reinforced concrete, strengthened by externally bonded carbon composites and additional anchorage, are tested by a four point bending test. From the many parameters that may have an influence on the prevention or delay of concrete rip-off and peeling, the following are investigated: the type of anchor (adhesive anchor, mechanical anchor, nail), the anchorage diameter, the anchorage length, the intermediate distance between the anchors and the question as to the bonding of metal plates. Afterwards the test results are compared to theoretically calculated values, calculated with formulas from literature, whether or not completed with any correction factors.

Woord vooraf.....	2
Abstract .....	3
Nederlands .....	3
English.....	3
Inhoudsopgave.....	4
Lijst met figuren, grafieken en tabellen.....	16
Inleiding.....	28
1    Onderzoeksaanpak .....	30
1.1    Werkpakket 1: Literatuurstudie .....	30
1.2    Werkpakket 2: Labo-onderzoek .....	30
1.3    Werkpakket 3: Modellerings .....	33
2    State-of-the-art.....	34
3    Materiaalkarakteristieken .....	39
3.1    Beton.....	39
3.1.1    Reeks 1.....	39
3.1.1.1    Algemene betondruksterkte .....	39
3.1.1.2    Specifieke betondruksterkte.....	42
3.1.2    Reeks 2.....	47
3.1.2.1    Drukproeven op gegoten stukken .....	47
3.1.2.2    Drukproeven op uitgeboorde kernen.....	52
3.1.2.2.1    Algemene betondruksterkte.....	52
3.1.2.2.2    Specifieke betondruksterkte .....	55
3.1.2.3    Statische elasticiteitsmodulus bij druk.....	70
3.2    Wapeningsstaal .....	71
3.2.1    Reeks 1.....	71
3.2.2    Reeks 2.....	71
3.2.2.1    Elasticiteitsmodulus.....	71
3.2.2.2    Bepaling van de vloeigrens en de treksterkte .....	84
3.3    Multidirectionele koolstofvezelwapening.....	88
4    Reeks 1 .....	89
4.1    Voorcalculatie .....	89
4.1.1    Onversterkte balken.....	89
4.1.1.1    Opbouw en dimensionering .....	89

4.1.1.2	Theoretische berekeningen.....	91
4.1.1.2.1	Het gedrag van de balk .....	91
4.1.1.2.2	UGT .....	92
4.1.1.2.3	GGT .....	93
4.1.1.2.4	Bezwijkmoment .....	94
4.1.1.2.5	Dwarskrachtencapaciteit .....	96
4.1.1.2.6	Doorbuiging .....	96
4.1.1.2.6.1	Initieel scheurmoment .....	97
4.1.1.2.6.2	Ongescheurde toestand .....	98
4.1.1.2.6.3	Gescheurde toestand .....	100
4.1.2	Versterkte balken.....	102
4.1.2.1	Opbouw en dimensionering .....	102
4.1.2.2	Theoretische berekeningen.....	104
4.1.2.2.1	UGT .....	104
4.1.2.2.2	GGT .....	105
4.1.2.2.3	Bezwijkmoment .....	107
4.1.2.2.4	Dwarskrachtencapaciteit .....	108
4.1.2.2.5	Doorbuiging .....	110
4.1.2.2.5.1	Initieel scheurmoment .....	110
4.1.2.2.5.2	Ongescheurde toestand .....	112
4.1.2.2.5.3	Gescheurde toestand .....	113
4.1.2.2.6	Breukmechanismen.....	116
4.1.2.2.6.1	Volgens CUR Aanbeveling 91 .....	116
4.1.2.2.6.2	Volgens FIB Bulletin 14.....	121
4.2	Balk B1.....	129
4.2.1	Algemeen.....	129
4.2.2	Materiaalkarakteristieken.....	130
4.2.3	Meetresultaten .....	131
4.2.3.1	Zakking t.h.v de vijzels .....	131
4.2.3.2	Zakking in het midden van de overspanning.....	131
4.2.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250 .....	133
4.2.3.4	Breukkracht .....	133
4.2.4	Besluit .....	134
4.2.4.1	Lasten .....	134
4.2.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	134
4.2.4.3	Doorbuiging .....	135
4.2.4.4	Scheurvorming .....	135

4.3	Balk BL1.....	137
4.3.1	Algemeen.....	137
4.3.2	Materiaalkarakteristieken.....	138
4.3.3	Meetresultaten.....	139
4.3.3.1	Zakking t.h.v. de vizels.....	139
	Zakking in het midden van de overspanning.....	139
4.3.3.2	Doorbuiging L/500 en L/250.....	141
4.3.3.3	Breukkracht.....	141
4.3.3.4	Foto's.....	142
4.3.4	Besluit.....	142
4.3.4.1	Lasten.....	142
4.3.4.2	Dwarskrachtencapaciteit.....	143
4.3.4.3	Doorbuiging.....	143
4.3.4.4	Scheurvorming.....	143
4.3.4.5	Breukmechanismen.....	144
4.4	Balk BLA1.1.....	145
4.4.1	Algemeen.....	145
4.4.2	Materiaalkarakteristieken.....	147
4.4.3	Meetresultaten.....	148
4.4.3.1	Zakking t.h.v. de vizels.....	148
4.4.3.2	Zakking in het midden van de overspanning.....	149
4.4.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250.....	150
4.4.3.4	Breukkracht.....	151
4.4.3.5	Foto's.....	152
4.4.4	Besluit.....	153
4.4.4.1	Lasten.....	153
4.4.4.2	Dwarskrachtencapaciteit.....	153
4.4.4.3	Doorbuiging.....	154
4.4.4.4	Scheurvorming.....	154
4.4.4.5	Breukmechanismen.....	155
4.5	Balk BLA1.2.....	156
4.5.1	Algemeen.....	156
4.5.2	Materiaalkarakteristieken.....	158
4.5.3	Meetresultaten.....	159
4.5.3.1	Zakking t.h.v. de vizels.....	159
4.5.3.2	Zakking in het midden van de overspanning.....	160
4.5.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250.....	161
4.5.3.4	Breukkracht.....	162
4.5.3.5	Foto's.....	163

4.5.4	Besluit .....	164
4.5.4.1	Lasten .....	164
4.5.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	164
4.5.4.3	Doorbuiging .....	165
4.5.4.4	Scheurvorming .....	165
4.5.4.5	Breukmechanismen .....	166
4.6	Balk BLA1.3 .....	167
4.6.1	Algemeen.....	167
4.6.2	Materiaalkarakteristieken.....	169
4.6.3	Meetresultaten .....	170
4.6.3.1	Zakking t.h.v. de vijzels .....	170
4.6.3.2	Zakking in het midden van de overspanning.....	171
4.6.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250.....	172
4.6.3.4	Breukkracht.....	173
4.6.3.5	Foto's .....	174
4.6.4	Besluit .....	175
4.6.4.1	Lasten .....	175
4.6.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	175
4.6.4.3	Doorbuiging.....	176
4.6.4.4	Scheurvorming .....	176
4.6.4.5	Breukmechanismen .....	177
4.7	Analyse resultaten reeks 1.....	178
4.7.1	Breukkracht.....	178
4.7.2	Andere kenmerkende krachten.....	179
4.7.3	Dwarskrachtencapaciteit.....	179
4.7.4	Doorbuiging .....	179
4.7.5	Scheurvorming.....	183
4.7.6	Besluit .....	183
5	Reeks 2.....	184
5.1	Voorcalculatie .....	184
5.1.1	Onversterkte balken.....	184
5.1.1.1	Opbouw en dimensionering .....	184
5.1.1.2	Theoretische berekeningen.....	186
5.1.1.2.1	Het gedrag van de balk .....	186
5.1.1.2.2	UGT .....	187
5.1.1.2.3	GGT .....	188
5.1.1.2.4	Bezwijkmoment .....	189
5.1.1.2.5	Dwarskrachtencapaciteit .....	191
5.1.1.2.6	Doorbuiging .....	191

5.1.1.2.6.1	Initieel scheurmoment .....	192
5.1.1.2.6.2	Ongescheurde toestand .....	193
5.1.1.2.6.3	Gescheurde toestand .....	195
5.1.2	Versterkte balken .....	197
5.1.2.1	Opbouw en dimensionering .....	197
5.1.2.2	Theoretische berekeningen .....	199
5.1.2.2.1	UGT .....	199
5.1.2.2.2	GGT .....	201
5.1.2.2.3	Bezwijkmoment .....	202
5.1.2.2.4	Dwarskrachtencapaciteit .....	204
5.1.2.2.5	Doorbuiging .....	204
5.1.2.2.5.1	Initieel scheurmoment .....	205
5.1.2.2.5.2	Ongescheurde toestand .....	207
5.1.2.2.5.3	Gescheurde toestand .....	208
5.1.2.2.6	Rek in de koolstofvezelwapening .....	211
5.1.2.2.7	Breukmechanismen .....	214
5.1.2.2.7.1	Volgens CUR Aanbeveling 91 .....	214
5.1.2.2.7.2	Volgens FIB Bulletin 14 .....	219
5.2	Balk B2 .....	227
5.2.1	Algemeen .....	227
5.2.2	Materiaalkarakteristieken .....	228
5.2.3	Meetresultaten .....	229
5.2.3.1	Zakking t.h.v. de vizels .....	229
5.2.3.2	Zakking in het midden van de overspanning .....	229
5.2.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250 .....	230
5.2.3.4	Breukkracht .....	231
5.2.3.5	Foto's .....	231
5.2.4	Besluit .....	232
5.2.4.1	Lasten .....	232
5.2.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	232
5.2.4.3	Doorbuiging .....	233
5.2.4.4	Scheurvorming .....	234
5.3	Balk BL2.1 .....	235
5.3.1	Algemeen .....	235
5.3.2	Materiaalkarakteristieken .....	236



5.3.3	Meetresultaten .....	237
5.3.3.1	Zakking t.h.v. de vizels .....	237
5.3.3.2	Zakking in het midden van de overspanning.....	237
5.3.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250 .....	239
5.3.3.4	Breukkracht .....	239
5.3.3.5	Foto's .....	240
5.3.4	Besluit .....	241
5.3.4.1	Lasten .....	241
5.3.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	241
5.3.4.3	Doorbuiging .....	242
5.3.4.4	Scheurvorming .....	242
5.3.4.5	Breukmechanismen .....	243
5.4	Balk BLA2.1 .....	244
5.4.1	Algemeen.....	244
5.4.2	Materiaalkarakteristieken.....	245
5.4.3	Meetresultaten .....	246
5.4.3.1	Zakking t.h.v. de vizels .....	246
5.4.3.2	Zakking in het midden van de overspanning.....	247
5.4.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250 .....	249
5.4.3.4	Breukkracht .....	249
5.4.3.5	Foto's .....	250
5.4.4	Besluit .....	251
5.4.4.1	Lasten .....	251
5.4.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	251
5.4.4.3	Doorbuiging .....	252
5.4.4.4	Scheurvorming .....	252
5.4.4.5	Breukmechanismen .....	253
5.5	Balk BLA2.2 .....	254
5.5.1	Algemeen.....	254
5.5.2	Materiaalkarakteristieken.....	255
5.5.3	Meetresultaten .....	256
5.5.3.1	Zakking t.h.v. de vizels .....	256
5.5.3.2	Zakking in het midden van de overspanning.....	257
5.5.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250 .....	259
5.5.3.4	Breukkracht .....	259
5.5.3.5	Foto's .....	260

5.5.4	Besluit .....	261
5.5.4.1	Lasten .....	261
5.5.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	261
5.5.4.3	Doorbuiging .....	262
5.5.4.4	Scheurvorming .....	262
5.5.4.5	Breukmechanismen .....	263
5.6	Balk BLA2.3 .....	264
5.6.1	Algemeen.....	264
5.6.2	Materiaalkarakteristieken.....	265
5.6.3	Meetresultaten .....	266
5.6.3.1	Zakking t.h.v. de vijzels .....	266
5.6.3.2	Zakking in het midden van de overspanning.....	267
5.6.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250.....	269
5.6.3.4	Breukkracht.....	269
5.6.3.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	270
5.6.3.6	Foto's .....	271
5.6.4	Besluit .....	272
5.6.4.1	Lasten .....	272
5.6.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	273
5.6.4.3	Doorbuiging .....	273
5.6.4.4	Scheurvorming .....	274
5.6.4.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	275
5.6.4.6	Breukmechanismen .....	277
5.7	Balk BLA2.4 .....	278
5.7.1	Algemeen.....	278
5.7.2	Materiaalkarakteristieken.....	279
5.7.3	Meetresultaten .....	280
5.7.3.1	Zakking t.h.v. de vijzels .....	280
5.7.3.2	Zakking in het midden van de overspanning.....	281
5.7.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250.....	282
5.7.3.4	Breukkracht.....	283
5.7.3.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	284
5.7.3.6	Foto's .....	285
5.7.4	Besluit .....	286
5.7.4.1	Lasten .....	286
5.7.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	286
5.7.4.3	Doorbuiging .....	287
5.7.4.4	Scheurvorming .....	288
5.7.4.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	289

5.7.4.6	Breukmechanismen .....	290
5.8	Balk BLA2.5 .....	291
5.8.1	Algemeen.....	291
5.8.2	Materiaalkarakteristieken.....	292
5.8.3	Meetresultaten .....	293
5.8.3.1	Zakking t.h.v. de vizels .....	293
5.8.3.2	Zakking in het midden van de overspanning.....	294
5.8.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250.....	295
5.8.3.4	Breukkracht.....	296
5.8.3.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	297
5.8.3.6	Foto's .....	301
5.8.4	Besluit .....	302
5.8.4.1	Lasten .....	302
5.8.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	303
5.8.4.3	Doorbuiging.....	303
5.8.4.4	Scheurvorming .....	304
5.8.4.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	305
5.8.4.6	Breukmechanismen .....	309
5.9	Balk BLA2.6 .....	310
5.9.1	Algemeen.....	310
5.9.2	Materiaalkarakteristieken.....	311
5.9.3	Meetresultaten .....	312
5.9.3.1	Zakking t.h.v. de vizels .....	312
5.9.3.2	Zakking in het midden van de overspanning.....	313
5.9.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250.....	315
5.9.3.4	Breukkracht.....	315
5.9.3.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	316
5.9.3.6	Foto's .....	317
5.9.4	Besluit .....	318
5.9.4.1	Lasten .....	318
5.9.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	318
5.9.4.3	Doorbuiging.....	319
5.9.4.4	Scheurvorming .....	320
5.9.4.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	321
5.9.4.6	Breukmechanismen .....	323

5.10	Balk BLA2.7 .....	324
5.10.1	Algemeen.....	324
5.10.2	Materiaalkarakteristieken.....	325
5.10.3	Meetresultaten .....	326
5.10.3.1	Zakking t.h.v. de vizels .....	326
5.10.3.2	Zakking in het midden van de overspanning .....	327
5.10.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250 .....	328
5.10.3.4	Breukkracht .....	329
5.10.3.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	330
5.10.3.6	Foto's.....	331
5.10.4	Besluit .....	332
5.10.4.1	Lasten.....	332
5.10.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	332
5.10.4.3	Doorbuiging .....	333
5.10.4.4	Scheurvorming .....	334
5.10.4.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	335
5.10.4.6	Breukmechanismen.....	337
5.11	Balk BLA2.8 .....	338
5.11.1	Algemeen.....	338
5.11.2	Materiaalkarakteristieken.....	339
5.11.3	Meetresultaten .....	340
5.11.3.1	Zakking t.h.v. de vizels .....	340
5.11.3.2	Zakking in het midden van de overspanning .....	341
5.11.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250 .....	342
5.11.3.4	Breukkracht .....	343
5.11.3.5	Foto's.....	344
5.11.4	Besluit .....	345
5.11.4.1	Lasten.....	345
5.11.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	345
5.11.4.3	Doorbuiging .....	346
5.11.4.4	Scheurvorming .....	346
5.11.4.5	Breukmechanismen.....	347
5.12	Balk BLA2.9 .....	348
5.12.1	Algemeen.....	348
5.12.2	Materiaalkarakteristieken.....	349
5.12.3	Meetresultaten .....	350
5.12.3.1	Zakking t.h.v. de vizels .....	350
5.12.3.2	Zakking in het midden van de overspanning .....	351
5.12.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250 .....	352

5.12.3.4	Breukkracht .....	353
5.12.3.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	354
5.12.3.6	Foto's .....	355
5.12.4	Besluit .....	355
5.12.4.1	Lasten .....	356
5.12.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	356
5.12.4.3	Doorbuiging .....	356
5.12.4.4	Scheurvorming .....	357
5.12.4.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	358
5.12.4.6	Breukmechanismen .....	360
5.13	Balk BLA2.10 .....	361
5.13.1	Algemeen .....	361
5.13.2	Materiaalkarakteristieken .....	362
5.13.3	Meetresultaten .....	363
5.13.3.1	Zakking t.h.v. de vizels .....	363
5.13.3.2	Zakking in het midden van de overspanning .....	364
5.13.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250 .....	365
5.13.3.4	Breukkracht .....	366
5.13.3.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	366
5.13.3.6	Foto's .....	368
5.13.4	Besluit .....	369
5.13.4.1	Lasten .....	369
5.13.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	369
5.13.4.3	Doorbuiging .....	370
5.13.4.4	Scheurvorming .....	371
5.13.4.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	372
5.13.4.6	Breukmechanismen .....	374
5.14	Balk BLA2.11 .....	375
5.14.1	Algemeen .....	375
5.14.2	Materiaalkarakteristieken .....	376
5.14.3	Meetresultaten .....	378
5.14.3.1	Zakking t.h.v. de vizels .....	378
5.14.3.2	Zakking in het midden van de overspanning .....	378
5.14.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250 .....	380
5.14.3.4	Breukkracht .....	380
5.14.3.5	Foto's .....	381

5.14.4	Besluit .....	382
5.14.4.1	Lasten .....	382
5.14.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	382
5.14.4.3	Doorbuiging .....	383
5.14.4.4	Scheurvorming .....	383
5.14.4.5	Breukmechanismen .....	384
5.15	Balk BLA2.12 .....	385
5.15.1	Algemeen.....	385
5.15.2	Materiaalkarakteristieken .....	386
5.15.3	Meetresultaten .....	387
5.15.3.1	Zakking t.h.v. de vijzels .....	387
5.15.3.2	Zakking in het midden van de overspanning .....	388
5.15.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250 .....	389
5.15.3.4	Breukkracht .....	390
5.15.3.5	Foto's .....	391
5.15.3.6	Besluit.....	392
5.15.3.7	Lasten .....	392
5.15.3.8	Dwarskrachtencapaciteit .....	392
5.15.3.9	Doorbuiging .....	393
5.15.3.10	Scheurvorming .....	393
5.15.3.11	Breukmechanismen .....	394
5.16	Balk BLA2.13 .....	395
5.16.1	Algemeen.....	395
5.16.2	Materiaalkarakteristieken .....	396
5.16.3	Meetresultaten .....	397
5.16.3.1	Zakking t.h.v. de vijzels .....	397
5.16.3.2	Zakking in het midden van de overspanning .....	398
5.16.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250 .....	400
5.16.3.4	Breukkracht .....	400
5.16.3.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	401
5.16.3.6	Foto's .....	402
5.16.4	Besluit .....	403
5.16.4.1	Lasten .....	403
5.16.4.2	Dwarskrachtencapaciteit .....	403
5.16.4.3	Doorbuiging .....	404
5.16.4.4	Scheurvorming .....	405
5.16.4.5	Rek van de koolstofvezelwapening .....	406
5.16.4.6	Breukmechanismen .....	408

5.17	Balk BL2.2.....	409
5.17.1	Algemeen.....	409
5.17.2	Materiaalkarakteristieken.....	410
5.17.3	Meetresultaten.....	411
5.17.3.1	Zakking t.h.v. de vizzels.....	411
5.17.3.2	Zakking in het midden van de overspanning.....	411
5.17.3.3	Doorbuiging L/500 en L/250.....	413
5.17.3.4	Breukkracht.....	413
5.17.3.5	Foto's.....	414
5.17.4	Besluit.....	414
5.17.4.1	Lasten.....	414
5.17.4.2	Dwarskrachtencapaciteit.....	415
5.17.4.3	Doorbuiging.....	415
5.17.4.4	Scheurvorming.....	416
5.17.4.5	Breukmechanismen.....	416
5.18	Analyse resultaten reeks 2.....	417
5.18.1	Breukkracht.....	417
5.18.2	Andere kenmerkende krachten.....	423
5.18.3	Dwarskrachtencapaciteit.....	424
5.18.4	Doorbuiging.....	425
5.18.5	Scheurvorming.....	435
5.18.6	Besluit.....	436
	Algemeen besluit.....	437
	Literatuurlijst.....	438
	Bijlagen.....	440

## Lijst met figuren, grafieken en tabellen

Figuur 1: Proefopstelling vierpuntsbuigproef .....	31
Figuur 2: Detail van een vijzel.....	31
Figuur 3: Momentenlijn en dwarskrachtenlijn van een vierpuntsbuigproef .....	32
Figuur 4: Elektronische meetklok in het midden van de overspanning .....	33
Figuur 5: Elektronische meetklok onder een steunpunt .....	33
Figuur 6: Peeling-off kan zich op verschillende lagen manifesteren .....	35
Figuur 7: Zones waarin peeling-off kan ontstaan .....	36
Figuur 8: Concrete rip-off.....	37
Figuur 9: Dwarsdoorsnede van een onversterkte balk .....	89
Figuur 10: Vooraanzicht wapeningskorf van een onversterkte balk.....	90
Figuur 11: Dwarsdoorsnede wapeningskorf van een onversterkte balk .....	90
Figuur 12: Bepaling van de vijzelkracht in de uiterste grenstoestand .....	92
Figuur 13: Bepaling van de vijzelkracht in de gebruiksgrenstoestand .....	94
Figuur 14: Bepaling van de vijzelkracht in de bezwijktoestand .....	95
Figuur 15: Traagheidsmoment van de niet-gescheurde doorsnede .....	97
Figuur 16: Momentenlijnen behorend bij de werkelijke en de fictieve belasting.....	99
Figuur 17: Traagheidsmoment van de gescheurde doorsnede .....	100
Figuur 18: Dwarsdoorsnede van een versterkte balk .....	102
Figuur 19: Vooraanzicht van de wapeningskorf van een versterkte balk.....	102
Figuur 20: Dwarsdoorsnede A-A wapeningskorf van een versterkte balk .....	103
Figuur 21: Onderaanzicht koolstofvezelwapening van een versterkte balk .....	103
Figuur 22: Bepaling van de vijzelkracht in de uiterste grenstoestand .....	105
Figuur 23: Bepaling van de vijzelkracht in de gebruiksgrenstoestand .....	106
Figuur 24: Bepaling van de vijzelkracht in de bezwijktoestand .....	108
Figuur 25: Traagheidsmoment van de niet-gescheurde doorsnede .....	110
Figuur 26: Momentenlijnen behorend bij de werkelijke en de fictieve belasting.....	112
Figuur 27: Traagheidsmoment van de gescheurde doorsnede .....	114
Figuur 28: Verankeringslengte $l_b$ .....	125
Figuur 29: End shear failure .....	127
Figuur 30: Dwarsdoorsnede balk B1 .....	129
Figuur 31: Schets scheurvorming balk B1 .....	133
Figuur 32: Dwarsdoorsnede balk BL1 .....	137
Figuur 33: Schets scheurvorming balk BL1 .....	141
Figuur 34: Peeling BL1 [1].....	142
Figuur 35: Peeling BL1 [2] .....	142
Figuur 36: Dwarsdoorsnede balk BLA1.1 .....	145
Figuur 37: Vooraanzicht verankering balk BLA1.1.....	146
Figuur 38: Onderaanzicht verankering balk BLA1.1 .....	146
Figuur 39: Schets scheurvorming balk BLA1.1 .....	151
Figuur 40: Scheurvorming balk BLA1.1 .....	152
Figuur 41: Brosse breuk van een anker.....	152
Figuur 42: Onthechting aan het linkeruiteinde .....	152
Figuur 43: Onthechting t.h.v. de linkerankers .....	152
Figuur 44: Dwarsdoorsnede balk BLA1.2 .....	156
Figuur 45: Vooraanzicht verankering BLA1.2 .....	157
Figuur 46: Onderaanzicht verankering balk BLA1.2 .....	157
Figuur 47: Schets scheurvorming BLA1.2 .....	162
Figuur 48: Scheurvorming linkerkant balk BLA1.2.....	163



Figuur 49: Scheurvorming rechterkant balk BLA1.2 .....	163
Figuur 50: Verbrijzeling van het beton .....	163
Figuur 51: Breuk aan het linkerruiteinde .....	163
Figuur 52: Linkerankers gedeeltelijk uit het beton getrokken.....	163
Figuur 53: Onthechting t.h.v. het midden [1].....	163
Figuur 54: Onthechting t.h.v. het midden [2].....	164
Figuur 55: Ingescheurd anker.....	164
Figuur 56: Dwarsdoorsnede balk BLA1.3 .....	167
Figuur 57: Vooraanzicht verankering balk BLA1.3.....	168
Figuur 58: Onderaanzicht verankering balk BLA1.3 .....	168
Figuur 59: Schets scheurvorming balk BLA1.3.....	173
Figuur 60: Scheurvorming linkerkant balk BLA1.3.....	174
Figuur 61: Scheurvorming rechterkant balk BLA1.3 .....	174
Figuur 62: Onthechting in het midden van de overspanning [1].....	174
Figuur 63: Onthechting in het midden van de overspanning [2].....	174
Figuur 64: Afgebroken anker .....	174
Figuur 65: Geplooid anker .....	174
Figuur 66: Dwarsdoorsnede van een onversterkte balk .....	184
Figuur 67: Vooraanzicht wapeningskorf van een onversterkte balk.....	185
Figuur 68: Dwarsdoorsnede wapeningskorf van een onversterkte balk .....	185
Figuur 69: Bepaling van de vjzelkracht in de uiterste grenstoestand .....	187
Figuur 70: Bepaling van de vjzelkracht in de gebruiksgrenstoestand .....	189
Figuur 71: Bepaling van de vjzelkracht in de bezwijktoestand .....	190
Figuur 72: Traagheidsmoment van de niet-gescheurde doorsnede .....	192
Figuur 73: Momentenlijnen behorend bij de werkelijke en de fictieve belasting.....	194
Figuur 74: Traagheidsmoment van de gescheurde doorsnede .....	195
Figuur 75: Dwarsdoorsnede van een versterkte balk .....	197
Figuur 76: Vooraanzicht van de wapeningskorf van een versterkte balk .....	197
Figuur 77: Dwarsdoorsnede A-A wapeningskorf van een versterkte balk .....	198
Figuur 78: Onderaanzicht koolstofvezelwapening van een versterkte balk .....	198
Figuur 79: Bepaling van de lengte van de koolstofvezelwapening .....	199
Figuur 80: Bepaling van de vjzelkracht in de uiterste grenstoestand .....	200
Figuur 81: Bepaling van de vjzelkracht in de gebruiksgrenstoestand .....	201
Figuur 82: Bepaling van de vjzelkracht in de bezwijktoestand .....	203
Figuur 83: Traagheidsmoment van de niet-gescheurde doorsnede .....	205
Figuur 84: Momentenlijnen behorend bij de werkelijke en de fictieve belasting.....	207
Figuur 85: Traagheidsmoment van de gescheurde doorsnede .....	209
Figuur 86: Verankeringslengt $l_b$ .....	223
Figuur 87: End shear failure .....	225
Figuur 88: Dwarsdoorsnede balk B2 .....	227
Figuur 89: Schets scheurvorming balk B2 .....	231
Figuur 90: Scheurvorming balk B2 [1] .....	231
Figuur 91: Scheurvorming balk B2 [2] .....	231
Figuur 92: Dwarsdoorsnede balk BL2.1 .....	235
Figuur 93: Schets scheurvorming balk BL2.1 .....	240
Figuur 94: Scheurvorming linkerkant balk BL2.1 .....	240
Figuur 95: Scheurvorming rechterkant balk BL2.1.....	240
Figuur 96: Aanzet tot concrete rip-off [1] .....	240
Figuur 97: Aanzet tot concrete rip-off [2] .....	240
Figuur 98: Dwarsdoorsnede balk BLA2.1 .....	244
Figuur 99: Vooraanzicht verankering balk BLA2.1.....	245
Figuur 100: Onderaanzicht verankering balk BLA2.1 .....	245

Figuur 101: Schets scheurvorming balk BLA2.1 .....	250
Figuur 102: Onthechting t.h.v. de koolstofvezelwapening [1] .....	250
Figuur 103: Onthechting t.h.v. de koolstofvezelwapening [2] .....	250
Figuur 104: Inscheuring M12 anker .....	250
Figuur 105: Inscheuring M10 ankers .....	250
Figuur 106: Dwarsdoorsnede balk BLA2.2 .....	254
Figuur 107: Vooraanzicht verankering BLA2.2 .....	255
Figuur 108: Onderaanzicht verankering BLA2.2 .....	255
Figuur 109: Schets scheurvorming balk BLA2.2 .....	260
Figuur 110: Aanzet tot concrete rip-off scheur .....	260
Figuur 111: Onthechting balk BLA2.2 [1] .....	260
Figuur 112: Onthechting balk BLA2.2 [2] .....	260
Figuur 113: Inscheuring M12 anker .....	260
Figuur 114: Dwarsdoorsnede balk BLA2.3 .....	264
Figuur 115: Vooraanzicht verankering balk BLA2.3 .....	265
Figuur 116: Onderaanzicht verankering balk BLA2.3 .....	265
Figuur 117: Schets scheurvorming balk BLA2.3 .....	270
Figuur 118: Scheurvorming linkerkant balk BLA2.3 .....	271
Figuur 119: Scheurvorming rechterkant balk BLA2.3 .....	271
Figuur 120: Onthechting door scheuroverbrugging [1] .....	272
Figuur 121: Onthechting door scheuroverbrugging [2] .....	272
Figuur 122: Geen inscheuringen zichtbaar .....	272
Figuur 123: Dwarsdoorsnede balk BLA2.4 .....	278
Figuur 124: Vooraanzicht verankering BLA2.4 .....	279
Figuur 125: Onderaanzicht verankering BLA2.4 .....	279
Figuur 126: Schets scheurvorming balk BLA2.4 .....	283
Figuur 127: Scheurvorming linkerkant balk BLA2.4 .....	285
Figuur 128: Scheurvorming linkerkant balk BLA2.4 .....	285
Figuur 129: Onthechting aan het rechtereinde .....	285
Figuur 130: Rechterankers .....	285
Figuur 131: Dwarsdoorsnede balk BLA2.5 .....	291
Figuur 132: Vooraanzicht verankering balk BLA2.5 .....	292
Figuur 133: Onderaanzicht verankering balk BLA2.5 .....	292
Figuur 134: Schets scheurvorming balk BLA2.5 .....	296
Figuur 135: Scheurvorming linkerkant balk BLA2.5 .....	301
Figuur 136: Scheurvorming rechterkant BLA2.5 .....	301
Figuur 137: Onthechting aan de linkerkant [1] .....	302
Figuur 138: Inscheuringen van de koolstofvezelwapening .....	302
Figuur 139: Onthechting aan de linkerkant [2] .....	302
Figuur 140: Dwarsdoorsnede balk BLA2.6 .....	310
Figuur 141: Vooraanzicht verankering BLA2.6 .....	311
Figuur 142: Onderaanzicht verankering BLA2.6 .....	311
Figuur 143: Schets scheurvorming balk BLA2.6 .....	315
Figuur 144: Scheurvorming linkerkant balk BLA2.6 .....	317
Figuur 145: Scheurvorming rechterkant balk BLA2.6 .....	317
Figuur 146: Onthechting in het midden .....	317
Figuur 147: Inscheuringen in de koolstofvezelwapening .....	317
Figuur 148: Scheuren na de herbelasting .....	317
Figuur 149: Situatie ankers na de herbelasting .....	317
Figuur 150: Dwarsdoorsnede balk BLA2.7 .....	324
Figuur 151: Vooraanzicht verankering balk BLA2.7 .....	325
Figuur 152: Onderaanzicht verankering balk BLA2.7 .....	325

Figuur 153: Schets scheurvorming balk BLA2.7 .....	329
Figuur 154: Scheurvorming linkerkant balk BLA2.7 .....	331
Figuur 155: Scheurvorming rechterkant balk BLA2.7 .....	331
Figuur 156: Linkerankers na de eerste belastingsfase .....	331
Figuur 157: Ankers na de herbelasting .....	331
Figuur 158: Inscheuringen van meest linkse ankers .....	331
Figuur 159: Dwarsdoorsnede balk BLA2.8 .....	338
Figuur 160: Vooraanzicht verankering balk BLA2.8 .....	339
Figuur 161: Onderaanzicht verankering balk BLA2.8 .....	339
Figuur 162: Schets scheurvorming BLA2.8 .....	343
Figuur 163: Scheurvorming balk BLA2.8 .....	344
Figuur 164: Linkerankers .....	344
Figuur 165: Rechterankers .....	344
Figuur 166: Onthechting t.h.v. een verzwakte laag .....	344
Figuur 167: Verbrotting van het beton na herbelasting .....	344
Figuur 168: Geen inscheuringen in de koolstofvezelwapening .....	344
Figuur 169: Onthechting t.h.v. een verzwakte laag .....	345
Figuur 170: Dwarsdoorsnede balk BLA2.9 .....	348
Figuur 171: Schets scheurvorming BLA2.9 .....	353
Figuur 172: Scheurvorming balk BLA2.9 .....	355
Figuur 173: Ankers worden niet uit het beton getrokken .....	355
Figuur 174: Inscheuringen in de koolstofvezelwapening .....	355
Figuur 175: Dwarsdoorsnede balk BLA2.10 .....	361
Figuur 176: Vooraanzicht verankering balk BLA2.10 .....	362
Figuur 177: Onderaanzicht verankering balk BLA2.10 .....	362
Figuur 178: Schets scheurvorming balk BLA2.10 .....	366
Figuur 179: Scheurvorming balk BLA2.10 .....	368
Figuur 180: Verbrijzeling van het beton in de drukzone .....	368
Figuur 181: Inscheuringen in de koolstofvezelwapening .....	368
Figuur 182: Inscheuringen na de herbelasting .....	368
Figuur 183: Dwarsdoorsnede balk BLA2.11 .....	375
Figuur 184: Vooraanzicht verankering balk BLA2.11 .....	376
Figuur 185: Onderaanzicht verankering balk BLA2.11 .....	376
Figuur 186: Schets scheurvorming van balk BLA2.11 .....	380
Figuur 187: Onthechting door vernageling .....	381
Figuur 188: Scheurvorming balk BLA2.10 .....	381
Figuur 189: Onthechting t.h.v. een verzwakte laag [1] .....	381
Figuur 190: Uitgetrokken ankers .....	381
Figuur 191: Onthechting t.h.v. een verzwakte laag [2] .....	381
Figuur 192: Onthechting t.h.v. een verzwakte laag [3] .....	381
Figuur 193: Dwarsdoorsnede balk BLA2.12 .....	385
Figuur 194: Vooraanzicht verankering balk BLA2.12 .....	386
Figuur 195: Onderaanzicht verankering balk BLA2.12 .....	386
Figuur 196: Schets scheurvorming BLA2.12 .....	390
Figuur 197: Scheurvorming balk BLA2.12 .....	391
Figuur 198: Slip koolstofvezelwapening .....	391
Figuur 199: Linkerkant koolstofvezelwapening .....	391
Figuur 200: Inscheuringen in de koolstofvezelwapening .....	391
Figuur 201: Rechterkant koolstofvezelwapening .....	391
Figuur 202: Dwarsdoorsnede balk BLA2.13 .....	395
Figuur 203: Vooraanzicht verankering BLA2.13 .....	396
Figuur 204: Onderaanzicht verankering BLA2.13 .....	396

Figuur 205: Schets scheurvorming BLA2.13 .....	401
Figuur 206: Scheurvorming balk BLA2.13 .....	402
Figuur 207: Onthechting .....	402
Figuur 208: Onthechting door scheuroverbrugging .....	402
Figuur 209: Aanzet tot onthechting t.h.v. verzwakte laag .....	402
Figuur 210: Uitgetrokken ankers.....	402
Figuur 211: Na de herbelasting .....	402
Figuur 212: Dwarsdoorsnede balk BL2.2 .....	409
Figuur 213: Schets scheurvorming balk BL2.2 .....	413
Figuur 214: Scheurvorming linkerkant balk BL2.2 .....	414
Figuur 215: Scheurvorming rechterkant balk BL2.2.....	414
Figuur 216: Breukmechanisme van balk BL2.2 .....	414
Grafiek 1: Invloed van de ouderdom op de cilinderdruksterkte.....	51
Grafiek 2: Spanning-rekdiagram van staaf 8-2007-blauw in het elastisch gebied .....	78
Grafiek 3: Spanning-rekdiagram van staaf 8-2007-groen in het elastisch gebied.....	78
Grafiek 4: Spanning-rekdiagram van staaf 8-2007-oranje in het elastisch gebied.....	79
Grafiek 5: Spanning-rekdiagram van staaf 8-2006-blauw in het elastisch gebied .....	79
Grafiek 6: Spanning-rekdiagram van staaf 8-2006-groen in het elastisch gebied.....	80
Grafiek 7: Spanning-rekdiagram van staaf 8-2006-oranje in het elastisch gebied.....	80
Grafiek 8: Spanning-rekdiagram van staaf 14-blauw in het elastisch gebied .....	81
Grafiek 9: Spanning-rekdiagram van staaf 14-groen in het elastisch gebied.....	81
Grafiek 10: Spanning-rekdiagram van staaf 14-oranje in het elastisch gebied .....	82
Grafiek 11: Spanning-rekdiagram van staaf 20-blauw in het elastisch gebied.....	82
Grafiek 12: Spanning-rekdiagram van staaf 20-groen in het elastisch gebied.....	83
Grafiek 13: Spanning-rekdiagram van staaf 20-oranje in het elastisch gebied.....	83
Grafiek 14: Theoretische doorbuiging van onversterkte balken in het midden van de overspanning .....	101
Grafiek 15: Theoretische doorbuiging van versterkte balken in het midden van de overspanning .....	115
Grafiek 16: Kracht-zakkingsdiagram van balk B1 t.h.v. de vijzels.....	131
Grafiek 17: Kracht-zakkingsdiagram van balk B1 in het midden van de overspanning .....	131
Grafiek 18: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk B1 in het midden van de overspanning.....	135
Grafiek 19: Werkelijke doorbuiging van balk B1 in het midden van de overspanning.....	136
Grafiek 20: Kracht-zakkingsdiagram van balk BL1 t.h.v. de vijzels.....	139
Grafiek 21: Kracht-zakkingsdiagram van balk BL1 in het midden van de overspanning .....	139
Grafiek 22: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BL1 in het midden van de overspanning.....	143
Grafiek 23: Werkelijke doorbuiging van balk BL1 in het midden van de overspanning.....	144
Grafiek 24: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.1 t.h.v. de vijzels .....	148
Grafiek 25: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.1 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit .....	148
Grafiek 26: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.1 in het midden van de overspanning .....	149
Grafiek 27: Theoretische en werkelijk doorbuiging van balk BLA1.1 in het midden van de overspanning .....	154
Grafiek 28: Werkelijke doorbuiging van balk BLA1.1 in het midden van de overspanning .....	155
Grafiek 29: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.2 t.h.v. de vijzels .....	159
Grafiek 30: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.2 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit .....	159
Grafiek 31: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.2 in het midden van de overspanning .....	160
Grafiek 32: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA1.2 in het midden van de overspanning .....	165
Grafiek 33: Werkelijke doorbuiging van balk BLA1.2 in het midden van de overspanning .....	166
Grafiek 34: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.3 t.h.v. de vijzels .....	170
Grafiek 35: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.3 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit .....	170
Grafiek 36: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.3 in het midden van de overspanning .....	171
Grafiek 37: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA1.3 in het midden van de overspanning .....	176
Grafiek 38: Werkelijke doorbuiging van balk BLA1.3 in het midden van de overspanning .....	177

Grafiek 39: Kracht-zakkingsdiagramma van reeks 1 t.h.v. de vijzels .....	180
Grafiek 40: Kracht-zakkingsdiagramma van reeks 1 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit .....	180
Grafiek 41: Kracht-zakkingsdiagramma van reeks 1 in het midden van de overspanning .....	181
Grafiek 42: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk B1 in het midden van de overspanning .....	182
Grafiek 43: Theoretische en werkelijke doorbuiging van reeks 1 in het midden van de overspanning .....	182
Grafiek 44: Theoretische doorbuiging van onversterkte balken in het midden van de overspanning .....	196
Grafiek 45: Theoretische doorbuiging van versterkte balken in het midden van de overspanning .....	210
Grafiek 46: Theoretisch krach-rekdiagram t.h.v. de koolstofvezelwapening .....	213
Grafiek 47: Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening .....	213
Grafiek 48: Kracht-zakkingsdiagram van balk B2 t.h.v. de vijzels .....	229
Grafiek 49: Kracht-zakkingsdiagram van balk B2 in het midden van de overspanning .....	229
Grafiek 50: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk B2 in het midden van de overspanning .....	233
Grafiek 51: Werkelijke doorbuiging van balk B2 in het midden van de overspanning .....	234
Grafiek 52: Kracht-zakkingsdiagram van balk BL2.1 t.h.v. de vijzels .....	237
Grafiek 53: Kracht-zakkingsdiagram van balk BL2.1 in het midden van de overspanning .....	237
Grafiek 54: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BL2.1 in het midden van de overspanning .....	242
Grafiek 55: Werkelijke doorbuiging van balk BL2.1 in het midden van de overspanning .....	243
Grafiek 56: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.1 t.h.v. de vijzels .....	246
Grafiek 57: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.1 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit .....	247
Grafiek 58: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.1 in het midden van de overspanning .....	247
Grafiek 59: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.1 in het midden van de overspanning .....	252
Grafiek 60: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.1 in het midden van de overspanning .....	253
Grafiek 61: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.2 t.h.v. de vijzels .....	256
Grafiek 62: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.2 t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit .....	257
Grafiek 63: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.2 in het midden van de overspanning .....	257
Grafiek 64: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.2 in het midden van de overspanning .....	262
Grafiek 65: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.2 in het midden van de overspanning .....	263
Grafiek 66: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.3 t.h.v. de vijzels .....	266
Grafiek 67: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.3 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit .....	267
Grafiek 68: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.3 in het midden van de overspanning .....	267
Grafiek 69: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.3 t.h.v. de rekstrookjes 1, 4, 6 en 7 .....	270
Grafiek 70: Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening van balk BLA2.3 .....	271
Grafiek 71: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.3 in het midden van de overspanning .....	273
Grafiek 72: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.3 in het midden van de overspanning .....	274
Grafiek 73: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.3 t.h.v. rekstrookje 1 .....	275
Grafiek 74: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.3 t.h.v. rekstrookje 4 .....	275
Grafiek 75: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.3 t.h.v. rekstrookje 6 .....	276
Grafiek 76: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.3 t.h.v. rekstrookje 7 .....	276
Grafiek 77: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.4 t.h.v. de vijzels .....	280
Grafiek 78: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.4 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit .....	281
Grafiek 79: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.4 in het midden van de overspanning .....	281
Grafiek 80: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.4 t.h.v. de koolstofvezelwapening .....	284
Grafiek 81: Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening van balk BLA2.4 .....	284
Grafiek 82: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.4 in het midden van de overspanning .....	287
Grafiek 83: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.4 in het midden van de overspanning .....	288
Grafiek 84: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.4 t.h.v. rekstrookje 2 .....	289
Grafiek 85: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.4 t.h.v. rekstrookje 5 .....	289
Grafiek 86: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. de vijzels .....	293
Grafiek 87: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit .....	294
Grafiek 88: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.5 in het midden van de overspanning .....	294
Grafiek 89: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 1 .....	297
Grafiek 90: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 2 .....	297

Grafiek 91: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 3 .....	298
Grafiek 92: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 4 .....	298
Grafiek 93: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 6 .....	299
Grafiek 94: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 7 .....	299
Grafiek 95: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 8 .....	300
Grafiek 96: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 9 .....	300
Grafiek 97: Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening van balk BLA2.5 .....	301
Grafiek 98: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.5 in het midden van de overspanning .....	303
Grafiek 99: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.5 in het midden van de overspanning .....	304
Grafiek 100: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 1 .....	305
Grafiek 101: en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 2 .....	305
Grafiek 102: en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 3 .....	306
Grafiek 103: en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 4 .....	306
Grafiek 104: en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 6 .....	307
Grafiek 105: en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 7 .....	307
Grafiek 106: en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 8 .....	308
Grafiek 107: en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 9 .....	308
Grafiek 108: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.6 t.h.v. de vijzels .....	312
Grafiek 109: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.6 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit ....	313
Grafiek 110: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.6 in het midden van de overspanning .....	313
Grafiek 111: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.6 t.h.v. de koolstofvezelwapening .....	316
Grafiek 112: Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening van balk BLA2.6 .....	316
Grafiek 113: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.6 in het midden van de overspanning .....	319
Grafiek 114: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.6 in het midden van de overspanning .....	320
Grafiek 115: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.6 t.h.v. rekstrookje 3 .....	321
Grafiek 116: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.6 t.h.v. rekstrookje 6 .....	321
Grafiek 117: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.6 t.h.v. rekstrookje 7 .....	322
Grafiek 118: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.6 t.h.v. rekstrookje 8 .....	322
Grafiek 119: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 t.h.v. de vijzels .....	326
Grafiek 120: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit ....	327
Grafiek 121: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 in het midden van de overspanning .....	327
Grafiek 122: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.7 t.h.v. de koolstofvezelwapening .....	330
Grafiek 123: Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening van balk BLA2.7 .....	330
Grafiek 124: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.7 in het midden van de overspanning .....	333
Grafiek 125: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.7 in het midden van de overspanning .....	334
Grafiek 126: Theoretisch en werkelijk kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 t.h.v. rekstrookje 3 .....	335
Grafiek 127: Theoretisch en werkelijk kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 t.h.v. rekstrookje 6 .....	335
Grafiek 128: Theoretisch en werkelijk kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 t.h.v. rekstrookje 7 .....	336
Grafiek 129: Theoretisch en werkelijk kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 t.h.v. rekstrookje 8 .....	336
Grafiek 130: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.8 t.h.v. de vijzels .....	340
Grafiek 131: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.8 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit ....	341
Grafiek 132: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.8 in het midden van de overspanning .....	341
Grafiek 133: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.8 in het midden van de overspanning .....	346
Grafiek 134: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.8 in het midden van de overspanning .....	347
Grafiek 135: Vooraanzicht verankering balk BLA2.9 .....	349
Grafiek 136: Onderaanzicht verankering balk BLA2.9 .....	349
Grafiek 137: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.9 t.h.v. de vijzels .....	350
Grafiek 138: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.9 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit ....	351
Grafiek 139: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.9 in het midden van de overspanning .....	351
Grafiek 140: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.9 t.h.v. de koolstofvezelwapening .....	354
Grafiek 141: Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening van balk BLA2.9 .....	354
Grafiek 142: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.9 in het midden van de overspanning .....	356

Grafiek 143: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.9 in het midden van de overspanning .....	357
Grafiek 144: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.9 t.h.v. rekstrookje 1.....	358
Grafiek 145: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.9 t.h.v. rekstrookje 3.....	358
Grafiek 146: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.9 t.h.v. rekstrookje 6.....	359
Grafiek 147: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.9 t.h.v. rekstrookje 9.....	359
Grafiek 148: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.10 t.h.v. de vijzels .....	363
Grafiek 149: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.10 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit ..	364
Grafiek 150: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.10 in het midden van de overspanning .....	364
Grafiek 151: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.10 t.h.v. de koolstofvezelwapening .....	367
Grafiek 152: Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening van balk BLA2.10 .....	367
Grafiek 153: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.10 in het midden van de overspanning ....	370
Grafiek 154: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.10 in het midden van de overspanning .....	371
Grafiek 155: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.10 t.h.v. rekstrookje 1.....	372
Grafiek 156: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.10 t.h.v. rekstrookje 4.....	372
Grafiek 157: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.10 t.h.v. rekstrookje 5.....	373
Grafiek 158: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.10 t.h.v. rekstrookje 7.....	373
Grafiek 159: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.11 t.h.v. de vijzels .....	378
Grafiek 160: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.11 in het midden van de overspanning .....	378
Grafiek 161: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.11 in het midden van de overspanning ....	383
Grafiek 162: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.11 in het midden van de overspanning .....	384
Grafiek 163: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.12 t.h.v. de vijzels .....	387
Grafiek 164: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.12 in het midden van de overspanning .....	388
Grafiek 165: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.12 in het midden van de overspanning ....	393
Grafiek 166: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.12 in het midden van de overspanning .....	394
Grafiek 167: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.13 t.h.v. de vijzels .....	397
Grafiek 168: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.13 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit ..	398
Grafiek 169: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.13 in het midden van de overspanning .....	398
Grafiek 170: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.13 t.h.v. de koolstofvezelwapening .....	401
Grafiek 171: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.13 in het midden van de overspanning ....	404
Grafiek 172: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.13 in het midden van de overspanning .....	405
Grafiek 173: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.13 t.h.v. rekstrookje 6.....	406
Grafiek 174: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.13 t.h.v. rekstrookje 7.....	406
Grafiek 175: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.13 t.h.v. rekstrookje 8.....	407
Grafiek 176: Kracht-zakkingsdiagram van balk BL2.2 t.h.v. de vijzels.....	411
Grafiek 177: Kracht-zakkingsdiagram van balk BL2.2 in het midden van de overspanning .....	411
Grafiek 178: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BL2.2 in het midden van de overspanning .....	415
Grafiek 179: Werkelijke doorbuiging van balk BL2.2 in het midden van de overspanning.....	416
Grafiek 180: Effect van de ankerdiameter van mechanische ankers.....	420
Grafiek 181: Kracht-zakkingsdiagram van de referentiebalken van reeks 2 t.h.v. de vijzels.....	425
Grafiek 182: Effect type anker op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels [1] .....	425
Grafiek 183: Effect type anker op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels [2] .....	426
Grafiek 184: Effect ankerdiameter op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels [1].....	426
Grafiek 185: Effect ankerdiameter op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels [2] .....	427
Grafiek 186: Effect ankerdiameter op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels [3].....	427
Grafiek 187: Effect voorspanning op het kracht-zakkingdiagram t.h.v. de vijzels .....	428
Grafiek 188: Effect verankeringslengte op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels.....	428
Grafiek 189: Effect verlijming van de verdeelplaatjes op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels .....	429
Grafiek 190: Effect verlijming van de koolstofvezelwapening op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels ....	429
Grafiek 191: Effect type anker op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit [1] ....	430
Grafiek 192: Effect type anker op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit [2] ....	431
Grafiek 193: Effect ankerdiameter op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit [1].....	431
Grafiek 194: Effect ankerdiameter op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit [2].....	432

Grafiek 195: Effect ankerdiameter op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit [3]	432
Grafiek 196: Effect voorspanning op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit	433
Grafiek 197: Effect verankeringslengte op kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit	433
Grafiek 198: Effect verlijming verdeelplaatjes op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit	434
Grafiek 199: Kracht geleverd door de linkervijzel	440
Grafiek 200: Kracht geleverd door de rechternijzel	441
Tabel 1: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit reeks 1	40
Tabel 2: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk B1	42
Tabel 3: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BL1	43
Tabel 4: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA1.1	44
Tabel 5: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA1.2	45
Tabel 6: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA1.3	46
Tabel 7: Gemiddelde cilinderdruksterkte en kubusdruksterkte per balk uit reeks 1	46
Tabel 8: Maximale drukkracht en maximale drukspanning op cilinders met een ouderdom van 28 dagen	47
Tabel 9: Maximale drukkracht en maximale drukspanning op kubussen met een ouderdom van 28 dagen	48
Tabel 10: Maximale drukkracht en maximale drukspanning op cilinders met ouderdom van 56 dagen	49
Tabel 11: Maximale drukkracht en maximale drukspanning op kubussen met ouderdom van 56 dagen	50
Tabel 12: Cilinder- en kubusdruksterkte na 28 en na 56 dagen	51
Tabel 13: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit reeks 2	54
Tabel 14: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk B2	55
Tabel 15: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BL2.1	56
Tabel 16: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.1	57
Tabel 17: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.2	58
Tabel 18: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.3	59
Tabel 19: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.4	60
Tabel 20: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.5	60
Tabel 21: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.6	61
Tabel 22: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.7	62
Tabel 23: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.8	63
Tabel 24: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.9	64
Tabel 25: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.10	64
Tabel 26: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.11	65
Tabel 27: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.12	66
Tabel 28: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.13	67
Tabel 29: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BL2.2	67
Tabel 30: Gemiddelde cilinderdruksterkte en kubusdruksterkte per balk uit reeks 2	68
Tabel 31: Gemiddelde cilinderdruksterkte	69
Tabel 32: Meetresultaten eerste prisma	70
Tabel 33: Meetresultaten tweede prisma	70
Tabel 34: Staaf 8-2007-blauw	72
Tabel 35: Staaf 8-2007-groen	72
Tabel 36: Staaf 8-2007-oranje	73
Tabel 37: Staaf 8-2006-blauw	73
Tabel 38: Staaf 8-2006-groen	74
Tabel 39: Staaf 8-2006-oranje	74
Tabel 40: Staaf 14-blauw	75
Tabel 41: Staaf 14-groen	75
Tabel 42: Staaf 14-oranje	75
Tabel 43: Staaf 20-blauw	76



Tabel 44: Staaf 20-groen .....	76
Tabel 45: Staaf 20-oranje .....	77
Tabel 46: Overzicht elasticiteitsmoduli .....	84
Tabel 47: Samenvatting van alle opgemeten en berekende waarden uit de trekproeven op staal .....	85
Tabel 48: Opgemeten en berekende waarden uit de trekproeven op $\phi 8$ staven uit 2007 .....	85
Tabel 49: 99%-betrouwbaarheidsinterval voor de meetresultaten uit trekproeven op $\phi 8$ staven uit 2007 .....	85
Tabel 50: Opgemeten en berekende waarden uit de trekproeven op $\phi 8$ staven uit 2006 .....	86
Tabel 51: 99%-betrouwbaarheidsinterval voor de meetresultaten uit trekproeven op $\phi 8$ staven uit 2006 .....	86
Tabel 52: Opgemeten en berekende waarden uit de trekproeven op $\phi 14$ staven .....	86
Tabel 53: 99%-betrouwbaarheidsinterval voor de meetresultaten uit trekproeven op $\phi 14$ staven .....	86
Tabel 54: Opgemeten en berekende waarden uit de trekproeven op $\phi 20$ staven .....	87
Tabel 55: 99%-betrouwbaarheidsinterval voor de meetresultaten uit trekproeven op $\phi 20$ staven .....	87
Tabel 56: Overzicht vloeispanning wapeningsstaal .....	87
Tabel 57: Materiaaleigenschappen PC Carbocomp Plus .....	88
Tabel 58: Materiaaleigenschappen PC 5800/BL .....	88
Tabel 59: Opbouw en dimensionering van de onversterkte balken .....	89
Tabel 60: Cijferwaarden theoretische doorbuiging van de onversterkte balken .....	101
Tabel 61: Opbouw en dimensionering van de versterkte balken .....	102
Tabel 62: Cijferwaarden theoretische doorbuiging van de versterkte balken .....	115
Tabel 63: Opbouw en dimensionering van balk B1 .....	129
Tabel 64: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk B1 in het midden van de overspanning .....	132
Tabel 65: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk B1 .....	134
Tabel 66: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk B1 .....	134
Tabel 67: Opbouw en dimensionering van balk BL1 .....	137
Tabel 68: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram balk BL1 in het midden van de overspanning .....	140
Tabel 69: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BL1 .....	142
Tabel 70: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BL1 .....	143
Tabel 71: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	144
Tabel 72: Opbouw en dimensionering van balk BLA1.1 .....	145
Tabel 73: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.1 in het midden van de overspanning .....	150
Tabel 74: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA1.1 .....	153
Tabel 75: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA1.1 .....	153
Tabel 76: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	155
Tabel 77: Opbouw en dimensionering van balk BLA1.2 .....	156
Tabel 78: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.2 in het midden van de overspanning .....	161
Tabel 79: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA1.2 .....	164
Tabel 80: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA1.2 .....	164
Tabel 81: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	166
Tabel 82: Opbouw en dimensionering van balk BLA1.3 .....	167
Tabel 83: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.3 in het midden van de overspanning .....	172
Tabel 84: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA1.3 .....	175
Tabel 85: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA1.3 .....	175
Tabel 86: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	177
Tabel 87: Breukkrachten van reeks 1 .....	178
Tabel 88: Breukkrachten en theoretisch berekende krachten van reeks 1 .....	178
Tabel 89: Andere kenmerkende krachten van reeks 1 .....	179
Tabel 90: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit .....	179
Tabel 91: Theoretisch berekende en empirische bepaalde waarden voor het initieel scheurmoment .....	183
Tabel 92: Opbouw en dimensionering van de onversterkte balken .....	184
Tabel 93: Cijferwaarden theoretische doorbuiging van de onversterkte balken .....	196
Tabel 94: Opbouw en dimensionering van de versterkte balken .....	197

Tabel 95: Cijferwaarden theoretische doorbuiging van de versterkte balken .....	210
Tabel 96: Grootheden in niet-gescheurde en in gescheurde toestand .....	211
Tabel 97: Theoretische rek in de koolstofvezelwapening .....	212
Tabel 98: Opbouw en dimensionering van balk B2 .....	227
Tabel 99: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk B2 in het midden van de overspanning.....	230
Tabel 100: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk B2 .....	232
Tabel 101: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk B2 .....	232
Tabel 102: Opbouw en dimensionering van balk BL2.1 .....	235
Tabel 103: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BL2.1 in het midden van de overspanning.....	238
Tabel 104: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BL2.1 .....	241
Tabel 105: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BL2.1 .....	241
Tabel 106: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	243
Tabel 107: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.1 .....	244
Tabel 108: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.1 in het midden van de overspanning .....	248
Tabel 109: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.1 .....	251
Tabel 110: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.1 .....	251
Tabel 111: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	253
Tabel 112: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.2 .....	254
Tabel 113: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.2 in het midden van de overspanning .....	258
Tabel 114: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.2 .....	261
Tabel 115: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.2 .....	261
Tabel 116: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	263
Tabel 117: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.3 .....	264
Tabel 118: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.3 in het midden van de overspanning .....	268
Tabel 119: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.3 .....	272
Tabel 120: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.3 .....	273
Tabel 121: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	277
Tabel 122: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.4 .....	278
Tabel 123: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.4 in het midden van de overspanning .....	282
Tabel 124: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.4 .....	286
Tabel 125: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.4 .....	286
Tabel 126: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB .....	290
Tabel 127: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.5 .....	291
Tabel 128: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.5 in het midden van de overspanning .....	295
Tabel 129: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.5 .....	302
Tabel 130: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.5 .....	303
Tabel 131: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	309
Tabel 132: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.6 .....	310
Tabel 133: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.6 in het midden van de overspanning .....	314
Tabel 134: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.6 .....	318
Tabel 135: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.6 .....	318
Tabel 136: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	323
Tabel 137: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.7 .....	324
Tabel 138: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 in het midden van de overspanning .....	328
Tabel 139: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.7 .....	332
Tabel 140: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.7 .....	332
Tabel 141: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	337
Tabel 142: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.8 .....	338
Tabel 143: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk balk BLA2.8 in het midden van de overspanning...	342
Tabel 144: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.8 .....	345
Tabel 145: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.8 .....	345
Tabel 146: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	347

Tabel 147: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.9 .....	348
Tabel 148: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.9 in het midden van de overspanning .....	352
Tabel 149: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.9 .....	356
Tabel 150: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.9 .....	356
Tabel 151: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	360
Tabel 152: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.10 .....	361
Tabel 153: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.10 in het midden van de overspanning .....	365
Tabel 154: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.10 .....	369
Tabel 155: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.10 .....	369
Tabel 156: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	374
Tabel 157: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.11 .....	375
Tabel 158: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.11 in het midden van de overspanning .....	379
Tabel 159: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.11 .....	382
Tabel 160: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.11 .....	382
Tabel 161: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	384
Tabel 162: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.12 .....	385
Tabel 163: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.12 in het midden van de overspanning .....	389
Tabel 164: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.12 .....	392
Tabel 165: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.12 .....	392
Tabel 166: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	394
Tabel 167: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.13 .....	395
Tabel 168: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.13 in het midden van de overspanning .....	399
Tabel 169: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.13 .....	403
Tabel 170: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.13 .....	403
Tabel 171: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	408
Tabel 172: Opbouw en dimensionering van balk BL2.2 .....	409
Tabel 173: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BL2.2 in het midden van de overspanning .....	412
Tabel 174: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BL2.2 .....	414
Tabel 175: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BL2.2 .....	415
Tabel 176: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 .....	416
Tabel 177: Breukkrachten van reeks 2 .....	417
Tabel 178: Effect type anker op de breukkracht [1] .....	418
Tabel 179: Effect type anker op de breukkracht [2] .....	418
Tabel 180: Effect ankerdiameter op de breukkracht [1] .....	418
Tabel 181: Effect ankerdiameter op de breukkracht [2] .....	419
Tabel 182: Effect ankerdiameter op de breukkracht [3] .....	419
Tabel 183: Effect van voorspanning op de breukkracht .....	419
Tabel 184: Effect van de verankeringslengte van mechanische ankers op de breukkracht .....	420
Tabel 185: Effect verlijming van de verdeelplaatjes op de breukkracht .....	420
Tabel 186: Effect verlijming van de koolstofvezelwapening .....	421
Tabel 187: Genomen maatregelen en hun respectievelijke bijdrage .....	421
Tabel 189: Breukkrachten en theoretisch berekende krachten van reeks 2 .....	422
Tabel 190: Andere kenmerkende krachten van reeks 2 .....	423
Tabel 191: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit .....	424
Tabel 192: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde waarden voor het initieel scheurmoment .....	435
Tabel 193: Behaalde resultaten .....	436

Op basis van sociale en economische belangen dienen bouwkundige constructies betrouwbaar en functioneel te zijn. Naast voldoende onderhoudswerkzaamheden en herstellingswerken waar nodig, zijn vaak ook versterkingen vereist. Het versterken van bestaande constructies kan omwille van verschillende redenen vereist zijn:

- herstellen van de oorspronkelijke draagkracht, zoals bijvoorbeeld na brand, explosie, aardbeving... of bij corrosie van wapeningen, vriesschade, inwerking van chemisch agressieve reagentia...
- lokaal versterken van constructie-elementen, zoals bij het maken van gaten in vloeren en wanden;
- verhogen van de draagkracht van constructie-elementen, zoals bij herbestemming van lokalen, toenemende belastingen...
- herstellen van ontwerp- of uitvoeringsfouten.

Betonnen constructies kunnen op allerlei verschillende manieren versterkt worden:

- wijzigingen in de doorsnede, zoals het toepassen van spuitbeton, het vervangen en/of toevoegen van wapening binnen de oorspronkelijke doorsnede of in een extra laag, het toepassen van uitwendig opgelijmde wapening of het aanwenden van geprefabriceerde betonnen elementen;
- toepassing van voorspanning, meestal onder de vorm van uitwendige voorspanning met na-gerekte wapening;
- wijziging van het draagsysteem, zoals het schoren van raamwerken;
- stabilisatie, zoals bijvoorbeeld door injecties, grondankers...

Het lijmen van wapening op de constructie is een techniek die al sinds de jaren '60 met stalen strippen wordt uitgevoerd. Sinds het begin van de jaren '90 worden versterkingen ook uitgevoerd met producten op basis van vezelversterkte kunststoffen. De uitvoering hiervan is veel eenvoudiger dan het lijmen van stalen strippen, waardoor de mogelijkheden van het versterken van betonnen constructies sterk toegenomen zijn.

De vandaag gebruikte vezelcomposietwapeningen zijn opgebouwd uit sterke, dunne, continue vezels van niet-metallische aard ingebed in een matrixstructuur, bestaande uit een harsbinder, vulstoffen en additieven. Meestal wordt uitgegaan van koolstofvezels, aramidevezels en glasvezels, respectievelijk CFRP, AFRP en GFRP genoemd. Deze composietmaterialen hebben een laag eigengewicht, een hoge treksterkte, een elasticiteitsmodulus vergelijkbaar met deze van staal en zijn bovendien zeer goed bestand tegen corrosie.

In hoofdzaak worden twee soorten systemen onderscheiden. Geprefabriceerde vezelcomposietwapeningen zijn systemen waarbij de vezels ingebed zijn in een matrixstructuur die vooraf verhard is, waardoor de wapening in de vorm van vormvaste strippen op de betonnen constructie gelijmd kan worden. Wet lay-up systemen, of ter plaatse uithardende systemen, zijn systemen waarbij de vezels in flexibele vorm, droog of geïmpregneerd, op de betonnen constructie worden aangebracht, waarna een epoxy met een lage viscositeit voor de verdere impregnering en verlijming zorgt.

De vele toepassingen wereldwijd hebben bewezen dat deze techniek in veel gevallen een technisch en economisch haalbare oplossing kan bieden in situaties waar versterken noodzakelijk is. De goede werking van deze versterkingstechniek is eigenlijk gebaseerd op de samenwerking tussen de gelijmde wapening en het beton. Deze samenwerking wordt gerealiseerd door de verlijming van de vezelcomposietwapening. Indien de schuifspanningen in het contactvlak tussen het beton en de gelijmde wapening een kritieke waarde overschrijden, treedt onthechting op. Vermits de gebruikte lijmen veelal een grote sterkte bezitten, zal deze onthechting plaats vinden in het beton.

Doelstelling van het onderzoek is het ontwikkelen van de aanzet voor een model voor een bijkomende verankering van multidirectionele koolstofvezelwapening waardoor breuk door concrete rip-off en door peeling voorkomen of uitgesteld kan worden.

### **Opbouw van deze scriptie**

**Hoofdstuk 1** vertelt kort iets over de aanpak van dit onderzoek. Wat is het precieze doel? Welke stappen worden ondernomen? Waar kunnen eventuele moeilijkheden optreden? In **Hoofdstuk 2** wordt een opsomming gegeven van de breukmechanismen volgens verschillende ontwerprichtlijnen. Verder wordt ook een opeenvolging van besluiten van gelijkaardige onderzoeken gegeven. **Hoofdstuk 3** heeft het kort over de verschillende materialen die gebruikt zijn en over de materiaalkarakteristieken. **Hoofdstuk 4** en **Hoofdstuk 5** vormen het eigenlijke onderzoek. **Hoofdstuk 4** behandelt een eerste reeks balken in gewapend beton, al dan niet versterkt met opgelijmde multidirectionele koolstofvezelwapening, terwijl **Hoofdstuk 5** een tweede reeks balken in gewapend beton nader bekijkt. In het laatste hoofdstuk, **Hoofdstuk 6**, worden de besluiten uit dit onderzoek opgesomd en worden enkele suggesties voor toekomstig onderzoek geformuleerd.

## 1 Onderzoeksaanpak

---

Op dit moment is er nog maar weinig gekend over het voorkomen of uitstellen van concrete rip-off en/of peeling door gebruik te maken van bijkomende verankering bij balken in gewapend beton, versterkt met opgelijmde multidirectionele koolstofvezelwapening. Doelstelling van dit onderzoek is dan ook het ontwikkelen van de aanzet voor een rekenmodel van deze bijkomende verankering bij balken in gewapend beton, versterkt met opgelijmde multidirectionele koolstofvezelwapening.

Vertrekkende van deze doelstelling kan een werkprogramma opgesteld worden met 3 werkpakketten.

### 1.1 Werkpakket 1: Literatuurstudie

---

In dit werkpakket wordt een overzicht gemaakt van de beschikbare rekenmodellen die handelen over concrete rip-off en/of peeling bij balken in gewapend beton die versterkt zijn met opgelijmde vezelcomposietwapening. Ook wordt gezocht naar conclusies in gelijkaardige onderzoeken die de voorbije jaren door Hogeschool Gent werden uitgevoerd.

### 1.2 Werkpakket 2: Labo-onderzoek

---

In dit werkpakket worden twee reeksen balken in gewapend beton, al dan niet versterkt met multidirectionele opgelijmde koolstofvezelwapening en eventueel bijkomend verankerd, onderworpen aan een vierpuntsbuigproef. Hierbij steunen de balken op twee oplegpunten, namelijk een scharnierende oplegging en een roloplegging. Tijdens de vierpuntsbuigproef worden deze balken door twee even grote krachten belast. Deze krachten grijpen aan op de bovenste vezel van de balken. In het labo worden deze krachten gegenereerd door twee hydraulische vijzels. De vijzels zijn zowel geschikt voor een staande als een hangende proefopstelling. De maximale kracht van de vijzels bedraagt 600 kN.

De vijzels bestaan uit een voetplaat, een sferische lagering, een cilinder met ingeslepen zuiger en een sferisch gelagerde drukplaat, die in de hoogte verstelbaar is. De zuiger is via een schijfvormige kopplaat en spiraalveren met de basis verbonden. Deze spiraalveren bewerkstelligen het invaren van de zuiger bij ontlasting. Bij uitvaren van de zuiger bieden deze spiraalveren weerstand. De kracht die hierbij ontstaat, is aangegeven op een lineaire schaal op de cilinder en moet afgetrokken worden van de kracht die aangeduid wordt op de wijzerschaal van de meet- en stureenheid, om de juiste kracht te bekomen.



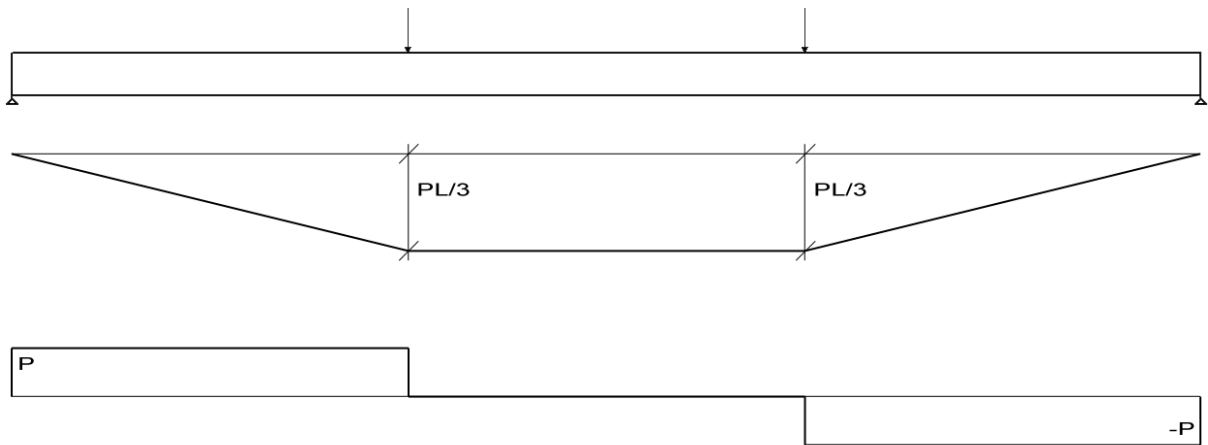
**Figuur 1: Proefopstelling vierpuntsbuigproef**



**Figuur 2: Detail van een vijzel**

De in de zuiger heersende oliedruk wordt door een oliedrukopnemer in een elektronisch signaal omgezet. De zuigerkoers kan gemeten worden met een zuigerkoersopnemer.

De vijzels worden op een zodanige manier gepositioneerd dat de overspanning tussen de steunpunten in drie gelijke velden verdeeld wordt. Deze configuratie leidt tot de onderstaande dwarskrachten- en momentenlijn.



**Figuur 3: Momentenlijn en dwarskrachtenlijn van een vierpuntsbuigproef**

De vorm van deze momentenlijn benadert het parabolisch verloop van de momentenlijn bij een gelijkmatig verdeelde last. Net daarom is de vierpuntsbuigproef een goed model voor het gedrag van op buiging belaste elementen. Er wordt wel opgemerkt dat bij deze opstelling zowel de maximale dwarskracht als het maximale moment t.h.v. de vijzels optreden, terwijl dit bij een gelijkmatig verdeelde last niet het geval is.

De last wordt stelselmatig en periodiek verhoogd met 5 kN. Dit gaat door totdat een breukverschijnsel optreedt. Gedurende de vierpuntsbuigproef worden verschillende parameters opgemeten.

De stureenheid van de vijzels registreert continu de kracht die de vijzels genereren en de zakking van de vijzels. Bij het registreren van de kracht wordt rekening gehouden met de eerder vermelde weerstand van de spiraalveren. Deze weerstand bedraagt 0,02 kN per millimeter uitwijking van de veer en dus ook per millimeter zakking van de vijzels. De effectieve kracht uitgeoefend door de vijzels zal dus iets kleiner zijn dan de kracht die men wil genereren. Zowel de gegenereerde kracht, de weerstand van de spiraalveren en de effectieve krachten worden continu geregistreerd. Op basis van de effectieve kracht wordt bovendien ook het effectieve moment berekend.

Ook de doorbuiging van de balken in het midden van de overspanning wordt opgemeten. Hiertoe worden elektronische meetklokken geplaatst. Twee meetklokken, één aan de voorzijde en één aan de achterzijde meten de zakking in het midden van de overspanning op. Bovendien wordt ook onder elk steunpunt een elektronische meetklok geplaatst om de zakking van het geheel op te meten. Per stap van 5 kN worden de waarden van de zakkings die deze meetklokken opmeten, geregistreerd. De eerste registratie gebeurt net na het verhogen van de vijzelkracht, de tweede registratie net voor het verhogen van de vijzelkracht. Op deze manier wordt de doorbuiging per stap tweemaal opgemeten met een



zeker tijdsinterval tussen beide metingen. Aan de hand van deze metingen kan het kruipeffect in rekening gebracht worden.



**Figuur 4: Elektronische meetklok in het midden van de overspanning**



**Figuur 5: Elektronische meetklok onder een steunpunt**

Tijdens de vierpuntsbuigproeven op de balken versterkt met opgelijmde koolstofvezelwapening wordt bovendien ook de rek in de koolstofvezelwapening geregistreerd. Hiervoor worden rekstrookjes verlijmd op de koolstofvezelwapening. Het meten met behulp van rekstrookjes berust op het verschijnsel dat de weerstand van een geleider verandert wanneer het materiaal van deze geleider wordt vervormd. Deze weerstandsvariatie is een gevolg van vormverandering en van verandering van de soortelijk weerstand. Na meting van de weerstandsverandering van de geleider kan de rek berekend worden. In dit geval echter kan de rek rechtstreeks afgelezen worden.

Naast deze vierpuntsbuigproeven worden een aantal bijkomende proeven verricht. Deze proeven dienen om de werkelijke materiaalkarakteristieken te achterhalen.

### **1.3 Werkpakket 3: Modelling**

---

In dit werkpakket wordt gepoogd met de experimenteel bekomen resultaten een rekenmodel op te stellen. Dit model kan ontwikkeld worden in de vorm van een formule, een tabel of een grafiek.

## 2 State-of-the-art

---

Uit de vele internationale toepassingen <sup>1 2 3 4 5 6</sup> blijkt dat het versterken van bestaande constructies met opgelijmde vezelcomposietwapening frequent toegepast wordt. Deze grote interesse heeft geleid tot een aantal onderzoeken met als doel het opstellen van rekenregels, analytische modellen en ontwerprichtlijnen.

In 1996 richtte het toenmalige CEB een Task Group op die als doel had ontwerprichtlijnen voor het gebruik van opgelijmde vezelcomposietwapening te ontwikkelen. Dit leidde in 2001 tot de publicatie van FIB Bulletin 14 *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*. Volgens dit technisch rapport <sup>7</sup> kunnen breukmechanismen van op buiging belaste versterkte elementen in twee klassen ingedeeld worden, namelijk deze waarbij de samenwerking tussen het beton en de vezelcomposietwapening behouden blijft tot een breuk optreedt in één van de materialen en deze waarbij de samenwerking tussen het beton en de vezelcomposietwapening eerder verloren gaat.

Indien de composietwerking tussen het beton en de koolstofvezelwapening behouden blijft, kan breuk op drie verschillende manieren optreden:

- vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton;
- vloeien van het staal gevolgd door breuk in de vezelcomposietwapening;
- verbrijzeling van het beton.

Indien de composietwerking eerder verloren gaat, dan moet logischerwijs onthechting optreden. Bij plaatselijke onthechting treedt lokaal vermindering op in de hechtsterkte tussen het beton en de vezelcomposietwapening. Indien deze plaatselijke onthechting zich voortzet, zodat er volledige onthechting optreedt, dan is er sprake van peeling-off. Peeling-off kan zich volgens FIB Bulletin 14 op verschillende plaatsen manifesteren:

---

<sup>1</sup> Tuakta, C. (2005) *Use of fiber reinforced polymer composite in bridge structures*. Department of Civil and Environmental Engineering. Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology. **S.B. Civil Engineering**.

<sup>2</sup> Watanabe, D. (2005). *Fibre Reinforcement Polymer (FRP) Composites*. Geraadpleegd op 8 mei 2008 via <http://www.testing-engineers.com/cs3.html>

<sup>3</sup> Bank, L.C., M.G. Oliva, et al. (2006). *Double-Layer Prefabricated FRP Grids for Rapid Bridge Deck Construction: Case Study*. *Journal of Composites for Construction* **10**(3): 204-212.

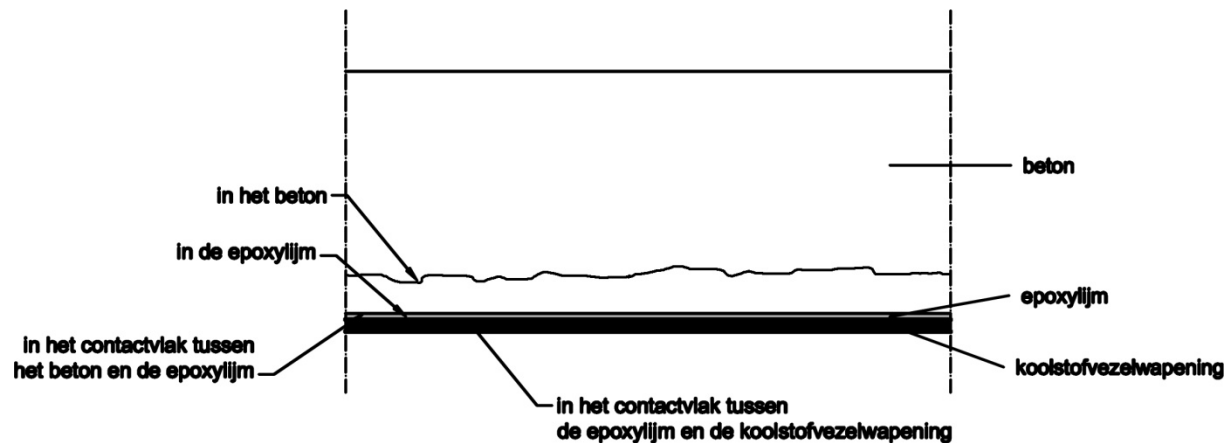
<sup>4</sup> Nishizaki, I., N. Takeda, et al. (2006). *A Case Study of Life Cycle Cost based on a Real FRP Bridge*. *Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*. Miami: 99-102.

<sup>5</sup> *Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced Polymer (FRP) for Nuclear Power Plant*. Geraadpleegd op 8 mei 2008 via [http://www.quakewrap.com/ConcreteBeamsStrengthenedwithFiberReinforcedPolymer\(FRP\)forNUCLEARPOWERPLANT.php](http://www.quakewrap.com/ConcreteBeamsStrengthenedwithFiberReinforcedPolymer(FRP)forNUCLEARPOWERPLANT.php)

<sup>6</sup> *Kledingzaak H&M Brussel*. Geraadpleegd op 8 mei 2008 via <http://www.ecc-belgium.be/default.aspx?lc=nl&NavCatID=162>

<sup>7</sup> FIB Bulletin 14. (2001). *Externally bonded FRP reinforcement for RC Structures*. CEB-FIP.

- onthechting in het beton t.h.v. een verzwakte laag, zoals t.h.v. de hoofdwapening;
- onthechting in de epoxylijm;
- onthechting in het contactvlak tussen het beton en de epoxylijm of tussen de epoxylijm en de vezelcomposietwapening;
- onthechting binnenin de vezelcomposietwapening.



Figuur 6: Peeling-off kan zich op verschillende lagen manifesteren

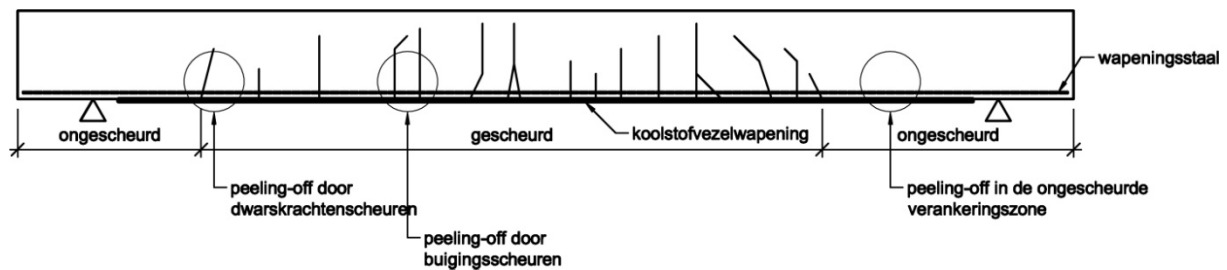
Wat onthechting in de epoxylijm betreft, vermeldt FIB Bulletin 14 dat *“the tensile and shear strength of the adhesive (epoxy resin) usually higher is than the tensile and shear strength of concrete, so failure will normally occur in the concrete. In this case a thin layer of concrete (a few millimeters thick) will remain on the FRP reinforcement. Debonding may occur through the adhesive only if its strength drops below that of concrete (e.g. at high temperature or when the strength of concrete is unusually high).”*

Onthechting in het contactvlak tussen het beton en de epoxylijm of tussen de epoxylijm en de vezelcomposietwapening zou enkel optreden bij een gebrekkige voorbereiding van het beton oppervlak, *“because the cohesion strength of epoxy resins is lower than the adhesion strength”*.

*“Because the FRP is a composite material itself, debonding may also occur inside the FRP between fibres and resin. This failure mechanism, as may be explained by fracture mechanics, will occur once crack propagation in the FRP energetically more convenient than in the concrete. This might be the case with high strength concretes. Nevertheless, interlaminar failure is secondary failure mode, that occurs after the bond fracture has initiated in the concrete, and, hence, usually does not determine bond strength.”* Dit breukmechanisme wordt verder niet meer beschouwd in FIB Bulletin 14.

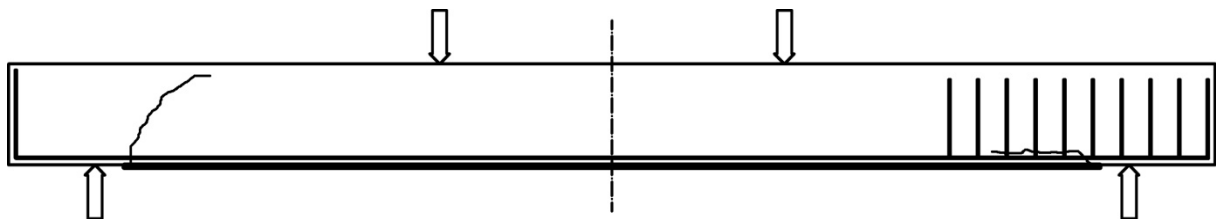
Uit testen op balken in gewapend beton, versterkt met opgelijmde vezelcomposietwapening, bleek het meest optredende breukmechanisme peeling-off te zijn, waarbij na de breuk nog steeds een dun laagje beton aan de vezelcomposietwapening hangt. Afhankelijk van het startpunt van de onthechting, kunnen de volgende breukmechanismen onderscheiden worden:

- peeling-off in de niet-gescheurde verankeringszone  
*“FRP may peel-off in the anchorage zone as a result of bond shear fracture through the concrete.”*
- peeling-off veroorzaakt door buigingscheuren  
*“Flexural (vertical) cracks in the concrete may propagate horizontally and thus cause peeling-off of the FRP in regions far from the anchorage.”*
- peeling-off veroorzaakt door dwarskrachtscheuren  
*“Shear cracking in the concrete generally results in both horizontal and vertical opening, which may lead to FRP peeling-off. However, in elements with sufficient internal (and external) shear reinforcement (as well as in slabs) the effect of vertical crack opening on peeling-off is negligible.”*
- peeling-off veroorzaakt door een oneffen betonnen oppervlak.  
*“The unevenness or roughness of the concrete surface may result in localized debonding of the FRP, which may propagate and cause peeling-off.”*



Figuur 7: Zones waarin peeling-off kan ontstaan

Uit testen is ook gebleken dat, indien de opgelijmde vezelcomposietwapening op een zekere afstand van de steunpunten stopt, er dan een quasi verticale scheur kan ontstaan die verder gaat als een dwarskrachtenscheur, zoals links in **Figuur 8** wordt aangetoond. *However, by virtue of internal stirrups, the shear crack may be arrested and the bonded-on plate separated from the concrete at the level of the longitudinal reinforcement in the form of spalling.* Dit breukmechanisme wordt ook wel concrete rip-off genoemd. Een schets van concrete rip-off wordt rechts op **Figuur 8** getekend.



**Figuur 8: Concrete rip-off**

In Nederland werd in 2002 een gelijkaardig rapport gepubliceerd<sup>8</sup>. Volgens Aanbeveling 91 van het Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving dienen met betrekking tot onthechting vier breukmechanismen gecontroleerd te worden:

- onthechting bij dwarskrachtenscheuren;
- onthechting door hoge schuifspanningen;
- onthechting door een onvoldoende verankeringslengte;
- eindverankering-dwarskrachtenbreuk.

Aan de Hogeschool Gent werden in de academiejaren 2004-2005, 2005-2006 en 2006-2007 reeds onderzoeken uitgevoerd naar het voorkomen of uitstellen van concrete rip-off en peeling bij balken in gewapend beton, versterkt met opgelijmde multidirectionele koolstofvezelwapening.

In het academiejaar 2004-2005 kwamen Marie Adriaenssens e.a.<sup>9</sup> tot het besluit dat het gebruik van lange koolstofvezelwapening een beperkte stijging in draagkracht heeft t.o.v. het gebruik van korte koolstofvezelwapening. Verder bleek ook dat een bijkomende verankering een positieve invloed heeft op de draagkracht bij een herbelasting na onthechting van de koolstofvezelwapening. De draagkracht tijdens deze herbelasting bleek hoger te zijn dan de draagkracht van een onversterkte balk in gewapend beton. De verankering bleek dus tijdens de herbelasting voor een krachtsoverdracht naar de koolstofvezelwapening te zorgen. Er werden echter geen conclusies genomen over de verankering zelf. Verder werden ook geen besluiten getrokken i.v.m. het voorkomen of uitstellen van concrete rip-off of peeling door deze bijkomende verankering.

<sup>8</sup> Aanbeveling 91. (2002). *Versterken van gewapend-betonconstructies met uitwendig gelijmde koolstofvezelwapening*. Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving.

<sup>9</sup> Adriaenssens, M., P. Coudijzer, et al. (2005). *Beproeving gewapende betonbalken voorzien van koolstofvezelwapening met of zonder bijkomende verankering*. Departement Industriële Wetenschappen. Gent, Hogeschool Gent. **Industrieel Ingenieur Bouwkunde**.

Nordine Saïdi Mazarou e.a.<sup>10</sup> kwamen in het academiejaar 2005-2006 eveneens tot het besluit dat de lengte van onverankerde koolstofvezelwapening een zekere invloed heeft op de draagkracht, zoals reeds eerder door Marie Adriaenssens e.a. besloten is. Lange koolstofvezelwapening vergroot de draagkracht in grotere mate dan korte koolstofvezelwapening. Nog volgens Nordine Saïdi Mazarou heeft het plaatsen van twee ankers op de uiteinden van lange koolstofvezelwapening geen invloed op de draagkracht t.o.v. een onversterkte referentiebalk. Of het plaatsen van twee ankers op de uiteinden van korte koolstofvezelwapening invloed heeft, kon niet besloten worden. Verankeren met meerdere ankers heeft zowel invloed op lange als korte koolstofvezelwapening. De toename bij lange koolstofvezelwapening is echter klein. Vanuit het oogpunt de draagkracht te verhogen zou het dus niet renderen lange koolstofvezelwapening te verankeren. Bij balken in gewapend beton versterkt met korte koolstofvezelwapening neemt de draagkracht t.o.v. een referentiebalk met opgelijmde koolstofvezelwapening zonder bijkomende verankering wel behoorlijk toe. Er kon echter geen besluit getrokken worden uit de invloed van de ankerdiameter.

Gert Van den Maegdenbergh e.a.<sup>11</sup> onderzochten in het academiejaar 2006-2007 het structureel gedrag van balken in gewapend beton, versterkt met opgelijmde koolstofvezelwapening, na verhoging van de buigstijfheid van de balken met een houten spacer. In het kader van het voorkomen of uitstellen van concrete rip-off en peeling werden echter geen conclusies getrokken.

---

<sup>10</sup> Saïdi Mazarou, N., W. Van Audenhove, et al. (2006). *Studie naar het effect van bijkomende verankering van opgelijmde koolstofvezelwapening op betonbalken, met in het bijzonder de invloed op het breukmechanisme*. Departement Industriële Wetenschappen. Gent, Hogeschool Gent. **Industrieel Ingenieur Bouwkunde**.

<sup>11</sup> Van den Maegdenbergh, G., A.-S. Dewitte, et al. (2007). *Parametrisch onderzoek naar het structureel gedrag van balken in gewapend beton, die verstevigd worden met opgelijmde koolstoflaminaten, na verhoging van de buigstijfheid met een spacer*. Departement Toegepaste Ingenieurswetenschappen. Gent, Hogeschool Gent. **Industrieel Ingenieur Bouwkunde**.

## 3 Materiaalkarakteristieken

---

### 3.1 Beton

---

#### 3.1.1 Reeks 1

De balken uit reeks zijn geprefabriceerd met beton met de volgende eigenschappen:

- sterkteklasse: C16/20
- omgevingsklasse: EE1
- consistentie: S3
- grootte granulaat ( $D_{\max}$ ): 16 mm grind
- cement CEM III/A 32,5 N LA
- hulpstof: Tixo superplastificeerder (0,5%)
- gegarandeerde verwerkingstijd: 100 minuten

Om de werkelijke betondruksterkte te kennen worden per balk drie kernen uitgeboord. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte gelijk aan de breedte van de balk. Uit elk van deze kernen kunnen twee proefstukken met een hoogte van 100 mm gezaagd worden. Op deze manier worden zes proefstukken bekomen. Deze proefstukken worden onderworpen aan een drukproef.

##### *3.1.1.1 Algemene betondruksterkte*

Alle balken uit reeks 1 werden gestort met beton van een zelfde levering. Bijgevolg kan een algemene betondruksterkte bepaald worden. **Tabel 1** toont per kern de maximale drukkracht en de maximale drukspanning. De maximale drukspanning wordt berekend met de onderstaande formule.

$$\sigma = \frac{F}{\left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \pi}$$

balk	cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
B1	1	491	48,959
	2	349	34,800
	3	406	40,484
	4	414	41,281
	5	366	36,495
	6	408	40,683
BL1	1	155	15,456
	2	371	36,994
	3	438	43,674
	4	392	39,088
	5	430	42,877
	6	406	40,484
BLA1.1	1	432	43,076
	2	446	44,472
	3	374	37,293
	4	456	45,469
	5	488	48,660
	6	443	44,173
BLA1.2	1	438	43,674
	2	339	33,803
	3	406	40,484
	4	309	30,811
	5	382	38,090
	6	358	35,697
BLA1.3	1	446	44,472
	2	440	43,874
	3	491	48,959
	4	406	40,484
	5	491	48,959
	6	536	53,446

Tabel 1: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit reeks 1

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking m.b.v. de onderstaande formules berekend worden.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$



Na uitwerking worden de onderstaande waarde gevonden.

$$\bar{x} = 40,906$$

$$s = 7,012$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. Aangezien zowel het gemiddelde als de spreiding van de populatie steekproefsgewijs bepaald zijn, wordt het 99%-betrouwbaarheidsinterval bepaald vertrekkende met de volgende variabele.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

Deze variabele is  $t(n-1 \text{ d.f.})$  verdeeld. Het symmetrische interval voor de variabele  $t$  wordt bepaald met de onderstaande formule.

$$P\left(t_{\frac{\alpha}{2}} < t < t_{1-\frac{\alpha}{2}}\right) = 1 - \alpha = \gamma$$

Stel hierin  $t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$ , zodat de ongelijkheden opgelost kunnen worden naar het

populatiegemiddelde  $\mu_0$ . Bovendien is  $t_{\frac{\alpha}{2}} = -t_{1-\frac{\alpha}{2}}$ .

$$\bar{x} - t_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu_0 < \bar{x} + t_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [37,372; 44,439]. Niet alle metingen behoren tot dit interval. De metingen die niet tot dit interval horen, dienen bijgevolg verworpen te worden en de berekeningen dienen herhaald te worden zonder deze metingen.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 41,262$$

$$s = 2,285$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [39,503; 43,020]. Opnieuw behoren niet alle metingen tot dit interval. Metingen die niet tot dit interval behoren, dienen verworpen te worden. De parameters van de steekproef dienen bijgevolg een derde maal berekend te worden.

$$\bar{x} = 40,968$$

$$s = 0,891$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opnieuw opgesteld. Dit interval is nu gelijk aan het interval [39,719; 42,217]. Alle metingen behoren nu wel tot dit interval, waardoor ze allemaal als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De algemene gemiddelde betondruksterkte afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 40,968 N/mm<sup>2</sup>. Deze druksterkte kan omgezet worden in een algemene cilinderdruksterkte, waarbij de cilinder een diameter van 150 mm en een hoogte van 300 mm heeft, en in een algemene kubusdruksterkte, waarbij de kubus ribben van 150 mm heeft. Voor de omzetting naar de algemene cilinderdruksterkte en de algemene kubusdruksterkte bekomt men uit de literatuur respectievelijk 0,73 en 0,88 als vormfactor.

Uiteindelijk worden de onderstaande waarden voor de algemene gemiddelde cilinderdruksterkte en de algemene gemiddelde kubusdruksterkte gevonden.

$$f_c = 29,907 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 36,052 \frac{N}{mm^2}$$

### 3.1.1.2 Specifieke betondruksterkte

Naast de algemene betondruksterkte wordt per balk ook de specifieke betondruksterkte berekend. De berekening hiervan gebeurt volledig analoog zoals reeds eerder beschreven is. Er wordt echter wel opgemerkt dat een gemiddelde uit zes metingen niet altijd representatief is.

**Tabel 2** toont per proefstuk uit balk B1 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	491	48,959
2	349	34,800
3	406	40,484
4	414	41,281
5	366	36,495
6	408	40,683

**Tabel 2: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk B1**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 40,450$$

$$s = 4,914$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [32,366; 48,534]. Niet alle metingen behoren tot dit interval. De metingen die niet tot dit interval behoren, dienen bijgevolg verworpen te worden en de berekeningen dienen herhaald te worden zonder deze metingen. In dit geval wordt proefstuk 1 buiten beschouwing gelaten.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 38,450$$

$$s = 2,908$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [33,507; 43,990]. Alle metingen behoren nu wel tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk B1 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 38,450 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 28,286 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 34,099 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 3** toont per proefstuk uit balk BL1 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	155	15,456
2	371	36,994
3	438	43,674
4	392	39,088
5	430	42,877
6	406	40,484

**Tabel 3: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BL1**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 36,429$$

$$s = 10,562$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [19,052; 53,806]. Niet alle metingen behoren tot dit interval. De metingen die niet tot dit interval behoren, dienen bijgevolg verworpen te worden en de berekeningen dienen

herhaald te worden zonder deze metingen. In dit geval wordt proefstuk 1 buiten beschouwing gelaten.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 40,623$$

$$s = 2,736$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [35,692; 45,554]. Alle metingen behoren nu wel tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BL1 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 40,623 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 29,655 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 35,748 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 4** toont per proefstuk uit balk BLA1.1 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	432	43,076
2	446	44,472
3	374	37,293
4	456	45,469
5	488	48,660
6	443	44,173

**Tabel 4: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA1.1**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 43,857$$

$$s = 3,738$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [37,708; 50,006]. Niet alle metingen behoren tot dit interval. De metingen die niet tot dit interval behoren, dienen bijgevolg verworpen te worden en de berekeningen dienen herhaald te worden zonder deze metingen. In dit geval wordt proefstuk 3 buiten beschouwing gelaten.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 45,170$$

$$s = 3,738$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [41,333; 49,008]. Alle metingen behoren nu wel tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA1.1 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 45,170 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 32,974 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 39,750 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 5** toont per proefstuk uit balk BLA1.2 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	438	43,674
2	339	33,803
3	406	40,484
4	309	30,811
5	382	38,090
6	358	35,697

**Tabel 5: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA1.2**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 37,093$$

$$s = 4,648$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [29,446; 44,741]. Alle metingen behoren tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA1.2 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 37,093 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 27,078 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 32,642 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 6** toont per proefstuk uit balk BLA1.3 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	446	44,472
2	440	43,874
3	491	48,959
4	406	40,484
5	491	48,959
6	536	53,446

**Tabel 6: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA1.3**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 46,699$$

$$s = 4,633$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [39,077; 54,321]. Alle metingen behoren tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA1.3 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 46,699 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 34,090 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 41,095 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 7** geeft een overzicht van de gemiddelde cilinderdruksterkte en de gemiddelde kubusdruksterkte per balk uit reeks 1.

balk	$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{c,cub}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
B1	28,286	34,099
BL1	29,655	35,748
BLA1.1	32,974	39,750
BLA1.2	27,078	32,642
BLA1.3	34,090	41,095

**Tabel 7: Gemiddelde cilinderdruksterkte en kubusdruksterkte per balk uit reeks 1**

### 3.1.2 Reeks 2

De balken uit reeks zijn geprefabriceerd met beton met de volgende eigenschappen:

- sterkteklasse: C16/20
- omgevingsklasse: EE1
- consistentie: S3
- grootte granulaat ( $D_{max}$ ): 16 mm kalksteen
- cement CEM III/A 32,5 N LA
- hulpstof: Tixo superplastificeerder (0,5%)
- gegarandeerde verwerkingstijd: 100 minuten

#### 3.1.2.1 Drukproeven op gegoten stukken

Tijdens het storten van de balken uit reeks 2 werden ook enkele proefstukken gestort met als doel het verloop van de verharding en van de betondruksterkte in de tijd te kennen. De balken werden op verschillende tijdstippen beproefd, bijgevolg is de betondruksterkte steeds verschillend. De proefstukken werden beproefd na 28 en na 56 dagen. Met deze gegevens kan een trendlijn opgesteld worden.

**Tabel 8** toont de maximale drukkracht en de maximale drukspanning op cilinders met een diameter van 150 mm en een hoogte van 300 mm met een ouderdom van 28 dagen.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	550	31,124
2	486	27,502
3	542	30,671
4	488	27,615
5	558	31,576
6	536	30,331
7	574	32,482
8	568	32,142

**Tabel 8: Maximale drukkracht en maximale drukspanning op cilinders met een ouderdom van 28 dagen**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 30,430$$

$$s = 1,909$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [28,069; 32,792]. Niet alle metingen behoren tot dit interval. De metingen die niet tot dit interval behoren, dienen bijgevolg verworpen te worden en de berekeningen dienen herhaald te worden zonder deze metingen. In dit geval dienen de cilinders 2 en 4 buiten beschouwing gelaten te worden.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 31,388$$

$$s = 0,837$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [30,011; 32,580]. Alle metingen behoren nu wel tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde cilinderdruksterkte na 28 dagen bedraagt dus 31,388 N/mm<sup>2</sup>.

**Tabel 9** toont de maximale drukkracht en de maximale drukspanning op kubussen met ribben van 150 mm met een ouderdom van 28 dagen.

kubus	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	720	32,000
2	779	34,622
3	790	35,111
4	744	33,067
5	827	36,756
6	763	33,911
7	723	32,133
8	803	35,689

**Tabel 9: Maximale drukkracht en maximale drukspanning op kubussen met een ouderdom van 28 dagen**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 34,161$$

$$s = 1,700$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [32,058; 36,264]. Niet alle metingen behoren tot dit interval. De metingen die niet tot dit interval behoren, dienen bijgevolg verworpen te worden en de berekeningen dienen herhaald te worden zonder deze metingen. In dit geval dienen de kubussen 1 en 5 buiten beschouwing gelaten te worden.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 34,089$$

$$s = 1,326$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [31,907; 36,270]. Alle metingen behoren nu wel tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde kubusdruksterkte na 28 dagen bedraagt dus 34,089 N/mm<sup>2</sup>.



**Tabel 10** toont de maximale drukkracht en de maximale drukspanning op cilinders met een diameter van 150 mm en een hoogte van 300 mm met een ouderdom van 56 dagen.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	699	39,555
2	574	32,482
3	558	31,576
4	600	33,953
5	587	33,217
6	568	32,142
7	630	35,651

**Tabel 10: Maximale drukkracht en maximale drukspanning op cilinders met ouderdom van 56 dagen**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 34,082$$

$$s = 2,762$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [30,209; 37,956]. Niet alle metingen behoren tot dit interval. De metingen die niet tot dit interval behoren, dienen bijgevolg verworpen te worden en de berekeningen dienen herhaald te worden zonder deze metingen. In dit geval dient cilinder 1 buiten beschouwing gelaten te worden.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 33,170$$

$$s = 1,472$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [30,748; 35,593]. Opnieuw behoren niet alle metingen tot dit interval. Na het schrappen van deze metingen worden de berekeningen nogmaals herhaald.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 32,674$$

$$s = 0,929$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [30,762; 34,586]. Alle metingen behoren nu wel tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde cilinderdruksterkte na 56 dagen bedraagt dus 32,674 N/mm<sup>2</sup>.

**Tabel 11** toont de maximale drukkracht en de maximale drukspanning op kubussen met ribben van 150 mm met een ouderdom van 56 dagen.

kubus	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	859	38,178
2	878	39,022
3	918	40,800
4	872	38,756
5	859	38,178
6	875	38,889
7	923	41,022

**Tabel 11: Maximale drukkracht en maximale drukspanning op kubussen met ouderdom van 56 dagen**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 39,263$$

$$s = 1,174$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [37,617; 40,910]. Niet alle metingen behoren tot dit interval. De metingen die niet tot dit interval behoren, dienen bijgevolg verworpen te worden en de berekeningen dienen herhaald te worden zonder deze metingen. In dit geval dient kubus 7 buiten beschouwing gelaten te worden.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 38,970$$

$$s = 0,965$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [37,382; 40,559]. Opnieuw behoren niet alle metingen tot dit interval. Na het schrappen van deze metingen worden de berekeningen nogmaals herhaald.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 38,604$$

$$s = 0,401$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [37,780; 39,429]. Alle metingen behoren nu wel tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde cilinderdruksterkte na 56 dagen bedraagt dus 38,604 N/mm<sup>2</sup>.

Tot slot geeft **Tabel 12** een overzicht van de resultaten.

na 28 dagen		na 56 dagen	
$f_{cm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{c,cub,m}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{cm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{c,cub,m}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
31,388	34,089	32,674	38,604

**Tabel 12: Cilinder- en kubusdruksterkte na 28 en na 56 dagen**

De evolutie van betondruksterkte is zowel afhankelijk van het cementtype als van de omgevingstemperatuur tijdens de verharding. Het verband tussen de druksterkte op een tijdstip  $t$  en de druksterkte na 28 dagen wordt gegeven door de onderstaande formule.

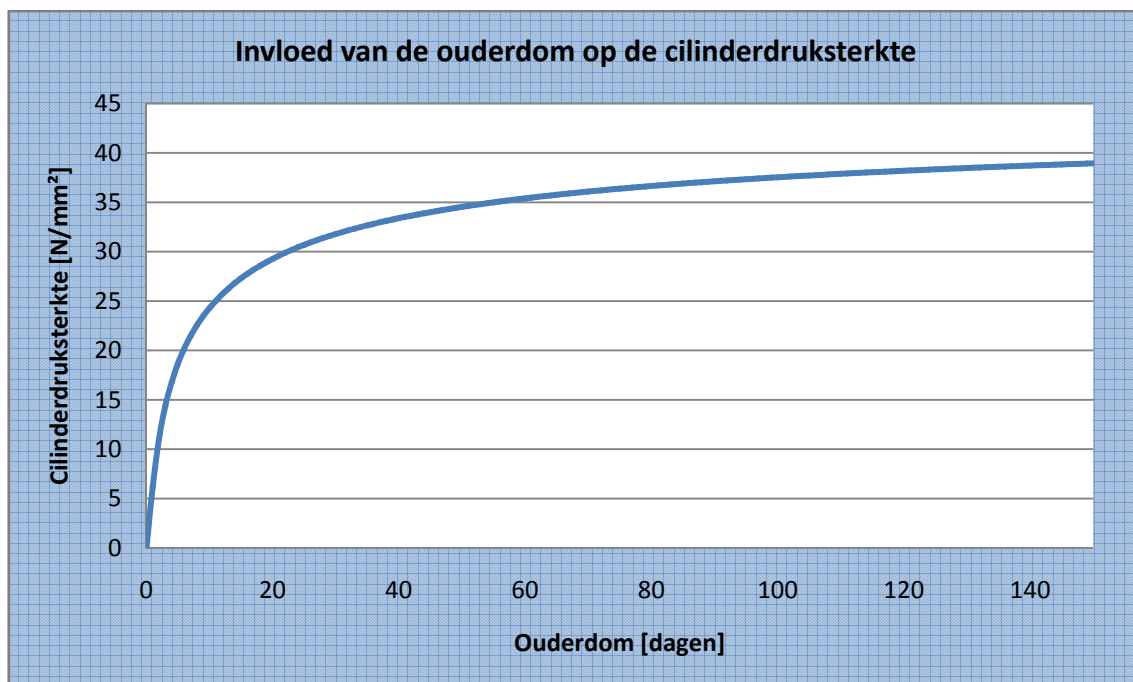
$$f_{cm}(t) = f_{cm} \cdot \beta_{cc}(t) = f_{cm} \cdot e^{s \cdot \left[ 1 - \left( \frac{28}{t/t_1} \right)^{1/2} \right]}$$

- met
- $f_{cm}(t)$  = de gemiddelde cilinderdruksterkte op het tijdstip  $t$ , in N/mm<sup>2</sup>
  - $f_{cm}$  = de gemiddelde cilinderdruksterkte na 28 dagen, in N/mm<sup>2</sup>
  - $t$  = de ouderdom van het beton, in dagen
  - $t_1$  = 1 dag
  - $s$  = een coëfficiënt in functie van het cementtype

Invullen van de gekende waarden levert de volgende formule.

$$f_{cm}(t) = 31,388 \times \beta_{cc}(t) = 31,388 \times e^{0,38 \times \left[ 1 - \left( \frac{28}{t/t_1} \right)^{1/2} \right]}$$

**Grafiek 1** geeft deze formule grafisch weer.



**Grafiek 1: Invloed van de ouderdom op de cilinderdruksterkte**

### 3.1.2.2 Drukproeven op uitgeboorde kernen

Om de betondruksterkte te kennen worden per balk drie kernen uitgeboord. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte gelijk aan de breedte van de balk. Uit elk van deze kernen kunnen twee proefstukken met een hoogte van 100 mm gezaagd worden. Op deze manier worden zes proefstukken bekomen. Deze proefstukken worden onderworpen aan een drukproef.

#### 3.1.2.2.1 Algemene betondruksterkte

Alle balken uit reeks 2 werden gestort met beton van een zelfde levering. Bijgevolg kan een algemene betondruksterkte bepaald worden. **Tabel 13** toont per kern de maximale drukkracht en de maximale drukspanning. De maximale drukspanning wordt berekend met de onderstaande formule.

$$\sigma = \frac{F}{\left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \pi}$$

balk	cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
B2	1	374	37,293
	2	349	34,800
	3	203	20,242
	4	325	32,407
	5	349	34,800
	6	267	26,623
BL2.1	1	408	40,683
	2	285	28,418
	3	307	30,612
	4	312	31,111
	5	299	29,814
	6	333	33,205
BLA2.1	1	360	35,897
	2	358	35,697
	3	366	36,495
	4	392	39,088
	5	392	39,088
	6	379	37,791
BLA2.2	1	411	40,982
	2	382	38,090
	3	387	38,589
	4	408	40,683
	5	336	33,504
	6	328	32,706

BLA2.3	1	349	34,800
	2	280	27,920
	3	328	32,706
	4	333	33,205
	5	333	33,205
	6	411	40,982
BLA2.4	1	416	41,481
	2	304	30,313
	3	376	37,492
	4	280	27,920
	5	328	32,706
	6	315	31,410
BLA2.5	1	363	36,196
	2	355	35,398
	3	390	38,888
	4	323	32,207
	5	336	33,504
	6	355	35,398
BLA2.6	1	317	31,609
	2	317	31,609
	3	344	34,301
	4	277	27,621
	5	349	34,800
	6	358	35,697
BLA2.7	1	411	40,982
	2	406	40,484
	3	328	32,706
	4	406	40,484
	5	355	35,398
	6	320	31,908
BLA2.8	1	400	39,885
	2	379	37,791
	3	366	36,495
	4	363	36,196
	5	419	41,780
	6	288	28,717
BLA2.9	1	358	35,697
	2	422	42,079
	3	331	33,005
	4	368	36,695
	5	403	40,184
	6	358	35,697

BLA2.10	1	360	35,897
	2	454	45,270
	3	398	39,686
	4	358	35,697
	5	400	39,885
	6	424	42,278
BLA2.11	1	251	25,028
	2	360	35,897
	3	307	30,612
	4	374	37,293
	5	309	30,811
	6	288	28,717
BLA2.12	1	352	35,099
	2	382	38,090
	3	376	37,492
	4	406	40,484
	5	374	37,293
	6	360	35,897
BLA2.13	1	317	31,609
	2	406	40,484
	3	387	38,589
	4	360	35,897
	5	355	35,398
	6	333	33,205
BL2.2	1	368	36,695
	2	376	37,492
	3	203	20,242
	4	368	36,695
	5	243	24,230
	6	331	33,005

Tabel 13: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit reeks 2

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 35,012$$

$$s = 4,689$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [33,750; 36,274]. Niet alle metingen behoren tot dit interval. De metingen die niet tot dit interval behoren, dienen bijgevolg verworpen te worden en de berekeningen dienen herhaald te worden zonder deze metingen.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 35,480$$

$$s = 0,514$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [35,170; 35,790]. Opnieuw behoren niet alle metingen tot dit interval. Metingen die niet tot dit interval behoren, worden verder buiten beschouwing gelaten. De berekeningen dienen voor een derde maal herhaald te worden.

$$\bar{x} = 35,564$$

$$s = 0,158$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [35,388; 35,741]. Alle metingen behoren nu wel tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De algemene gemiddelde betondruksterkte afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 35,564 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een algemene gemiddelde cilinderdruksterkte en in een algemene gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 25,962 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 31,296 \frac{N}{mm^2}$$

### 3.1.2.2.2 Specifieke betondruksterkte

Naast de algemene betondruksterkte wordt per balk ook de specifieke betondruksterkte berekend.

**Tabel 14** toont per proefstuk uit balk B2 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	374	37,293
2	349	34,800
3	203	20,242
4	325	32,407
5	349	34,800
6	267	26,623

**Tabel 14: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk B2**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 31,027$$

$$s = 6,409$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [20,484; 41,571]. Niet alle metingen behoren tot dit interval. De metingen die niet tot dit interval behoren, dienen bijgevolg verworpen te worden en de berekeningen dienen herhaald te worden zonder deze metingen. In dit geval wordt proefstuk 3 buiten beschouwing gelaten.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 33,185$$

$$s = 4,054$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [25,878; 40,492]. Alle metingen behoren nu wel tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk B2 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 33,185 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 24,225 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 29,202 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 15** toont per proefstuk uit balk BL2.1 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	408	40,683
2	285	28,418
3	307	30,612
4	312	31,111
5	299	29,814
6	333	33,205

**Tabel 15: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BL2.1**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 32,307$$

$$s = 4,396$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [25,075; 39,539]. Niet alle metingen behoren tot dit interval. De metingen die niet tot dit interval behoren, dienen bijgevolg verworpen te worden en de berekeningen dienen



herhaald te worden zonder deze metingen. In dit geval wordt proefstuk 1 buiten beschouwing gelaten.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 30,632$$

$$s = 1,762$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [27,457; 33,807]. Alle metingen behoren nu wel tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BL2.1 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 30,632 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 22,361 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 26,956 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 16** toont per proefstuk uit balk BLA2.1 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	360	35,897
2	358	35,697
3	366	36,495
4	392	39,088
5	392	39,088
6	379	37,791

**Tabel 16: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.1**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 37,343$$

$$s = 1,537$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [34,814; 39,871]. De metingen behoren allemaal tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA2.1 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 37,343 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 27,260 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 32,862 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 17** toont per proefstuk uit balk BLA2.2 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	411	40,982
2	382	38,090
3	387	38,589
4	408	40,683
5	336	33,504
6	328	32,706

**Tabel 17: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.2**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 37,426$$

$$s = 3,542$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [31,599; 43,252]. De metingen behoren allemaal tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA2.2 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 37,426 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 27,321 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 32,935 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 18** toont per proefstuk uit balk BLA2.3 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	349	34,800
2	280	27,920
3	328	32,706
4	333	33,205
5	333	33,205
6	411	40,982

**Tabel 18: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.3**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 33,803$$

$$s = 4,221$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [26,859; 40,747]. Niet alle metingen behoren tot dit interval. De metingen die niet tot dit interval behoren, dienen bijgevolg verworpen te worden en de berekeningen dienen herhaald te worden zonder deze metingen. In dit geval wordt proefstuk 6 buiten beschouwing gelaten.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 32,367$$

$$s = 2,608$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [27,666; 37,068]. Alle metingen behoren nu wel tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA2.3 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 32,367 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 23,628 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 28,483 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 19** toont per proefstuk uit balk BLA2.4 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	416	41,481
2	304	30,313
3	376	37,492
4	280	27,920
5	328	32,706
6	315	31,410

**Tabel 19: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.4**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 33,554$$

$$s = 5,018$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [25,297; 41,810]. De metingen behoren allemaal tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA2.4 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 33,554 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 24,494 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 29,527 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 20** toont per proefstuk uit balk BLA2.5 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	363	36,196
2	355	35,398
3	390	38,888
4	323	32,207
5	336	33,504
6	355	35,398

**Tabel 20: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.5**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 35,265$$

$$s = 2,301$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [31,479; 39,052]. De metingen behoren allemaal tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA2.5 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 35,265 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 25,744 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 31,033 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 21** toont per proefstuk uit balk BLA2.6 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	317	31,609
2	317	31,609
3	344	34,301
4	277	27,621
5	349	34,800
6	358	35,697

**Tabel 21: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.6**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 32,606$$

$$s = 2,969$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [27,721; 37,492]. Niet alle metingen behoren tot dit interval. De metingen die niet tot dit interval behoren, dienen bijgevolg verworpen te worden en de berekeningen dienen herhaald te worden zonder deze metingen. In dit geval wordt proefstuk 4 buiten beschouwing gelaten.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 33,603$$

$$s = 1,888$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [30,201; 37,006]. Alle metingen behoren nu wel tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA2.6 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 33,603 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 24,530 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 29,571 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 22** toont per proefstuk uit balk BLA2.7 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	411	40,982
2	406	40,484
3	328	32,706
4	406	40,484
5	355	35,398
6	320	31,908

**Tabel 22: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.7**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 36,994$$

$$s = 4,173$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [30,128; 43,859]. De metingen behoren allemaal tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA2.7 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 36,994 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 27,005 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 32,554 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 23** toont per proefstuk uit balk BLA2.8 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	400	39,885
2	379	37,791
3	366	36,495
4	363	36,196
5	419	41,780
6	288	28,717

**Tabel 23: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.8**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 36,811$$

$$s = 4,496$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [29,413; 44,208]. Niet alle metingen behoren tot dit interval. De metingen die niet tot dit interval behoren, dienen bijgevolg verworpen te worden en de berekeningen dienen herhaald te worden zonder deze metingen. In dit geval wordt proefstuk 6 buiten beschouwing gelaten.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 38,430$$

$$s = 2,371$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [34,157; 42,702]. Alle metingen behoren nu wel tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA2.8 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 38,430 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 28,054 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 33,818 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 24** toont per proefstuk uit balk BLA2.9 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	358	35,697
2	422	42,079
3	331	33,005
4	368	36,695
5	403	40,184
6	358	35,697

Tabel 24: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.9

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 37,226$$

$$s = 3,319$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [31,766; 42,687]. De metingen behoren allemaal tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA2.9 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 37,226 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 27,175 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 32,759 \frac{N}{mm^2}$$

Tabel 25 toont per proefstuk uit balk BLA2.10 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	360	35,897
2	454	45,270
3	398	39,686
4	358	35,697
5	400	39,885
6	424	42,278

Tabel 25: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.10

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 39,786$$

$$s = 3,692$$



Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [33,712; 45,860]. De metingen behoren allemaal tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA2.10 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 39,786 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 29,044 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 35,011 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 26** toont per proefstuk uit balk BLA2.11 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	251	25,028
2	360	35,897
3	307	30,612
4	374	37,293
5	309	30,811
6	288	28,717

**Tabel 26: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.11**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 31,393$$

$$s = 4,554$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [23,900; 38,886]. De metingen behoren allemaal tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA2.11 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 31,393 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 22,917 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 27,626 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 27** toont per proefstuk uit balk BLA2.12 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	352	35,099
2	382	38,090
3	376	37,492
4	406	40,484
5	374	37,293
6	360	35,897

**Tabel 27: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.12**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 37,392$$

$$s = 1,874$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [34,309; 40,476]. Niet alle metingen behoren tot dit interval. De metingen die niet tot dit interval behoren, dienen bijgevolg verworpen te worden en de berekeningen dienen herhaald te worden zonder deze metingen. In dit geval wordt proefstuk 4 buiten beschouwing gelaten.

De parameters van de steekproef worden opnieuw berekend.

$$\bar{x} = 36,774$$

$$s = 1,234$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval dient opnieuw opgesteld te worden. In dit geval is het gelijk aan het interval [34,550; 38,999]. Alle metingen behoren nu wel tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA2.12 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 36,774 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 26,845 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 32,361 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 28** toont per proefstuk uit balk BLA2.13 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	317	31,609
2	406	40,484
3	387	38,589
4	360	35,897
5	355	35,398
6	333	33,205

**Tabel 28: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BLA2.13**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 35,864$$

$$s = 3,291$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [30,449; 41,278]. De metingen behoren allemaal tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BLA2.13 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 35,864 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 26,180 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 31,560 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 29** toont per proefstuk uit balk BL2.2 de maximale drukkracht en de maximale drukspanning.

cilinder	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	368	36,695
2	376	37,492
3	203	20,242
4	368	36,695
5	243	24,230
6	331	33,005

**Tabel 29: Maximale drukkracht en maximale drukspanning per proefstuk uit balk BL2.2**

Uitgaande van een normale verdeling kan de gemiddelde drukspanning en de standaardafwijking berekend worden.

$$\bar{x} = 31,393$$

$$s = 7,371$$

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of alle metingen behouden mogen worden. In dit geval is het 99%-betrouwbaarheidsinterval gelijk aan het interval [19,266; 43,520]. De metingen behoren allemaal tot dit interval, waardoor ze als betrouwbaar beschouwd mogen worden. De gemiddelde betondruksterkte van balk BL2.2 afgeleid uit cilinders met een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm is dus gelijk aan 31,393 N/mm<sup>2</sup>. Tot slot wordt deze druksterkte omgezet in een gemiddelde cilinderdruksterkte en in een gemiddelde kubusdruksterkte.

$$f_c = 22,917 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub} = 27,626 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 30** geeft een overzicht van de gemiddelde cilinderdruksterkte en de gemiddelde kubusdruksterkte per balk uit reeks 2.

balk	$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{c,cub}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
B2	24,225	29,202
BL2.1	22,361	26,956
BLA2.1	27,260	32,862
BLA2.2	27,321	32,935
BLA2.3	23,628	28,483
BLA2.4	24,494	29,527
BLA2.5	25,744	31,033
BLA2.6	24,530	29,571
BLA2.7	27,005	32,554
BLA2.8	28,054	33,818
BLA2.9	27,175	32,759
BLA2.10	29,044	35,011
BLA2.11	22,917	27,626
BLA2.12	26,845	32,361
BLA2.13	26,180	31,560
BL2.2	22,917	27,626

**Tabel 30: Gemiddelde cilinderdruksterkte en kubusdruksterkte per balk uit reeks 2**

**Tabel 31** tot slot vergelijkt de gemiddelde cilinderdruksterkte met de waarden bekomen uit **Grafiek 1**, die de invloed van de ouderdom op de druksterkte weergeeft.

balk	Ouderdom [dagen]	$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{c,theorie}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>B2</b>	112	24,225	37,956
<b>BL2.1</b>	113	22,361	37,988
<b>BLA2.1</b>	127	27,260	38,398
<b>BLA2.2</b>	126	27,321	38,371
<b>BLA2.3</b>	141	23,628	38,748
<b>BLA2.4</b>	141	24,494	38,748
<b>BLA2.5</b>	126	25,744	38,371
<b>BLA2.6</b>	141	24,530	38,748
<b>BLA2.7</b>	141	27,005	38,748
<b>BLA2.8</b>	149	28,054	38,827
<b>BLA2.9</b>	143	27,175	38,794
<b>BLA2.10</b>	143	29,044	38,794
<b>BLA2.11</b>	146	22,917	38,862
<b>BLA2.12</b>	148	26,845	38,906
<b>BLA2.13</b>	147	26,180	38,884
<b>BL2.2</b>	142	22,917	38,772

**Tabel 31: Gemiddelde cilinderdruksterkte**

Er dient echter wel opgemerkt te worden dat de theoretisch berekende waarden slechts geldig zijn voor mengsels waaraan alleen cement en geen toevoegsels of hulpstoffen toegevoegd zijn die de verhardingssnelheid beïnvloeden. Het gebruik van de plastificeerder in het beton kan dus mogelijks de grote verschillen verklaren.

### 3.1.2.3 Statische elasticiteitsmodulus bij druk

Tijdens het storten van de balken werden ook twee prisma's met als theoretische afmetingen 200 mm x 200 mm x 500 mm gegoten. M.b.v. deze prisma's kon de elasticiteitsmodulus van het beton gemeten worden.

**Tabel 32** en **Tabel 33** tonen de meetresultaten die bekomen zijn conform de norm NBN B15-203:1990.

meting	$\epsilon$	$\epsilon'$	$\epsilon_m$	centrering ok?		# cycli
				voor	achter	
0	-9,2E-05	-9,2E-05	-9,2E-05	WAAR	WAAR	
1	-0,0001	-8,8E-05	-9,4E-05	WAAR	WAAR	ok
2	-0,000096	-7,6E-05	-0,000086	WAAR	WAAR	ok
3	-0,000108	-0,000108	-0,000108	WAAR	WAAR	ok
4	-0,000108	-0,000104	-0,000106	WAAR	WAAR	ok

**Tabel 32: Meetresultaten eerste prisma**

meting	$\epsilon$	$\epsilon'$	$\epsilon_m$	centrering ok?		# cycli
				voor	achter	
0	-9,2E-05	-0,0001	-0,000096	WAAR	WAAR	
1	-8,4E-05	-7,6E-05	-8E-05	WAAR	WAAR	niet ok
2	-0,000104	-9,2E-05	-0,000098	WAAR	WAAR	ok
3	-0,000104	-8,8E-05	-9,6E-05	WAAR	WAAR	ok
4	-0,000096	-8,8E-05	-9,2E-05	WAAR	WAAR	ok

**Tabel 33: Meetresultaten tweede prisma**

Volgens de metingen op het eerste prisma is de elasticiteitsmodulus van het beton gelijk aan 43925 N/mm<sup>2</sup>. Volgens de metingen op het tweede prisma is de elasticiteitsmodulus van het beton gelijk aan 41489 N/mm<sup>2</sup>.

De elasticiteitsmodulus kan ook berekend worden met een experimenteel bepaalde formule.

$$E_c = 9,5 \times (f_{ck} + 8)^{1/3} \times 10^3 = 9,5 \times (16 + 8)^{1/3} \times 10^3 = 27402,742 \frac{N}{mm^2}$$

De theoretisch berekende elasticiteitsmodulus is steeds kleiner dan de empirisch bepaalde elasticiteitsmodulus en is bijgevolg een veilige waarde om mee te rekenen.

## 3.2 Wapeningsstaal

---

### 3.2.1 Reeks 1

De balken uit reeks 1 werden reeds in het academiejaar 2006-2007 geprefabriceerd. Er waren echter geen staven meer voorradig om de elasticiteitsmodulus en de vloeigrens te bepalen. Daarom worden de waarden voor de vloeigrenzen, zoals die toentertijd gevonden werden uit trekproeven, als waar aangenomen.

$$\sigma_{v,\phi 14} = 567,723 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi 8} = 584,745 \frac{N}{mm^2}$$

### 3.2.2 Reeks 2

Om de karakteristieken van het gebruikte wapeningsstaal te achterhalen, worden enkele proefstaven van de verschillende gebruikte diameters onderworpen aan een trekproef. Deze trekproef gebeurt met een elektronisch gestuurde mechanische proefbank. De proefstaaf dient in de proefbank over de volle lengte van de klauwen te worden geklemd en dan moet er nog voldoende plaats blijven voor een rekmeter. In een eerste fase zal het staal elastisch rekken. Tijdens dit stadium wordt de spanning in functie van de rek opgemeten, waarbij volgens de wet van Hooke de elasticiteitsmodulus  $E$  bepaald kan worden. Eens de proportionaliteitsgrens voorbij begint het staal te vloeien en is de vervorming plastisch. De spanning blijft constant, terwijl het staal blijft vervormen. Daarna neemt de spanning opnieuw toe en begint de proefstaaf in te snoeren. De trekspanning in de ingesnoerde doorsnede loopt dan snel op, totdat de staaf uiteindelijk breekt. De spanning bij de breuk is de maat voor de treksterkte.

#### 3.2.2.1 Elasticiteitsmodulus

Om de elasticiteitsmodulus van het staal te bepalen wordt de trekkracht in het elastisch gebied opgemeten in functie van de rek. De opgemeten kracht wordt omgerekend naar een spanning in de doorsnede zodat m.b.v. de wet van Hooke de elasticiteitsmodulus berekend kan worden door lineaire regressie.

**Tabel 34** tot **Tabel 45** tonen de opgemeten krachten en de verdere berekeningen. Er wordt gebruik gemaakt van een rekmeter met meetbasis 50 mm.

$\Delta L$ [mm]	$\epsilon$	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0,00	0,000000	0,0	0,000
0,01	0,000200	2,6	51,961
0,02	0,000400	4,8	95,928
0,03	0,000600	7,3	145,891
0,04	0,000800	9,0	179,866
0,05	0,001000	11,2	223,833
0,06	0,001200	13,8	275,794
0,07	0,001400	15,7	313,766
0,08	0,001600	17,8	355,734
0,09	0,001800	20,1	401,700
0,10	0,002000	21,9	437,673
0,11	0,002200	23,8	475,645
0,12	0,002400	25,7	513,616
0,13	0,002600	26,7	533,601
0,14	0,002800	27,2	543,594

Tabel 34: Staaf 8-2007-blauw

$\Delta L$ [mm]	$\epsilon$	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0,01	0,000000	0,0	0,000
0,01	0,000200	2,0	39,819
0,02	0,000400	4,1	81,629
0,03	0,000600	6,3	125,429
0,04	0,000800	8,0	159,275
0,05	0,001000	9,9	197,103
0,06	0,001200	11,9	236,922
0,07	0,001400	13,8	274,750
0,08	0,001600	15,7	312,578
0,09	0,001800	17,5	348,415
0,10	0,002000	19,1	380,270
0,11	0,002200	21,4	426,062
0,12	0,002400	23,1	459,908
0,13	0,002600	25,0	497,735
0,14	0,002800	26,8	533,572

Tabel 35: Staaf 8-2007-groen



$\Delta L$ [mm]	$\epsilon$	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0,00	0,000000	0,0	0,000
0,01	0,000200	2,0	39,973
0,02	0,000400	4,1	81,944
0,03	0,000600	6,3	125,913
0,04	0,000800	8,0	159,890
0,05	0,001000	9,9	197,864
0,06	0,001200	11,9	237,837
0,07	0,001400	13,8	275,810
0,08	0,001600	15,7	313,784
0,09	0,001800	17,5	349,760
0,10	0,002000	19,1	381,738
0,11	0,002200	21,4	427,706
0,12	0,002400	23,1	461,683
0,13	0,002600	25,0	499,657
0,14	0,002800	26,8	535,632

Tabel 36: Staaf 8-2007-oranje

$\Delta L$ [mm]	$\epsilon$	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0,00	0,000000	0,0	0,000
0,01	0,000200	1,9	37,496
0,02	0,000400	4,0	78,939
0,03	0,000600	6,2	122,356
0,04	0,000800	8,5	167,746
0,05	0,001000	10,7	211,163
0,06	0,001200	12,7	250,633
0,07	0,001400	14,6	288,129
0,08	0,001600	16,4	323,652
0,09	0,001800	18,2	359,175
0,10	0,002000	20,1	396,671
0,11	0,002200	21,8	430,220
0,12	0,002400	23,4	461,796
0,13	0,002600	25,2	497,319
0,14	0,002800	26,9	530,868
0,15	0,003000	28,2	556,523

Tabel 37: Staaf 8-2006-blauw

$\Delta L$ [mm]	$\epsilon$	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0,00	0,000000	0,0	0,000
0,01	0,000200	1,9	37,355
0,02	0,000400	3,4	66,846
0,03	0,000600	5,6	110,099
0,04	0,000800	8,1	159,250
0,05	0,001000	10,5	206,436
0,06	0,001200	12,6	247,723
0,07	0,001400	15,0	294,908
0,08	0,001600	17,1	336,195
0,09	0,001800	19,3	379,449
0,10	0,002000	21,9	430,566
0,11	0,002200	24,3	477,751
0,12	0,002400	26,2	515,106
0,13	0,002600	27,9	548,529

Tabel 38: Staaf 8-2006-groen

$\Delta L$ [mm]	$\epsilon$	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0,00	0,000000	0,0	0,000
0,01	0,000200	1,0	19,784
0,02	0,000400	3,1	61,331
0,03	0,000600	4,4	87,050
0,04	0,000800	6,3	124,640
0,05	0,001000	7,9	156,295
0,06	0,001200	9,4	185,971
0,07	0,001400	11,9	235,432
0,08	0,001600	13,4	265,108
0,09	0,001800	15,4	304,677
0,10	0,002000	17,2	340,288
0,11	0,002200	18,8	371,943
0,12	0,002400	20,8	411,511
0,13	0,002600	22,5	445,145
0,14	0,002800	24,1	476,799
0,15	0,003000	26,0	514,389
0,16	0,003200	27,3	540,109

Tabel 39: Staaf 8-2006-oranje

$\Delta L$ [mm]	$\epsilon$	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0,00	0,000000	0,0	0,000
0,01	0,000200	0,5	3,254
0,02	0,000400	2,4	15,618
0,03	0,000600	7,4	48,157
0,04	0,000800	13,6	88,504
0,05	0,001000	22,2	144,470
0,06	0,001200	33,7	219,308
0,07	0,001400	44,4	288,939
0,08	0,001600	55,9	363,777
0,09	0,001800	69,9	454,884
0,10	0,002000	79,8	519,310
0,11	0,002200	85,1	553,800

Tabel 40: Staaf 14-blauw

$\Delta L$ [mm]	$\epsilon$	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0,00	0,000000	0,0	0,000
0,01	0,000200	1,6	10,433
0,02	0,000400	4,2	27,387
0,03	0,000600	8,7	56,731
0,04	0,000800	15,4	100,421
0,05	0,001000	24,4	159,108
0,06	0,001200	34,1	222,360
0,07	0,001400	45,6	297,350
0,08	0,001600	56,2	366,471
0,09	0,001800	67,1	437,548
0,10	0,002000	78,7	513,189
0,11	0,002200	85,1	554,923

Tabel 41: Staaf 14-groen

$\Delta L$ [mm]	$\epsilon$	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0,00	0,000000	0,0	0,000
0,01	0,000200	0,8	5,215
0,02	0,000400	2,7	17,599
0,03	0,000600	7,6	49,539
0,04	0,000800	14,9	97,123
0,05	0,001000	24,9	162,306
0,06	0,001200	33,9	220,970
0,07	0,001400	46,8	305,057
0,08	0,001600	59,1	385,232
0,09	0,001800	70,1	456,933
0,10	0,002000	81,2	529,286
0,11	0,002200	85,6	557,967

Tabel 42: Staaf 14-oranje

$\Delta L$ [mm]	$\epsilon$	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0,00	0,000000	0,0	0,000
0,01	0,000200	8,9	28,501
0,02	0,000400	19,6	62,766
0,03	0,000600	30,0	96,071
0,04	0,000800	41,2	131,937
0,05	0,001000	50,6	162,040
0,06	0,001200	62,0	198,546
0,07	0,001400	73,0	233,772
0,08	0,001600	85,6	274,122
0,09	0,001800	98,0	313,832
0,10	0,002000	110,9	355,142
0,11	0,002200	123,4	395,172
0,12	0,002400	138,7	444,168
0,13	0,002600	151,6	485,478
0,14	0,002800	160,7	514,620
0,15	0,003000	165,9	531,272
0,16	0,003200	171,7	549,846
0,17	0,003400	174,9	560,093
0,18	0,003600	179,8	575,785

Tabel 43: Staaf 20-blauw

$\Delta L$ [mm]	$\epsilon$	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0,00	0,000000	0,0	0,000
0,01	0,000200	14,9	47,506
0,02	0,000400	28,7	91,506
0,03	0,000600	39,9	127,215
0,04	0,000800	51,8	165,157
0,05	0,001000	63,8	203,417
0,06	0,001200	76,1	242,634
0,07	0,001400	88,4	281,850
0,08	0,001600	102,0	325,212
0,09	0,001800	114,1	363,791
0,10	0,002000	126,1	402,051
0,11	0,002200	138,9	442,862
0,12	0,002400	150,5	479,847
0,13	0,002600	162,4	517,788
0,14	0,002800	169,0	538,831
0,15	0,003000	172,4	549,672
0,16	0,003200	181,7	579,324

Tabel 44: Staaf 20-groen

$\Delta L$ [mm]	$\varepsilon$	F [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0,00	0,000000	0,0	0,000
0,01	0,000200	19,4	61,743
0,02	0,000400	37,9	120,621
0,03	0,000600	54,9	174,726
0,04	0,000800	67,0	213,236
0,05	0,001000	79,4	252,700
0,06	0,001200	91,8	292,165
0,07	0,001400	103,4	329,083
0,08	0,001600	114,4	364,092
0,09	0,001800	124,8	397,191
0,10	0,002000	133,4	424,562
0,11	0,002200	143,8	457,661
0,12	0,002400	150,9	480,258
0,13	0,002600	155,4	494,580
0,14	0,002800	160,6	511,129
0,15	0,003000	166,8	530,862
<b>0,16</b>	0,003200	171,6	546,138

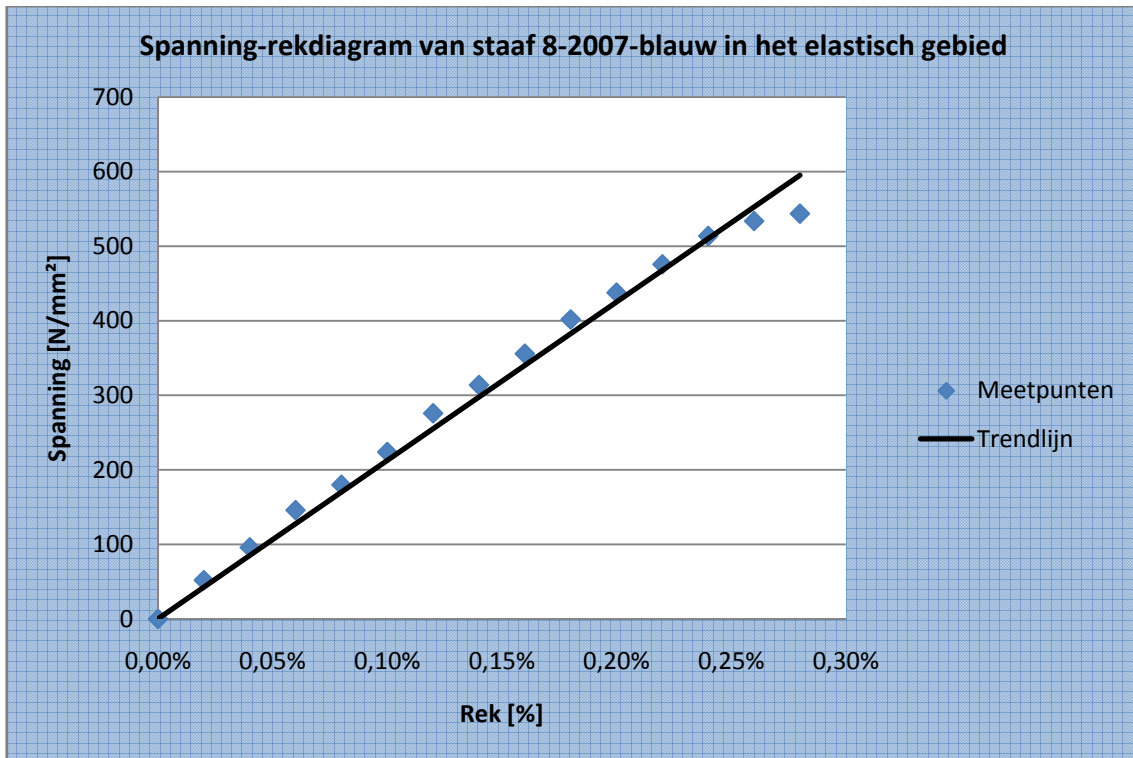
Tabel 45: Staaf 20-oranje

De wet van Hooke geeft het verband aan tussen de elasticiteitsmodulus van het staal, de spanning en de rek, zolang de vervorming elastisch is.

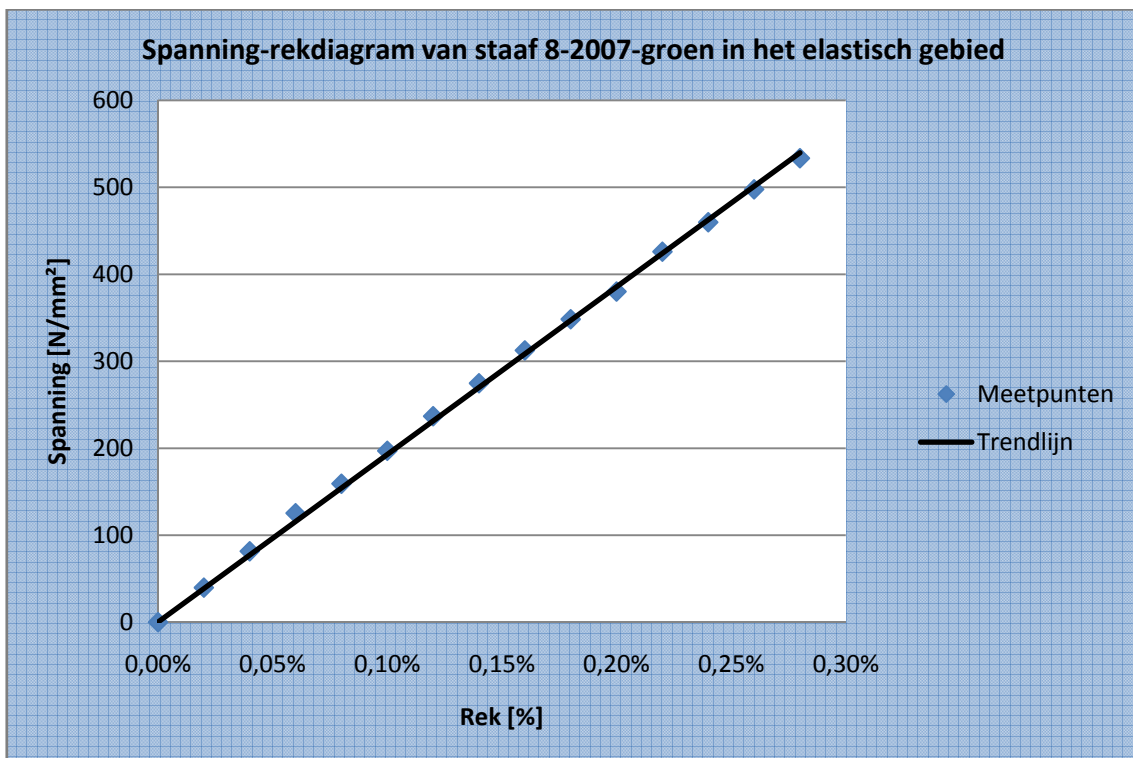
$$\sigma = E \times \varepsilon$$

De richtingscoëfficiënt van de rechte in het spanning-rekdiagram, die bekomen wordt door lineaire regressie, is dus gelijk aan de elasticiteitsmodulus van het staal.

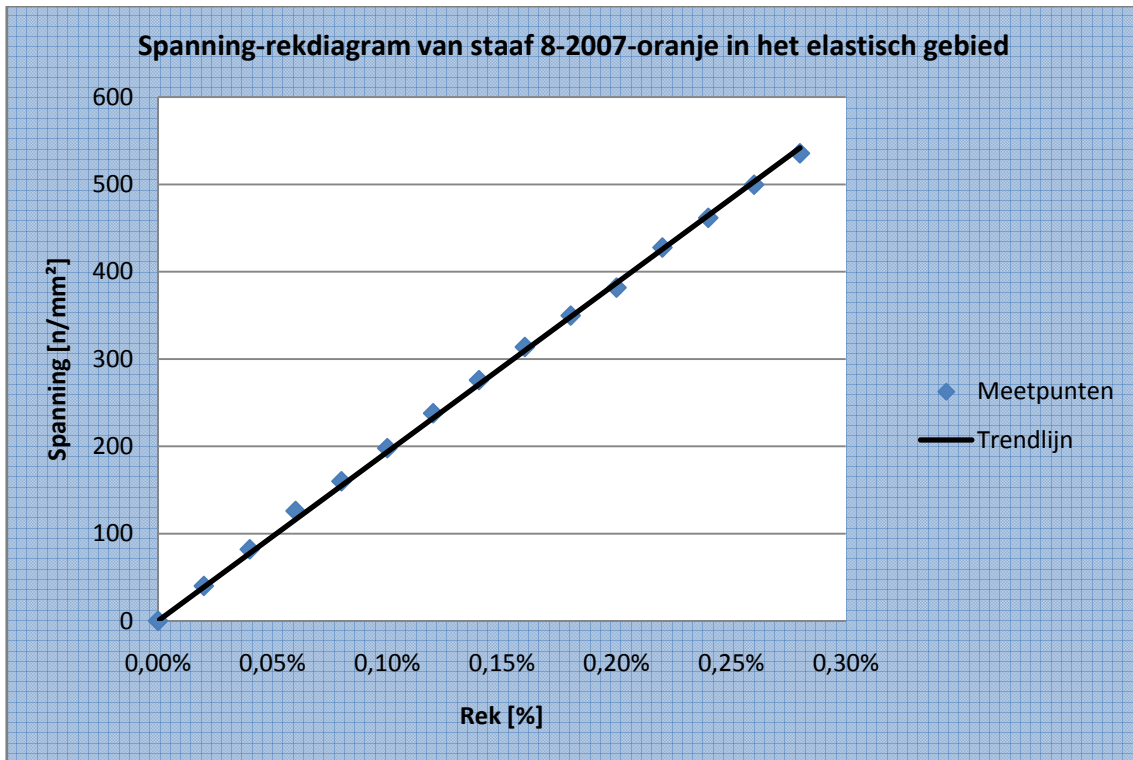
**Grafiek 2** tot **Grafiek 13** geven de meetwaarden en de corresponderende trendlijnen weer.



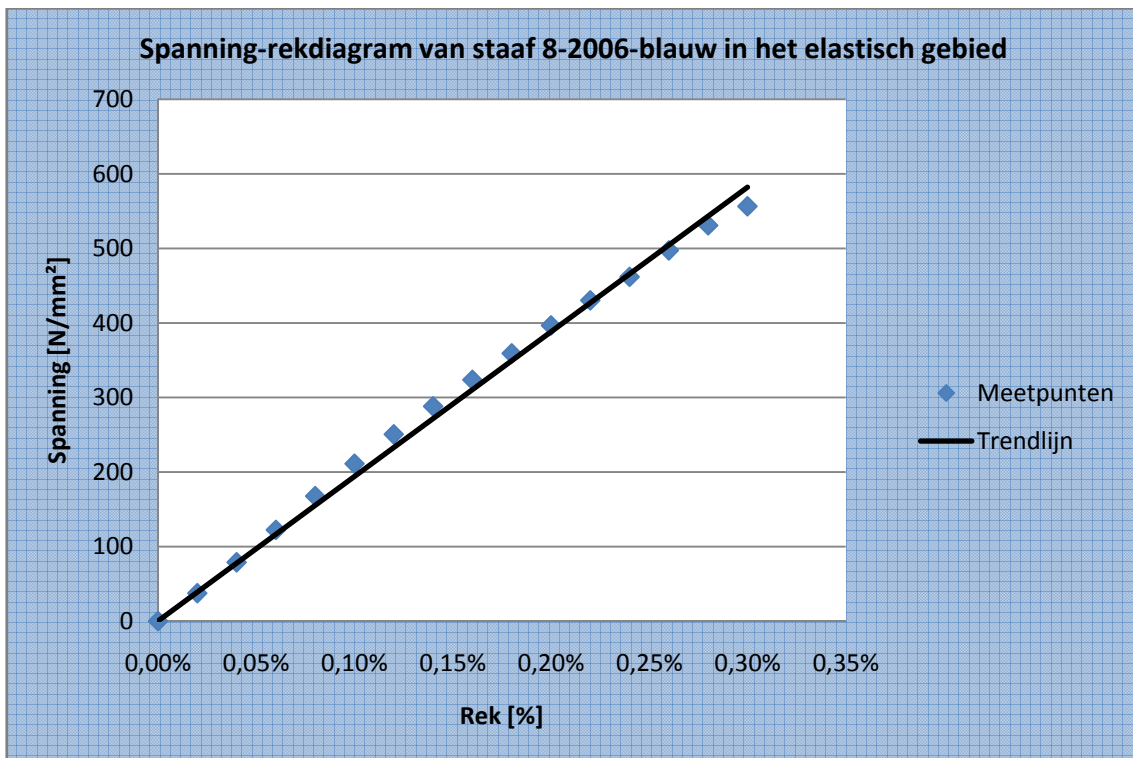
Grafiek 2: Spanning-rekdiagram van staaf 8-2007-blauw in het elastisch gebied



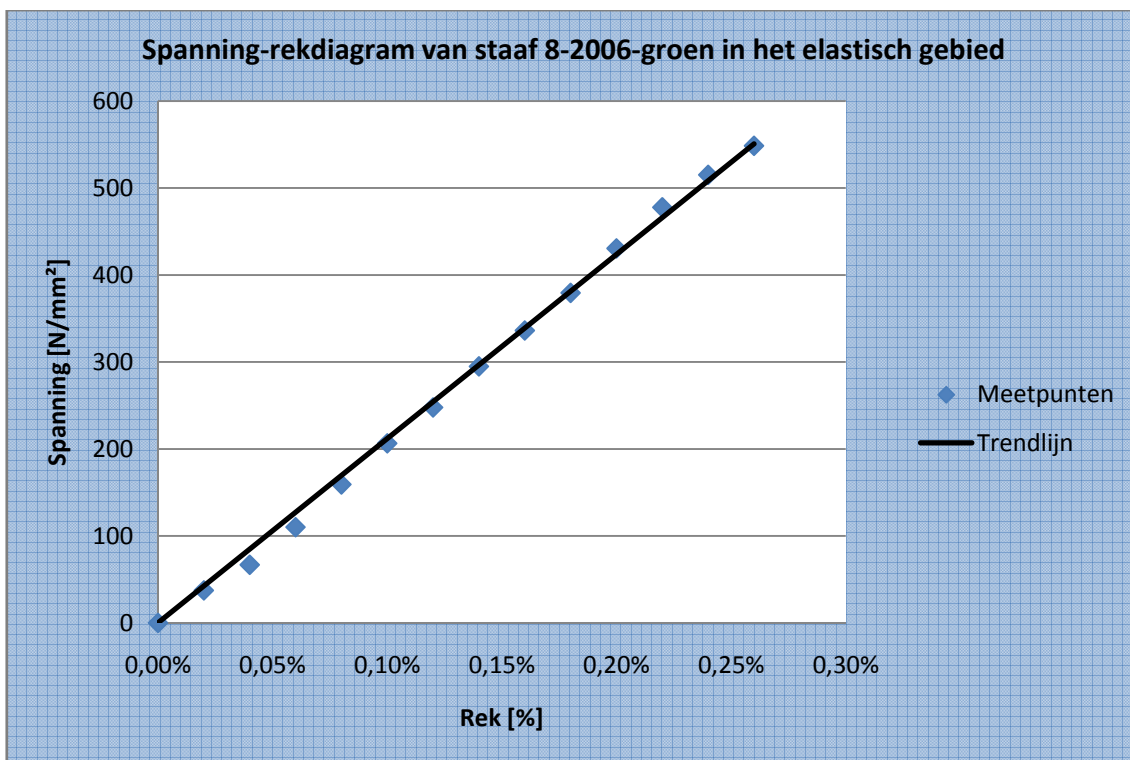
Grafiek 3: Spanning-rekdiagram van staaf 8-2007-groen in het elastisch gebied



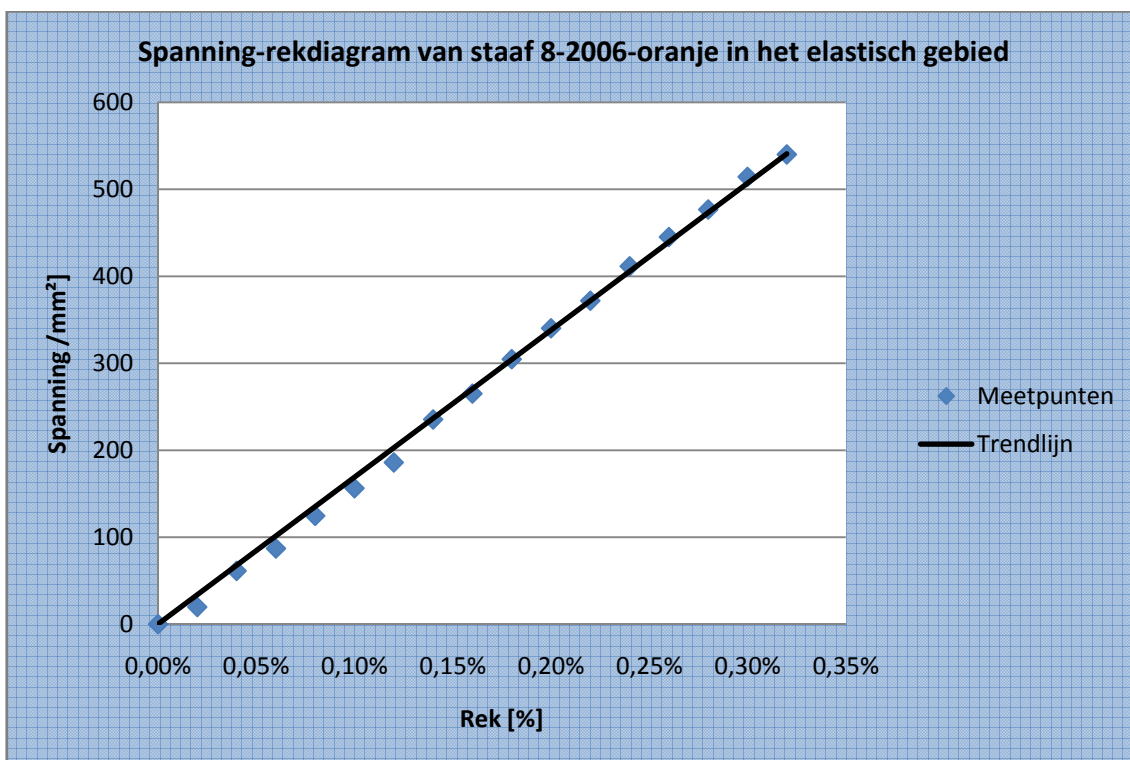
Grafiek 4: Spanning-rekdiagram van staaf 8-2007-oranje in het elastisch gebied



Grafiek 5: Spanning-rekdiagram van staaf 8-2006-blauw in het elastisch gebied

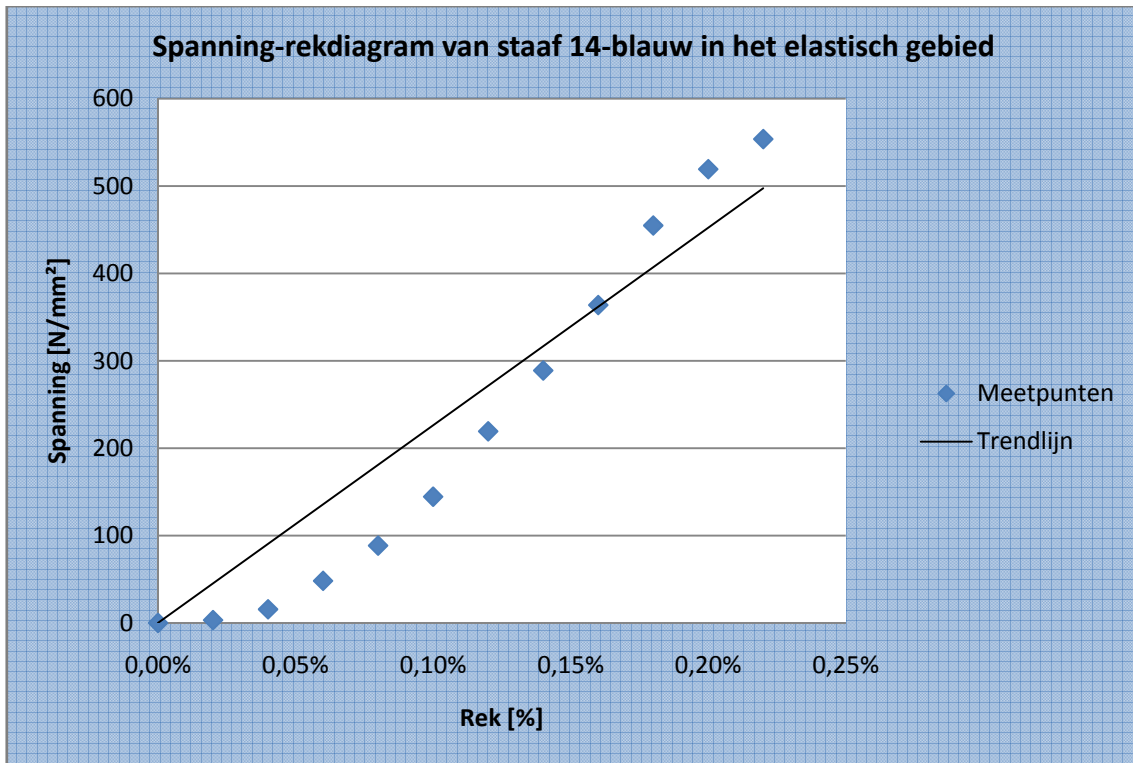


Grafiek 6: Spanning-rekdiagram van staaf 8-2006-groen in het elastisch gebied

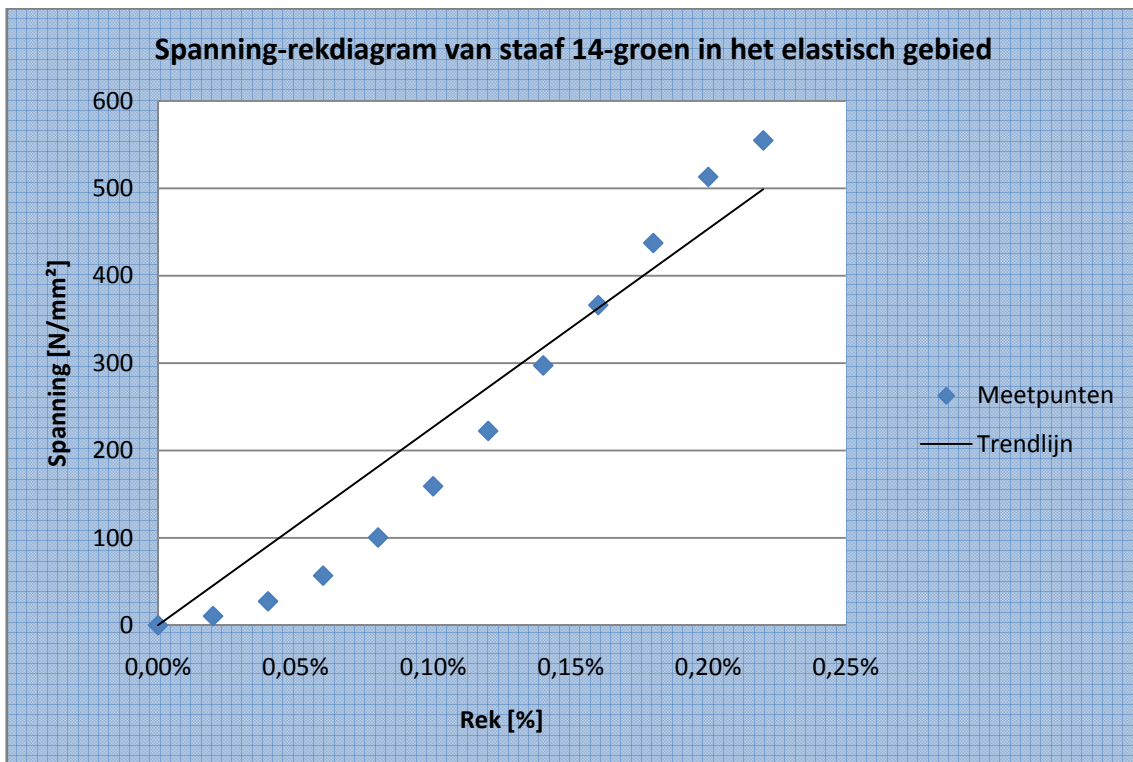


Grafiek 7: Spanning-rekdiagram van staaf 8-2006-oranje in het elastisch gebied

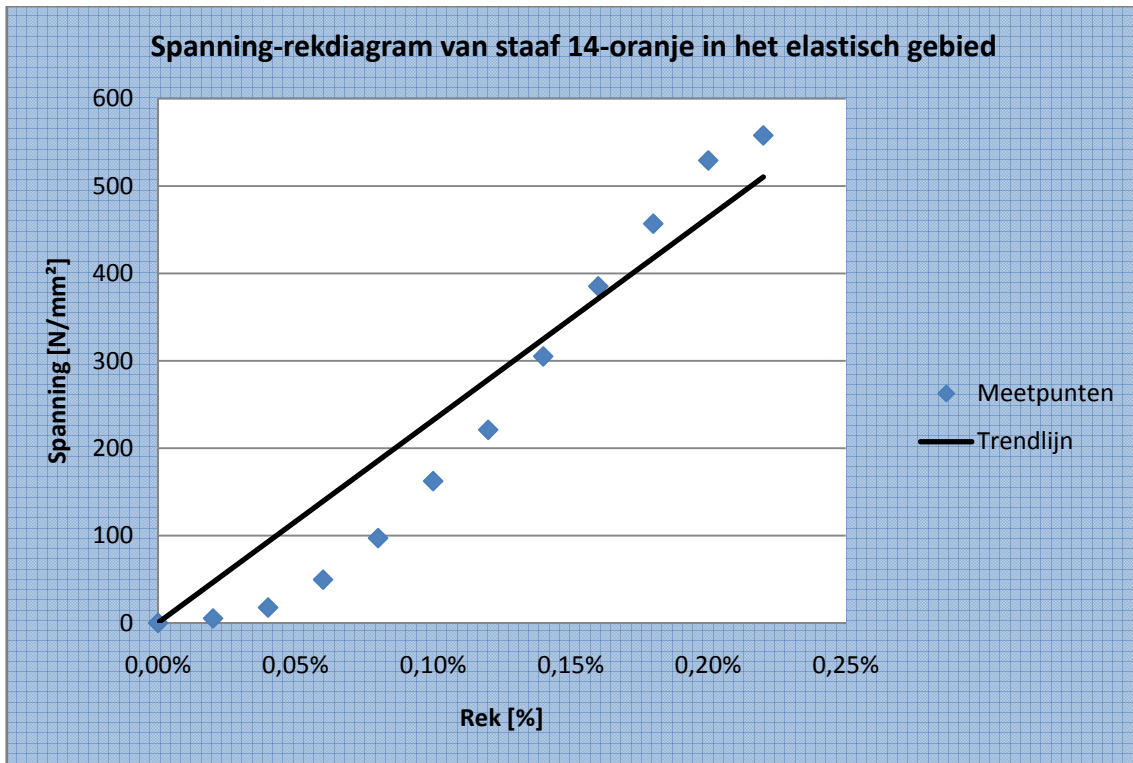




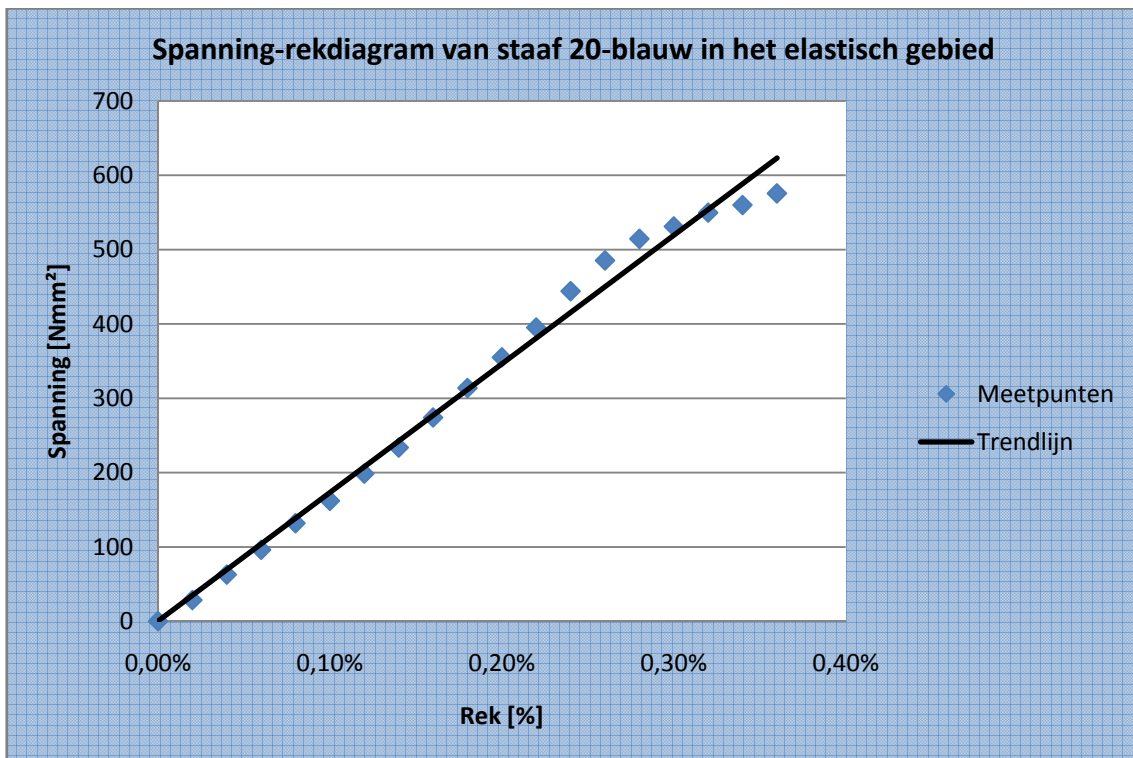
Grafiek 8: Spanning-rekdiagram van staaf 14-blauw in het elastisch gebied



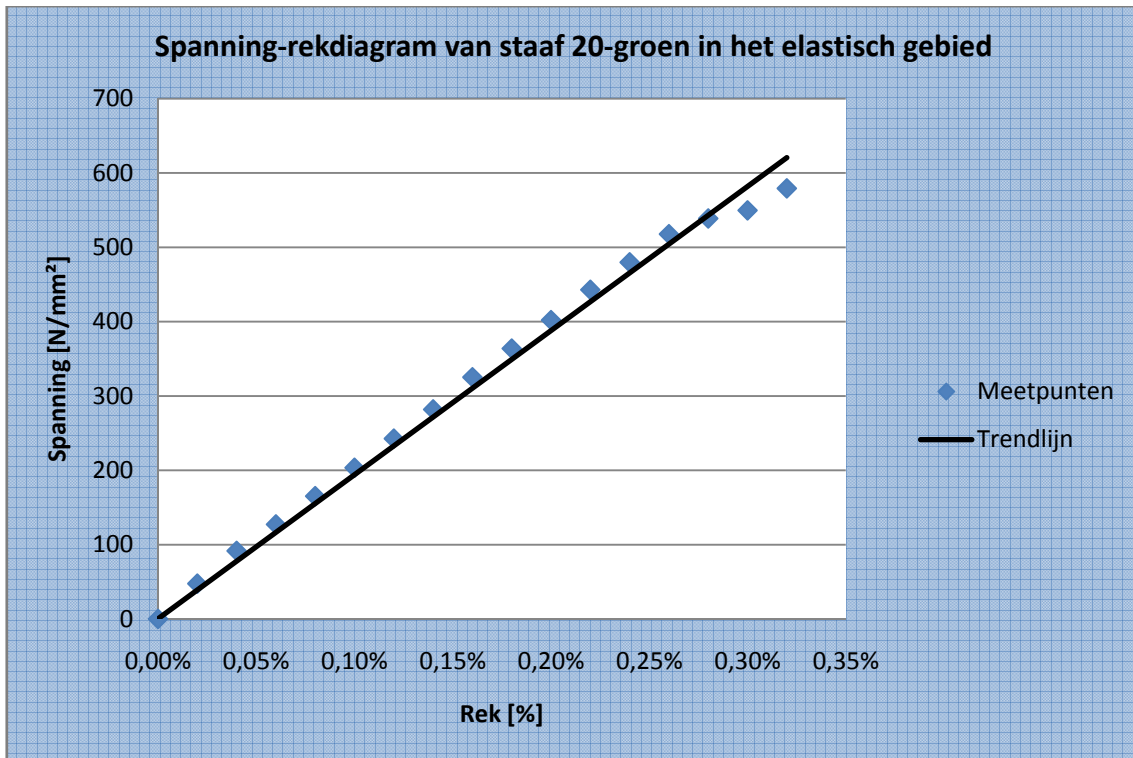
Grafiek 9: Spanning-rekdiagram van staaf 14-groen in het elastisch gebied



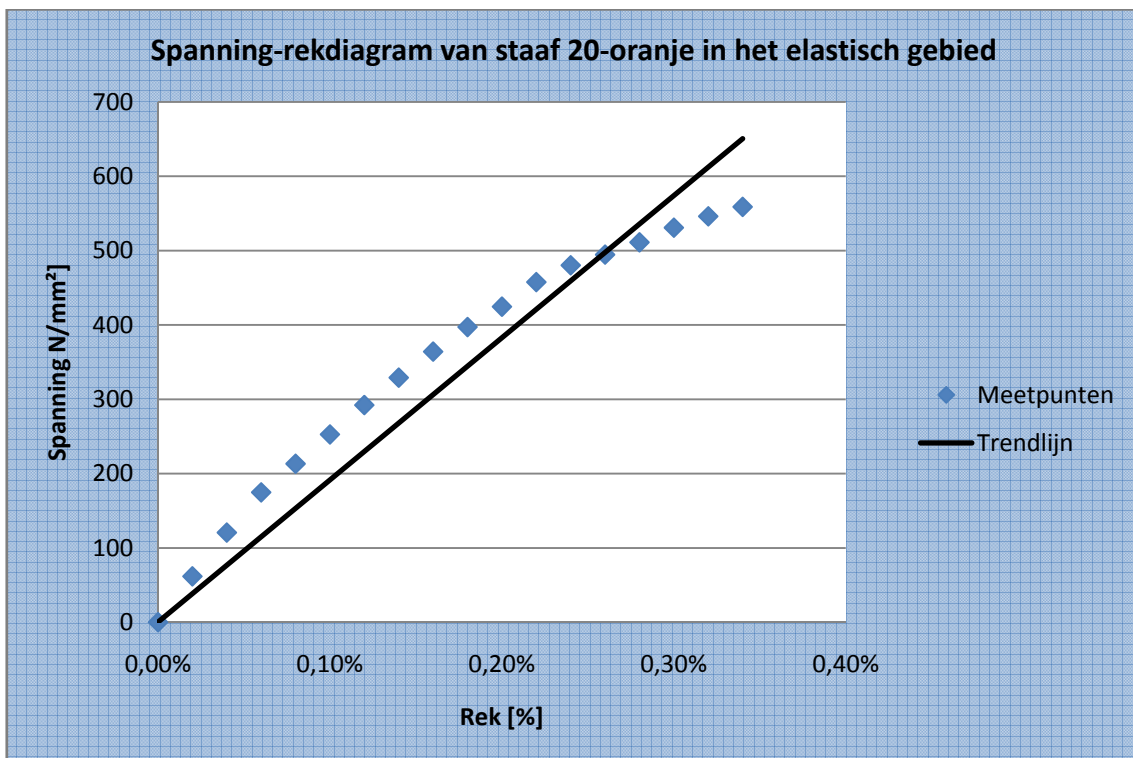
Grafiek 10: Spanning-rekdiagram van staaf 14-oranje in het elastisch gebied



Grafiek 11: Spanning-rekdiagram van staaf 20-blauw in het elastisch gebied



Grafiek 12: Spanning-rekdiagram van staaf 20-groen in het elastisch gebied



Grafiek 13: Spanning-rekdiagram van staaf 20-oranje in het elastisch gebied

Uit elke grafiek wordt de elasticiteitsmodulus van het staal berekend.

diameter [mm]	kleur	levering	E [N/mm <sup>2</sup> ]
8	blauw	2007	212570
8	groen	2007	192768
8	oranje	2007	193512
8	blauw	2006	194022
8	groen	2006	211837
8	oranje	2006	168992
14	blauw	2006	226115
14	groen	2006	226818
14	oranje	2006	231967
20	blauw	2006	173120
20	groen	2006	193963
20	oranje	2006	191367

**Tabel 46: Overzicht elasticiteitsmoduli**

Theoretisch is de elasticiteitsmodulus van staal minimaal 200000 N/mm<sup>2</sup>. De afwijking van verschillende meetresultaten is echter veel te groot om aan toevallige fouten geweten te kunnen worden. Er moet bijgevolg een systematische fout opgetreden zijn. Deze is waarschijnlijk een gevolg van de slip die tijdens de trekproef optreedt tussen de proefstaaf en de klauwen van de proefbank. Omdat deze fout onbekend is in grootte, kan er dus geen betrouwbaar besluit getrokken worden. Daarom wordt voortaan enkel met de theoretische waarde van 200000 N/mm<sup>2</sup> gerekend.

### 3.2.2.2 *Bepaling van de vloeigrens en de treksterkte*

Naast de elasticiteitsmodulus van het staal zijn ook de vloeigrens en de treksterkte van belang. De producent garandeert een minimale vloeigrens van 500 N/mm<sup>2</sup>. Voor de bepaling van de vloeigrens worden proefstaven van alle gebruikte diameters onderworpen aan een trekproef. De onderstaande grootheden worden daarbij opgemeten en/of berekend.

- L = de exacte lengte van de proefstaven, in mm
- m = de massa van de staaf, nauwkeurig tot op 1 gram
- $d_0$  = de conventionele diameter, in mm
- $F_b$  = de theoretische breukkracht, in kN
- $F_v$  = de vloeigrens, in kN
- $F_m$  = de opgemeten breukkracht, in kN
- $\sigma_v$  = de vloeispanning, in N/mm<sup>2</sup>
- $\sigma_m$  = de treksterkte, d.i. de spanning waarbij het staal breekt, in N/mm<sup>2</sup>

**Tabel 47** vat alle opgemeten en berekende waarden uit de trekproeven op staal samen.

diameter [mm]	kleur	jaar	nominale kwaliteit	m [kg]	L [mm]	d <sub>o</sub> [mm]	S <sub>o</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>b</sub> [kN]	F <sub>v</sub> [kN]	σ <sub>v</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	F <sub>m</sub> [kN]	σ <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
8	blauw	2007	BE500	0,168	0,428	7,982	50,007	25,004	27,382	547,205	31,078	621,076
8	groen	2007	BE500	0,158	0,401	7,997	50,198	25,099	27,821	553,888	31,666	630,444
8	oranje	2007	BE500	0,157	0,400	7,982	50,005	25,002	27,866	556,887	31,857	636,627
8	blauw	2006	BE500	0,159	0,400	8,032	50,642	25,321	28,400	560,515	32,654	644,461
8	groen	2006	BE500	0,160	0,401	8,047	50,833	25,416	27,340	537,576	32,585	640,710
8	oranje	2006	BE500	0,159	0,401	8,022	50,515	25,258	27,412	542,366	32,242	637,917
14	blauw	2006	BE500	0,487	0,404	13,988	153,574	76,787	86,075	559,952	99,770	649,042
14	groen	2006	BE500	0,480	0,399	13,973	153,263	76,632	87,090	568,177	100,933	658,492
14	oranje	2006	BE500	0,485	0,403	13,976	153,323	76,661	84,507	550,539	100,803	656,706
20	blauw	2006	BE500	0,997	0,407	19,940	312,083	156,042	190,437	609,834	217,43	696,273
20	groen	2006	BE500	0,994	0,404	19,984	313,454	156,727	190,926	608,709	220,215	702,089
20	oranje	2006	BE500	0,981	0,398	20,001	314,019	157,009	182,198	579,953	213,165	678,526

**Tabel 47: Samenvatting van alle opgemeten en berekende waarden uit de trekproeven op staal**

Er wordt vastgesteld dat de vloeispanning verschilt naargelang de diameter. Om zo goed mogelijk de realiteit te benaderen wordt daarom een onderscheid gemaakt tussen de verschillende diameters. Zo wordt voor elke diameter de best passende vloeispanning bekomen.

**Tabel 48** toont de opgemeten en berekende waarden voor de staven met een diameter van 8 mm die geleverd zijn in 2007.

diameter [mm]	kleur	jaar	nominale kwaliteit	massa [kg]	lengte [mm]	d <sub>o</sub> [mm]	S <sub>o</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>b</sub> [kN]	F <sub>v</sub> [kN]	σ <sub>v</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	F <sub>m</sub> [kN]	σ <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
8	blauw	2007	BE500	0,168	0,428	7,982	50,007	25,004	27,382	547,205	31,078	621,076
8	groen	2007	BE500	0,158	0,401	7,997	50,198	25,099	27,821	553,888	31,666	630,444
8	oranje	2007	BE500	0,157	0,400	7,982	50,005	25,002	27,866	556,887	31,857	636,627

**Tabel 48: Opgemeten en berekende waarden uit de trekproeven op φ8 staven uit 2007**

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of er metingen al dan niet verworpen moeten worden.

gemiddelde [kN]	deviatie [kN]	interval metingen		99% betrouwbaarheidsinterval	
		min [kN]	max [kN]	min [kN]	max [kN]
552,660	4,956	547,205	556,887	524,273	581,047

**Tabel 49: 99%-betrouwbaarheidsinterval voor de meetresultaten uit trekproeven op φ8 staven uit 2007**

Er dienen geen metingen verworpen te worden. De gemiddelde vloeigrens voor de staven met een diameter van 8 mm (levering 2007) is gelijk aan de onderstaande waarde.

$$\sigma_{v,\phi 8,2007} = 552,662 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 50** toont de opgemeten en berekende waarden voor de staven met een diameter van 8 mm die geleverd zijn in 2006.

diameter [mm]	kleur	levering	nominale kwaliteit	massa [kg]	lengte [mm]	$d_o$ [mm]	$S_o$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_b$ [kN]	$F_v$ [kN]	$\sigma_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [kN]	$\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]
8	blauw	2006	BE500	0,159	0,400	8,032	50,642	25,321	28,400	560,515	32,654	644,461
8	groen	2006	BE500	0,160	0,401	8,047	50,833	25,416	27,34	537,576	32,585	640,710
8	oranje	2006	BE500	0,159	0,401	8,022	50,515	25,258	27,412	542,366	32,242	637,917

**Tabel 50: Opgemeten en berekende waarden uit de trekproeven op  $\phi 8$  staven uit 2006**

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of er metingen al dan niet verworpen moeten worden.

gemiddelde [kN]	deviatie [kN]	interval metingen		99% betrouwbaarheidsinterval	
		min [kN]	max [kN]	min [kN]	max [kN]
546,819	12,100	537,576	560,515	477,516	616,122

**Tabel 51: 99%-betrouwbaarheidsinterval voor de meetresultaten uit trekproeven op  $\phi 8$  staven uit 2006**

Er moeten geen metingen verworpen worden. De gemiddelde vloeigrens voor de staven met een diameter van 8 mm (levering 2006) is gelijk aan de volgende waarde.

$$\sigma_{v,\phi 8,2006} = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 52** toont de opgemeten en berekende waarden voor de staven met een diameter van 14 mm.

diameter [mm]	kleur	levering	nominale kwaliteit	massa [kg]	lengte [mm]	$d_o$ [mm]	$S_o$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_b$ [kN]	$F_v$ [kN]	$\sigma_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [kN]	$\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]
14	blauw	2006	BE500	0,487	0,404	13,988	153,574	76,787	86,075	559,952	99,770	649,042
14	groen	2006	BE500	0,480	0,399	13,973	153,263	76,632	87,090	568,177	100,933	658,492
14	oranje	2006	BE500	0,485	0,403	13,976	153,323	76,661	84,507	550,539	100,803	656,706

**Tabel 52: Opgemeten en berekende waarden uit de trekproeven op  $\phi 14$  staven**

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of er metingen al dan niet verworpen moeten worden.

gemiddelde [kN]	deviatie [kN]	interval metingen		99% betrouwbaarheidsinterval	
		min [kN]	max [kN]	min [kN]	max [kN]
559,556	8,826	550,539	568,177	509,009	610,103

**Tabel 53: 99%-betrouwbaarheidsinterval voor de meetresultaten uit trekproeven op  $\phi 14$  staven**

Er moeten geen metingen verworpen worden. De gemiddelde vloeigrens voor de staven met een diameter van 14 mm is gelijk aan de volgende waarde.

$$\sigma_{v,\phi 14} = 559,556 \frac{N}{mm^2}$$

Tot slot worden toont **Tabel 54** de opgemeten en berekende waarden voor de staven met een diameter van 20 mm.

diameter [mm]	kleur	levering	nominale kwaliteit	massa [kg]	lengte [mm]	d <sub>o</sub> [mm]	S <sub>o</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>b</sub> [kN]	F <sub>v</sub> [kN]	σ <sub>v</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	F <sub>m</sub> [kN]	σ <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
20	blauw	2006	BE500	0,997	0,407	19,940	312,083	156,042	190,437	609,834	217,43	696,273
20	groen	2006	BE500	0,994	0,404	19,984	313,454	156,727	190,926	608,709	220,215	702,089
20	oranje	2006	BE500	0,981	0,398	20,001	314,019	157,009	182,198	579,953	213,165	678,526

**Tabel 54: Opgemeten en berekende waarden uit de trekproeven op φ20 staven**

Het 99%-betrouwbaarheidsinterval wordt opgesteld om na te gaan of er metingen al dan niet verworpen moeten worden.

gemiddelde [kN]	deviatie [kN]	interval metingen		99% betrouwbaarheidsinterval	
		min [kN]	max [kN]	min [kN]	max [kN]
599,499	16,936	579,953	609,834	502,499	696,499

**Tabel 55: 99%-betrouwbaarheidsinterval voor de meetresultaten uit trekproeven op φ20 staven**

Er moeten geen metingen verworpen worden. De gemiddelde vloeigrens voor de staven met een diameter van 20 mm is gelijk aan de volgende waarden.

$$\sigma_{v,\phi 20} = 599,499 \frac{N}{mm^2}$$

**Tabel 56** vat alle gegevens nog eens samen.

diameter [mm]	jaar	nominale kwaliteit	vloeispanning [N/mm <sup>2</sup> ]
8	2007	BE500	552,660
8	2006	BE500	546,819
14	2006	BE500	559,556
20	2006	BE500	599,499

**Tabel 56: Overzicht vloeispanning wapeningsstaal**

### 3.3 Multidirectionele koolstofvezelwapening

De gebruikte multidirectionele koolstofvezelwapening werd geleverd door de firma ECC nv onder de merknaam PC Carbocomp Plus. Het is een multidirectioneel koolstoflaminaat, samengesteld uit unilaterale koolstofvezels in de langsrichting en extra vezels die gericht zijn onder een hoek van  $\pm 45^\circ$ , dat met bouten verankerd kan worden.

PC Carbocomp Plus wordt gebruikt als structurele wapening van balken, platen, wanden en kolommen in beton, hout en staal.

**Tabel 57** geeft de eigenschappen van PC Carbocomp Plus weer.

<b>Breedte:</b>	100 mm
<b>Effectieve dikte:</b>	1,0 mm
<b>Totale dikte:</b>	1,4 mm (inclusief hechtingsmotief)
<b>Treksterkte:</b>	2850 N/mm <sup>2</sup>
<b>Elasticiteitsmodulus:</b>	175000 N/mm <sup>2</sup>
<b>Breukrek:</b>	1,65%
<b>Densiteit:</b>	1,6 g/cm <sup>3</sup>
<b>Wateropname:</b>	< 0,1 gewichtsprocent
<b>Gebruikstemperatuur:</b>	-40°C tot +130°C

**Tabel 57: Materiaaleigenschappen PC Carbocomp Plus**

De koolstofvezellaminaten werden verlijmd met een epoxylijm, PC 5800/BL. Deze epoxylijm bezit de onderstaande eigenschappen.

<b>Uitzicht</b>	<b>A-component:</b>	zwarte pasta
	<b>B-component:</b>	witte pasta
<b>Pot-life (20°C):</b>		30 min.
<b>Mengverhouding (gewicht):</b>		5,15 kg A / 2,35 kg B
<b>Treksterkte:</b>		23 N/mm <sup>2</sup>
<b>Druksterkte:</b>		75 N/mm <sup>2</sup>
<b>Buigsterkte:</b>		45 N/mm <sup>2</sup>
<b>Elasticiteitsmodulus:</b>		4500 – 5000 N/mm <sup>2</sup>
<b>Hechting:</b>		> 3N/mm <sup>2</sup> (breuk in beton)
<b>Uithardingtijd:</b>		24 uur
<b>Glasovergangstemperatuur:</b>		81°C

**Tabel 58: Materiaaleigenschappen PC 5800/BL**



## 4.1 Voorcalculatie

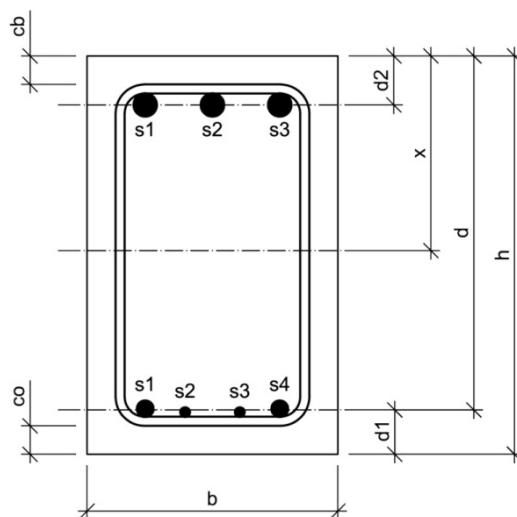
### 4.1.1 Onversterkte balken

#### 4.1.1.1 Opbouw en dimensionering

De onversterkte balken zijn balken uit gewapend beton zonder opgelijmde koolstofvezelwapening. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over de opbouw van deze balken.

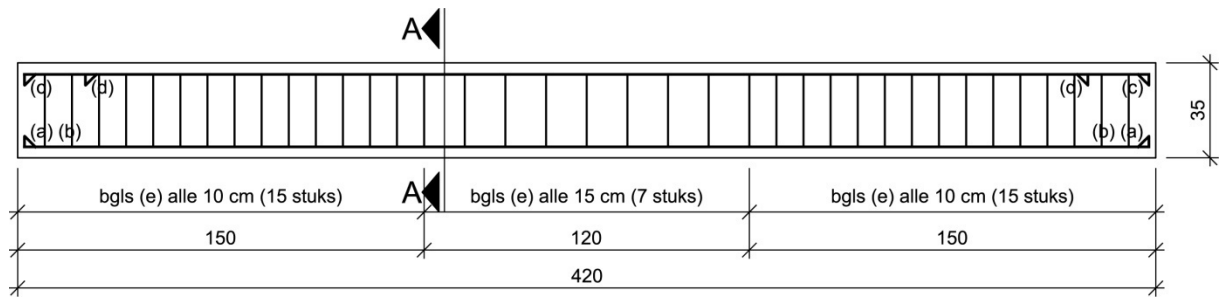
<b>Lengte</b>	4,20 m
<b>Overspanning</b>	3,60 m
<b>Breedte</b>	0,22 m (volgens het bekistingsplan)
<b>Hoogte</b>	0,35 m (volgens het bekistingsplan)
<b>Wapening</b>	Onderwapening 2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening 3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels 7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van 15 cm 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van 10 cm

Tabel 59: Opbouw en dimensionering van de onversterkte balken

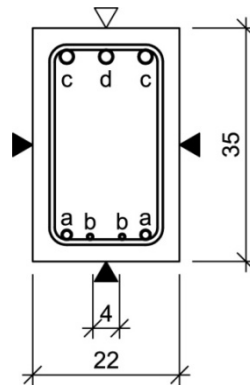


$$\begin{aligned}
 h &= 350 \text{ mm} \\
 b &= 220 \text{ mm} \\
 co &= 25 \text{ mm} \\
 cb &= 25 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Figuur 9: Dwarsdoorsnede van een onversterkte balk



**Figuur 10: Vooraanzicht wapeningskorf van een onversterkte balk**



**Figuur 11: Dwarsdoorsnede wapeningskorf van een onversterkte balk**

Deze balken werden geprefabriceerd op 31 december 2006. Het gebruikte wapeningsstaal is van de kwaliteit BE500. De betoncentrale Inter-Beton nv leverde beton met de volgende karakteristieken:

- sterkteklasse: C16/20
- omgevingsklasse: EE1
- consistentie: S3
- grootte granulaat ( $D_{max}$ ): 16 mm grind
- cement CEM III/A 32,5 N LA
- hulpstof: Tixo superplastificeerder (0,5%)
- gegarandeerde verwerkingstijd: 100 minuten

#### 4.1.1.2 Theoretische berekeningen

Bij de onderstaande theoretische berekeningen wordt geen gebruik gemaakt van de werkelijke materiaaleigenschappen, die nadien wel bepaald werden. Verder wordt ook geen rekening gehouden met de werkelijke afmetingen van de balken, maar met de theoretische afmetingen ervan.

##### 4.1.1.2.1 Het gedrag van de balk

Vooraf dient nagegaan te worden of deze onversterkte balken zich gedragen als enkelvoudig gewapende balken of als dubbel gewapende balken. Dit is eenvoudig te controleren door de werkelijke hoogte te vergelijken met de economische hoogte. Om de werkelijke nuttige hoogte te bepalen dient het zwaartepunt van de hoofdwapening gekend te zijn. Dit zwaartepunt wordt op de onderstaande manier berekend. Als basis wordt de onderkant van de balk genomen.

$$d_1 = \frac{\sum A_i \times z_i}{\sum A_i} = \frac{2 \times \pi \times (14/2)^2 \times 40 + 2 \times \pi \times (8/2)^2 \times 37}{2 \times \pi \times (14/2)^2 + 2 \times \pi \times (8/2)^2} = \frac{5104\pi}{130\pi} = 39,262\text{mm}$$

Met dit zwaartepunt is het eenvoudig de nuttige hoogte  $d$  te berekenen.

$$h = d + d_1 \Leftrightarrow d = h - d_1 = 350 - 39,262 = 310,738\text{mm} \approx 311\text{mm}$$

De economische hoogte  $d_{ec}$  wordt als volgt berekend.

$$d_{ec} = \beta_{ec} \cdot \sqrt{\frac{M_d}{b}} \quad \text{waarbij} \quad \beta_{ec} = \frac{2,311}{\sqrt{f_{cu}}} = 0,0243$$

De waarde voor het moment  $M_d$  wordt berekend met onderstaande formule.

$$\begin{aligned} M_d &= A_{s1} \times \zeta_{ec} \times d \times f_{yd} \\ \Leftrightarrow M_d &= 409 \times 0,892 \times 311 \times 434,783 \\ \Leftrightarrow M_d &= 49289604,977\text{N.mm} \\ \Leftrightarrow M_d &= 49,290\text{kN.m} \end{aligned}$$

Dit invullen in de formule voor de economische hoogte geeft het volgende resultaat.

$$d_{ec} = \beta_{ec} \cdot \sqrt{\frac{M_d}{b}} = 0,0243 \times \sqrt{\frac{49,290}{0,22}} = 0,364\text{m} = 364\text{mm}$$

De economische hoogte  $d_{ec}$  is groter dan de werkelijke hoogte  $d$ . Daarom dient ook de minimale hoogte  $d_{lim}$  berekend te worden.

$$d_{lim} = \beta_{lim} \cdot \sqrt{\frac{M_d}{b}} = 0,0221 \times \sqrt{\frac{49,290}{0,22}} = 0,331\text{m} = 331\text{mm}$$

Ook de minimale hoogte  $d_{lim}$  blijkt groter te zijn dan de werkelijke hoogte  $d$ . De balk gedraagt zich dus als een dubbel gewapende balk. Toch zullen de volgende berekeningen uitgaan van een enkelvoudig economisch gewapende balk. De bovenwapening wordt bijgevolg verondersteld enkel actief te zijn bij versterkte balken.

#### 4.1.1.2.2 UGT

Om te beginnen worden de rekenwaarden van de materiaaleigenschappen bepaald.

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,783 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{16}{1,5} = 10,667 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{cu} = 0,85 \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,85 \times \frac{16}{1,5} = 9,067 \frac{N}{mm^2}$$

De nuttige hoogte  $d$  werd reeds eerder bepaald. Het moment  $M_d$  wordt als volgt berekend.

$$M_d = A_{s1} \times \zeta_{ec} \times d \times f_{yd}$$

$$\Leftrightarrow M_d = 409 \times 0,892 \times 311 \times 434,783$$

$$\Leftrightarrow M_d = 49289604,977 N.mm$$

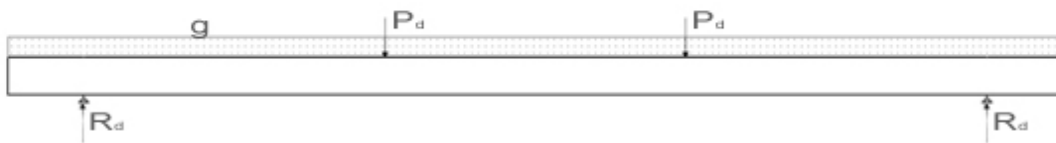
$$\Leftrightarrow M_d = 49,290 kN.m$$

Het eigengewicht van de balk wordt per lopende meter berekend.

$$g = b \times h \times 25 \frac{kN}{m^3} = 0,22 \times 0,35 \times 25 = 1,925 \frac{kN}{m}$$

Verder dienen ook de reactiekrachten bij de oplegpunten bepaald te worden.

$$R_d = P_d + g_d \times \frac{L}{2} = P_d + 1,35 \times g \times \frac{L}{2} = P_d + 1,35 \times g \times 2,10$$



**Figuur 12: Bepaling van de vijklcracht in de uiterste grenstoestand**

Tot slot wordt de vijzelkracht  $P_d$  a.d.h.v. een momentenvergelijking berekend.

$$\begin{aligned} \sum_{x=L/2} M &= 0 \\ \Leftrightarrow M_d + P_d \times 0,6 + 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,05 - R_d \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow M_d + P_d \times 0,6 + 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,05 - (P_d + 1,35 \times g \times 2,10) \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P_d = M_d + 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,05 - 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,80 & \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P_d = M_d - 2,12625 \times g & \\ \Leftrightarrow P_d = \frac{49,290 - 2,12625 \times 1,925}{1,20} & \\ \Leftrightarrow P_d = 37,664 \text{ kN} & \end{aligned}$$

In de uiterste grenstoestand wordt een maximale kracht van 37,664 kN bereikt. Deze kracht komt overeen met een moment van 49,290 kN m.

#### 4.1.1.2.3 GGT

Alvorens van start te gaan met de berekeningen in de gebruiksgrenstoestand, worden de maximaal toelaatbare spanningen in de materialen bepaald.

$$\begin{aligned} \sigma_{s,adm} &= 0,6 \times f_{yk} = 0,6 \times 500 = 300 \frac{N}{mm^2} \\ \sigma_{c,adm} &= 0,5 \times f_{ck} = 0,5 \times 16 = 8 \frac{N}{mm^2} \end{aligned}$$

Het moment wordt als volgt bepaald.

$$\begin{aligned} M &= A_{s1} \times \zeta_e \times d \times \sigma_{s,adm} \\ \Leftrightarrow M &= 409 \times 0,905 \times 311 \times 300 \\ \Leftrightarrow M &= 34505486,354 \text{ N.mm} \\ \Leftrightarrow M &= 34,505 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Het eigengewicht van de balk per lopende meter werd reeds eerder berekend.

$$g = 1,925 \frac{kN}{m}$$

Verder dienen ook de reactiekrachten bij de oplegpunten bepaald te worden.

$$R = P + g \times \frac{L}{2} = P + g \times 2,10$$



Figuur 13: Bepaling van de vjzelkracht in de gebruiksgrenstoestand

Tot slot wordt de vjzelkracht  $P$  a.d.h.v. een momentenvergelijking berekend.

$$\begin{aligned} \sum_{x=L/2} M &= 0 \\ \Leftrightarrow M + P \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - R \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow M + P \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - (P + g \times 2,10) \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P &= M + g \times 2,10 \times 1,05 - g \times 2,10 \times 1,80 \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P &= M - 1,575 \times g \\ \Leftrightarrow P &= \frac{34,505 - 1,575 \times 1,925}{1,20} \\ \Leftrightarrow P &= 26,228 \text{ kN} \end{aligned}$$

In de gebruiksgrenstoestand wordt een maximale kracht van 26,228 kN bereikt. Deze kracht komt overeen met een moment van 34,505 kN m.

#### 4.1.1.2.4 Bezwijkmoment

Het is eveneens mogelijk het bezwijkmoment  $M_u$  te bepalen voor een bepaalde doorsnede. Het horizontaal evenwicht vereist dat  $N_{cd} = N_{sd}$  waarbij  $N_{cd} = \psi b \xi d f_{cu}$  en  $N_{sd} = A_{s1} f_{yd}$ . Dit invullen in de vergelijking van het horizontaal evenwicht geeft het onderstaande resultaat.

$$\begin{aligned} N_{cd} &= N_{sd} \\ \Leftrightarrow \psi \cdot b \cdot \xi \cdot d \cdot f_{cu} &= A_{s1} \cdot f_{yd} \\ \Leftrightarrow \xi &= \frac{A_{s1} \cdot f_{yd}}{\psi \cdot b \cdot d \cdot f_{cu}} \end{aligned}$$

Wordt er vooropgesteld dat  $\psi = 0,81$ , dan vindt men een waarde voor  $\xi$ .

$$\xi = \frac{A_{s1} \cdot f_{yd}}{\psi \cdot b \cdot d \cdot f_{cu}} = \frac{409 \times 434,783}{0,81 \times 220 \times 350 \times 9,067} = 0,354$$

Met deze waarde kan men een waarde vinden voor  $\mu_d$  en  $\zeta$ .

$$\mu_d = 0,244 \text{ en } \zeta = 0,853$$

Aangezien  $\mu_d \geq 0,187$  is, is inderdaad  $\psi = 0,81$ . Uitgaande van de drukzone is het bezwijkmoment gelijk aan het onderstaande resultaat.

$$\begin{aligned} M_u &= \mu_d \cdot f_{cu} \cdot b \cdot d^2 \\ \Leftrightarrow M_u &= 0,244 \times 9,067 \times 220 \times 311^2 \\ \Leftrightarrow M_u &= 47058740,346 \text{ N.mm} = 47,059 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Uitgaande van de wapeningsdoorsnede krijgt men de volgende waarde.

$$\begin{aligned} M_u &= A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot \zeta \cdot d \\ \Leftrightarrow M_u &= 409 \times 434,783 \times 0,853 \times 311 \\ \Leftrightarrow M_u &= 47112514,985 \text{ N.mm} = 47,113 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Men stelt het bezwijkmoment gelijk aan het gemiddelde van bovenstaande waarden. Het bezwijkmoment is dus gelijk aan 47,086 kN m. Tot slot wordt de kracht  $P_u$  berekend die nodig is om dit moment te bereiken. Hiervoor dient het eigengewicht van de balk en de reactiekrachten gekend te zijn.

$$\begin{aligned} g &= 1,925 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ R_u &= P_u + g \times \frac{L}{2} = P_u + g \times 2,10 \end{aligned}$$



Figuur 14: Bepaling van de vijklkracht in de bezwijktoestand

Tot slot wordt de vijklkracht  $P_u$  a.d.h.v. een momentenvergelijking berekend.

$$\begin{aligned} \sum_{x=L/2} M &= 0 \\ \Leftrightarrow M_u + P_u \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - R_u \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow M_u + P_u \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - (P_u + g \times 2,10) \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P_u = M_u + g \times 2,10 \times 1,05 - g \times 2,10 \times 1,80 & \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P_u = M_u - 1,575 \times g & \\ \Leftrightarrow P_u = \frac{47,086 - 1,575 \times 1,925}{1,20} & \\ \Leftrightarrow P_u = 36,711 \text{ kN} & \end{aligned}$$

In de bezwijktoestand wordt een maximale kracht van 36,711 kN bereikt. Deze kracht komt overeen met een moment van 47,086 kN m.

#### 4.1.1.2.5 Dwarskrachtencapaciteit

$V_{Rd1}$  is de weerstand van de betondoorsnede tegen dwarskrachten. Men is voor de rekenwaarde van deze dwarskrachtenweerstand gekomen tot de volgende experimentele formule.

$$V_{Rd1} = \left[ 0,1 \times k \times (100 \times \rho \times f_{ck})^{1/3} + 0,15 \times \sigma_{cp} \right] \times b_w \times d$$

met  $k = 1 + \sqrt{200/d}$  de invloed van  $d$  (in mm)

$\rho = \frac{A_{s1}}{b_w \times d} \leq 0,02$  het in rekening te brengen percentage van de hoofdwapening

$\sigma_{cp} = \frac{N_{pd}}{A}$  de spanning t.g.v. een langskracht  $N_{pd}$ , in  $N/mm^2$

$b_w$  de minimale breedte van de balk, in mm

De weerstand van de betondoorsnede tegen dwarskrachten wordt als volgt berekend.

$$\begin{aligned} V_{Rd1} &= \left[ 0,1 \times k \times (100 \times \rho \times f_{ck})^{1/3} + 0,15 \times \sigma_{cp} \right] \times b_w \times d \\ \Leftrightarrow V_{Rd1} &= \left[ 0,1 \times \left( 1 + \sqrt{200/311} \right) \times \left( 100 \times \frac{409}{220 \times 311} \times 16 \right)^{1/3} \right] \times 220 \times 311 \\ \Leftrightarrow V_{Rd1} &= 26160,420 N \\ \Leftrightarrow V_{Rd1} &= 26,160 kN \end{aligned}$$

$V_{wd}$  is de weerstand van de dwarskrachtenwapening tegen dwarskrachten. De waarde voor deze weerstand wordt met de volgende formule bepaald.

$$V_{wd} = \frac{0,9 \times d \times A_{sw} \times f_{wd}}{s} = \frac{0,9 \times 311 \times 101 \times 474,783}{100} = 122809,444 N = 122,809 kN$$

De totale dwarskrachtencapaciteit varieert van 122,809 kN (waarbij het beton helemaal niet bijdraagt tot de dwarskrachtenweerstand) tot 148,970 kN (waarbij het beton 100% bijdraagt tot de dwarskrachtenweerstand).

#### 4.1.1.2.6 Doorbuiging

De doorbuiging wordt zuiver theoretisch berekend. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen twee toestanden: een ongescheurde toestand, d.i. een toestand waarbij nog geen scheuren zijn, en een gescheurde toestand, waarbij het beton in de trekzone volledig gescheurd is.



4.1.1.2.6.1 *Initieel scheurmoment*

Om te beginnen wordt het initieel scheurmoment bepaald.

$$M_{cr} = f_{ctm} \times \frac{I_1}{v_1}$$

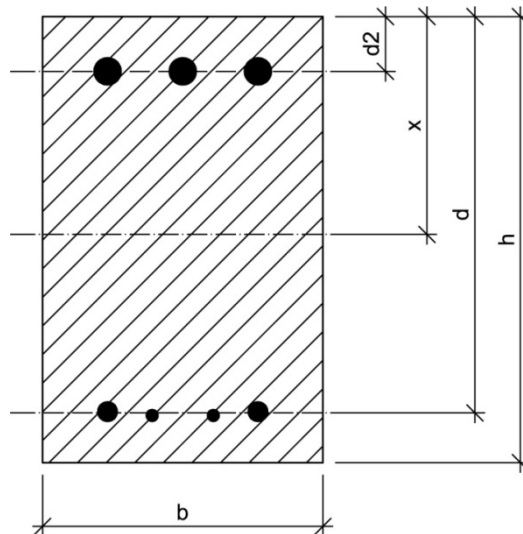
Voor de bepaling van het initieel scheurmoment is de betontreksterkte nodig.

$$f_{ctm} = 0,3 \times f_{ck}^{2/3} = 0,3 \times 16^{2/3} = 1,905 \frac{N}{mm^2}$$

Het traagheidsmoment van de rechthoekige doorsnede wordt als volgt berekend.

$$I_1 = \frac{b \times x^3}{3} + \frac{b \times (h-x)^3}{3} + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} \times (d-x)^2 + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times (x-d_2)^2$$

Normatief wordt de bovenwapening niet in rekening gebracht bij het berekenen van de bovenwapening. Aangezien de bovenwapening in dit geval echter een belangrijke verstijving met zich meebrengt, wordt de bovenwapening wel in rekening gebracht bij de bepaling van de traagheidsmomenten van de rechthoekige doorsnede.



**Figuur 15: Traagheidsmoment van de niet-gescheurde doorsnede**

Om het traagheidsmoment te bepalen heeft men de ligging van de neutrale vezel nodig.

$$x = \frac{b \times h \times \frac{h}{2} + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} \times d + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times d_2}{b \times h + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} + (\alpha_s - 1) \times A_{s2}}$$

$$\text{met } \alpha_s = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{27402,742} = 7,299$$

$$E_c = 9,5 \times (f_{ck} + 8)^{1/3} \times 10^3 = 9,5 \times (16 + 8)^{1/3} \times 10^3 = 27402,742 \frac{N}{mm^2}$$

Invullen van deze waarden geeft het onderstaande resultaat.

$$x = \frac{220 \times 350 \times \frac{350}{2} + (7,299 - 1) \times 409 \times 311 + (7,299 - 1) \times 942 \times 43}{220 \times 350 + (7,299 - 1) \times 409 + (7,299 - 1) \times 942} = 170mm$$

Verder is ook de afstand van de neutrale vezel tot de meest getrokken vezel nodig.

$$v_1 = h - x = 350 - 170 = 180mm$$

Uiteindelijk kan het traagheidsmoment berekend worden.

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{b \times x^3}{3} + \frac{b \times (h-x)^3}{3} + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} \times (d-x)^2 + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times (x-d_2)^2 \\ \Leftrightarrow I_1 &= \frac{220 \times 170^3}{3} + \frac{220 \times (350-170)^3}{3} + (7,299-1) \times 409 \times (311-170)^2 + \\ & (7,299-1) \times 942 \times (170-43)^2 \\ \Leftrightarrow I_1 &= 934688905mm^4 \end{aligned}$$

Tot slot wordt een waarde voor het initieel scheurmoment gevonden.

$$M_{cr} = f_{cm} \times \frac{I_1}{v_1} = 1,905 \times \frac{934688905}{180} = 9887677,171N.mm = 9,888kN.m$$

#### 4.1.1.2.6.2 Ongescheurde toestand

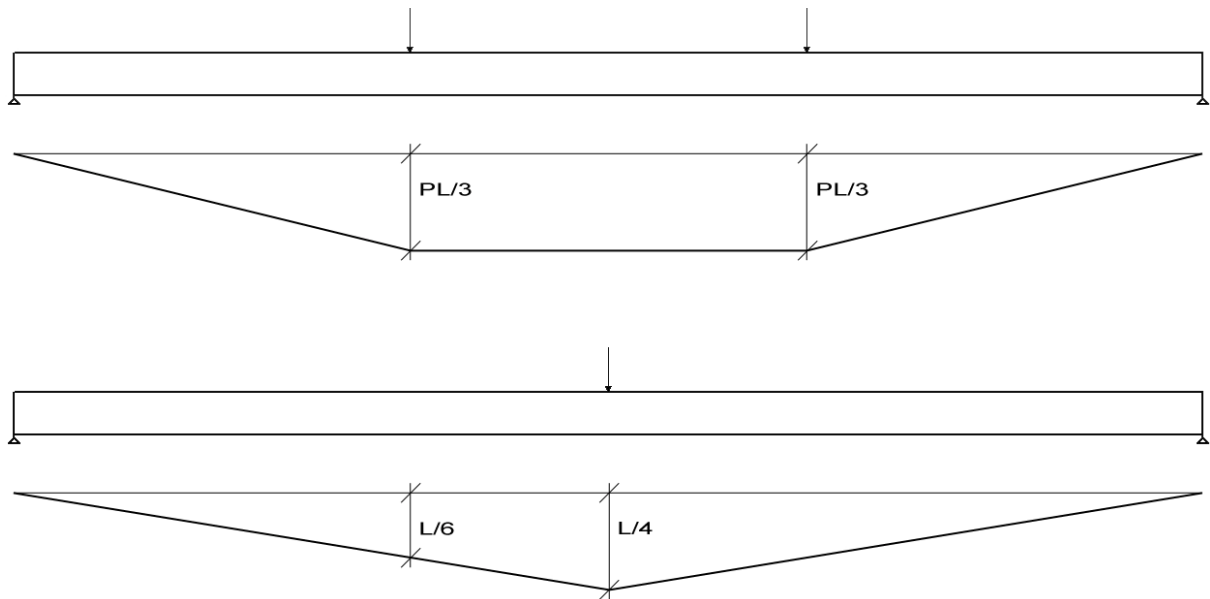
De doorbuiging in de ongescheurde toestand wordt met de onderstaande formule bepaald.

$$a = a_1 = k \times \frac{M \times L^2}{E_c \times I_1}$$

Er moet echter aan de volgende voorwaarde voldaan zijn.

$$M \leq M_{cr}$$

De coëfficiënt k kan m.b.v. de vormveranderingsarbeid bepaald worden. Deze doorbuiging kan benaderend berekend worden door enkel de term betreffende de buigende momenten in rekening te brengen. Dit is toegelaten, vermits een balk uit gewapend beton gezien kan worden als een tweedimensionaal staafwerk waar de belasting in hoofdzaak loodrecht op de richting van de aslijn van de staaf aangrijpt.



**Figuur 16: Momentenlijnen behorend bij de werkelijke en de fictieve belasting**

M.b.v. de tabellen van de Mohrse integralen bekomt men een waarde voor de coëfficiënt  $k$ .

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{1}{E.I} \int M.M \, dx \\
 \Leftrightarrow a &= \frac{2}{E.I} \times \left( \frac{1}{3} \cdot M.M \cdot \frac{L}{3} + \frac{1}{2} \cdot (M_{links} + M_{rechts}) \cdot M \cdot \frac{L}{6} \right) \\
 \Leftrightarrow a &= \frac{2}{E.I} \times \left( \frac{1}{3} \times \frac{L}{6} \times \frac{P.L}{3} \times \frac{L}{3} + \frac{1}{2} \times \left( \frac{L}{6} + \frac{L}{4} \right) \times \frac{P.L}{3} \times \frac{L}{6} \right) \\
 \Leftrightarrow a &= \frac{2}{E.I} \times \left( \frac{P.L^3}{162} + \frac{5.P.L^3}{432} \right) = \frac{46.P.L^3}{1296.E.I} = \frac{23.M.L^2}{216.E.I}
 \end{aligned}$$

Uit deze berekeningen volgt het onderstaande resultaat.

$$k = \frac{23}{216}$$

De elasticiteitsmodulus van het beton  $E_c$  en het traagheidsmoment  $I_1$  zijn reeds eerder berekend. De doorbuiging in de ongescheurde toestand kan uiteindelijk met de onderstaande formule berekend worden.

$$a = a_1 = \frac{23}{216} \times \frac{M \times L^2}{E_c \times I_1}$$

4.1.1.2.6.3 *Gescheurde toestand*

Van zodra aan de volgende voorwaarde voldaan is, bevindt de balk zich in een gedeeltelijk gescheurde toestand.

$$M_{cr} \leq M$$

De doorbuiging in de gescheurde toestand wordt als volgt berekend.

$$a = \chi \times a_1 + (1 - \chi) \times a_2$$

De doorbuiging  $a_1$  is gelijk aan de doorbuiging in de ongescheurde toestand. De doorbuiging  $a_2$  is deze bij een volledig gescheurd veronderstelde doorsnede.

$$a_2 = k \times \frac{M \times L^2}{E_c \times I_2}$$

De coëfficiënt  $k$  is dezelfde als deze in de ongescheurde toestand. Ook de elasticiteitsmodulus van het beton  $E_c$  behoudt dezelfde waarde. Om het traagheidsmoment  $I_2$  te bepalen, heeft men de nieuwe ligging van de neutrale vezel nodig. Die kan men als volgt berekenen.

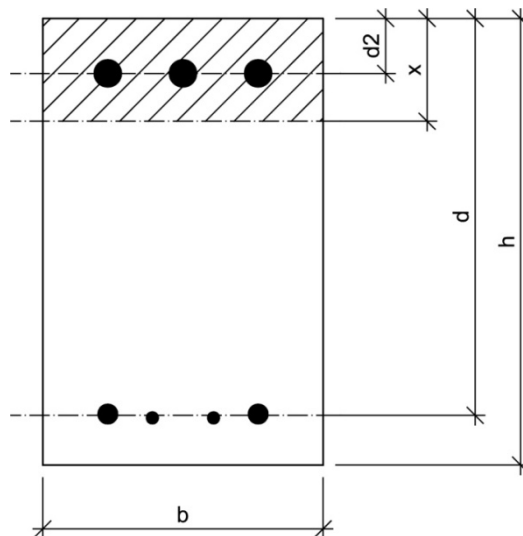
$$x = \xi \times d = 0,259 \times 311 = 80,481 \text{ mm}$$

Het traagheidsmoment zelf wordt dan op de volgende manier uitgewerkt.

$$I_2 = \frac{b \times x^3}{3} + \alpha_s \times A_{s1} \times (d - x)^2 + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times (x - d_2)^2$$

$$\Leftrightarrow I_2 = \frac{220 \times 80,481^3}{3} + 7,299 \times 409 \times (311 - 80,481)^2 + (7,299 - 1) \times 942 \times (80,481 - 43)^2$$

$$\Leftrightarrow I_2 = 204828934 \text{ mm}^4$$



Figuur 17: Traagheidsmoment van de gescheurde doorsnede

De coëfficiënt  $\chi$  berekent men als volgt.

$$\chi = \beta_1 \times \beta_2 \times \left( \frac{M_{cr}}{M} \right)^2$$

met  $\beta_1 = 1$  voor staven met een verbeterde hechting

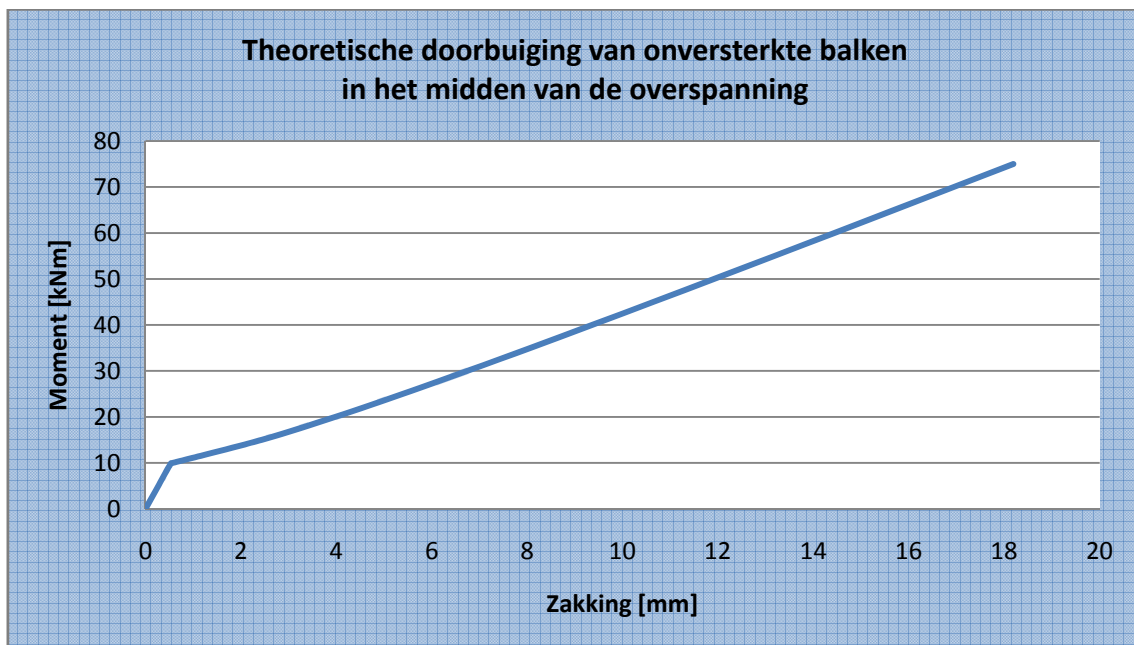
$\beta_2 = 1$  voor een kortstondige of éénmalige belasting

**Tabel 60** toont de berekende waarden van de theoretische doorbuiging.

moment [kN m]	$\chi$	$1-\chi$	$a_1$ [mm]	$a_2$ [mm]	$a$ [mm]
0,000			0,000		0,000
5,000			0,269		0,269
9,888	1,000	0,000	0,533	2,431	0,533
10,000	0,978	0,022	0,539	2,459	0,582
15,000	0,435	0,565	0,808	3,688	2,437
20,000	0,244	0,756	1,078	4,917	3,979
25,000	0,156	0,844	1,347	6,147	5,396
30,000	0,109	0,891	1,616	7,376	6,750
35,000	0,080	0,920	1,886	8,605	8,069
40,000	0,061	0,939	2,155	9,835	9,365
45,000	0,048	0,952	2,425	11,064	10,647
50,000	0,039	0,961	2,694	12,293	11,918

**Tabel 60:** Cijferwaarden theoretische doorbuiging van de onversterkte balken

Tot slot toont **Grafiek 14** de berekende waarden van de theoretische doorbuiging.



**Grafiek 14:** Theoretische doorbuiging van onversterkte balken in het midden van de overspanning

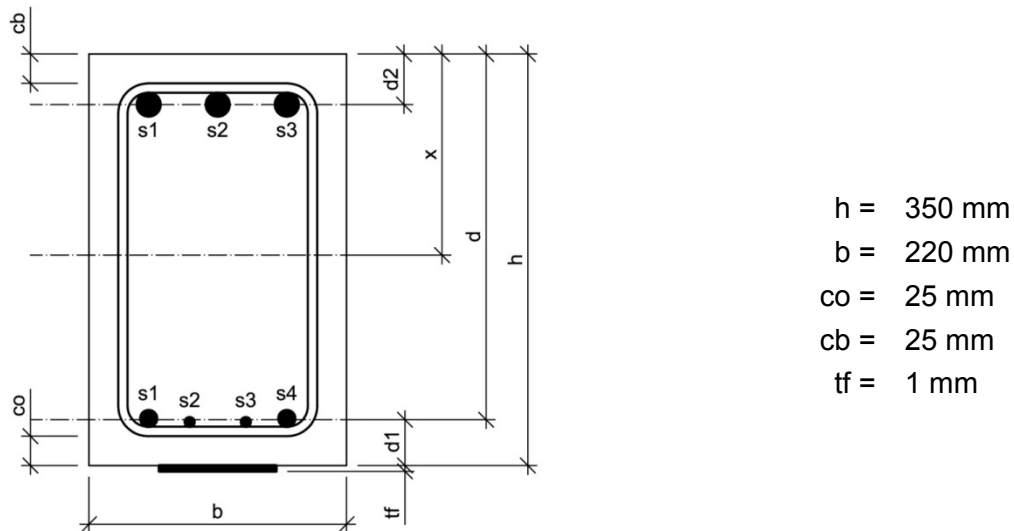
### 4.1.2 Versterkte balken

#### 4.1.2.1 Opbouw en dimensionering

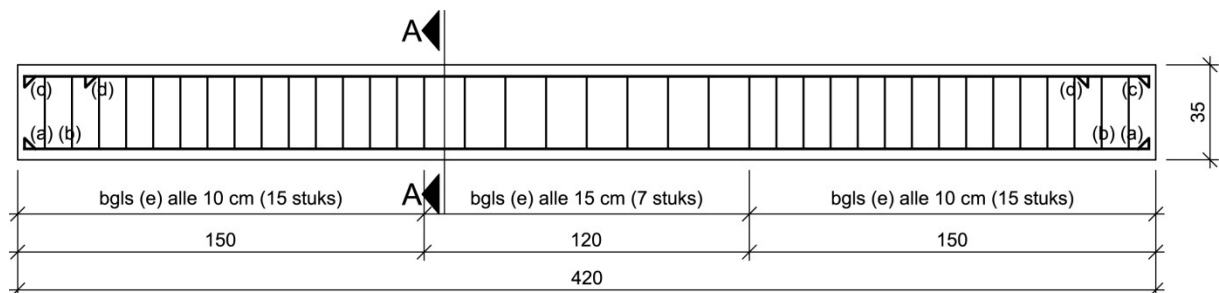
De versterkte balken zijn balken uit gewapend betonnen met opgelijmde koolstofvezelwapening en eventueel bijkomend verankerd. Onderstaande tabellen en figuren geven meer informatie over de opbouw van deze balken.

<b>Lengte</b>	4,20 m
<b>Overspanning</b>	3,60 m
<b>Breedte</b>	0,22 m (volgens het bekistingsplan)
<b>Hoogte</b>	0,35 m (volgens het bekistingsplan)
<b>Wapening</b>	Onderwapening 2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening 3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels 7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels met een tussenafstand van 15 cm 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van 10 cm

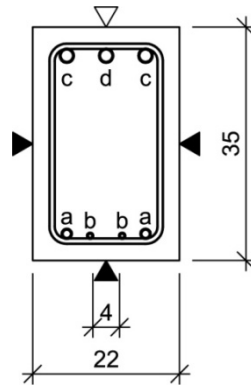
Tabel 61: Opbouw en dimensionering van de versterkte balken



Figuur 18: Dwarsdoorsnede van een versterkte balk



Figuur 19: Vooraanzicht van de wapeningskorf van een versterkte balk

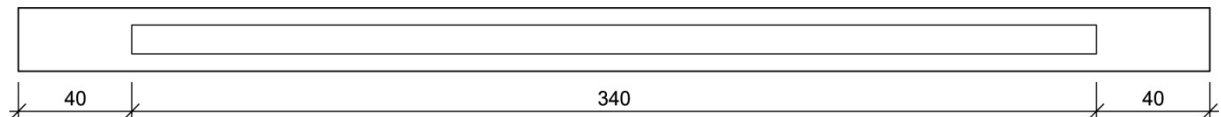


**Figuur 20: Dwarsdoorsnede A-A wapeningskorf van een versterkte balk**

Deze balken werden geprefabriceerd op 31 december 2006. Het gebruikte wapeningsstaal is van de kwaliteit BE500. De betoncentrale Inter-Beton nv leverde beton met de volgende karakteristieken:

- sterkteklasse: C16/20
- omgevingsklasse: EE1
- consistentie: S3
- grootte granulaat ( $D_{max}$ ): 16 mm grind
- cement CEM III/A 32,5 N LA
- hulpstof: Tixo superplastificeerder (0,5%)
- gegarandeerde verwerkingstijd: 100 minuten

De koolstofvezelwapening werd spanningloos verlijmd op 14 november 2007. De lengte ervan bedraagt 3400 mm, de doorsnede is gelijk aan 100 mm<sup>2</sup>.



**Figuur 21: Onderaanzicht koolstofvezelwapening van een versterkte balk**

#### 4.1.2.2 Theoretische berekeningen

Bij de onderstaande theoretische berekeningen wordt geen gebruik gemaakt van de werkelijke materiaaleigenschappen, die nadien wel bepaald werden. Verder wordt ook geen rekening gehouden met de werkelijke afmetingen van de balken, maar met de theoretische afmetingen ervan.

##### 4.1.2.2.1 UGT

Om te beginnen worden de rekenwaarden van de materiaaleigenschappen bepaald.

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,783 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{16}{1,5} = 10,667 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{cu} = 0,85 \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,85 \times \frac{16}{1,5} = 9,067 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} = \frac{2850}{1,3} = 2192,308 \frac{N}{mm^2}$$

De nuttige hoogte  $d$  is dezelfde als deze van de onversterkte balken. De koolstofvezelwapening heeft echter een grotere hefboomsarm. Deze is gelijk aan de hefboomsarm van de hoofdwapening vermeerderd met de afstand tussen de zwaartepunten van de hoofdwapening en de koolstofvezelwapening. Er dient echter wel opgemerkt te worden dat de factor  $\zeta$  enigszins wijzigt in vergelijking met een onversterkte balk. Deze waarde zal echter niet zo veel verschillen van  $\zeta_{ec}$ . Het moment wordt dan als volgt benaderd.

$$M_d = A_{s1} \times \zeta \times d \times f_{yd} + A_f \times \left( \zeta \times d + \left( h - d + \frac{t_f}{2} \right) \right) \times f_{fd}$$

$$\Leftrightarrow M_d = 409 \times 0,892 \times 311 \times 434,783 + 100 \times \left( 0,892 \times 311 + \left( 350 - 311 + \frac{1}{2} \right) \right) \times 2192,308$$

$$\Leftrightarrow M_d = 118772659 N.mm$$

$$\Leftrightarrow M_d = 118,8 kN.m$$

Het eigengewicht van de balk is even groot als het eigengewicht van een onversterkte balk.

$$g = 1,925 \frac{kN}{m}$$

Verder dienen ook de reactiekrachten bij de oplegpunten bepaald te worden.

$$R_d = P_d + g_d \times \frac{L}{2} = P_d + 1,35 \times g \times 2,10$$





**Figuur 22: Bepaling van de vijzelkracht in de uiterste grenstoestand**

Tot slot wordt de vijzelkracht  $P_d$  a.d.h.v. een momentenvergelijking berekend.

$$\begin{aligned} \sum_{x=L/2} M &= 0 \\ \Leftrightarrow M_d + P_d \times 0,6 + 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,05 - R_d \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow M_d + P_d \times 0,6 + 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,05 - (P_d + 1,35 \times g \times 2,10) \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P_d &= M_d + 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,05 - 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,80 \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P_d &= M_d - 2,12625 \times g \\ \Leftrightarrow P_d &= \frac{M_d - 2,12625 \times g}{1,20} \\ \Leftrightarrow P_d &= \frac{118,8 - 2,12625 \times 1,925}{1,20} \\ \Leftrightarrow P_d &= 95,6 \text{ kN} \end{aligned}$$

In de uiterste grenstoestand wordt een maximale kracht van 95,6 kN bekomen. Deze kracht komt overeen met een moment van 118,8 kN m.

#### 4.1.2.2.2 GGT

Alvorens van start te gaan met de berekeningen in de gebruiksgrenstoestand, worden de maximale spanningen in de materialen bepaald.

$$\begin{aligned} \sigma_{s,adm} &= 0,6 \times f_{yk} = 0,6 \times 500 = 300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\ \sigma_{c,adm} &= 0,5 \times f_{ck} = 0,5 \times 16 = 8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\ \sigma_{f,adm} &= 0,8 \times f_{fk} = 0,8 \times 2850 = 2280 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \end{aligned}$$

Het moment wordt als volgt bepaald. Er dient echter wel opgemerkt te worden dat de factor  $\zeta$  enigszins wijzigt in vergelijking met een onversterkte balk. Deze waarde zal echter niet zo veel verschillen van  $\zeta$ .

$$M = A_{s1} \times \zeta_e \times d \times \sigma_{s,adm} + A_f \times \left( \zeta_e \times d + \left( h - d + \frac{t_f}{2} \right) \right) \times \sigma_{f,adm}$$

$$\Leftrightarrow M = 409 \times 0,905 \times 311 \times 300 + 100 \times \left( 0,905 \times 311 + \left( 350 - 311 + \frac{1}{2} \right) \right) \times 2280$$

$$\Leftrightarrow M = 10768889 \text{ N.mm}$$

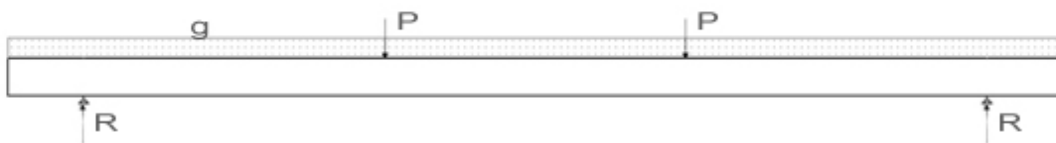
$$\Leftrightarrow M = 107,7 \text{ kN.m}$$

Het eigengewicht van de balk per lopende meter werd reeds eerder berekend.

$$g = 1,925 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Verder dienen ook de reactiekrachten bij de oplegpunten bepaald te worden.

$$R = P + g \times \frac{L}{2} = P + g \times 2,10$$



**Figuur 23: Bepaling van de vjzjelkracht in de gebruiksgrenstoestand**

Tot slot wordt de vjzjelkracht P a.d.h.v. een momentenvergelijking berekend.

$$\sum_{x=L/2} M = 0$$

$$\Leftrightarrow M + P \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - R \times 1,80 = 0$$

$$\Leftrightarrow M + P \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - (P + g \times 2,10) \times 1,80 = 0$$

$$\Leftrightarrow 1,20 \times P = M + g \times 2,10 \times 1,05 - g \times 2,10 \times 1,80$$

$$\Leftrightarrow 1,20 \times P = M - 1,575 \times g$$

$$\Leftrightarrow P = \frac{M - 1,575 \times g}{1,20}$$

$$\Leftrightarrow P = 87,2 \text{ kN}$$

In de gebruiksgrenstoestand wordt een maximale kracht van 87,2 kN bekomen. Deze kracht komt overeen met een moment van 107,7 kN m.

## 4.1.2.2.3 Bezwijkmoment

Het is eveneens mogelijk het bezwijkmoment  $M_u$  te bepalen voor een bepaalde doorsnede. Het horizontaal evenwicht vereist dat  $N_{cd} = N_{sd}$  waarbij  $N_{cd} = \psi b \xi d f_{cu}$  en  $N_{sd} = A_{s1} f_{yd} + A_f A_{fd}$ . Dit invullen in de vergelijking van het horizontaal evenwicht geeft het onderstaande resultaat.

$$\begin{aligned} N_{cd} &= N_{sd} \\ \Leftrightarrow \psi \cdot b \cdot \xi \cdot d \cdot f_{cu} &= A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot f_{fd} \\ \Leftrightarrow \xi &= \frac{A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot f_{fd}}{\psi \cdot b \cdot d \cdot f_{cu}} \end{aligned}$$

Wordt er vooropgesteld dat  $\psi = 0,81$ , dan vindt men een waarde voor  $\xi$ .

$$\xi = \frac{A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot f_{fd}}{\psi \cdot b \cdot d \cdot f_{cu}} = \frac{409 \times 434,783 + 100 \times 2192,308}{0,81 \times 220 \times 350 \times 9,067} = 0,791$$

Met deze waarde kan men een waarde vinden voor  $\mu_d$  en  $\zeta$ .

$$\mu_d = 0,429 \text{ en } \zeta = 0,671$$

Aangezien  $\mu_d \geq 0,187$  is, is inderdaad  $\psi = 0,81$ . Uitgaande van de drukzone is het bezwijkmoment gelijk aan het onderstaande resultaat.

$$\begin{aligned} M_u &= \mu_d \cdot f_{cu} \cdot b \cdot d^2 \\ \Leftrightarrow M_u &= 0,429 \times 9,067 \times 220 \times 311^2 \\ \Leftrightarrow M_u &= 82694755,75 \text{ N.mm} = 82,695 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

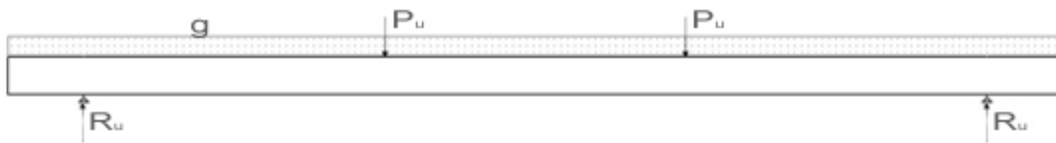
Uitgaande van de wapeningsdoorsnede krijgt men de volgende waarde.

$$\begin{aligned} M_u &= A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot \zeta \cdot d + A_f \cdot f_{fd} \cdot \left( \zeta \cdot d + \left( h - d + \frac{t_f}{2} \right) \right) \\ \Leftrightarrow M_u &= 409 \times 434,783 \times 0,671 \times 311 + 100 \times 2192,308 \times \left( 0,671 \times 311 + \left( 350 - 311 + \frac{1}{2} \right) \right) \\ \Leftrightarrow M_u &= 91466778,16 \text{ N.mm} = 91,467 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Men stelt het bezwijkmoment gelijk aan het gemiddelde van bovenstaande waarden. Het bezwijkmoment is dus gelijk aan 87,081 kN m. Tot slot wordt de kracht  $P_u$  berekend die nodig is om dit moment te bereiken. Hiervoor dient het eigengewicht van de balk en de reactiekrachten gekend te zijn.

$$g = 1,925 \frac{kN}{m}$$

$$R = P_u + g \times \frac{L}{2} = P_u + g \times 2,10$$



Figuur 24: Bepaling van de vjzelkracht in de bezwijktoestand

Tot slot wordt de kracht  $P_u$  a.d.h.v. een momentenvergelijking berekend.

$$\sum_{x=L/2} M = 0$$

$$\Leftrightarrow M_u + P_u \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - R \times 1,80 = 0$$

$$\Leftrightarrow M_u + P_u \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - (P_u + g \times 2,10) \times 1,80 = 0$$

$$\Leftrightarrow 1,20 \times P_u = M_u + g \times 2,10 \times 1,05 - g \times 2,10 \times 1,80$$

$$\Leftrightarrow 1,20 \times P_u = M_u - 1,575 \times g$$

$$\Leftrightarrow P_u = \frac{87,081 - 1,575 \times 1,925}{1,20}$$

$$\Leftrightarrow P_u = 70,041 kN$$

In de bezwijktoestand wordt een maximale kracht van 70,041 kN bereikt. Deze kracht komt overeen met een moment van 87,081 kN m.

#### 4.1.2.2.4 Dwarskrachtencapaciteit

$V_{Rd1}$  is de weerstand van de betondoorsnede tegen dwarskrachten. Men is voor de rekenwaarde van deze dwarskrachtenweerstand gekomen tot de volgende experimentele formule.

$$V_{Rd1} = \left[ 0,1 \times k \times \left( 100 \times \rho_{eq} \times f_{ck} \right)^{1/3} + 0,15 \times \sigma_{cp} \right] \times b_w \times d$$

- met  $k = 1 + \sqrt{200/d}$  de invloed van  $d$  (in mm)
- $\rho_{eq} \leq 0,02$  het in rekening te brengen percentage van de hoofdwapening en van de koolstofvezelwapening
- $\sigma_{cp} = \frac{N_{pd}}{A}$  de spanning t.g.v. een langskracht  $N_{pd}$ , in  $N/mm^2$
- $b_w$  de minimale breedte van de balk, in mm

De berekening van  $\rho_{eq}$  verloopt als volgt.

$$\rho_s = \frac{A_{s1}}{b.d}$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{b.h}$$

$$\rho_{eq} = \rho_s + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_s}$$

De berekening van de dwarskrachtenweerstand van de betondoorsnede verloopt dan als volgt.

$$\rho_{eq} = \frac{A_{s1}}{b.d} + \frac{A_f}{b.h} \cdot \frac{E_f}{E_s}$$

$$\Leftrightarrow \rho_{eq} = \frac{409}{220 \times 311} + \frac{100}{220 \times 350} \times \frac{175000}{200000} = 0,712\%$$

$$V_{Rd1} = \left[ 0,1 \times k \times (100 \times \rho_{eq} \times f_{ck})^{1/3} + 0,15 \times \sigma_{cp} \right] \times b_w \times d$$

$$\Leftrightarrow V_{Rd1} = \left[ 0,1 \times (1 + \sqrt{200/311}) \times (0,712 \times 16)^{1/3} \right] \times 220 \times 311$$

$$\Leftrightarrow V_{Rd1} = 27721,676N$$

$$\Leftrightarrow V_{Rd1} = 27,722kN$$

$V_{wd}$  is de weerstand van de dwarskrachtenwapening tegen dwarskrachten. De waarde voor deze weerstand wordt met de volgende formule bepaald.

$$V_{wd} = \frac{0,9 \times d \times A_{sw} \times f_{wd}}{s} = \frac{0,9 \times 311 \times 101 \times 474,783}{100} = 122809,444N = 122,809kN$$

De totale dwarskrachtencapaciteit varieert van 122,809 kN (waarbij het beton helemaal niet bijdraagt tot de dwarskrachtenweerstand) tot 150,531 kN (waarbij het beton 100% bijdraagt tot de dwarskrachtenweerstand).

4.1.2.2.5 Doorbuiging

De doorbuiging wordt zuiver theoretisch berekend. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen twee toestanden: een ongescheurde toestand, d.i. een toestand waarbij nog geen scheuren zijn, en een gescheurde toestand, waarbij het beton in de trekzone volledig gescheurd is.

4.1.2.2.5.1 Initieel scheurmoment

Het initieel scheurmoment wordt het eerst bepaald.

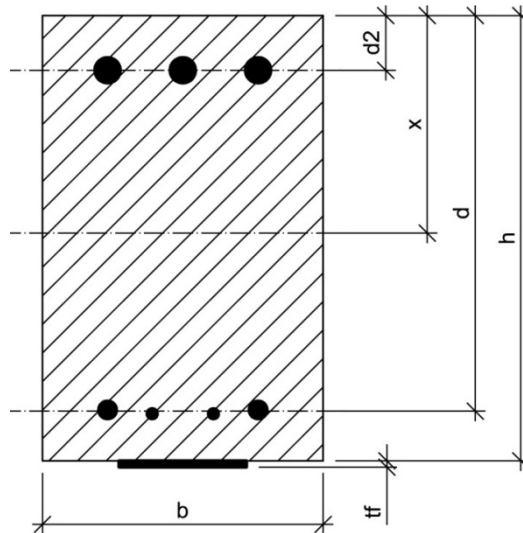
$$M_{cr} = f_{cm} \times \frac{I_1}{v_1}$$

Voor de bepaling van het initieel scheurmoment is de betontreksterkte nodig.

$$f_{cm} = 0,3 \times f_{ck}^{2/3} = 0,3 \times 16^{2/3} = 1,905 \frac{N}{mm^2}$$

Het traagheidsmoment van de rechthoekige doorsnede wordt als volgt berekend.

$$I_1 = \frac{b \times x^3}{3} + \frac{b \times (h-x)^3}{3} + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} \times (d-x)^2 + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times (x-d_2)^2 + \alpha_f \times A_f \times \left( h - x + \frac{t_f}{2} \right)^2$$



**Figuur 25: Traagheidsmoment van de niet-gescheurde doorsnede**

Om het traagheidsmoment te bepalen heeft men de ligging van de neutrale vezel nodig.

$$x = \frac{b \times h \times \frac{h}{2} + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} \times d + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times d_2 + \alpha_f \times A_f \times \left( h + \frac{t_f}{2} \right)}{b \times h + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} + \alpha_f \times A_f}$$

$$\text{met } \alpha_s = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000 \text{ N/mm}^2}{27402,742 \text{ N/mm}^2} = 7,299$$

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{175000 \text{ N/mm}^2}{27402,742 \text{ N/mm}^2} = 6,386$$

$$E_c = 9,5 \times (f_{ck} + 8)^{1/3} \times 10^3 = 9,5 \times (16 + 8)^{1/3} \times 10^3 = 27402,742 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Invullen van deze waarden geeft het onderstaande resultaat.

$$x = \frac{220 \times 350 \times \frac{350}{2} + (7,299 - 1) \times 409 \times 311 + (7,299 - 1) \times 942 \times 43 + 6,386 \times 100 \times \left(350 + \frac{1}{2}\right)}{220 \times 350 + (7,299 - 1) \times 409 + (7,299 - 1) \times 942 + 6,386 \times 100}$$

$$\Leftrightarrow x = 171 \text{ mm}$$

Verder is ook de afstand van de neutrale vezel tot de meest getrokken vezel nodig.

$$v_1 = h + t_f - x = 350 + 1 - 171 = 180 \text{ mm}$$

Uiteindelijk kan het traagheidsmoment berekend worden.

$$I_1 = \frac{b \times x^3}{3} + \frac{b \times (h-x)^3}{3} + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} \times (d-x)^2 + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times (x-d_2)^2 + \left(h-x + \frac{t_f}{2}\right)^2 \times \alpha_f \times A_f$$

$$\Leftrightarrow I_1 = \frac{220 \times 171^3}{3} + \frac{220 \times (350-171)^3}{3} + (7,299-1) \times 409 \times (311-171)^2 +$$

$$(7,299-1) \times 942 \times (171-43)^2 + \left(350-171 + \frac{1}{2}\right)^2 \times 6,386 \times 100$$

$$\Leftrightarrow I_1 = 955357097 \text{ mm}^4$$

Tot slot wordt een waarde voor het initieel scheurmoment gevonden.

$$M_{cr} = f_{ctm} \times \frac{I_1}{v_1} = 1,905 \times \frac{955357097}{180} = 10125355,566 \text{ N.mm} = 10,125 \text{ kN.m}$$

4.1.2.2.5.2 Ongescheurde toestand

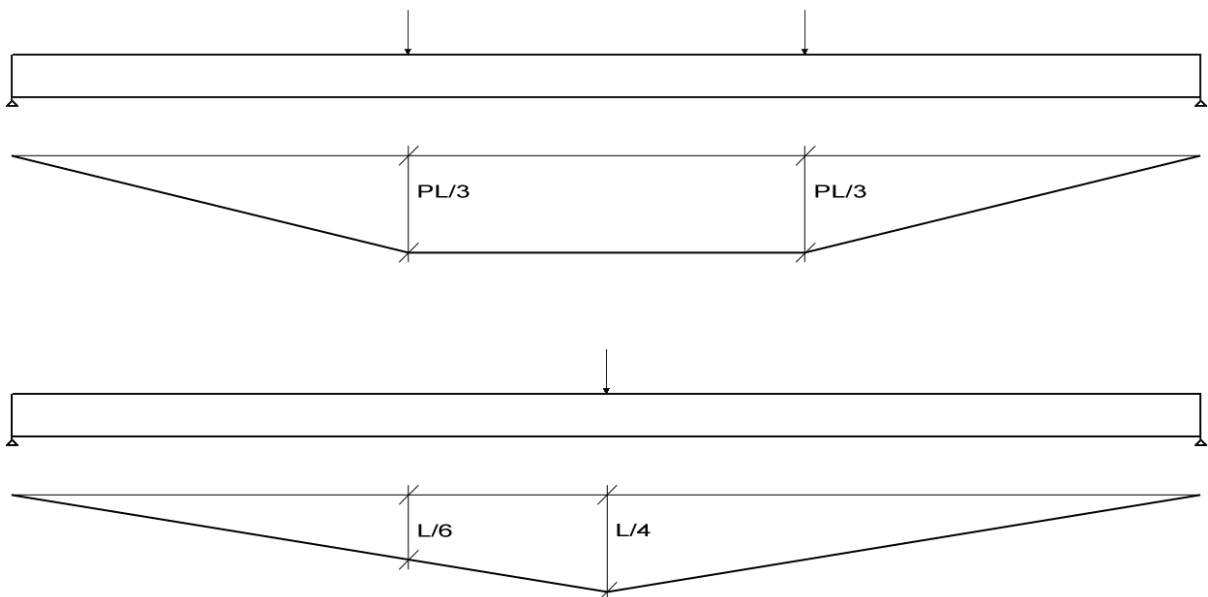
De doorbuiging in de ongescheurde toestand wordt met de onderstaande formule bepaald.

$$a = a_1 = k \times \frac{M \times L^2}{E_c \times I_1}$$

Er moet echter aan de volgende voorwaarde voldaan zijn.

$$M \leq M_{cr}$$

De coëfficiënt k kan m.b.v. de vormveranderingsarbeid bepaald worden. Voor vervorming kan benaderend berekend worden door enkel de term betreffende de buigende momenten in rekening te brengen. Dit is toegelaten, vermits een balk uit gewapend beton gezien kan worden als een tweedimensionaal staafwerk waar de belasting in hoofdzaak loodrecht op de richting van de aslijn van de staaf aangrijpt.



**Figuur 26: Momentenlijnen behorend bij de werkelijke en de fictieve belasting**

M.b.v. de tabellen van de Mohrse integralen bekomt men een waarde voor de coëfficiënt k.

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{1}{E.I} \int M.M.dx \\
 \Leftrightarrow a &= \frac{2}{E.I} \times \left( \frac{1}{3} . M.M. \frac{L}{3} + \frac{1}{2} . (M_{links} + M_{rechts}) . M. \frac{L}{6} \right) \\
 \Leftrightarrow a &= \frac{2}{E.I} \times \left( \frac{1}{3} \times \frac{L}{6} \times \frac{P.L}{3} \times \frac{L}{3} + \frac{1}{2} \times \left( \frac{L}{6} + \frac{L}{4} \right) \times \frac{P.L}{3} \times \frac{L}{6} \right) \\
 \Leftrightarrow a &= \frac{2}{E.I} \times \left( \frac{P.L^3}{162} + \frac{5.P.L^3}{432} \right) = \frac{46.P.L^3}{1296.E.I} = \frac{23.M.L^2}{216.E.I}
 \end{aligned}$$



Uit deze berekeningen volgt het onderstaande resultaat.

$$k = \frac{23}{216}$$

De elasticiteitsmodulus van het beton  $E_c$  en het traagheidsmoment  $I_1$  zijn reeds eerder berekend. De doorbuiging in de ongescheurde toestand kan uiteindelijk als volgt berekend worden.

$$a = a_1 = \frac{23}{216} \times \frac{M \times L^2}{E_c \times I_1}$$

#### 4.1.2.2.5.3 Gescheurde toestand

Van zodra aan de volgende voorwaarde voldaan is, bevindt de balk zich in een gedeeltelijk gescheurde toestand.

$$M_{cr} \leq M$$

De doorbuiging in de gescheurde toestand wordt als volgt berekend.

$$a = \chi \times a_1 + (1 - \chi) \times a_2$$

De doorbuiging  $a_1$  is gelijk aan de doorbuiging in de ongescheurde toestand. De doorbuiging  $a_2$  is deze bij een volledig gescheurd veronderstelde doorsnede.

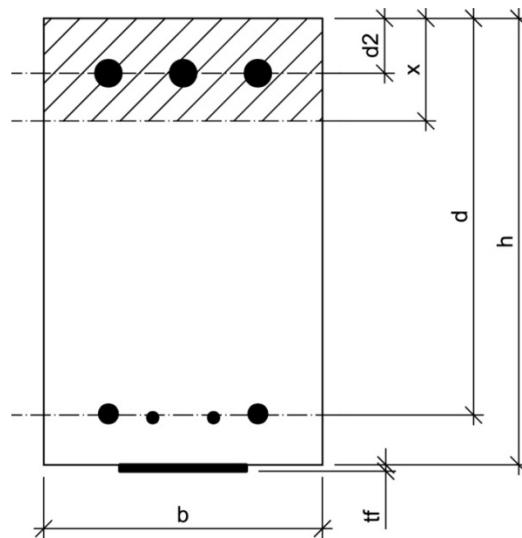
$$a_2 = k \times \frac{M \times L^2}{E_c \times I_2}$$

De coëfficiënt  $k$  is dezelfde als deze in de ongescheurde toestand. Ook de elasticiteitsmodulus van het beton  $E_c$  behoudt dezelfde waarde. Om het traagheidsmoment  $I_2$  te bepalen, heeft men de nieuwe ligging van de neutrale vezel nodig. Die kan men als volgt berekenen.

$$x = \xi \times d = 0,259 \times 311 \text{ mm} = 80,48 \text{ mm}$$

Het traagheidsmoment zelf wordt dan op de volgende manier uitgewerkt.

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \frac{b \times x^3}{3} + \alpha_s \times A_{s1} \times (d - x)^2 + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times (x - d_2)^2 \\
 &+ \left( h - x + \frac{t_f}{2} \right)^2 \times \alpha_f \times A_f \\
 \Leftrightarrow I_2 &= \frac{220 \times 80,481^3}{3} + 7,299 \times 409 \times (311 - 80,481)^2 + (7,299 - 1) \times 942 \times (80,481 - 43)^2 \\
 &+ \left( 350 - 80,481 + \frac{1}{2} \right)^2 \times 6,386 \times 100 \\
 \Leftrightarrow I_2 &= 251390957 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$



Figuur 27: Traagheidsmoment van de gescheurde doorsnede

De coëfficiënt  $\chi$  berekent men als volgt.

$$\chi = \beta_1 \times \beta_2 \times \left( \frac{M_{cr}}{M} \right)^2$$

met  $\beta_1 = 1$  voor staven met een verbeterde hechting

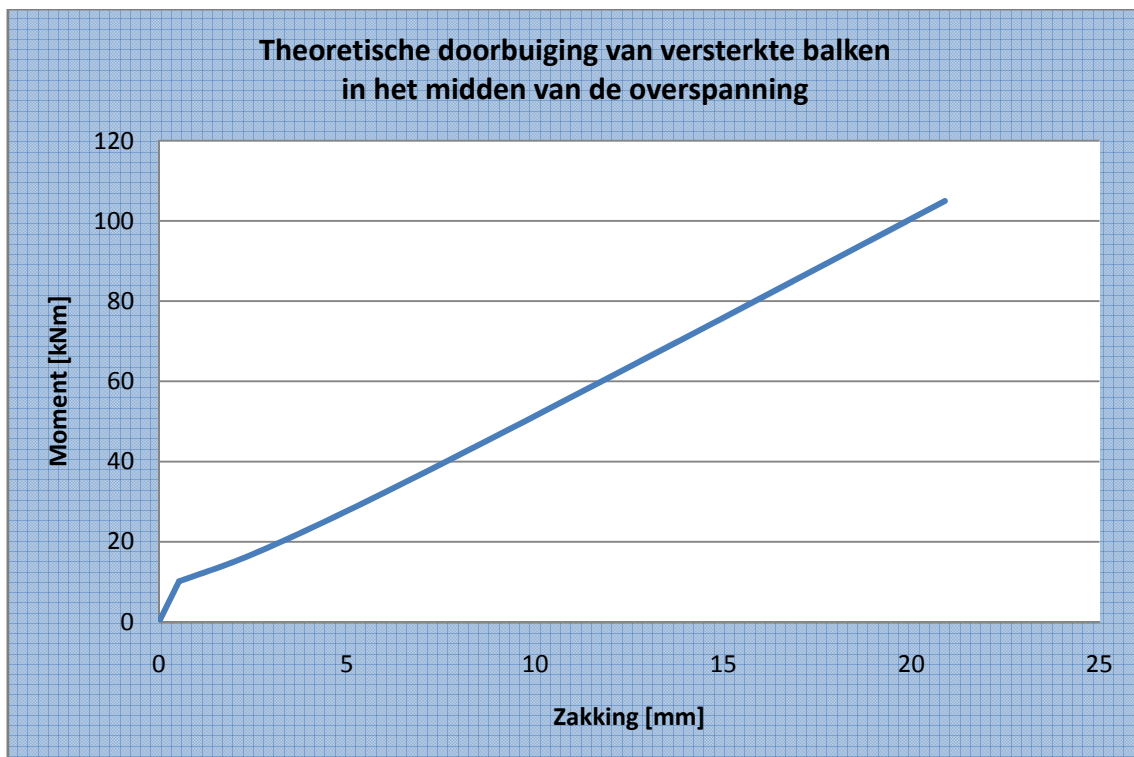
$\beta_2 = 1$  voor een kortstondige of éénmalige belasting

Tabel 62 toont de berekende waarden van de theoretische doorbuiging.

moment [kN m]	$\chi$	$1-\chi$	$a_1$ [mm]	$a_2$ [mm]	$a$ [mm]
0,000			0,000		0,000
5,000			0,264		0,264
10,000			0,527		0,527
10,125	1,000	0,000	0,534	2,028	0,534
15,000	0,456	0,544	0,791	3,005	1,996

20,000	0,256	0,744	1,054	4,007	3,250
25,000	0,164	0,836	1,318	5,008	4,403
30,000	0,114	0,886	1,581	6,010	5,505
35,000	0,084	0,916	1,845	7,011	6,579
40,000	0,064	0,936	2,109	8,013	7,635
45,000	0,051	0,949	2,372	9,015	8,678
50,000	0,041	0,959	2,636	10,016	9,714
55,000	0,034	0,966	2,899	11,018	10,743
60,000	0,028	0,972	3,163	12,020	11,767
65,000	0,024	0,976	3,426	13,021	12,788
70,000	0,021	0,979	3,690	14,023	13,807
75,000	0,018	0,982	3,953	15,024	14,823
80,000	0,016	0,984	4,217	16,026	15,837
85,000	0,014	0,986	4,481	17,028	16,850
90,000	0,013	0,987	4,744	18,029	17,861
95,000	0,011	0,989	5,008	19,031	18,872
100,000	0,010	0,990	5,271	20,033	19,881
105,000	0,009	0,991	5,535	21,034	20,890

Tabel 62: Cijferwaarden theoretische doorbuiging van de versterkte balken



Grafiek 15: Theoretische doorbuiging van versterkte balken in het midden van de overspanning

#### 4.1.2.2.6 Breukmechanismen

Zowel de breukmechanismen volgens CUR Aanbeveling 91 als volgens FIB Bulletin 14 worden in beschouwing genomen.

##### 4.1.2.2.6.1 Volgens CUR Aanbeveling 91

De CUR Aanbeveling 91 gaat uit van een initiële rek, d.i. de rek in het beton ter plaatse van de koolstofvezelwapening op het moment van aanbrengen van de koolstofvezelwapening. Deze initiële rek wordt gelijk aan nul gesteld, vermits de koolstofvezelwapening bij een nullast is verlijmd.

Met betrekking tot het verlies van composietwerking dienen 3 breukmechanismen gecontroleerd te worden:

- onthechting bij dwarskrachtscheuren;
- onthechting door hoge schuifspanningen;
- eindverankering-dwarskrachtenbreuk (d.i. concrete rip-off).

##### 4.1.2.2.6.1.1 Onthechting bij dwarskrachtscheuren

Deze methode gaat ervan uit dat het beton zich aan weerszijden van een verticale scheur vertikaal verplaatst, waardoor een trekspanning loodrecht op de koolstofvezelwapening tot onthechting kan leiden. Voor dit mechanisme wordt gebruik gemaakt van een empirisch afgeleide formule. Bij de afleiding van deze formule is echter geen rekening gehouden met de beugelwapening. Aangezien de balken sterk gewapend zijn tegen dwarskrachtscheuren, zal men een onrealistisch resultaat bekomen.

Onthechting bij dwarskrachtscheuren zal optreden indien de dwarskrachten de onderstaande waarde bereiken.

$$V_{d,\max} = V_{odu} = \tau_{odu} \times b \times d$$

met  $V_{d,\max}$  = de maximale waarde voor de dwarskracht in het gebied waar de koolstofvezelwapening aanwezig is

$b$  = de breedte van de betondoorsnede

$d$  = de nuttige hoogte van de betondoorsnede

$\tau_{odu}$  = de uiterst opneembare schuifspanning m.b.t. tot dit breukmechanisme

De uiterst opneembare schuifspanning m.b.t. tot onthechting bij dwarskrachtscheuren  $\tau_{odu}$  valt te berekenen met de onderstaande formule.

$$\tau_{odu} = \frac{\tau_{odrep}}{\gamma_m}$$

met  $\tau_{odrep} = 0,38 + 1,51 \rho_{eq}$

$\gamma_m = 1,4$

$\rho_{eq} =$  het equivalente wapeningspercentage

Het equivalente wapeningspercentage wordt als volgt berekend.

$$\begin{aligned}\rho_{eq} &= \rho_s + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_s} \\ \Leftrightarrow \rho_{eq} &= \frac{A_{s1}}{b \cdot d} + \frac{A_f}{b \cdot h} \cdot \frac{E_f}{E_s} \\ \Leftrightarrow \rho_{eq} &= \frac{409}{220 \times 311} + \frac{100}{220 \times 350} \times \frac{175000}{200000} \\ \Leftrightarrow \rho_{eq} &= 0,712\%\end{aligned}$$

Uiteindelijk wordt voor de dwarskracht  $V_{odu}$  het onderstaande resultaat bekomen.

$$\begin{aligned}V_{odu} &= \tau_{odu} \times b \times d \\ \Leftrightarrow V_{odu} &= \frac{\tau_{odrep}}{\gamma_m} \times b \times d \\ \Leftrightarrow V_{odu} &= \frac{0,38 + 1,51 \cdot \rho_{eq}}{\gamma_m} \times b \times d \\ \Leftrightarrow V_{odu} &= \frac{0,38 + 1,51 \times 0,712}{1,4} \times 220 \times 311 \\ \Leftrightarrow V_{odu} &= 71047,937 N \\ \Leftrightarrow V_{odu} &= 71,048 kN\end{aligned}$$

Het is gekend dat de dwarskracht tijdens een vierpuntsbuigproef gelijk is aan de reactiekracht. Bijgevolg is uit de bovenstaande dwarskracht eenvoudig het corresponderende moment te berekenen. Hierbij wordt echter geen rekening gehouden met het eigengewicht.

$$M = \frac{P \times L}{3} = \frac{71,048 \times 3,6}{3} = 85,258 kN.m$$

#### 4.1.2.2.6.1.2 *Onthechting door hoge schuifspanningen*

In verband met beperking van de schuifspanning tussen beton en koolstofvezelwapening moet voor doorsneden waarin de hoofdwapening in de uiterste grenstoestand vloeit, worden voldaan aan de volgende voorwaarde.

$$V_{de} \leq V_{osu} = \tau_{osu} \cdot z_r \cdot b_f$$

met  $V_{osu}$  = de uiterst opneembare dwarskracht m.b.t. onthechting door hoge schuifspanningen

$\tau_{osu}$  = de uiterst opneembare schuifspanning m.b.t. tot onthechting door hoge schuifspanningen

$z_r$  = de hefboomsarm voor de resulterende trekkracht van de inwendige wapening en de uitwendige koolstofvezelwapening

$b_f$  = de breedte van de koolstofvezelwapening

Als benadering voor de hefboomsarm mag  $z_r = 0,95 d$  worden aangehouden.

De uiterst opneembare schuifspanning m.b.t. tot onthechting door hoge schuifspanningen  $\tau_{osu}$  valt te berekenen met de onderstaande formule.

$$\tau_{osu} = \frac{\tau_{osrep}}{\gamma_m}$$

met  $\tau_{osrep} = 1,8 f_{hrep}$

$\gamma_m = 1,4$

Voor  $f_{hrep}$  mag 0,7 maal de experimenteel bepaalde gemiddelde waarde voor de hechtsterkte worden aangehouden. Bij een goede voorbereiding van het betonoppervlak zal de hechtsterkte gelijk zijn aan de betontreksterkte. De werkelijke hechtsterkte dient tijdens de uitvoering bepaald te worden. In deze berekeningen wordt uitgegaan van een hechtsterkte gelijk aan de betontreksterkte.

Uiteindelijk wordt voor de dwarskracht  $V_{osu}$  het onderstaande resultaat gevonden.

$$\begin{aligned}
 V_{osu} &= \tau_{osu} \cdot z_r \cdot b_f \\
 \Leftrightarrow V_{osu} &= \frac{\tau_{osrep}}{\gamma_m} \cdot z_r \cdot b_f \\
 \Leftrightarrow V_{osu} &= \frac{1,8 \times 0,7 \times f_{ctm}}{1,4} \times 0,95 \times d \times b_f \\
 \Leftrightarrow V_{osu} &= \frac{1,8 \times 0,7 \times 1,905}{1,4} \times 0,95 \times 311 \times 100 \\
 \Leftrightarrow V_{osu} &= 50609,149 N = 50,609 kN
 \end{aligned}$$

Het is gekend dat de dwarskracht tijdens een vierpuntsbuigproef gelijk is aan de reactiekracht. Bijgevolg is uit de bovenstaande dwarskracht eenvoudig het corresponderende moment te berekenen. Hierbij wordt echter geen rekening gehouden met het eigengewicht.

$$M = \frac{P \times L}{3} = \frac{50,609 \times 3,6}{3} = 60,731 kN.m$$

#### 4.1.2.2.6.1.3 Eindverankering-dwarskrachtenbreuk

Voor beëindiging van een versterking in het veld bij een eindsteunpunt moet het mechanisme voor eindverankering-dwarskrachtenbreuk voldoen aan de volgende voorwaarden.

$$V_{du} \leq V_{ouu} = \tau_{ouu} \cdot b \cdot d \text{ en } \lambda_v > 1 + \frac{L'}{d}$$

met  $V_{du}$  = de dwarskracht in de doorsnede op een afstand  $d$  van het einde van de koolstofvezelwapening bij een eindoplegging

$V_{ouu}$  = de uiterst opneembare dwarskracht m.b.t. een eindverankering-dwarskrachtenbreuk

$b$  = de breedte van de betondoorsnede

$d$  = de nuttige hoogte van de betondoorsnede

$\tau_{ouu}$  = de uiterst opneembare schuifspanning m.b.t. een eindverankering-dwarskrachtenbreuk

$\lambda_v$  = de dwarskrachtsslankheid

$L'$  = de afstand tussen het einde van de koolstofvezelwapening en de dagmaat van de oplegging in mm

De uiterst opneembare schuifspanning m.b.t. dit breukmechanisme  $\tau_{ouu}$  wordt als volgt berekend.

$$\tau_{ouu} = \frac{\tau_{ourep}}{\gamma_m} \text{ waarbij } \tau_{ourep} = \frac{k_3 \cdot f_b \cdot \sqrt{\rho_s}}{\sqrt[4]{L'}}$$

met  $\tau_{ourep}$  = de representatieve waarde voor de uiterst opneembare schuifspanningen  
m.b.t. een eindverankering-dwarskrachtenbreuk

$$k_3 = 4 \text{ mm}^{0,25}$$

$f_b$  = de rekenwaarde voor de betontreksterkte

$$\gamma_m = 1,4$$

Uiteindelijk wordt voor de dwarskracht  $V_{ouu}$  het onderstaande resultaat gevonden.

$$\begin{aligned} V_{ouu} &= \tau_{ouu} \cdot b \cdot d \\ \Leftrightarrow V_{ouu} &= \frac{\tau_{ourep}}{\gamma_m} \cdot b \cdot d \\ &= \frac{k_3 \cdot f_b \cdot \sqrt{\rho_s}}{\gamma_m \cdot \sqrt[4]{L'}} \cdot b \cdot d \\ \Leftrightarrow V_{ouu} &= \frac{k_3 \times 0,7 \times f_{cm} \times \sqrt{\frac{A_{s1}}{b \cdot d}}}{\gamma_m \cdot \sqrt[4]{L'}} \cdot b \cdot d \\ \Leftrightarrow V_{ouu} &= \frac{4 \times 0,7 \times 1,905 \times \sqrt{\frac{409}{220 \times 311}}}{1,4 \cdot \sqrt[4]{100}} \times 220 \times 350 \\ \Leftrightarrow V_{ouu} &= 63704,250 \text{ N} = 63,704 \text{ kN} \end{aligned}$$

Het is gekend dat de dwarskracht tijdens een vierpuntsbuigproef gelijk is aan een reactiekracht. Bijgevolg is uit de bovenstaande dwarskracht eenvoudig het corresponderende moment te berekenen. Hierbij wordt echter geen rekening gehouden met het eigengewicht.

$$M = \frac{P \times L}{3} = \frac{63,704 \times 3,6}{3} = 76,445 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



4.1.2.2.6.2 Volgens FIB Bulletin 14

Volgens FIB Bulletin 14 kunnen breukmechanismen in twee klassen ingedeeld worden, namelijk deze waarbij de volledige samenwerking tussen het beton en de koolstofvezelwapening behouden blijft tot het beton in de drukzone het begeeft of de koolstofvezelwapening breekt door te hoge trekspanningen en deze waarbij de samenwerking tussen het beton en de koolstofvezelwapening eerder verloren gaat.

4.1.2.2.6.2.1 Full composite action

4.1.2.2.6.2.1.1 Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton

Brek kan optreden door vloeien van het staal, gevolgd door verbrijzeling van beton, terwijl de koolstofvezelwapening intact blijft. Dit breukmechanisme is het meest gewenste breukmechanisme. Om te beginnen wordt de ligging van de neutrale vezel berekend.

$$0,85 \times \psi \times f_{cd} \times b \times x + A_{s2} \times E_s \times \varepsilon_{s2} = A_{s1} \times f_{yd} + A_f \times E_{fu} \times \varepsilon_f$$

met  $\psi = 0,8$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad E_s \varepsilon_{s2} \text{ mag echter } f_{yd} \text{ niet overschrijden}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0$$

$$\varepsilon_{cu} = 0,0035 \quad \varepsilon_{cu} \text{ is de maximaal opneembare stuik van het beton}$$

Er wordt echter aangenomen dat de neutrale vezel op dezelfde hoogte ligt zoals reeds eerder berekend is.

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} = 0,0035 \times \frac{80 - 43}{80} = 0,001630$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 = 0,0035 \times \frac{350 - 80}{80} - 0 = 0,011721$$

Met deze gegevens kan het moment berekend worden.

$$M_{Rd} = A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot (d - \delta_G \cdot x) + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (h - \delta_G \cdot x) + A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} \cdot (\delta_G \cdot x - d_2)$$

$$\Leftrightarrow M_{Rd} = 409 \times 434,783 \times (311 - 0,4 \times 80) + 100 \times 175000 \times 0,011721 \times (350 - 0,4 \times 80) + 942 \times 200000 \times 0,001630 \times (0,4 \times 80 - 43)$$

$$\Leftrightarrow M_{Rd} = 111401357,152 \text{ N.mm} = 111,401 \text{ kN.m}$$

Opdat de bovenstaande vergelijkingen geldig zouden zijn, moet aan twee voorwaarden voldaan zijn.

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d-x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s}$$

$$\Leftrightarrow \varepsilon_{s1} = 0,0035 \times \frac{311-80}{80} = 0,010014 \geq \frac{434,783}{200000} = 0,002174$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h-x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fud} = \frac{f_{fd}}{E_f}$$

$$\Leftrightarrow \varepsilon_f = 0,011721 \leq \varepsilon_{fud} = \frac{2192,308}{175000} = 0,012527$$

Aan beide voorwaarden is voldaan.

4.1.2.2.6.2.1.2 Vloeien van het staal gevolgd door breuk in de koolstofvezelwapening  
Indien slechts kleine hoeveelheden staal en koolstofvezelwapening gebruikt worden, is het mogelijk dat breuk optreedt door vloeien van het staal gevolgd door breuk in de koolstofvezelwapening. Theoretisch is dit breukmechanisme dus mogelijk. Er wordt echter aangenomen dat in dit geval onthechting eerder zal optreden dan breuk in de koolstofvezelwapening.

4.1.2.2.6.2.1.3 Verbrijzeling van het beton  
Indien grote hoeveelheden staal en koolstofvezelwapening gebruikt worden, is het mogelijk dat breuk optreedt door het begeven van het beton in de drukzone. Door de grote hoeveelheid drukwapening echter zal dit breukmechanisme waarschijnlijk niet als eerste optreden.

#### 4.1.2.2.6.2.2 *Loss of composite action*

Volgens FIB Bulletin 14 kan onthechting op verschillende plaatsen voorkomen:

- onthechting in het beton t.h.v. een verzwakte laag;
- onthechting in de epoxylijm;
- onthechting in het contactvlak tussen het beton en de epoxylijm of tussen de epoxylijm en de koolstofvezelwapening;
- onthechting binnen de koolstofvezelwapening.

Het meest optredende breukmechanisme zou onthechting zijn waarbij nog steeds een dun laagje beton aan de koolstofvezelwapening hangt. Een ander mogelijk breukmechanisme is concrete rip-off. De verdere berekeningen houden enkel met deze laatste breukmechanismen rekening.

#### 4.1.2.2.6.2.2.1 Peeling-off caused at shear cracks

Dwarskrachtenscheuren zijn verantwoordelijk voor zowel horizontale als verticale scheuropeningen, die tot peeling van de koolstofvezelwapening kunnen leiden. Peeling veroorzaakt door dwarskrachtenscheuren kan voorkomen worden door de dwarskrachten te beperken tot de dwarskrachtenweerstand  $V_{Rd1}$ . Deze dwarskrachtenweerstand wordt echter op een andere manier berekend dan zoals eerder is gedaan. Ze wordt berekend zoals aangegeven in Eurocode 2, met de onderstaande wijzigingen.

$$\tau_{Rk} = 0,15 \times f_{ck}^{1/3}$$

$$\rho_{eq} = \frac{A_s + A_f \cdot \frac{E_f}{E_s}}{b \cdot d}$$

De dwarskrachtenweerstand wordt volgens Eurocode 2 m.b.v. de onderstaande formule berekend.

$$V_{Rd1} = \tau_{Rk} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \kappa \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_{eq}) \cdot b_w \cdot d$$

met  $\beta_1 = 1$ , uitgezonderd voorgespannen beton

$$\beta_2 = V_d / V_{dred}$$

$V_{dred}$  = gereduceerde dwarskracht t.h.v. een puntlast op een afstand  $a < 2 \cdot d$  van de opleg

$\kappa = 1,6 - d$  (in m), groter dan of gelijk aan 1

$b_w$  = minimale breedte van de balk

$d$  = nuttige hoogte

Invullen van alle waarden geeft het volgende resultaat.

$$V_{Rd1} = \tau_{Rk} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \kappa \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_{eq}) \cdot b_w \cdot d$$

$$\Leftrightarrow V_{Rd1} = 0,15 \times f_{ck}^{1/3} \times \beta_1 \times \beta_2 \times (1,6 - d) \times \left( 1,2 + 40 \times \frac{A_s + A_f \times \frac{E_f}{E_s}}{b \times d} \right) \times b_w \times d$$

$$\Leftrightarrow V_{Rd1} = 0,15 \times 16^{1/3} \times 1 \times 1 \times (1,6 - 0,311) \times \left( 1,2 + 40 \times \frac{409 + 100 \times \frac{175000}{200000}}{220 \times 311} \right) \times 220 \times 311$$

$$\Leftrightarrow V_{Rd1} = 49654,463N = 49,654kN$$

Het is gekend dat de dwarskracht tijdens een vierpuntsbuigproef gelijk is aan de reactiekracht. Bijgevolg is uit de bovenstaande dwarskracht eenvoudig het corresponderende moment te berekenen. Hierbij wordt echter geen rekening gehouden met het eigengewicht.

$$M = \frac{P \times L}{3} = \frac{49,654 \times 3,6}{3} = 59,585kN.m$$

## 4.1.2.2.6.2.2.2 Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks

Peeling aan de eindverankering en bij buigingsscheuren kan op verschillende manieren behandeld worden.

## 4.1.2.2.6.2.2.2.1 Verification of end anchorage, strain limitation in the FRP

Een eerste aanpak om peeling te voorkomen is het opleggen van een beperking voor de rek in de koolstofvezelwapening in de uiterste grenstoestand. Meestal wordt de rek  $\varepsilon_f$  beperkt tot een bepaalde waarde  $\varepsilon_{f,lim}$  gaande van 0,0065 tot 0,0085. Bijkomend dient de eindverankering gecontroleerd te worden. In dit geval wordt de eindverankering gecontroleerd volgens het model van Holzenkämpfer. Dit model geeft waarden voor de maximale kracht  $N_{fa,max}$  in de koolstofvezelwapening die verankerd kan worden en voor de maximale verankeringslengte  $l_{b,max}$ .

$$N_{fa,max} = \alpha \cdot c_1 \cdot k_c \cdot k_b \cdot b \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ctm}}$$

$$l_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{c_2 \cdot f_{ctm}}}$$

$\alpha$  is een reductiefactor die de invloed van dwarskrachtscheuren op de weerstand tegen buiging in rekening brengt. Voor balken met voldoende dwarskrachtenwapening geldt  $\alpha = 1$ .  $k_c$  is een factor die de mate van verdichting van het beton aangeeft. Vermits de balken in dit geval in ideale omstandigheden geproduceerd zijn, mag  $k_c$  gelijk gesteld worden aan 1.  $k_b$  is een geometrische factor.

$$k_b = 1,06 \cdot \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1$$

De constanten  $c_1$  en  $c_2$  kunnen experimenteel bepaald worden. Voor koolstofvezelwapening zijn  $c_1$  en  $c_2$  respectievelijk gelijk aan 0,64 en 2.

Na invullen van alle waarden worden de onderstaande resultaten bekomen.

$$N_{fa,max} = \alpha \cdot c_1 \cdot k_c \cdot k_b \cdot b \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ctm}}$$

$$\Leftrightarrow N_{fa,max} = \alpha \cdot c_1 \cdot k_c \cdot 1,06 \cdot \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \cdot b \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ctm}}$$

$$\Leftrightarrow N_{fa,max} = 1 \times 0,64 \times 1 \times 1,06 \times \sqrt{\frac{2 - \frac{100}{220}}{1 + \frac{100}{400}}} \times 220 \times \sqrt{175000 \times 1 \times 1,905}$$

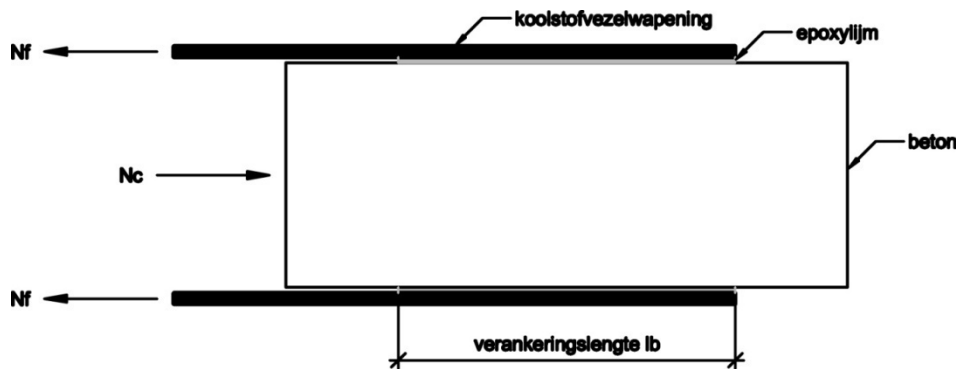
$$\Leftrightarrow N_{fa,max} = 95815,244N = 95,815kN$$

$$l_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{c_2 \cdot f_{cm}}} = \sqrt{\frac{175000 \times 1}{2 \times 1,905}} = 214 \text{ mm}$$

Indien de verankeringslengte  $l_b$  kleiner is dan  $l_{b,max}$ , dan wordt de maximale bindingskracht als volgt berekend.

$$N_{fa} = N_{fa,max} \cdot \frac{l_b}{l_{b,max}} \cdot \left( 2 - \frac{l_b}{l_{b,max}} \right)$$

De verankeringslengte  $l_b$  kan geanalyseerd worden door bindingstesten, zoals getoond in **Figuur 28** in vereenvoudigde vorm.



**Figuur 28:** Verankeringslengte  $l_b$

Aangezien de bindingslengte niet gekend is, worden bovenstaande waarden enkel als illustratie meegegeven.

#### 4.1.2.2.6.2.2.2.2 Verification according to the envelope line of tensile stresses in the FRP

Deze aanpak behandelt peeling op het einde en op elk willekeurig punt van het scheidingsvlak tussen het beton en de koolstofvezelwapening op een gelijkaardige manier. Het grote voordeel van deze methode is dat peeling op het einde en bij buigingsscheuren met hetzelfde model behandeld worden, terwijl de complexiteit van deze methode het grootste nadeel is. Deze complexiteit maakt het moeilijk deze methode als een praktisch ingenieursmodel toe te passen. Bijgevolg wordt deze aanpak buiten beschouwing gelaten.

#### 4.1.2.2.6.2.2.2.3 Verification of end anchorage and of force transfer at the FRP/concrete interface

Ook deze aanpak bestaat uit twee stappen. De eerste stap heeft betrekking op de eindverankering, zoals in 4.1.2.2.6.2.2.2.1. In de tweede stap wordt nagegaan of de schuifspanning  $\tau_b$  tussen het beton en de koolstofvezelwapening een beperking kent. Beschouwt men twee doorsneden, onderworpen aan de momenten  $M_d$  en  $M_d + \Delta M_d$ , gelegen op een afstand  $\Delta x$  van elkaar, dan wordt de schuifspanning  $\tau_b$  volgens de onderstaande formule berekend.

$$\tau_b = \frac{\Delta N_{fd}}{b_f \cdot \Delta x}$$

$\Delta N_{fd}$  is het verschil in trekkracht in de koolstofvezelwapening tussen de verschillende doorsneden.

De schuifspanning  $\tau_b$  dient beperkt te worden tot de design bond shear strength, die in de meeste gevallen gelijk is aan de bond shear strength  $f_{cbd}$  van beton.

$$f_{cbd} = 1,8 \times \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}$$

In dit geval wordt  $f_{cbd}$  berekend met de gemiddelde betontreksterkte.

$$f_{cbd} = 1,8 \times \frac{f_{cm}}{1,5}$$

De formule voor de schuifspanning  $\tau_b$  kan vereenvoudigd worden, indien men beschouwt dat  $N_{rd} = M_d/z_m$  en dat  $N_{rd} = N_{fd} + N_{sd}$ . Afhankelijk van het moment van het vloeien van het staal kunnen  $N_{rd}$  en  $N_{sd}$  als volgt benaderd worden.

$$\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd}: \quad N_{rd} = N_{fd} \cdot \left( 1 + \frac{A_{s1} \cdot E_s \cdot \varepsilon_s}{A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f} \right) \approx N_{fd} \cdot \left( 1 + \frac{A_{s1} \cdot E_s}{A_f \cdot E_f} \right) \text{ en } \Delta N_{fd} \approx \frac{\Delta M_d}{z_m \cdot \left( 1 + \frac{A_{s1} \cdot E_s}{A_f \cdot E_f} \right)}$$

$$\varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{yd}: \quad N_{rd} = N_{fd} + A_{s1} \cdot f_{yd} \text{ en } \Delta N_{fd} = \frac{\Delta M_d}{z_m}$$

Met  $\Delta M_d/\Delta x \approx V_d$  en  $z_m = (z_s + z_f)/2 \approx 0,95 d$  worden de onderstaande voorwaarden gevonden.

$$\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd}: \quad \frac{V_d}{0,95 \cdot d \cdot b_f \cdot \left( 1 + \frac{A_{s1} \cdot E_s}{A_f \cdot E_f} \right)} \leq f_{cbd}$$

$$\varepsilon_{s1} > \varepsilon_{yd}: \quad \frac{V_d}{0,95 \cdot d \cdot b_f} \leq f_{cbd}$$

Er wordt verondersteld dat de hoofdwapening reeds aan het vloeien is wanneer de maximale schuifspanning  $\tau_b$  bereikt wordt.

$$\begin{aligned} V_d &= f_{bcd} \cdot (0,95 \cdot d \cdot b_f) \\ \Leftrightarrow V_d &= 1,8 \cdot \frac{f_{ctm}}{1,5} \cdot (0,95 \cdot d \cdot b_f) \\ \Leftrightarrow V_d &= 1,8 \times \frac{1,905}{1,5} \times (0,95 \times 311 \times 100) \\ \Leftrightarrow V_d &= 67478,866 \text{ N} = 67,479 \text{ kN} \end{aligned}$$

Het is gekend dat de dwarskracht tijdens een vierpuntsbuigproef gelijk is aan de reactiekracht. Bijgevolg is uit de bovenstaande dwarskracht eenvoudig het corresponderende moment te berekenen. Hierbij wordt echter geen rekening gehouden met het eigengewicht.

$$M = \frac{P \times L}{3} = \frac{67,479 \times 3,6}{3} = 80,975 \text{ kN.m}$$

#### 4.1.2.2.6.2.2.3 End shear failure

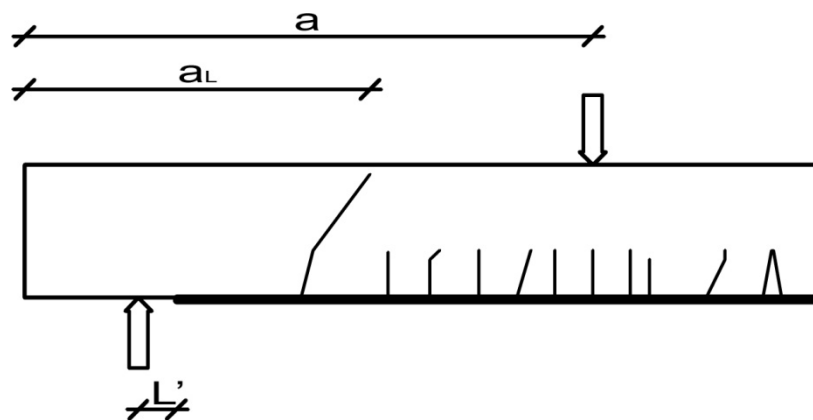
Opdat concrete rip-off zou optreden dient de volgende voorwaarde overschreden te worden.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} = \tau_{Rd} \cdot b \cdot d$$

met 
$$\tau_{Rd} = 0,15 \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \frac{d}{a_L} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \rho_s \cdot f_{ck}}}$$

$$a_L = \sqrt[4]{\frac{(1 - \rho_s)^2}{\rho_s} \cdot d \cdot L^3}$$

Verder dient  $a_L$  kleiner te zijn dan  $a$ , dat zelf groter moet zijn dan de som van  $d$  en  $L'$ .



Figuur 29: End shear failure

Invullen van alle parameters geeft de onderstaande resultaten.

$$L' = \frac{L - L_f}{2} = \frac{3600 - 3400}{2} = 100 \text{ mm}$$

$$a_L = \sqrt[4]{\frac{(1 - \rho_s)^2}{\rho_s} \cdot d \cdot L'^3} = \sqrt[4]{\frac{\left(1 - \frac{A_{s1}}{b \cdot d}\right)^2}{\frac{A_{s1}}{b \cdot d}} \cdot d \cdot L'^3}$$

$$\Leftrightarrow a_L = \sqrt[4]{\frac{\left(1 - \frac{409}{220 \times 311}\right)^2}{\frac{409}{220 \times 311}} \cdot 311 \cdot 100^3} = 771,194 \text{ mm}$$

$$\tau_{Rd} = 0,15 \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \frac{d}{a_L} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)} \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \rho_s \cdot f_{ck}}$$

$$\Leftrightarrow \tau_{Rd} = 0,15 \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \frac{d}{a_L} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)} \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \cdot f_{ck}}$$

$$\Leftrightarrow \tau_{Rd} = 0,15 \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \frac{311}{771,194} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{311}}\right)} \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \frac{409}{220 \cdot 311} \cdot 16}$$

$$\Leftrightarrow \tau_{Rd} = 0,611 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$V_{Rd} = \tau_{Rd} \cdot b \cdot d = 0,611 \times 220 \times 311$$

$$\Leftrightarrow V_{Rd} = 41801,017 \text{ N} = 41,801 \text{ kN}$$

Het is gekend dat de dwarskracht tijdens een vierpuntsbuigproef gelijk is aan de reactiekracht. Bijgevolg is uit de bovenstaande dwarskracht eenvoudig het corresponderende moment te berekenen.

$$M = \frac{P \times L}{3} = \frac{41,801 \times 3,6}{3} = 50,161 \text{ kN.m}$$

#### 4.1.2.6.2.2.4 Peeling-off caused by the unevenness of the concrete surface

Onthechting van koolstofvezelwapening door een oneffen oppervlak is ook een mogelijk breukmechanisme. Dit breukmechanisme is nog niet in detail bestudeerd. In dit geval is het echter onwaarschijnlijk dat het mechanisme het bepalende breukmechanisme is, vermits het beton steeds geschuurd werd vooraleer de koolstofvezelwapening erop aan te brengen. Dit breukmechanisme wordt bijgevolg dan ook verder buiten beschouwing gelaten.



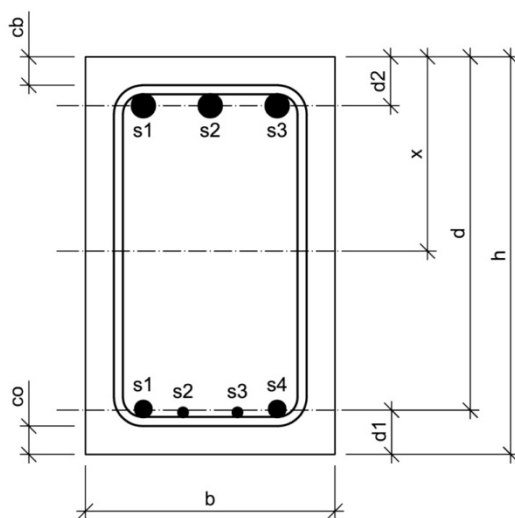
## 4.2 Balk B1

### 4.2.1 Algemeen

Balk B1 is een onversterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton zonder opgelijmde koolstofvezelwapening. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuur geven meer informatie over balk B1.

<b>Ouderdom</b>	337 dagen	
<b>Lengte</b>	4,190 m	
<b>Breedte</b>	0,220 m	
<b>Hoogte</b>	0,347 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

Tabel 63: Opbouw en dimensionering van balk B1



$$h = 347 \text{ mm}$$

$$b = 220 \text{ mm}$$

Figuur 30: Dwarsdoorsnede balk B1

#### 4.2.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{cx}$ , die men zou bekomen op een cilindervormig proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvormig proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 28,286 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 34,099 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal werd reeds in het academiejaar 2006-2007 afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk B1 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden in het academiejaar 2006-2007 experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi14} = 567,723 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi8} = 584,745 \frac{N}{mm^2}$$

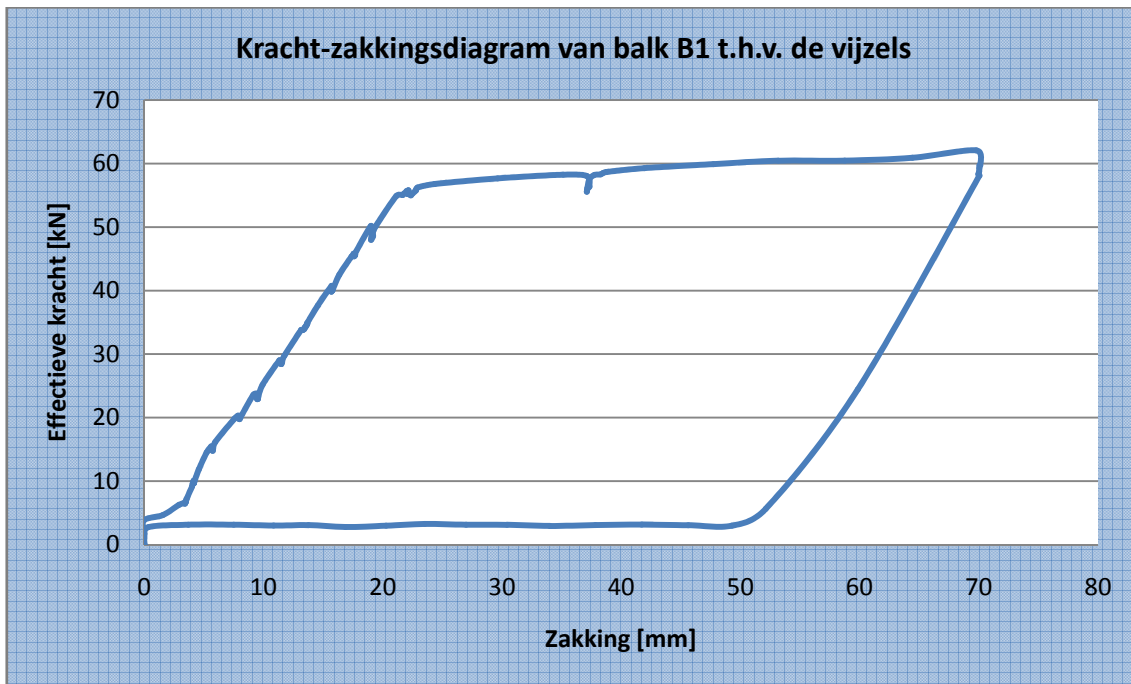
De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 567,723 + 101 \times 584,745}{308 + 101} = 571,926 \frac{N}{mm^2}$$

### 4.2.3 Meetresultaten

#### 4.2.3.1 Zakking t.h.v de vizels

Grafiek 16 toont de zakking van de vizels in functie van de belasting.

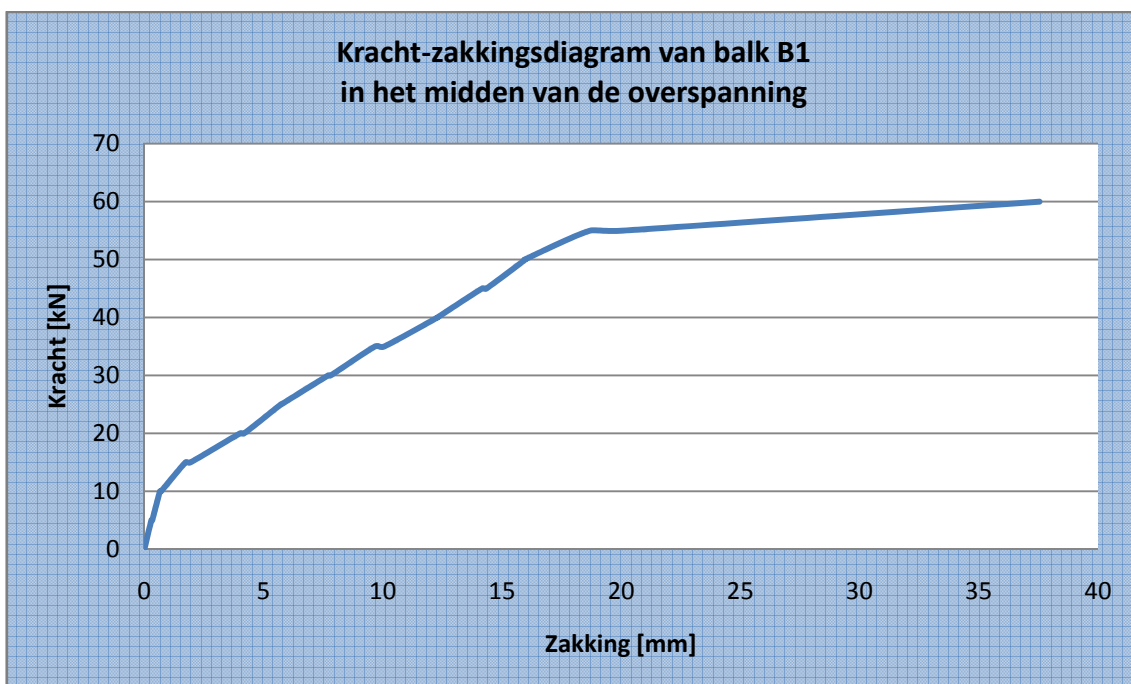


Grafiek 16: Kracht-zakkingsdiagram van balk B1 t.h.v. de vizels

#### 4.2.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

Grafiek 17 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting.

Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 17: Kracht-zakkingsdiagram van balk B1 in het midden van de overspanning

**Tabel 64** toont de cijferwaarden van **Grafiek 17**.

Kracht	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging
	meetklok 1	meetklok 2	meetklok 3	meetklok 4	midden	uiteinde	
	(midden)	(midden)	(uiteinde)	(uiteinde)	[mm]	[mm]	
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,39	0,39	0,19	0,01	0,39	0,10	0,29
5	0,45	0,45	0,23	0,02	0,45	0,13	0,33
10	0,91	0,87	0,44	0,04	0,89	0,24	0,65
10	0,96	0,93	0,46	0,04	0,95	0,25	0,70
15	2,21	2,11	0,79	0,08	2,16	0,44	1,73
15	2,42	2,31	0,79	0,08	2,37	0,44	1,93
20	4,67	4,51	1,04	0,12	4,59	0,58	4,01
20	4,85	4,67	1,04	0,12	4,76	0,58	4,18
25	6,51	6,27	1,18	0,16	6,39	0,67	5,72
25	6,52	6,28	1,17	0,16	6,40	0,67	5,74
30	8,59	8,30	1,28	0,20	8,45	0,74	7,71
30	8,71	8,39	1,28	0,20	8,55	0,74	7,81
35	10,67	10,26	1,34	0,25	10,47	0,80	9,67
35	11,07	10,64	1,35	0,25	10,86	0,80	10,06
40	13,42	12,86	1,40	0,30	13,14	0,85	12,29
40	13,42	12,86	1,40	0,31	13,14	0,86	12,29
45	15,38	14,72	1,44	0,34	15,05	0,89	14,16
45	15,58	14,90	1,45	0,35	15,24	0,90	14,34
50	17,30	16,51	1,49	0,37	16,91	0,93	15,98
50	17,28	16,46	1,49	0,37	16,87	0,93	15,94
55	20,10	19,23	1,54	0,40	19,67	0,97	18,70
55	21,51	20,58	1,55	0,41	21,05	0,98	20,07
60	39,28	37,81	1,59	0,41	38,55	1,00	37,55

**Tabel 64: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk B1 in het midden van de overspanning**

#### 4.2.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 25 kN en 30 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 25kN + 5 \times \frac{7,2mm - 5,72mm}{7,71mm - 5,72mm} = 28,728kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 45 kN en 50 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 45kN + 5 \times \frac{14,4mm - 14,16mm}{15,98mm - 14,16mm} = 45,661kN$$

#### 4.2.3.4 Breukkracht

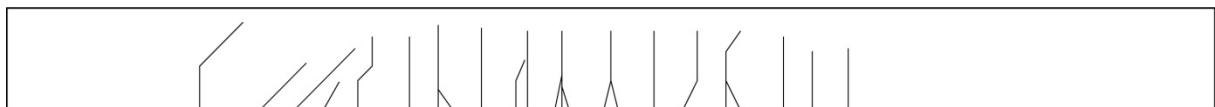
De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 62,083kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- overwegend buigingsscheuren
- breuk door vloeien van de hoofdwapening

**Figuur 31** toont een schets van de scheurvorming van balk B1.



**Figuur 31: Schets scheurvorming balk B1**

#### 4.2.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

##### 4.2.4.1 Lasten

**Tabel 65** vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 74,5 \text{ kN m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 62,1 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 42,3 \text{ kN m}$ $P_d = 37,7 \text{ kN}$
	GGT	$M = 34,5 \text{ kN m}$ $P = 26,2 \text{ kN}$
	Bezwijktoestand	$M_u = 47,1 \text{ kN m}$
		$P_u = 36,7 \text{ kN}$

**Tabel 65: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk B1**

Geen van de theoretisch berekende momenten ligt in de buurt van het empirisch bepaalde moment. Dit is waarschijnlijk voor een groot deel te wijten aan het grote verschil tussen de rekenwaarden van de materiaalkarakteristieken en de effectieve waarden van de materiaalkarakteristieken.

##### 4.2.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 66** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

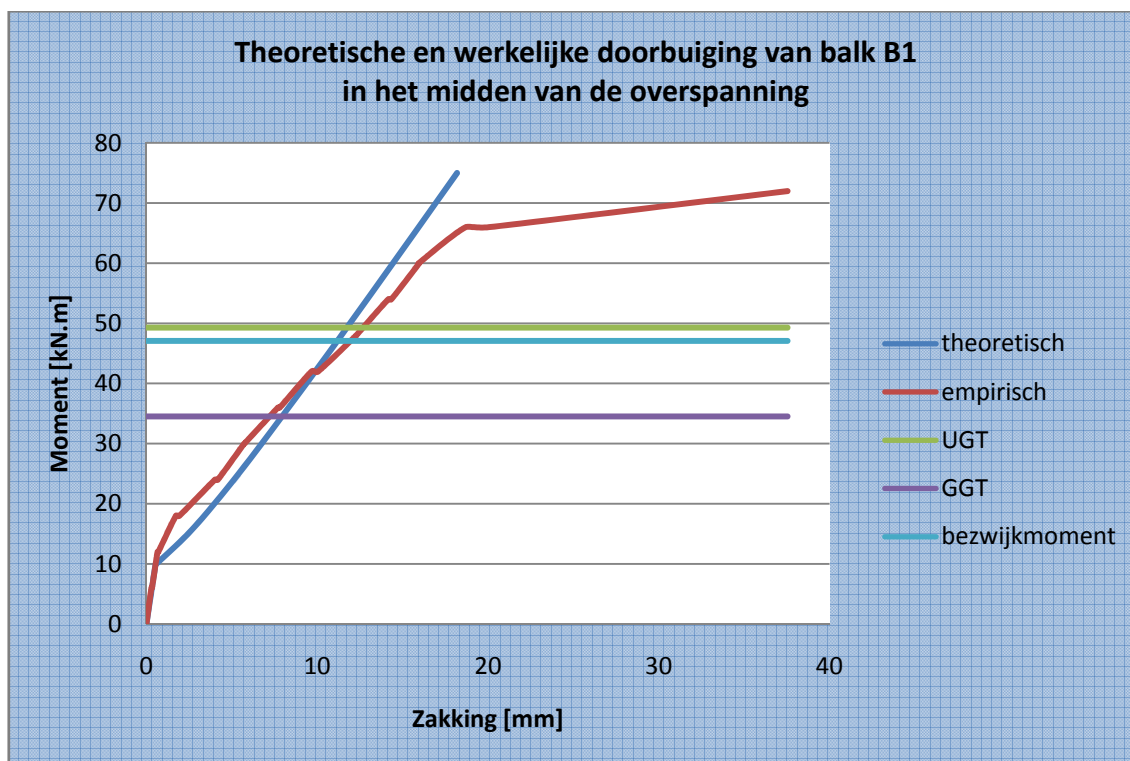
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN (beton: 0\%)}$
		$V_d = 149,0 \text{ kN (beton: 100\%)}$

**Tabel 66: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk B1**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

#### 4.2.4.3 Doorbuiging

**Grafiek 18** toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

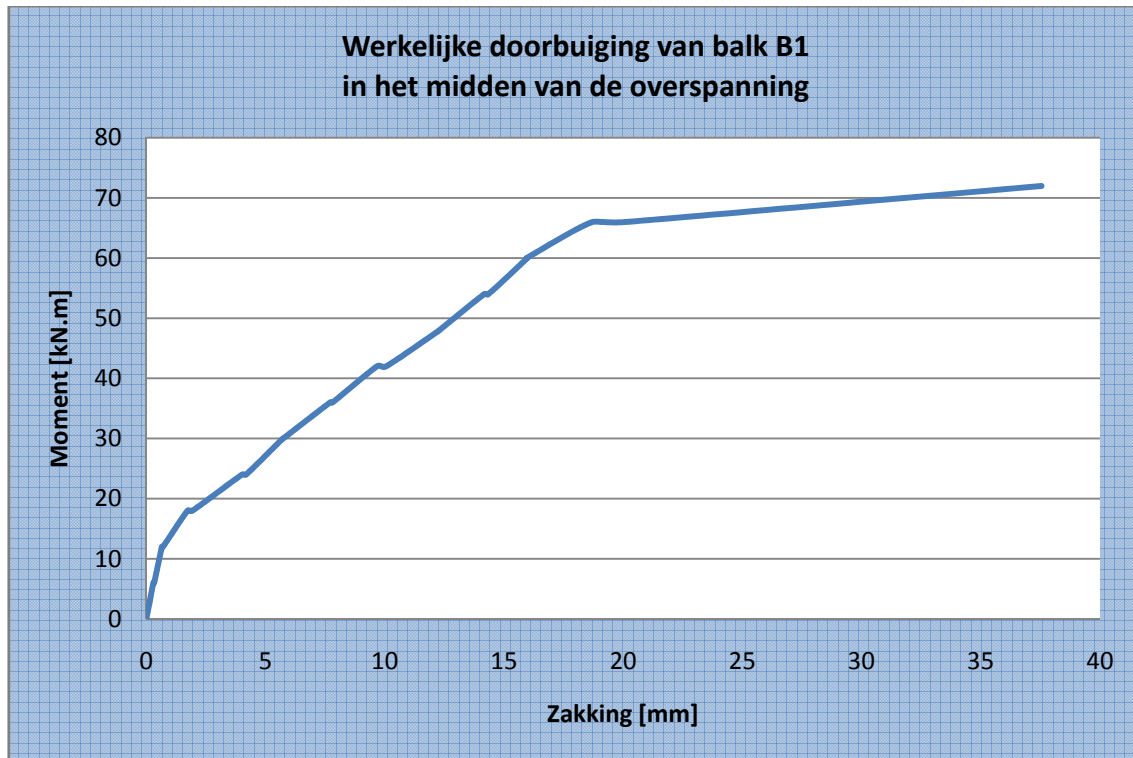


**Grafiek 18:** Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk B1 in het midden van de overspanning

In de niet-gescheurde toestand vallen de grafieken aanvankelijk samen. Er wordt opgemerkt dat het theoretisch berekende scheurmoment kleiner is dan het empirisch waargenomen scheurmoment. In de gescheurde toestand is de theoretisch berekende doorbuiging iets groter dan de werkelijke doorbuiging, zolang de bovengrens van de gebruiksgrenstoestand niet bereikt is. Eénmaal deze bovengrens bereikt is, wordt de werkelijke doorbuiging al gauw groter dan de theoretisch berekende doorbuiging.

#### 4.2.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 19** toont de werkelijke doorbuiging van balk B1 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 19** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 12 kN m.



**Grafiek 19: Werkelijke doorbuiging van balk B1 in het midden van de overspanning**

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 20 kN. Dit komt overeen met een moment van 24 kN m. Het theoretisch berekende scheurmoment bedraagt 9,9 kN m. Dit is merkbaar lager dan de empirisch gevonden waarde voor het initieel scheurmoment.



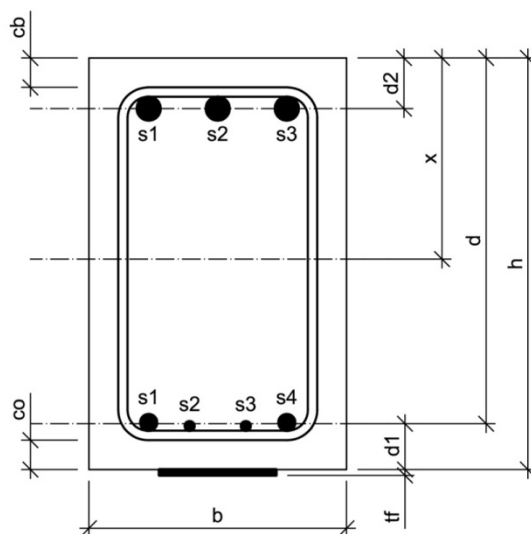
## 4.3 Balk BL1

### 4.3.1 Algemeen

Balk BL1 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening, maar zonder bijkomende verankering. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuur geven meer informatie over balk BL1.

<b>Ouderdom</b>	344 dagen	
<b>Lengte</b>	4,205 m	
<b>Breedte</b>	0,224 m	
<b>Hoogte</b>	0,350 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

Tabel 67: Opbouw en dimensionering van balk BL1



$$h = 350 \text{ mm}$$

$$b = 224 \text{ mm}$$

Figuur 32: Dwarsdoorsnede balk BL1

### 4.3.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{cx}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 29,655 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 35,748 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal werd reeds in het academiejaar 2006-2007 afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BL1 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden in het academiejaar 2006-2007 experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi14} = 567,723 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi8} = 584,745 \frac{N}{mm^2}$$

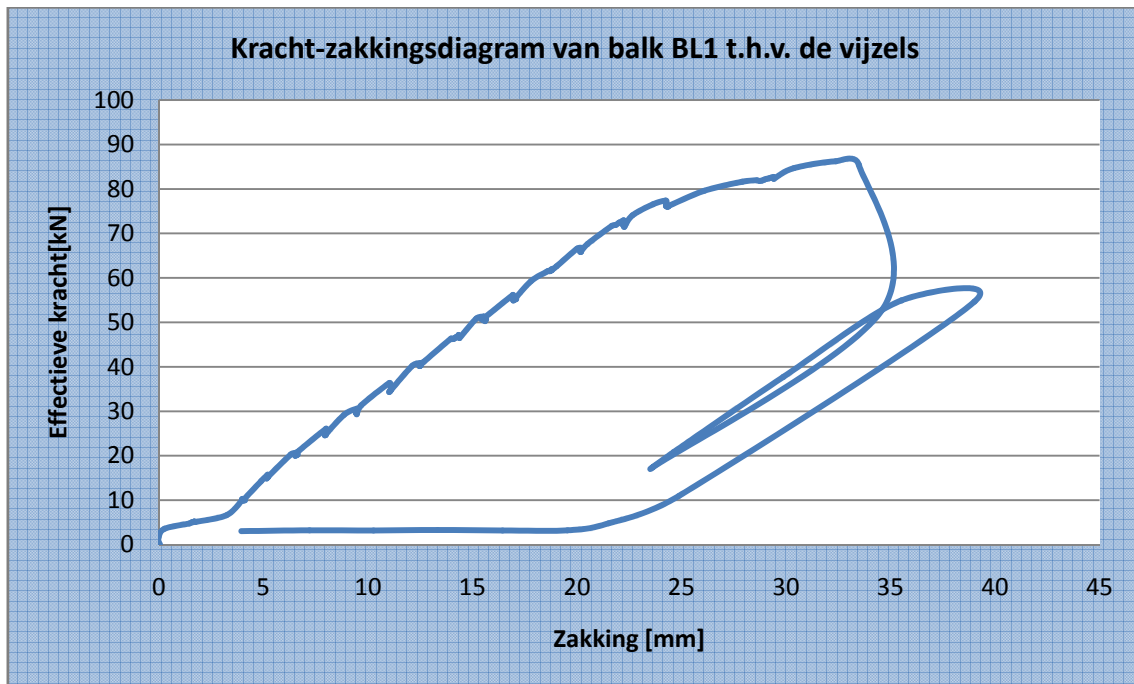
De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 567,723 + 101 \times 584,745}{308 + 101} = 571,926 \frac{N}{mm^2}$$

### 4.3.3 Meetresultaten

#### 4.3.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

Grafiek 20 toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.

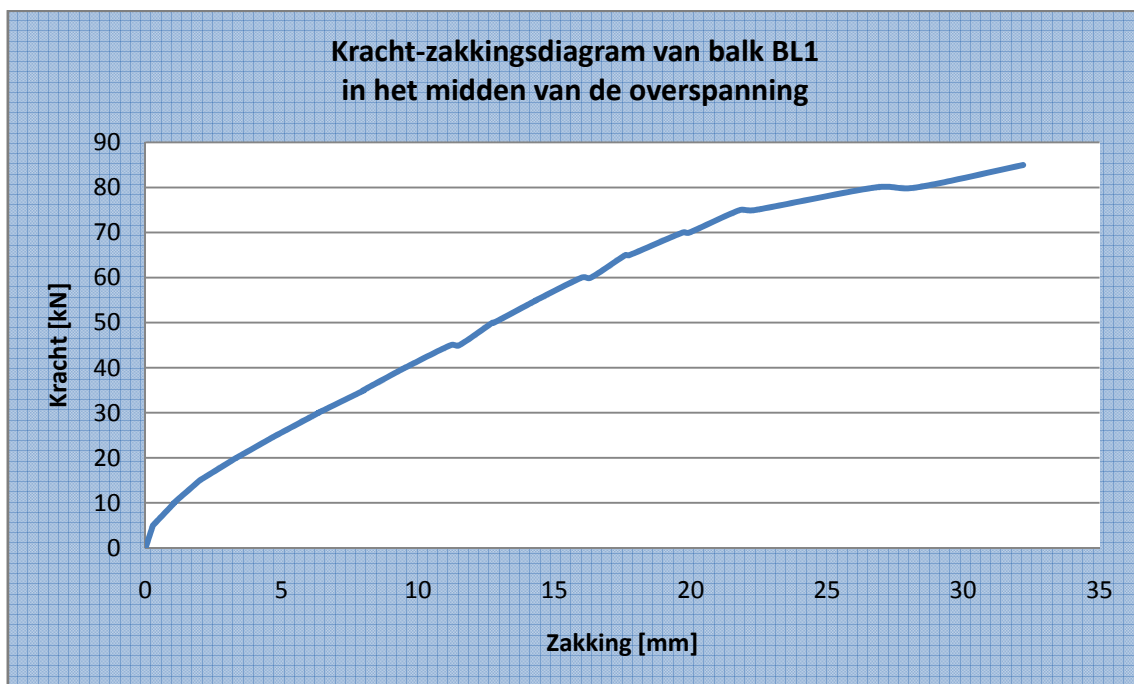


Grafiek 20: Kracht-zakkingsdiagram van balk BL1 t.h.v. de vijzels

#### Zakking in het midden van de overspanning

Grafiek 21 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting.

Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 21: Kracht-zakkingsdiagram van balk BL1 in het midden van de overspanning

**Tabel 68** toont de cijferwaarden van **Grafiek 21**.

Kracht	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging
	meetklok 1	meetklok 2	meetklok 3	meetklok 4	midden	uiteinde	
	(midden)	(midden)	(uiteinde)	(uiteinde)	[mm]	[mm]	
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,29	0,27	0,02	0,00	0,28	0,01	0,27
5	0,28	0,28	0,02	0,00	0,28	0,01	0,27
10	1,08	1,21	0,15	0,03	1,15	0,09	1,06
10	1,06	1,20	0,15	0,03	1,13	0,09	1,04
15	2,14	2,33	0,43	0,07	2,24	0,25	1,99
15	2,14	2,33	0,43	0,07	2,24	0,25	1,99
20	3,54	3,73	0,51	0,11	3,64	0,31	3,33
20	3,54	3,74	0,51	0,11	3,64	0,31	3,33
25	5,05	5,25	0,58	0,14	5,15	0,36	4,79
25	5,05	5,26	0,58	0,14	5,16	0,36	4,80
30	6,64	6,88	0,65	0,18	6,76	0,42	6,35
30	6,63	6,87	0,65	0,18	6,75	0,42	6,34
35	8,37	8,65	0,77	0,21	8,51	0,49	8,02
35	8,34	8,62	0,78	0,21	8,48	0,50	7,99
40	9,93	10,23	0,89	0,25	10,08	0,57	9,51
40	9,93	10,24	0,89	0,25	10,09	0,57	9,52
45	11,65	11,96	0,95	0,29	11,81	0,62	11,19
45	12,00	12,29	0,97	0,30	12,15	0,64	11,51
50	13,25	13,53	1,00	0,33	13,39	0,67	12,73
50	13,31	13,59	1,01	0,33	13,45	0,67	12,78
55	14,90	15,18	1,05	0,36	15,04	0,71	14,34
55	14,90	15,18	1,05	0,37	15,04	0,71	14,33
60	16,60	16,88	1,09	0,40	16,74	0,75	16,00
60	16,95	17,23	1,10	0,41	17,09	0,76	16,34
65	18,23	18,52	1,12	0,43	18,38	0,78	17,60
65	18,39	18,67	1,13	0,43	18,53	0,78	17,75
70	20,40	20,62	1,16	0,46	20,51	0,81	19,70
70	20,66	20,86	1,17	0,46	20,76	0,82	19,95
75	22,50	22,77	1,19	0,48	22,64	0,84	21,80
75	23,07	23,30	1,19	0,48	23,19	0,84	22,35
80	27,44	27,78	1,21	0,50	27,61	0,86	26,76
80	28,98	29,25	1,22	0,50	29,12	0,86	28,26
85	32,93	33,22	1,24	0,52	33,08	0,88	32,20

**Tabel 68: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram balk BL1 in het midden van de overspanning**

#### 4.3.3.2 Doorbuiging L/500 en L/250

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 30 kN en 35 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 30kN + 5 \times \frac{7,2mm - 6,35mm}{8,02mm - 6,35mm} = 32,552kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 55 kN en 60 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 55kN + 5 \times \frac{14,4mm - 14,34mm}{16,00mm - 14,34mm} = 55,196kN$$

#### 4.3.3.3 Breukkracht

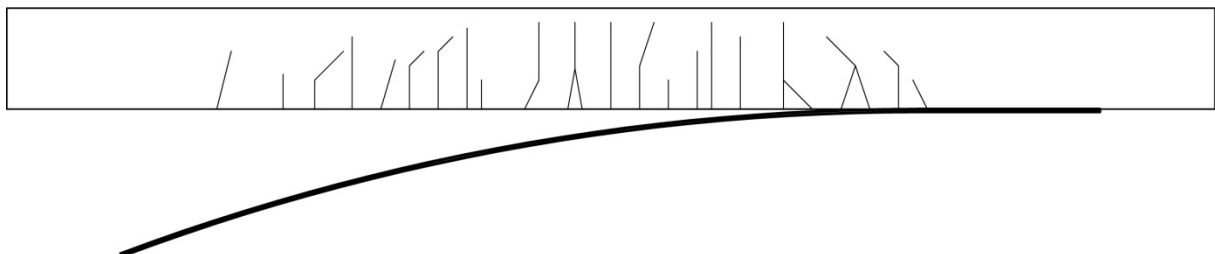
De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 86,234kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- overwegend buigingsscheuren
- vloeien van de hoofdwapening visueel niet zichtbaar
- scheuren gesloten door de externe wapening
- zeer plotse onthechting van de koolstofvezelwapening

**Figuur 33** toont een schets van de scheurvorming van balk BL1.



**Figuur 33: Schets scheurvorming balk BL1**

#### 4.3.3.4 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BL1.



Figuur 34: Peeling BL1 [1]



Figuur 35: Peeling BL1 [2]

#### 4.3.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

##### 4.3.4.1 Lasten

Tabel 69 vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 103,5 \text{ kN m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 86,2 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN m}$
		$P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN m}$
		$P = 87,2 \text{ kN}$
Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN m}$	
	$P_u = 70,0 \text{ kN}$	

Tabel 69: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BL1

#### 4.3.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 70** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

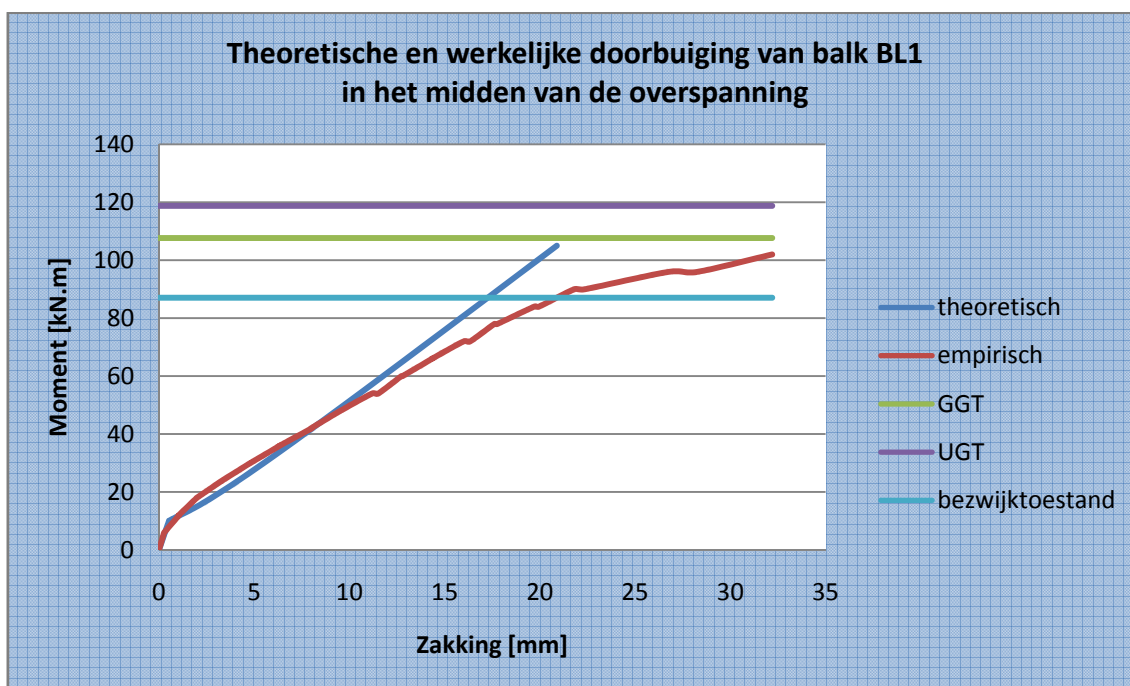
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{\max} = 86,2 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 150,5 \text{ kN}$ (beton: 100%)

**Tabel 70: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BL1**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

#### 4.3.4.3 Doorbuiging

**Grafiek 22** toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

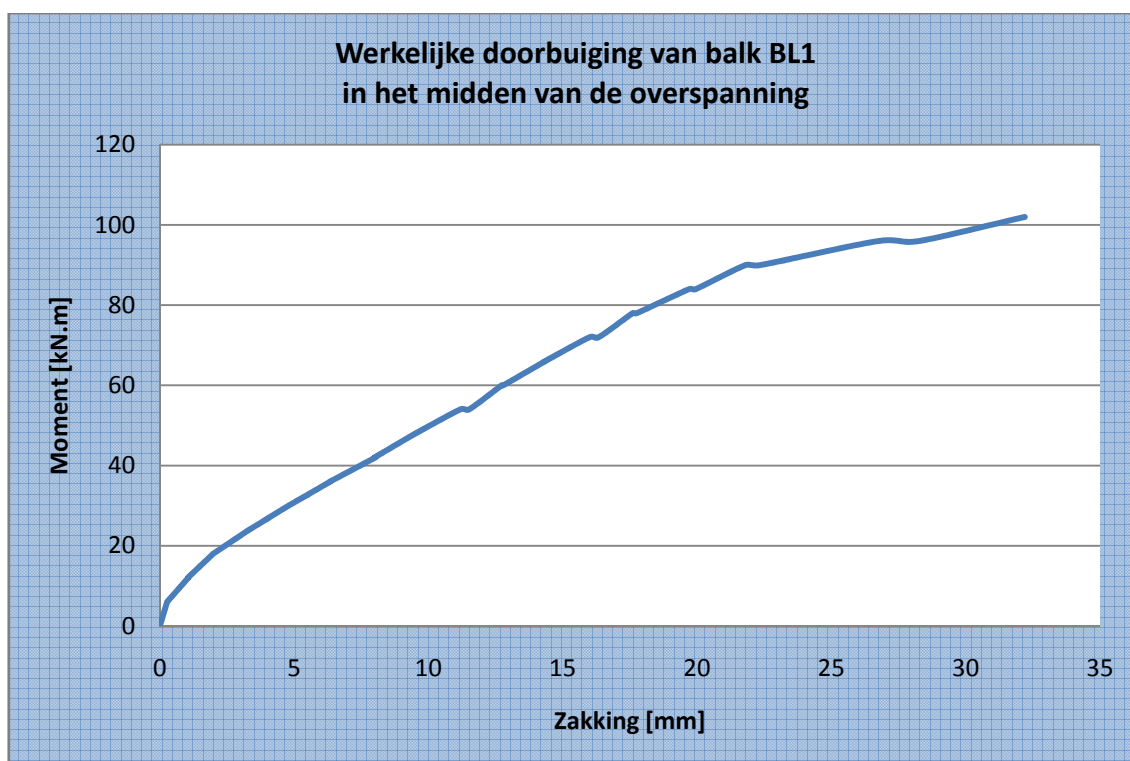


**Grafiek 22: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BL1 in het midden van de overspanning**

In de niet-gescheurde toestand vallen de grafieken aanvankelijk samen. Er wordt opgemerkt dat het theoretisch berekende scheurmoment groter is dan het empirisch waargenomen scheurmoment. In de gescheurde toestand is de theoretisch berekende doorbuiging groter dan de werkelijke doorbuiging indien het opgenomen moment kleiner is dan 42 kN m.

#### 4.3.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 23** toont de werkelijke doorbuiging van balk B1 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 23** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 6 kN m.



Grafiek 23: Werkelijke doorbuiging van balk BL1 in het midden van de overspanning

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 20 kN. Dit komt overeen met een moment van 24,0 kN m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN m.

#### 4.3.4.5 Breukmechanismen

Tabel 71 vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	76,4 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	50,2 kN m

Tabel 71: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14

Volgens CUR Aanbeveling 91 zou het eerst optredende breukmechanisme onthechting door hoge schuifspanningen zijn. Volgens FIB Bulletin 14 zou concrete rip-off het bepalende breukmechanisme zijn. In werkelijkheid trad onthechting op. Aangezien de onthechting zeer plots en zeer snel optrad, was het onmogelijk vast te stellen waar de onthechting zich eerst lokaliseerde. Er wordt aangenomen dat de onthechting begon in het midden van de overspanning, zoals ook door CUR Aanbeveling 91 wordt voorspeld.



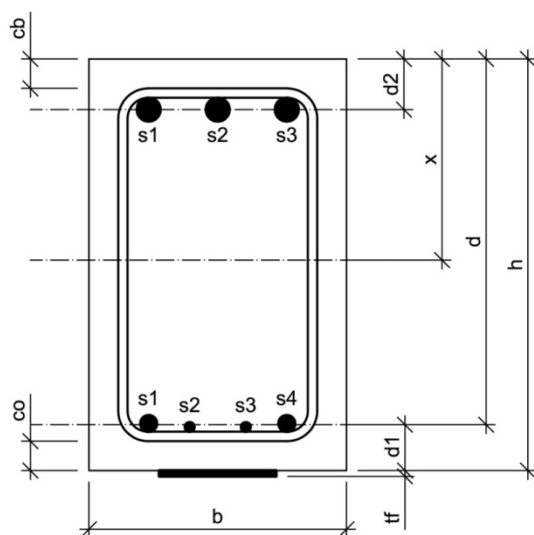
## 4.4 Balk BLA1.1

### 4.4.1 Algemeen

Balk BLA1.1 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening. Aan beide zijden is deze balk bijkomend verankerd met 7 mechanische M6 ankers. Deze ankers hebben een lengte van 65 mm en worden voorgespannen met een moment van 5 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA1.1.

<b>Ouderdom</b>	358 dagen	
<b>Lengte</b>	4,210 m	
<b>Breedte</b>	0,220 m	
<b>Hoogte</b>	0,350 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

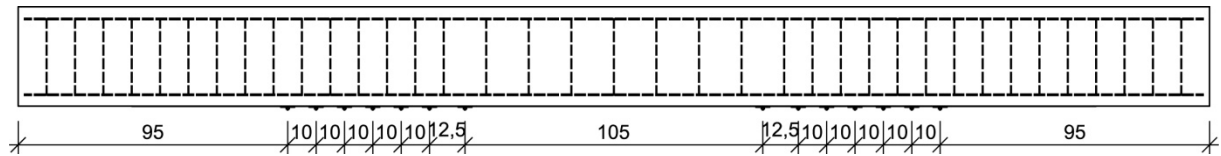
Tabel 72: Opbouw en dimensionering van balk BLA1.1



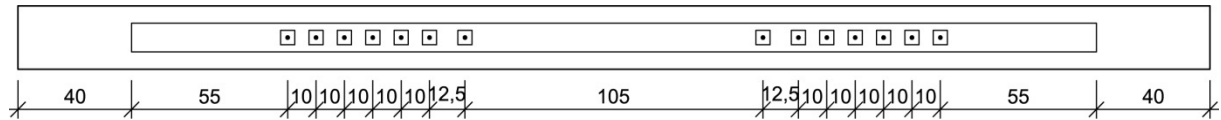
$$h = 350 \text{ mm}$$

$$b = 220 \text{ mm}$$

Figuur 36: Dwarsdoorsnede balk BLA1.1



**Figuur 37: Vooraanzicht verankering balk BLA1.1**



**Figuur 38: Onderaanzicht verankering balk BLA1.1**

Er dient wel opgemerkt te worden dat het bovenzvlak van deze balk zeer oneffen afgewerkt was. Zo bedroeg de totale hoogte van de balk t.h.v. de linkervijzel maar liefst 371 mm.

#### 4.4.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{cx}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 32,974 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 39,750 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal werd reeds in het academiejaar 2006-2007 afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA1.1 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden in het academiejaar 2006-2007 experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi14} = 567,723 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi8} = 584,745 \frac{N}{mm^2}$$

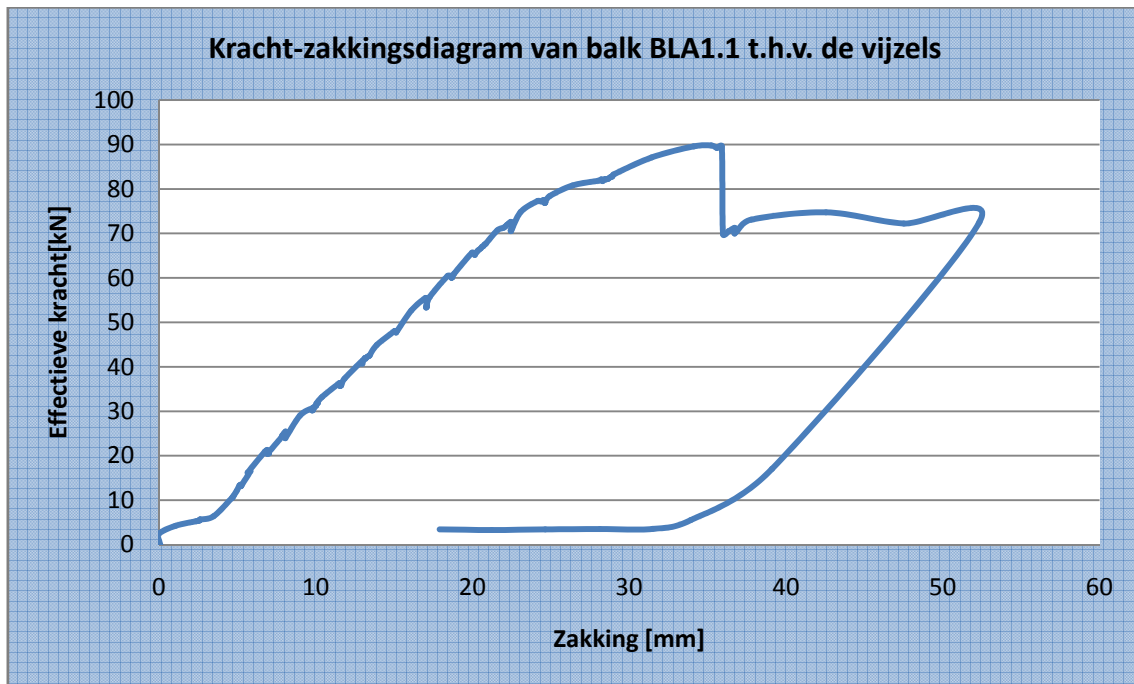
De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 567,723 + 101 \times 584,745}{308 + 101} = 571,926 \frac{N}{mm^2}$$

### 4.4.3 Meetresultaten

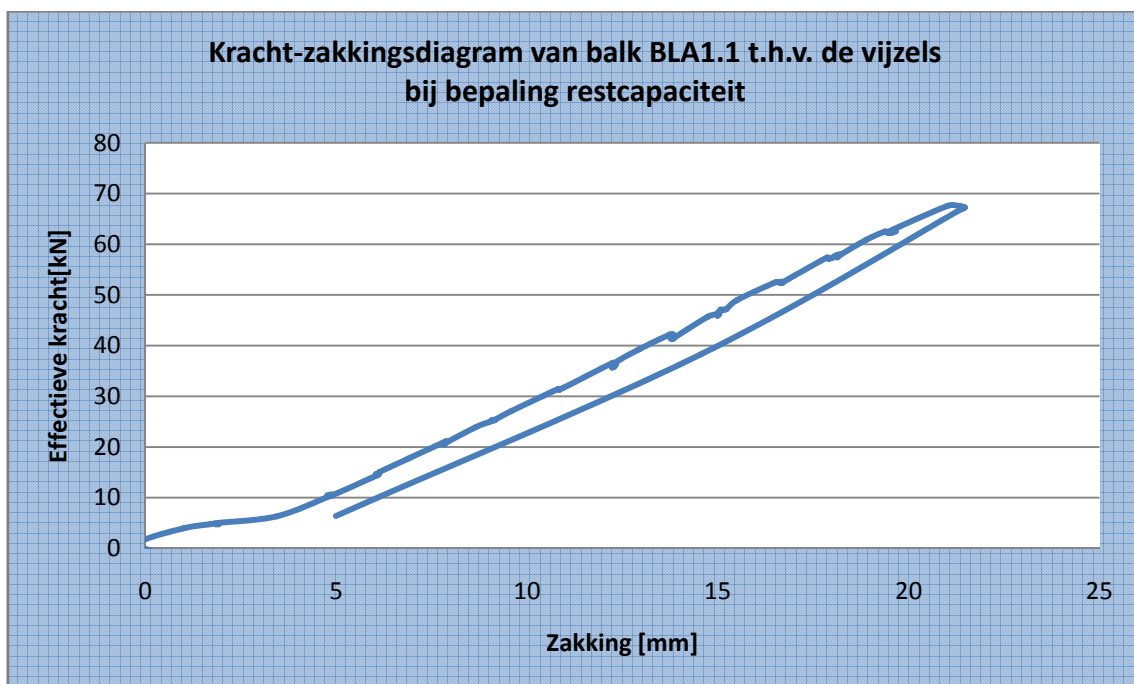
#### 4.4.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

Grafiek 24 toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



Grafiek 24: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.1 t.h.v. de vijzels

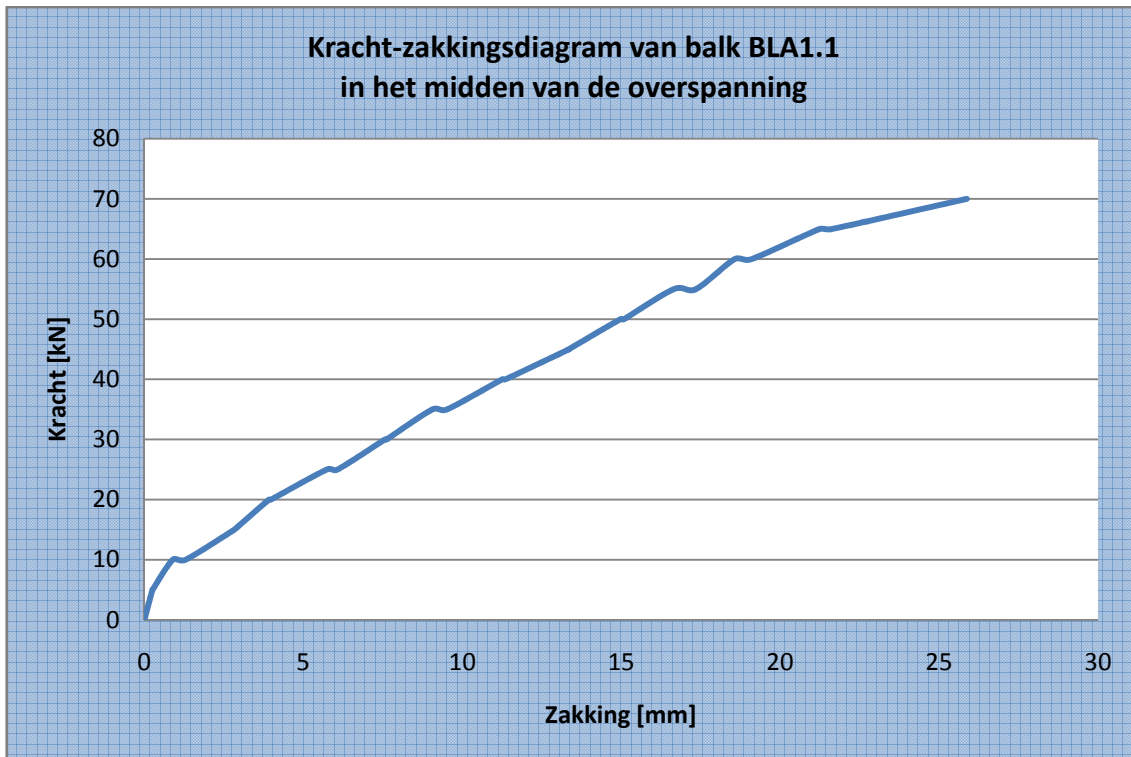
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.



Grafiek 25: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.1 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit

#### 4.4.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

**Grafiek 26** toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 26: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.1 in het midden van de overspanning

**Tabel 73** toont de cijferwaarden van **Grafiek 26**.

Kracht [kN]	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging [mm]
	meetklok 1 (midden)	meetklok 2 (midden)	meetklok 3 (uiteinde)	meetklok 4 (uiteinde)	midden	uiteinde	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,39	0,35	0,23	0,01	0,37	0,12	0,25
5	0,40	0,37	0,25	0,01	0,39	0,13	0,26
10	1,30	1,28	0,76	0,04	1,29	0,40	0,89
10	1,75	1,74	0,84	0,06	1,75	0,45	1,30
15	3,41	3,39	1,02	0,12	3,40	0,57	2,83
15	3,41	3,39	1,02	0,12	3,40	0,57	2,83
20	4,55	4,54	1,10	0,15	4,55	0,63	3,92
20	4,61	4,60	1,10	0,15	4,61	0,63	3,98
25	6,43	6,44	1,20	0,20	6,44	0,70	5,74
25	6,78	6,79	1,22	0,20	6,79	0,71	6,08
30	8,32	8,32	1,27	0,24	8,32	0,76	7,57
30	8,37	8,38	1,28	0,24	8,38	0,76	7,62
35	9,87	9,87	1,34	0,28	9,87	0,81	9,06
35	10,34	10,34	1,36	0,28	10,34	0,82	9,52
40	12,11	12,13	1,41	0,32	12,12	0,87	11,26
40	12,22	12,24	1,43	0,32	12,23	0,88	11,36
45	14,29	14,29	1,49	0,37	14,29	0,93	13,36
45	14,29	14,29	1,50	0,38	14,29	0,94	13,35
50	15,96	15,95	1,55	0,41	15,96	0,98	14,98
50	16,08	16,06	1,55	0,42	16,07	0,99	15,09
55	17,68	17,66	1,59	0,44	17,67	1,02	16,66
55	18,38	18,38	1,60	0,46	18,38	1,03	17,35
60	19,62	19,61	1,62	0,47	19,62	1,05	18,57
60	20,17	20,15	1,63	0,48	20,16	1,06	19,11
65	22,33	22,31	1,66	0,49	22,32	1,08	21,25
65	22,72	22,69	1,66	0,50	22,71	1,08	21,63
70	26,96	27,00	1,69	0,52	26,98	1,11	25,88

**Tabel 73: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.1 in het midden van de overspanning****4.4.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250**

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 25 kN en 30 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 25kN + 5 \times \frac{7,2mm - 5,74mm}{7,57mm - 5,74mm} = 29,003kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 45 kN en 50 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 45kN + 5 \times \frac{14,4mm - 13,36mm}{14,98mm - 13,36mm} = 48,220kN$$

#### 4.4.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 89,796kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- overwegend buigingsscheuren
- breuk van het meest linkse anker
- onthechting in het midden en aan het linkeruiteinde

Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

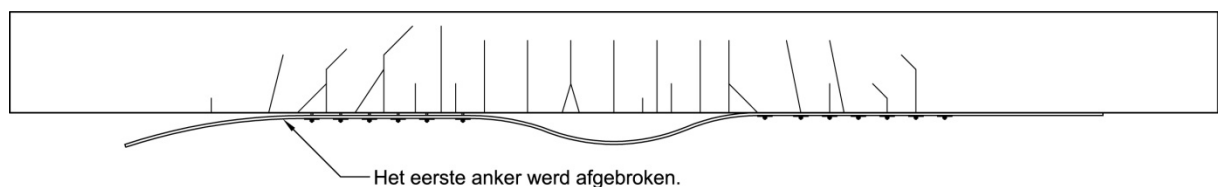
$$F_{rest, \max} = 67,569kN$$

Er wordt opgemerkt dat deze restcapaciteit niet veel meer is dan de breukkracht van balk B1.

De volgende verschijnselen m.b.t. de restcapaciteit werden visueel waargenomen.

- geen inscheuren door ankers in de koolstofvezelwapening

**Figuur 39** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA1.1.



**Figuur 39: Schets scheurvorming balk BLA1.1**

#### 4.4.3.5 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BLA1.1.



**Figuur 40: Scheurvorming balk BLA1.1**



**Figuur 41: Brosse breuk van een anker**



**Figuur 42: Onthechting aan het linkeruiteinde**



**Figuur 43: Onthechting t.h.v. de linkerankers**



#### 4.4.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

##### 4.4.4.1 Lasten

**Tabel 74** vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 107,8 \text{ kN m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 89,8 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN m}$ $P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN m}$ $P = 87,2 \text{ kN}$
	Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN m}$
		$P_u = 70,0 \text{ kN}$

**Tabel 74: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA1.1**

##### 4.4.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 75** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

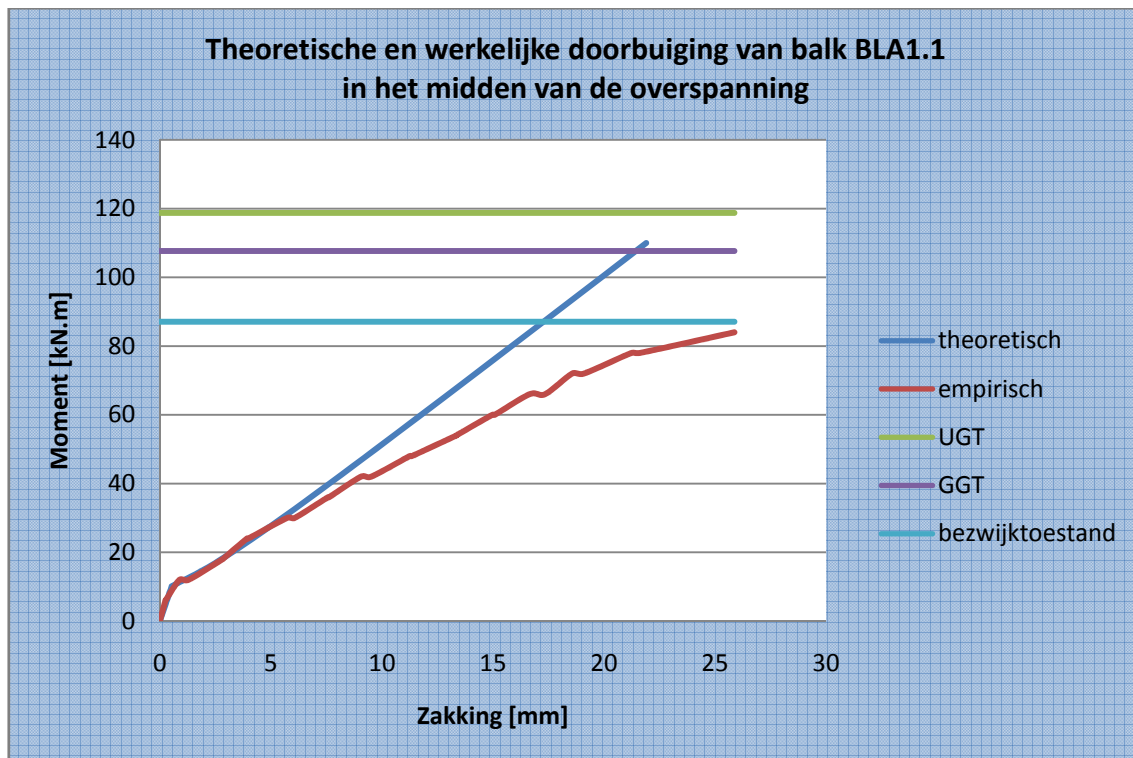
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{\max} = 89,8 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 150,5 \text{ kN}$ (beton: 100%)

**Tabel 75: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA1.1**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

#### 4.4.4.3 Doorbuiging

**Grafiek 27** toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

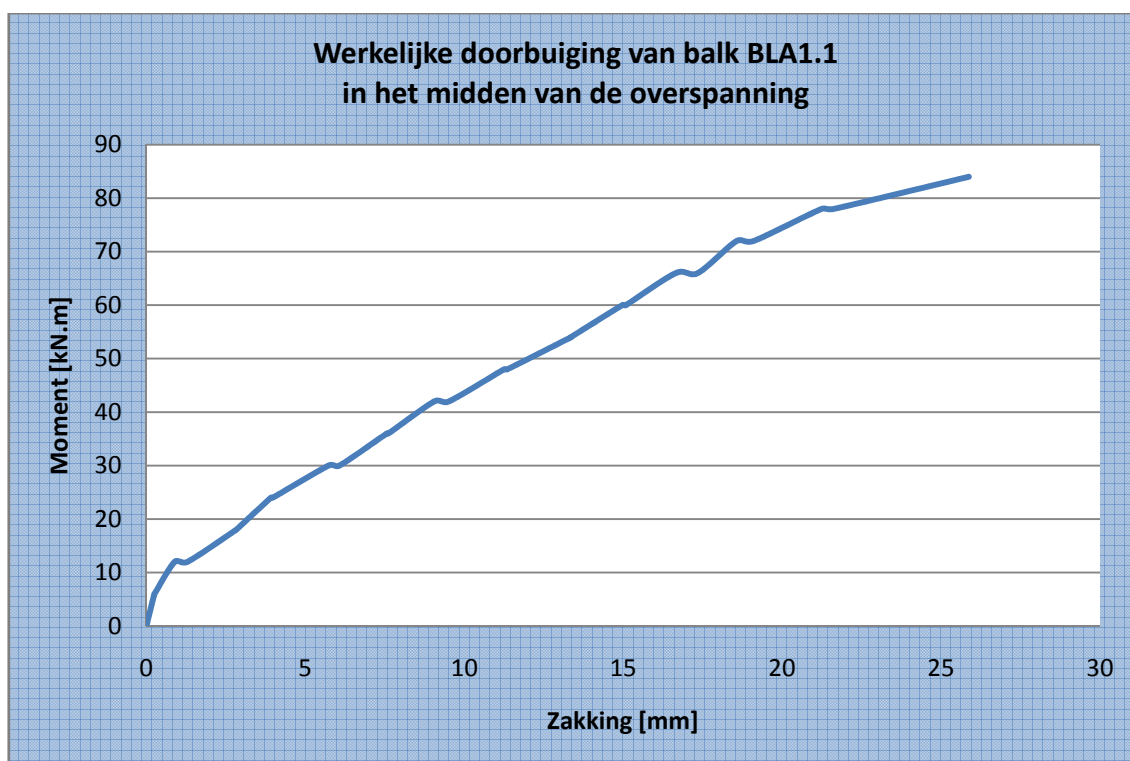


**Grafiek 27:** Theoretische en werkelijk doorbuiging van balk BLA1.1 in het midden van de overspanning

In de niet-gescheurde toestand vallen de grafieken samen. Het theoretisch berekende scheurmoment en het empirisch bepaalde scheurmoment zijn aan elkaar gelijk. In de gescheurde toestand is de werkelijke doorbuiging groter dan de theoretisch berekende doorbuiging indien het opgenomen moment groter is dan 30 kN m.

#### 4.4.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 28** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA1.1 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 28** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 12 kN m.



**Grafiek 28: Werkelijke doorbuiging van balk BLA1.1 in het midden van de overspanning**

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 15 kN. Dit komt overeen met een moment van 18,0 kN m. Het theoretisch berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN m.

#### 4.4.4.5 Breukmechanismen

**Tabel 76** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	76,4 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	50,2 kN m

**Tabel 76: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Volgens CUR Aanbeveling 91 zou het eerst optredende breukmechanisme onthechting door hoge schuifspanningen zijn. Volgens FIB Bulletin 14 zou concrete rip-off het bepalende breukmechanisme zijn. In werkelijkheid trad onthechting op. Bijgevolg is men geneigd de stelling van CUR Aanbeveling 91, namelijk dat onthechting startte in het midden van de overspanning, als waar aan te nemen, hoewel dit visueel niet waarneembaar was door de zeer plotse en zeer snelle onthechting.

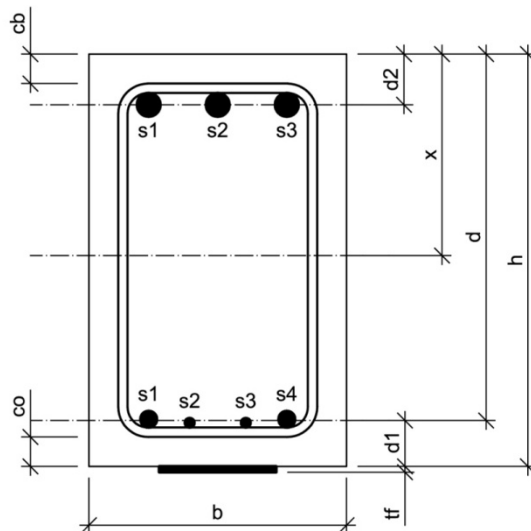
## 4.5 Balk BLA1.2

### 4.5.1 Algemeen

Balk BLA1.2 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening. Aangezien het vermoeden bestond dat de metingen tijdens de vierpuntsbuigproef op balk balk BLA1.1 niet correct verliepen, werd besloten dezelfde configuratie als van balk BLA1.1 te nemen. Bijgevolg is deze balk aan beide zijden bijkomend verankerd met 7 mechanische M6 ankers. Deze ankers hebben een lengte van 65 mm en worden voorgespannen met een moment van 5 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA1.2.

<b>Ouderdom</b>	365 dagen
<b>Lengte</b>	4,215 m
<b>Breedte</b>	0,221 m
<b>Hoogte</b>	0,347 m
<b>Wapening</b>	Onderwapening 2x $\phi 14$ +2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening 3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels 7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

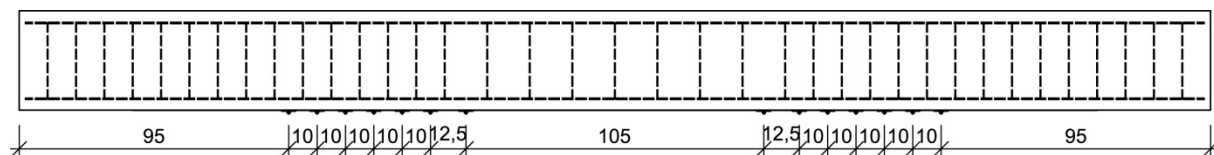
Tabel 77: Opbouw en dimensionering van balk BLA1.2



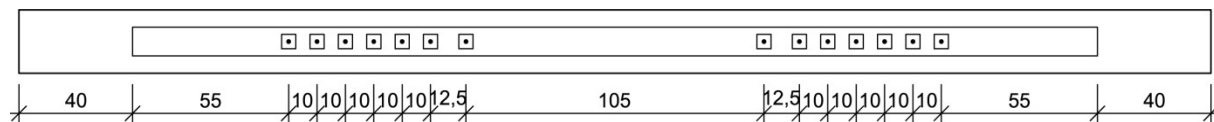
$$h = 347 \text{ mm}$$

$$b = 221 \text{ mm}$$

Figuur 44: Dwarsdoorsnede balk BLA1.2



**Figuur 45: Vooraanzicht verankering BLA1.2**



**Figuur 46: Onderaanzicht verankering balk BLA1.2**

#### 4.5.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{cx}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 27,028 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 32,642 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal werd reeds in het academiejaar 2006-2007 afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA1.2 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden in het academiejaar 2006-2007 experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi14} = 567,723 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi8} = 584,745 \frac{N}{mm^2}$$

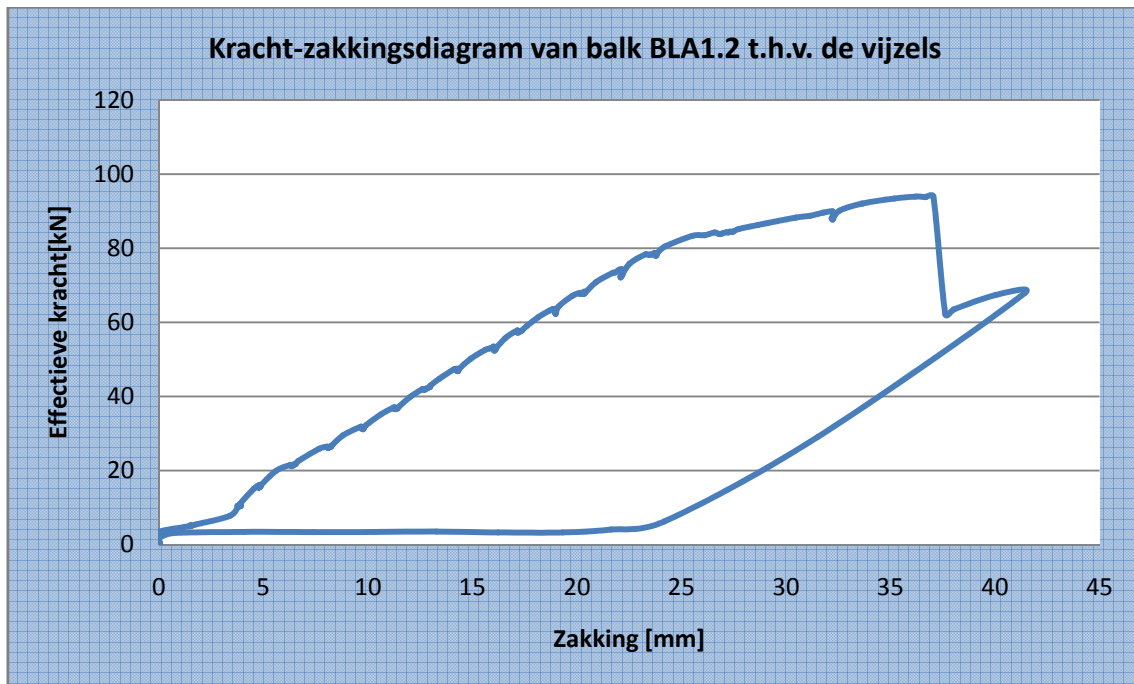
De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 567,723 + 101 \times 584,745}{308 + 101} = 571,926 \frac{N}{mm^2}$$

### 4.5.3 Meetresultaten

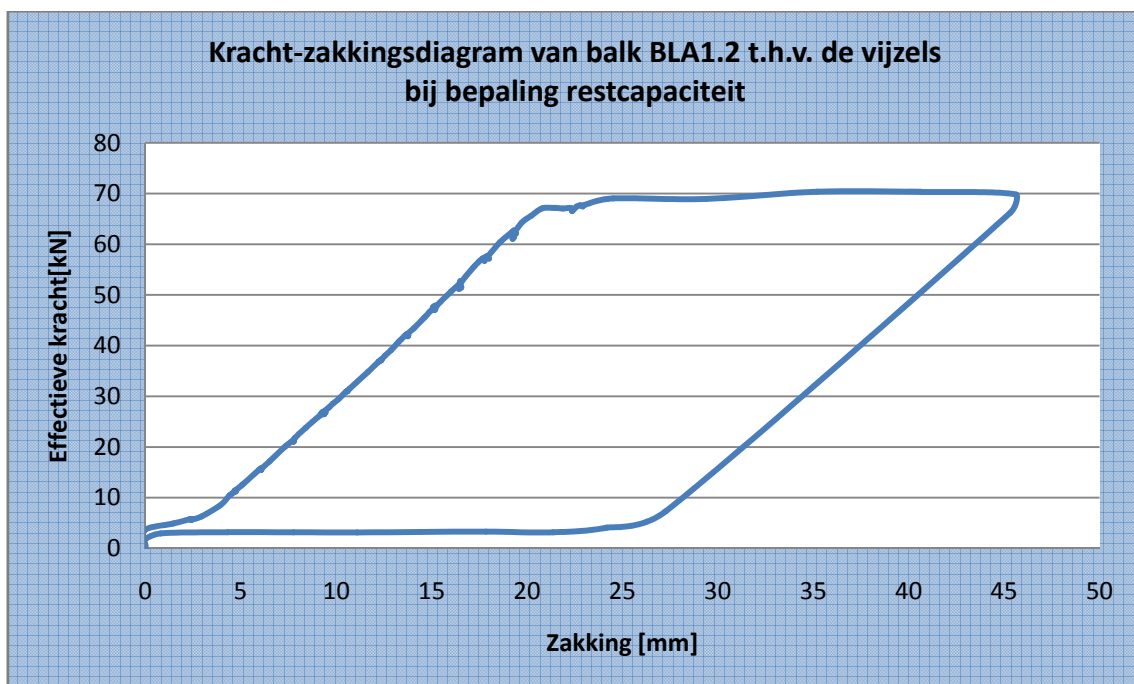
#### 4.5.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

Grafiek 29 toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



Grafiek 29: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.2 t.h.v. de vijzels

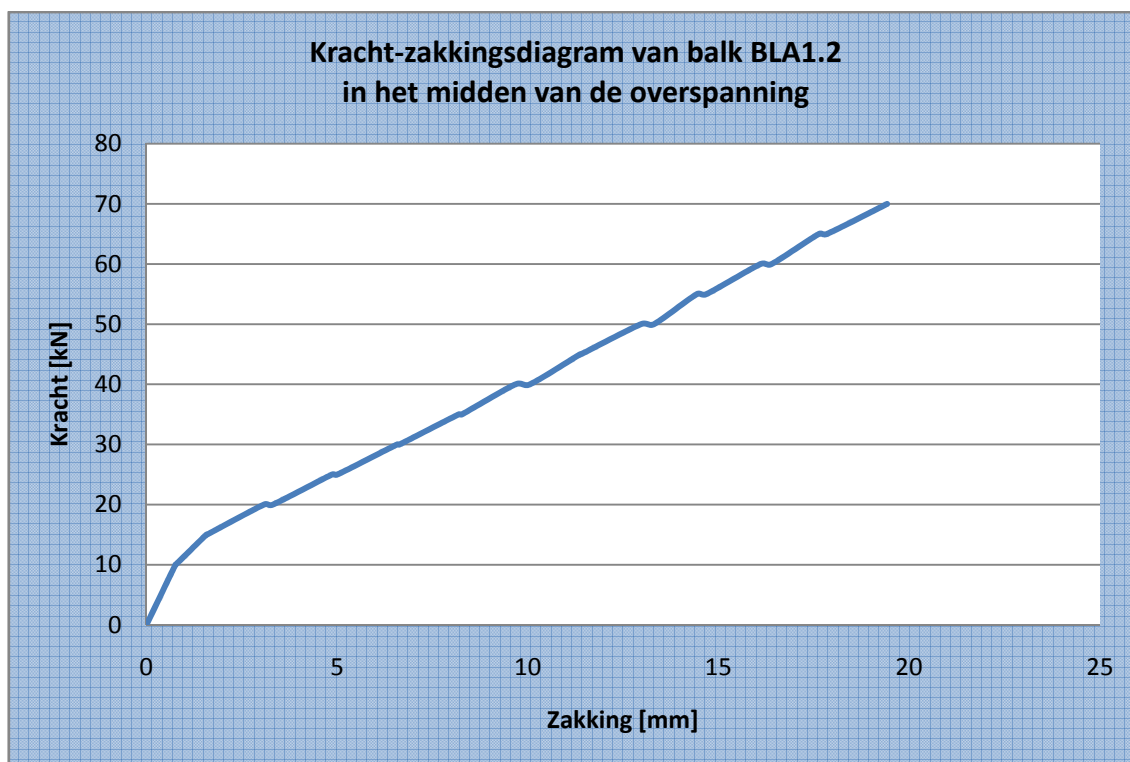
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.



Grafiek 30: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.2 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit

#### 4.5.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

**Grafiek 31** toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



**Grafiek 31:** Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.2 in het midden van de overspanning

**Tabel 78** toont de cijferwaarden van **Grafiek 31**.

Kracht	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging
	meetklok 1 (midden)	meetklok 2 (midden)	meetklok 3 (uiteinde)	meetklok 4 (uiteinde)	midden	uiteinde	
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
10	0,88	0,81	0,13	0,04	0,85	0,09	0,76
10	0,88	0,82	0,13	0,04	0,85	0,09	0,77
15	1,77	1,68	0,22	0,09	1,73	0,16	1,57
15	1,78	1,7	0,22	0,09	1,74	0,16	1,59
20	3,33	3,25	0,29	0,13	3,29	0,21	3,08
20	3,57	3,49	0,3	0,13	3,53	0,22	3,32
25	5,16	5,08	0,34	0,17	5,12	0,26	4,87
25	5,3	5,22	0,34	0,17	5,26	0,26	5,01
30	6,9	6,84	0,38	0,22	6,87	0,30	6,57
30	6,97	6,91	0,39	0,22	6,94	0,31	6,64
35	8,55	8,5	0,42	0,26	8,53	0,34	8,19
35	8,64	8,59	0,42	0,27	8,62	0,35	8,27
40	10,08	10,03	0,46	0,3	10,06	0,38	9,68



40	10,48	10,42	0,47	0,32	10,45	0,40	10,06
45	11,82	11,76	0,5	0,34	11,79	0,42	11,37
45	11,85	11,79	0,5	0,35	11,82	0,43	11,40
50	13,44	13,39	0,52	0,38	13,42	0,45	12,97
50	13,8	13,73	0,53	0,39	13,77	0,46	13,31
55	14,97	14,87	0,56	0,42	14,92	0,49	14,43
55	15,22	15,12	0,56	0,42	15,17	0,49	14,68
60	16,67	16,57	0,59	0,45	16,62	0,52	16,10
60	16,98	16,86	0,6	0,46	16,92	0,53	16,39
65	18,24	18,12	0,62	0,48	18,18	0,55	17,63
65	18,46	18,33	0,63	0,48	18,40	0,56	17,84
70	20,14	19,85	0,65	0,5	20,00	0,58	19,42

Tabel 78: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.2 in het midden van de overspanning

#### 4.5.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 30 kN en 35 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 30kN + 5 \times \frac{7,2mm - 6,57mm}{8,19mm - 6,57mm} = 31,950kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 50 kN en 55 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 50kN + 5 \times \frac{14,4mm - 12,97mm}{14,43mm - 12,97mm} = 54,898kN$$

#### 4.5.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 93,954kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- overwegend buigingsscheuren
- verbrijzeling van het beton in de drukzone t.h.v. de linkervijzel
- zeer plotse onthechting in het midden en aan het linkeruiteinde
- breuk van de koolstofvezelwapening aan het linkeruiteinde
- geen inscheuringen in de koolstofvezelwapening door de ankers
- linkerankers gedeeltelijk uit het beton getrokken

De ankers lijken te helpen tegen onthechting. Dit is waarschijnlijk te wijten aan de ankers die het meest in het midden gelegen zijn, indien men uitgaat van onthechting in het midden.

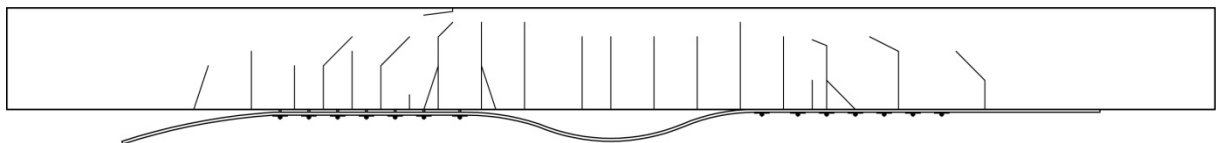
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

$$F_{rest,max} = 70,359kN$$

De volgende waarnemingen m.b.t. de restcapaciteit werden visueel geregistreerd.

- inscheuringen in de koolstofvezelwapening t.h.v. de 4 meest linkse ankers.

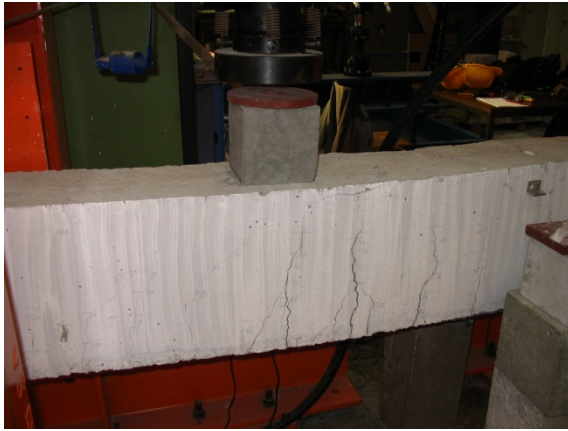
**Figuur 47** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA1.2.



**Figuur 47: Schets scheurvorming BLA1.2**

#### 4.5.3.5 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BLA1.2.



Figuur 48: Scheurvorming linkerkant balk BLA1.2



Figuur 49: Scheurvorming rechterkant balk BLA1.2



Figuur 50: Verbrijzeling van het beton



Figuur 51: Breuk aan het linkeruiteinde



Figuur 52: Linkerankers gedeeltelijk uit het beton getrokken



Figuur 53: Onthechting t.h.v. het midden [1]



Figuur 54: Onthechting t.h.v. het midden [2]



Figuur 55: Ingescheurd anker

#### 4.5.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

##### 4.5.4.1 Lasten

Tabel 79 vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 112,8 \text{ kN m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 94,0 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN m}$ $P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN m}$ $P = 87,2 \text{ kN}$
	Bezwijkttoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN m}$
		$P_u = 70,0 \text{ kN}$

Tabel 79: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA1.2

##### 4.5.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

Tabel 80 vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

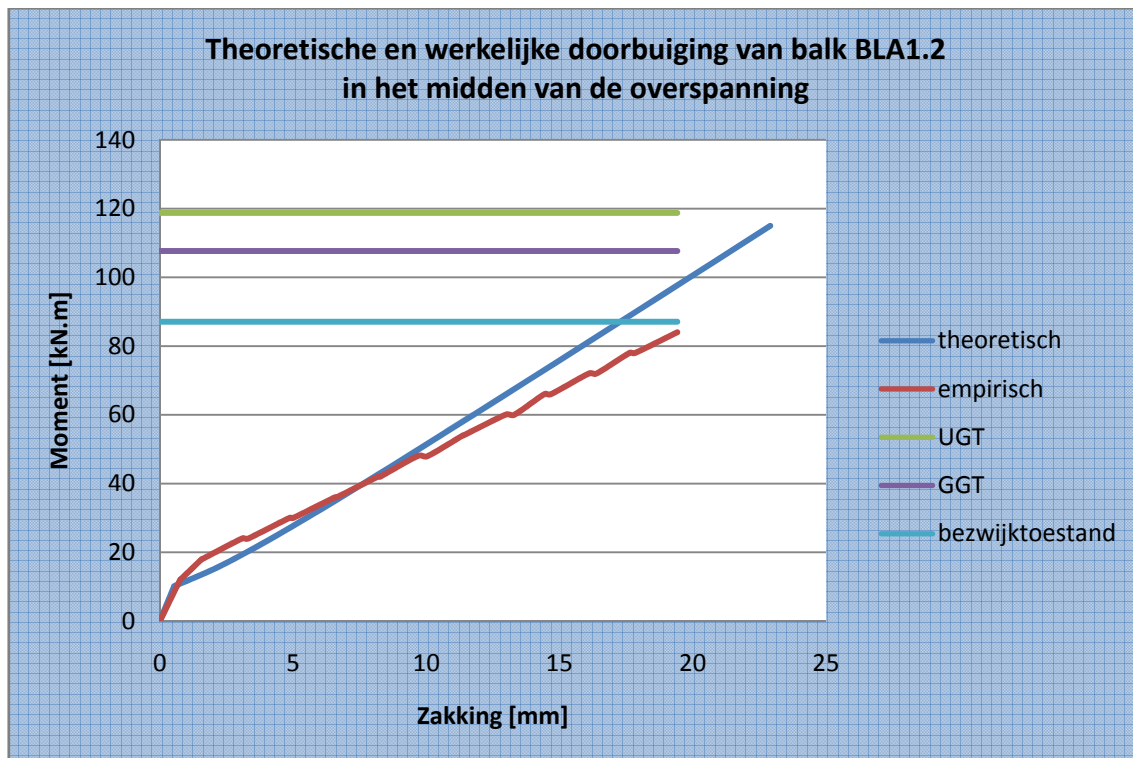
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{\max} = 94,0 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 150,5 \text{ kN}$ (beton: 100%)

Tabel 80: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA1.2

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

#### 4.5.4.3 Doorbuiging

**Grafiek 32** toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

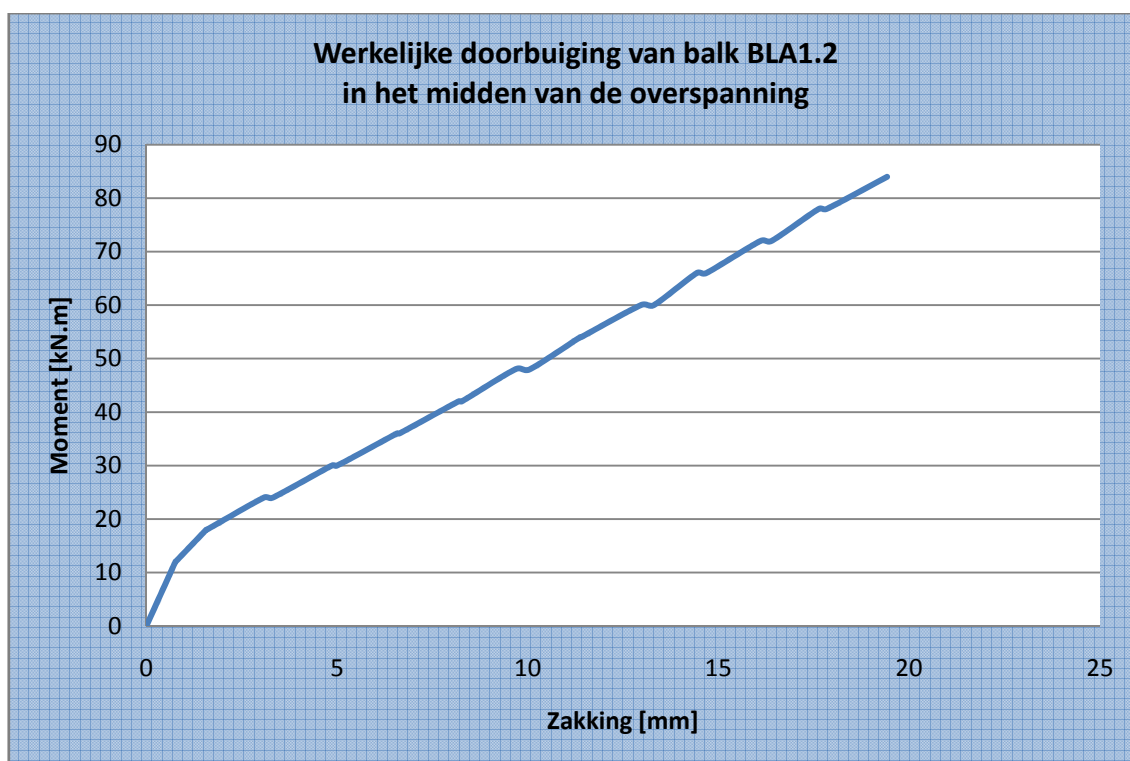


**Grafiek 32:** Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA1.2 in het midden van de overspanning

In de niet-gescheurde toestand vallen de grafieken aanvankelijk samen. Het theoretisch berekende scheurmoment is net iets kleiner dan het empirisch bepaalde scheurmoment. In de gescheurde toestand is de werkelijke doorbuiging groter dan de theoretisch berekende doorbuiging indien het opgenomen moment groter is dan 36 kN m.

#### 4.5.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 33** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA1.2 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 33** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 12 kN m.



**Grafiek 33: Werkelijke doorbuiging van balk BLA1.2 in het midden van de overspanning**

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 20 kN. Dit komt overeen met een moment van 24,0 kN m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN m.

#### 4.5.4.5 Breukmechanismen

**Tabel 81** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	76,4 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	50,2 kN m

**Tabel 81: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Volgens CUR Aanbeveling 91 zou het eerst optredende breukmechanisme onthechting door hoge schuifspanningen zijn. Volgens FIB Bulletin 14 zou concrete rip-off het bepalende breukmechanisme zijn. In werkelijkheid trad onthechting op, waardoor het lijkt dat CUR Aanbeveling 91 de breukmechanismen meer correct kan voorspellen.

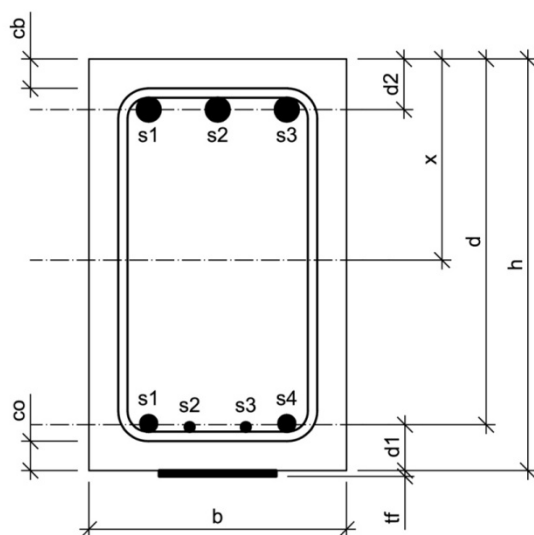
## 4.6 Balk BLA1.3

### 4.6.1 Algemeen

Balk BLA1.3 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening. Aan beide zijden is deze balk bijkomend verankerd met 4 mechanische M6 ankers. Deze ankers hebben een lengte van 65 mm en worden voorgespannen met een moment van 5 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA1.3.

<b>Ouderdom</b>	372 dagen	
<b>Lengte</b>	4,195 m	
<b>Breedte</b>	0,220 m	
<b>Hoogte</b>	0,339 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

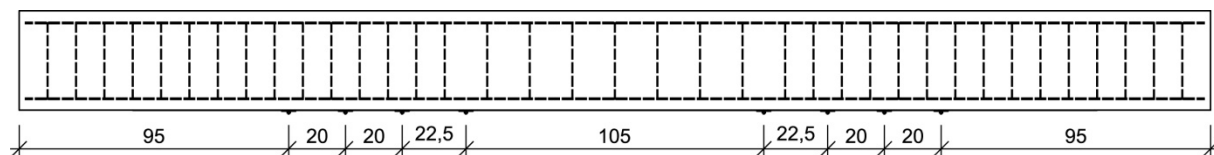
Tabel 82: Opbouw en dimensionering van balk BLA1.3



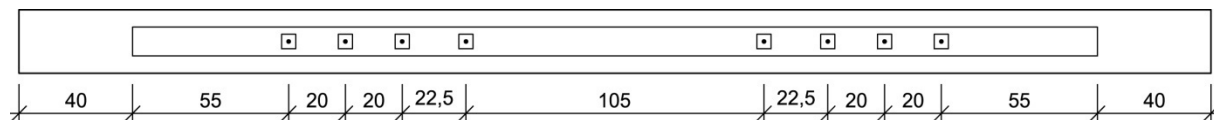
$$h = 339 \text{ mm}$$

$$b = 220 \text{ mm}$$

Figuur 56: Dwarsdoorsnede balk BLA1.3



**Figuur 57: Vooraanzicht verankering balk BLA1.3**



**Figuur 58: Onderaanzicht verankering balk BLA1.3**



#### 4.6.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{ck}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{ck} = 34,090 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,k} = 41,095 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal werd reeds in het academiejaar 2006-2007 afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA1.3 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden in het academiejaar 2006-2007 experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi14} = 567,723 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi8} = 584,745 \frac{N}{mm^2}$$

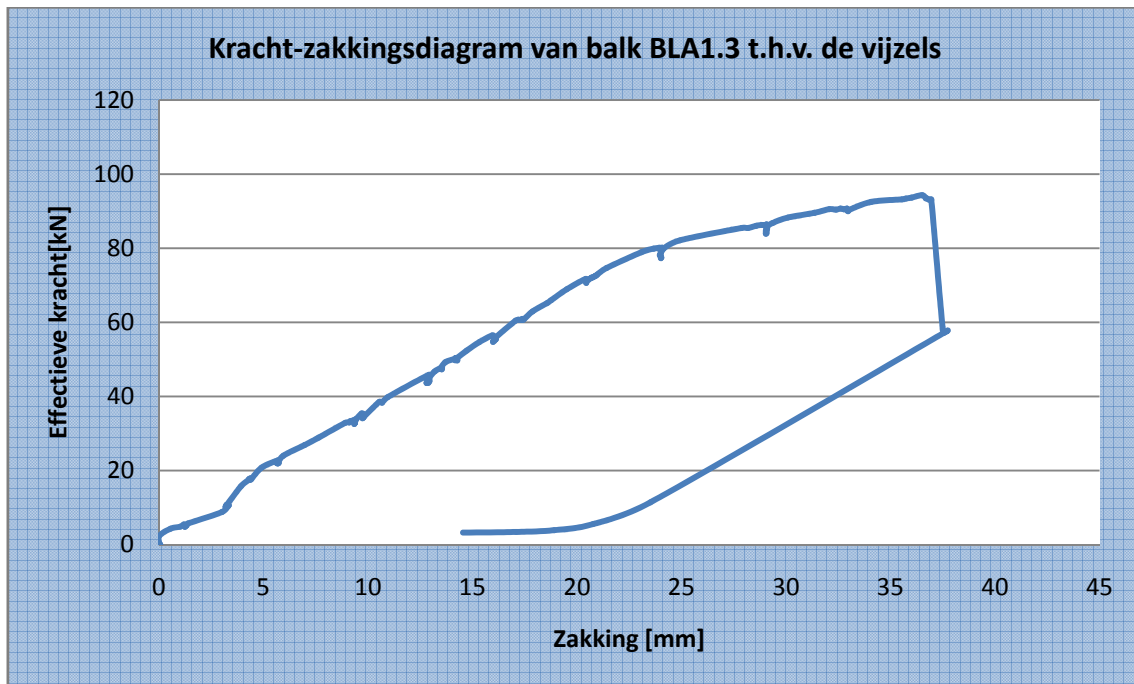
De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 567,723 + 101 \times 584,745}{308 + 101} = 571,926 \frac{N}{mm^2}$$

### 4.6.3 Meetresultaten

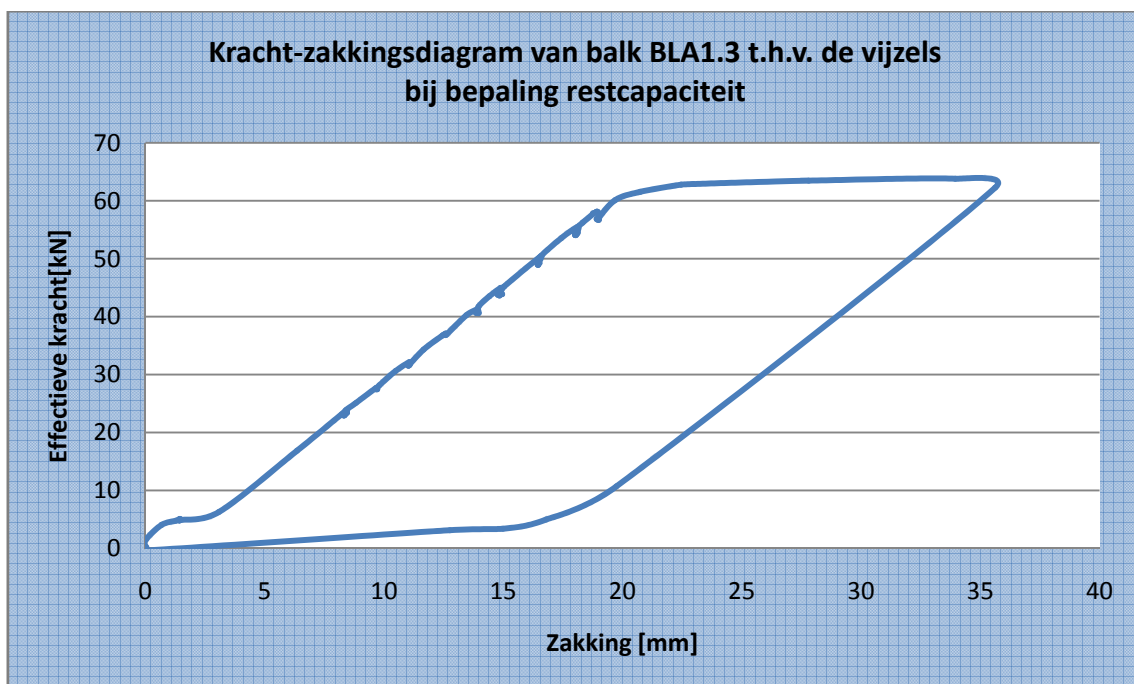
#### 4.6.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

Grafiek 34 toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



Grafiek 34: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.3 t.h.v. de vijzels

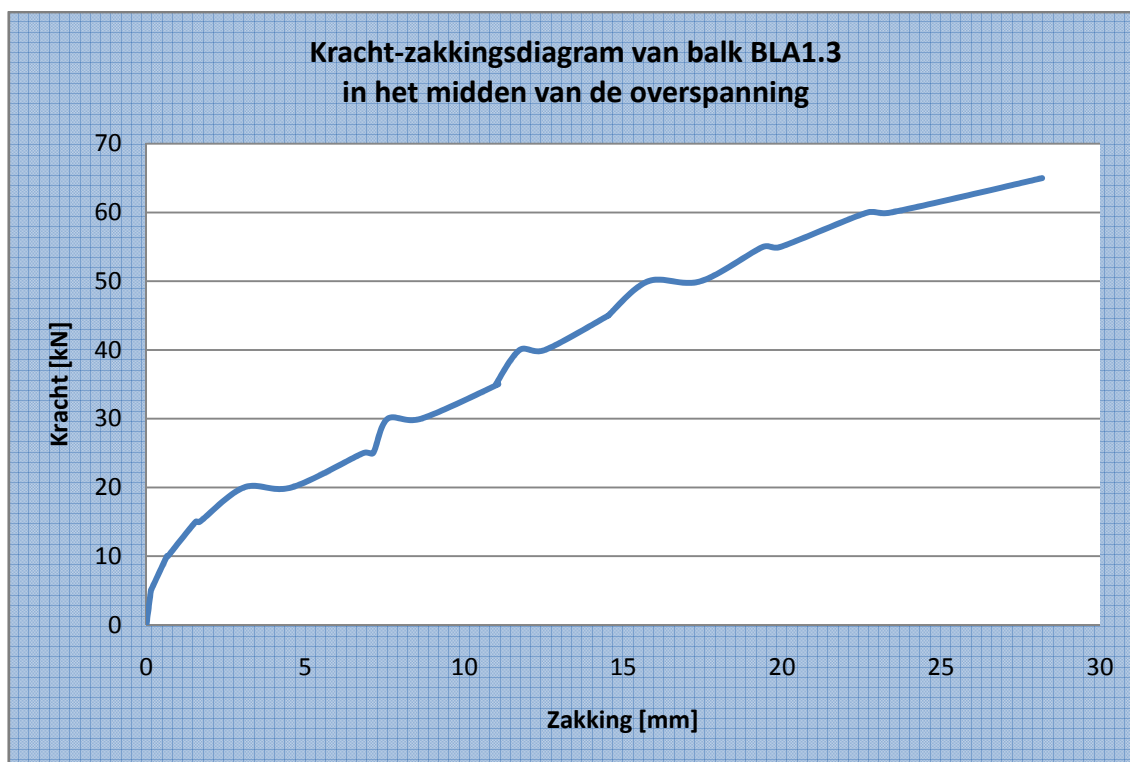
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.



Grafiek 35: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.3 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit

#### 4.6.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

**Grafiek 36** toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



**Grafiek 36:** Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.3 in het midden van de overspanning

**Tabel 83** toont de cijferwaarden van **Grafiek 36**.

Kracht	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging
	meetklok 1 (midden)	meetklok 2 (midden)	meetklok 3 (uiteinde)	meetklok 4 (uiteinde)	midden	uiteinde	
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,11	0,19	0,01	0,01	0,15	0,01	0,14
5	0,12	0,18	0,01	0,01	0,15	0,01	0,14
10	0,66	0,75	0,07	0,05	0,71	0,06	0,65
10	0,69	0,78	0,07	0,05	0,74	0,06	0,68
15	1,59	1,72	0,10	0,11	1,66	0,11	1,55
15	1,71	1,85	0,10	0,11	1,78	0,11	1,68
20	3,12	3,31	0,13	0,16	3,22	0,15	3,07
20	4,60	4,85	0,14	0,19	4,73	0,17	4,56
25	6,90	7,16	0,17	0,24	7,03	0,21	6,83
25	7,22	7,46	0,17	0,25	7,34	0,21	7,13
30	7,70	7,93	0,18	0,27	7,82	0,23	7,59
30	8,77	8,99	0,19	0,29	8,88	0,24	8,64
35	11,25	11,43	0,21	0,34	11,34	0,28	11,07

35	11,18	11,36	0,21	0,34	11,27	0,28	11,00
40	11,95	12,11	0,22	0,36	12,03	0,29	11,74
40	12,77	12,91	0,23	0,38	12,84	0,31	12,54
45	14,81	14,92	0,25	0,42	14,87	0,34	14,53
45	14,81	14,91	0,25	0,42	14,86	0,34	14,53
50	16,10	16,18	0,27	0,44	16,14	0,36	15,79
50	17,78	17,84	0,29	0,47	17,81	0,38	17,43
55	19,79	19,80	0,31	0,49	19,80	0,40	19,40
55	20,35	20,36	0,32	0,50	20,36	0,41	19,95
60	23,13	23,11	0,35	0,53	23,12	0,44	22,68
60	23,88	23,84	0,36	0,53	23,86	0,45	23,42
65	28,69	28,62	0,40	0,55	28,66	0,48	28,18

Tabel 83: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA1.3 in het midden van de overspanning

#### 4.6.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 25 kN en 30 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 25kN + 5 \times \frac{7,2mm - 6,83mm}{7,59mm - 6,83mm} = 27,451kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 40 kN en 45 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 40kN + 5 \times \frac{14,4mm - 11,74mm}{14,53mm - 11,74mm} = 44,767kN$$

#### 4.6.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 94,338kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- buigings- en dwarskrachtenscheuren
- onthechting in het midden en aan het linkereinde
- brosse breuk van het derde anker
- linkerankers gedeeltelijk uit het beton getrokken

Uit de breuk van een anker zou men kunnen afleiden dat de ankers onderworpen worden aan een combinatie van trek en afschuiving.

Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

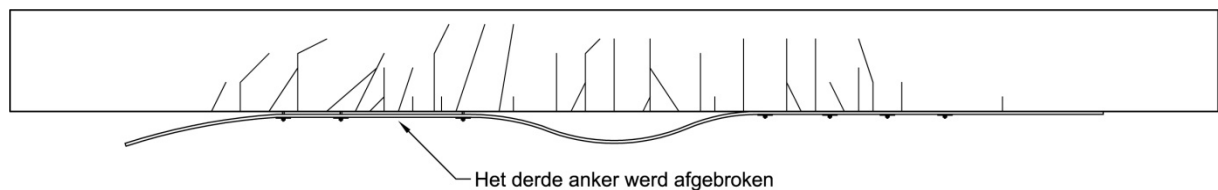
$$F_{rest,max} = 63,813kN$$

Er wordt opgemerkt dat deze restcapaciteit nauwelijks meer is dan de breukkracht van balk B1.

De volgende waarnemingen m.b.t. de restcapaciteit werden visueel geregistreerd.

- inscheuringen in de koolstofvezelwapening t.h.v. de 2 meest linkse ankers.

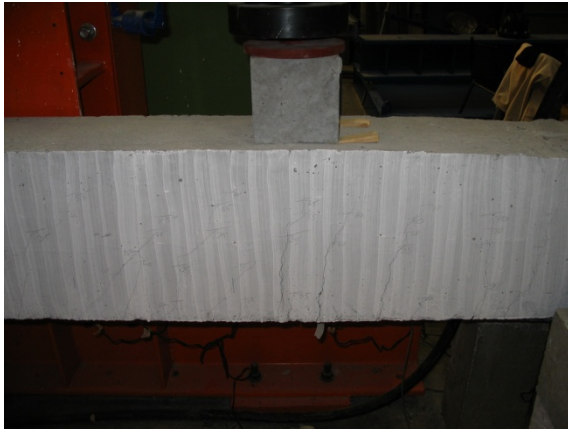
**Figuur 59** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA1.3.



**Figuur 59: Schets scheurvorming balk BLA1.3**

#### 4.6.3.5 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BLA1.3



Figuur 60: Scheurvorming linkerkant balk BLA1.3



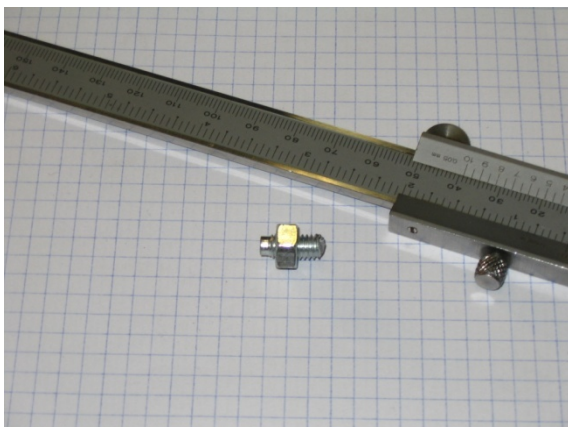
Figuur 61: Scheurvorming rechterkant balk BLA1.3



Figuur 62: Onthechting in het midden van de overspanning [1]



Figuur 63: Onthechting in het midden van de overspanning [2]



Figuur 64: Afgebroken anker



Figuur 65: Geplooid anker

#### 4.6.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

##### 4.6.4.1 Lasten

**Tabel 84** vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 113,2 \text{ kN m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 94,3 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN m}$ $P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN m}$ $P = 87,2 \text{ kN}$
	Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN m}$
		$P_u = 70,0 \text{ kN}$

**Tabel 84: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA1.3**

##### 4.6.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 85** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

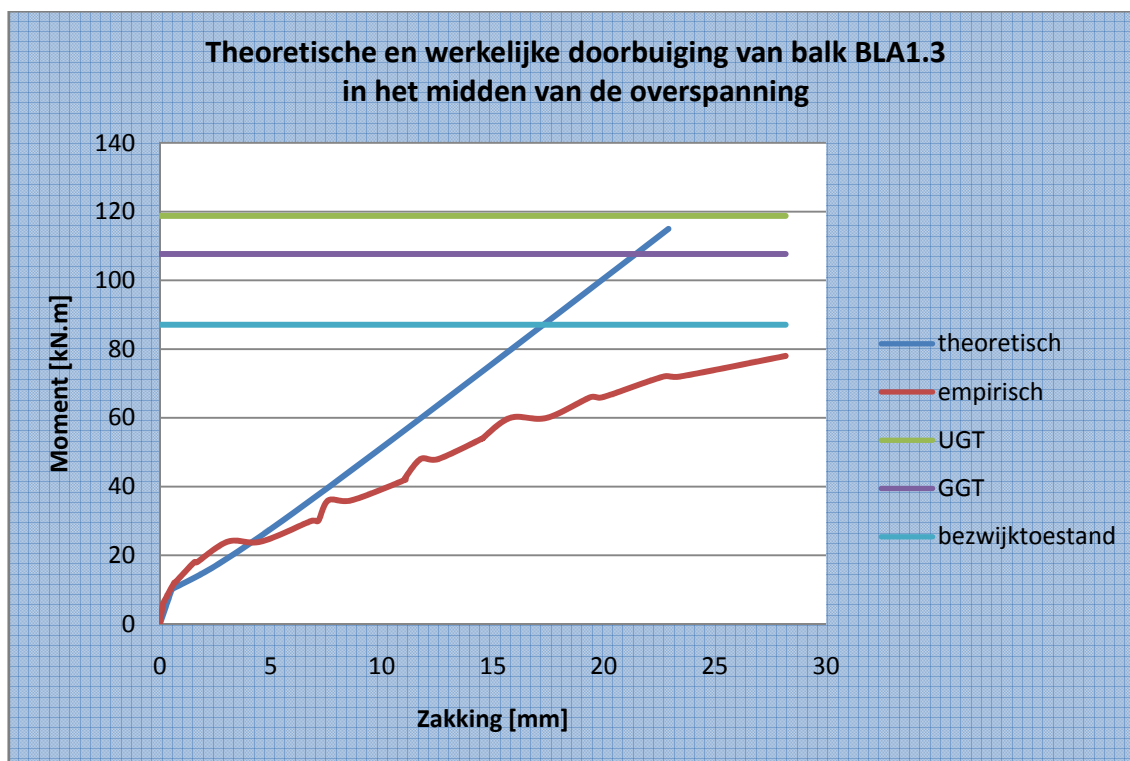
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{\max} = 94,3 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 150,5 \text{ kN}$ (beton: 100%)

**Tabel 85: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA1.3**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

#### 4.6.4.3 Doorbuiging

**Grafiek 37** toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.



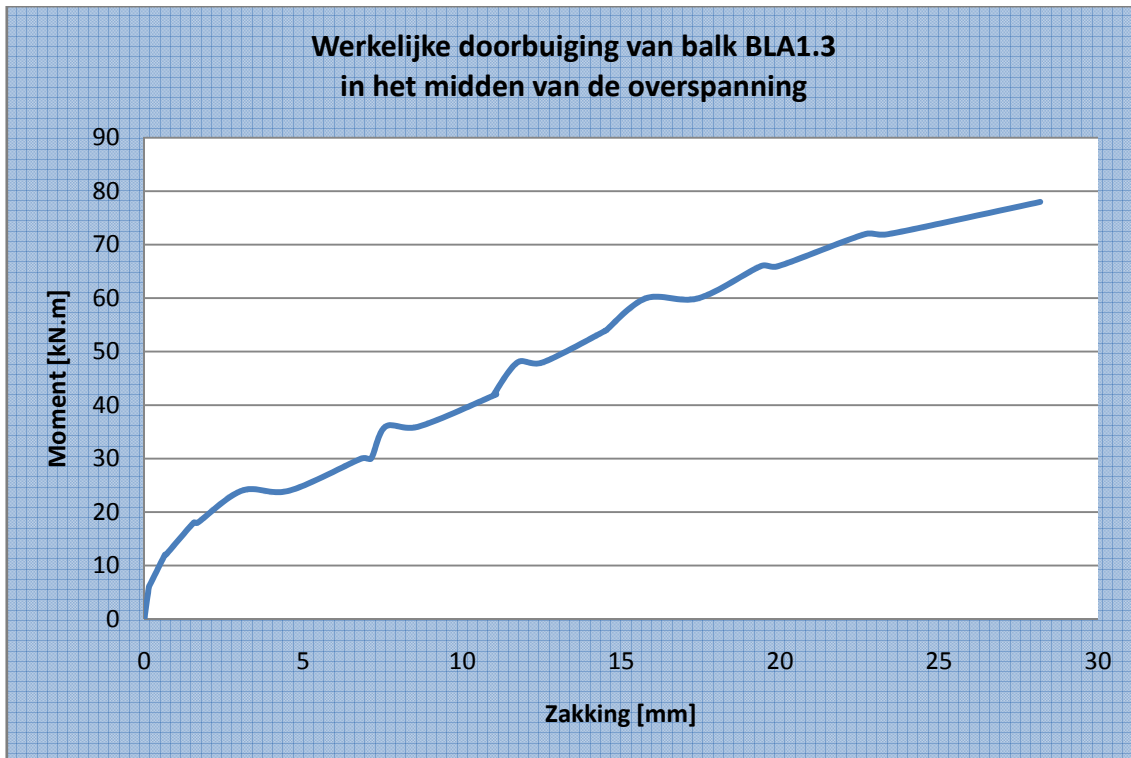
**Grafiek 37:** Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA1.3 in het midden van de overspanning

In de niet-gescheurde toestand vallen de grafieken samen. Het theoretisch berekende scheurmoment en het empirisch bepaalde scheurmoment lijken ongeveer gelijk te zijn aan elkaar. In de gescheurde toestand is de werkelijke doorbuiging veel groter dan de theoretisch berekende doorbuiging.

#### 4.6.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 38** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA1.3 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 38** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 12 kN m.





**Grafiek 38: Werkelijke doorbuiging van balk BLA1.3 in het midden van de overspanning**

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 25 kN. Dit komt overeen met een moment van 30,0 kN m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN m.

#### 4.6.4.5 Breukmechanismen

**Tabel 86** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	76,4 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	57,5 kN m

**Tabel 86: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Volgens CUR Aanbeveling 91 zou het eerst optredende breukmechanisme onthechting door hoge schuifspanningen zijn. Volgens FIB Bulletin 14 zou concrete rip-off het bepalende breukmechanisme zijn. In werkelijkheid trad onthechting. Het was echter onmogelijk waar te nemen waar deze onthechting zich het eerst manifesteerde.

## 4.7 Analyse resultaten reeks 1

Aangezien het vermoeden bestaat dat de metingen op balk BLA1.1 niet correct verliepen, wordt deze balk buiten beschouwing gelaten bij de analyse van de resultaten van reeks 1.

### 4.7.1 Breukkracht

**Tabel 87** vat de breukkrachten van de verschillende balken samen.

Balk	Breukkracht		
	[kN]	t.o.v. B1 [%]	t.o.v. BL1 [%]
B1	62,1	0,0%	-28,0%
BL1	86,2	38,9%	0,0%
BLA1.2	94,0	51,3%	9,0%
BLA1.3	94,3	52,0%	9,4%

**Tabel 87: Breukkrachten van reeks 1**

Uit **Tabel 87** blijkt dat het gebruik van koolstofvezelwapening een groot effect heeft op de draagkracht t.o.v. een onversterkte balk. Verder blijkt ook dat ook een bijkomende verankering een positief effect heeft op de draagkracht. De verbetering van de draagkracht door de bijkomende verankering is natuurlijk veel kleiner dan de verbetering door het gebruik van koolstofvezelwapening.

Het verschil in de tussenafstand tussen de ankers bij de balken BLA1.2 en BLA1.3 is echter niet af te leiden uit de meetresultaten. Mogelijks is de zone waar de koolstofvezelwapening bijkomend verankerd wordt van een groter belang dan de tussenafstand tussen de ankers.

**Tabel 88** zet de empirisch bepaalde breukkrachten naast de theoretisch berekende krachten. Het is echter onmogelijk om uit deze gegevens een besluit te nemen omtrent de theoretische berekeningen, vermits het verschil tussen de rekenwaarden en de werkelijke waarden van de materiaalkarakteristieken te groot is.

Balk	Breukkracht		UGT		GGT		$P_u$	
	[kN]	[kN]	t.o.v. breukkracht [%]	[kN]	t.o.v. breukkracht [%]	[kN]	t.o.v. breukkracht [%]	
B1	62,1	37,7	-39,3%	26,2	-57,8%	36,7	-40,9%	
BL1	86,2	95,6	10,8%	87,2	1,1%	70,0	-18,8%	
BLA1.2	94,0	95,6	1,7%	87,2	-7,2%	70,0	-25,5%	
BLA1.3	94,3	95,6	1,3%	88,2	-6,5%	71,0	-24,7%	

**Tabel 88: Breukkrachten en theoretisch berekende krachten van reeks 1**

#### 4.7.2 Andere kenmerkende krachten

**Tabel 89** toont de krachten waarbij de doorbuiging respectievelijk  $L/500$  en  $L/250$  bedraagt.

Balk	Andere kenmerkende krachten					
	doorbuiging = $L/500$			doorbuiging = $L/250$		
	[kN]	t.o.v. B1 [%]	t.o.v. BL1 [%]	[kN]	t.o.v. B1 [%]	t.o.v. BL1 [%]
B1	28,7	0,0%	-11,7%	45,7	0,00%	-17,3%
BL1	32,6	13,3%	0,0%	55,2	20,88%	0,0%
BLA1.2	32,0	11,2%	-1,8%	54,9	20,23%	-0,5%
BLA1.3	27,5	-4,4%	-15,7%	44,8	-1,96%	-18,9%

**Tabel 89: Andere kenmerkende krachten van reeks 1**

De koolstofvezelwapening blijkt in de meeste gevallen de stijfheid van de balken te verhogen. De stijfheid van balk BLA1.3 blijkt echter lager te zijn dan die van een onversterkte balk. Indien balk BLA1.3 buiten beschouwing gelaten wordt, is het niet mogelijk een besluit te nemen m.b.t. de stijfheid van de balken door een bijkomende verankering.

#### 4.7.3 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 90** vergelijkt de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit van de balken met de empirisch bepaalde dwarskrachten.

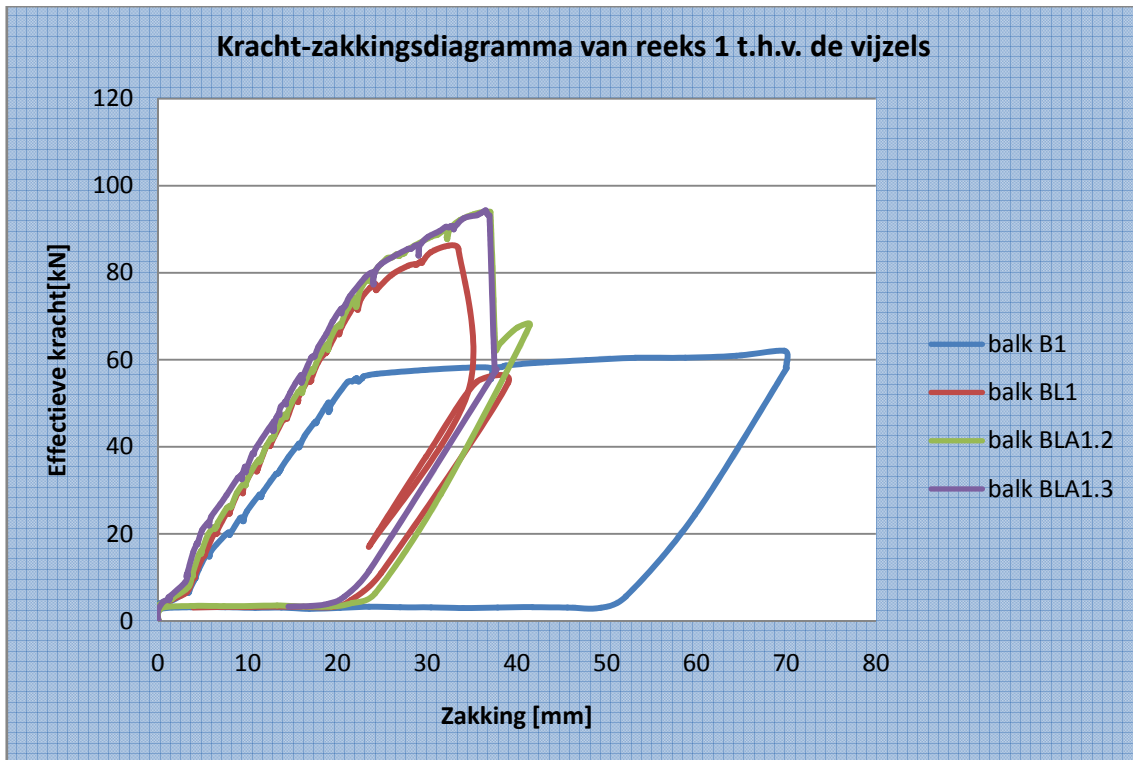
Balk	Theoretische $V_{max}$ [kN]		Empirische $V_{max}$ [kN]
	beton: 0%	beton: 100%	
B1	122,8	149,0	62,1
BL1	122,8	150,5	86,2
BLA1.2	122,8	150,5	94,0
BLA1.3	122,8	150,5	94,3

**Tabel 90: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit**

In geen enkel geval wordt de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit overschreden. Hierbij is echter geen rekening gehouden met het eigengewicht van de balken. Maar zelfs rekening houdende met het eigengewicht, dan nog zou de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit niet overschreden worden.

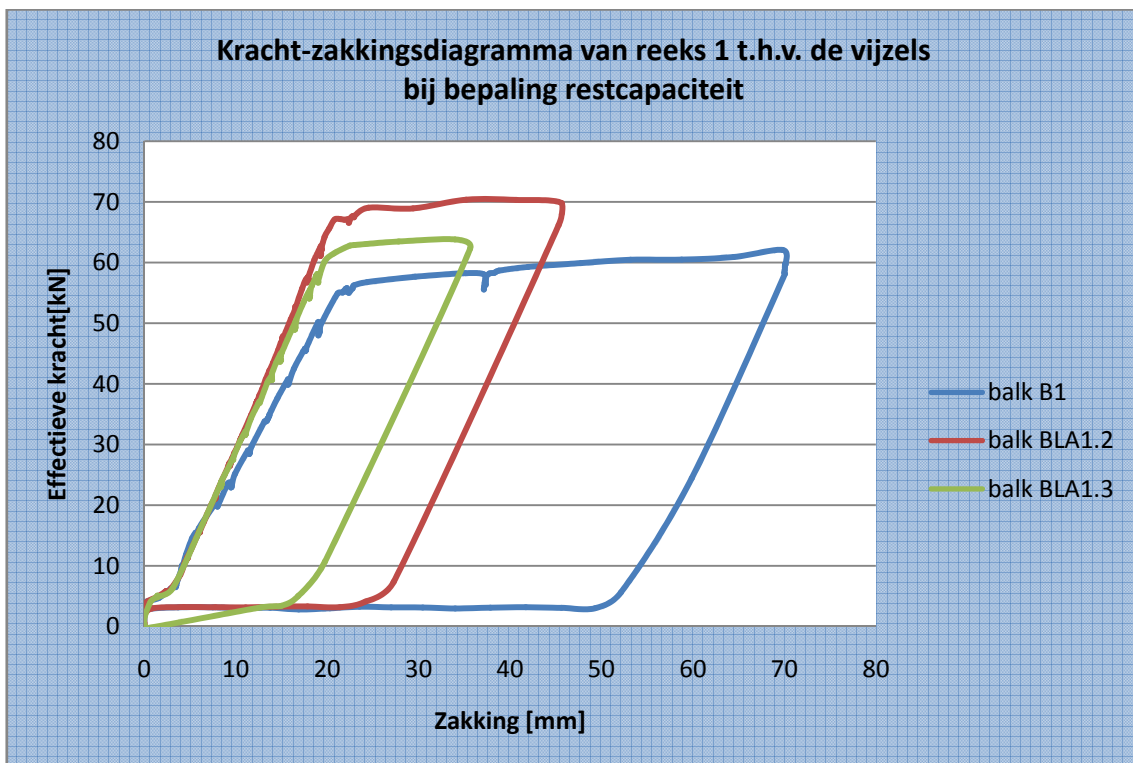
#### 4.7.4 Doorbuiging

**Grafiek 39** vergelijkt de verschillende kracht-zakkingsdiagramma van reeks 1 t.h.v. de vizels met elkaar. De grafieken van de versterkte balken hebben een steiler verloop dan de grafiek van balk B1. Dit wijst op een hogere stijfheid van de versterkte balken. Verder blijkt dat het vloeien van het staal bij een versterkte balk met bijkomende verankering zich iets later manifesteert dan bij een versterkte balk zonder bijkomende verankering.



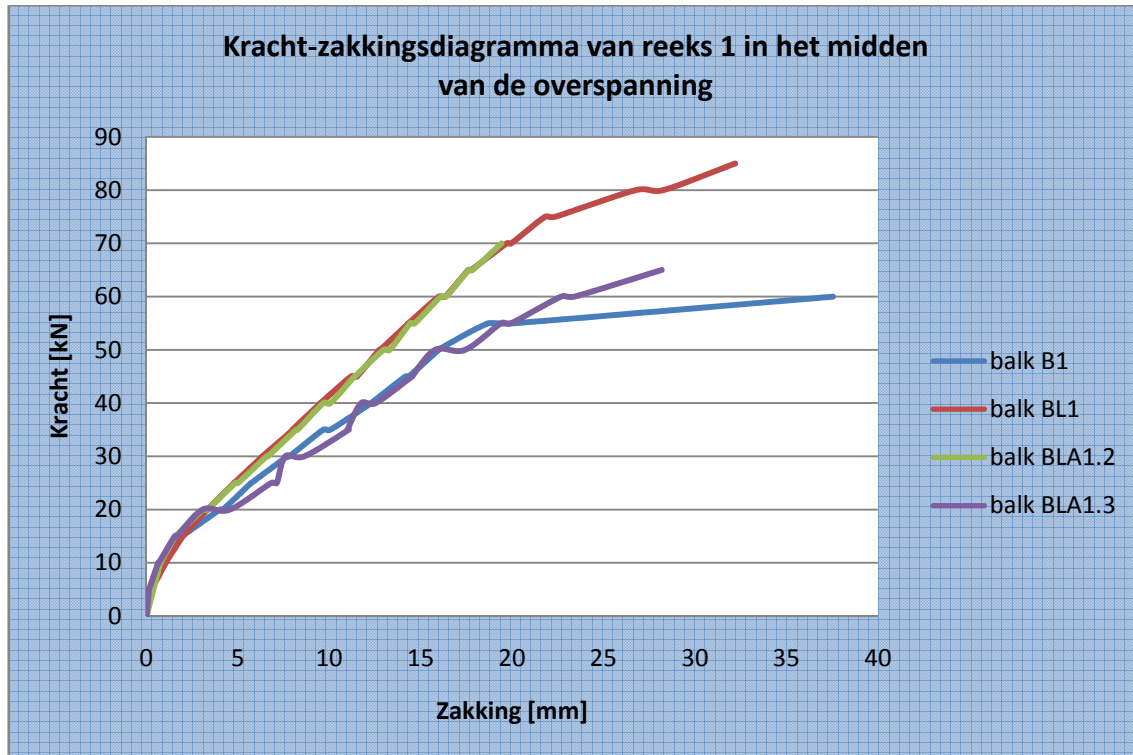
Grafiek 39: Kracht-zakkingsdiagramma van reeks 1 t.h.v. de vijzels

**Grafiek 40** vergelijkt de kracht-zakkingsdiagramma van de versterkte balken met bijkomende verankering t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit met elkaar. De restcapaciteit blijkt steeds hoger te zijn dan de draagkracht van balk B1.



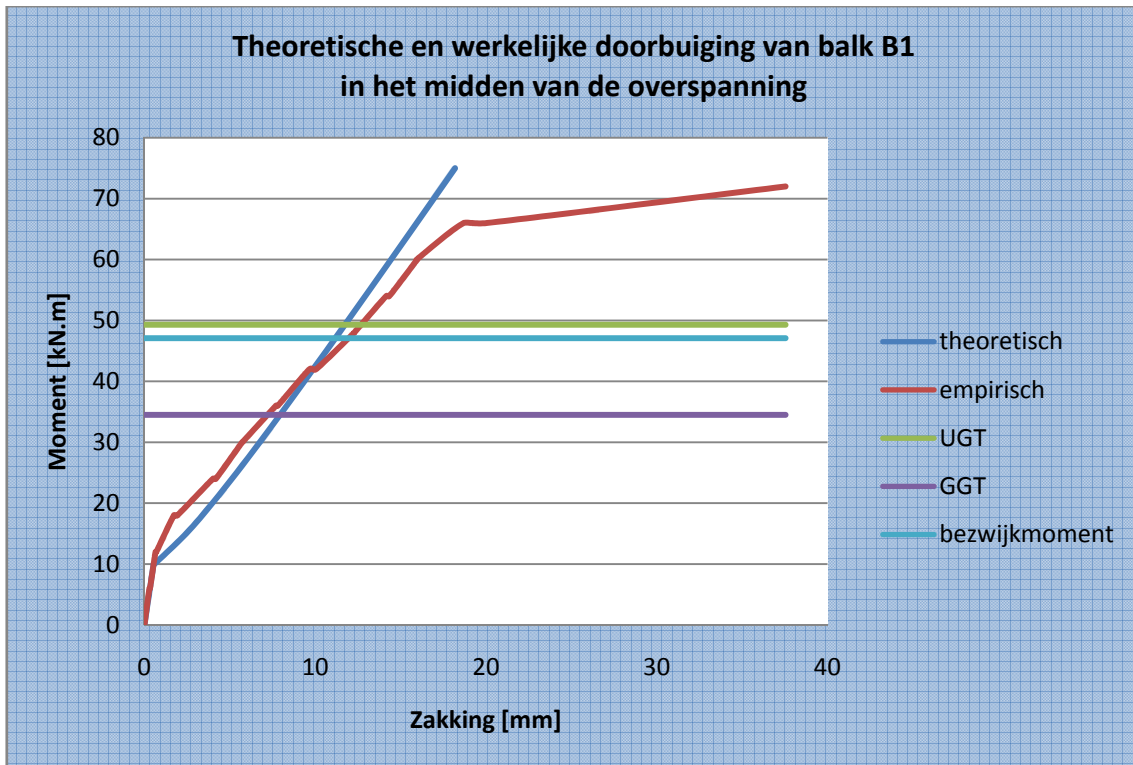
Grafiek 40: Kracht-zakkingsdiagramma van reeks 1 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit

**Grafiek 41** vergelijkt de verschillende kracht-zakkingsdiagramma van reeks 1 in het midden van de overspanning met elkaar. Een opmerking hierbij is dat de grafiek van balk BLA1.3 continu rond de grafiek van balk B1 schommelt, hoewel uit **Grafiek 39** bleek dat balk BLA1.3 stijver zou zijn dan balk B1.

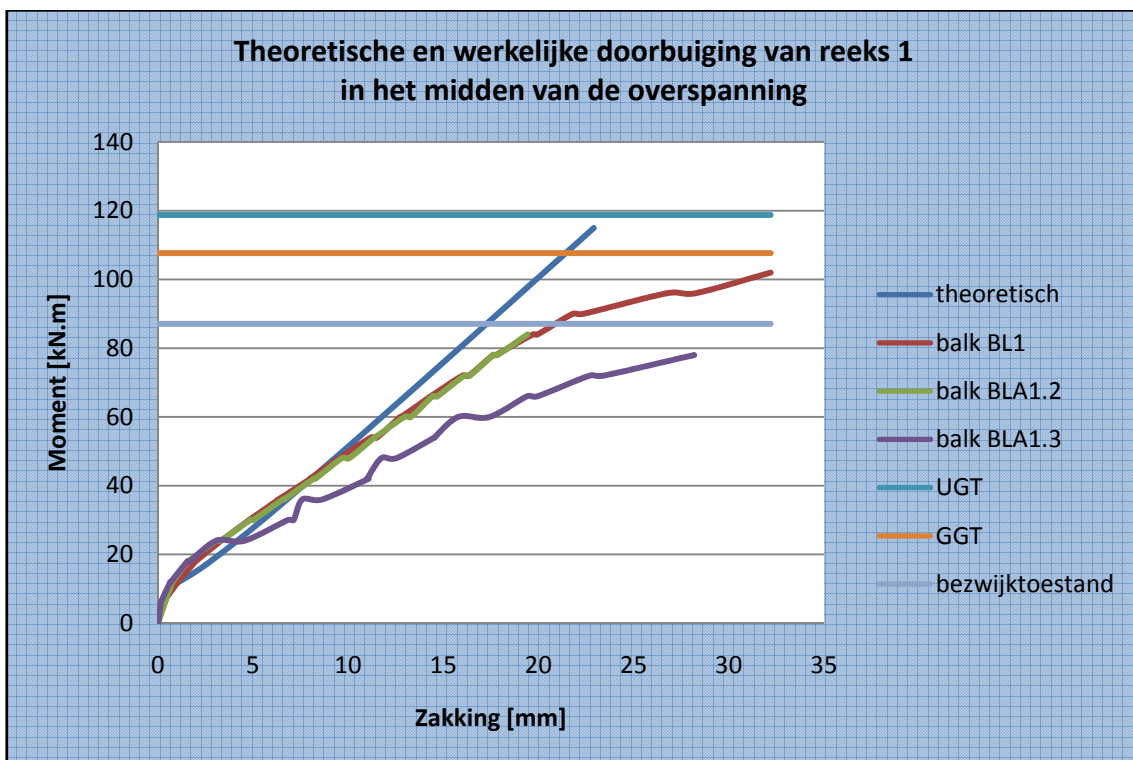


**Grafiek 41: Kracht-zakkingsdiagramma van reeks 1 in het midden van de overspanning**

**Grafiek 42** en **Grafiek 43** vergelijken de empirisch bepaalde doorbuigingen van reeks 1 in het midden van de overspanning met de theoretisch berekende doorbuigingen.



Grafiek 42: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk B1 in het midden van de overspanning



Grafiek 43: Theoretische en werkelijke doorbuiging van reeks 1 in het midden van de overspanning

Uit **Grafiek 42** blijkt dat de theoretisch berekende doorbuiging veilige waarden levert voor een onversterkte balk. Uit **Grafiek 43** blijkt dat een nieuw rekenmodel vereist is om de doorbuiging van een versterkte balk theoretisch te berekenen.

#### 4.7.5 Scheurvorming

**Tabel 91** vergelijkt de verschillende waarden van het initieel scheurmoment met elkaar.

Balk	theoretisch scheurmoment [kN m]	empirisch scheurmoment [kN m]	
		uit het kracht- zakkingsdiagram	uit het optekenen van de scheuren
B1	9,9	12,0	24,0
BL1	10,1	6,0	24,0
BLA1.2	10,1	12,0	24,0
BLA1.3	10,1	12,0	30,0

**Tabel 91: Theoretisch berekende en empirische bepaalde waarden voor het initieel scheurmoment**

De waarden voor het initieel scheurmoment liggen meestal dicht bij elkaar. De invloed van de koolstofvezelwapening op het initieel scheurmoment blijkt verwaarloosbaar te zijn. Ook in de theoretische berekeningen komt dit naar voren. De invloed van de koolstofvezelwapening beperkt zich tot het traagheidsmoment en de ligging van de neutrale vezel.

#### 4.7.6 Besluit

Zowel het gebruik van koolstofvezelwapening als een bijkomende verankering hebben een positieve invloed op de draagkracht van een onversterkte balk.

In de meeste gevallen blijkt de koolstofvezelwapening de doorsnede stijver te maken.

De vergelijking tussen de empirisch bepaalde doorbuiging en de theoretisch berekende doorbuiging toont aan dat de theoretisch berekende doorbuiging geen veilige waarden oplevert. Een nieuw rekenmodel is vereist.

De restcapaciteit van de versterkte balken die bijkomend verankerd zijn, lijkt steeds hoger te zijn dan de draagkracht van een onversterkte balk.

De koolstofvezelwapening blijkt geen invloed te hebben op het initieel scheurmoment.

Aan de hand van deze besluiten kan een aanzet gegeven worden voor de configuraties van reeks 2.

## 5.1 Voorcalculatie

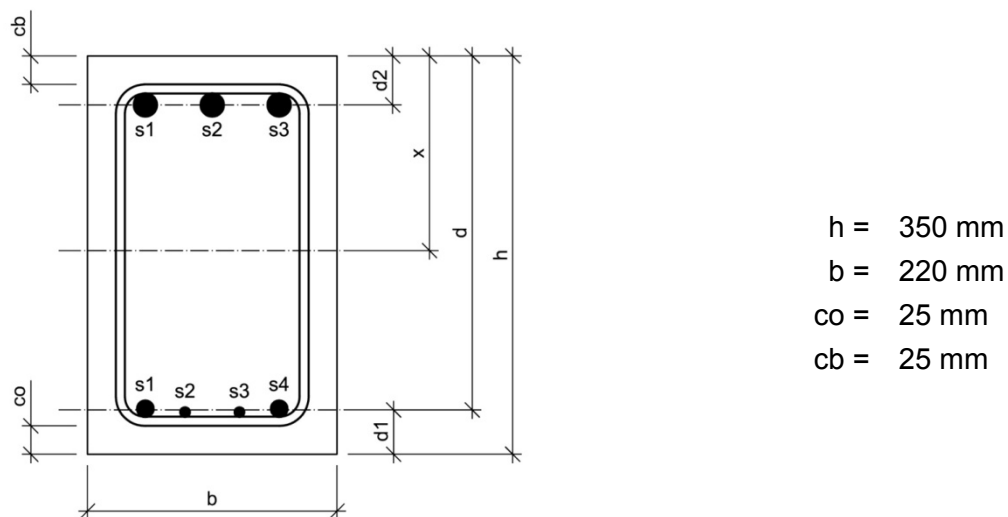
### 5.1.1 Onversterkte balken

#### 5.1.1.1 Opbouw en dimensionering

De onversterkte balken zijn balken uit gewapend beton zonder opgelijmde koolstofvezelwapening. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over de opbouw van deze balken.

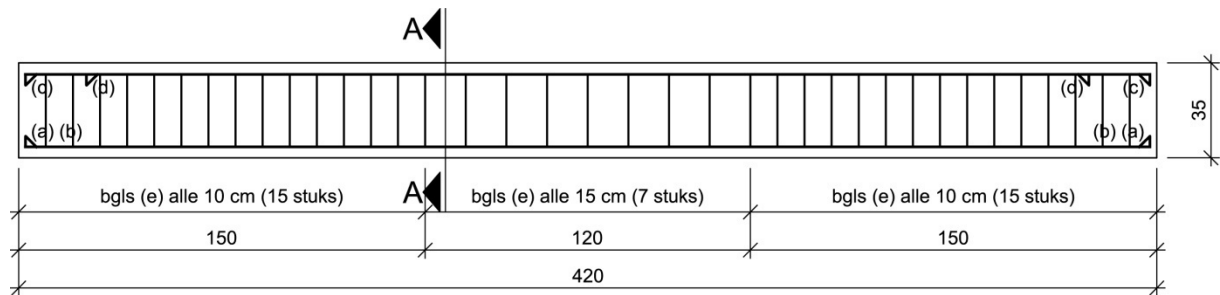
<b>Lengte</b>	4,20 m
<b>Overspanning</b>	3,60 m
<b>Breedte</b>	0,22 m (volgens het bekistingsplan)
<b>Hoogte</b>	0,35 m (volgens het bekistingsplan)
<b>Wapening</b>	Onderwapening 2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening 3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels 7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van 15 cm 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van 10 cm

Tabel 92: Opbouw en dimensionering van de onversterkte balken

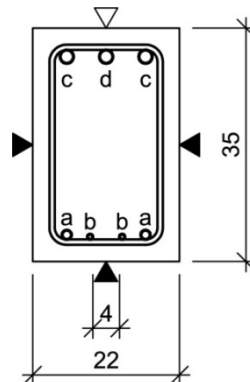


Figuur 66: Dwarsdoorsnede van een onversterkte balk





**Figuur 67: Vooraanzicht wapeningskorf van een onversterkte balk**



**Figuur 68: Dwarsdoorsnede wapeningskorf van een onversterkte balk**

Deze balken werden geprefabriceerd op 23 oktober 2007. Het gebruikte wapeningsstaal is van de kwaliteit BE500. De betoncentrale Inter-Beton nv leverde beton met de volgende karakteristieken:

- sterkteklasse: C16/20
- omgevingsklasse: EE1
- consistentie: S3
- grootte granulaat ( $D_{max}$ ): 16 mm kalksteen
- cement CEM III/A 32,5 N LA
- hulpstof: Tixo superplastificeerder (0,5%)
- gegarandeerde verwerkingstijd: 100 minuten

### 5.1.1.2 Theoretische berekeningen

Bij de onderstaande theoretische berekeningen wordt geen gebruik gemaakt van de werkelijke materiaaleigenschappen, die nadien wel bepaald werden. Verder wordt ook geen rekening gehouden met de werkelijke afmetingen van de balken, maar met de theoretische afmetingen ervan.

#### 5.1.1.2.1 Het gedrag van de balk

Vooraf dient nagegaan te worden of deze onversterkte balken zich gedragen als enkelvoudig gewapende balken of als dubbel gewapende balken. Dit is eenvoudig te controleren door de werkelijke hoogte te vergelijken met de economische hoogte. Om de werkelijke nuttige hoogte te bepalen dient het zwaartepunt van de hoofdwapening gekend te zijn. Dit zwaartepunt wordt op de onderstaande manier berekend. Als basis wordt de onderkant van de balk genomen.

$$d_1 = \frac{\sum A_i \times z_i}{\sum A_i} = \frac{2 \times \pi \times (14/2)^2 \times 40 + 2 \times \pi \times (8/2)^2 \times 37}{2 \times \pi \times (14/2)^2 + 2 \times \pi \times (8/2)^2} = \frac{5104\pi}{130\pi} = 39,262 \text{ mm}$$

Met dit zwaartepunt is het eenvoudig de nuttige hoogte  $d$  te berekenen.

$$h = d + d_1 \Leftrightarrow d = h - d_1 = 350 - 39,262 = 310,738 \text{ mm} \approx 311 \text{ mm}$$

De economische hoogte  $d_{ec}$  wordt als volgt berekend.

$$d_{ec} = \beta_{ec} \cdot \sqrt{\frac{M_d}{b}} \quad \text{waarbij} \quad \beta_{ec} = \frac{2,311}{\sqrt{f_{cu}}} = 0,0243$$

De waarde voor het moment  $M_d$  wordt berekend met onderstaande formule.

$$\begin{aligned} M_d &= A_{s1} \times \zeta_{ec} \times d \times f_{yd} \\ \Leftrightarrow M_d &= 409 \times 0,892 \times 311 \times 434,783 \\ \Leftrightarrow M_d &= 49289604,977 \text{ N.mm} \\ \Leftrightarrow M_d &= 49,290 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Dit invullen in de formule voor de economische hoogte geeft het volgende resultaat.

$$d_{ec} = \beta_{ec} \cdot \sqrt{\frac{M_d}{b}} = 0,0243 \times \sqrt{\frac{49,290}{0,22}} = 0,364 \text{ m} = 364 \text{ mm}$$

De economische hoogte  $d_{ec}$  is groter dan de werkelijke hoogte  $d$ . Daarom dient ook de minimale hoogte  $d_{lim}$  berekend te worden.

$$d_{lim} = \beta_{lim} \cdot \sqrt{\frac{M_d}{b}} = 0,0221 \times \sqrt{\frac{49,290}{0,22}} = 0,331 \text{ m} = 331 \text{ mm}$$

Ook de minimale hoogte  $d_{lim}$  blijkt groter te zijn dan de werkelijke hoogte  $d$ . De balk gedraagt zich dus als een dubbel gewapende balk. Toch zullen de volgende berekeningen uitgaan van een enkelvoudig economisch gewapende balk. De bovenwapening wordt bijgevolg verondersteld enkel actief te zijn bij versterkte balken.

#### 5.1.1.2.2 UGT

Om te beginnen worden de rekenwaarden van de materiaaleigenschappen bepaald.

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,783 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{16}{1,5} = 10,667 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{cu} = 0,85 \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,85 \times \frac{16}{1,5} = 9,067 \frac{N}{mm^2}$$

De nuttige hoogte  $d$  werd reeds eerder bepaald. Het moment  $M_d$  wordt als volgt berekend.

$$M_d = A_{s1} \times \zeta_{ec} \times d \times f_{yd}$$

$$\Leftrightarrow M_d = 409 \times 0,892 \times 311 \times 434,783$$

$$\Leftrightarrow M_d = 49289604,977 N.mm$$

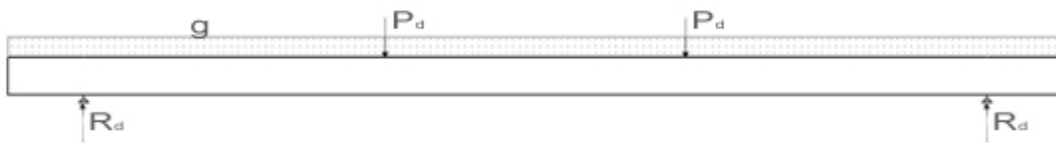
$$\Leftrightarrow M_d = 49,290 kN.m$$

Het eigengewicht van de balk wordt per lopende meter berekend.

$$g = b \times h \times 25 \frac{kN}{m^3} = 0,22 \times 0,35 \times 25 = 1,925 \frac{kN}{m}$$

Verder dienen ook de reactiekrachten bij de oplegpunten bepaald te worden.

$$R_d = P_d + g_d \times \frac{L}{2} = P_d + 1,35 \times g \times \frac{L}{2} = P_d + 1,35 \times g \times 2,10$$



**Figuur 69: Bepaling van de vijklcracht in de uiterste grenstoestand**

Tot slot wordt de vijzelkracht  $P_d$  a.d.h.v. een momentenvergelijking berekend.

$$\begin{aligned} \sum_{x=L/2} M &= 0 \\ \Leftrightarrow M_d + P_d \times 0,6 + 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,05 - R_d \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow M_d + P_d \times 0,6 + 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,05 - (P_d + 1,35 \times g \times 2,10) \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P_d = M_d + 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,05 - 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,80 & \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P_d = M_d - 2,12625 \times g & \\ \Leftrightarrow P_d = \frac{49,290 - 2,12625 \times 1,925}{1,20} & \\ \Leftrightarrow P_d = 37,664 \text{ kN} & \end{aligned}$$

In de uiterste grenstoestand wordt een maximale kracht van 37,664 kN bereikt. Deze kracht komt overeen met een moment van 49,290 kN m.

### 5.1.1.2.3 GGT

Alvorens van start te gaan met de berekeningen in de gebruiksgrenstoestand, worden de maximaal toelaatbare spanningen in de materialen bepaald.

$$\begin{aligned} \sigma_{s,adm} &= 0,6 \times f_{yk} = 0,6 \times 500 = 300 \frac{N}{mm^2} \\ \sigma_{c,adm} &= 0,5 \times f_{ck} = 0,5 \times 16 = 8 \frac{N}{mm^2} \end{aligned}$$

Het moment wordt als volgt bepaald.

$$\begin{aligned} M &= A_{s1} \times \zeta_e \times d \times \sigma_{s,adm} \\ \Leftrightarrow M &= 409 \times 0,905 \times 311 \times 300 \\ \Leftrightarrow M &= 34505486,354 \text{ N.mm} \\ \Leftrightarrow M &= 34,505 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Het eigengewicht van de balk per lopende meter werd reeds eerder berekend.

$$g = 1,925 \frac{kN}{m}$$

Verder dienen ook de reactiekrachten bij de oplegpunten bepaald te worden.

$$R = P + g \times \frac{L}{2} = P + g \times 2,10$$



**Figuur 70: Bepaling van de vjzelkracht in de gebruiksgrenstoestand**

Tot slot wordt de vjzelkracht  $P$  a.d.h.v. een momentenvergelijking berekend.

$$\begin{aligned} \sum_{x=L/2} M &= 0 \\ \Leftrightarrow M + P \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - R \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow M + P \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - (P + g \times 2,10) \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P &= M + g \times 2,10 \times 1,05 - g \times 2,10 \times 1,80 \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P &= M - 1,575 \times g \\ \Leftrightarrow P &= \frac{34,505 - 1,575 \times 1,925}{1,20} \\ \Leftrightarrow P &= 26,228 \text{ kN} \end{aligned}$$

In de gebruiksgrenstoestand wordt een maximale kracht van 26,228 kN bereikt. Deze kracht komt overeen met een moment van 34,505 kN m.

#### 5.1.1.2.4 Bezwijkmoment

Het is eveneens mogelijk het bezwijkmoment  $M_u$  te bepalen voor een bepaalde doorsnede. Het horizontaal evenwicht vereist dat  $N_{cd} = N_{sd}$  waarbij  $N_{cd} = \psi b \xi d f_{cu}$  en  $N_{sd} = A_{s1} f_{yd}$ . Dit invullen in de vergelijking van het horizontaal evenwicht geeft het onderstaande resultaat.

$$\begin{aligned} N_{cd} &= N_{sd} \\ \Leftrightarrow \psi \cdot b \cdot \xi \cdot d \cdot f_{cu} &= A_{s1} \cdot f_{yd} \\ \Leftrightarrow \xi &= \frac{A_{s1} \cdot f_{yd}}{\psi \cdot b \cdot d \cdot f_{cu}} \end{aligned}$$

Wordt er vooropgesteld dat  $\psi = 0,81$ , dan vindt men een waarde voor  $\xi$ .

$$\xi = \frac{A_{s1} \cdot f_{yd}}{\psi \cdot b \cdot d \cdot f_{cu}} = \frac{409 \times 434,783}{0,81 \times 220 \times 350 \times 9,067} = 0,354$$

Met deze waarde kan men een waarde vinden voor  $\mu_d$  en  $\zeta$ .

$$\mu_d = 0,244 \text{ en } \zeta = 0,853$$

Aangezien  $\mu_d \geq 0,187$  is, is inderdaad  $\psi = 0,81$ . Uitgaande van de drukzone is het bezwijkmoment gelijk aan het onderstaande resultaat.

$$\begin{aligned} M_u &= \mu_d \cdot f_{cu} \cdot b \cdot d^2 \\ \Leftrightarrow M_u &= 0,244 \times 9,067 \times 220 \times 311^2 \\ \Leftrightarrow M_u &= 47058740,346 \text{ N.mm} = 47,059 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Uitgaande van de wapeningsdoorsnede krijgt men de volgende waarde.

$$\begin{aligned} M_u &= A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot \zeta \cdot d \\ \Leftrightarrow M_u &= 409 \times 434,783 \times 0,853 \times 311 \\ \Leftrightarrow M_u &= 47112514,985 \text{ N.mm} = 47,113 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Men stelt het bezwijkmoment gelijk aan het gemiddelde van bovenstaande waarden. Het bezwijkmoment is dus gelijk aan 47,086 kN m. Tot slot wordt de kracht  $P_u$  berekend die nodig is om dit moment te bereiken. Hiervoor dient het eigengewicht van de balk en de reactiekrachten gekend te zijn.

$$\begin{aligned} g &= 1,925 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ R_u &= P_u + g \times \frac{L}{2} = P_u + g \times 2,10 \end{aligned}$$



Figuur 71: Bepaling van de vijklkracht in de bezwijktoestand

Tot slot wordt de vijklkracht  $P_u$  a.d.h.v. een momentenvergelijking berekend.

$$\begin{aligned} \sum_{x=L/2} M &= 0 \\ \Leftrightarrow M_u + P_u \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - R_u \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow M_u + P_u \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - (P_u + g \times 2,10) \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P_u = M_u + g \times 2,10 \times 1,05 - g \times 2,10 \times 1,80 & \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P_u = M_u - 1,575 \times g & \\ \Leftrightarrow P_u = \frac{47,086 - 1,575 \times 1,925}{1,20} & \\ \Leftrightarrow P_u = 36,711 \text{ kN} & \end{aligned}$$

In de bezwijktoestand wordt een maximale kracht van 36,711 kN bereikt. Deze kracht komt overeen met een moment van 47,086 kN m.

## 5.1.1.2.5 Dwarskrachtencapaciteit

$V_{Rd1}$  is de weerstand van de betondoorsnede tegen dwarskrachten. Men is voor de rekenwaarde van deze dwarskrachtenweerstand gekomen tot de volgende experimentele formule.

$$V_{Rd1} = \left[ 0,1 \times k \times (100 \times \rho \times f_{ck})^{1/3} + 0,15 \times \sigma_{cp} \right] \times b_w \times d$$

met  $k = 1 + \sqrt{200/d}$  de invloed van  $d$  (in mm)

$\rho = \frac{A_s}{b_w \times d} \leq 0,02$  het in rekening te brengen percentage van de hoofdwapening

$\sigma_{cp} = N_{pd} / A$  de spanning t.g.v. een langskracht  $N_{pd}$ , in  $N/mm^2$

$b_w$  de minimale breedte van de balk, in mm

De weerstand van de betondoorsnede tegen dwarskrachten wordt als volgt berekend.

$$\begin{aligned} V_{Rd1} &= \left[ 0,1 \times k \times (100 \times \rho \times f_{ck})^{1/3} + 0,15 \times \sigma_{cp} \right] \times b_w \times d \\ \Leftrightarrow V_{Rd1} &= \left[ 0,1 \times \left( 1 + \sqrt{200/311} \right) \times \left( 100 \times \frac{409}{220 \times 311} \times 16 \right)^{1/3} \right] \times 220 \times 311 \\ \Leftrightarrow V_{Rd1} &= 26160,420 N \\ \Leftrightarrow V_{Rd1} &= 26,160 kN \end{aligned}$$

$V_{wd}$  is de weerstand van de dwarskrachtenwapening tegen dwarskrachten. De waarde voor deze weerstand wordt met de volgende formule bepaald.

$$V_{wd} = \frac{0,9 \times d \times A_{sw} \times f_{wd}}{s} = \frac{0,9 \times 311 \times 101 \times 474,783}{100} = 122809,444 N = 122,809 kN$$

De totale dwarskrachtencapaciteit varieert van 122,809 kN (waarbij het beton helemaal niet bijdraagt tot de dwarskrachtenweerstand) tot 148,970 kN (waarbij het beton 100% bijdraagt tot de dwarskrachtenweerstand).

## 5.1.1.2.6 Doorbuiging

De doorbuiging wordt zuiver theoretisch berekend. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen twee toestanden: een ongescheurde toestand, d.i. een toestand waarbij nog geen scheuren zijn, en een gescheurde toestand, waarbij het beton in de trekzone volledig gescheurd is.

5.1.1.2.6.1 *Initieel scheurmoment*

Om te beginnen wordt het initieel scheurmoment bepaald.

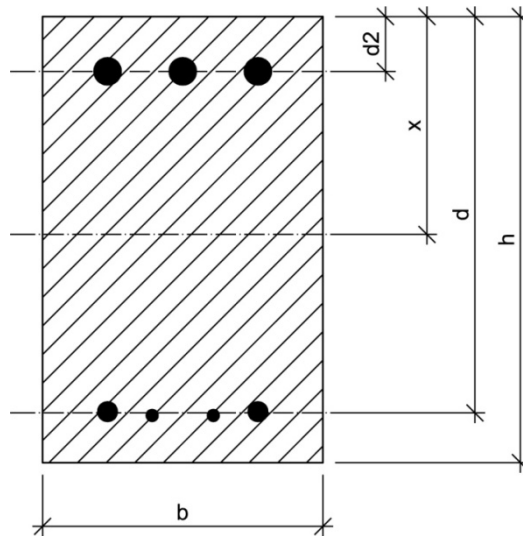
$$M_{cr} = f_{ctm} \times \frac{I_1}{v_1}$$

Voor de bepaling van het initieel scheurmoment is de betontreksterkte nodig.

$$f_{ctm} = 0,3 \times f_{ck}^{2/3} = 0,3 \times 16^{2/3} = 1,905 \frac{N}{mm^2}$$

Het traagheidsmoment van de rechthoekige doorsnede wordt als volgt berekend.

$$I_1 = \frac{b \times x^3}{3} + \frac{b \times (h-x)^3}{3} + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} \times (d-x)^2 + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times (x-d_2)^2$$



**Figuur 72: Traagheidsmoment van de niet-gescheurde doorsnede**

Om het traagheidsmoment te bepalen heeft men de ligging van de neutrale vezel nodig.

$$x = \frac{b \times h \times \frac{h}{2} + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} \times d + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times d_2}{b \times h + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} + (\alpha_s - 1) \times A_{s2}}$$

met  $\alpha_s = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{27402,742} = 7,299$

$$E_c = 9,5 \times (f_{ck} + 8)^{1/3} \times 10^3 = 9,5 \times (16 + 8)^{1/3} \times 10^3 = 27402,742 \frac{N}{mm^2}$$



Invullen van deze waarden geeft het onderstaande resultaat.

$$x = \frac{220 \times 350 \times \frac{350}{2} + (7,299 - 1) \times 409 \times 311 + (7,299 - 1) \times 942 \times 43}{220 \times 350 + (7,299 - 1) \times 409 + (7,299 - 1) \times 942} = 170 \text{ mm}$$

Verder is ook de afstand van de neutrale vezel tot de meest getrokken vezel nodig.

$$v_1 = h - x = 350 - 170 = 180 \text{ mm}$$

Uiteindelijk kan het traagheidsmoment berekend worden.

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{b \times x^3}{3} + \frac{b \times (h-x)^3}{3} + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} \times (d-x)^2 + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times (x-d_2)^2 \\ \Leftrightarrow I_1 &= \frac{220 \times 170^3}{3} + \frac{220 \times (350-170)^3}{3} + (7,299-1) \times 409 \times (311-170)^2 + \\ & (7,299-1) \times 942 \times (170-43)^2 \\ \Leftrightarrow I_1 &= 934688905 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Tot slot wordt een waarde voor het initieel scheurmoment gevonden.

$$M_{cr} = f_{ctm} \times \frac{I_1}{v_1} = 1,905 \times \frac{934688905}{180} = 9887677,171 \text{ N.mm} = 9,888 \text{ kN.m}$$

#### 5.1.1.2.6.2 Ongescheurde toestand

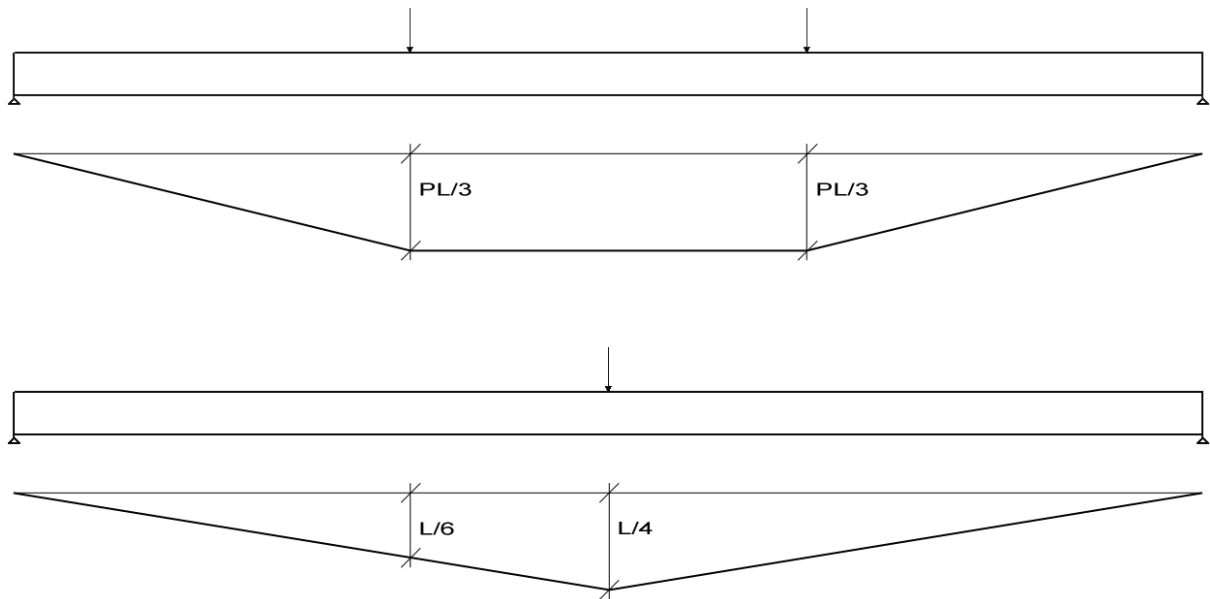
De doorbuiging in de ongescheurde toestand wordt met de onderstaande formule bepaald.

$$a = a_1 = k \times \frac{M \times L^2}{E_c \times I_1}$$

Er moet echter aan de volgende voorwaarde voldaan zijn.

$$M \leq M_{cr}$$

De coëfficiënt  $k$  kan m.b.v. de vormveranderingsarbeid bepaald worden. Deze doorbuiging kan benaderend berekend worden door enkel de term betreffende de buigende momenten in rekening te brengen. Dit is toegelaten, vermits een balk uit gewapend beton gezien kan worden als een tweedimensionaal staafwerk waar de belasting in hoofdzaak loodrecht op de richting van de aslijn van de staaf aangrijpt.



**Figuur 73: Momentenlijnen behorend bij de werkelijke en de fictieve belasting**

M.b.v. de tabellen van de Mohrse integralen bekomt men een waarde voor de coëfficiënt  $k$ .

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{1}{E.I} \int M.M \, dx \\
 \Leftrightarrow a &= \frac{2}{E.I} \times \left( \frac{1}{3} \cdot M.M \cdot \frac{L}{3} + \frac{1}{2} \cdot (M_{links} + M_{rechts}) \cdot M \cdot \frac{L}{6} \right) \\
 \Leftrightarrow a &= \frac{2}{E.I} \times \left( \frac{1}{3} \times \frac{L}{6} \times \frac{P.L}{3} \times \frac{L}{3} + \frac{1}{2} \times \left( \frac{L}{6} + \frac{L}{4} \right) \times \frac{P.L}{3} \times \frac{L}{6} \right) \\
 \Leftrightarrow a &= \frac{2}{E.I} \times \left( \frac{P.L^3}{162} + \frac{5.P.L^3}{432} \right) = \frac{46.P.L^3}{1296.E.I} = \frac{23.M.L^2}{216.E.I}
 \end{aligned}$$

Uit deze berekeningen volgt het onderstaande resultaat.

$$k = \frac{23}{216}$$

De elasticiteitsmodulus van het beton  $E_c$  en het traagheidsmoment  $I_1$  zijn reeds eerder berekend. De doorbuiging in de ongescheurde toestand kan uiteindelijk met de onderstaande formule berekend worden.

$$a = a_1 = \frac{23}{216} \times \frac{M \times L^2}{E_c \times I_1}$$

5.1.1.2.6.3 *Gescheurde toestand*

Van zodra aan de volgende voorwaarde voldaan is, bevindt de balk zich in een gedeeltelijk gescheurde toestand.

$$M_{cr} \leq M$$

De doorbuiging in de gescheurde toestand wordt als volgt berekend.

$$a = \chi \times a_1 + (1 - \chi) \times a_2$$

De doorbuiging  $a_1$  is gelijk aan de doorbuiging in de ongescheurde toestand. De doorbuiging  $a_2$  is deze bij een volledig gescheurd veronderstelde doorsnede.

$$a_2 = k \times \frac{M \times L^2}{E_c \times I_2}$$

De coëfficiënt  $k$  is dezelfde als deze in de ongescheurde toestand. Ook de elasticiteitsmodulus van het beton  $E_c$  behoudt dezelfde waarde. Om het traagheidsmoment  $I_2$  te bepalen, heeft men de nieuwe ligging van de neutrale vezel nodig. Die kan men als volgt berekenen.

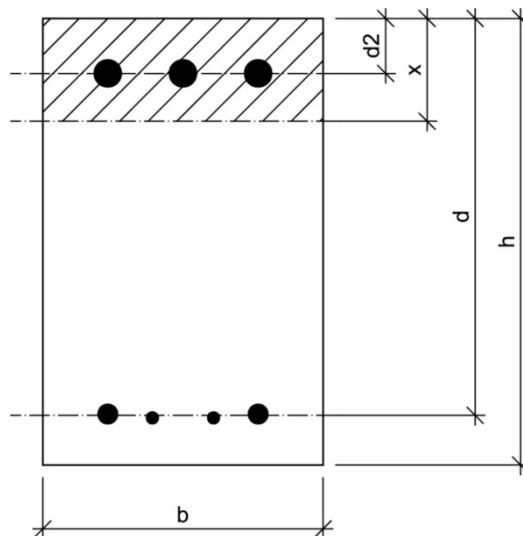
$$x = \xi \times d = 0,259 \times 311 = 80,481 \text{ mm}$$

Het traagheidsmoment zelf wordt dan op de volgende manier uitgewerkt.

$$I_2 = \frac{b \times x^3}{3} + \alpha_s \times A_{s1} \times (d - x)^2 + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times (x - d_2)^2$$

$$\Leftrightarrow I_2 = \frac{220 \times 80,481^3}{3} + 7,299 \times 409 \times (311 - 80,481)^2 + (7,299 - 1) \times 942 \times (80,481 - 43)^2$$

$$\Leftrightarrow I_2 = 204828934 \text{ mm}^4$$



Figuur 74: Traagheidsmoment van de gescheurde doorsnede

De coëfficiënt  $\chi$  berekent men als volgt.

$$\chi = \beta_1 \times \beta_2 \times \left( \frac{M_{cr}}{M} \right)^2$$

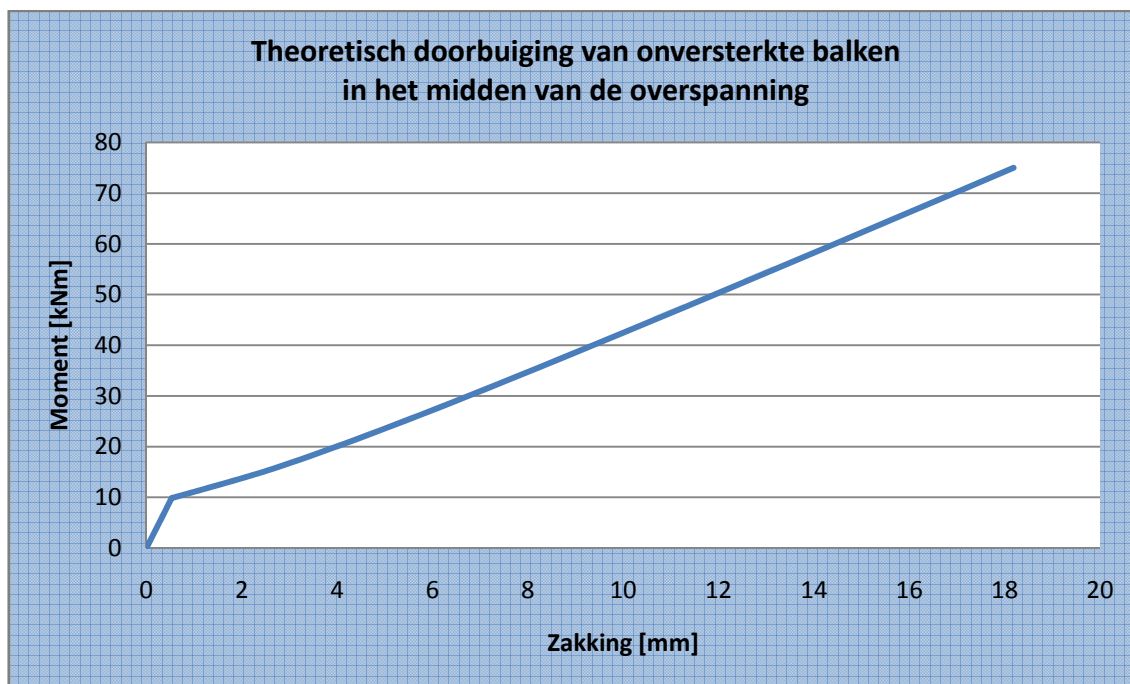
met  $\beta_1 = 1$  voor staven met een verbeterde hechting

$\beta_2 = 1$  voor een kortstondige of éénmalige belasting

**Tabel 93** toont de berekende waarden van de theoretische doorbuiging.

moment [kN m]	$\chi$	$1-\chi$	$a_1$ [mm]	$a_2$ [mm]	$a$ [mm]
0,000			0,000		0,000
5,000			0,269		0,269
9,888	1,000	0,000	0,533	2,431	0,533
10,000	0,978	0,022	0,539	2,459	0,582
15,000	0,435	0,565	0,808	3,688	2,437
20,000	0,244	0,756	1,078	4,917	3,979
25,000	0,156	0,844	1,347	6,147	5,396
30,000	0,109	0,891	1,616	7,376	6,750
35,000	0,080	0,920	1,886	8,605	8,069
40,000	0,061	0,939	2,155	9,835	9,365
45,000	0,048	0,952	2,425	11,064	10,647
50,000	0,039	0,961	2,694	12,293	11,918

Tabel 93: Cijferwaarden theoretische doorbuiging van de onversterkte balken



Grafiek 44: Theoretische doorbuiging van onversterkte balken in het midden van de overspanning

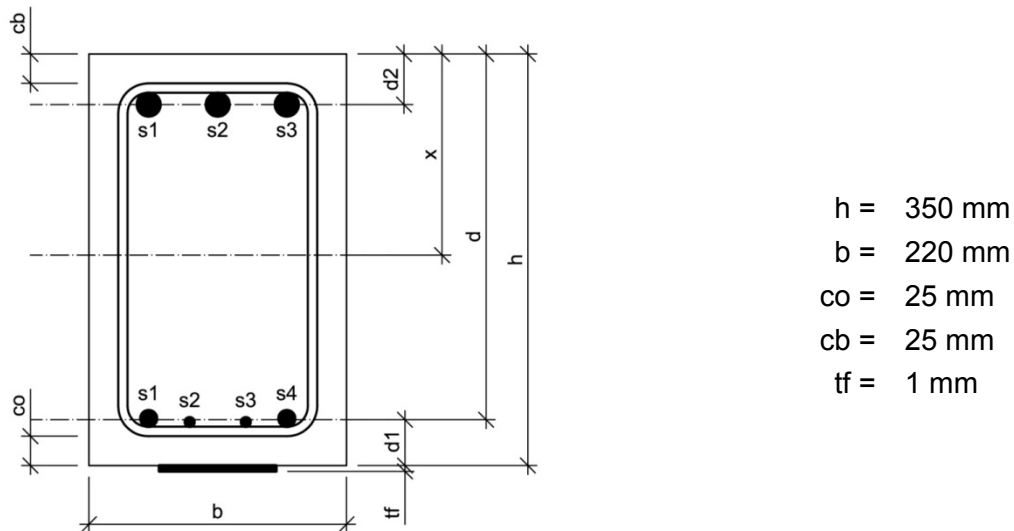
### 5.1.2 Versterkte balken

#### 5.1.2.1 Opbouw en dimensionering

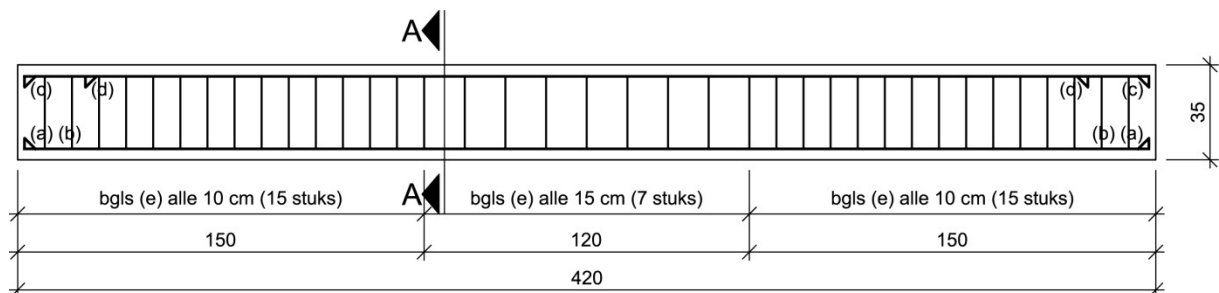
De versterkte balken zijn balken uit gewapend betonnen met opgelijmde koolstofvezelwapening en eventueel bijkomend verankerd. Onderstaande tabellen en figuren geven meer informatie over de opbouw van deze balken.

<b>Lengte</b>	4,20 m
<b>Overspanning</b>	3,60 m
<b>Breedte</b>	0,22 m (volgens het bekistingsplan)
<b>Hoogte</b>	0,35 m (volgens het bekistingsplan)
<b>Wapening</b>	Onderwapening 2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening 3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels 7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels met een tussenafstand van 15 cm 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van 10 cm

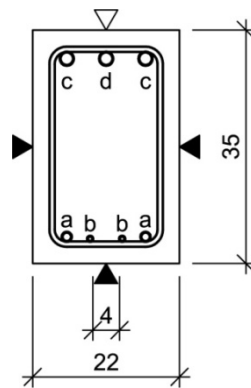
Tabel 94: Opbouw en dimensionering van de versterkte balken



Figuur 75: Dwarsdoorsnede van een versterkte balk



Figuur 76: Vooraanzicht van de wapeningskorf van een versterkte balk

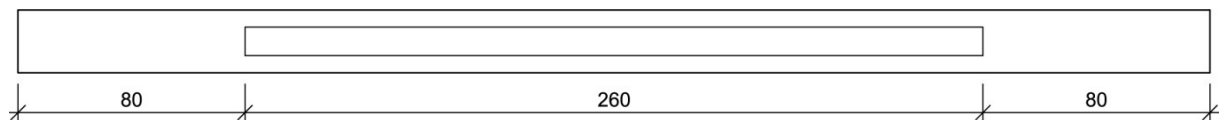


**Figuur 77: Dwarsdoorsnede A-A wapeningskorf van een versterkte balk**

Deze balken werden geprefabriceerd op 23 oktober 2007. Het gebruikte wapeningsstaal is van de kwaliteit BE500. De betoncentrale Inter-Beton nv leverde beton met de volgende karakteristieken:

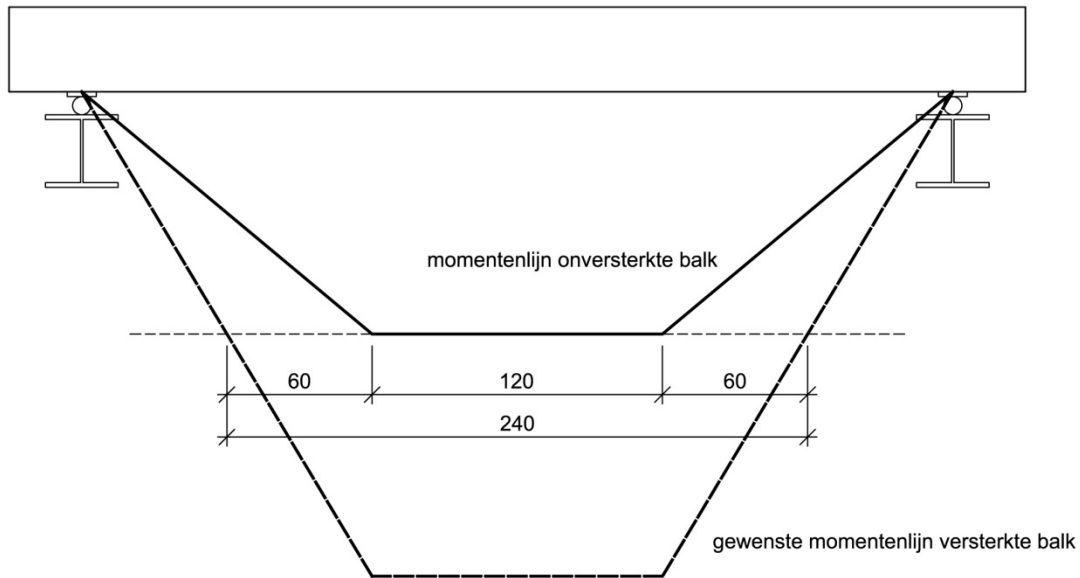
- sterkteklasse: C16/20
- omgevingsklasse: EE1
- consistentie: S3
- grootte granulaat ( $D_{max}$ ): 16 mm kalksteen
- cement CEM III/A 32,5 N LA
- hulpstof: Tixo superplastificeerder (0,5%)
- gegarandeerde verwerkingstijd: 100 minuten

De koolstofvezelwapening werd spanningloos verlijmd op 11 februari 2008. De lengte ervan bedraagt 2600 mm, de doorsnede is gelijk aan 100 mm<sup>2</sup>.



**Figuur 78: Onderaanzicht koolstofvezelwapening van een versterkte balk**

Bij de bepaling van de lengte van de koolstofvezelwapening werd uitgegaan van een verdubbeling van de momentenlijn van een onversterkte balk. **Figuur 79** verduidelijkt ietwat het rekenproces.



**Figuur 79: Bepaling van de lengte van de koolstofvezelwapening**

### 5.1.2.2 Theoretische berekeningen

Bij de onderstaande theoretische berekeningen wordt geen gebruik gemaakt van de werkelijke materiaaleigenschappen, die nadien wel bepaald werden. Verder wordt ook geen rekening gehouden met de werkelijke afmetingen van de balken, maar met de theoretische afmetingen ervan.

#### 5.1.2.2.1 UGT

Om te beginnen worden de rekenwaarden van de materiaaleigenschappen bepaald.

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,783 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{16}{1,5} = 10,667 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{cu} = 0,85 \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,85 \times \frac{16}{1,5} = 9,067 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} = \frac{2850}{1,3} = 2192,308 \frac{N}{mm^2}$$

De nuttige hoogte  $d$  is dezelfde als deze van de onversterkte balken. De koolstofvezelwapening heeft echter een grotere hefboomsarm. Deze is gelijk aan de hefboomsarm van de hoofdwapening vermeerderd met de afstand tussen de zwaartepunten van de hoofdwapening en de koolstofvezelwapening. Er dient echter wel opgemerkt te worden dat de factor  $\zeta$  enigszins wijzigt in vergelijking met een onversterkte balk. Deze waarde zal echter niet zo veel verschillen van  $\zeta_{ec}$ . Het moment wordt dan als volgt benaderd.

$$M_d = A_{s1} \times \zeta \times d \times f_{yd} + A_f \times \left( \zeta \times d + \left( h - d + \frac{t_f}{2} \right) \right) \times f_{fd}$$

$$\Leftrightarrow M_d = 409 \times 0,892 \times 311 \times 434,783 + 100 \times \left( 0,892 \times 311 + \left( 350 - 311 + \frac{1}{2} \right) \right) \times 2192,308$$

$$\Leftrightarrow M_d = 118772659 \text{ N.mm}$$

$$\Leftrightarrow M_d = 118,8 \text{ kN.m}$$

Het eigengewicht van de balk is even groot als het eigengewicht van een onversterkte balk.

$$g = 1,925 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Verder dienen ook de reactiekrachten bij de oplegpunten bepaald te worden.

$$R_d = P_d + g_d \times \frac{L}{2} = P_d + 1,35 \times g \times 2,10$$



**Figuur 80: Bepaling van de vjzjelkracht in de uiterste grenstoestand**

Tot slot wordt de vjzjelkracht  $P_d$  a.d.h.v. een momentenvergelijking berekend.

$$\sum_{x=L/2} M = 0$$

$$\Leftrightarrow M_d + P_d \times 0,6 + 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,05 - R_d \times 1,80 = 0$$

$$\Leftrightarrow M_d + P_d \times 0,6 + 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,05 - (P_d + 1,35 \times g \times 2,10) \times 1,80 = 0$$

$$\Leftrightarrow 1,20 \times P_d = M_d + 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,05 - 1,35 \times g \times 2,10 \times 1,80$$

$$\Leftrightarrow 1,20 \times P_d = M_d - 2,12625 \times g$$

$$\Leftrightarrow P_d = \frac{M_d - 2,12625 \times g}{1,20}$$

$$\Leftrightarrow P_d = \frac{118,8 - 2,12625 \times 1,925}{1,20}$$

$$\Leftrightarrow P_d = 95,6 \text{ kN}$$



In de uiterste grenstoestand wordt een maximale kracht van 95,6 kN bekomen. Deze kracht komt overeen met een moment van 118,8 kN m.

#### 5.1.2.2.2 GGT

Alvorens van start te gaan met de berekeningen in de gebruiksgrenstoestand, worden de maximale spanningen in de materialen bepaald.

$$\sigma_{s,adm} = 0,6 \times f_{yk} = 0,6 \times 500 = 300 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{c,adm} = 0,5 \times f_{ck} = 0,5 \times 16 = 8 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{f,adm} = 0,8 \times f_{fk} = 0,8 \times 2850 = 2280 \frac{N}{mm^2}$$

Het moment wordt als volgt bepaald. Er dient echter wel opgemerkt te worden dat de factor  $\zeta$  enigszins wijzigt in vergelijking met een onversterkte balk. Deze waarde zal echter niet zo veel verschillen van  $\zeta$ .

$$M = A_{s1} \times \zeta_e \times d \times \sigma_{s,adm} + A_f \times \left( \zeta_e \times d + \left( h - d + \frac{t_f}{2} \right) \right) \times \sigma_{f,adm}$$

$$\Leftrightarrow M = 409 \times 0,905 \times 311 \times 300 + 100 \times \left( 0,905 \times 311 + \left( 350 - 311 + \frac{1}{2} \right) \right) \times 2280$$

$$\Leftrightarrow M = 107688891 N.mm$$

$$\Leftrightarrow M = 107,7 kN.m$$

Het eigengewicht van de balk per lopende meter werd reeds eerder berekend.

$$g = 1,925 \frac{kN}{m}$$

Verder dienen ook de reactiekrachten bij de oplegpunten bepaald te worden.

$$R = P + g \times \frac{L}{2} = P + g \times 2,10$$



Figuur 81: Bepaling van de vjzelkracht in de gebruiksgrenstoestand

Tot slot wordt de vijzelkracht  $P$  a.d.h.v. een momentenvergelijking berekend.

$$\begin{aligned} \sum_{x=L/2} M &= 0 \\ \Leftrightarrow M + P \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - R \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow M + P \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - (P + g \times 2,10) \times 1,80 &= 0 \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P &= M + g \times 2,10 \times 1,05 - g \times 2,10 \times 1,80 \\ \Leftrightarrow 1,20 \times P &= M - 1,575 \times g \\ \Leftrightarrow P &= \frac{M - 1,575 \times g}{1,20} \\ \Leftrightarrow P &= 87,2 \text{ kN} \end{aligned}$$

In de gebruiksgrenstoestand wordt een maximale kracht van 87,2 kN bekomen. Deze kracht komt overeen met een moment van 107,7 kN m.

### 5.1.2.2.3 Bezwijkmoment

Het is eveneens mogelijk het bezwijkmoment  $M_u$  te bepalen voor een bepaalde doorsnede. Het horizontaal evenwicht vereist dat  $N_{cd} = N_{sd}$  waarbij  $N_{cd} = \psi b \xi d f_{cu}$  en  $N_{sd} = A_{s1} f_{yd} + A_f A_{fd}$ . Dit invullen in de vergelijking van het horizontaal evenwicht geeft het onderstaande resultaat.

$$\begin{aligned} N_{cd} &= N_{sd} \\ \Leftrightarrow \psi \cdot b \cdot \xi \cdot d \cdot f_{cu} &= A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot f_{fd} \\ \Leftrightarrow \xi &= \frac{A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot f_{fd}}{\psi \cdot b \cdot d \cdot f_{cu}} \end{aligned}$$

Wordt er vooropgesteld dat  $\psi = 0,81$ , dan vindt men een waarde voor  $\xi$ .

$$\xi = \frac{A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot f_{fd}}{\psi \cdot b \cdot d \cdot f_{cu}} = \frac{409 \times 434,783 + 100 \times 2192,308}{0,81 \times 220 \times 350 \times 9,067} = 0,791$$

Met deze waarde kan men een waarde vinden voor  $\mu_d$  en  $\zeta$ .

$$\mu_d = 0,429 \text{ en } \zeta = 0,671$$

Aangezien  $\mu_d \geq 0,187$  is, is inderdaad  $\psi = 0,81$ . Uitgaande van de drukzone is het bezwijkmoment gelijk aan het onderstaande resultaat.

$$\begin{aligned} M_u &= \mu_d \cdot f_{cu} \cdot b \cdot d^2 \\ \Leftrightarrow M_u &= 0,429 \times 9,067 \times 220 \times 311^2 \\ \Leftrightarrow M_u &= 82694755,75 \text{ N} \cdot \text{mm} = 82,695 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Uitgaande van de wapeningsdoorsnede krijgt men de volgende waarde.

$$M_u = A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot \zeta \cdot d + A_f \cdot f_{fd} \cdot \left( \zeta \cdot d + \left( h - d + \frac{t_f}{2} \right) \right)$$

$$\Leftrightarrow M_u = 409 \times 434,783 \times 0,671 \times 311 + 100 \times 2192,308 \times \left( 0,671 \times 311 + \left( 350 - 311 + \frac{1}{2} \right) \right)$$

$$\Leftrightarrow M_u = 91466778,16 \text{ N.mm} = 91,467 \text{ kN.m}$$

Men stelt het bezwijkmoment gelijk aan het gemiddelde van bovenstaande waarden. Het bezwijkmoment is dus gelijk aan 87,081 kN m. Tot slot wordt de kracht  $P_u$  berekend die nodig is om dit moment te bereiken. Hiervoor dient het eigengewicht van de balk en de reactiekrachten gekend te zijn.

$$g = 1,925 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$R = P_u + g \times \frac{L}{2} = P_u + g \times 2,10$$



Figuur 82: Bepaling van de vijklkracht in de bezwijktoestand

Tot slot wordt de kracht  $P_u$  a.d.h.v. een momentenvergelijking berekend.

$$\sum_{x=L/2} M = 0$$

$$\Leftrightarrow M_u + P_u \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - R \times 1,80 = 0$$

$$\Leftrightarrow M_u + P_u \times 0,6 + g \times 2,10 \times 1,05 - (P_u + g \times 2,10) \times 1,80 = 0$$

$$\Leftrightarrow 1,20 \times P_u = M_u + g \times 2,10 \times 1,05 - g \times 2,10 \times 1,80$$

$$\Leftrightarrow 1,20 \times P_u = M_u - 1,575 \times g$$

$$\Leftrightarrow P_u = \frac{87,081 - 1,575 \times 1,925}{1,20}$$

$$\Leftrightarrow P_u = 70,041 \text{ kN}$$

In de bezwijktoestand wordt een maximale kracht van 70,041 kN bereikt. Deze kracht komt overeen met een moment van 87,081 kN m.

## 5.1.2.2.4 Dwarskrachtencapaciteit

$V_{Rd1}$  is de weerstand van de betondoorsnede tegen dwarskrachten. Men is voor de rekenwaarde van deze dwarskrachtenweerstand gekomen tot de volgende experimentele formule.

$$V_{Rd1} = \left[ 0,1 \times k \times (100 \times \rho \times f_{ck})^{1/3} + 0,15 \times \sigma_{cp} \right] \times b_w \times d$$

met  $k = 1 + \sqrt{200/d}$  de invloed van  $d$  (in mm)

$\rho = \frac{A_{s1}}{b_w \times d} \leq 0,02$  het in rekening te brengen percentage van de hoofdwapening

$\sigma_{cp} = N_{pd} / A$  de spanning t.g.v. een langskracht  $N_{pd}$ , in  $N/mm^2$

$b_w$  de minimale breedte van de balk, in mm

De berekening van de dwarskrachtenweerstand van de betondoorsnede verloopt dan als volgt.

$$\begin{aligned} V_{Rd1} &= \left[ 0,1 \times k \times (100 \times \rho \times f_{ck})^{1/3} + 0,15 \times \sigma_{cp} \right] \times b_w \times d \\ \Leftrightarrow V_{Rd1} &= \left[ 0,1 \times \left( 1 + \sqrt{200/311} \right) \times \left( 100 \times \frac{409}{220 \times 311} \times 16 \right)^{1/3} \right] \times 220 \times 311 \\ \Leftrightarrow V_{Rd1} &= 26160,420 N \\ \Leftrightarrow V_{Rd1} &= 26,160 kN \end{aligned}$$

$V_{wd}$  is de weerstand van de dwarskrachtenwapening tegen dwarskrachten. De waarde voor deze weerstand wordt met de volgende formule bepaald.

$$V_{wd} = \frac{0,9 \times d \times A_{sw} \times f_{wd}}{s} = \frac{0,9 \times 311 \times 101 \times 474,783}{100} = 122809,444 N = 122,809 kN$$

De totale dwarskrachtencapaciteit varieert van 122,809 kN (waarbij het beton helemaal niet bijdraagt tot de dwarskrachtenweerstand) tot 148,970 kN (waarbij het beton 100% bijdraagt tot de dwarskrachtenweerstand).

## 5.1.2.2.5 Doorbuiging

De doorbuiging wordt zuiver theoretisch berekend. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen twee toestanden: een ongescheurde toestand, d.i. een toestand waarbij nog geen scheuren zijn, en een gescheurde toestand, waarbij het beton in de trekzone volledig gescheurd is.

5.1.2.2.5.1 *Initieel scheurmoment*

Het initieel scheurmoment wordt het eerst bepaald.

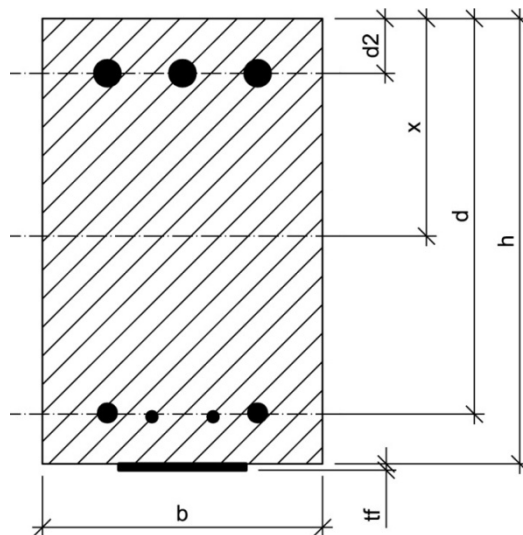
$$M_{cr} = f_{ctm} \times \frac{I_1}{v_1}$$

Voor de bepaling van het initieel scheurmoment is de betontreksterkte nodig.

$$f_{ctm} = 0,3 \times f_{ck}^{2/3} = 0,3 \times 16^{2/3} = 1,905 \frac{N}{mm^2}$$

Het traagheidsmoment van de rechthoekige doorsnede wordt als volgt berekend.

$$I_1 = \frac{b \times x^3}{3} + \frac{b \times (h-x)^3}{3} + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} \times (d-x)^2 + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times (x-d_2)^2 + \alpha_f \times A_f \times \left( h-x + \frac{t_f}{2} \right)^2$$



**Figuur 83: Traagheidsmoment van de niet-gescheurde doorsnede**

Om het traagheidsmoment te bepalen heeft men de ligging van de neutrale vezel nodig.

$$x = \frac{b \times h \times \frac{h}{2} + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} \times d + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times d_2 + \alpha_f \times A_f \times \left( h + \frac{t_f}{2} \right)}{b \times h + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} + \alpha_f \times A_f}$$

$$\text{met } \alpha_s = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000 \text{ N/mm}^2}{27402,742 \text{ N/mm}^2} = 7,299$$

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{175000 \text{ N/mm}^2}{27402,742 \text{ N/mm}^2} = 6,386$$

$$E_c = 9,5 \times (f_{ck} + 8)^{1/3} \times 10^3 = 9,5 \times (16 + 8)^{1/3} \times 10^3 = 27402,742 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Invullen van deze waarden geeft het onderstaande resultaat.

$$x = \frac{220 \times 350 \times \frac{350}{2} + (7,299 - 1) \times 409 \times 311 + (7,299 - 1) \times 942 \times 43 + 6,386 \times 100 \times \left(350 + \frac{1}{2}\right)}{220 \times 350 + (7,299 - 1) \times 409 + (7,299 - 1) \times 942 + 6,386 \times 100}$$

$$\Leftrightarrow x = 171 \text{ mm}$$

Verder is ook de afstand van de neutrale vezel tot de meest getrokken vezel nodig.

$$v_1 = h + t_f - x = 350 + 1 - 171 = 180 \text{ mm}$$

Uiteindelijk kan het traagheidsmoment berekend worden.

$$I_1 = \frac{b \times x^3}{3} + \frac{b \times (h-x)^3}{3} + (\alpha_s - 1) \times A_{s1} \times (d-x)^2 + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times (x-d_2)^2 + \left(h-x + \frac{t_f}{2}\right)^2 \times \alpha_f \times A_f$$

$$\Leftrightarrow I_1 = \frac{220 \times 171^3}{3} + \frac{220 \times (350-171)^3}{3} + (7,299-1) \times 409 \times (311-171)^2 +$$

$$(7,299-1) \times 942 \times (171-43)^2 + \left(350-171 + \frac{1}{2}\right)^2 \times 6,386 \times 100$$

$$\Leftrightarrow I_1 = 955357097 \text{ mm}^4$$

Tot slot wordt een waarde voor het initieel scheurmoment gevonden.

$$M_{cr} = f_{ctm} \times \frac{I_1}{v_1} = 1,905 \times \frac{955357097}{180} = 10125355,566 \text{ N.mm} = 10,125 \text{ kN.m}$$

5.1.2.2.5.2 Ongescheurde toestand

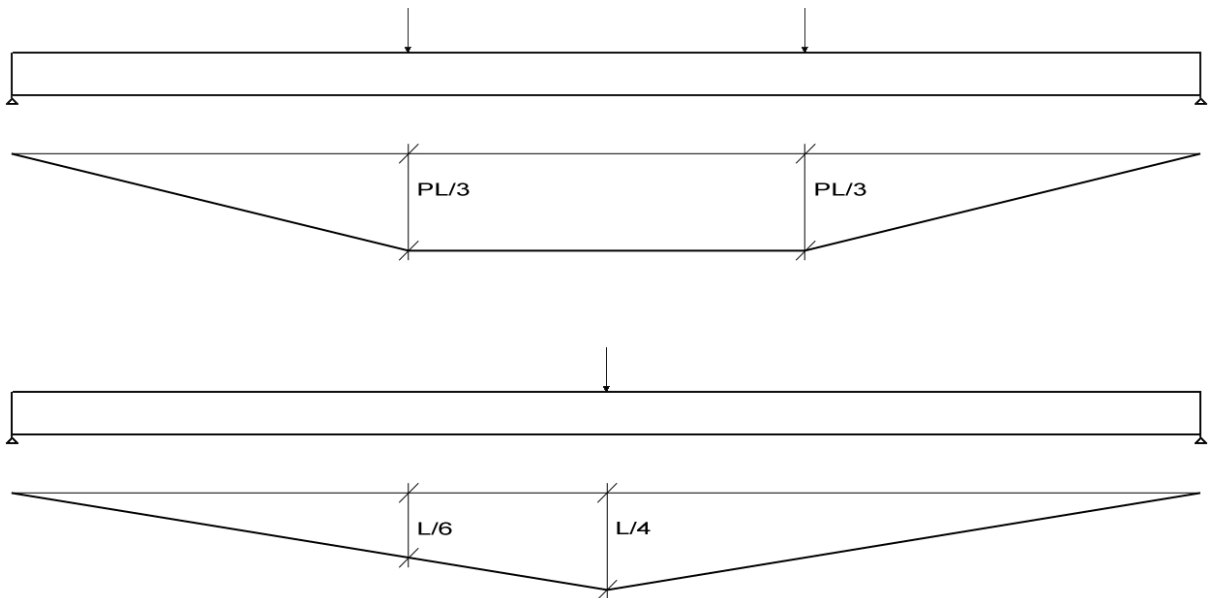
De doorbuiging in de ongescheurde toestand wordt met de onderstaande formule bepaald.

$$a = a_1 = k \times \frac{M \times L^2}{E_c \times I_1}$$

Er moet echter aan de volgende voorwaarde voldaan zijn.

$$M \leq M_{cr}$$

De coëfficiënt k kan m.b.v. de vormveranderingsarbeid bepaald worden. Voor vervorming kan benaderend berekend worden door enkel de term betreffende de buigende momenten in rekening te brengen. Dit is toegelaten, vermits een balk uit gewapend beton gezien kan worden als een tweedimensionaal staafwerk waar de belasting in hoofdzaak loodrecht op de richting van de aslijn van de staaf aangrijpt.



**Figuur 84: Momentenlijnen behorend bij de werkelijke en de fictieve belasting**

M.b.v. de tabellen van de Mohrse integralen bekomt men een waarde voor de coëfficiënt k.

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{1}{E.I} \int M.M.dx \\
 \Leftrightarrow a &= \frac{2}{E.I} \times \left( \frac{1}{3} \cdot M.M. \cdot \frac{L}{3} + \frac{1}{2} \cdot (M_{links} + M_{rechts}) \cdot M \cdot \frac{L}{6} \right) \\
 \Leftrightarrow a &= \frac{2}{E.I} \times \left( \frac{1}{3} \times \frac{L}{6} \times \frac{P.L}{3} \times \frac{L}{3} + \frac{1}{2} \times \left( \frac{L}{6} + \frac{L}{4} \right) \times \frac{P.L}{3} \times \frac{L}{6} \right) \\
 \Leftrightarrow a &= \frac{2}{E.I} \times \left( \frac{P.L^3}{162} + \frac{5.P.L^3}{432} \right) = \frac{46.P.L^3}{1296.E.I} = \frac{23.M.L^2}{216.E.I}
 \end{aligned}$$

Uit deze berekeningen volgt het onderstaande resultaat.

$$k = \frac{23}{216}$$

De elasticiteitsmodulus van het beton  $E_c$  en het traagheidsmoment  $I_1$  zijn reeds eerder berekend. De doorbuiging in de ongescheurde toestand kan uiteindelijk als volgt berekend worden.

$$a = a_1 = \frac{23}{216} \times \frac{M \times L^2}{E_c \times I_1}$$

#### 5.1.2.2.5.3 Gescheurde toestand

Van zodra aan de volgende voorwaarde voldaan is, bevindt de balk zich in een gedeeltelijk gescheurde toestand.

$$M_{cr} \leq M$$

De doorbuiging in de gescheurde toestand wordt als volgt berekend.

$$a = \chi \times a_1 + (1 - \chi) \times a_2$$

De doorbuiging  $a_1$  is gelijk aan de doorbuiging in de ongescheurde toestand. De doorbuiging  $a_2$  is deze bij een volledig gescheurd veronderstelde doorsnede.

$$a_2 = k \times \frac{M \times L^2}{E_c \times I_2}$$

De coëfficiënt  $k$  is dezelfde als deze in de ongescheurde toestand. Ook de elasticiteitsmodulus van het beton  $E_c$  behoudt dezelfde waarde. Om het traagheidsmoment  $I_2$  te bepalen, heeft men de nieuwe ligging van de neutrale vezel nodig. Die kan men als volgt berekenen.

$$x = \xi \times d = 0,259 \times 311 \text{ mm} = 80,48 \text{ mm}$$



Het traagheidsmoment zelf wordt dan op de volgende manier uitgewerkt.

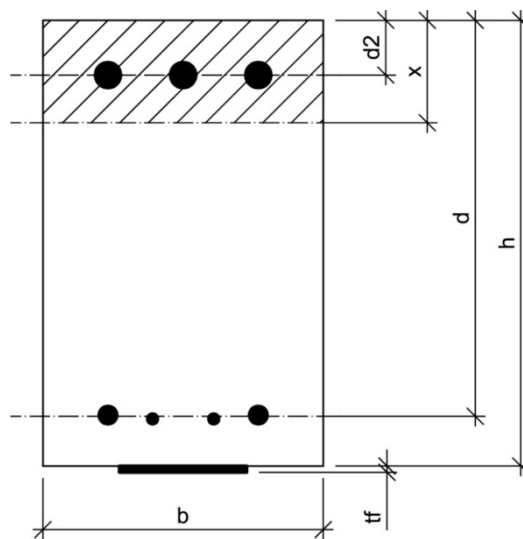
$$I_2 = \frac{b \times x^3}{3} + \alpha_s \times A_{s1} \times (d - x)^2 + (\alpha_s - 1) \times A_{s2} \times (x - d_2)^2$$

$$+ \left( h - x + \frac{t_f}{2} \right)^2 \times \alpha_f \times A_f$$

$$\Leftrightarrow I_2 = \frac{220 \times 80,481^3}{3} + 7,299 \times 409 \times (311 - 80,481)^2 + (7,299 - 1) \times 942 \times (80,481 - 43)^2$$

$$+ \left( 350 - 80,481 + \frac{1}{2} \right)^2 \times 6,386 \times 100$$

$$\Leftrightarrow I_2 = 251390957 \text{ mm}^4$$



**Figuur 85: Traagheidsmoment van de gescheurde doorsnede**

De coëfficiënt  $\chi$  berekent men als volgt.

$$\chi = \beta_1 \times \beta_2 \times \left( \frac{M_{cr}}{M} \right)^2$$

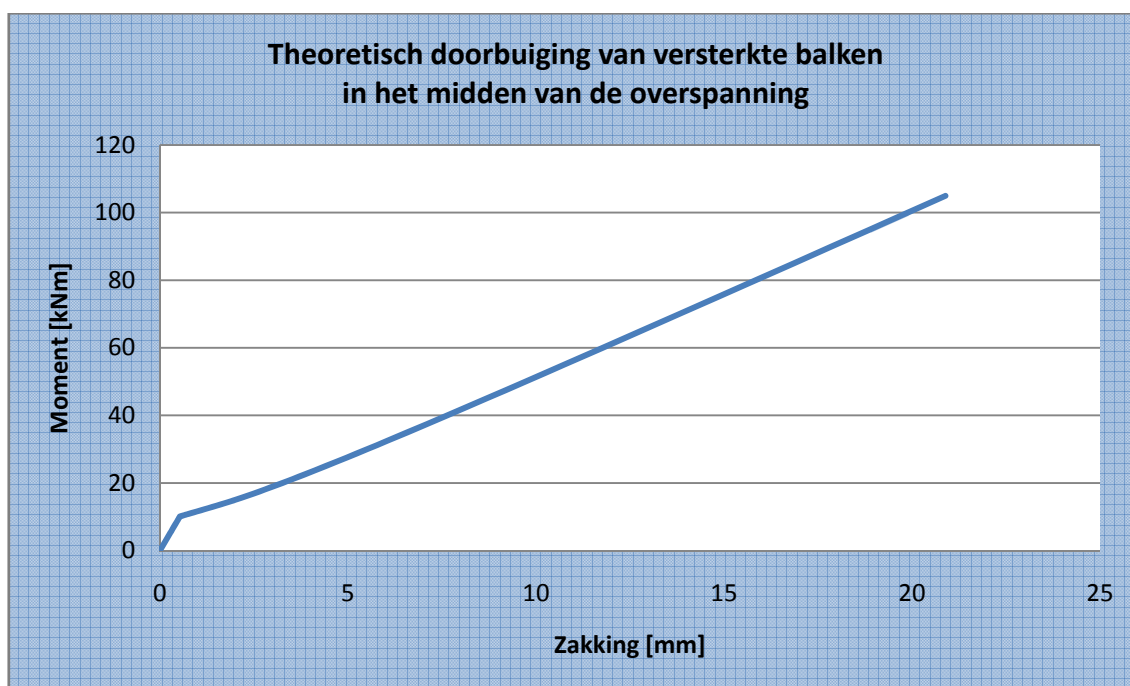
met  $\beta_1 = 1$  voor staven met een verbeterde hechting

$\beta_2 = 1$  voor een kortstondige of éénmalige belasting

**Tabel 95** toont de berekende waarden van de theoretische doorbuiging.

moment [kN m]	$\chi$	$1-\chi$	$a_1$ [mm]	$a_2$ [mm]	$a$ [mm]
0,000			0,000		0,000
5,000			0,264		0,264
10,000			0,527		0,527
10,125	1,000	0,000	0,534	2,028	0,534
15,000	0,456	0,544	0,791	3,005	1,996
20,000	0,256	0,744	1,054	4,007	3,250
25,000	0,164	0,836	1,318	5,008	4,403
30,000	0,114	0,886	1,581	6,010	5,505
35,000	0,084	0,916	1,845	7,011	6,579
40,000	0,064	0,936	2,109	8,013	7,635
45,000	0,051	0,949	2,372	9,015	8,678
50,000	0,041	0,959	2,636	10,016	9,714
55,000	0,034	0,966	2,899	11,018	10,743
60,000	0,028	0,972	3,163	12,020	11,767
65,000	0,024	0,976	3,426	13,021	12,788
70,000	0,021	0,979	3,690	14,023	13,807
75,000	0,018	0,982	3,953	15,024	14,823
80,000	0,016	0,984	4,217	16,026	15,837
85,000	0,014	0,986	4,481	17,028	16,850
90,000	0,013	0,987	4,744	18,029	17,861
95,000	0,011	0,989	5,008	19,031	18,872
100,000	0,010	0,990	5,271	20,033	19,881
105,000	0,009	0,991	5,535	21,034	20,890

Tabel 95: Cijferwaarden theoretische doorbuiging van de versterkte balken



Grafiek 45: Theoretische doorbuiging van versterkte balken in het midden van de overspanning

5.1.2.2.6 Rek in de koolstofvezelwapening

De theoretische berekening van de rek in het midden van de koolstofvezelwapening verloopt als volgt.

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad \text{en} \quad M = \frac{P \times L}{3}$$

$$\Leftrightarrow \sigma = \frac{P \times L \times v}{3 \times I}$$

$$\Leftrightarrow \varepsilon = \frac{P \times L \times v}{3 \times E \times I}$$

Op andere plaatsen dient het moment op die respectievelijke plaatsen in rekening gebracht te worden.

$$\varepsilon = \frac{M \times v}{E \times I}$$

Ook bij deze berekeningen dient een onderscheid gemaakt te worden tussen een niet-gescheurde en een gescheurde toestand. **Tabel 96** geeft een overzicht van de waarden van de verschillende grootheden die nodig zijn bij de berekening van de rek in de koolstofvezelwapening, en dit zowel voor een niet-gescheurde als een gescheurde toestand.

	Niet-gescheurde toestand	Gescheurde toestand
<b>E [N/mm<sup>2</sup>]</b>	30 618,540	41 014,616
<b>I [mm<sup>4</sup>]</b>	955 357 097	251 390 957
<b>v [mm]</b>	180	271

**Tabel 96: Grootheden in niet-gescheurde en in gescheurde toestand**

De elasticiteitsmoduli zijn een gewogen gemiddelde van de elasticiteitsmoduli van het beton, het staal en de koolstofvezelwapening.

De rek in de gescheurde toestand wordt als volgt berekend.

$$\varepsilon = \chi \times \varepsilon_1 + (1 - \chi) \times \varepsilon_2$$

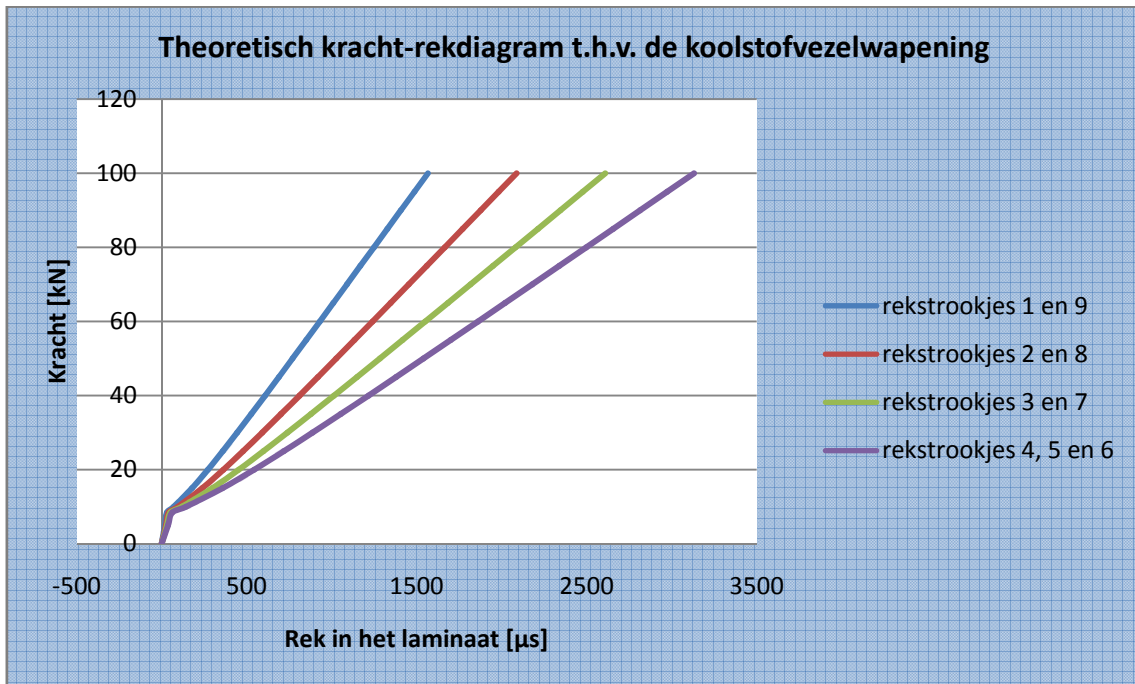
De rek  $\varepsilon_1$  is gelijk aan de rek in de niet-gescheurde toestand. De rek  $\varepsilon_2$  is deze bij een volledig gescheurde doorsnede. De coëfficiënt  $\chi$  wordt op dezelfde manier als bij de berekening van de doorbuiging berekend.

**Tabel 97** toont de berekende waarden van de theoretische rek in de koolstofvezelwapening.

		Positie [mm]								
		600	800	1000	1200	1800	2400	2600	2800	3000
M	kracht	rekstrookje 1	rekstrookje 2	rekstrookje 3	rekstrookje 4	rekstrookje 5	rekstrookje 6	rekstrookje 7	rekstrookje 8	rekstrookje 9
[kN.m]	[kN]	[ $\mu$ s]	[ $\mu$ s]	[ $\mu$ s]	[ $\mu$ s]	[ $\mu$ s]	[ $\mu$ s]	[ $\mu$ s]	[ $\mu$ s]	[ $\mu$ s]
0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	5	18,4	24,6	30,7	36,9	36,9	36,9	30,7	24,6	18,4
10,125	8,438	31,1	41,5	51,8	62,2	62,2	62,2	51,8	41,5	31,1
12	10	71,6	95,5	119,3	143,2	143,2	143,2	119,3	95,5	71,6
18	15	178,9	238,5	298,2	357,8	357,8	357,8	298,2	238,5	178,9
24	20	271,9	362,6	453,2	543,9	543,9	543,9	453,2	362,6	271,9
30	25	359,2	479,0	598,7	718,4	718,4	718,4	598,7	479,0	359,2
36	30	443,7	591,5	739,4	887,3	887,3	887,3	739,4	591,5	443,7
42	35	526,4	701,9	877,4	1052,9	1052,9	1052,9	877,4	701,9	526,4
48	40	608,2	811,0	1013,7	1216,4	1216,4	1216,4	1013,7	811,0	608,2
54	45	689,3	919,1	1148,9	1378,6	1378,6	1378,6	1148,9	919,1	689,3
60	50	769,9	1026,6	1283,2	1539,9	1539,9	1539,9	1283,2	1026,6	769,9
66	55	850,2	1133,6	1417,0	1700,4	1700,4	1700,4	1417,0	1133,6	850,2
72	60	930,2	1240,3	1550,4	1860,4	1860,4	1860,4	1550,4	1240,3	930,2
78	65	1010,0	1346,7	1683,4	2020,1	2020,1	2020,1	1683,4	1346,7	1010,0
84	70	1089,7	1452,9	1816,1	2179,4	2179,4	2179,4	1816,1	1452,9	1089,7
90	75	1169,2	1558,9	1948,7	2338,4	2338,4	2338,4	1948,7	1558,9	1169,2
96	80	1248,6	1664,8	2081,1	2497,3	2497,3	2497,3	2081,1	1664,8	1248,6
102	85	1328,0	1770,6	2213,3	2655,9	2655,9	2655,9	2213,3	1770,6	1328,0
108	90	1407,2	1876,3	2345,4	2814,5	2814,5	2814,5	2345,4	1876,3	1407,2
114	95	1486,5	1981,9	2477,4	2972,9	2972,9	2972,9	2477,4	1981,9	1486,5
120	100	1565,6	2087,5	2609,4	3131,2	3131,2	3131,2	2609,4	2087,5	1565,6

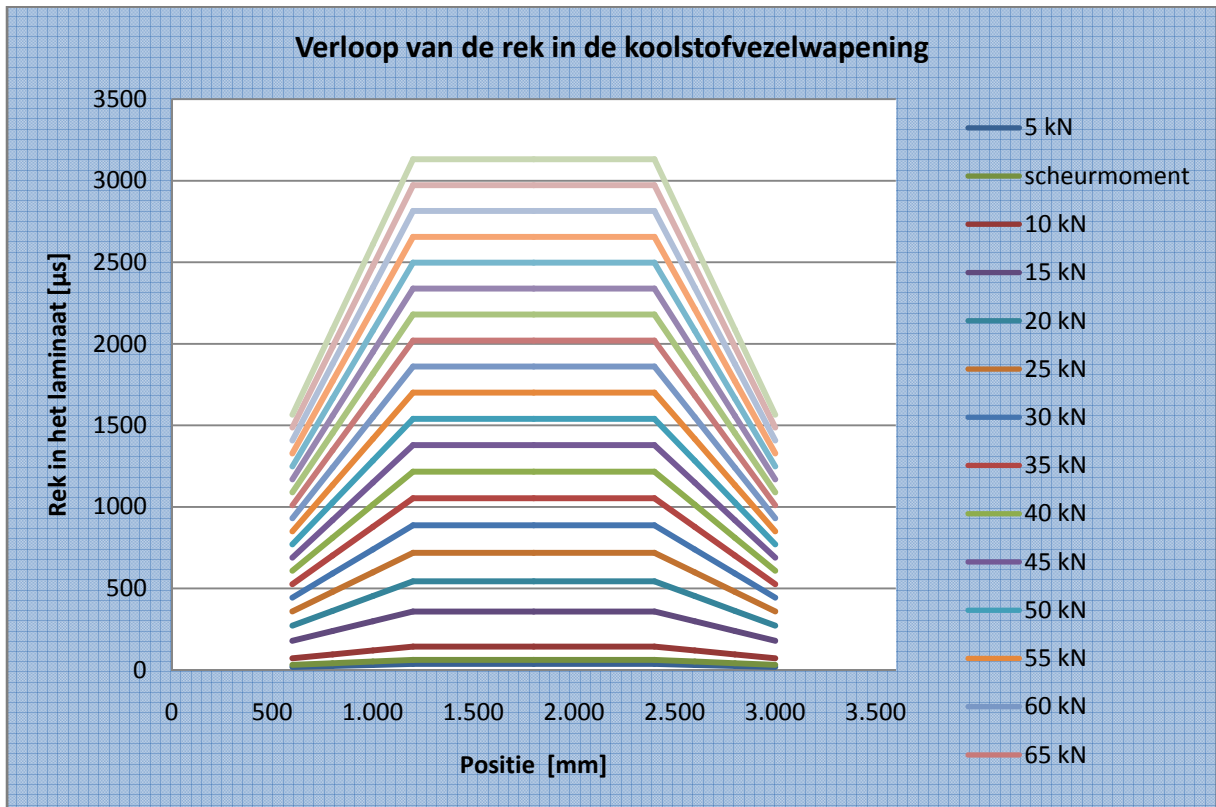
**Tabel 97: Theoretische rek in de koolstofvezelwapening**

Grafiek 46 geeft de waarden van Tabel 97 grafisch weer.



Grafiek 46: Theoretisch kracht-rekdiagram t.h.v. de koolstofvezelwapening

Grafiek 47 toont het verloop van de rek bij een stijgende belasting over de volledige overspanning.



Grafiek 47: Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening

### 5.1.2.2.7 Breukmechanismen

Zowel de breukmechanismen volgens CUR Aanbeveling 91 als volgens FIB Bulletin 14 worden in beschouwing genomen.

#### 5.1.2.2.7.1 Volgens CUR Aanbeveling 91

De CUR Aanbeveling 91 gaat uit van een initiële rek, d.i. de rek in het beton ter plaatse van de koolstofvezelwapening op het moment van aanbrengen van de koolstofvezelwapening. Deze initiële rek wordt gelijk aan nul gesteld, vermits de koolstofvezelwapening bij een nullast is verlijmd.

Met betrekking tot het verlies van composietwerking dienen 3 breukmechanismen gecontroleerd te worden:

- onthechting bij dwarskrachtscheuren;
- onthechting door hoge schuifspanningen;
- eindverankering-dwarskrachtenbreuk (d.i. concrete rip-off).

#### 5.1.2.2.7.1.1 Onthechting bij dwarskrachtscheuren

Deze methode gaat ervan uit dat het beton zich aan weerszijden van een verticale scheur vertikaal verplaatst, waardoor een trekspanning loodrecht op de koolstofvezelwapening tot onthechting kan leiden. Voor dit mechanisme wordt gebruik gemaakt van een empirisch afgeleide formule. Bij de afleiding van deze formule is echter geen rekening gehouden met de beugelwapening. Aangezien de balken sterk gewapend zijn tegen dwarskrachtscheuren, zal men een onrealistisch resultaat bekomen.

Onthechting bij dwarskrachtscheuren zal optreden indien de dwarskrachten de onderstaande waarde bereiken.

$$V_{d,\max} = V_{odu} = \tau_{odu} \times b \times d$$

met  $V_{d,\max}$  = de maximale waarde voor de dwarskracht in het gebied waar de koolstofvezelwapening aanwezig is

$b$  = de breedte van de betondoorsnede

$d$  = de nuttige hoogte van de betondoorsnede

$\tau_{odu}$  = de uiterst opneembare schuifspanning m.b.t. tot dit breukmechanisme

De uiterst opneembare schuifspanning m.b.t. tot onthechting bij dwarskrachtscheuren  $\tau_{odu}$  valt te berekenen met de onderstaande formule.

$$\tau_{odu} = \frac{\tau_{odrep}}{\gamma_m}$$

$$\text{met } \tau_{odrep} = 0,38 + 1,51 \rho_{eq}$$

$$\gamma_m = 1,4$$

$$\rho_{eq} = \text{het equivalente wapeningspercentage}$$

Het equivalente wapeningspercentage wordt als volgt berekend.

$$\begin{aligned} \rho_{eq} &= \rho_s + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_s} \\ \Leftrightarrow \rho_{eq} &= \frac{A_{s1}}{b \cdot d} + \frac{A_f}{b \cdot h} \cdot \frac{E_f}{E_s} \\ \Leftrightarrow \rho_{eq} &= \frac{409}{220 \times 311} + \frac{100}{220 \times 350} \times \frac{175000}{200000} \\ \Leftrightarrow \rho_{eq} &= 0,712\% \end{aligned}$$

Uiteindelijk wordt voor de dwarskracht  $V_{odu}$  het onderstaande resultaat bekomen.

$$\begin{aligned} V_{odu} &= \tau_{odu} \times b \times d \\ \Leftrightarrow V_{odu} &= \frac{\tau_{odrep}}{\gamma_m} \times b \times d \\ \Leftrightarrow V_{odu} &= \frac{0,38 + 1,51 \cdot \rho_{eq}}{\gamma_m} \times b \times d \\ \Leftrightarrow V_{odu} &= \frac{0,38 + 1,51 \times 0,712}{1,4} \times 220 \times 311 \\ \Leftrightarrow V_{odu} &= 71047,937 N \\ \Leftrightarrow V_{odu} &= 71,048 kN \end{aligned}$$

Het is gekend dat de dwarskracht tijdens een vierpuntsbuigproef gelijk is aan de reactiekracht. Bijgevolg is uit de bovenstaande dwarskracht eenvoudig het corresponderende moment te berekenen. Hierbij wordt echter geen rekening gehouden met het eigengewicht.

$$M = \frac{P \times L}{3} = \frac{71,048 \times 3,6}{3} = 85,258 kN.m$$

### 5.1.2.2.7.1.2 Onthechting door hoge schuifspanningen

In verband met beperking van de schuifspanning tussen beton en koolstofvezelwapening moet voor doorsneden waarin de hoofdwapening in de uiterste grenstoestand vloeit, worden voldaan aan de volgende voorwaarde.

$$V_{de} \leq V_{osu} = \tau_{osu} \cdot z_r \cdot b_f$$

met  $V_{osu}$  = de uiterst opneembare dwarskracht m.b.t. onthechting door hoge schuifspanningen

$\tau_{osu}$  = de uiterst opneembare schuifspanning m.b.t. tot onthechting door hoge schuifspanningen

$z_r$  = de hefboomsarm voor de resulterende trekkracht van de inwendige wapening en de uitwendige koolstofvezelwapening

$b_f$  = de breedte van de koolstofvezelwapening

Als benadering voor de hefboomsarm mag  $z_r = 0,95 d$  worden aangehouden.

De uiterst opneembare schuifspanning m.b.t. tot onthechting door hoge schuifspanningen  $\tau_{osu}$  valt te berekenen met de onderstaande formule.

$$\tau_{osu} = \frac{\tau_{osrep}}{\gamma_m}$$

met  $\tau_{osrep} = 1,8 f_{hrep}$

$\gamma_m = 1,4$

Voor  $f_{hrep}$  mag 0,7 maal de experimenteel bepaalde gemiddelde waarde voor de hechtsterkte worden aangehouden. Bij een goede voorbereiding van het betonoppervlak zal de hechtsterkte gelijk zijn aan de betontreksterkte. De werkelijke hechtsterkte dient tijdens de uitvoering bepaald te worden. In deze berekeningen wordt uitgegaan van een hechtsterkte gelijk aan de betontreksterkte.

Uiteindelijk wordt voor de dwarskracht  $V_{osu}$  het onderstaande resultaat gevonden.



$$\begin{aligned}
 V_{osu} &= \tau_{osu} \cdot z_r \cdot b_f \\
 \Leftrightarrow V_{osu} &= \frac{\tau_{osrep}}{\gamma_m} \cdot z_r \cdot b_f \\
 \Leftrightarrow V_{osu} &= \frac{1,8 \times 0,7 \times f_{ctm}}{1,4} \times 0,95 \times d \times b_f \\
 \Leftrightarrow V_{osu} &= \frac{1,8 \times 0,7 \times 1,905}{1,4} \times 0,95 \times 311 \times 100 \\
 \Leftrightarrow V_{osu} &= 50609,149 N = 50,609 kN
 \end{aligned}$$

Het is gekend dat de dwarskracht tijdens een vierpuntsbuigproef gelijk is aan de reactiekracht. Bijgevolg is uit de bovenstaande dwarskracht eenvoudig het corresponderende moment te berekenen. Hierbij wordt echter geen rekening gehouden met het eigengewicht.

$$M = \frac{P \times L}{3} = \frac{50,609 \times 3,6}{3} = 60,731 kN.m$$

#### 5.1.2.2.7.1.3 Eindverankering-dwarskrachtenbreuk

Voor beëindiging van een versterking in het veld bij een eindsteunpunt moet het mechanisme voor eindverankering-dwarskrachtenbreuk voldoen aan de volgende voorwaarden.

$$V_{du} \leq V_{ouu} = \tau_{ouu} \cdot b \cdot d \text{ en } \lambda_v > 1 + \frac{L'}{d}$$

met  $V_{du}$  = de dwarskracht in de doorsnede op een afstand  $d$  van het einde van de koolstofvezelwapening bij een eindoplegging

$V_{ouu}$  = de uiterst opneembare dwarskracht m.b.t. een eindverankering-dwarskrachtenbreuk

$b$  = de breedte van de betondoorsnede

$d$  = de nuttige hoogte van de betondoorsnede

$\tau_{ouu}$  = de uiterst opneembare schuifspanning m.b.t. een eindverankering-dwarskrachtenbreuk

$\lambda_v$  = de dwarskrachtsslankheid

$L'$  = de afstand tussen het einde van de koolstofvezelwapening en de dagmaat van de oplegging in mm

De uiterst opneembare schuifspanning m.b.t. dit breukmechanisme  $\tau_{ouu}$  wordt als volgt berekend.

$$\tau_{ouu} = \frac{\tau_{ourep}}{\gamma_m} \text{ waarbij } \tau_{ourep} = \frac{k_3 \cdot f_b \cdot \sqrt{\rho_s}}{\sqrt[4]{L'}}$$

met  $\tau_{ourep}$  = de representatieve waarde voor de uiterst opneembare schuifspanningen  
m.b.t. een eindverankering-dwarskrachtenbreuk

$$k_3 = 4 \text{ mm}^{0,25}$$

$f_b$  = de rekenwaarde voor de betontreksterkte

$$\gamma_m = 1,4$$

Uiteindelijk wordt voor de dwarskracht  $V_{ouu}$  het onderstaande resultaat gevonden.

$$\begin{aligned} V_{ouu} &= \tau_{ouu} \cdot b \cdot d \\ \Leftrightarrow V_{ouu} &= \frac{\tau_{ourep}}{\gamma_m} \cdot b \cdot d \\ &= \frac{k_3 \cdot f_b \cdot \sqrt{\rho_s}}{\gamma_m \cdot \sqrt[4]{L'}} \cdot b \cdot d \\ \Leftrightarrow V_{ouu} &= \frac{k_3 \times 0,7 \times f_{cm} \times \sqrt{\frac{A_{s1}}{b \cdot d}}}{\gamma_m \cdot \sqrt[4]{L'}} \cdot b \cdot d \\ \Leftrightarrow V_{ouu} &= \frac{4 \times 0,7 \times 1,905 \times \sqrt{\frac{409}{220 \times 311}}}{1,4 \cdot \sqrt[4]{500}} \times 220 \times 350 \\ \Leftrightarrow V_{ouu} &= 42601,599 \text{ N} = 42,602 \text{ kN} \end{aligned}$$

Het is gekend dat de dwarskracht tijdens een vierpuntsbuigproef gelijk is aan een reactiekracht. Bijgevolg is uit de bovenstaande dwarskracht eenvoudig het corresponderende moment te berekenen. Hierbij wordt echter geen rekening gehouden met het eigengewicht.

$$M = \frac{P \times L}{3} = \frac{42,602 \times 3,6}{3} = 51,122 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

5.1.2.2.7.2 Volgens FIB Bulletin 14

Volgens FIB Bulletin 14 kunnen breukmechanismen in 2 klassen ingedeeld worden, namelijk deze waarbij de volledige samenwerking tussen het beton en de koolstofvezelwapening behouden blijft tot het beton in de drukzone het begeeft of de koolstofvezelwapening breekt door te hoge trekspanningen en deze waarbij de samenwerking tussen het beton en de koolstofvezelwapening eerder verloren gaat.

5.1.2.2.7.2.1 Full composite action

5.1.2.2.7.2.1.1 Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton

Breuk kan optreden door vloeien van het staal, gevolgd door verbrijzeling van beton, terwijl de koolstofvezelwapening intact blijft. Dit breukmechanisme is het meest gewenste breukmechanisme. Om te beginnen wordt de ligging van de neutrale vezel berekend.

$$0,85 \times \psi \times f_{cd} \times b \times x + A_{s2} \times E_s \times \varepsilon_{s2} = A_{s1} \times f_{yd} + A_f \times E_{fu} \times \varepsilon_f$$

met  $\psi = 0,8$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad E_s \varepsilon_{s2} \text{ mag echter } f_{yd} \text{ niet overschrijden}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0$$

$$\varepsilon_{cu} = 0,0035 \quad \varepsilon_{cu} \text{ is de maximaal opneembare stuik van het beton}$$

Er wordt echter aangenomen dat de neutrale vezel op dezelfde hoogte ligt zoals reeds eerder berekend is.

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} = 0,0035 \times \frac{80 - 43}{80} = 0,001630$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 = 0,0035 \times \frac{350 - 80}{80} - 0 = 0,011721$$

Met deze gegevens kan het moment berekend worden.

$$M_{Rd} = A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot (d - \delta_G \cdot x) + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (h - \delta_G \cdot x) + A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} \cdot (\delta_G \cdot x - d_2)$$

$$\Leftrightarrow M_{Rd} = 409 \times 434,783 \times (311 - 0,4 \times 80) + 100 \times 175000 \times 0,011721 \times (350 - 0,4 \times 80) + 942 \times 200000 \times 0,001630 \times (0,4 \times 80 - 43)$$

$$\Leftrightarrow M_{Rd} = 111401357,152 \text{ N.mm} = 111,401 \text{ kN.m}$$

Opdat de bovenstaande vergelijkingen geldig zouden zijn, moet aan 2 voorwaarden voldaan zijn.

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d-x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s}$$

$$\Leftrightarrow \varepsilon_{s1} = 0,0035 \times \frac{311-80}{80} = 0,010014 \geq \frac{434,783}{200000} = 0,002174$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h-x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fud} = \frac{f_{fd}}{E_f}$$

$$\Leftrightarrow \varepsilon_f = 0,011721 \leq \varepsilon_{fud} = \frac{2192,308}{175000} = 0,012527$$

Aan beide voorwaarden is voldaan.

5.1.2.2.7.2.1.2 Vloeien van het staal gevolgd door breuk in de koolstofvezelwapening  
Indien slechts kleine hoeveelheden staal en koolstofvezelwapening gebruikt worden, is het mogelijk dat breuk optreedt door vloeien van het staal gevolgd door breuk in de koolstofvezelwapening. Theoretisch is dit breukmechanisme dus mogelijk. Er wordt echter aangenomen dat in dit geval onthechting eerder zal optreden dan breuk in de koolstofvezelwapening.

5.1.2.2.7.2.1.3 Verbrijzeling van het beton  
Indien grote hoeveelheden staal en koolstofvezelwapening gebruikt worden, is het mogelijk dat breuk optreedt door het begeven van het beton in de drukzone. Door de grote hoeveelheid drukwapening echter zal dit breukmechanisme waarschijnlijk niet als eerste optreden.

#### 5.1.2.2.7.2.2 *Loss of composite action*

Volgens FIB Bulletin 14 kan onthechting op verschillende plaatsen voorkomen.

- onthechting in het beton t.h.v. een verzwakte laag
- onthechting in de epoxylijm
- onthechting in het contactvlak tussen het beton en de epoxylijm of tussen de epoxylijm en de koolstofvezelwapening
- onthechting binnen de koolstofvezelwapening

Het meest optredende breukmechanisme zou onthechting zijn waarbij nog steeds een dun laagje beton aan de koolstofvezelwapening hangt. Een ander mogelijk breukmechanisme is concrete rip-off. De verdere berekeningen houden enkel met deze laatste breukmechanismen rekening.

#### 5.1.2.2.7.2.2.1 Peeling-off caused at shear cracks

Dwarskrachtenscheuren zijn verantwoordelijk voor zowel horizontale als verticale scheuropeningen, die tot peeling van de koolstofvezelwapening kunnen leiden. Peeling veroorzaakt door dwarskrachtenscheuren kan voorkomen worden door de dwarskrachten te beperken tot de dwarskrachtenweerstand  $V_{Rd1}$ . Deze dwarskrachtenweerstand wordt echter op een andere manier berekend dan zoals eerder is gedaan. Ze wordt berekend zoals aangegeven in Eurocode 2, met de onderstaande wijzigingen.

$$\tau_{Rk} = 0,15 \times f_{ck}^{1/3}$$

$$\rho_{eq} = \frac{A_s + A_f \cdot \frac{E_f}{E_s}}{b \cdot d}$$

De dwarskrachtenweerstand wordt volgens Eurocode 2 m.b.v. de onderstaande formule berekend.

$$V_{Rd1} = \tau_{Rk} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \kappa \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_{eq}) \cdot b_w \cdot d$$

met  $\beta_1 = 1$ , uitgezonderd voorgespannen beton

$$\beta_2 = V_d / V_{dred}$$

$V_{dred}$  = gereduceerde dwarskracht t.h.v. een puntlast op een afstand  $a < 2 \cdot d$  van de opleg

$\kappa = 1,6 - d$  (in m), groter dan of gelijk aan 1

$b_w$  = minimale breedte van de balk

$d$  = nuttige hoogte

Invullen van alle waarden geeft het volgende resultaat.

$$V_{Rd1} = \tau_{Rk} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \kappa \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_{eq}) \cdot b_w \cdot d$$

$$\Leftrightarrow V_{Rd1} = 0,15 \times f_{ck}^{1/3} \times \beta_1 \times \beta_2 \times (1,6 - d) \times \left( 1,2 + 40 \times \frac{A_s + A_f \times \frac{E_f}{E_s}}{b \times d} \right) \times b_w \times d$$

$$\Leftrightarrow V_{Rd1} = 0,15 \times 16^{1/3} \times 1 \times 1 \times (1,6 - 0,311) \times \left( 1,2 + 40 \times \frac{409 + 100 \times \frac{175000}{200000}}{220 \times 311} \right) \times 220 \times 311$$

$$\Leftrightarrow V_{Rd1} = 49654,463 N = 49,654 kN$$

Het is gekend dat de dwarskracht tijdens een vierpuntsbuigproef gelijk is aan de reactiekracht. Bijgevolg is uit de bovenstaande dwarskracht eenvoudig het corresponderende moment te berekenen. Hierbij wordt echter geen rekening gehouden met het eigengewicht.

$$M = \frac{P \times L}{3} = \frac{49,654 \times 3,6}{3} = 59,585 kN.m$$

5.1.2.2.7.2.2.2 Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks

Peeling aan de eindverankering en bij buigingsscheuren kan op verschillende manieren behandeld worden.

5.1.2.2.7.2.2.2.1 Verification of end anchorage, strain limitation in the FRP

Een eerste aanpak om peeling te voorkomen is het opleggen van een beperking voor de rek in de koolstofvezelwapening in de uiterste grenstoestand. Meestal wordt de rek  $\varepsilon_f$  beperkt tot een bepaalde waarde  $\varepsilon_{f,lim}$  gaande van 0,0065 tot 0,0085. Bijkomend dient de eindverankering gecontroleerd te worden. In dit geval wordt de eindverankering gecontroleerd volgens het model van Holzenkämpfer. Dit model geeft waarden voor de maximale kracht  $N_{fa,max}$  in de koolstofvezelwapening die verankerd kan worden en voor de maximale verankeringslengte  $l_{b,max}$ .

$$N_{fa,max} = \alpha \cdot c_1 \cdot k_c \cdot k_b \cdot b \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ctm}}$$

$$l_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{c_2 \cdot f_{ctm}}}$$

$\alpha$  een reductiefactor is die de invloed van dwarskrachtscheuren op de weerstand tegen buiging in rekening brengt. Voor balken met voldoende dwarskrachtenwapening geldt  $\alpha = 1$ .  $k_c$  is een factor die de mate van verdichting van het beton aangeeft. Vermits de balken in dit geval in ideale omstandigheden geproduceerd zijn, mag  $k_c$  gelijk gesteld worden aan 1.  $k_b$  is een geometrische factor.

$$k_b = 1,06 \cdot \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1$$

De constanten  $c_1$  en  $c_2$  kunnen experimenteel bepaald worden. Voor koolstofvezelwapening zijn  $c_1$  en  $c_2$  respectievelijk gelijk aan 0,64 en 2.

Na invullen van alle waarden worden de onderstaande resultaten bekomen.

$$N_{fa,max} = \alpha \cdot c_1 \cdot k_c \cdot k_b \cdot b \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ctm}}$$

$$\Leftrightarrow N_{fa,max} = \alpha \cdot c_1 \cdot k_c \cdot 1,06 \cdot \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \cdot b \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ctm}}$$

$$\Leftrightarrow N_{fa,max} = 1 \times 0,64 \times 1 \times 1,06 \times \sqrt{\frac{2 - \frac{100}{220}}{1 + \frac{100}{400}}} \times 220 \times \sqrt{175000 \times 1 \times 1,905}$$

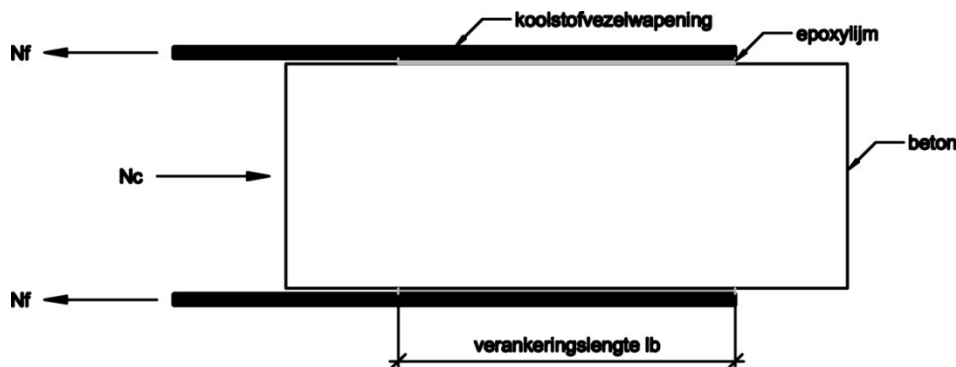
$$\Leftrightarrow N_{fa,max} = 95815,244N = 95,815kN$$

$$l_{b,\max} = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{c_2 \cdot f_{cm}}} = \sqrt{\frac{175000 \times 1}{2 \times 1,905}} = 214 \text{ mm}$$

Indien de verankeringslengte  $l_b$  kleiner is dan  $l_{b,\max}$ , dan wordt de maximale bindingskracht als volgt berekend.

$$N_{fa} = N_{fa,\max} \cdot \frac{l_b}{l_{b,\max}} \cdot \left( 2 - \frac{l_b}{l_{b,\max}} \right)$$

De verankeringslengte  $l_b$  kan geanalyseerd worden door bindingstesten, zoals getoond in **Figuur 86** in vereenvoudigde vorm.



**Figuur 86: Verankeringslengte  $l_b$**

Aangezien de bindingslengte niet gekend is, worden bovenstaande waarden enkel als illustratie meegegeven.

#### 5.1.2.2.7.2.2.2.2 Verification according to the envelope line of tensile stresses in the FRP

Deze aanpak behandelt peeling op het einde en op elk willekeurig punt van het scheidingsvlak tussen het beton en de koolstofvezelwapening op een gelijkaardige manier. Het grote voordeel van deze methode is dat peeling op het einde en bij buigings scheuren met hetzelfde model behandeld worden, terwijl de complexiteit van deze methode het grootste nadeel is. Deze complexiteit maakt het moeilijk deze methode als een praktisch ingenieursmodel toe te passen. Bijgevolg wordt deze aanpak buiten beschouwing gelaten.

#### 5.1.2.2.7.2.2.2.3 Verification of end anchorage and of force transfer at the FRP/concrete interface

Ook deze aanpak bestaat uit 2 stappen. De eerste stap heeft betrekking op de eindverankering, zoals in **5.1.2.2.7.2.2.2.1**. In de tweede stap wordt nagegaan of de schuifspanning  $\tau_b$  tussen het beton en de koolstofvezelwapening een beperking kent. Beschouwt men 2 doorsneden, onderworpen aan de momenten  $M_d$  en  $M_d + \Delta M_d$ , gelegen op een afstand  $\Delta x$  van elkaar, dan wordt de schuifspanning  $\tau_b$  volgens de onderstaande formule berekend.

$$\tau_b = \frac{\Delta N_{fd}}{b_f \cdot \Delta x}$$

$\Delta N_{fd}$  is het verschil in trekkracht in de koolstofvezelwapening tussen de verschillende doorsneden.

De schuifspanning  $\tau_b$  dient beperkt te worden tot de design bond shear strength, die in de meeste gevallen gelijk is aan de bond shear strength  $f_{cbd}$  van beton.

$$f_{cbd} = 1,8 \times \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}$$

In dit geval wordt  $f_{cbd}$  berekend met de gemiddelde betontreksterkte.

$$f_{cbd} = 1,8 \times \frac{f_{ctm}}{1,5}$$

De formule voor de schuifspanning  $\tau_b$  kan vereenvoudigd worden, indien men beschouwt dat  $N_{rd} = M_d/z_m$  en dat  $N_{rd} = N_{fd} + N_{sd}$ . Afhankelijk van het moment van het vloeien van het staal kunnen  $N_{rd}$  en  $N_{sd}$  als volgt benaderd worden.

$$\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd}: \quad N_{rd} = N_{fd} \cdot \left( 1 + \frac{A_{s1} \cdot E_s \cdot \varepsilon_s}{A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f} \right) \approx N_{fd} \cdot \left( 1 + \frac{A_{s1} \cdot E_s}{A_f \cdot E_f} \right) \text{ en } \Delta N_{fd} \approx \frac{\Delta M_d}{z_m \cdot \left( 1 + \frac{A_{s1} \cdot E_s}{A_f \cdot E_f} \right)}$$

$$\varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{yd}: \quad N_{rd} = N_{fd} + A_{s1} \cdot f_{yd} \text{ en } \Delta N_{fd} = \frac{\Delta M_d}{z_m}$$

Met  $\Delta M_d/\Delta x \approx V_d$  en  $z_m = (z_s + z_f)/2 \approx 0,95 d$  worden de onderstaande voorwaarden gevonden.

$$\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd}: \quad \frac{V_d}{0,95 \cdot d \cdot b_f \cdot \left( 1 + \frac{A_{s1} \cdot E_s}{A_f \cdot E_f} \right)} \leq f_{cbd}$$

$$\varepsilon_{s1} > \varepsilon_{yd}: \quad \frac{V_d}{0,95 \cdot d \cdot b_f} \leq f_{cbd}$$



Er wordt verondersteld dat de hoofdwapening reeds aan het vloeien is wanneer de maximale schuifspanning  $\tau_b$  bereikt wordt.

$$\begin{aligned}
 V_d &= f_{bcd} \cdot (0,95 \cdot d \cdot b_f) \\
 \Leftrightarrow V_d &= 1,8 \cdot \frac{f_{ctm}}{1,5} \cdot (0,95 \cdot d \cdot b_f) \\
 \Leftrightarrow V_d &= 1,8 \times \frac{1,905}{1,5} \times (0,95 \times 311 \times 100) \\
 \Leftrightarrow V_d &= 67478,866 \text{ N} = 67,479 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Het is gekend dat de dwarskracht tijdens een vierpuntsbuigproef gelijk is aan de reactiekracht. Bijgevolg is uit de bovenstaande dwarskracht eenvoudig het corresponderende moment te berekenen. Hierbij wordt echter geen rekening gehouden met het eigengewicht.

$$M = \frac{P \times L}{3} = \frac{67,479 \times 3,6}{3} = 80,975 \text{ kN.m}$$

#### 5.1.2.2.7.2.2.3 End shear failure

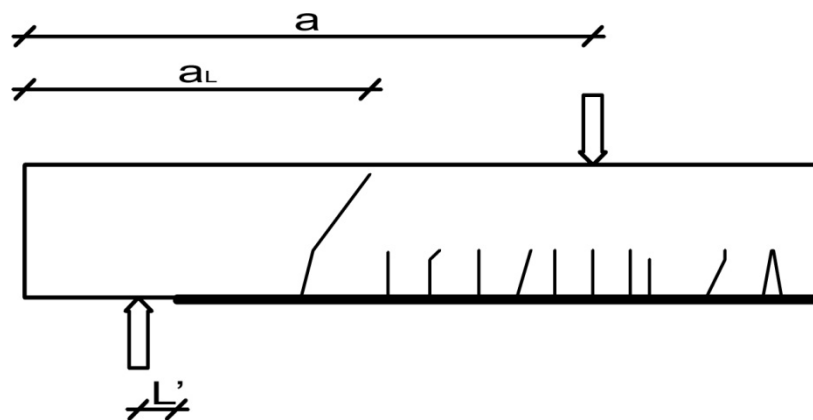
Opdat concrete rip-off zou optreden dient de volgende voorwaarde overschreden te worden.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} = \tau_{Rd} \cdot b \cdot d$$

met 
$$\tau_{Rd} = 0,15 \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \frac{d}{a_L} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \rho_s \cdot f_{ck}}}$$

$$a_L = \sqrt[4]{\frac{(1 - \rho_s)^2}{\rho_s} \cdot d \cdot L^3}$$

Verder dient  $a_L$  kleiner te zijn dan  $a$ , dat zelf groter moet zijn dan de som van  $d$  en  $L'$ .



Figuur 87: End shear failure

Invullen van alle parameters geeft de onderstaande resultaten.

$$L' = \frac{L - L_f}{2} = \frac{3600 - 3400}{2} = 500 \text{ mm}$$

$$a_L = \sqrt[4]{\frac{(1 - \rho_s)^2}{\rho_s} \cdot d \cdot L'^3} = \sqrt[4]{\frac{\left(1 - \frac{A_{s1}}{b \cdot d}\right)^2}{\frac{A_{s1}}{b \cdot d}} \cdot d \cdot L'^3}$$

$$\Leftrightarrow a_L = \sqrt[4]{\frac{\left(1 - \frac{409}{220 \times 311}\right)^2}{\frac{409}{220 \times 311}} \cdot 311 \cdot 500^3} = 2578,643 \text{ mm}$$

$$\tau_{Rd} = 0,15 \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \frac{d}{a} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)} \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \rho_s \cdot f_{ck}}$$

$$\Leftrightarrow \tau_{Rd} = 0,15 \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \frac{d}{a} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)} \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \cdot f_{ck}}$$

$$\Leftrightarrow \tau_{Rd} = 0,15 \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \frac{311}{1200,0004} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{311}}\right)} \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \frac{409}{220 \cdot 311} \cdot 16}$$

$$\Leftrightarrow \tau_{Rd} = 0,528 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$V_{Rd} = \tau_{Rd} \cdot b \cdot d = 0,528 \times 220 \times 311$$

$$\Leftrightarrow V_{Rd} = 36072,894 \text{ N} = 36,073 \text{ kN}$$

Het is gekend dat de dwarskracht tijdens een vierpuntsbuigproef gelijk is aan de reactiekracht. Bijgevolg is uit de bovenstaande dwarskracht eenvoudig het corresponderende moment te berekenen.

$$M = \frac{P \times L}{3} = \frac{36,073 \times 3,6}{3} = 43,287 \text{ kN.m}$$

#### 5.1.2.2.7.2.2.4 Peeling-off caused by the unevenness of the concrete surface

Onthechting van koolstofvezelwapening door een oneffen oppervlak is ook een mogelijk breukmechanisme. Dit breukmechanisme is nog niet in detail bestudeerd. In dit geval is het echter onwaarschijnlijk dat het mechanisme het bepalende breukmechanisme is, vermits het beton steeds geschuurd werd vooraleer de koolstofvezelwapening erop aan te brengen. Dit breukmechanisme wordt bijgevolg dan ook verder buiten beschouwing gelaten.

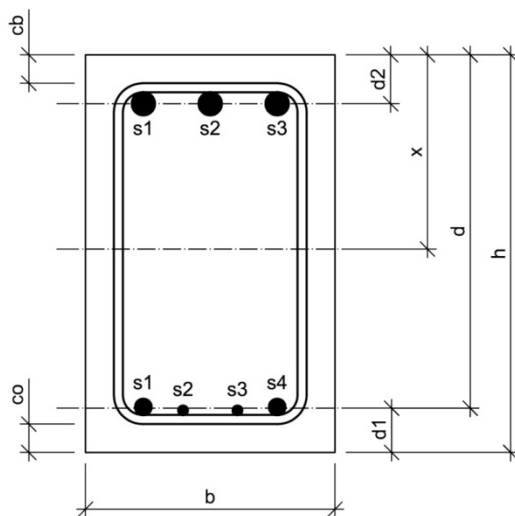
## 5.2 Balk B2

### 5.2.1 Algemeen

Balk B2 is een onversterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton zonder opgelijmde koolstofvezelwapening. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuur geven meer informatie over balk B2.

<b>Ouderdom</b>	112 dagen	
<b>Lengte</b>	4,195 m	
<b>Breedte</b>	0,220 m	
<b>Hoogte</b>	0,351 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

Tabel 98: Opbouw en dimensionering van balk B2



$$h = 351 \text{ mm}$$

$$b = 220 \text{ mm}$$

Figuur 88: Dwarsdoorsnede balk B2

### 5.2.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{cx}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 24,225 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 29,202 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk B2 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi14} = 559,556 \frac{N}{mm^2} \quad \text{en} \quad \sigma_{v,\phi8} = 552,660 \frac{N}{mm^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{mm^2}$$

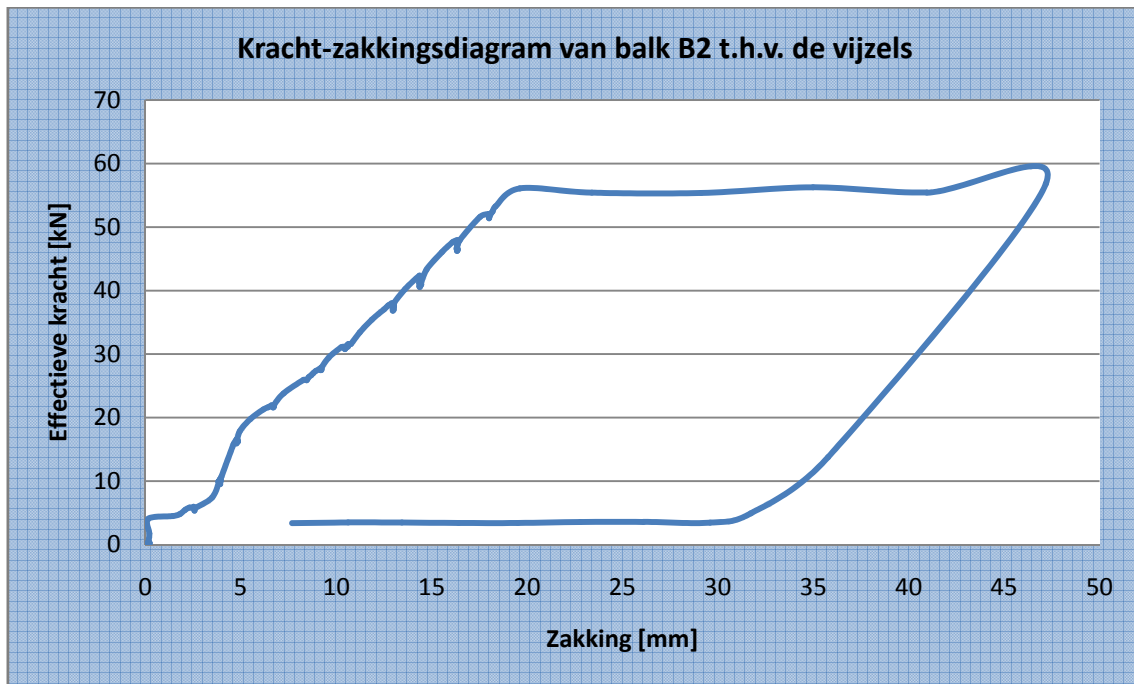
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.2.3 Meetresultaten

#### 5.2.3.1 Zakking t.h.v. de vizzels

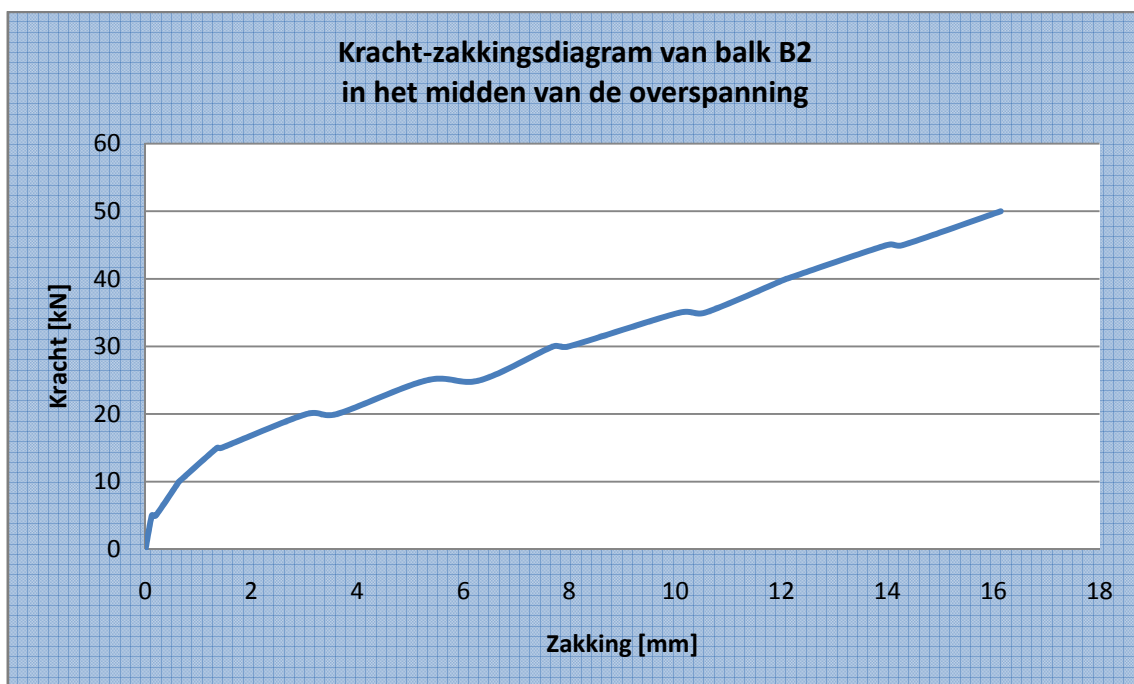
Grafiek 48 toont de zakking van de vizzels in functie van de belasting.



Grafiek 48: Kracht-zakkingsdiagram van balk B2 t.h.v. de vizzels

#### 5.2.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

Grafiek 49 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 49: Kracht-zakkingsdiagram van balk B2 in het midden van de overspanning

Tabel 99 toont de cijferwaarden van Grafiek 49.

Kracht [kN]	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging [mm]
	meetklok 1 (midden)	meetklok 2 (midden)	meetklok 3 (uiteinde)	meetklok 4 (uiteinde)	midden	uiteinde	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,14	0,11	0,01	0,00	0,13	0,01	0,12
5	0,24	0,17	0,02	0,00	0,21	0,01	0,20
10	0,73	0,62	0,06	0,03	0,68	0,05	0,63
10	0,73	0,62	0,06	0,03	0,68	0,05	0,63
15	1,52	1,38	0,12	0,08	1,45	0,10	1,35
15	1,60	1,46	0,12	0,08	1,53	0,10	1,43
20	3,24	3,10	0,15	0,12	3,17	0,14	3,04
20	3,83	3,67	0,16	0,13	3,75	0,15	3,61
25	5,56	5,40	0,18	0,16	5,48	0,17	5,31
25	6,58	6,41	0,19	0,18	6,50	0,19	6,31
30	7,98	7,81	0,20	0,21	7,90	0,21	7,69
30	8,27	8,10	0,20	0,21	8,19	0,21	7,98
35	10,38	10,25	0,22	0,26	10,32	0,24	10,08
35	10,87	10,74	0,23	0,27	10,81	0,25	10,56
40	12,41	12,30	0,24	0,30	12,36	0,27	12,09
40	12,42	12,30	0,24	0,30	12,36	0,27	12,09
45	14,33	14,25	0,26	0,34	14,29	0,30	13,99
45	14,63	14,54	0,26	0,34	14,59	0,30	14,29
50	16,48	16,44	0,27	0,38	16,46	0,33	16,14

Tabel 99: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk B2 in het midden van de overspanning

### 5.2.3.3 Doorbuiging $L/500$ en $L/250$

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging  $L/500$  en de doorbuiging  $L/250$  zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging  $L/500$  wordt bereikt bij een kracht tussen 25 kN en 30 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging  $L/500$ .

$$F_{y=L/500} = 25kN + 5 \times \frac{7,2mm - 5,31mm}{7,69mm - 5,31mm} = 28,971kN$$

De doorbuiging  $L/250$  wordt bereikt bij een kracht tussen 45 kN en 50 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging  $L/250$ .

$$F_{y=L/250} = 45kN + 5 \times \frac{14,4mm - 13,99mm}{16,14mm - 13,99mm} = 45,956kN$$

#### 5.2.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 56,841kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- overwegend buigingsscheuren
- geen dwarskrachtenscheuren
- breuk door vloeien van de hoofdwapening

**Figuur 89** toont een schets van de scheurvorming van balk B2.



**Figuur 89: Schets scheurvorming balk B2**

#### 5.2.3.5 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk B2.



**Figuur 90: Scheurvorming balk B2 [1]**



**Figuur 91: Scheurvorming balk B2 [2]**

### 5.2.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

#### 5.2.4.1 Lasten

**Tabel 100** vat de verschillende lasten en momenten samen.

	Maximum kracht	$P_{\max} = 56,8 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 42,3 \text{ kN.m}$
		$P_d = 37,7 \text{ kN}$
	GGT	$M = 34,5 \text{ kN.m}$
		$P = 26,2 \text{ kN}$
	Bezwijktoestand	$M_u = 47,1 \text{ kN.m}$
		$P_u = 36,7 \text{ kN}$

**Tabel 100: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk B2**

Geen van de theoretisch berekende momenten ligt in de buurt van het empirisch bepaalde moment. Dit is waarschijnlijk voor een groot deel te wijten aan het grote verschil tussen de rekenwaarden van de materiaalkarakteristieken en de effectieve waarden van de materiaalkarakteristieken.

#### 5.2.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 101** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN (beton: 0\%)}$
		$V_d = 149,0 \text{ kN (beton: 100\%)}$

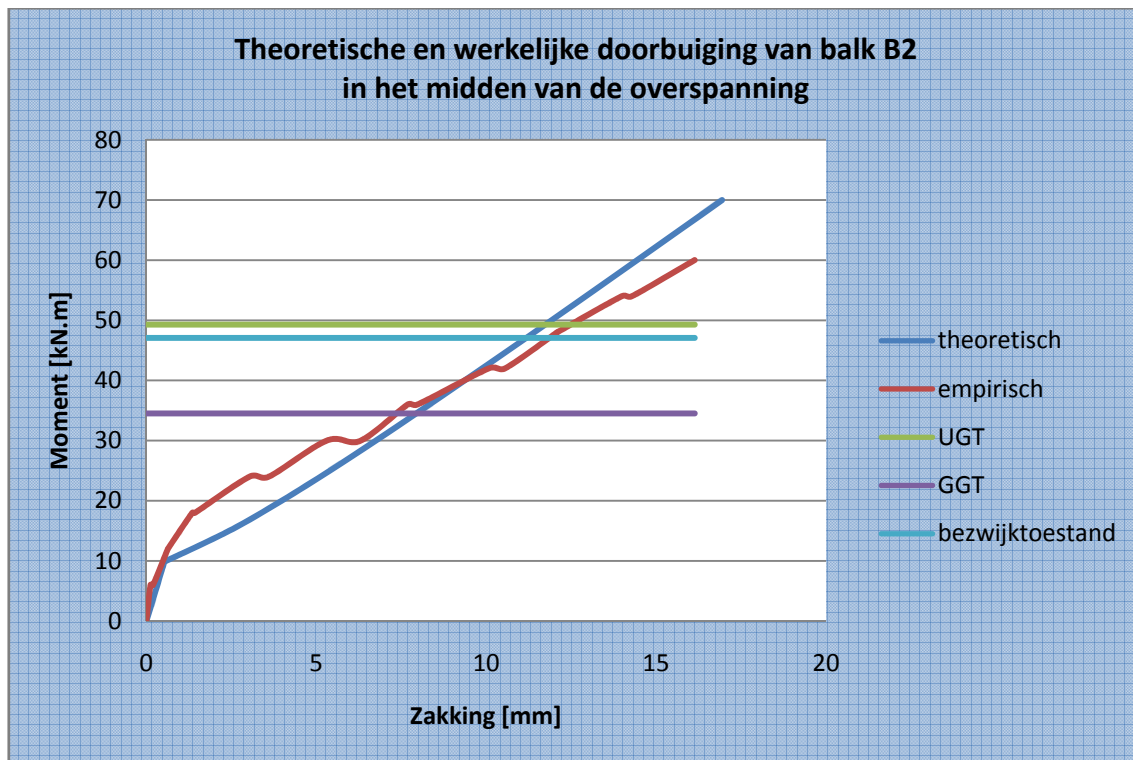
**Tabel 101: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk B2**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.



### 5.2.4.3 Doorbuiging

Grafiek 50 toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

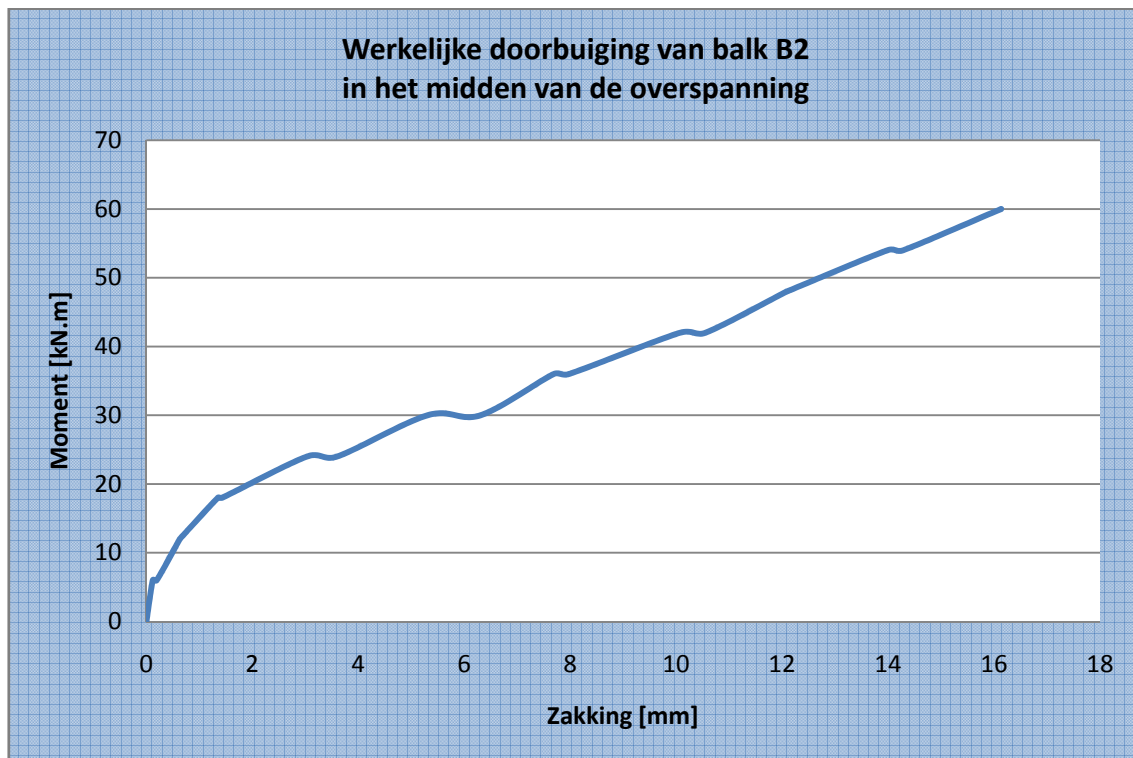


Grafiek 50: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk B2 in het midden van de overspanning

In de niet-gescheurde toestand vallen beide grafieken aanvankelijk samen. In de gescheurde toestand is de theoretisch berekende doorbuiging iets groter dan de empirisch bepaalde doorbuiging, zolang de bovengrens van de gebruiksgrenstoestand niet bereikt is. Eénmaal deze bovengrens bereikt is, wordt de werkelijke doorbuiging al gauw groter dan de theoretisch berekende doorbuiging.

#### 5.2.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 51** toont de werkelijke doorbuiging van balk B2 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 51** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 12,0 kN m.



**Grafiek 51: Werkelijke doorbuiging van balk B2 in het midden van de overspanning**

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 20,0 kN. Dit komt overeen met een moment van 24,0 kN m. Het theoretisch berekende scheurmoment bedraagt 9,9 kN m.

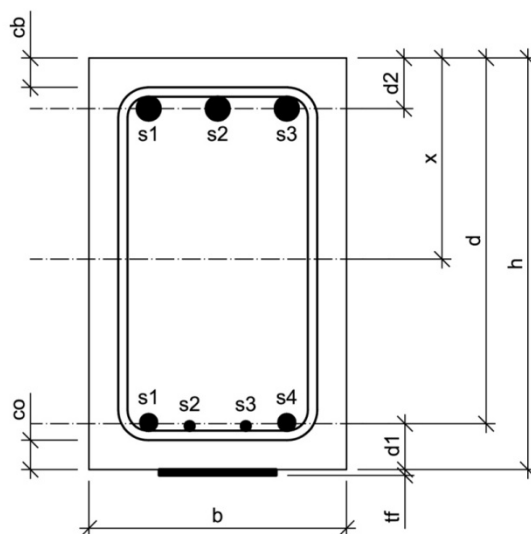
## 5.3 Balk BL2.1

### 5.3.1 Algemeen

Balk BL2.1 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening, maar zonder bijkomende verankering. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuur geven meer informatie over balk BL2.1.

<b>Ouderdom</b>	113 dagen	
<b>Lengte</b>	4,203 m	
<b>Breedte</b>	0,223 m	
<b>Hoogte</b>	0,351 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

Tabel 102: Opbouw en dimensionering van balk BL2.1



$$h = 351 \text{ mm}$$

$$b = 223 \text{ mm}$$

Figuur 92: Dwarsdoorsnede balk BL2.1

### 5.3.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{cx}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 22,361 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 26,956 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BL2.1 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi14} = 559,556 \frac{N}{mm^2} \quad \text{en} \quad \sigma_{v,\phi8} = 552,660 \frac{N}{mm^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{mm^2}$$

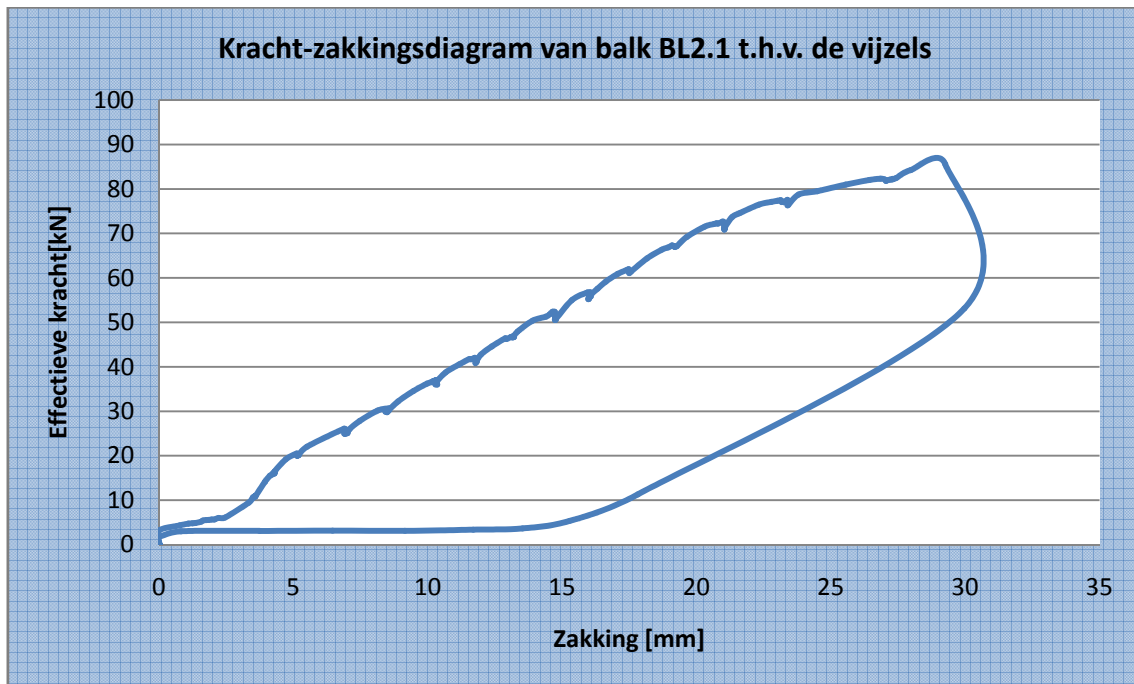
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.3.3 Meetresultaten

#### 5.3.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

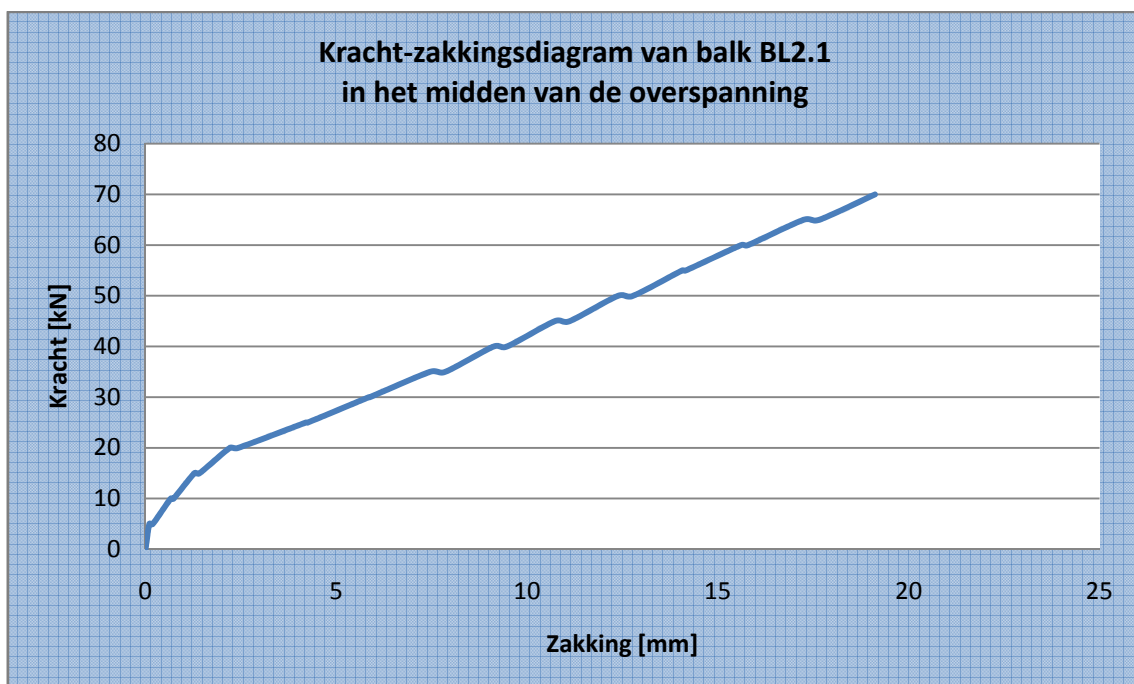
Grafiek 52 toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



Grafiek 52: Kracht-zakkingsdiagram van balk BL2.1 t.h.v. de vijzels

#### 5.3.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

Grafiek 53 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 53: Kracht-zakkingsdiagram van balk BL2.1 in het midden van de overspanning

**Tabel 103** toont de cijferwaarden van **Grafiek 53**.

Kracht	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging
	meetklok 1	meetklok 2	meetklok 3	meetklok 4	midden	uiteinde	
	(midden)	(midden)	(uiteinde)	(uiteinde)	[mm]	[mm]	
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,11	0,10	0,00	0,01	0,11	0,01	0,10
5	0,21	0,19	0,01	0,01	0,20	0,01	0,19
10	0,74	0,67	0,05	0,04	0,71	0,05	0,66
10	0,83	0,75	0,06	0,05	0,79	0,06	0,74
15	1,42	1,32	0,10	0,08	1,37	0,09	1,28
15	1,56	1,46	0,10	0,09	1,51	0,10	1,42
20	2,38	2,28	0,12	0,12	2,33	0,12	2,21
20	2,60	2,50	0,13	0,12	2,55	0,13	2,43
25	4,41	4,30	0,14	0,17	4,36	0,16	4,20
25	4,46	4,35	0,14	0,17	4,41	0,16	4,25
30	6,08	5,99	0,16	0,21	6,04	0,19	5,85
30	6,10	6,02	0,16	0,21	6,06	0,19	5,88
35	7,71	7,62	0,17	0,25	7,67	0,21	7,46
35	8,13	8,02	0,18	0,26	8,08	0,22	7,86
40	9,41	9,31	0,19	0,29	9,36	0,24	9,12
40	9,76	9,67	0,19	0,30	9,72	0,25	9,47
45	10,99	10,98	0,20	0,32	10,99	0,26	10,73
45	11,37	11,38	0,20	0,33	11,38	0,27	11,11
50	12,64	12,69	0,21	0,36	12,67	0,29	12,38
50	13,03	13,11	0,22	0,37	13,07	0,30	12,78
55	14,36	14,39	0,23	0,40	14,38	0,32	14,06
55	14,45	14,49	0,23	0,40	14,47	0,32	14,16
60	15,93	15,96	0,25	0,43	15,95	0,34	15,61
60	16,11	16,14	0,25	0,43	16,13	0,34	15,79
65	17,55	17,66	0,27	0,45	17,61	0,36	17,25
65	17,95	18,09	0,27	0,46	18,02	0,37	17,66
70	19,41	19,59	0,29	0,48	19,50	0,39	19,12

**Tabel 103: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BL2.1 in het midden van de overspanning**

### 5.3.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 30 kN en 35 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 30kN + 5 \times \frac{7,2mm - 5,85mm}{7,46mm - 5,85mm} = 34,206kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 55 kN en 60 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 55kN + 5 \times \frac{14,4mm - 14,06mm}{15,61mm - 14,06mm} = 56,100kN$$

### 5.3.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

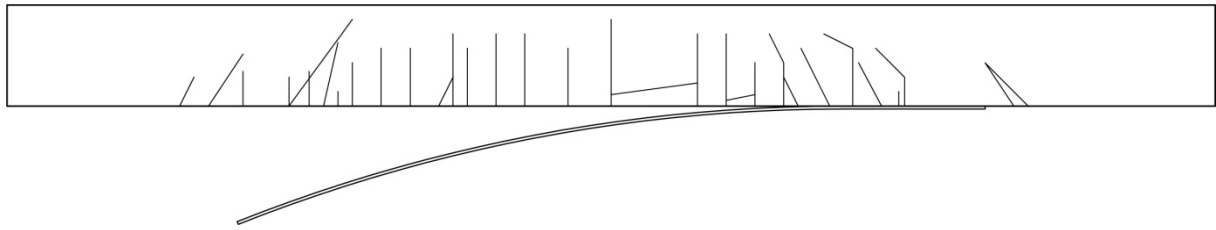
$$F_{\max} = 85,595kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- buigingsscheuren
- dwarskrachtenscheuren vanaf 50 kN
- horizontale scheuren t.h.v. de hoofdwapening in het midden van de overspanning
- aanzet tot concrete rip-off aan de linkerkant
- breuk door onthechting

De breukmechanismen concrete rip-off en onthechting waarbij nog een dun laagje beton aan de koolstofvezelwapening kleeft, blijken dicht bij elkaar te liggen. Verder kunnen de horizontale scheuren in het midden van de overspanning ook wijzen op een eventuele onthechting t.h.v. een verzwakte laag. Dit laatste wordt echter niet beschouwd in FIB Bulletin 14.

**Figuur 93** toont een schets van de scheurvorming van balk BL2.1.



**Figuur 93: Schets scheurvorming balk BL2.1**

#### 5.3.3.5 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BL2.1



**Figuur 94: Scheurvorming linkerkant balk BL2.1**



**Figuur 95: Scheurvorming rechterkant balk BL2.1**



**Figuur 96: Aanzet tot concrete rip-off [1]**



**Figuur 97: Aanzet tot concrete rip-off [2]**



### 5.3.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

#### 5.3.4.1 Lasten

**Tabel 104** vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 102,7 \text{ kN m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 85,6 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN m}$
		$P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN m}$
		$P = 87,2 \text{ kN}$
Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN m}$	
	$P_u = 70,0 \text{ kN}$	

**Tabel 104: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BL2.1**

#### 5.3.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 105** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

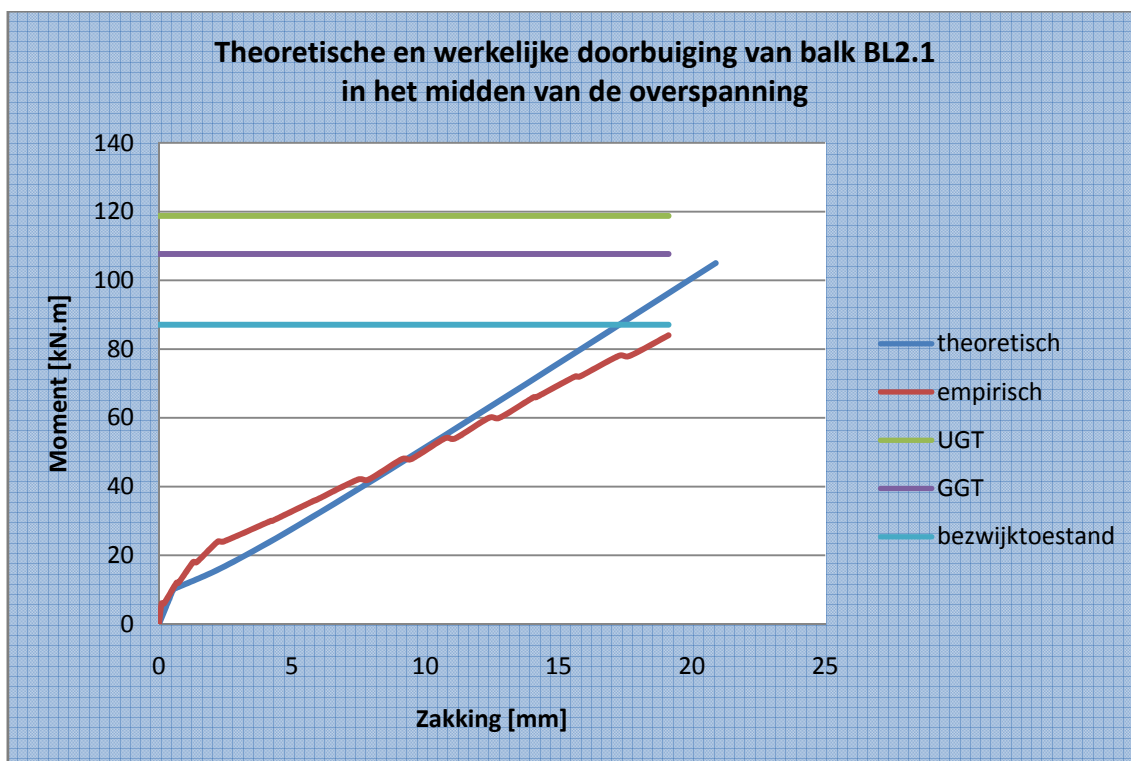
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{\max} = 85,6 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 149,0 \text{ kN}$ (beton: 100%)

**Tabel 105: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BL2.1**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

### 5.3.4.3 Doorbuiging

**Grafiek 54** toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

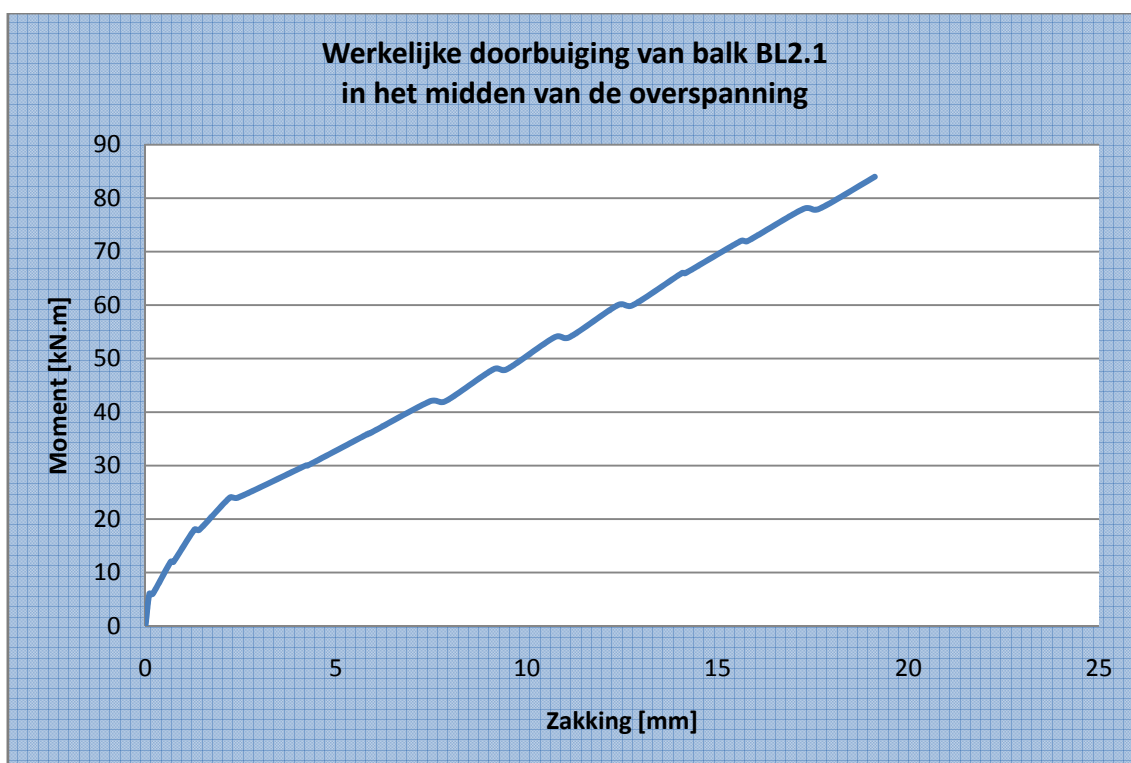


**Grafiek 54:** Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BL2.1 in het midden van de overspanning

In de niet-gescheurde toestand vallen beide grafieken aanvankelijk samen. Er wordt opgemerkt dat het theoretisch berekende scheurmoment kleiner is dan het empirisch waargenomen scheurmoment. In de gescheurde toestand is de theoretisch berekende doorbuiging groter dan de empirisch waargenomen doorbuiging indien het opgenomen moment kleiner is dan 42 kN m.

### 5.3.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 55** toont de werkelijke doorbuiging van balk B1 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 55** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 18,0 kN m.



**Grafiek 55: Werkelijke doorbuiging van balk BL2.1 in het midden van de overspanning**

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 25,0 kN. Dit komt overeen met een moment van 30,0 kN m. Het theoretisch berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN m.

#### 5.3.4.5 Breukmechanismen

**Tabel 106** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	51,1 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	43,3 kN m

**Tabel 106: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Volgens CUR Aanbeveling 91 zou het eerst optredende breukmechanisme eindverankering-dwarskrachtenbreuk zijn. Ook volgens FIB Bulletin 14 zou concrete rip-off het bepalende breukmechanisme zijn. In werkelijkheid was een aanzet tot concrete rip-off merkbaar, maar het uiteindelijke breukmechanisme was toch onthechting. Om het optreden van concrete rip-off te vermijden, werd besloten de koolstofvezelwapening telkens op enkele centimeters van de uiteinden bijkomend te verankeren.

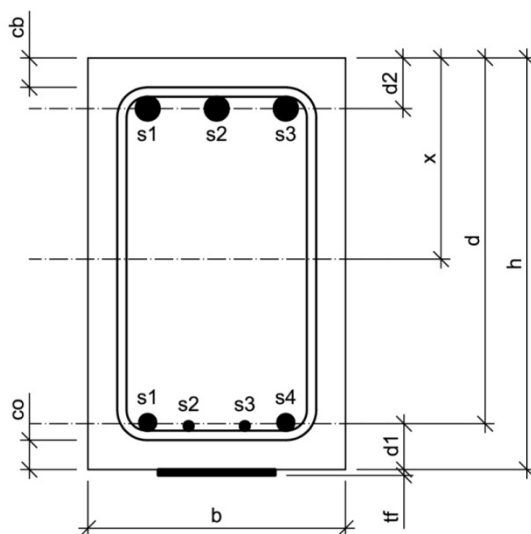
## 5.4 Balk BLA2.1

### 5.4.1 Algemeen

Balk BLA2.1 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening. Aan beide zijden is deze balk bijkomend verankerd met 7 mechanische M10 ankers. Deze ankers hebben een lengte van 68 mm en worden op zo'n manier voorgespannen dat de verdeelplaatjes een zelfde druk uitoefenen op de koolstofvezelwapening als de verdeelplaatjes van de balken BLA1.1 en BLA1.2. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Om concrete rip-off te vermijden, is de koolstofvezelwapening aan beide zijden op 3 cm van de uiteinden bijkomend verankerd met een mechanisch M12 anker. Deze ankers hebben een lengte van 150 mm en worden voorgespannen met een moment van 50 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA2.1.

<b>Ouderdom</b>	127 dagen	
<b>Lengte</b>	4,189 m	
<b>Breedte</b>	0,219 m	
<b>Hoogte</b>	0,356 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

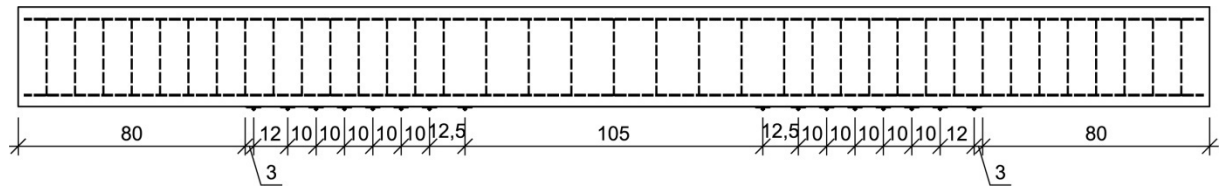
Tabel 107: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.1



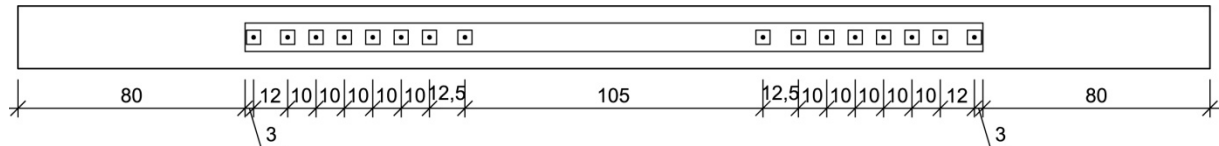
$$h = 356 \text{ mm}$$

$$b = 219 \text{ mm}$$

Figuur 98: Dwarsdoorsnede balk BLA2.1



Figuur 99: Vooraanzicht verankering balk BLA2.1



Figuur 100: Onderaanzicht verankering balk BLA2.1

#### 5.4.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{cx}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 27,260 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 32,862 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA2.1 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi 14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi 8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi 14} = 559,556 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi 8} = 552,660 \frac{N}{mm^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{mm^2}$$

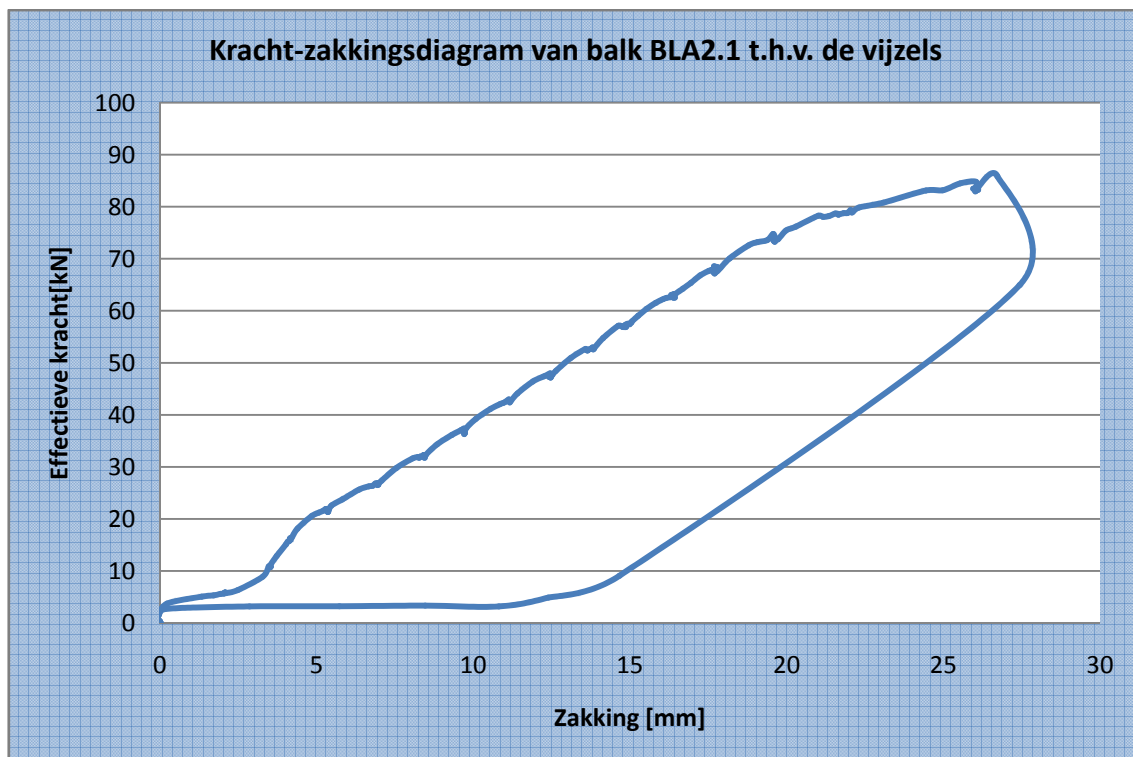
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.4.3 Meetresultaten

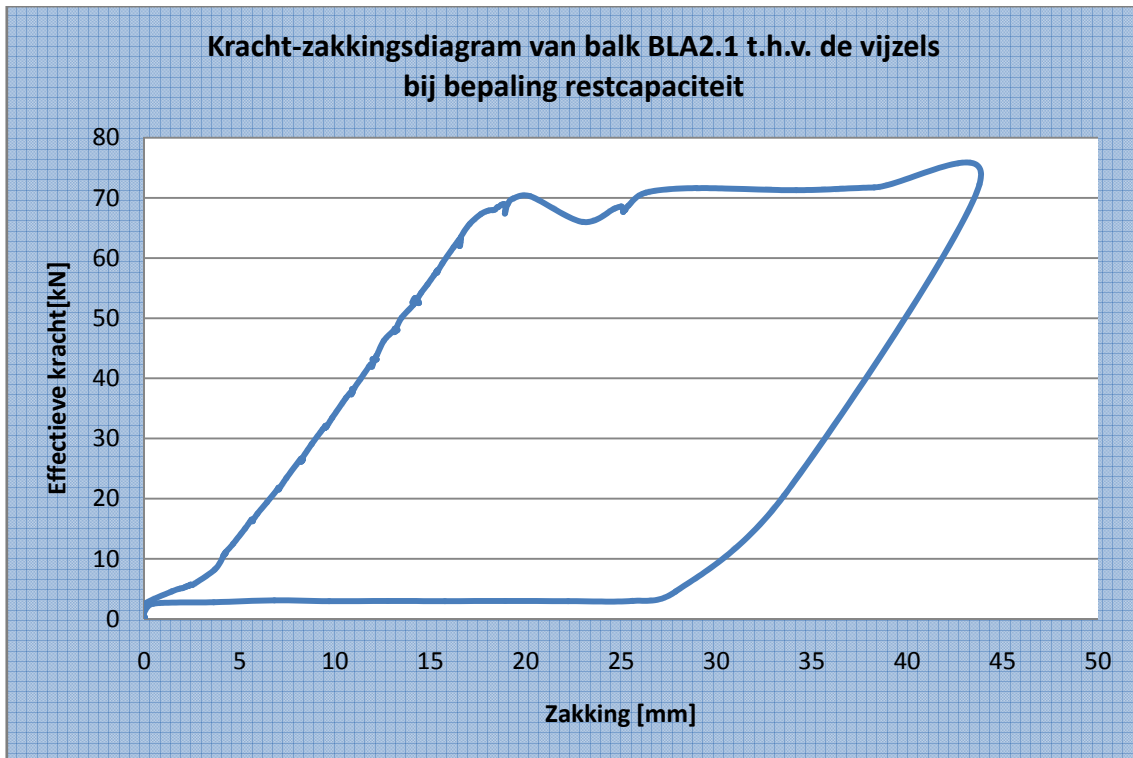
#### 5.4.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

**Grafiek 56** toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



**Grafiek 56: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.1 t.h.v. de vijzels**

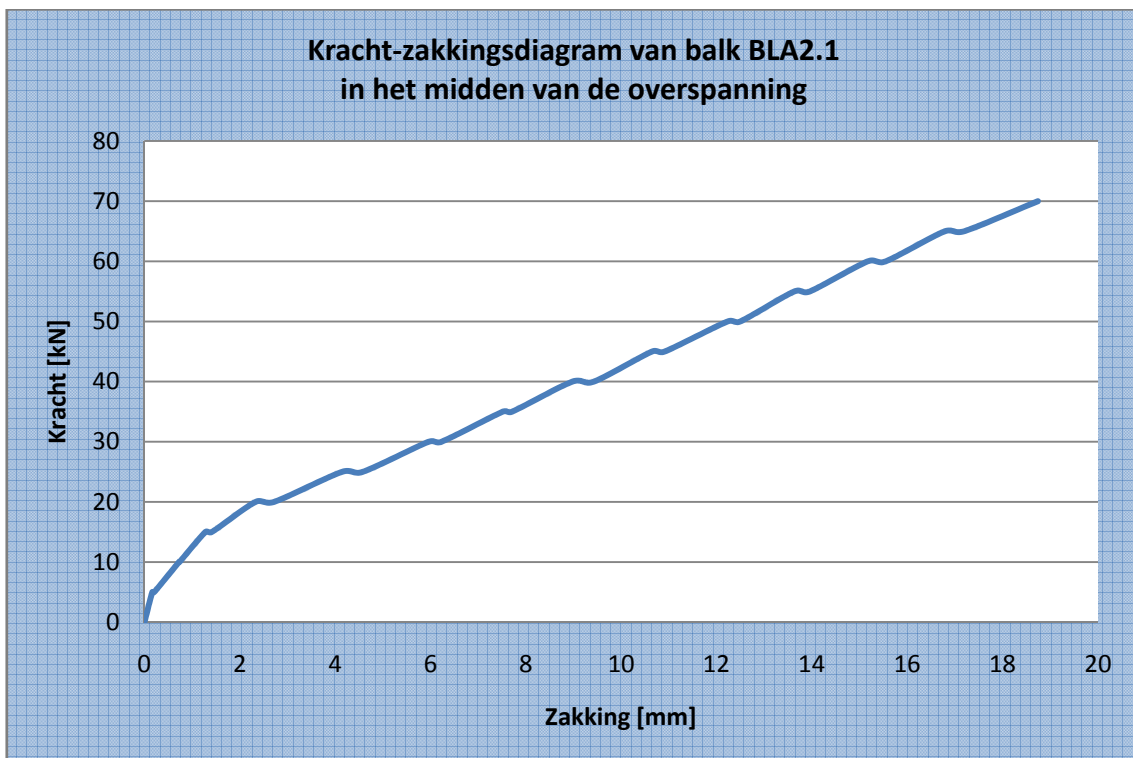
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.



Grafiek 57: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.1 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit

**5.4.3.2 Zakking in het midden van de overspanning**

Grafiek 58 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 58: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.1 in het midden van de overspanning

**Tabel 108** toont de cijferwaarden van **Grafiek 58**.

Kracht	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging
	meetklok 1	meetklok 2	meetklok 3	meetklok 4	midden	uiteinde	
	(midden)	(midden)	(uiteinde)	(uiteinde)	[mm]	[mm]	
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,16	0,18	0,00	0,01	0,17	0,01	0,17
5	0,20	0,22	0,00	0,01	0,21	0,01	0,21
10	0,73	0,77	0,00	0,05	0,75	0,03	0,73
10	0,74	0,78	0,00	0,05	0,76	0,03	0,74
15	1,31	1,33	0,00	0,08	1,32	0,04	1,28
15	1,45	1,47	0,00	0,09	1,46	0,05	1,42
20	2,39	2,40	0,00	0,13	2,40	0,07	2,33
20	2,79	2,79	0,00	0,14	2,79	0,07	2,72
25	4,23	4,23	0,00	0,17	4,23	0,09	4,15
25	4,68	4,66	0,00	0,18	4,67	0,09	4,58
30	6,09	6,06	0,00	0,23	6,08	0,12	5,96
30	6,38	6,32	0,00	0,24	6,35	0,12	6,23
35	7,69	7,62	0,00	0,28	7,66	0,14	7,52
35	7,89	7,81	0,00	0,28	7,85	0,14	7,71
40	9,19	9,08	0,00	0,32	9,14	0,16	8,98
40	9,66	9,52	0,00	0,33	9,59	0,17	9,43
45	10,90	10,75	0,00	0,36	10,83	0,18	10,65
45	11,19	11,00	0,00	0,37	11,10	0,19	10,91
50	12,53	12,33	0,00	0,40	12,43	0,20	12,23
50	12,81	12,59	0,00	0,41	12,70	0,21	12,50
55	13,97	13,73	0,00	0,44	13,85	0,22	13,63
55	14,30	14,06	0,00	0,45	14,18	0,23	13,96
60	15,54	15,28	0,00	0,48	15,41	0,24	15,17
60	15,93	15,65	0,00	0,49	15,79	0,25	15,55
65	17,18	16,90	0,00	0,51	17,04	0,26	16,79
65	17,60	17,30	0,00	0,52	17,45	0,26	17,19
70	19,17	18,85	0,00	0,54	19,01	0,27	18,74

**Tabel 108: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.1 in het midden van de overspanning**



### 5.4.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 30 kN en 35 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 30kN + 5 \times \frac{7,2mm - 5,96mm}{7,52mm - 5,96mm} = 33,987kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 55 kN en 60 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 55kN + 5 \times \frac{14,4mm - 13,63mm}{15,17mm - 13,63mm} = 57,500kN$$

### 5.4.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 85,878kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- buigingsscheuren
- enkele dwarskrachtenscheuren
- de scheuren blijven gesloten
- breuk in de koolstofvezelwapening

In dit geval blijkt de onthechting zich te manifesteren binnen de koolstofvezelwapening zelf. Dit breukmechanisme wordt noch in de CUR Aanbeveling 91, noch in de FIB Bulletin 14 beschouwd.

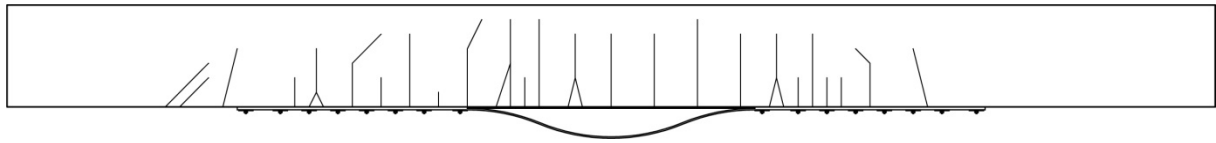
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

$$F_{rest, \max} = 72,255kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de restcapaciteit werden visueel waargenomen.

- inscheuringen in de koolstofvezelwapening t.h.v. de linkerankers

**Figuur 101** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA2.1.



**Figuur 101: Schets scheurvorming balk BLA2.1**

#### 5.4.3.5 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BLA2.1



**Figuur 102: Onthechting t.h.v. de koolstofvezelwapening [1]**



**Figuur 103: Onthechting t.h.v. de koolstofvezelwapening [2]**



**Figuur 104: Inscheuring M12 anker**



**Figuur 105: Inscheuring M10 ankers**

#### 5.4.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

##### 5.4.4.1 Lasten

**Tabel 109** vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 103,1 \text{ kN.m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 85,9 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN.m}$ $P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN.m}$ $P = 87,2 \text{ kN}$
	Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN.m}$
		$P_u = 70,0 \text{ kN}$

**Tabel 109: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.1**

##### 5.4.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 110** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

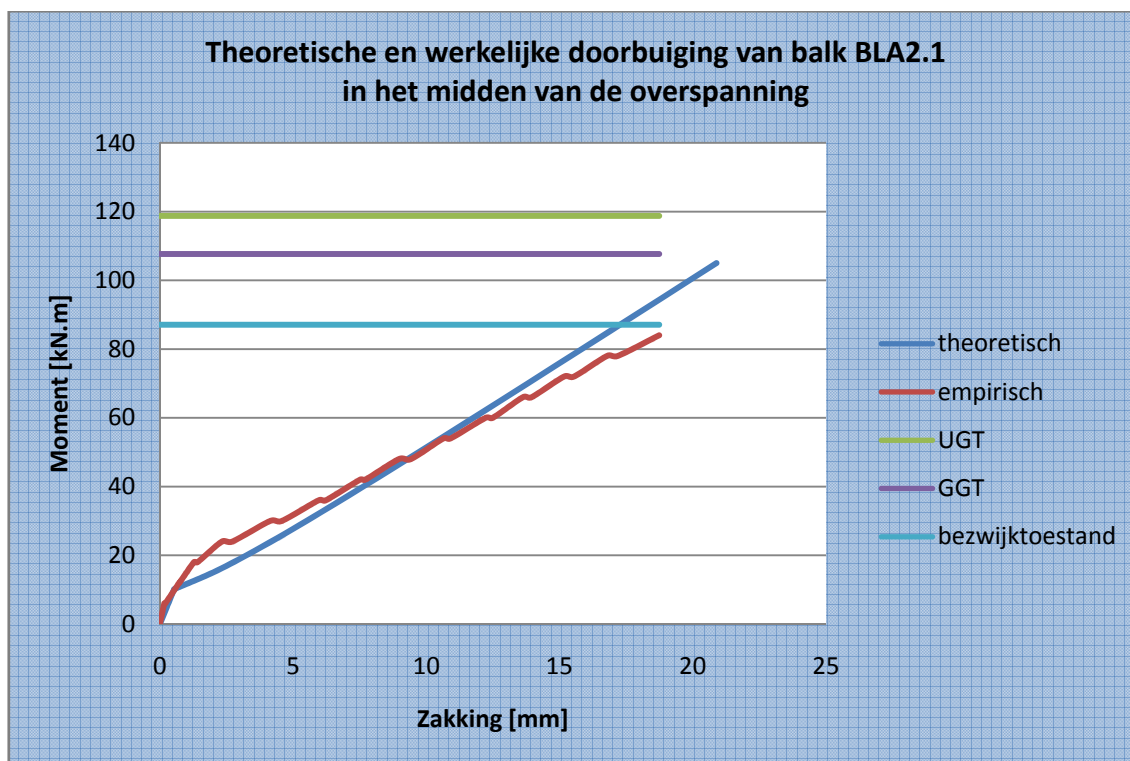
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN (beton: 0\%)}$
		$V_d = 149,0 \text{ kN (beton: 100\%)}$

**Tabel 110: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.1**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

### 5.4.4.3 Doorbuiging

**Grafiek 59** toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

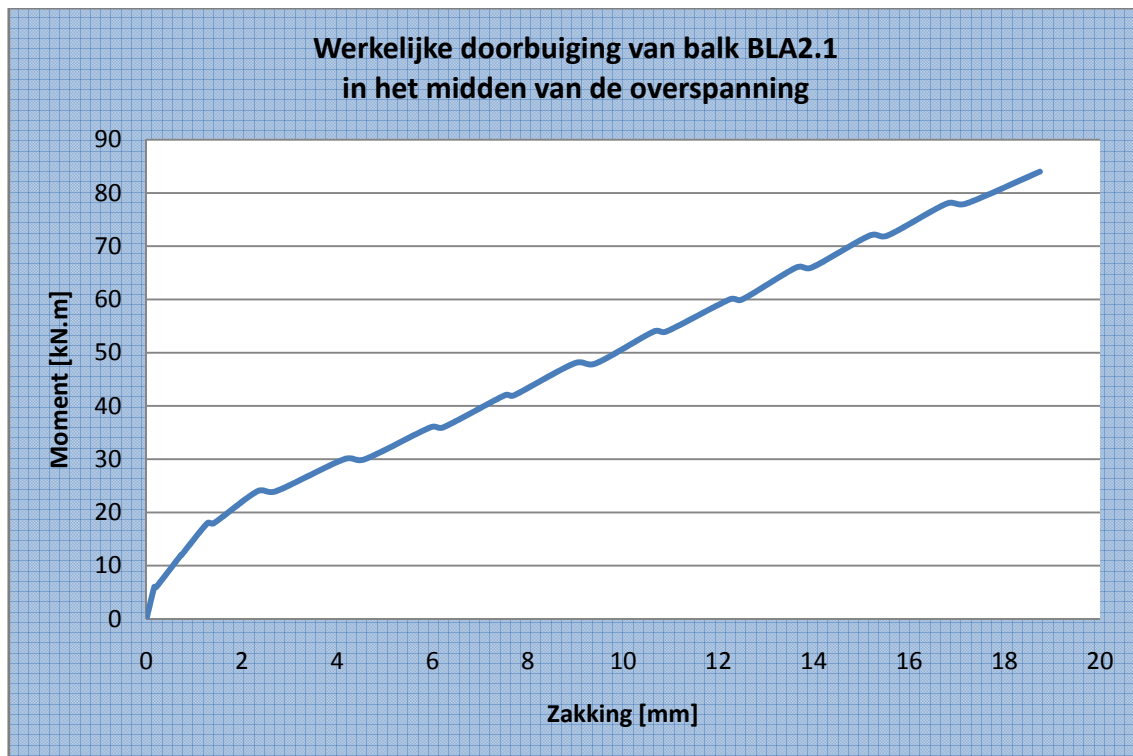


**Grafiek 59:** Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.1 in het midden van de overspanning

In de gescheurde toestand vallen beide grafieken aanvankelijk samen. Het theoretisch berekende scheurmoment is iets kleiner dan het empirisch bepaalde scheurmoment. In de gescheurde toestand is de werkelijke doorbuiging groter dan de theoretisch berekende doorbuiging indien het opgenomen moment groter is dan 48 kN m.

### 5.4.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 60** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA2.1 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 60** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 6,0 kN m.



**Grafiek 60: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.1 in het midden van de overspanning**

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 20,0 kN. Dit komt overeen met een moment van 24,0 kN.m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN.m.

#### 5.4.4.5 Breukmechanismen

**Tabel 111** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	51,1 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	43,3 kN m

**Tabel 111: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Indien concrete rip-off buiten beschouwing gelaten wordt, dan is zowel volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 onthechting het bepalende breukmechanisme. Er bestaat wel geen eensgezindheid over de locatie waar de onthechting zich het eerst zou manifesteren. Volgens CUR Aanbeveling 91 zou dit in het midden van de overspanning zijn, terwijl volgens FIB Bulletin 14 dit t.h.v. dwarskrachtscheuren zou zijn. In werkelijkheid manifesteerde de onthechting zich binnen de koolstofvezelwapening zelf. Dit breukmechanisme wordt noch door CUR Aanbeveling 91 noch door FIB Bulletin 14 beschouwd.

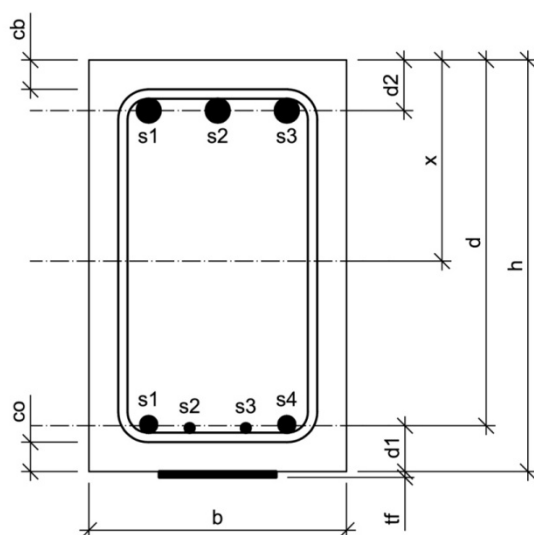
## 5.5 Balk BLA2.2

### 5.5.1 Algemeen

Balk BLA2.2 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening. Aan beide zijden is deze balk bijkomend verankerd met 7 mechanische M10 ankers. Deze ankers hebben een lengte van 68 mm en worden voorgespannen met een moment van 30 N.m. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Om concrete rip-off te vermijden, is de koolstofvezelwapening aan beide zijden op 3 cm van de uiteinden bijkomend verankerd met een mechanisch M12 anker. Deze ankers hebben een lengte van 150 mm en worden voorgespannen met een moment van 50 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA2.2.

<b>Ouderdom</b>	126 dagen	
<b>Lengte</b>	4,198 m	
<b>Breedte</b>	0,220 m	
<b>Hoogte</b>	0,350 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

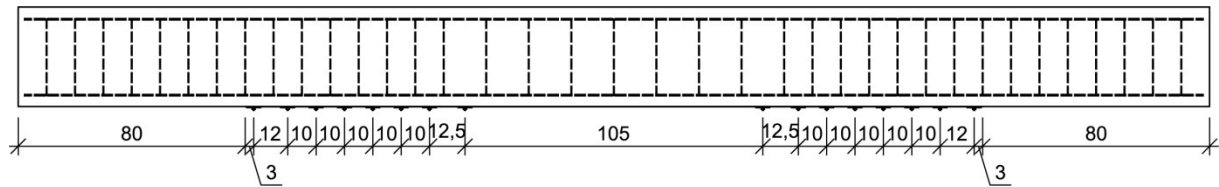
Tabel 112: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.2



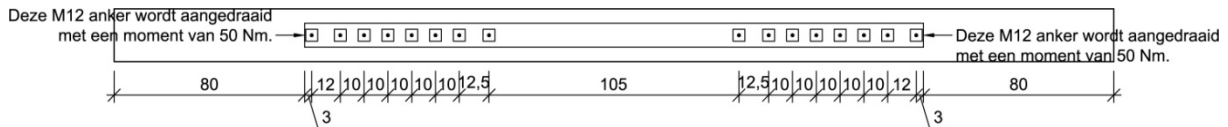
$$h = 350 \text{ mm}$$

$$b = 220 \text{ mm}$$

Figuur 106: Dwarsdoorsnede balk BLA2.2



**Figuur 107: Vooraanzicht verankering BLA2.2**



**Figuur 108: Onderaanzicht verankering BLA2.2**

### 5.5.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{c,x}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 27,321 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 32,935 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA2.2 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi 14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi 8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi 14} = 559,556 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi 8} = 552,660 \frac{N}{mm^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{mm^2}$$

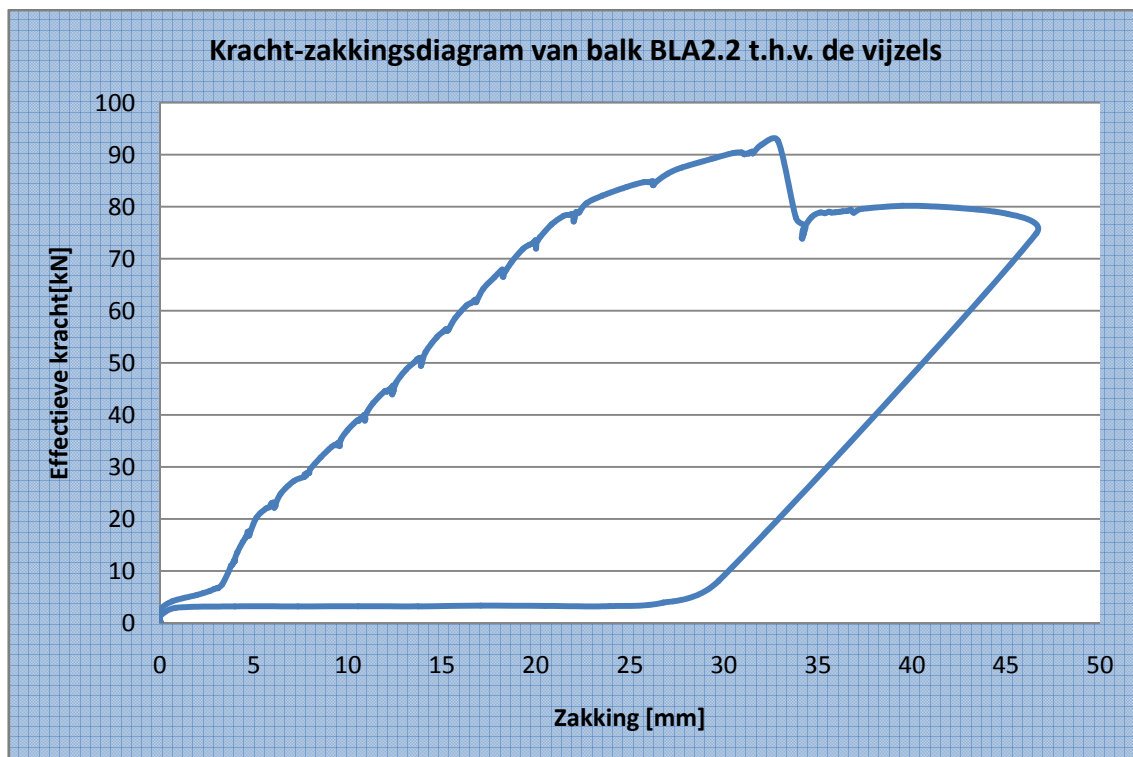
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.5.3 Meetresultaten

#### 5.5.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

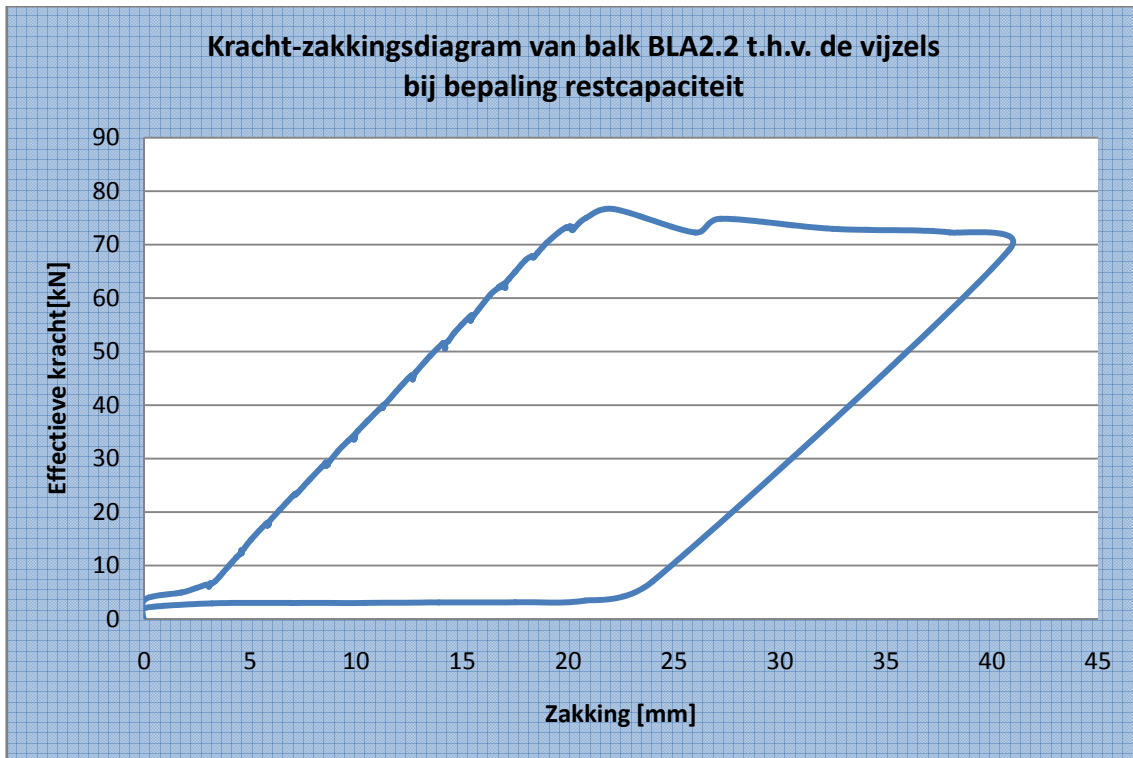
Grafiek 61 toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



Grafiek 61: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.2 t.h.v. de vijzels

Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

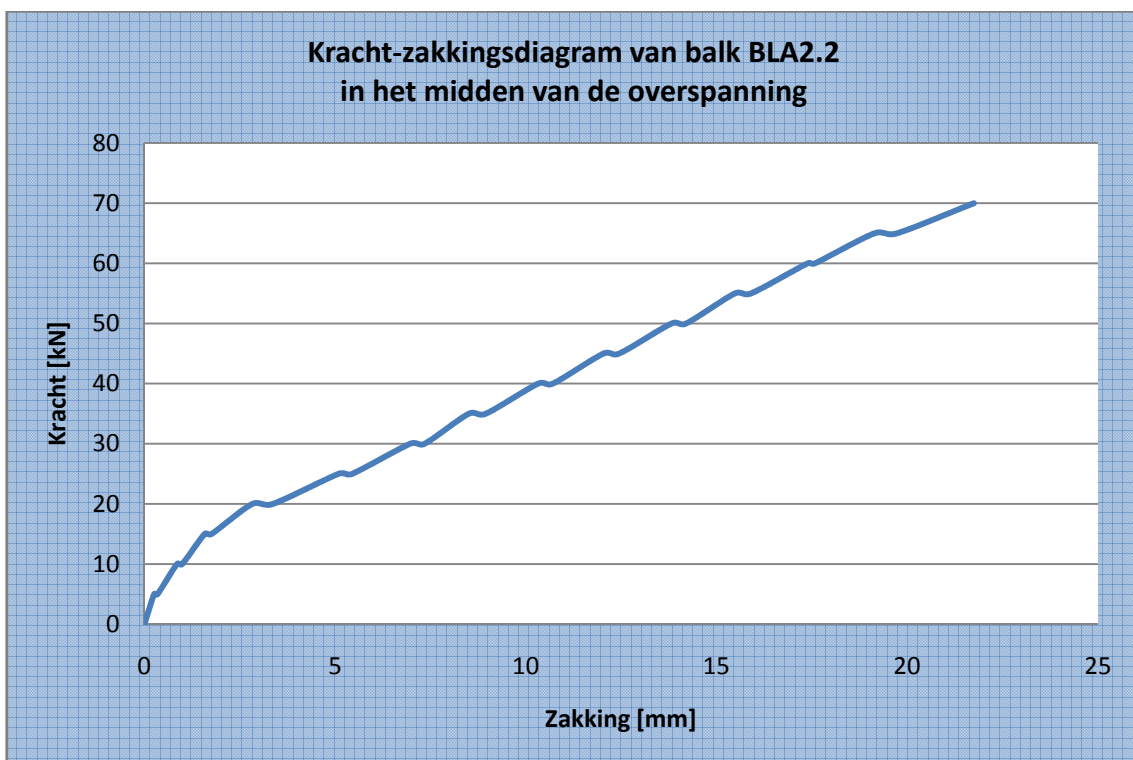




Grafiek 62: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.2 t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit

### 5.5.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

Grafiek 63 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 63: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.2 in het midden van de overspanning

**Tabel 113** toont de cijferwaarden van **Grafiek 63**.

Kracht	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging
	meetklok 1	meetklok 2	meetklok 3	meetklok 4	midden	uiteinde	
	(midden)	(midden)	(uiteinde)	(uiteinde)	[mm]	[mm]	
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,28	0,24	0,00	0,01	0,26	0,01	0,26
5	0,38	0,33	0,00	0,02	0,36	0,01	0,35
10	0,95	0,82	0,00	0,06	0,89	0,03	0,86
10	1,10	0,95	0,00	0,07	1,03	0,04	0,99
15	1,72	1,54	0,00	0,10	1,63	0,05	1,58
15	1,92	1,72	0,00	0,12	1,82	0,06	1,76
20	3,01	2,81	0,00	0,16	2,91	0,08	2,83
20	3,57	3,35	0,00	0,18	3,46	0,09	3,37
25	5,33	5,08	0,00	0,23	5,21	0,12	5,09
25	5,69	5,44	0,00	0,24	5,57	0,12	5,45
30	7,24	6,98	0,00	0,29	7,11	0,15	6,97
30	7,63	7,36	0,00	0,30	7,50	0,15	7,35
35	8,81	8,54	0,00	0,34	8,68	0,17	8,51
35	9,26	8,99	0,00	0,35	9,13	0,18	8,95
40	10,65	10,38	0,00	0,39	10,52	0,20	10,32
40	11,05	10,76	0,00	0,40	10,91	0,20	10,71
45	12,38	12,12	0,00	0,43	12,25	0,22	12,04
45	12,81	12,52	0,00	0,44	12,67	0,22	12,45
50	14,20	13,93	0,00	0,49	14,07	0,25	13,82
50	14,59	14,31	0,00	0,50	14,45	0,25	14,20
55	15,89	15,60	0,00	0,53	15,75	0,27	15,48
55	16,32	16,02	0,00	0,54	16,17	0,27	15,90
60	17,82	17,52	0,00	0,57	17,67	0,29	17,39
60	18,03	17,70	0,00	0,58	17,87	0,29	17,58
65	19,61	19,28	0,00	0,61	19,45	0,31	19,14
65	20,22	19,85	0,00	0,61	20,04	0,31	19,73
70	22,25	21,87	0,00	0,63	22,06	0,32	21,75

**Tabel 113: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.2 in het midden van de overspanning**

### 5.5.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 30 kN en 35 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 30kN + 5 \times \frac{7,2mm - 6,97mm}{8,51mm - 6,97mm} = 30,763kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 50 kN en 55 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 50kN + 5 \times \frac{14,4mm - 13,82mm}{15,48mm - 13,82mm} = 51,747kN$$

### 5.5.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 92,648kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- buigingsscheuren
- dwarskrachtenscheuren
- plotse onthechting van de koolstofvezelwapening in het midden en t.h.v. 4 linkerankers
- 4 van de linkerankers worden schuin uit de balk getrokken
- aanzet tot concrete rip-off

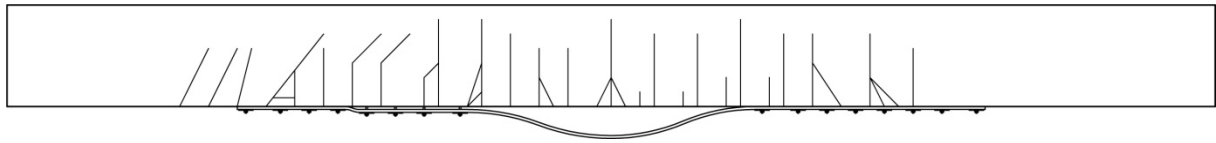
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

$$F_{rest,\max} = 76,674kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de restcapaciteit werden visueel waargenomen.

- inscheuringen in de koolstofvezelwapening t.h.v. de linkerankers
- 4 van de linkerankers worden geleidelijk aan uit de balk getrokken

**Figuur 109** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA2.2.



**Figuur 109: Schets scheurvorming balk BLA2.2**

#### 5.5.3.5 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BLA2.2.



**Figuur 110: Aanzet tot concrete rip-off scheur**



**Figuur 111: Onthechting balk BLA2.2 [1]**



**Figuur 112: Onthechting balk BLA2.2 [2]**



**Figuur 113: Inscheuring M12 anker**

### 5.5.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

#### 5.5.4.1 Lasten

**Tabel 114** vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 111,2 \text{ kN.m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 92,6 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN.m}$ $P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN.m}$ $P = 87,2 \text{ kN}$
	Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN.m}$
		$P_u = 70,0 \text{ kN}$

**Tabel 114: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.2**

#### 5.5.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 115** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

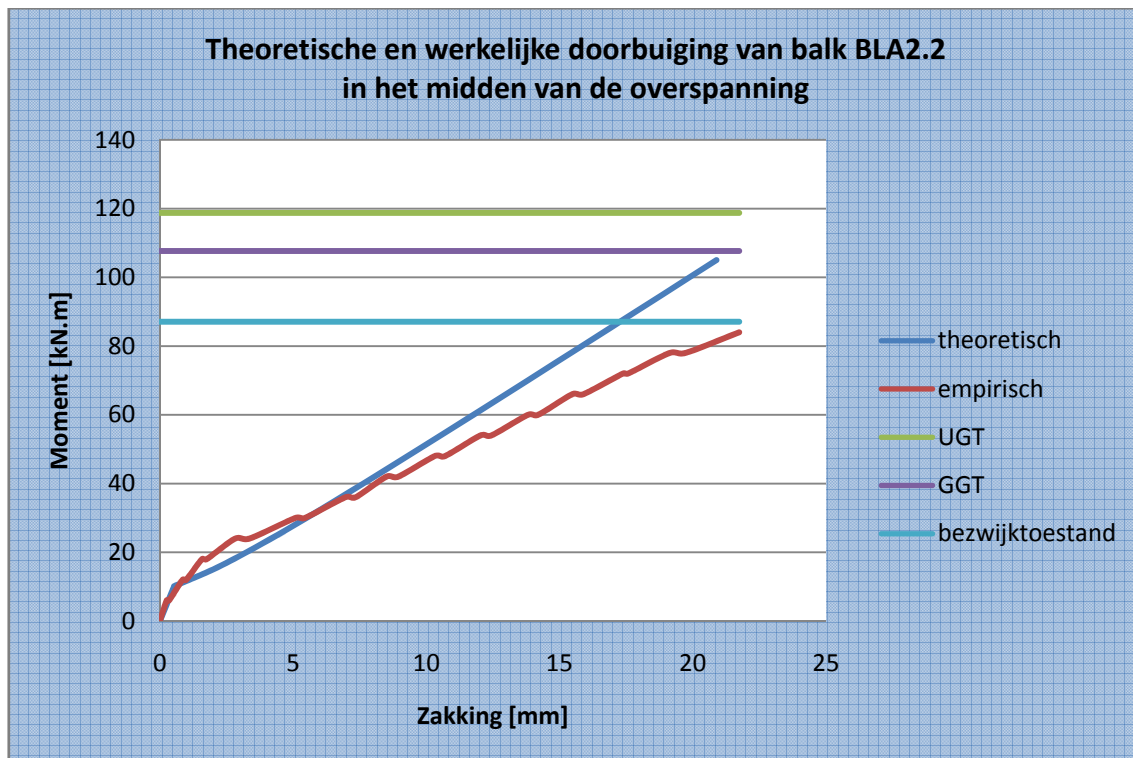
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{\max} = 92,6 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 149,0 \text{ kN}$ (beton: 100%)

**Tabel 115: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.2**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

### 5.5.4.3 Doorbuiging

**Grafiek 64** toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

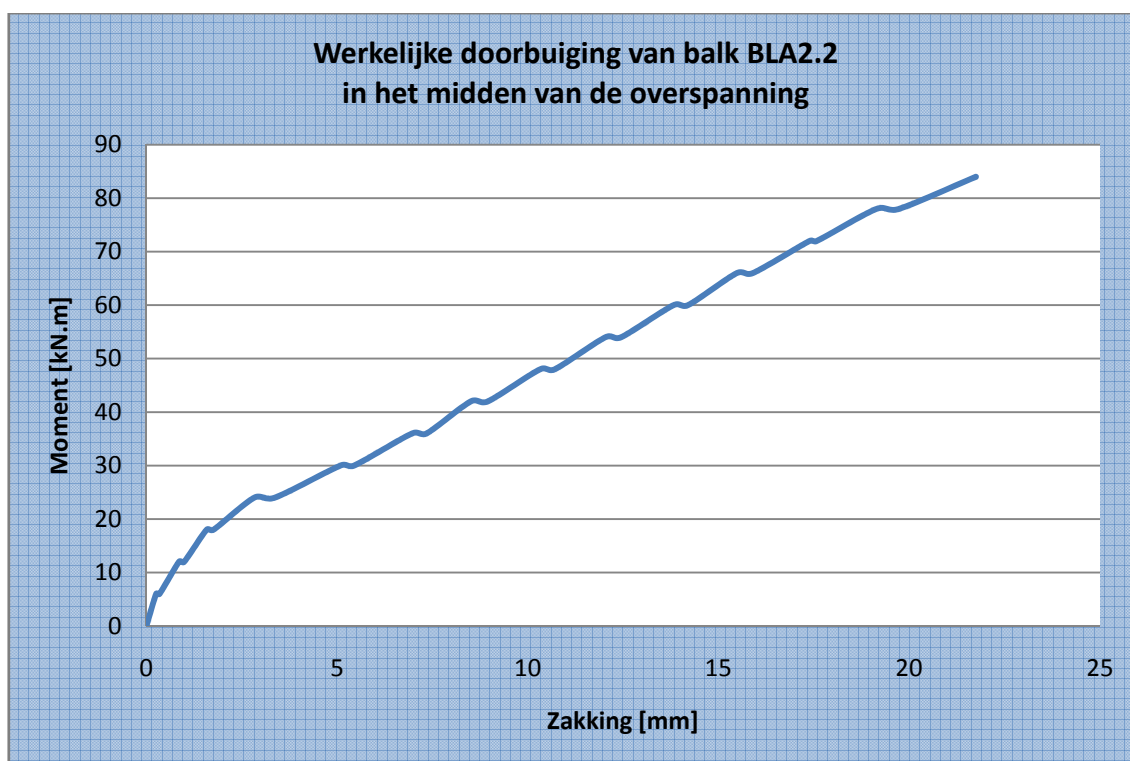


**Grafiek 64:** Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.2 in het midden van de overspanning

In de niet-gescheurde toestand vallen beide grafieken aanvankelijk samen. In de gescheurde toestand is de empirisch bepaalde doorbuiging groter dan de theoretisch berekende doorbuiging indien het opgenomen moment groter is dan 24 kN m.

### 5.5.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 65** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA2.2 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 65** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 18,0 kN m.



**Grafiek 65: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.2 in het midden van de overspanning**

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 25,0 kN. Dit komt overeen met een moment van 30,0 kN.m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN.m.

#### 5.5.4.5 Breukmechanismen

**Tabel 116** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	51,1 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	43,3 kN m

**Tabel 116: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Indien concrete rip-off buiten beschouwing gelaten wordt, dan is zowel volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 onthechting het bepalende breukmechanisme. Er bestaat wel geen eensgezindheid over de locatie waar de onthechting zich het eerst zou manifesteren. Volgens CUR Aanbeveling 91 zou dit in het midden van de overspanning zijn, terwijl volgens FIB Bulletin 14 dit t.h.v. dwarskrachtenscheuren zou zijn. In werkelijkheid trad onthechting op, maar de onthechting trad zo snel en zo plots op dat het onmogelijk vast te stellen waar die zich het eerst manifesteerde.

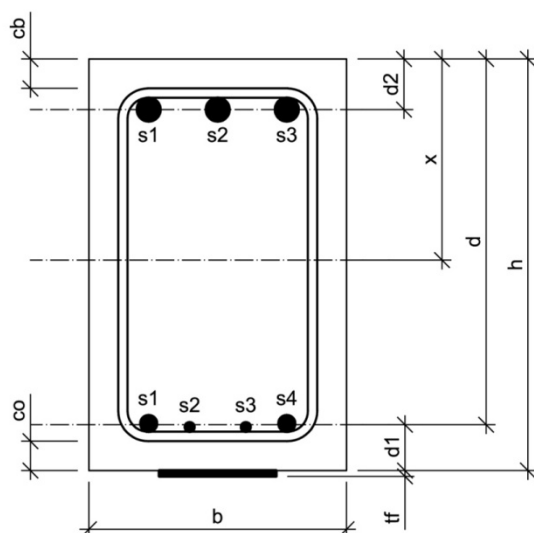
## 5.6 Balk BLA2.3

### 5.6.1 Algemeen

Balk BLA2.3 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening. Aan beide zijden is deze balk bijkomend verankerd met 7 mechanische M10 ankers. Deze ankers hebben een lengte van 68 mm en worden voorgespannen met een moment van 30 N.m. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm, hebben een dikte van 3 mm en worden bijkomend verlijmd op de koolstofvezelwapening. Om concrete rip-off te vermijden, is de koolstofvezelwapening aan beide zijden op 3 cm van de uiteinden bijkomend verankerd met een mechanisch M12 anker. Deze ankers hebben een lengte van 150 mm en worden voorgespannen met een moment van 50 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA2.3.

<b>Ouderdom</b>	141 dagen	
<b>Lengte</b>	4,210 m	
<b>Breedte</b>	0,226 m	
<b>Hoogte</b>	0,351 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

Tabel 117: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.3

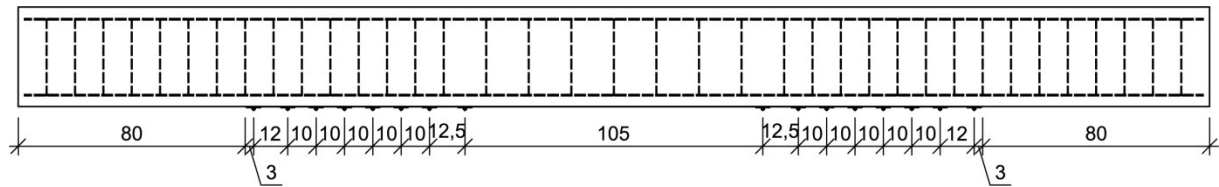


$$h = 351 \text{ mm}$$

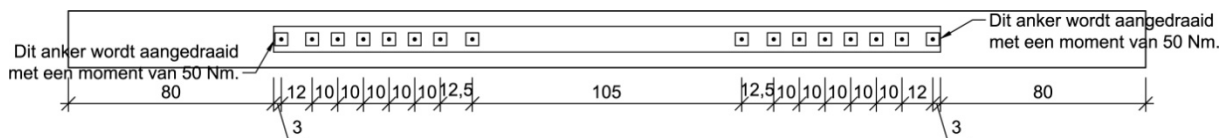
$$b = 226 \text{ mm}$$

Figuur 114: Dwarsdoorsnede balk BLA2.3





Figuur 115: Vooraanzicht verankering balk BLA2.3



Figuur 116: Onderaanzicht verankering balk BLA2.3

### 5.6.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{c,x}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 23,628 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 28,483 \frac{N}{mm^2}^2$$

De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA2.3 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi 14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi 8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi 14} = 559,556 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi 8} = 552,660 \frac{N}{mm^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{mm^2}$$

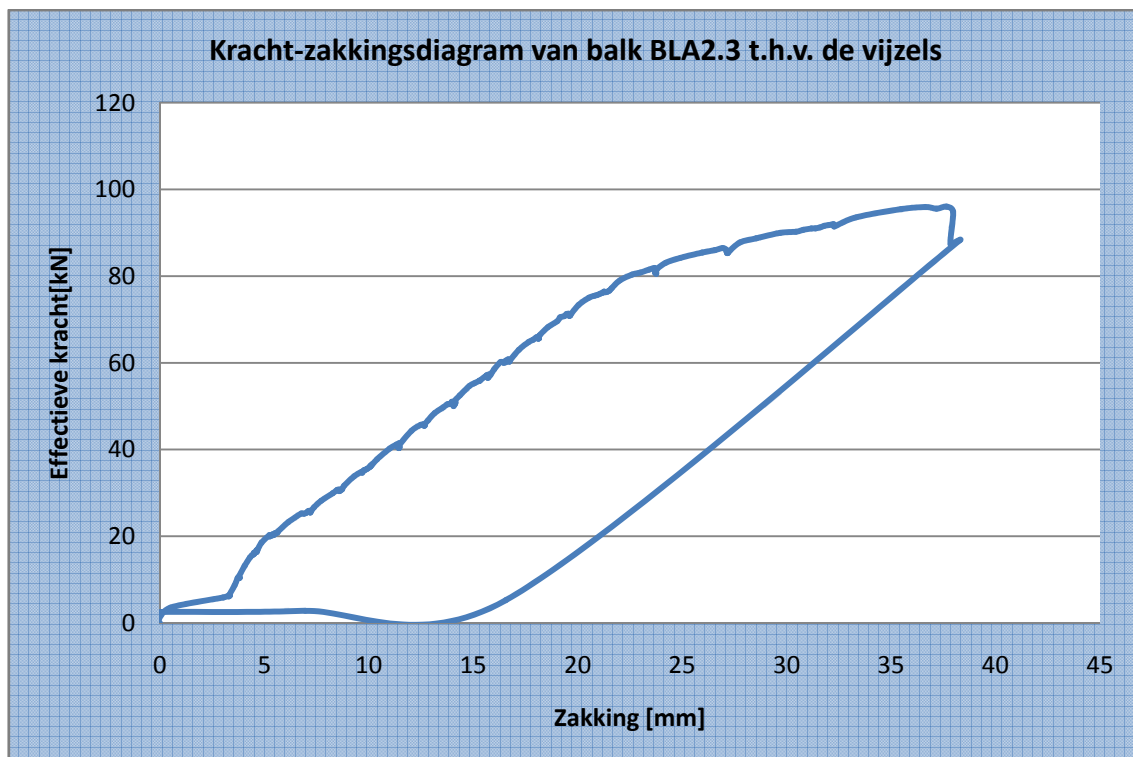
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.6.3 Meetresultaten

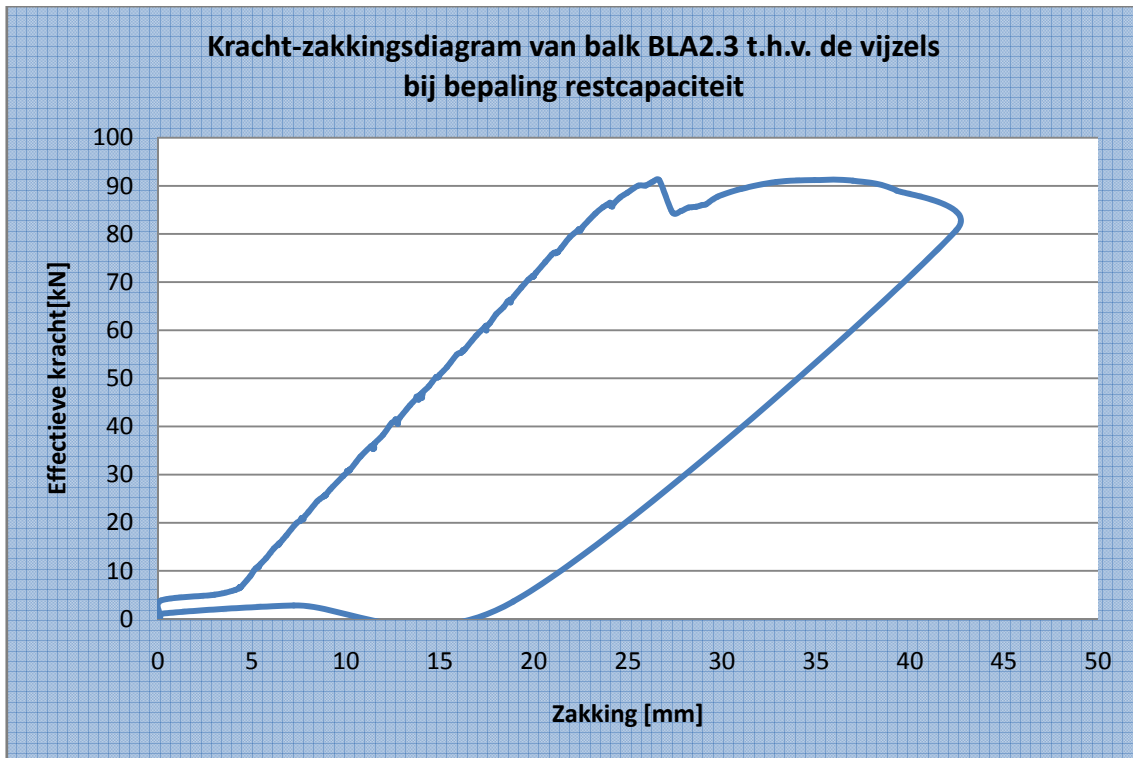
#### 5.6.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

Grafiek 66 toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



Grafiek 66: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.3 t.h.v. de vijzels

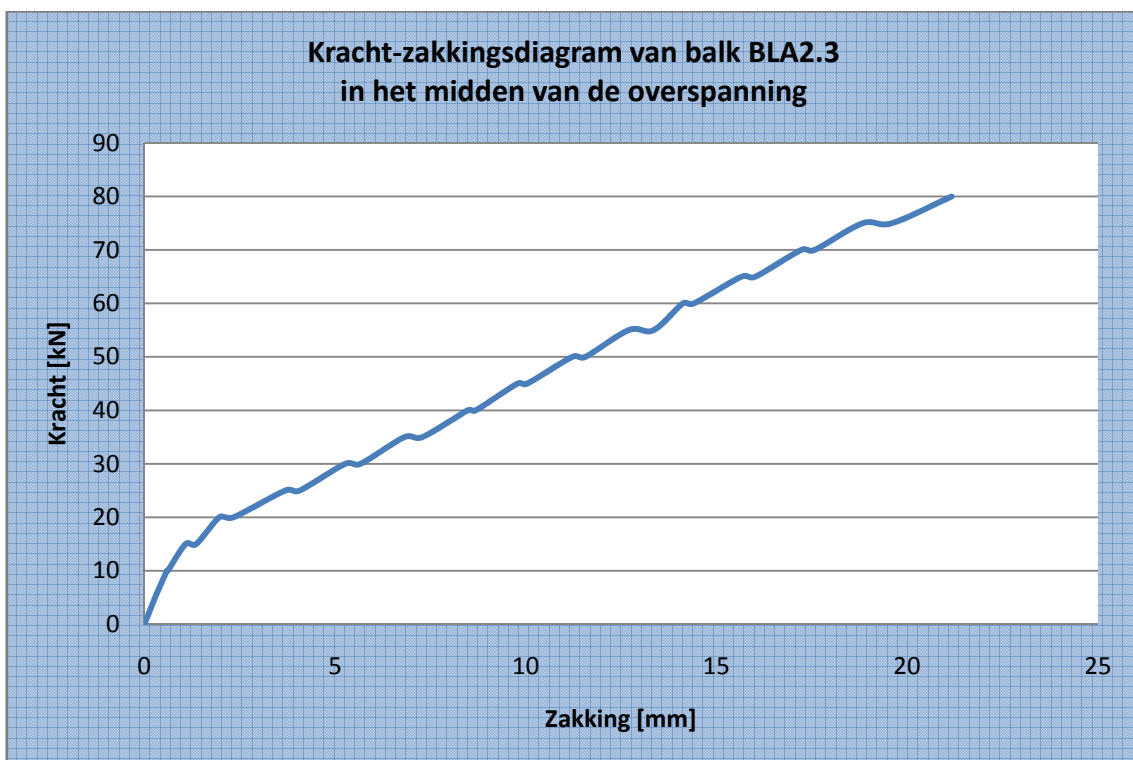
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.



Grafiek 67: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.3 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit

**5.6.3.2 Zakking in het midden van de overspanning**

Grafiek 68 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 68: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.3 in het midden van de overspanning

**Tabel 118** toont de cijferwaarden van **Grafiek 68**.

Kracht	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging
	meetklok 1	meetklok 2	meetklok 3	meetklok 4	midden	uiteinde	
	(midden)	(midden)	(uiteinde)	(uiteinde)	[mm]	[mm]	
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	0,00	0,00	n.c	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,31	0,31		0,03	0,31	0,03	0,28
5	0,31	0,31		0,03	0,31	0,03	0,28
10	0,65	0,65		0,06	0,65	0,06	0,59
10	0,68	0,69		0,07	0,69	0,07	0,62
15	1,16	1,20		0,10	1,18	0,10	1,08
15	1,45	1,49		0,11	1,47	0,11	1,36
20	2,06	2,13		0,13	2,10	0,13	1,97
20	2,43	2,52		0,14	2,48	0,14	2,34
25	3,78	3,91		0,15	3,85	0,15	3,70
25	4,15	4,29		0,15	4,22	0,15	4,07
30	5,32	5,53		0,16	5,43	0,16	5,27
30	5,73	5,94		0,17	5,84	0,17	5,67
35	6,88	7,12		0,18	7,00	0,18	6,82
35	7,34	7,60		0,18	7,47	0,18	7,29
40	8,51	8,83		0,19	8,67	0,19	8,48
40	8,72	9,03		0,19	8,88	0,19	8,69
45	9,80	10,16		0,20	9,98	0,20	9,78
45	10,06	10,43		0,21	10,25	0,21	10,04
50	11,24	11,64		0,22	11,44	0,22	11,22
50	11,57	11,99		0,22	11,78	0,22	11,56
55	12,70	13,15		0,23	12,93	0,23	12,70
55	13,34	13,82		0,23	13,58	0,23	13,35
60	14,10	14,62		0,24	14,36	0,24	14,12
60	14,38	14,91		0,24	14,65	0,24	14,41
65	15,62	16,19		0,25	15,91	0,25	15,66
65	15,98	16,57		0,26	16,28	0,26	16,02
70	17,18	17,80		0,27	17,49	0,27	17,22
70	17,52	18,16		0,27	17,84	0,27	17,57
75	18,78	19,44		0,28	19,11	0,28	18,83
75	19,52	20,23		0,28	19,88	0,28	19,60
80	21,09	21,84		0,30	21,47	0,30	21,17

**Tabel 118: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.3 in het midden van de overspanning**

### 5.6.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 35 kN en 40 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 35kN + 5 \times \frac{7,2mm - 6,82mm}{8,48mm - 6,82mm} = 36,145kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 60 kN en 65 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 60kN + 5 \times \frac{14,4mm - 14,12mm}{15,66mm - 14,12mm} = 60,912kN$$

### 5.6.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 96,018kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- buigingsscheuren en dwarskrachtenscheuren
- onthechting door scheuroverbrugging
- onthechting enkel t.h.v. de rechterszijde
- gelijmde verdeelplaatjes verhinderen het inscheuren van de koolstofvezelwapening

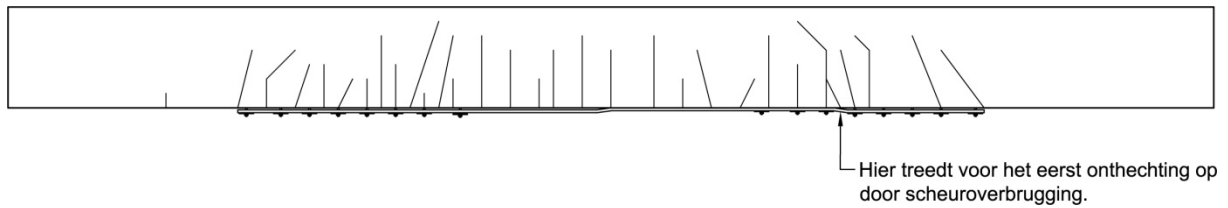
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

$$F_{rest, \max} = 91,219kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de restcapaciteit werden visueel waargenomen.

- onthechting t.h.v. de linkerszijde aan 90 kN
- ankers scheuren niet door
- aanzet tot concrete rip-off scheur

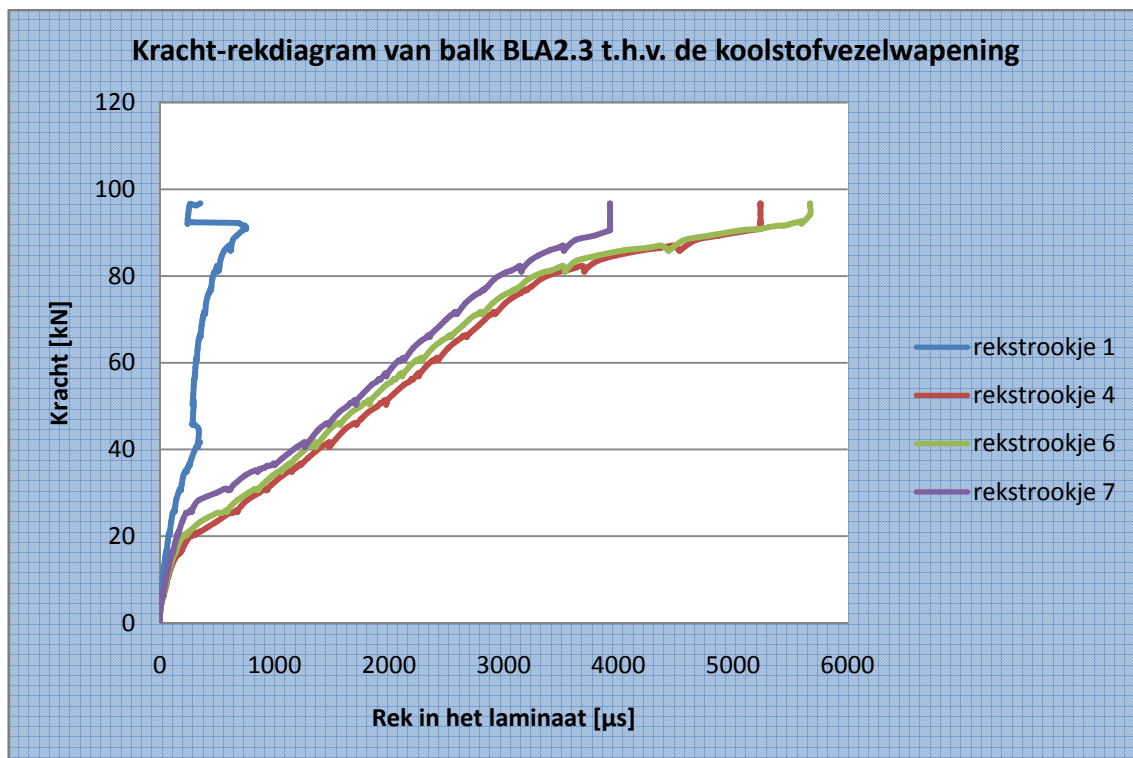
**Figuur 117** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA2.3.



**Figuur 117: Schets scheurvorming balk BLA2.3**

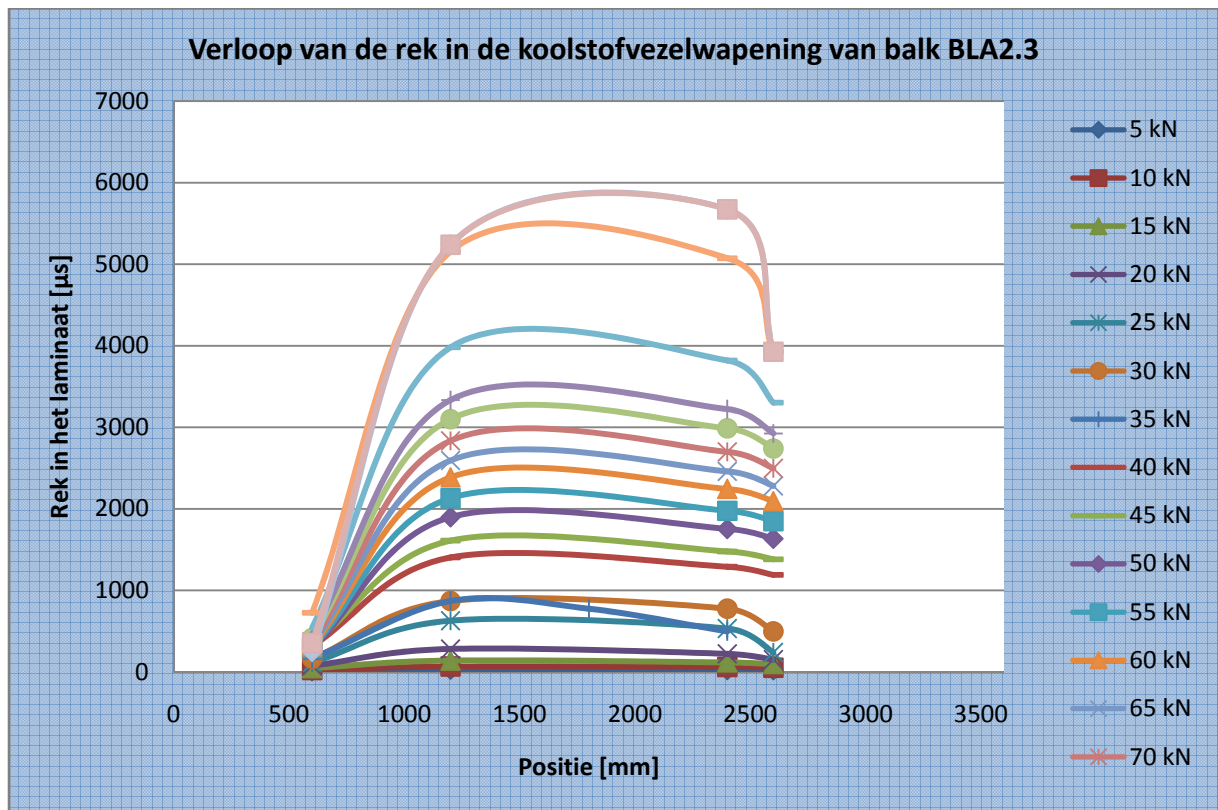
### 5.6.3.5 Rek van de koolstofvezelwapening

**Grafiek 69** toont de rek in de koolstofvezelwapening. Er dient wel opgemerkt te worden dat niet alle rekstrookjes gegevens registreerden tijdens de proef.



**Grafiek 69: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.3 t.h.v. de rekstrookjes 1, 4, 6 en 7**

**Grafiek 70** toont het verloop van de rek over de volledige lengte van de overspanning bij een stijgende belasting.



Grafiek 70: Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening van balk BLA2.3

### 5.6.3.6 Foto's

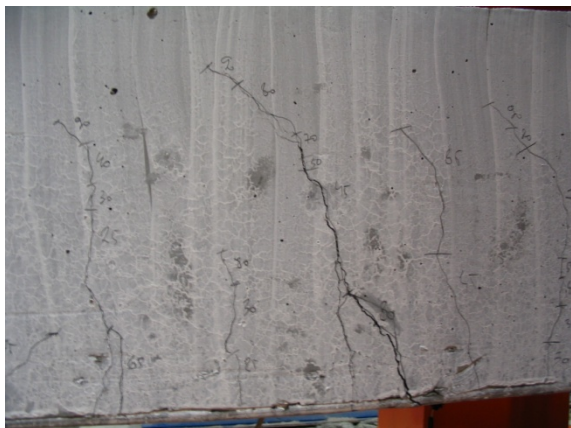
De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BLA2.3.



Figuur 118: Scheurvorming linkerkant balk BLA2.3



Figuur 119: Scheurvorming rechterkant balk BLA2.3



Figuur 120: Onthechting door scheuroverbrugging [1]



Figuur 121: Onthechting door scheuroverbrugging [2]



Figuur 122: Geen inscheuringen zichtbaar

#### 5.6.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

##### 5.6.4.1 Lasten

Tabel 119 vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 115,2 \text{ kN.m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 96,0 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN.m}$ $P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN.m}$ $P = 87,2 \text{ kN}$
	Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN.m}$
		$P_u = 70,0 \text{ kN}$

Tabel 119: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.3



### 5.6.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 120** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

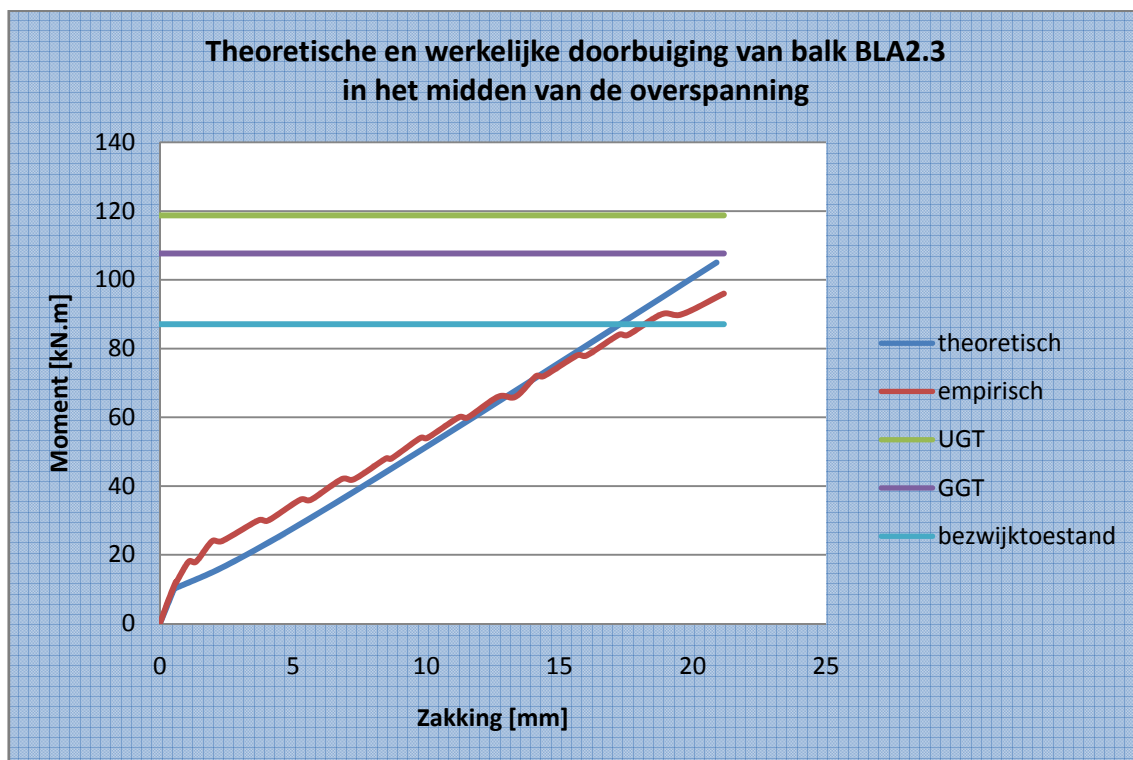
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{\max} = 92,6 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 149,0 \text{ kN}$ (beton: 100%)

**Tabel 120: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.3**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

### 5.6.4.3 Doorbuiging

**Grafiek 71** toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

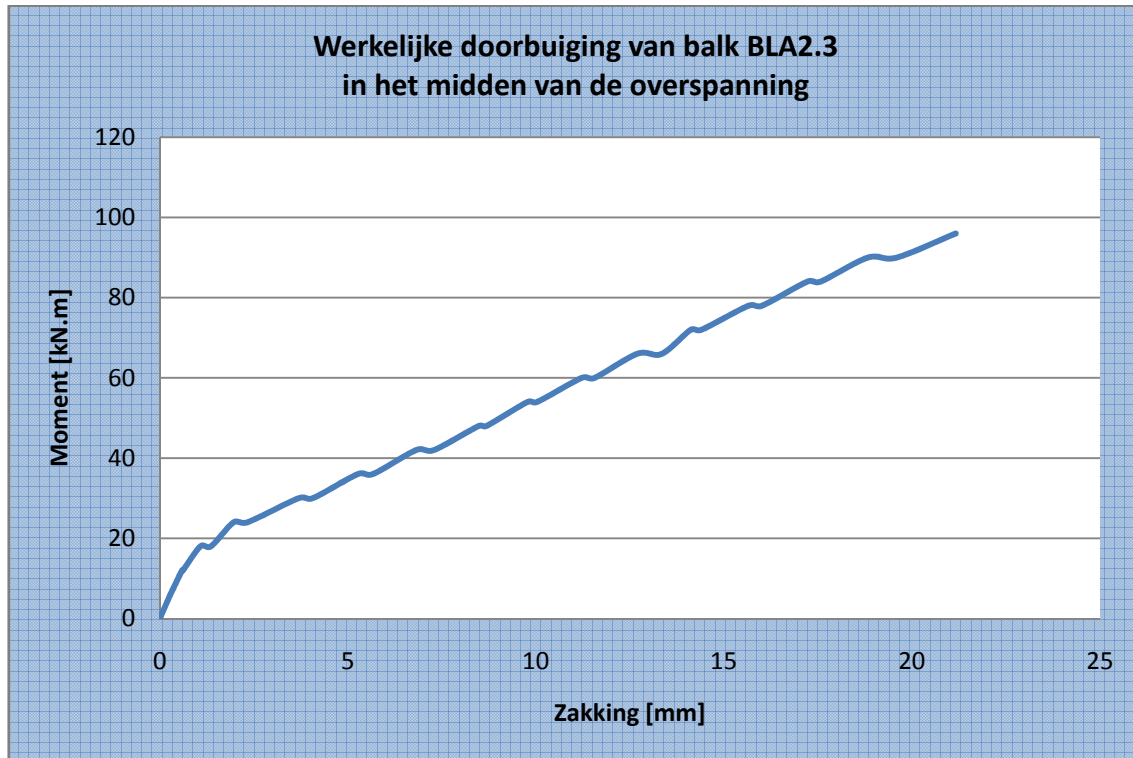


**Grafiek 71: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.3 in het midden van de overspanning**

In de niet-gescheurde toestand vallen beide grafieken aanvankelijk samen. In de gescheurde toestand is de empirisch bepaalde doorbuiging groter dan de theoretisch berekende doorbuiging indien het opgenomen moment groter is dan 66 kN m.

#### 5.6.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 72** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA2.3 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 72** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 18,0 kN m.

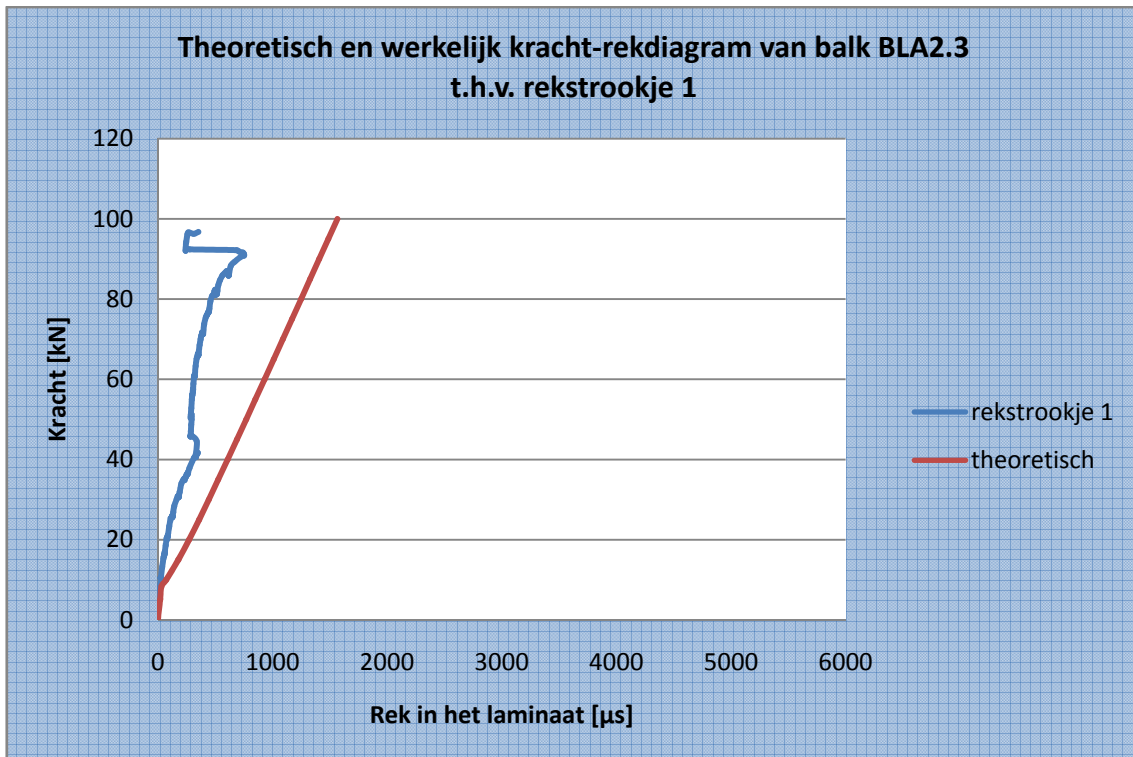


**Grafiek 72: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.3 in het midden van de overspanning**

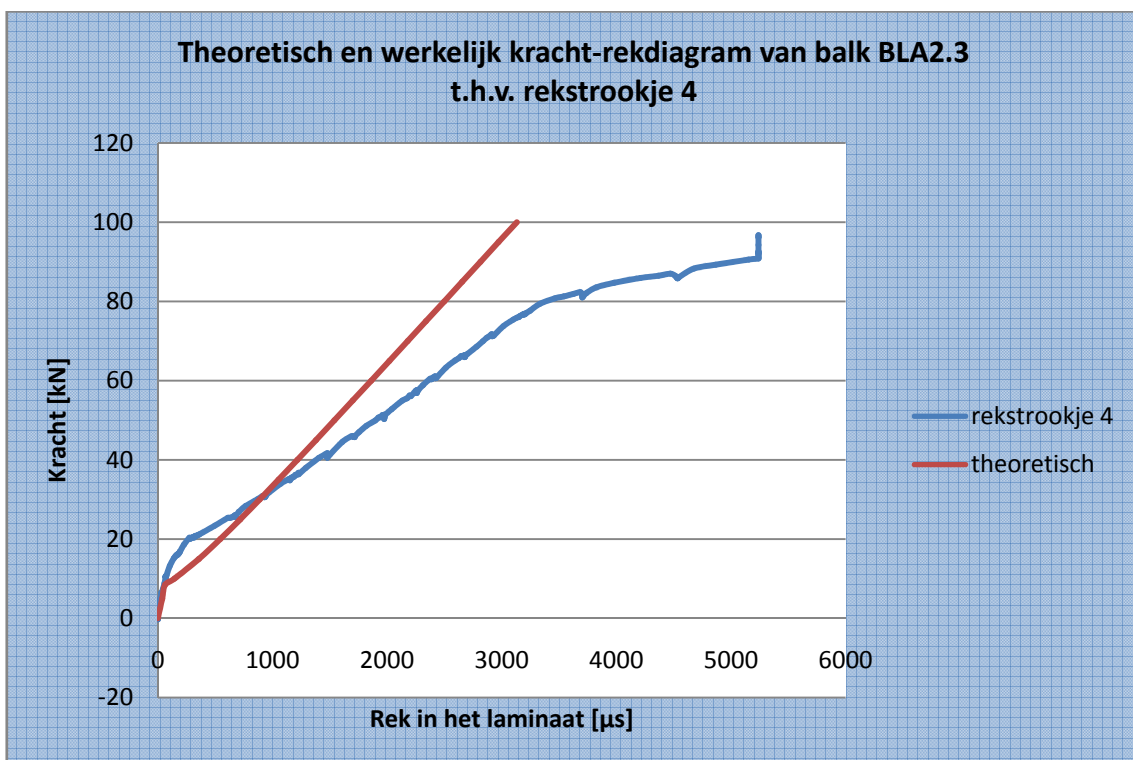
Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 20,0 kN. Dit komt overeen met een moment van 24,0 kN.m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN.m.

5.6.4.5 *Rek van de koolstofvezelwapening*

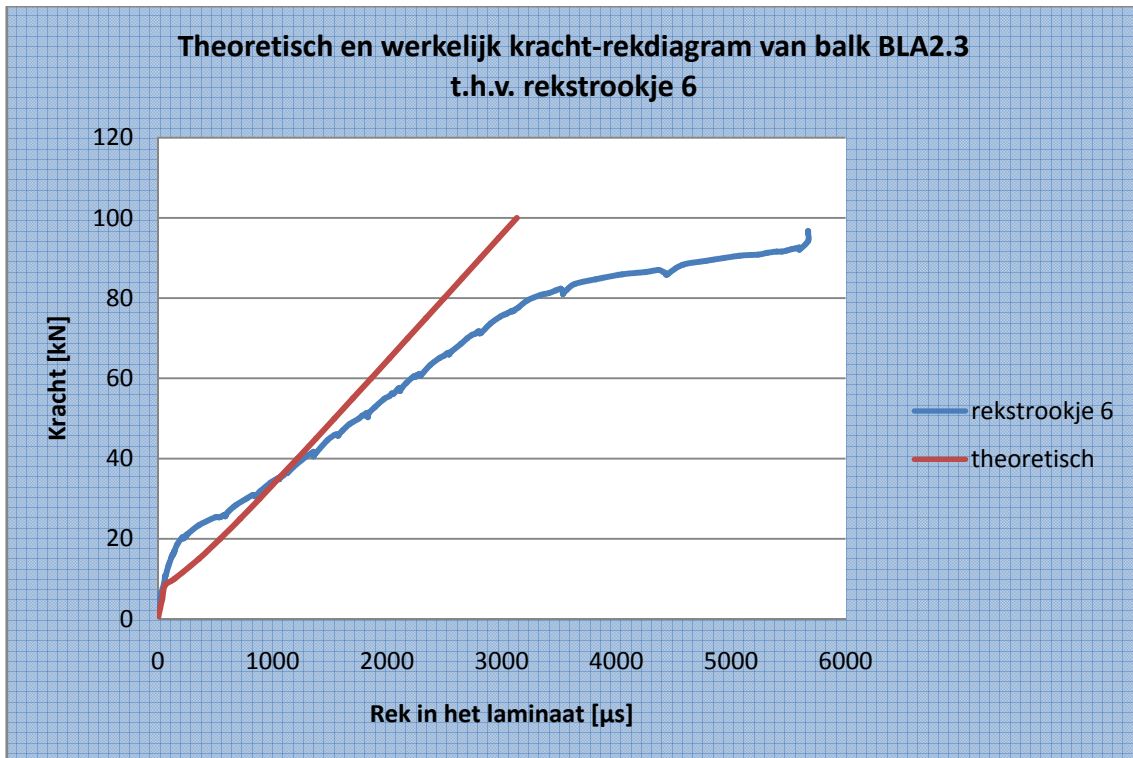
Grafiek 73 tot Grafiek 76 vergelijken de theoretisch berekende rek en de empirisch bepaalde rek met elkaar.



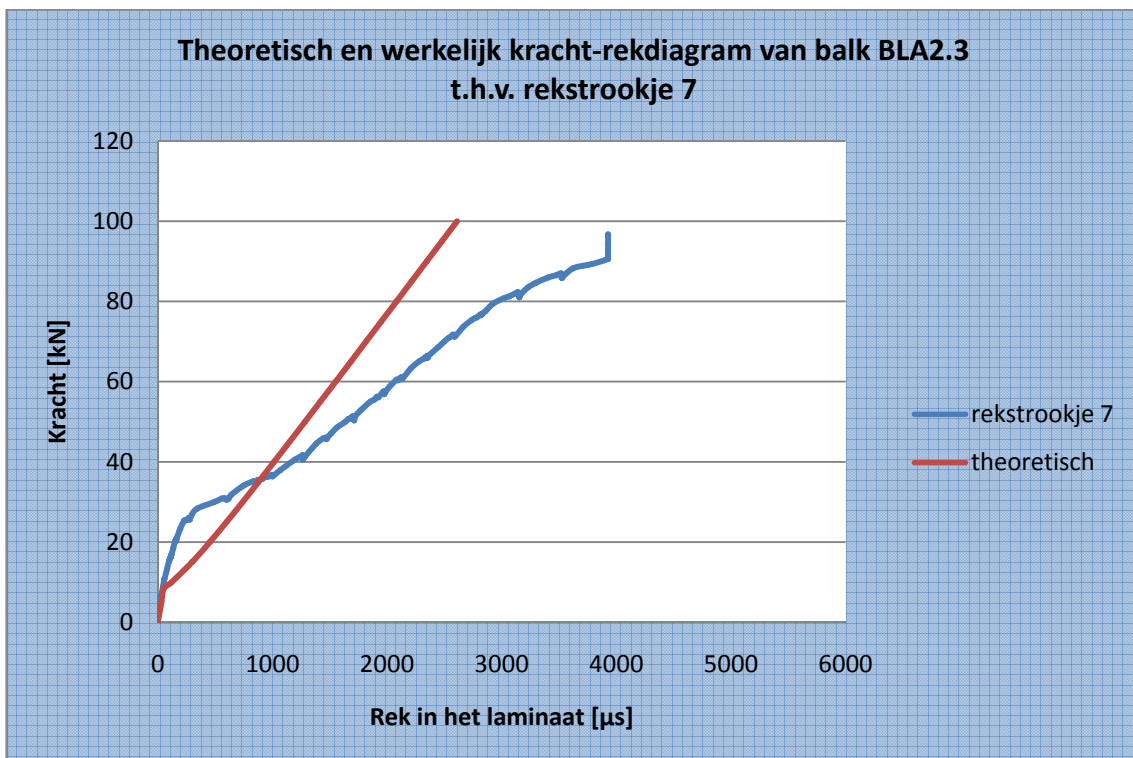
Grafiek 73: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.3 t.h.v. rekstrookje 1



Grafiek 74: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA23 t.h.v. rekstrookje 4



Grafiek 75: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.3 t.h.v. rekstrookje 6



Grafiek 76: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.3 t.h.v. rekstrookje 7

Uit de bovenstaande grafieken blijkt dat de klassieke berekeningsmethode niet voldoet om de rek in de koolstofvezelwapening te voorspellen. Verder blijkt de hoofdwapening te vloeien bij een vjzelkracht van 82,0 à 83,0 kN. Dit is af te leiden uit de knik in bovenstaande grafieken. Deze waarneming bleek ook reeds uit **Grafiek 67** naar boven te komen. Bijgevolg kan er aangenomen worden dat bij een kracht van 82 à 83 kN het staal begint te vloeien. Na dit vloeimoment wordt er verondersteld dat de hoofdwapening geen extra last meer kan opnemen. De extra last dient dan bijgevolg door de koolstofvezelwapening opgenomen te worden.

Er kan dus besloten worden dat de hoofdwapening reeds gevloeid heeft vooraleer breuk optrad. Eens het vloeimoment overschreden is, neemt de rek in grote mate toe. De maximale spanning in de koolstofvezelwapening wordt als volgt berekend.

$$\begin{aligned}\sigma &= E \cdot \varepsilon \\ \Leftrightarrow \sigma &= 175000 \times 5672,934 \times 10^{-6} \\ \Leftrightarrow \sigma &= 992,763 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}$$

De maximale spanning in de koolstofvezelwapening bedraagt 992,8 N/mm<sup>2</sup>. Dit is slechts 34,8% van de breukspanning, die 2850 N/mm<sup>2</sup> bedraagt.

#### 5.6.4.6 Breukmechanismen

**Tabel 121** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	51,1 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	43,3 kN m

**Tabel 121: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Indien concrete rip-off buiten beschouwing gelaten wordt, dan is zowel volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 onthechting het bepalende breukmechanisme. Er bestaat wel geen eensgezindheid over de locatie waar de onthechting zich het eerst zou manifesteren. Volgens CUR Aanbeveling 91 zou dit in het midden van de overspanning zijn, terwijl volgens FIB Bulletin 14 dit t.h.v. dwarskrachtenscheuren zou zijn. In werkelijkheid trad onthechting door scheuroverbrugging op. Het betrof een dwarskrachtenscheur, dus hier heeft FIB Bulletin 14 het bij het rechte eind.

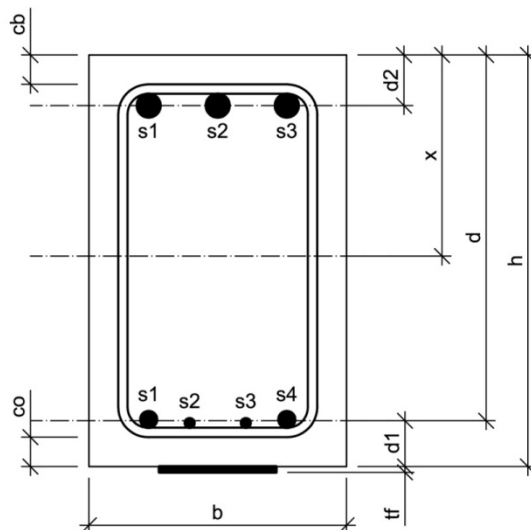
## 5.7 Balk BLA2.4

### 5.7.1 Algemeen

Balk BLA2.4 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening. Aan beide zijden is deze balk bijkomend verankerd met 2 mechanische M10 ankers. Deze ankers hebben een lengte van 68 mm en worden voorgespannen met een moment van 30 N.m. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Om concrete rip-off te vermijden, is de koolstofvezelwapening aan beide zijden op 3 cm van de uiteinden bijkomend verankerd met een mechanisch M12 anker. Deze ankers hebben een lengte van 150 mm en worden voorgespannen met een moment van 50 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA2.4.

<b>Ouderdom</b>	141 dagen	
<b>Lengte</b>	4,206 m	
<b>Breedte</b>	0,220 m	
<b>Hoogte</b>	0,352 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

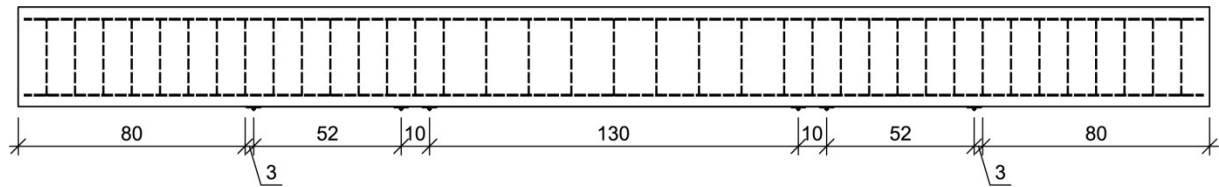
Tabel 122: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.4



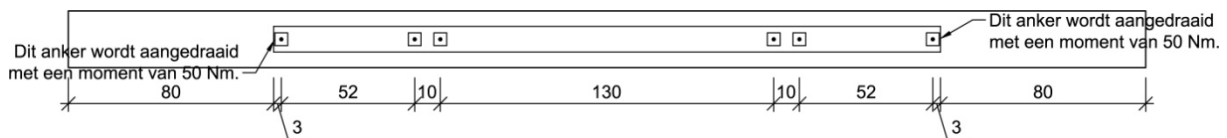
$$h = 352 \text{ mm}$$

$$b = 220 \text{ mm}$$

Figuur 123: Dwarsdoorsnede balk BLA2.4



Figuur 124: Vooraanzicht verankering BLA2.4



Figuur 125: Onderaanzicht verankering BLA2.4

### 5.7.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{c,x}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 24,494 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 29,527 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA2.4 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi 14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi 8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi 14} = 559,556 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi 8} = 552,660 \frac{N}{mm^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{mm^2}$$

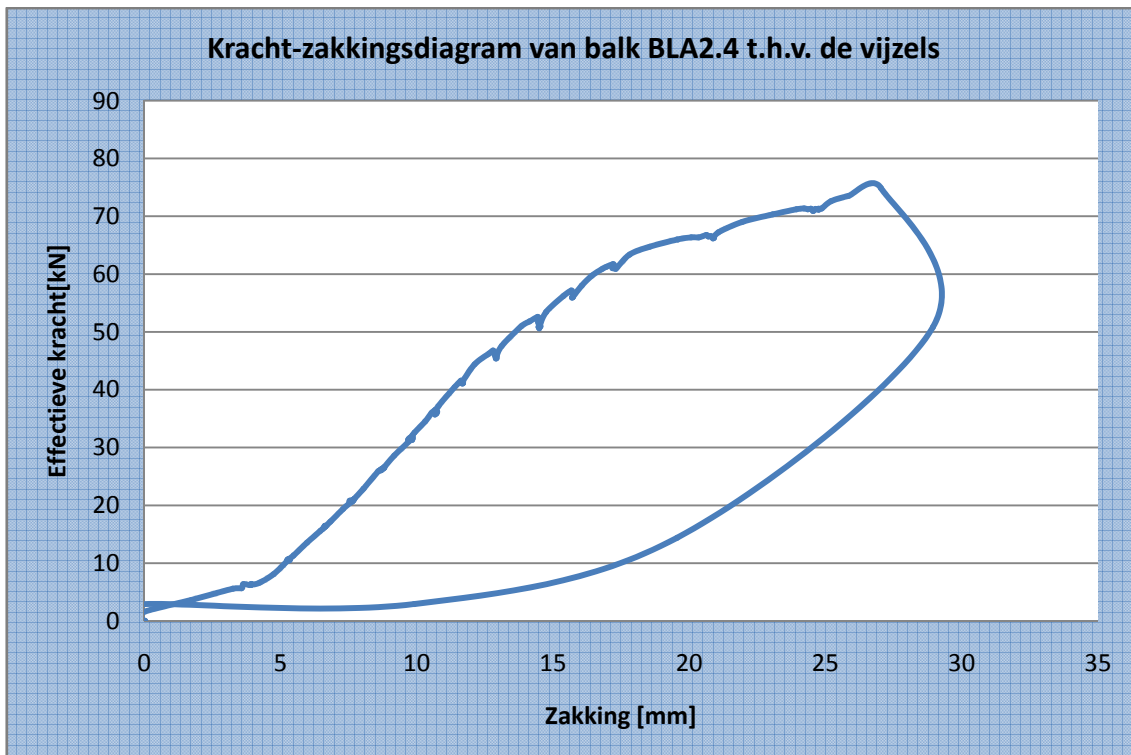
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.7.3 Meetresultaten

#### 5.7.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

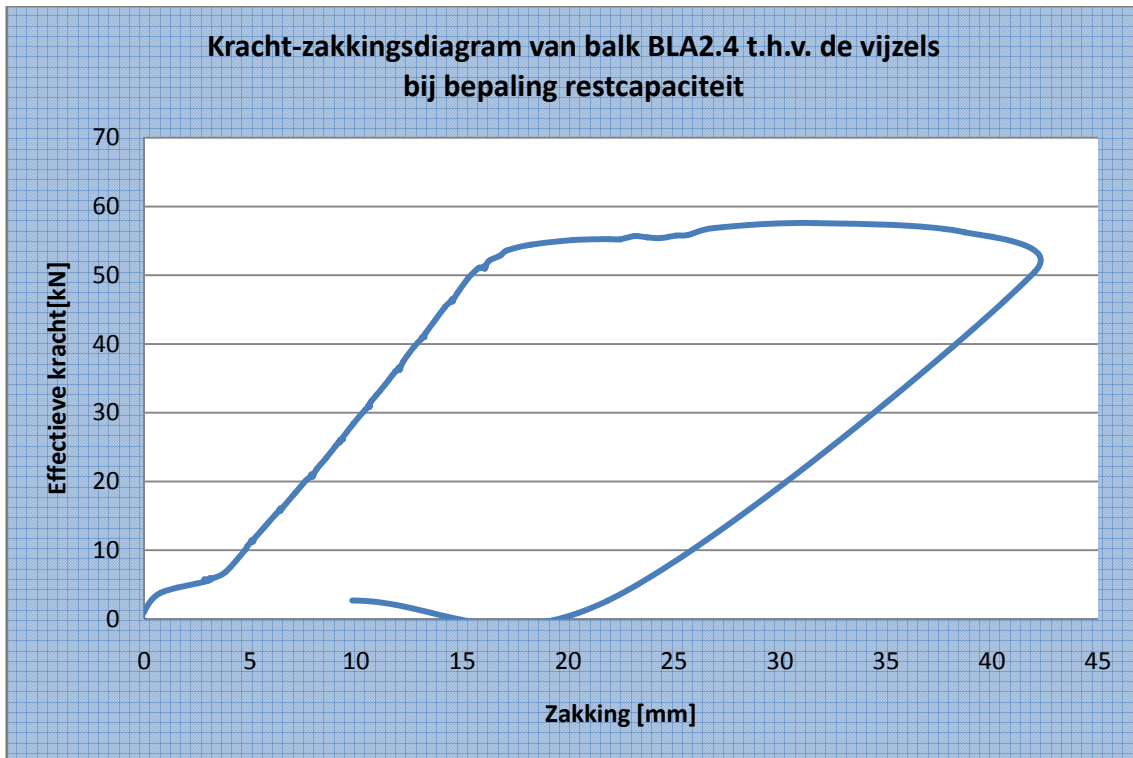
Grafiek 77 toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



Grafiek 77: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.4 t.h.v. de vijzels

Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

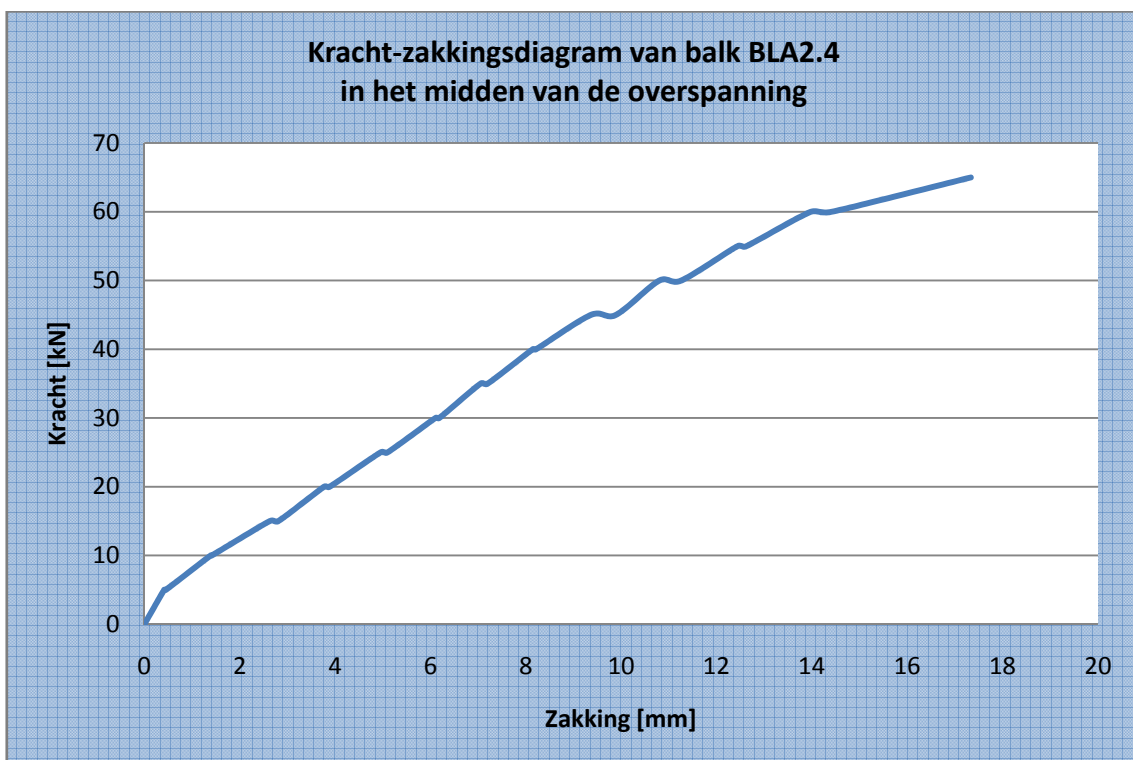




Grafiek 78: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.4 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit

### 5.7.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

Grafiek 79 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 79: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.4 in het midden van de overspanning

**Tabel 123** toont de cijferwaarden van **Grafiek 79**.

Kracht [kN]	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging [mm]
	meetklok 1 (midden)	meetklok 2 (midden)	meetklok 3 (uiteinde)	meetklok 4 (uiteinde)	midden	uiteinde	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
0	n.c.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5		0,44	0,04	0,01	0,44	0,03	0,42
5		0,48	0,05	0,01	0,48	0,03	0,45
10		1,46	0,10	0,04	1,46	0,07	1,39
10		1,49	0,11	0,04	1,49	0,08	1,42
15		2,74	0,14	0,08	2,74	0,11	2,63
15		2,93	0,15	0,09	2,93	0,12	2,81
20		3,91	0,16	0,12	3,91	0,14	3,77
20		4,03	0,17	0,12	4,03	0,15	3,89
25		5,13	0,19	0,16	5,13	0,18	4,96
25		5,28	0,19	0,17	5,28	0,18	5,10
30		6,31	0,20	0,21	6,31	0,21	6,11
30		6,40	0,21	0,22	6,40	0,22	6,19
35		7,28	0,21	0,25	7,28	0,23	7,05
35		7,44	0,22	0,26	7,44	0,24	7,20
40		8,41	0,23	0,30	8,41	0,27	8,15
40		8,48	0,23	0,30	8,48	0,27	8,22
45		9,65	0,24	0,33	9,65	0,29	9,37
45		10,19	0,25	0,35	10,19	0,30	9,89
50		11,11	0,25	0,37	11,11	0,31	10,80
50		11,58	0,26	0,38	11,58	0,32	11,26
55		12,76	0,26	0,38	12,76	0,32	12,44
55		12,96	0,27	0,40	12,96	0,34	12,63
60		14,32	0,28	0,41	14,32	0,35	13,98
60		14,77	0,29	0,43	14,77	0,36	14,41
65		17,70	0,29	0,44	17,70	0,37	17,34

**Tabel 123:** Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.4 in het midden van de overspanning**5.7.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250**

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 35 kN en 40 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 35kN + 5 \times \frac{7,2mm - 7,05mm}{8,15mm - 7,05mm} = 35,685kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 60 kN en 65 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 60kN + 5 \times \frac{14,4mm - 13,98mm}{17,34mm - 13,98mm} = 60,632kN$$

#### 5.7.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 92,648kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- buigingsscheuren
- dwarskrachtenscheuren
- plotse onthechting
- M10 ankers t.h.v. de rechtermijzel scheuren iets door

Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

$$F_{rest, \max} = 57,597kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de restcapaciteit werden visueel waargenomen.

- inscheuringen in de koolstofvezelwapening t.h.v. de rechterankers

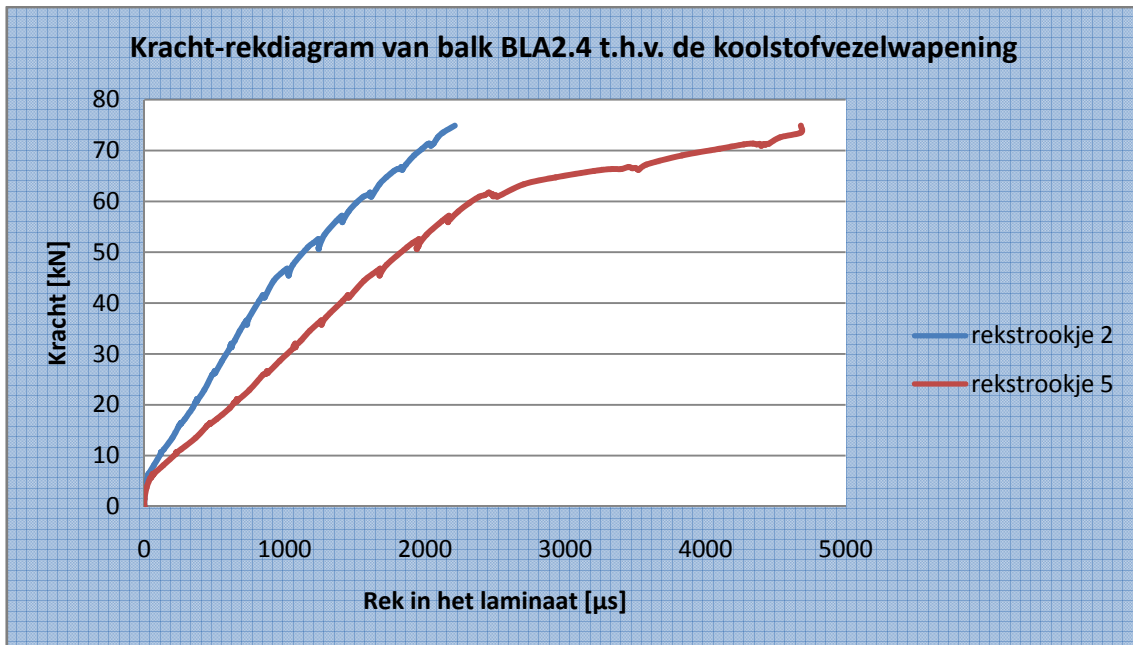
**Figuur 126** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA2.4.



**Figuur 126: Schets scheurvorming balk BLA2.4**

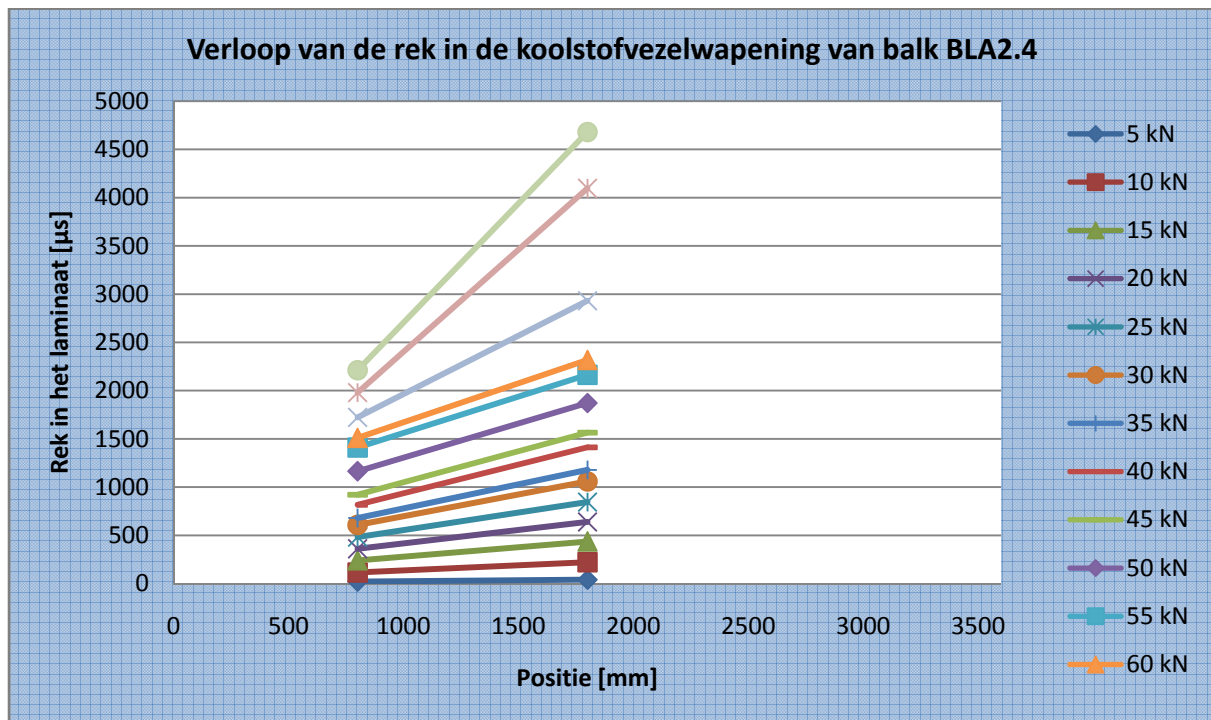
5.7.3.5 *Rek van de koolstofvezelwapening*

**Grafiek 80** toont de rek in de koolstofvezelwapening. Er dient wel opgemerkt te worden dat niet alle rekstroomjes gegevens registreerden tijdens de proef.



**Grafiek 80:** Kracht-rekdiagram van balk BLA2.4 t.h.v. de koolstofvezelwapening

**Grafiek 81** toont het verloop van de rek over de volledige lengte van de balk bij een stijgende belasting. In dit geval echter kunnen geen besluiten uit deze grafiek genomen worden, aangezien slechts twee rekstroomjes gegevens registreerden.



**Grafiek 81:** Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening van balk BLA2.4

### 5.7.3.6 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BLA2.4.



**Figuur 127: Scheurvorming linkerkant balk BLA2.4**



**Figuur 128: Scheurvorming linkerkant balk BLA2.4**



**Figuur 129: Onthechting aan het rechtereinde**



**Figuur 130: Rechterankers**

### 5.7.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

#### 5.7.4.1 Lasten

**Tabel 124** vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 89,9 \text{ kN.m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 74,9 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN.m}$
		$P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN.m}$
		$P = 87,2 \text{ kN}$
Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN.m}$	
	$P_u = 70,0 \text{ kN}$	

**Tabel 124:** Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.4

#### 5.7.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 125** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

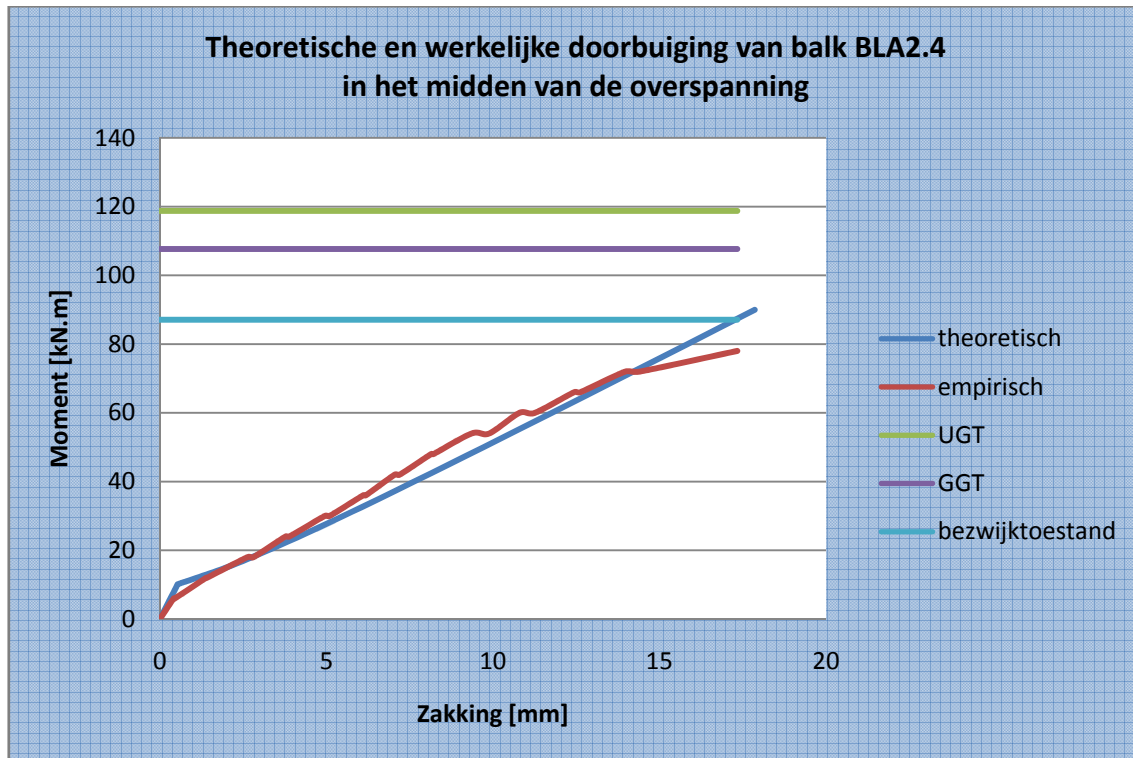
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{\max} = 74,9 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 149,0 \text{ kN}$ (beton: 100%)

**Tabel 125:** Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.4

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

### 5.7.4.3 Doorbuiging

Grafiek 82 toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

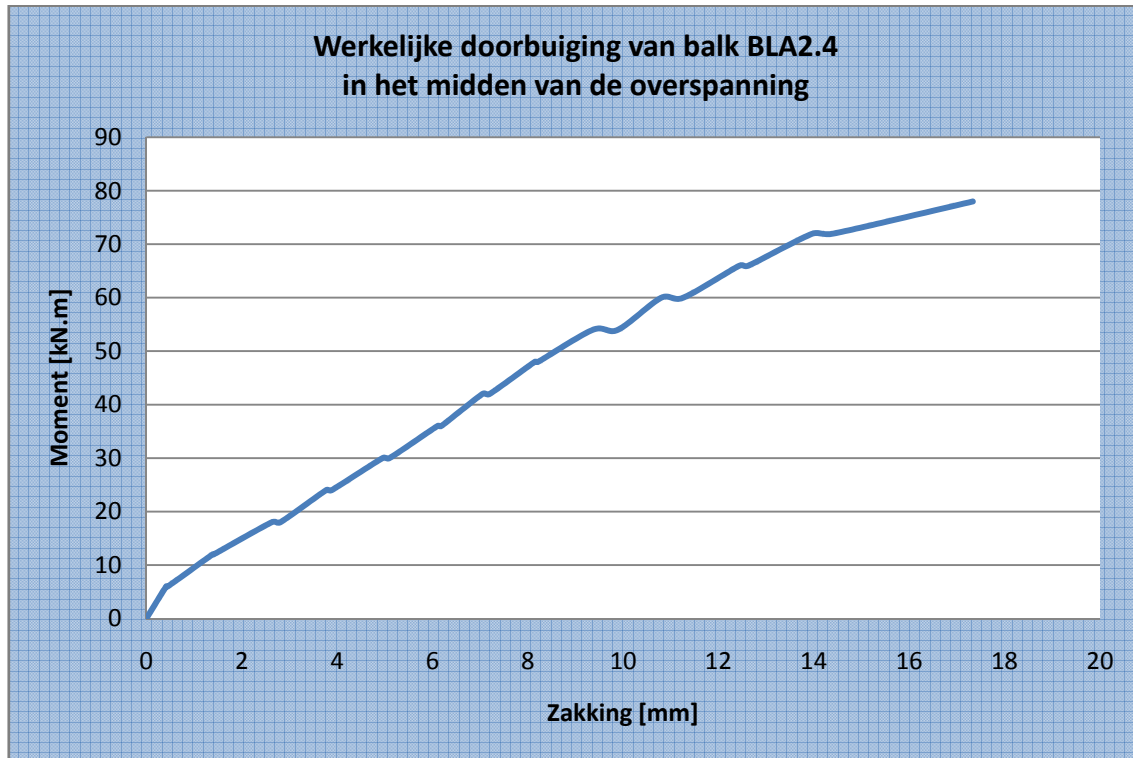


Grafiek 82: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.4 in het midden van de overspanning

De theoretisch berekende en de empirisch bepaalde doorbuiging liggen constant in elkaars buurt. De lijn van de empirisch bepaalde doorbuiging ondervindt een knik bij een moment van 71 kN m. Het verschil tussen de theoretisch berekende en de empirisch bepaalde doorbuiging wordt dan al gauw groter.

#### 5.7.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 83** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA2.4 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 83** blijkt het initieel scheurmoment blijkt gelijk te zijn aan 6,0 kN m.



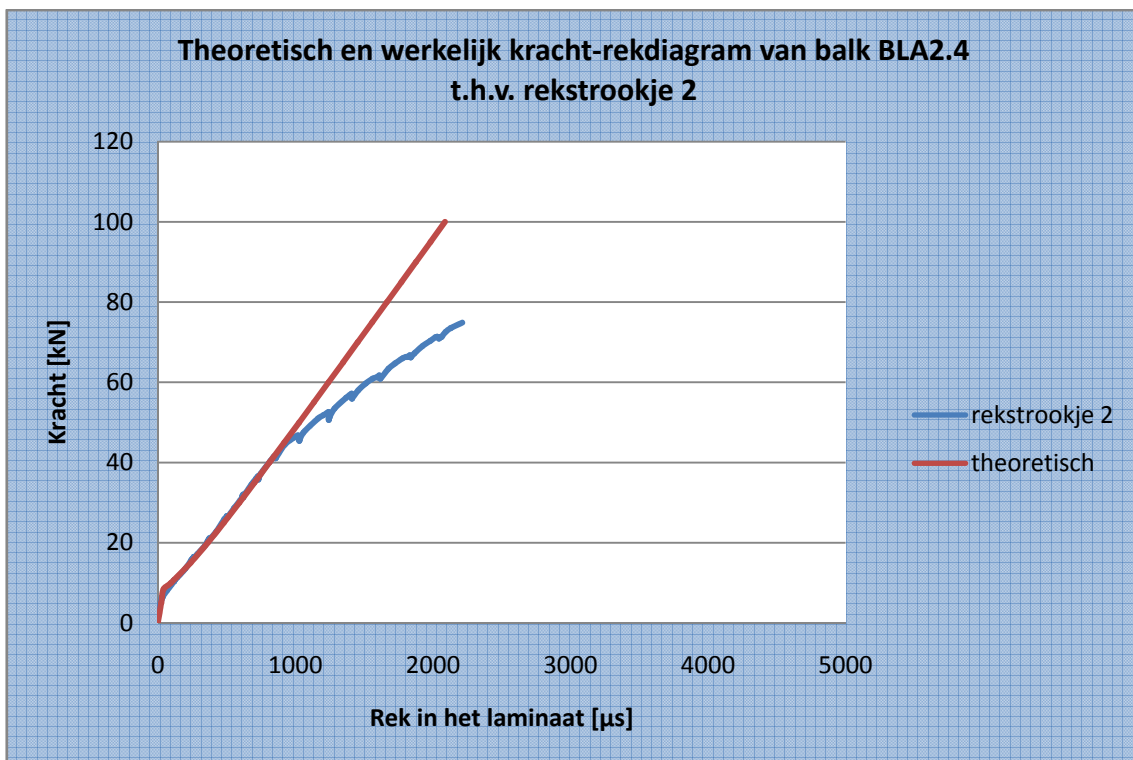
**Grafiek 83: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.4 in het midden van de overspanning**

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 15,0 kN. Dit komt overeen met een moment van 18,0 kN.m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN.m.

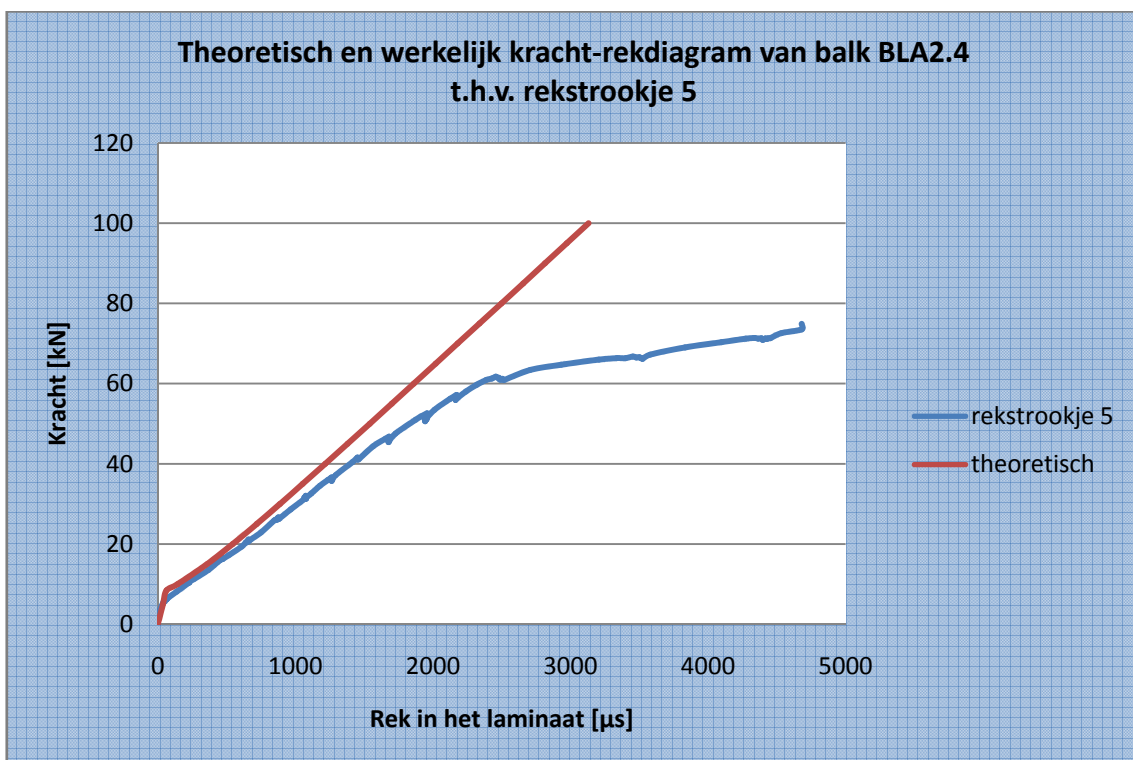


5.7.4.5 *Rek van de koolstofvezelwapening*

Grafiek 84 en Grafiek 85 vergelijken de theoretisch berekende rek en de empirisch bepaalde rek met elkaar.



Grafiek 84: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.4 t.h.v. rekstrookje 2



Grafiek 85: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.4 t.h.v. rekstrookje 5

Uit de bovenstaande grafieken blijkt dat de klassieke berekeningsmethode niet voldoet om de rek in de koolstofvezelwapening te voorspellen. Enkel in de niet-gescheurde toestand voldoet de empirisch bepaalde rek aan de theoretisch berekende rek. Verder blijkt de hoofdwapening te vloeien bij een vjzjelkracht van 61,0 kN. Dit is af te leiden uit de knik in bovenstaande grafieken. Deze waarneming bleek ook reeds uit **Grafiek 79** naar boven te komen. Bijgevolg kan er aangenomen worden dat bij een kracht van 61,0 kN het staal begint te vloeien. Na dit vloeimoment wordt er verondersteld dat de hoofdwapening geen extra last meer kan opnemen. De extra last dient dan bijgevolg door de koolstofvezelwapening opgenomen te worden.

Er kan dus besloten worden dat de hoofdwapening reeds gevloeid heeft vooraleer breuk optrad. Eens het vloeimoment overschreden is, neemt de rek in grote mate toe. De maximale spanning in de koolstofvezelwapening wordt als volgt berekend.

$$\begin{aligned}\sigma &= E \cdot \varepsilon \\ \Leftrightarrow \sigma &= 175000 \times 4680,539 \times 10^{-6} \\ \Leftrightarrow \sigma &= 819,094 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}$$

De maximale spanning in de koolstofvezelwapening bedraagt 891,1 N/mm<sup>2</sup>. Dit is slechts 28,7% van de breukspanning, die 2850 N/mm<sup>2</sup> bedraagt.

#### 5.7.4.6 Breukmechanismen

**Tabel 126** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	51,1 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	43,3 kN m

**Tabel 126: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB**

Indien concrete rip-off buiten beschouwing gelaten wordt, dan is zowel volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 onthechting het bepalende breukmechanisme. Er bestaat wel geen eensgezindheid over de locatie waar de onthechting zich het eerst zou manifesteren. Volgens CUR Aanbeveling 91 zou dit in het midden van de overspanning zijn, terwijl volgens FIB Bulletin 14 dit t.h.v. dwarskrachtenscheuren zou zijn. In werkelijkheid trad onthechting op. Deze gebeurde echter zo snel en zo plots dat het onmogelijk was vast te stellen waar deze zich het eerst manifesteerde.

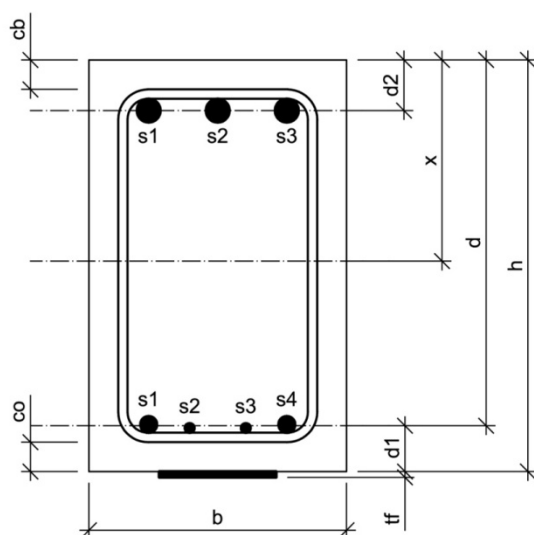
## 5.8 Balk BLA2.5

### 5.8.1 Algemeen

Balk BLA2.5 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening. Aan beide zijden is deze balk bijkomend verankerd met 14 mechanische M6 ankers. Deze ankers hebben een lengte van 65 mm en worden voorgespannen met een moment van 5 N.m. De verdeelplaatjes meten 3,5 cm op 3,5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Om concrete rip-off te vermijden, is de koolstofvezelwapening aan beide zijden op 3 cm van de uiteinden bijkomend verankerd met een mechanisch M12 anker. Deze ankers hebben een lengte van 150 mm en worden voorgespannen met een moment van 50 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA2.5.

<b>Ouderdom</b>	126 dagen	
<b>Lengte</b>	4,209 m	
<b>Breedte</b>	0,219 m	
<b>Hoogte</b>	0,356 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

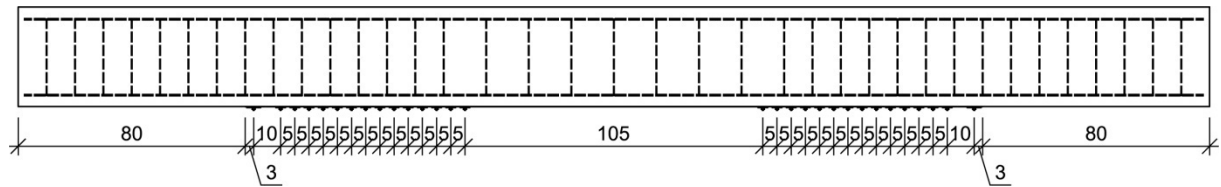
Tabel 127: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.5



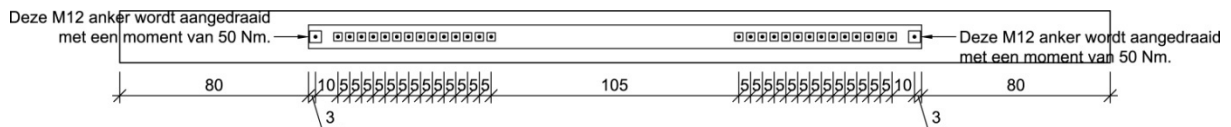
$$h = 356 \text{ mm}$$

$$b = 219 \text{ mm}$$

Figuur 131: Dwarsdoorsnede balk BLA2.5



Figuur 132: Vooraanzicht verankering balk BLA2.5



Figuur 133: Onderaanzicht verankering balk BLA2.5

### 5.8.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{c,x}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 27,321 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 32,935 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA2.5 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308mm^2$$

$$A_{s1,\phi8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi 14} = 559,556 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi 8} = 552,660 \frac{N}{mm^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{mm^2}$$

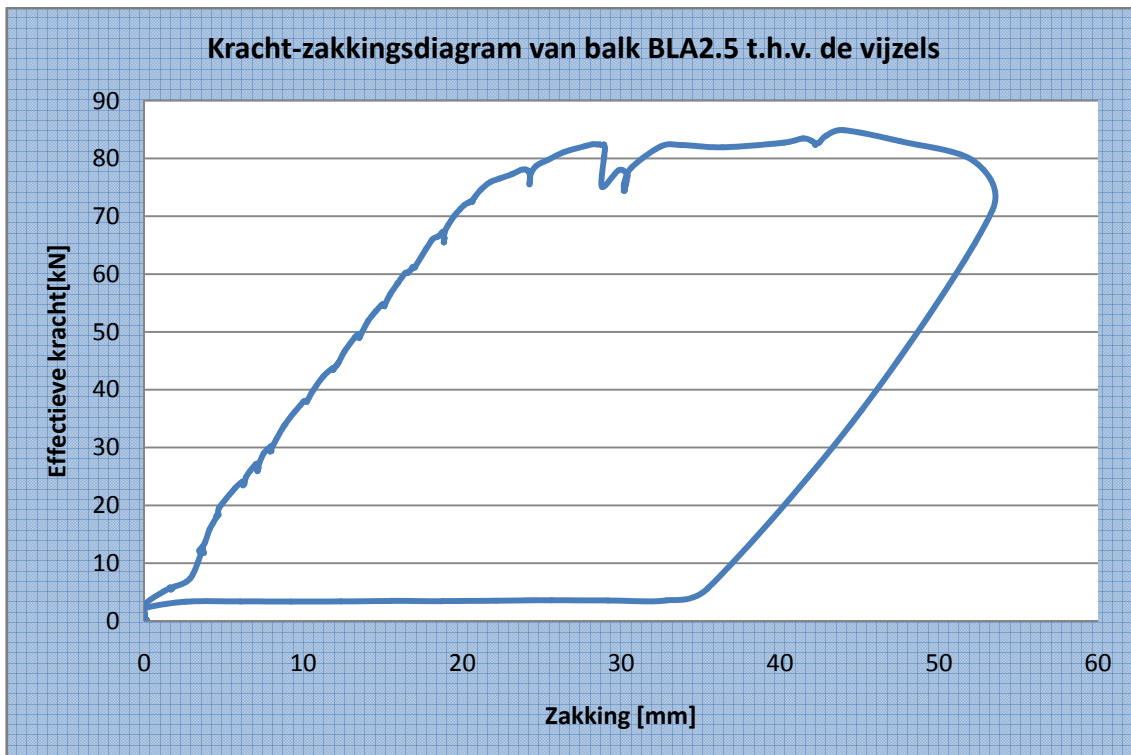
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.8.3 Meetresultaten

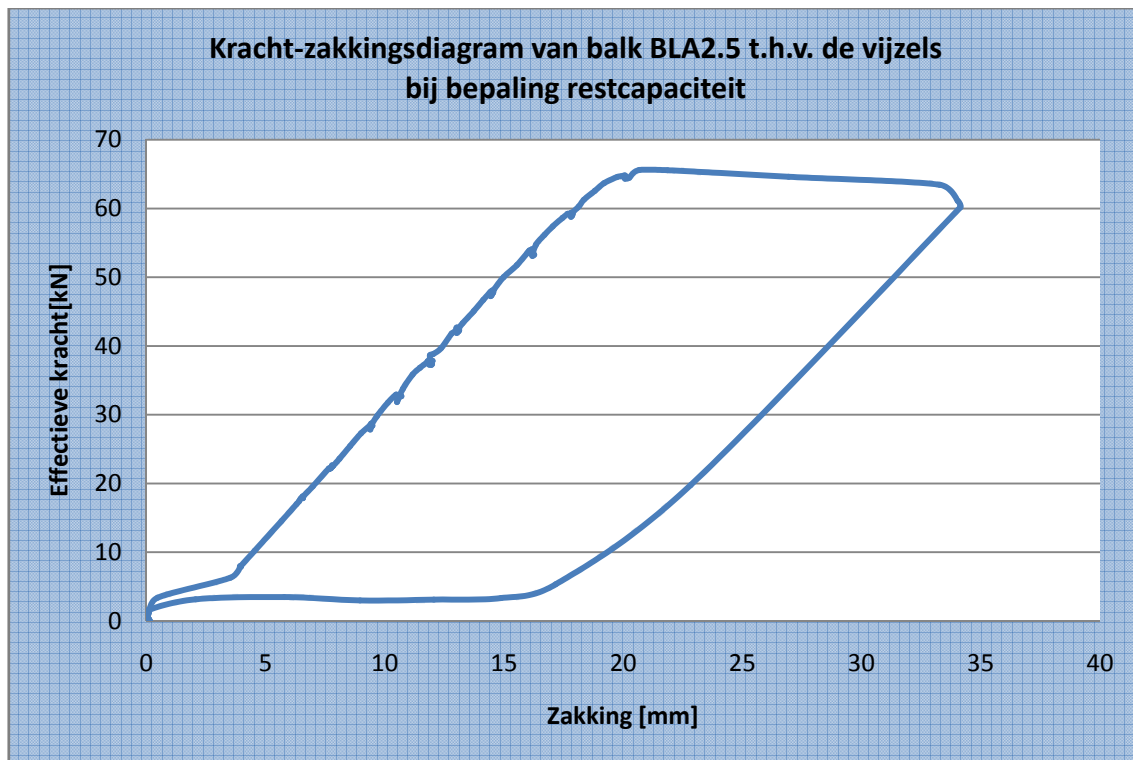
#### 5.8.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

Grafiek 86 toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



Grafiek 86: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. de vijzels

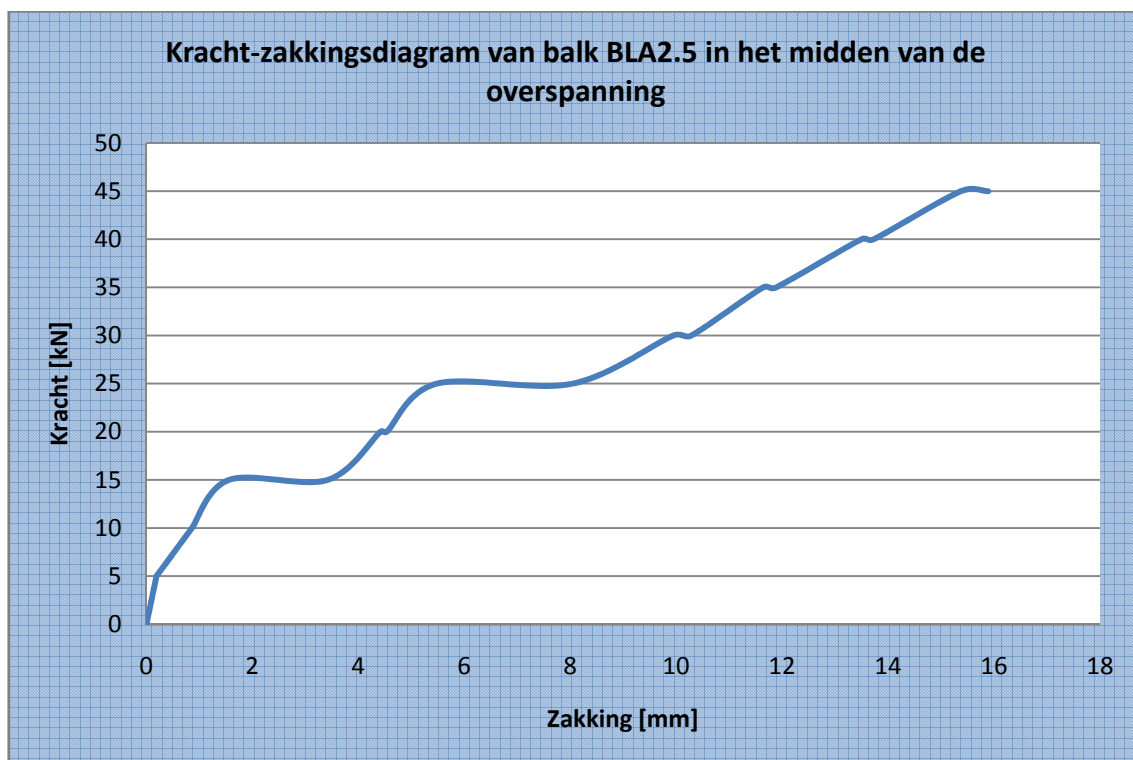
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.



Grafiek 87: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit

### 5.8.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

Grafiek 88 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 88: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.5 in het midden van de overspanning

**Tabel 128** toont de cijferwaarden van **Grafiek 88**.

Kracht [kN]	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging [mm]
	meetklok 1 (midden)	meetklok 2 (midden)	meetklok 3 (uiteinde)	meetklok 4 (uiteinde)	midden	uiteinde	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,21	0,28	0,11	0,00	0,25	0,06	0,19
5	0,21	0,28	0,11	0,00	0,25	0,06	0,19
10	1,05	1,17	0,49	0,01	1,11	0,25	0,86
10	1,05	1,17	0,49	0,01	1,11	0,25	0,86
15	1,88	2,02	0,71	0,07	1,95	0,39	1,56
15	3,81	4,00	0,82	0,14	3,91	0,48	3,43
20	4,82	5,04	0,85	0,17	4,93	0,51	4,42
20	4,95	5,16	0,86	0,18	5,06	0,52	4,54
25	5,92	6,14	0,89	0,21	6,03	0,55	5,48
25	8,50	8,81	0,95	0,28	8,66	0,62	8,04
30	10,42	10,78	0,98	0,33	10,60	0,66	9,95
30	10,76	11,13	0,99	0,33	10,95	0,66	10,29
35	12,11	12,55	1,01	0,37	12,33	0,69	11,64
35	12,36	12,79	1,01	0,37	12,58	0,69	11,89
40	13,98	14,46	1,04	0,41	14,22	0,73	13,50
40	14,21	14,69	1,04	0,41	14,45	0,73	13,73
45	15,86	16,40	1,06	0,45	16,13	0,76	15,38
45	16,39	16,92	1,07	0,46	16,66	0,77	15,89

**Tabel 128:** Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.5 in het midden van de overspanning

### 5.8.3.3 Doorbuiging $L/500$ en $L/250$

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging  $L/500$  en de doorbuiging  $L/250$  zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging  $L/500$  wordt bereikt bij een kracht tussen 25 kN en 30 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging  $L/500$ .

$$F_{y=L/500} = 25kN + 5 \times \frac{7,2mm - 5,48mm}{9,95mm - 5,48mm} = 26,926kN$$

De doorbuiging  $L/250$  wordt bereikt bij een kracht tussen 40 kN en 45 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging  $L/250$ .

$$F_{y=L/250} = 40kN + 5 \times \frac{14,4mm - 13,50mm}{15,38mm - 13,50mm} = 42,407kN$$

#### 5.8.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 82,469kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- buigingsscheuren en dwarskrachtenscheuren
- geleidelijke onthechting van de koolstofvezelwapening links en in het midden
- linkerankers houden de koolstofvezelwapening op zijn plaats
- na onthechting blijkt de belasting nog te kunnen stijgen
- de scheuren t.h.v. de linkervijzel openen zich, de anderen scheuren blijven gesloten

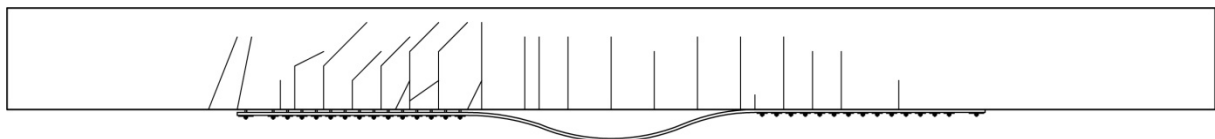
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

$$F_{rest,\max} = 65,567kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de restcapaciteit werden visueel waargenomen.

- inscheuringen in de koolstofvezelwapening t.h.v. de 3 meest linkse ankers
- linker M6 ankers worden langzaam uit de balk getrokken

**Figuur 134** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA2.5.

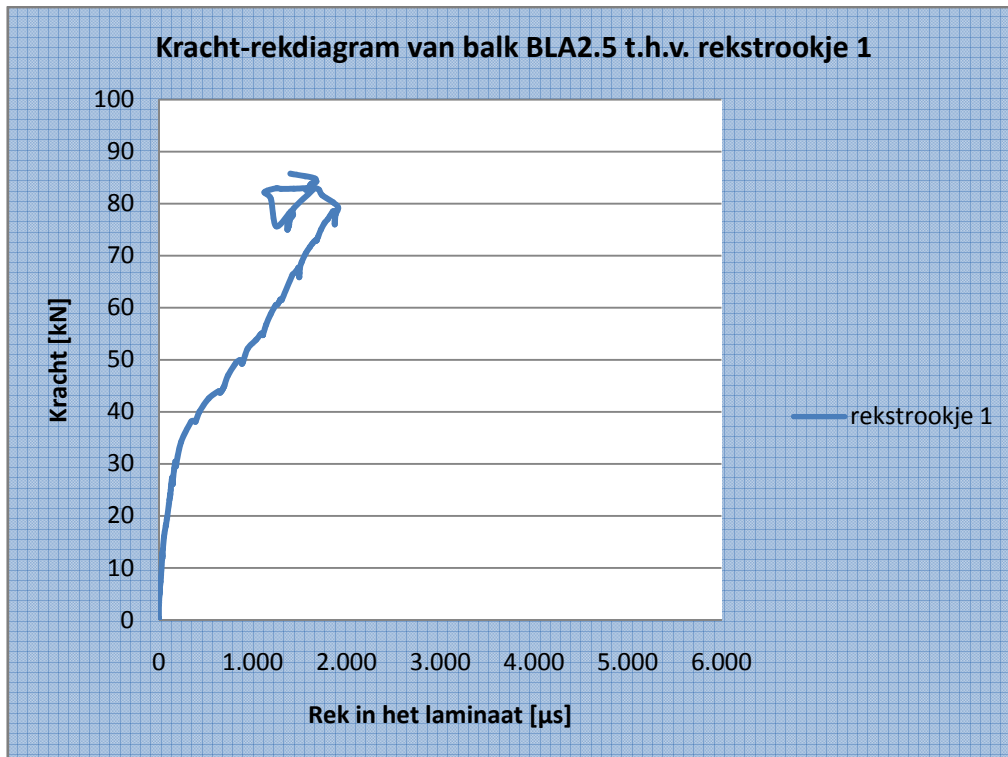


**Figuur 134: Schets scheurvorming balk BLA2.5**

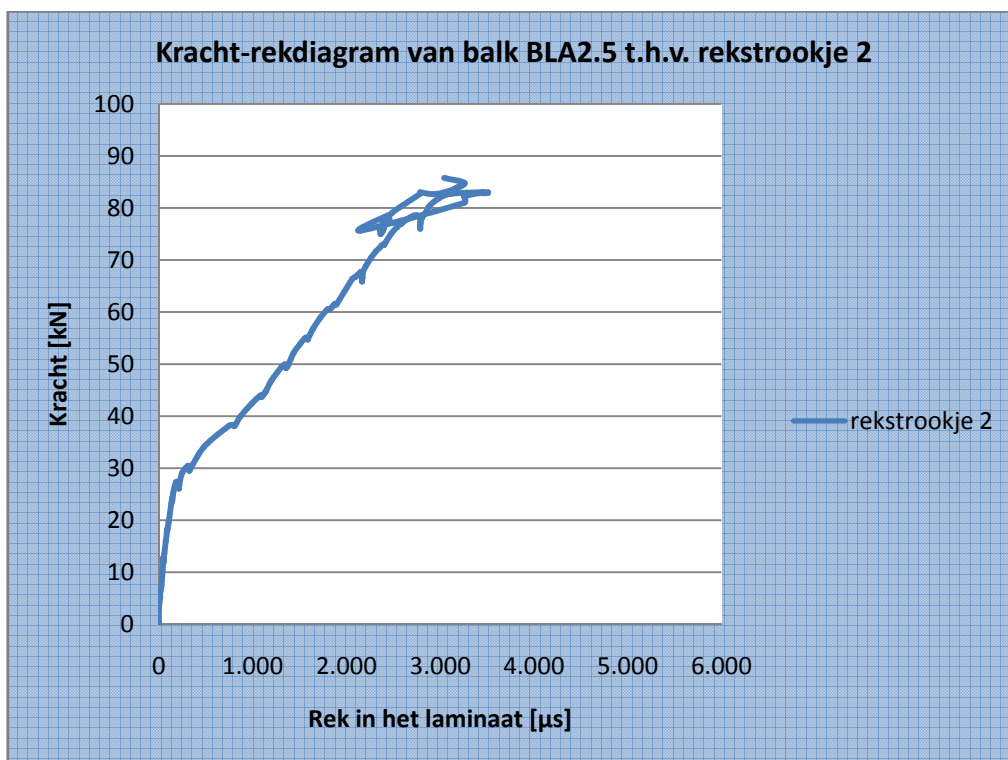


5.8.3.5 *Rek van de koolstofvezelwapening*

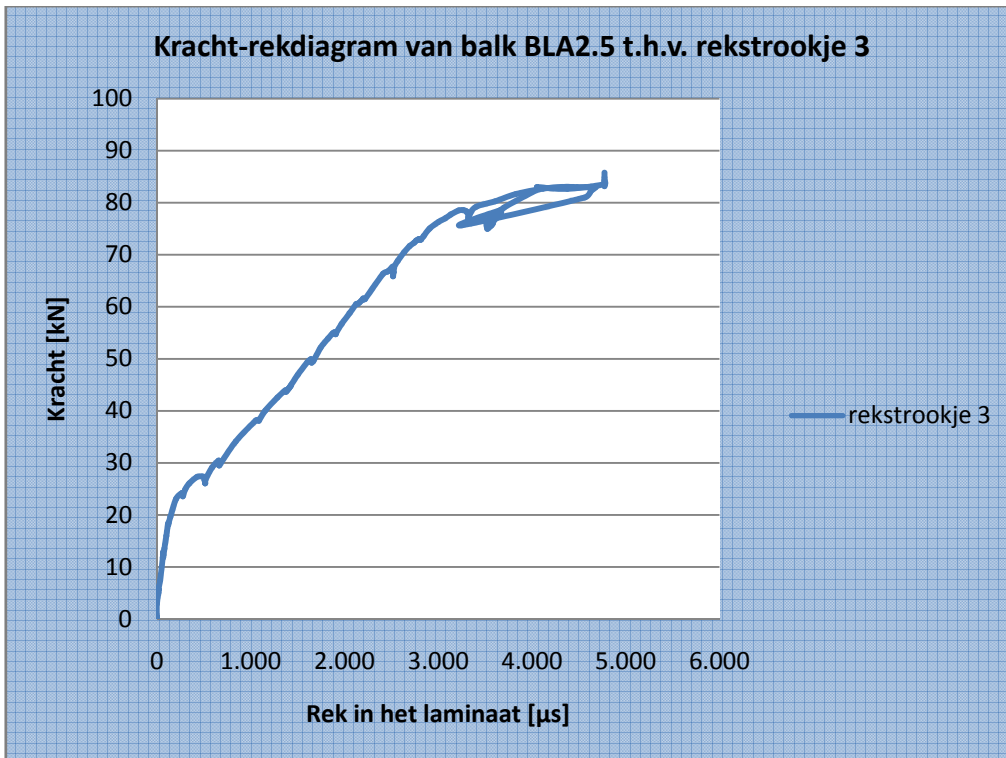
**Grafiek 89** tot **Grafiek 96** tonen de rek in de koolstofvezelwapening. Er dient wel opgemerkt te worden dat niet alle rekstrookjes gegevens registreerden tijdens de proef.



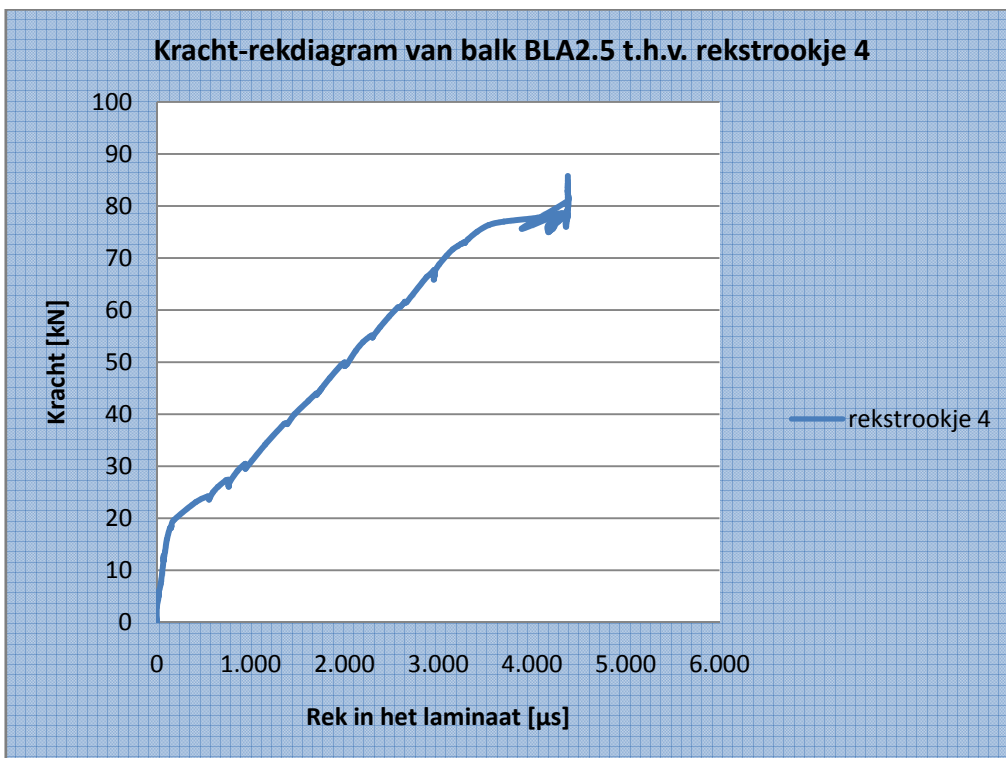
Grafiek 89: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 1



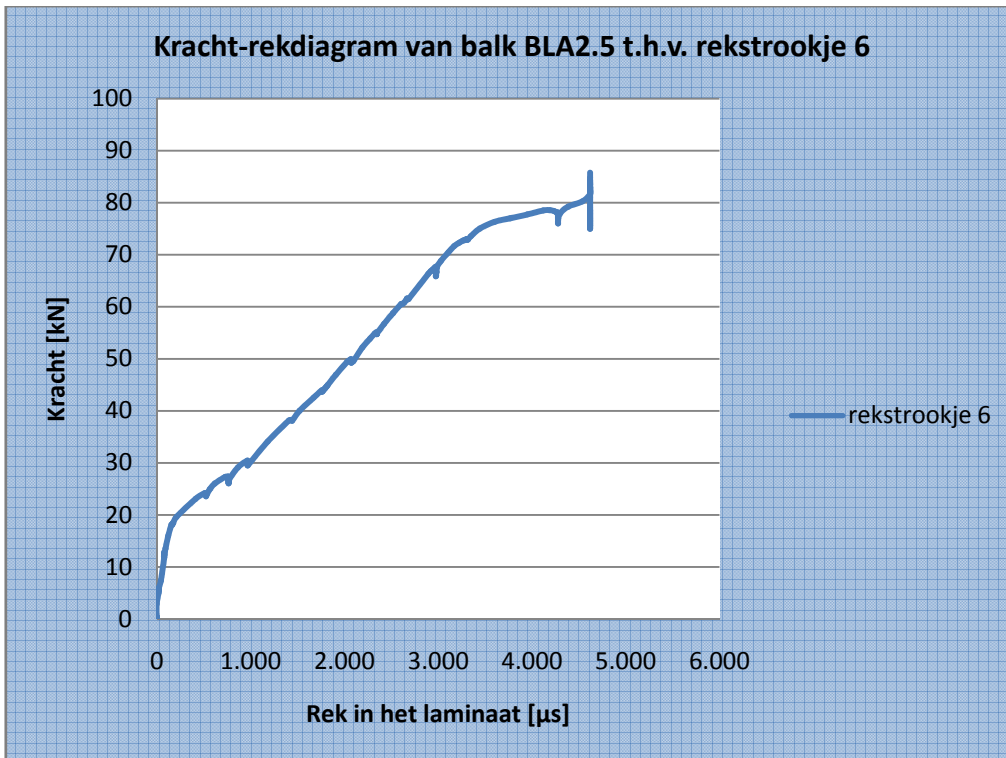
Grafiek 90: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 2



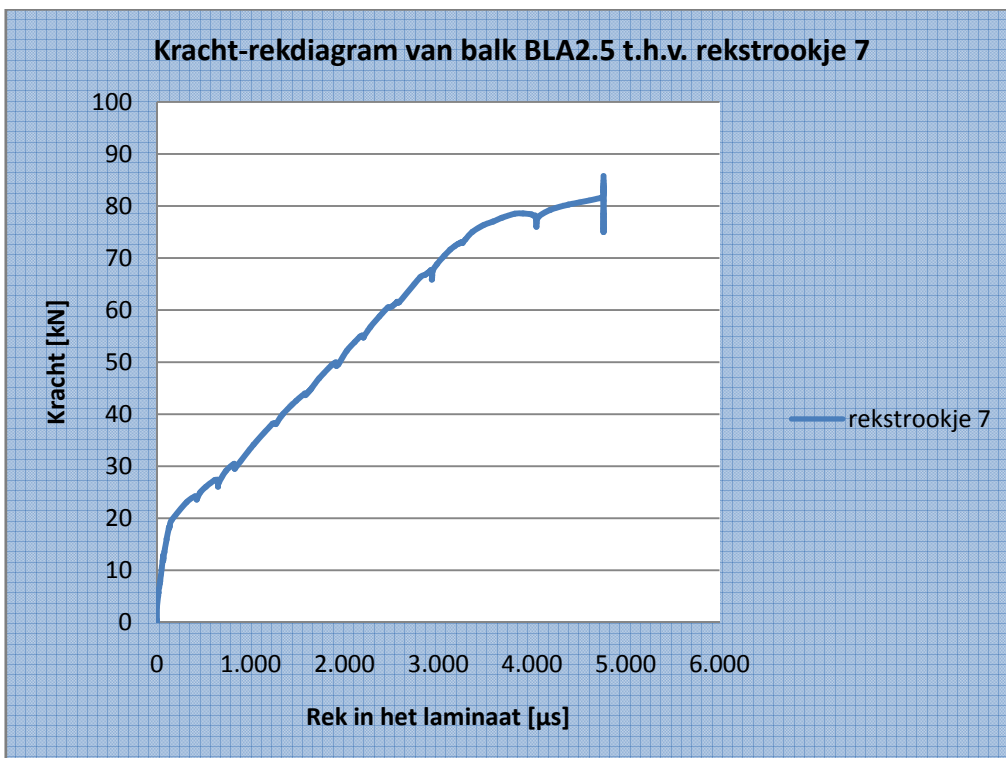
Grafiek 91: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 3



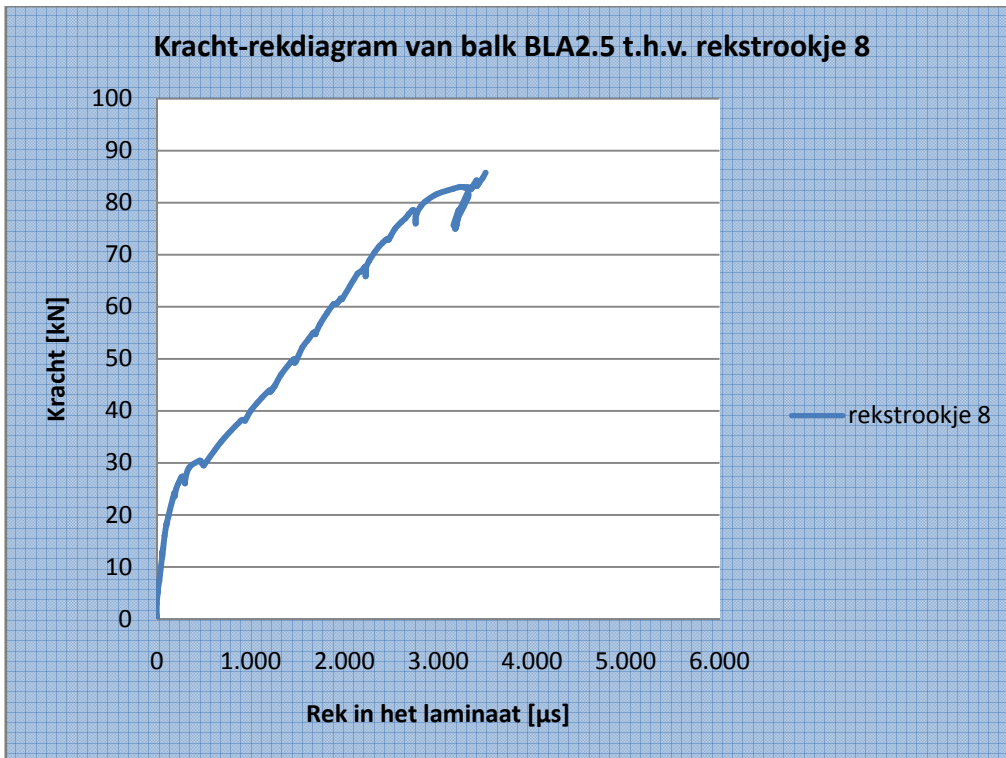
Grafiek 92: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 4



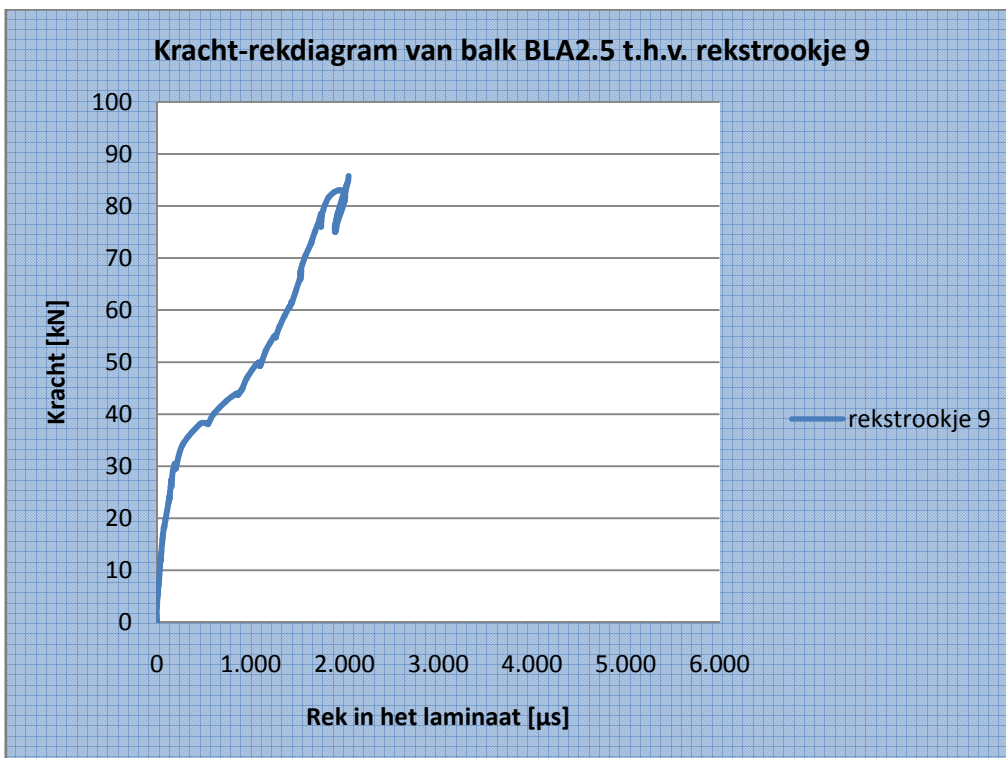
Grafiek 93: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 6



Grafiek 94: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 7

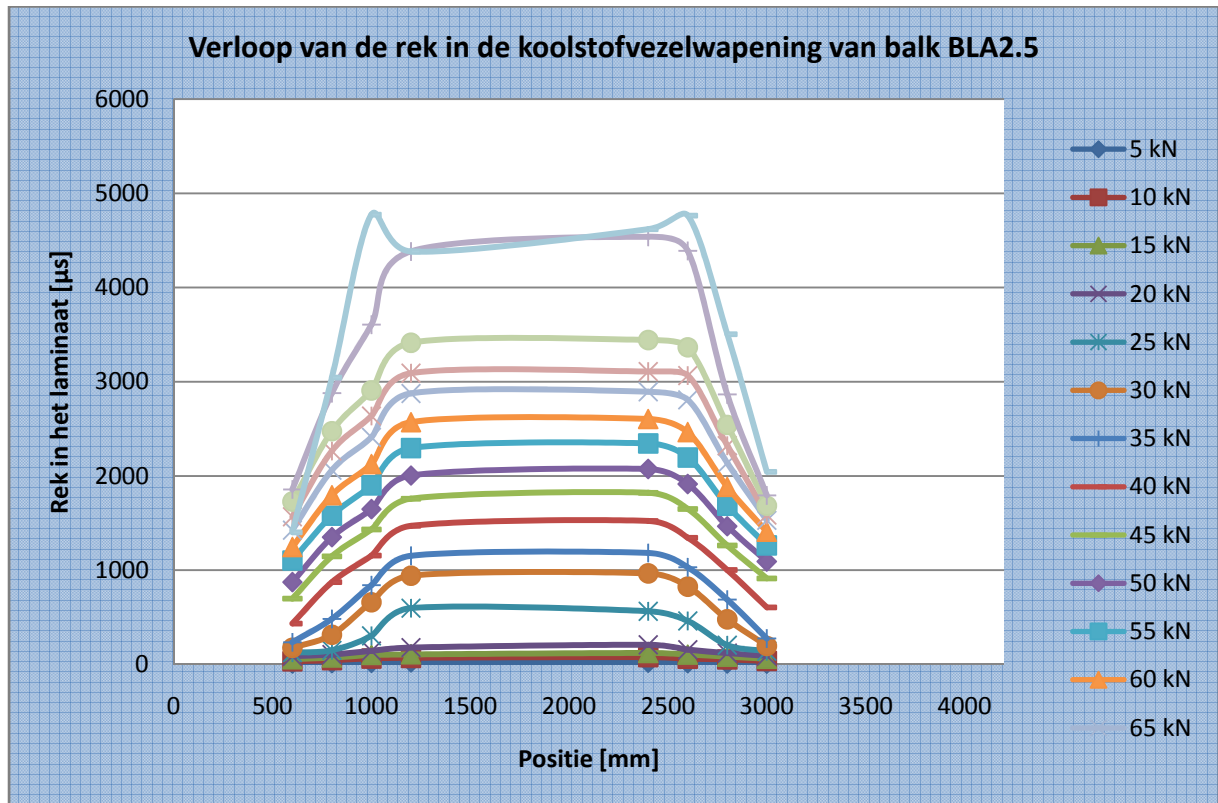


Grafiek 95: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 8



Grafiek 96: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 9

**Grafiek 97** toont het verloop van de rek over de volledige lengte van de balk bij een stijgende belasting.



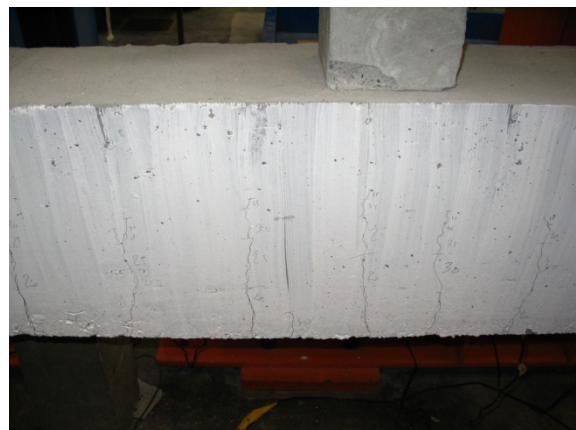
**Grafiek 97:** Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening van balk BLA2.5

**5.8.3.6 Foto's**

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BLA2.5.



**Figuur 135:** Scheurvorming linkerkant balk BLA2.5



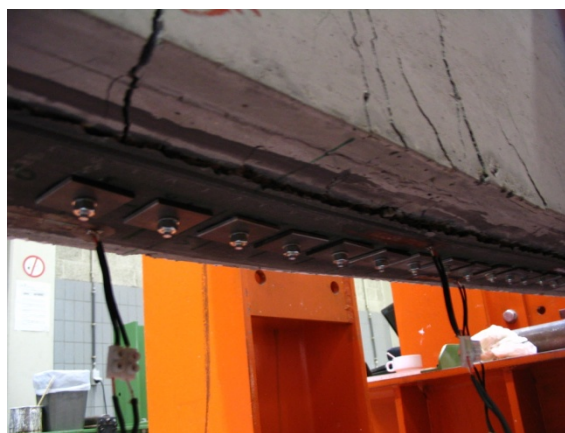
**Figuur 136:** Scheurvorming rechterkant BLA2.5



Figuur 137: Onthechting aan de linkerkant [1]



Figuur 138: Inscheuringen van de koolstofvezelwapening



Figuur 139: Onthechting aan de linkerkant [2]

#### 5.8.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

##### 5.8.4.1 Lasten

Tabel 129 vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 99,0 \text{ kN.m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 82,5 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN.m}$
		$P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN.m}$
		$P = 87,2 \text{ kN}$
	Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN.m}$
	$P_u = 70,0 \text{ kN}$	

Tabel 129: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.5

**5.8.4.2 Dwarskrachtencapaciteit**

**Tabel 130** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

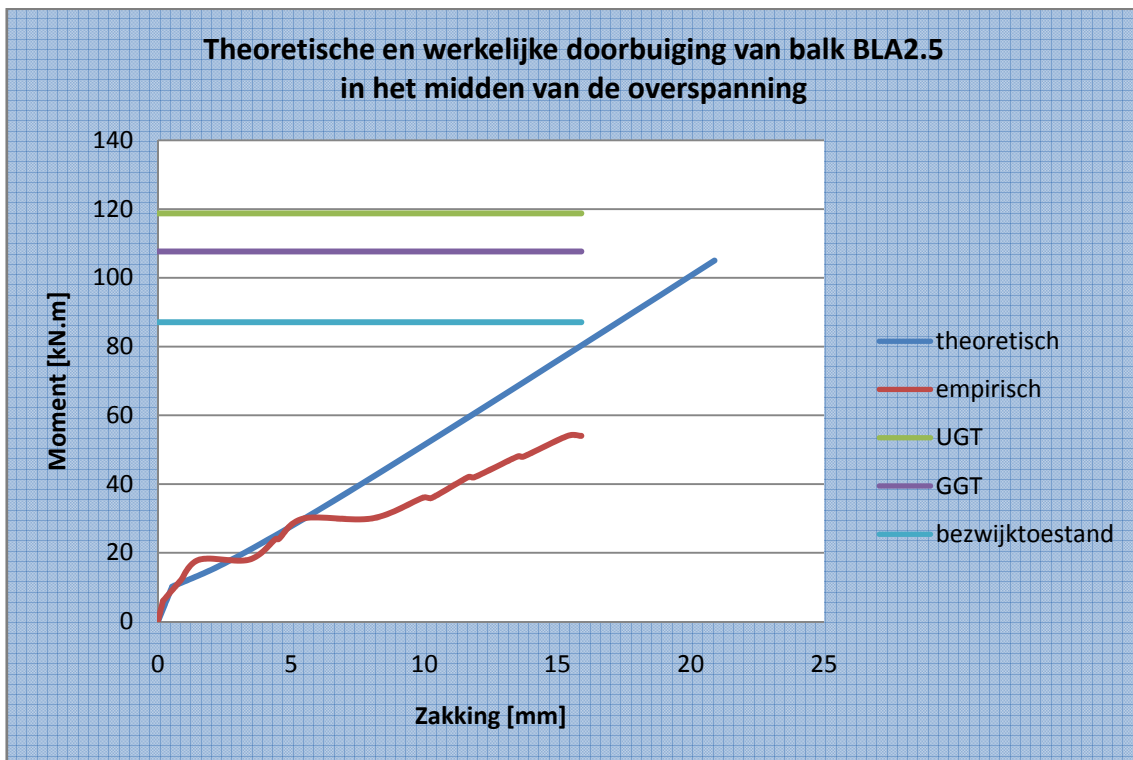
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{max} = 82,5 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 149,0 \text{ kN}$ (beton: 100%)

**Tabel 130: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.5**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd . Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

**5.8.4.3 Doorbuiging**

**Grafiek 98** toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

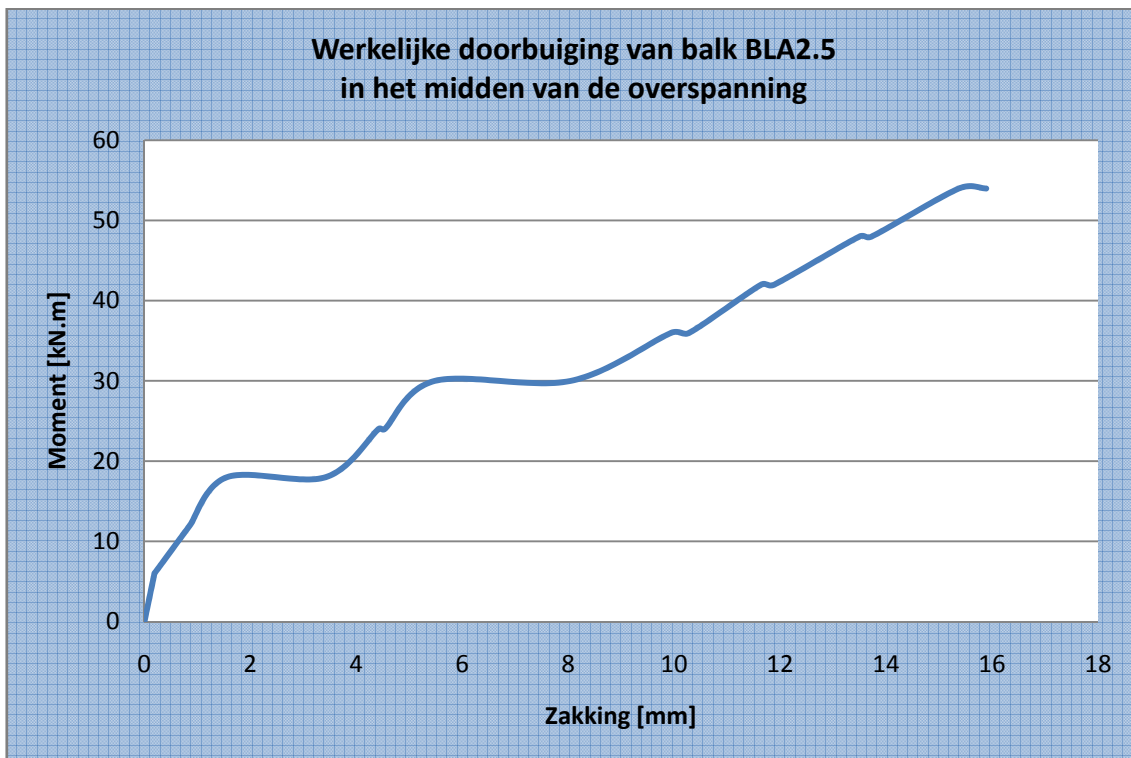


**Grafiek 98: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.5 in het midden van de overspanning**

In de niet-gescheurde toestand vallen de grafieken samen. In de gescheurde toestand zijn de theoretisch berekende doorbuiging en de empirisch bepaalde doorbuiging ongeveer gelijk, zolang het opgenomen moment kleiner is dan 30 kN m. Van zodra het opgenomen moment groter is dan 30 kN m is de empirisch bepaalde doorbuiging veel groter dan de theoretisch berekende doorbuiging.

#### 5.8.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 99** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA2.5 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 99** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 11,0 kN m.



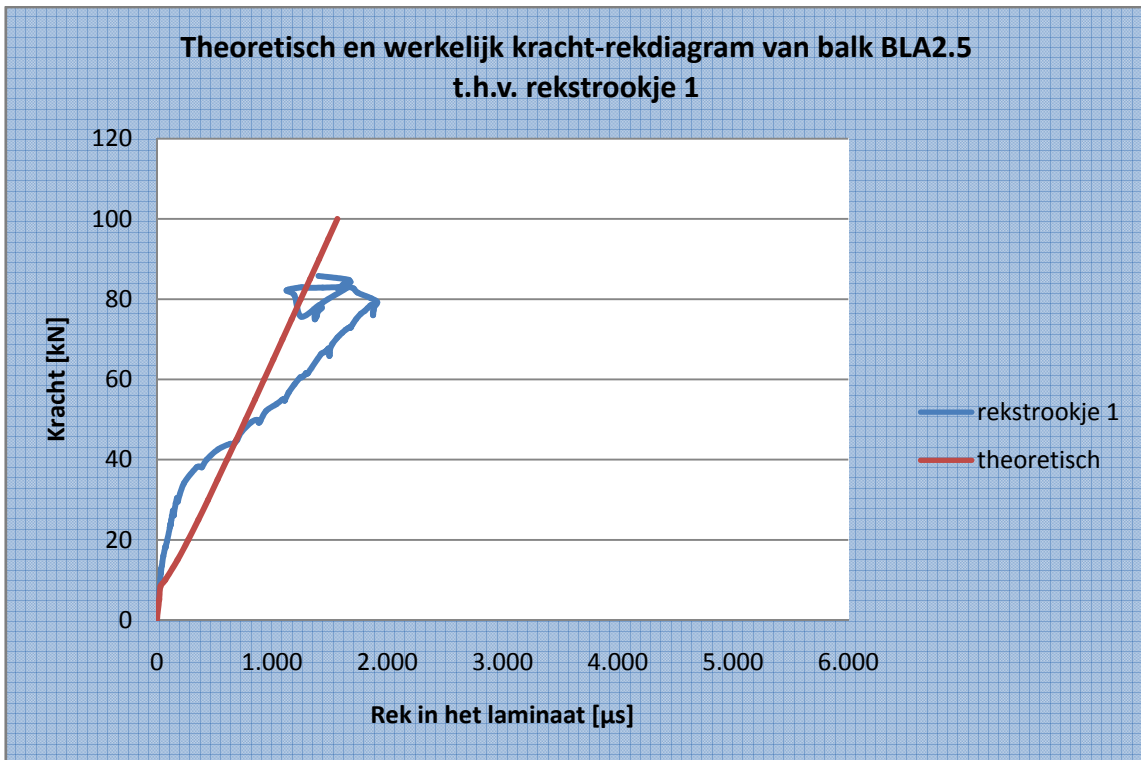
**Grafiek 99: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.5 in het midden van de overspanning**

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 20,0 kN. Dit komt overeen met een moment van 24,0 kN.m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN.m.

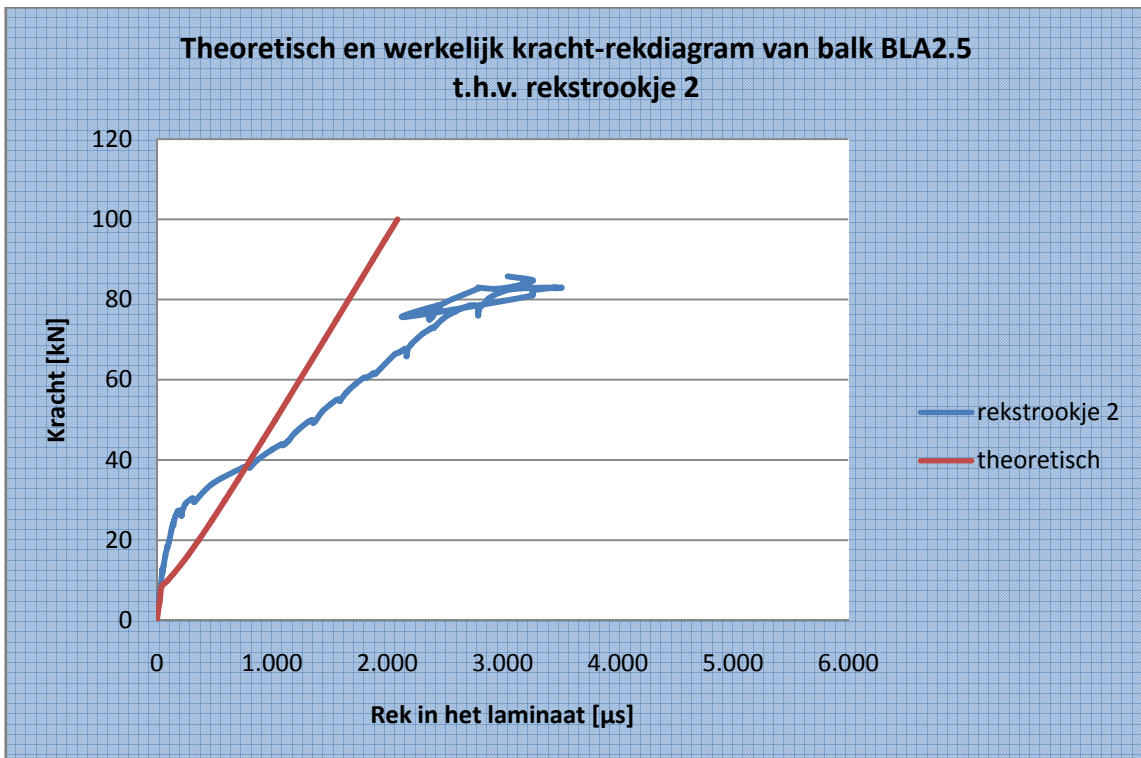


**5.8.4.5 Rek van de koolstofvezelwapening**

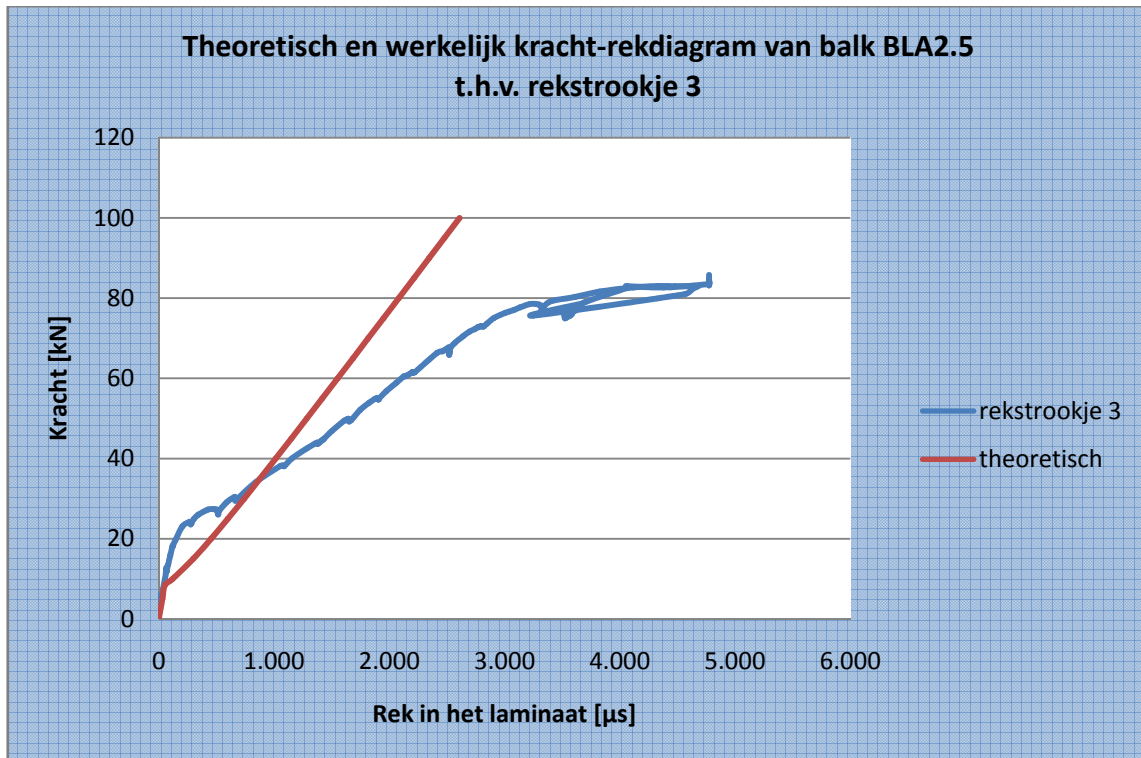
**Grafiek 100** tot **Grafiek 107** vergelijken de theoretisch berekende rek en de empirisch bepaalde rek met elkaar.



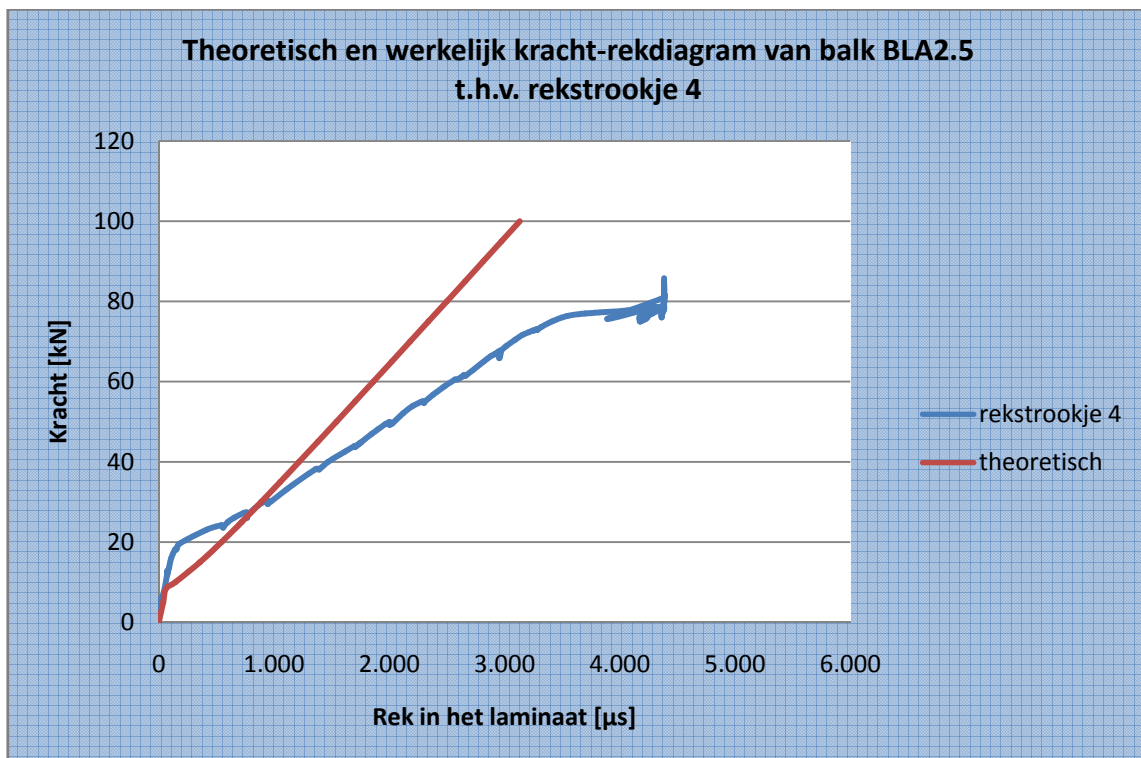
**Grafiek 100:** Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 1



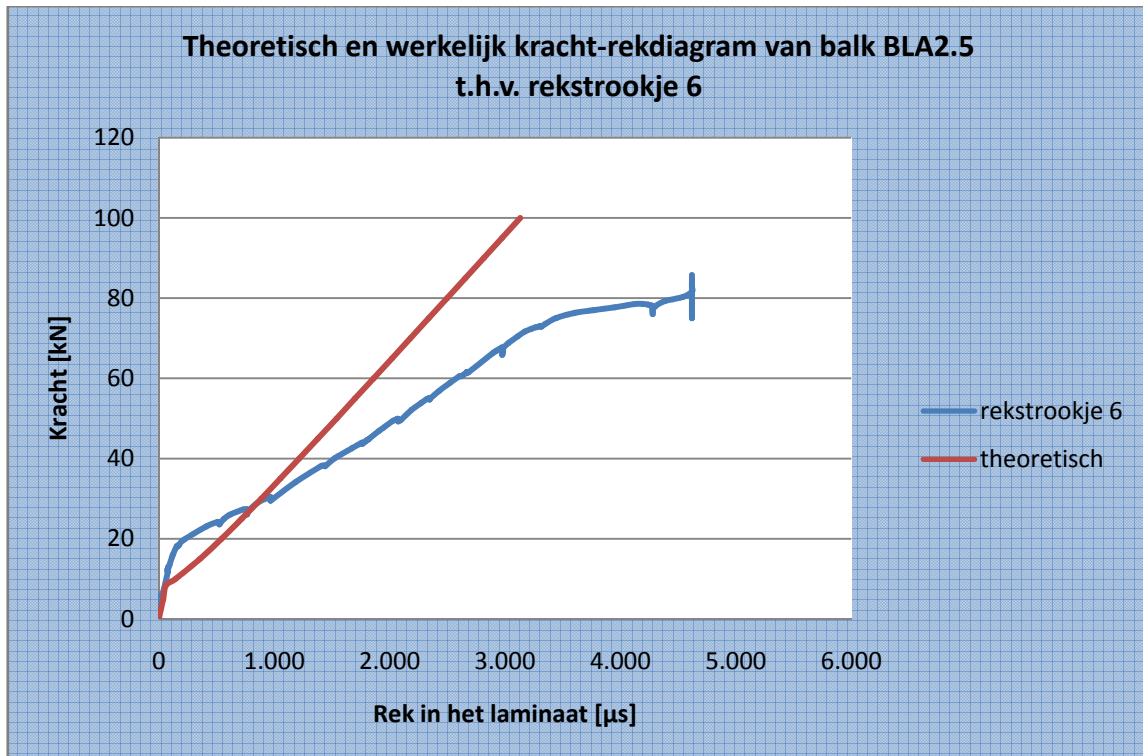
**Grafiek 101:** en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 2



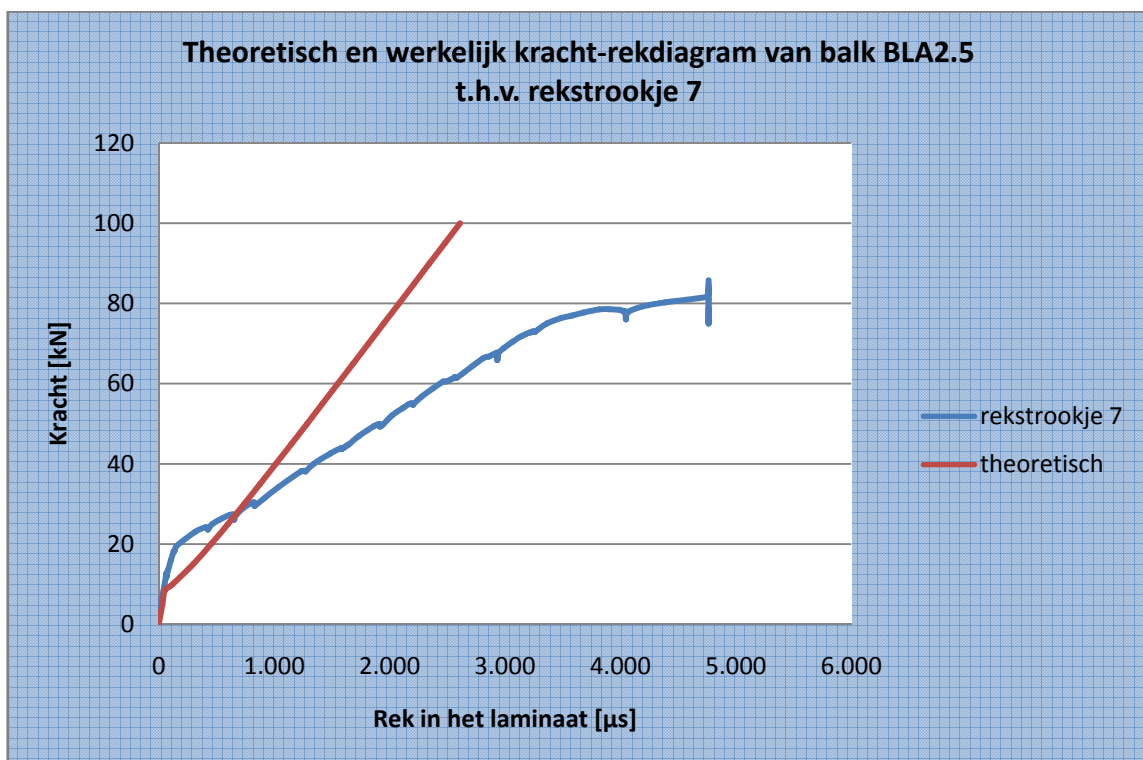
Grafiek 102: en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 3



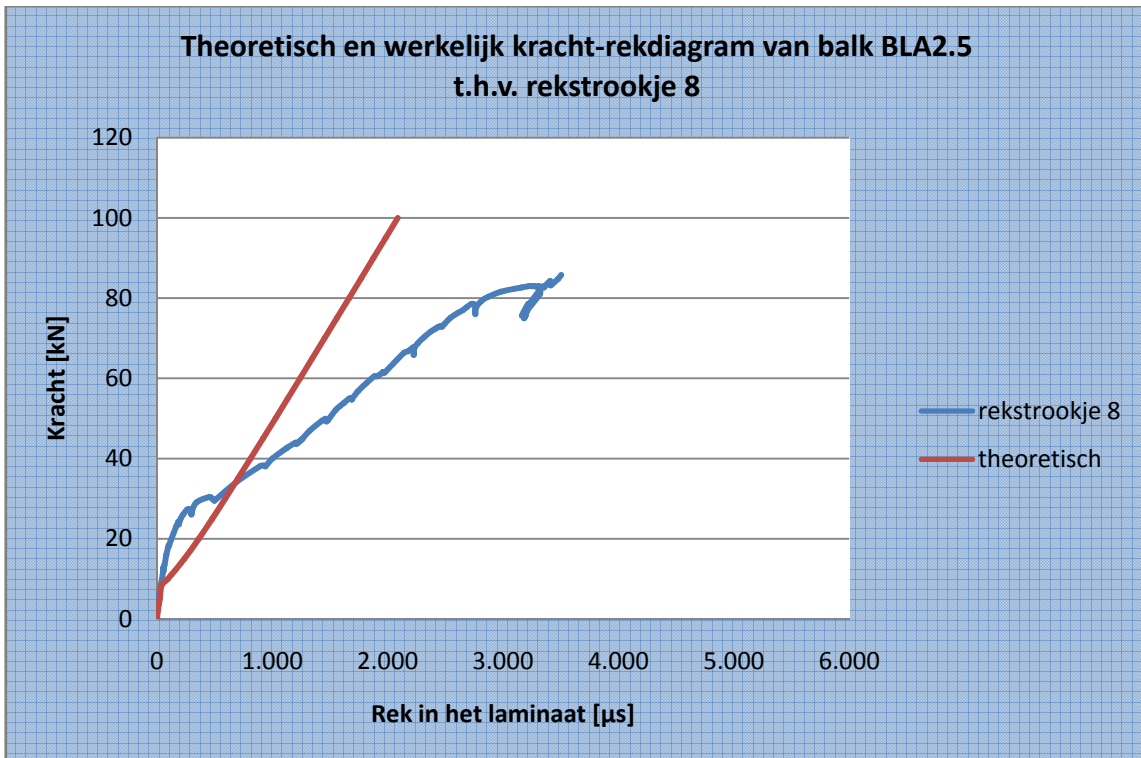
Grafiek 103: en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 4



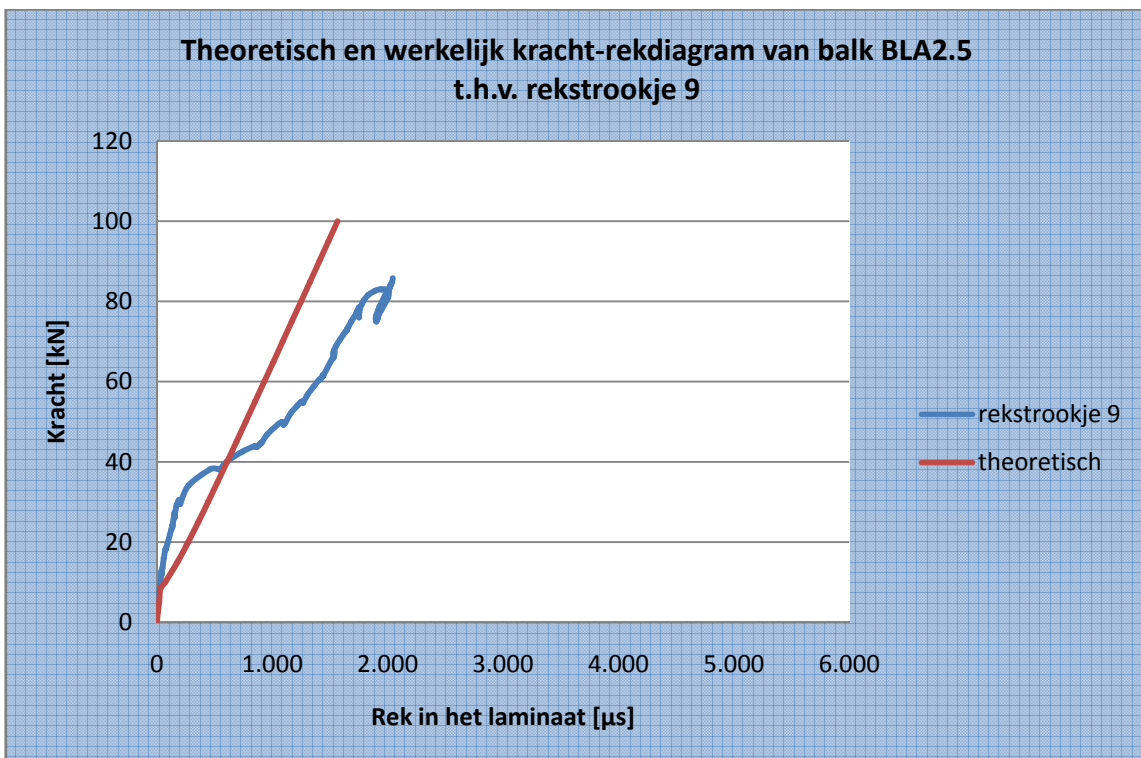
Grafiek 104: en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 6



Grafiek 105: en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 7



Grafiek 106: en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 8



Grafiek 107: en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.5 t.h.v. rekstrookje 9

Uit de bovenstaande grafieken blijkt dat de klassieke berekeningsmethode niet voldoet om de rek in de koolstofvezelwapening te voorspellen. Verder blijkt de hoofdwapening te vloeien bij een vjzelkracht van 73,6 kN. Dit is af te leiden uit de knik in bovenstaande grafieken. Uit **Grafiek 86** bleek het staal te vloeien bij een vjzelkracht van 75,9 kN. Bijgevolg kan er

aangenomen worden dat bij een kracht van 73,5 à 76,0 kN het staal begint te vloeien. Na dit vloeimoment wordt er verondersteld dat de hoofdwapening geen extra last meer kan opnemen. De extra last dient dan bijgevolg door de koolstofvezelwapening opgenomen te worden.

Er kan dus besloten worden dat de hoofdwapening reeds gevloeid heeft vooraleer breuk optrad. Eens het vloeimoment overschreden is, neemt de rek in grote mate toe. De maximale spanning in de koolstofvezelwapening wordt als volgt berekend.

$$\begin{aligned}\sigma &= E \cdot \varepsilon \\ \Leftrightarrow \sigma &= 175000 \times 4773,845 \times 10^{-6} \\ \Leftrightarrow \sigma &= 835,423 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}$$

De maximale spanning in de koolstofvezelwapening bedraagt 835,4 N/mm<sup>2</sup>. Dit is slechts 29,3% van de breukspanning, die 2850 N/mm<sup>2</sup> bedraagt.

#### 5.8.4.6 Breukmechanismen

**Tabel 131** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	51,1 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	43,3 kN m

**Tabel 131: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Indien concrete rip-off buiten beschouwing gelaten wordt, dan is zowel volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 onthechting het bepalende breukmechanisme. Er bestaat wel geen eensgezindheid over de locatie waar de onthechting zich het eerst zou manifesteren. Volgens CUR Aanbeveling 91 zou dit in het midden van de overspanning zijn, terwijl volgens FIB Bulletin 14 dit t.h.v. dwarskrachtenscheuren zou zijn. In werkelijkheid trad geleidelijk aan onthechting op.

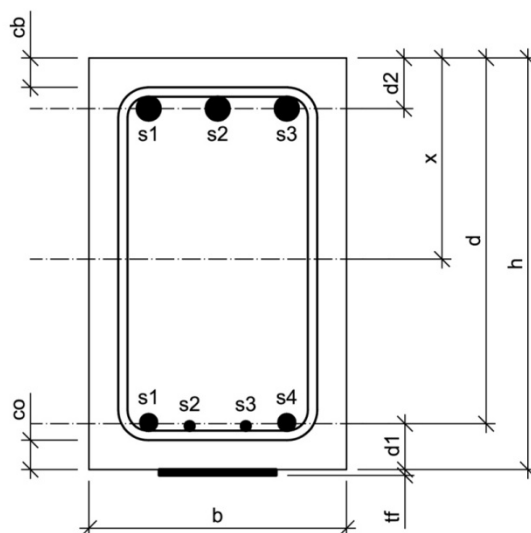
## 5.9 Balk BLA2.6

### 5.9.1 Algemeen

Balk BLA2.6 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening. Aan beide zijden is deze balk bijkomend verankerd met 7 chemische M6 ankers. Deze ankers hebben een lengte van 65 mm. De verdeelplaatjes meten 3,5 cm op 3,5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Om concrete rip-off te vermijden, is de koolstofvezelwapening aan beide zijden op 3 cm van de uiteinden bijkomend verankerd met een mechanisch M12 anker. Deze ankers hebben een lengte van 150 mm en worden voorgespannen met een moment van 50 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA2.6.

<b>Ouderdom</b>	141 dagen	
<b>Lengte</b>	4,200 m	
<b>Breedte</b>	0,220 m	
<b>Hoogte</b>	0,352 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

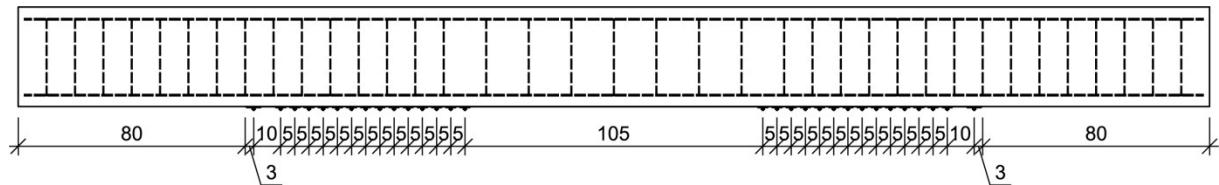
Tabel 132: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.6



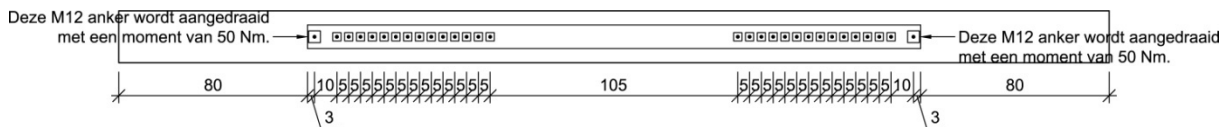
$$h = 352 \text{ mm}$$

$$b = 220 \text{ mm}$$

Figuur 140: Dwarsdoorsnede balk BLA2.6



Figuur 141: Vooraanzicht verankering BLA2.6



Figuur 142: Onderaanzicht verankering BLA2.6

### 5.9.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{c,x}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 24,530 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 29,571 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA2.6 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308mm^2$$

$$A_{s1,\phi8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi 14} = 559,556 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi 8} = 552,660 \frac{N}{mm^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{mm^2}$$

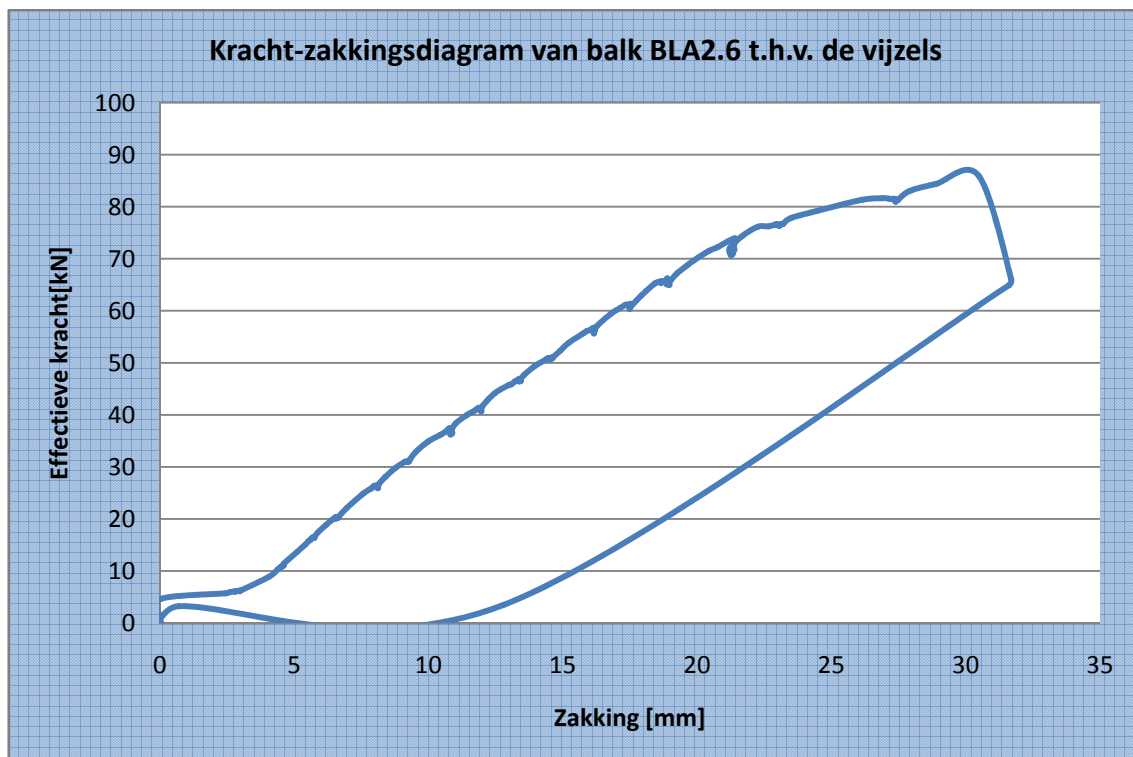
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.9.3 Meetresultaten

#### 5.9.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

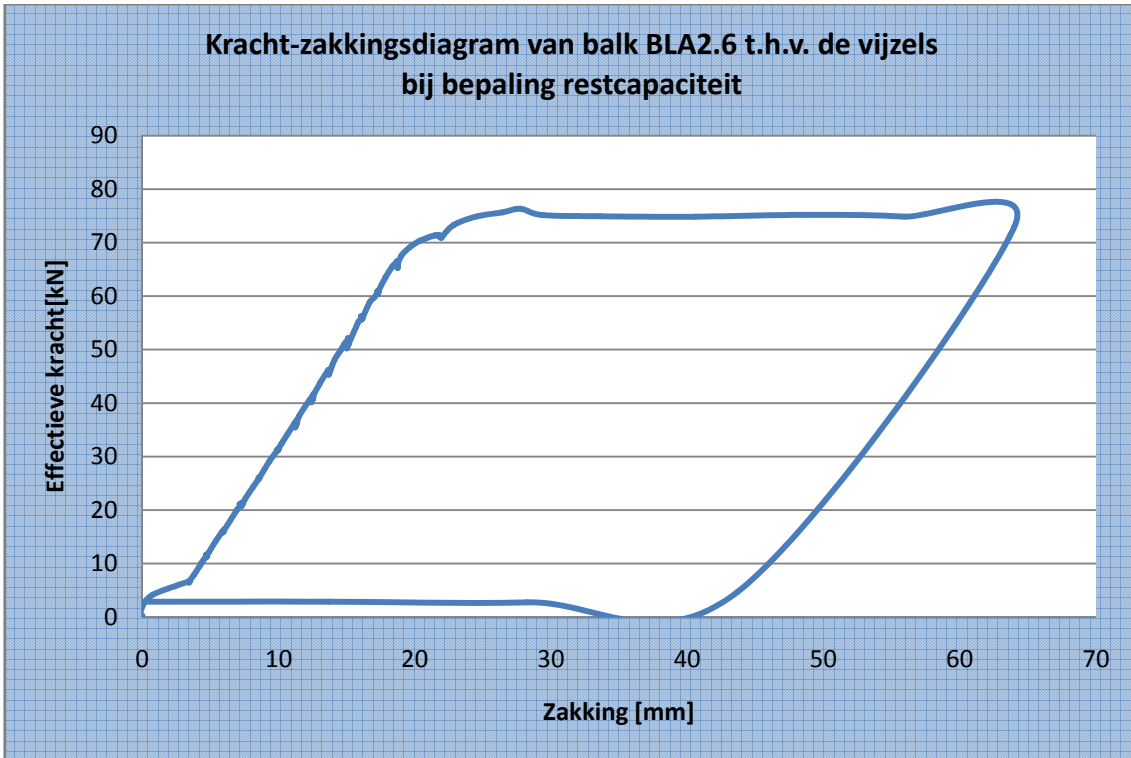
Grafiek 108 toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



Grafiek 108: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.6 t.h.v. de vijzels

Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

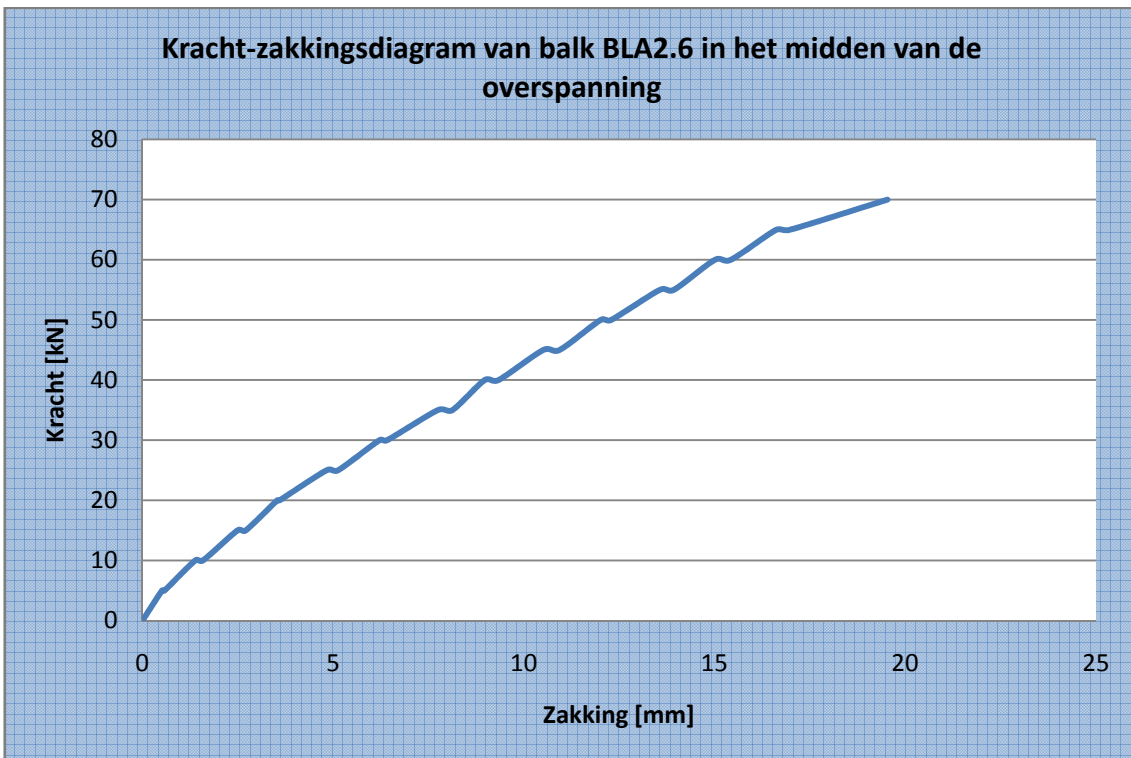




Grafiek 109: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.6 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit

**Zakking in het midden van de overspanning**

Grafiek 110 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 110: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.6 in het midden van de overspanning

**Tabel 133** toont de cijferwaarden van **Grafiek 110**.

Kracht	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging
	meetklok 1	meetklok 2	meetklok 3	meetklok 4	midden	uiteinde	
	(midden)	(midden)	(uiteinde)	(uiteinde)	[mm]	[mm]	
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	0,00	0,00	n.c	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,55	0,52		0,02	0,54	0,02	0,52
5	0,63	0,59		0,03	0,61	0,03	0,58
10	1,49	1,46		0,09	1,48	0,09	1,39
10	1,70	1,67		0,10	1,69	0,10	1,59
15	2,68	2,65		0,17	2,67	0,17	2,50
15	2,92	2,88		0,19	2,90	0,19	2,71
20	3,80	3,77		0,25	3,79	0,25	3,54
20	3,87	3,84		0,26	3,86	0,26	3,60
25	5,15	5,13		0,31	5,14	0,31	4,83
25	5,47	5,43		0,32	5,45	0,32	5,13
30	6,59	6,56		0,36	6,58	0,36	6,22
30	6,80	6,77		0,37	6,79	0,37	6,42
35	8,18	8,15		0,42	8,17	0,42	7,75
35	8,57	8,54		0,43	8,56	0,43	8,13
40	9,45	9,42		0,46	9,44	0,46	8,98
40	9,84	9,79		0,48	9,82	0,48	9,34
45	11,05	11,01		0,52	11,03	0,52	10,51
45	11,50	11,45		0,54	11,48	0,54	10,94
50	12,61	12,56		0,57	12,59	0,57	12,02
50	12,90	12,84		0,58	12,87	0,58	12,29
55	14,20	14,15		0,61	14,18	0,61	13,57
55	14,59	14,53		0,63	14,56	0,63	13,93
60	15,68	15,64		0,65	15,66	0,65	15,01
60	16,11	16,06		0,66	16,09	0,66	15,43
65	17,35	17,29		0,70	17,32	0,70	16,62
65	17,71	17,65		0,70	17,68	0,70	16,98
70	20,14	20,40		0,74	20,27	0,74	19,53
70	20,37	20,28		0,74	20,33	0,74	19,59
75	21,58	21,51		0,76	21,55	0,76	20,79
75	22,58	22,47		0,76	22,53	0,76	21,77

**Tabel 133: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.6 in het midden van de overspanning**

### 5.9.3.2 Doorbuiging L/500 en L/250

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 30 kN en 35 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 30kN + 5 \times \frac{7,2mm - 6,22mm}{7,75mm - 6,22mm} = 33,219kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 55 kN en 60 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 55kN + 5 \times \frac{14,4mm - 13,57mm}{15,01mm - 13,57mm} = 57,889kN$$

### 5.9.3.3 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 85,977kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- buigingsscheuren en dwarskrachtenscheuren
- enkel onthechting in het midden van de overspanning
- inscheuringen in de koolstofvezelwapening

Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening wordt vastgesteld, wordt de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

$$F_{rest,\max} = 75,195kN$$

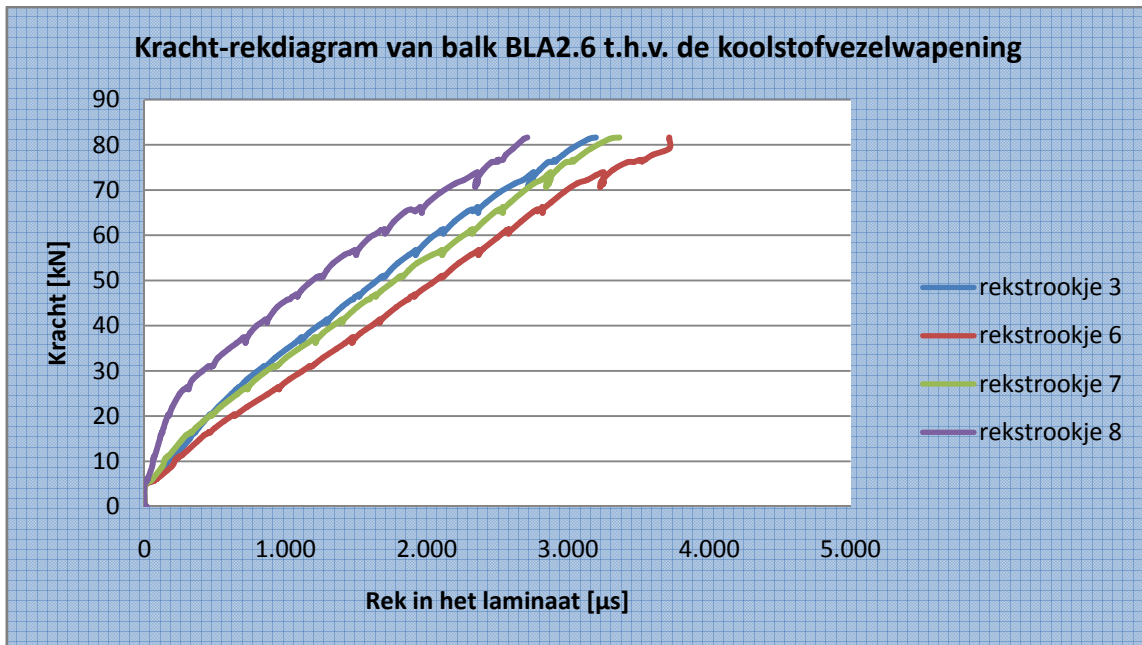
**Figuur 143** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA2.6.



**Figuur 143: Schets scheurvorming balk BLA2.6**

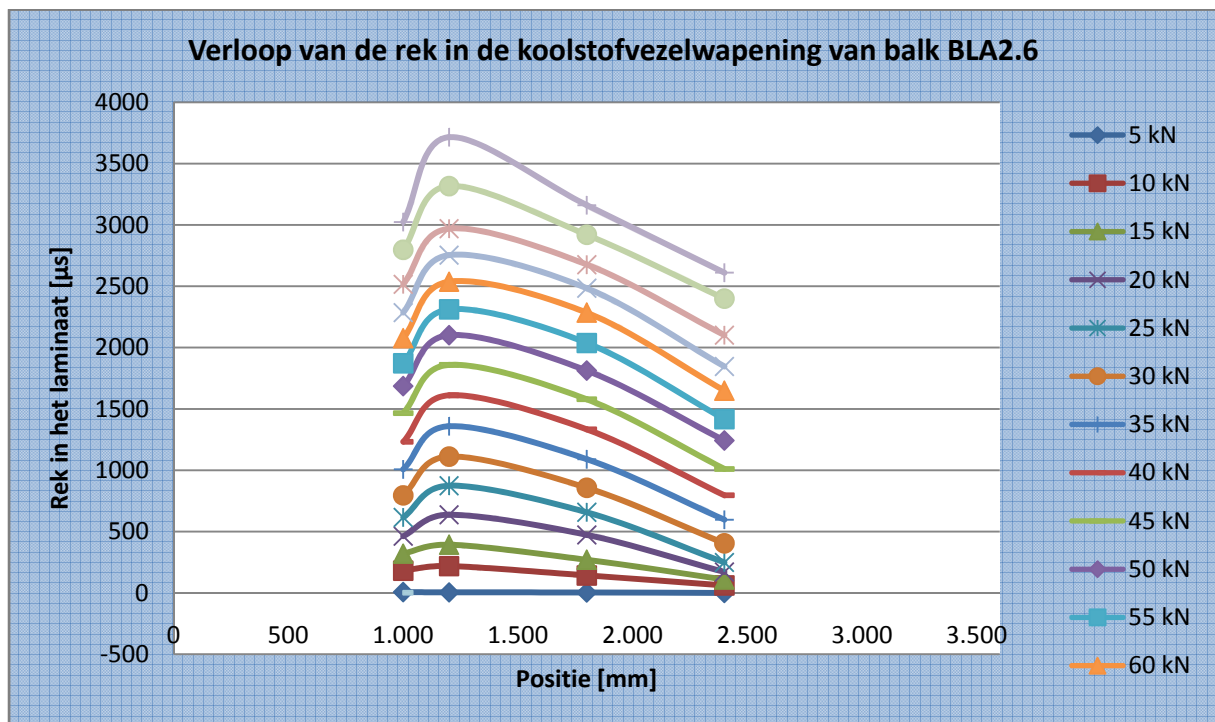
5.9.3.4 *Rek van de koolstofvezelwapening*

**Grafiek 111** toont de rek in de koolstofvezelwapening. Er dient wel opgemerkt te worden dat niet alle rekstrookjes gegevens registreerden tijdens de proef.



**Grafiek 111:** Kracht-rekdiagram van balk BLA2.6 t.h.v. de koolstofvezelwapening

**Grafiek 112** toont het verloop van de rek over de volledige lengte van de balk bij een stijgende belasting.



**Grafiek 112:** Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening van balk BLA2.6

### 5.9.3.5 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld op het breukmechanisme van balk BLA2.6.



**Figuur 144: Scheurvorming linkerkant balk BLA2.6**



**Figuur 145: Scheurvorming rechterkant balk BLA2.6**



**Figuur 146: Onthechting in het midden**



**Figuur 147: Inscheuringen in de koolstofvezelwapening**



**Figuur 148: Scheuren na de herbelasting**



**Figuur 149: Situatie ankers na de herbelasting**

### 5.9.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

#### 5.9.4.1 Lasten

**Tabel 134** vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 103,2 \text{ kN.m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 86,0 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN.m}$
		$P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN.m}$
		$P = 87,2 \text{ kN}$
Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN.m}$	
	$P_u = 70,0 \text{ kN}$	

**Tabel 134: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.6**

#### 5.9.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 135** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

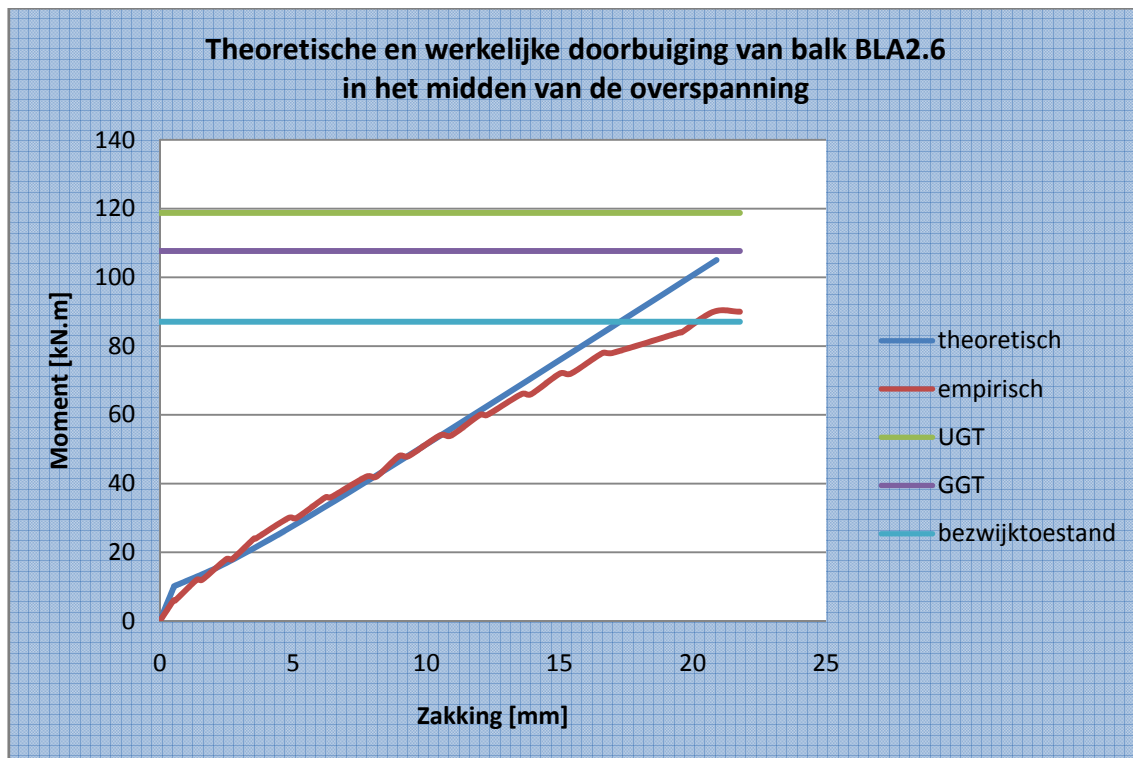
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{\max} = 86,0 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 149,0 \text{ kN}$ (beton: 100%)

**Tabel 135: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.6**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

### 5.9.4.3 Doorbuiging

Grafiek 113 toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

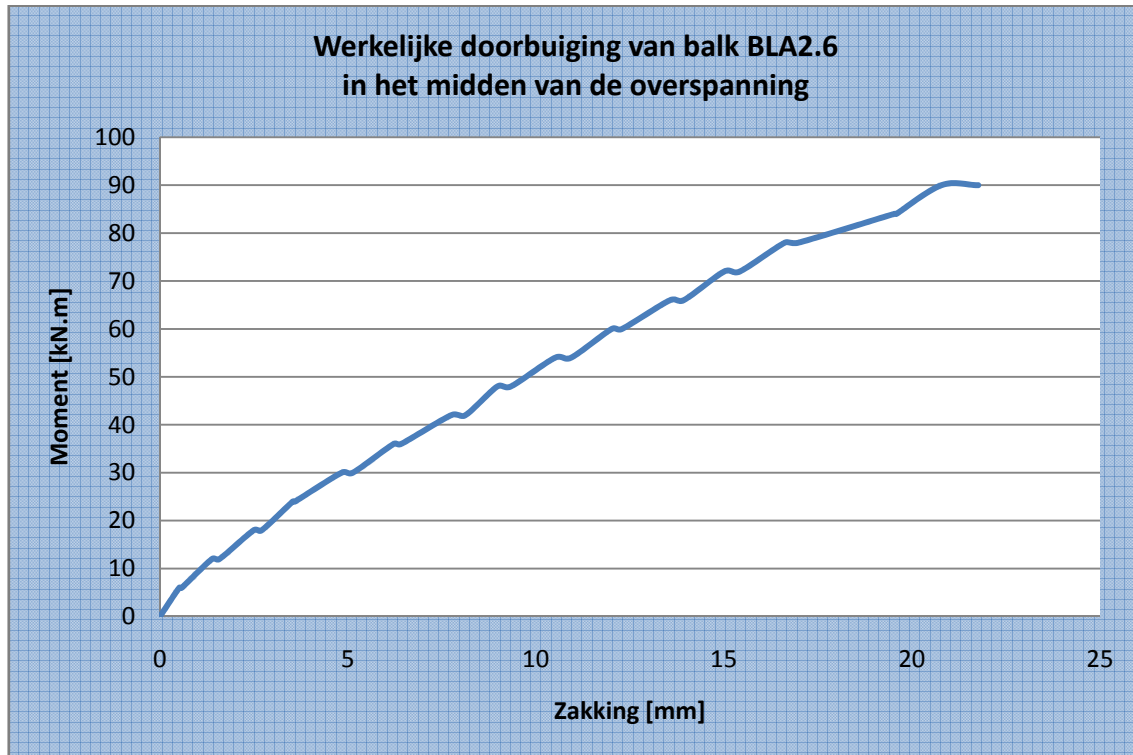


Grafiek 113: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.6 in het midden van de overspanning

In de niet-gescheurde toestand vallen beide grafieken aanvankelijk samen. In de gescheurde toestand is de empirisch bepaalde doorbuiging ongeveer gelijk aan de theoretisch berekende doorbuiging indien het opgenomen moment kleiner is dan 54 kN m. Bij grotere momenten wordt de empirische doorbuiging al gauw groter dan de theoretisch berekende doorbuiging.

#### 5.9.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 114** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA2.6 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 114** is het initieel scheurmoment echter niet af te leiden.



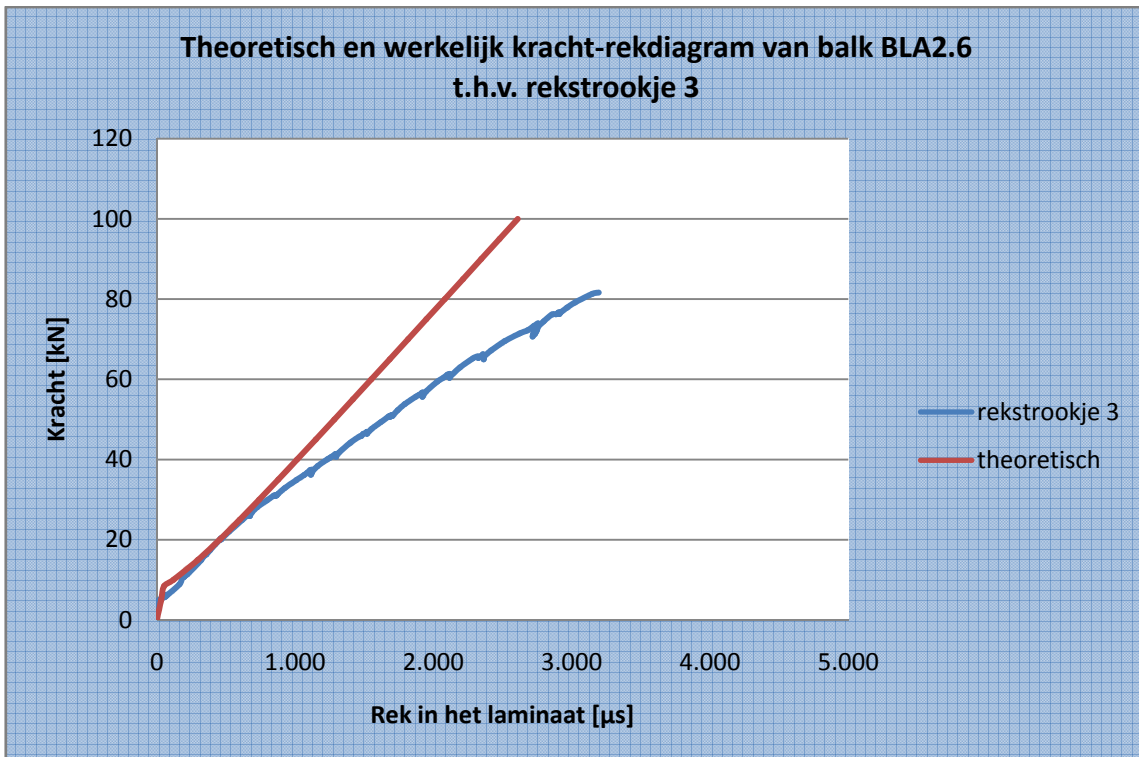
**Grafiek 114: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.6 in het midden van de overspanning**

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 25,0 kN. Dit komt overeen met een moment van 30,0 kN.m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN.m.

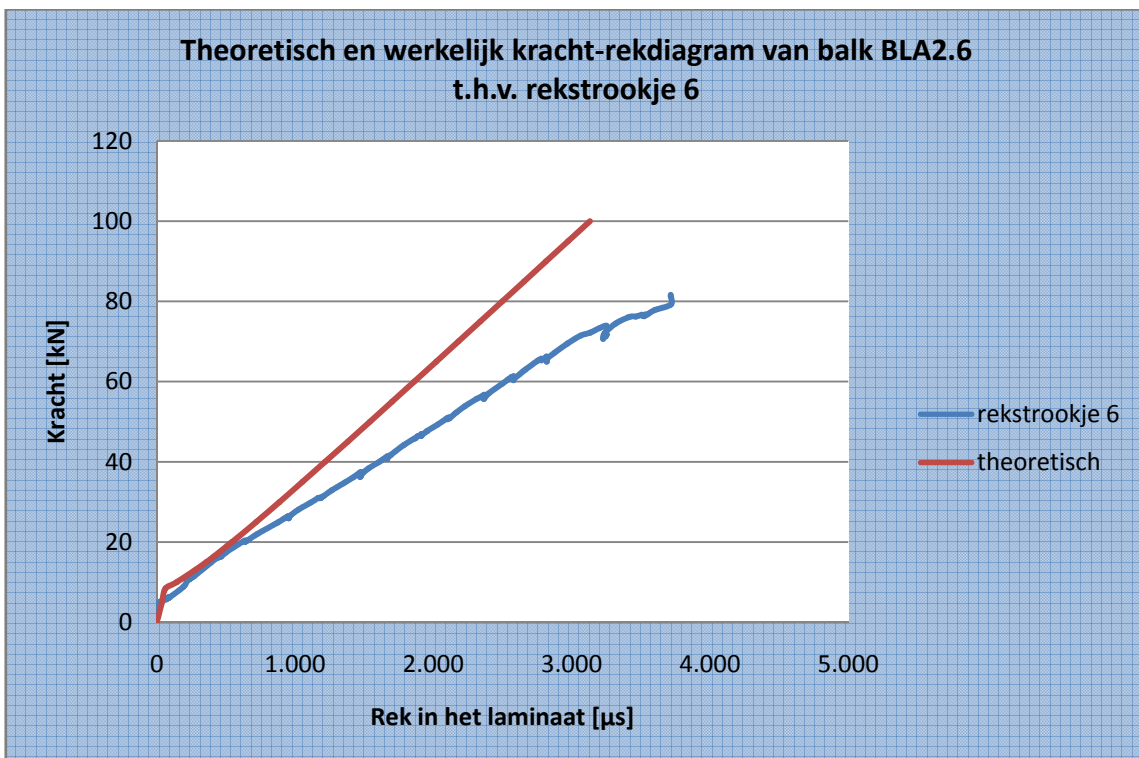


5.9.4.5 *Rek van de koolstofvezelwapening*

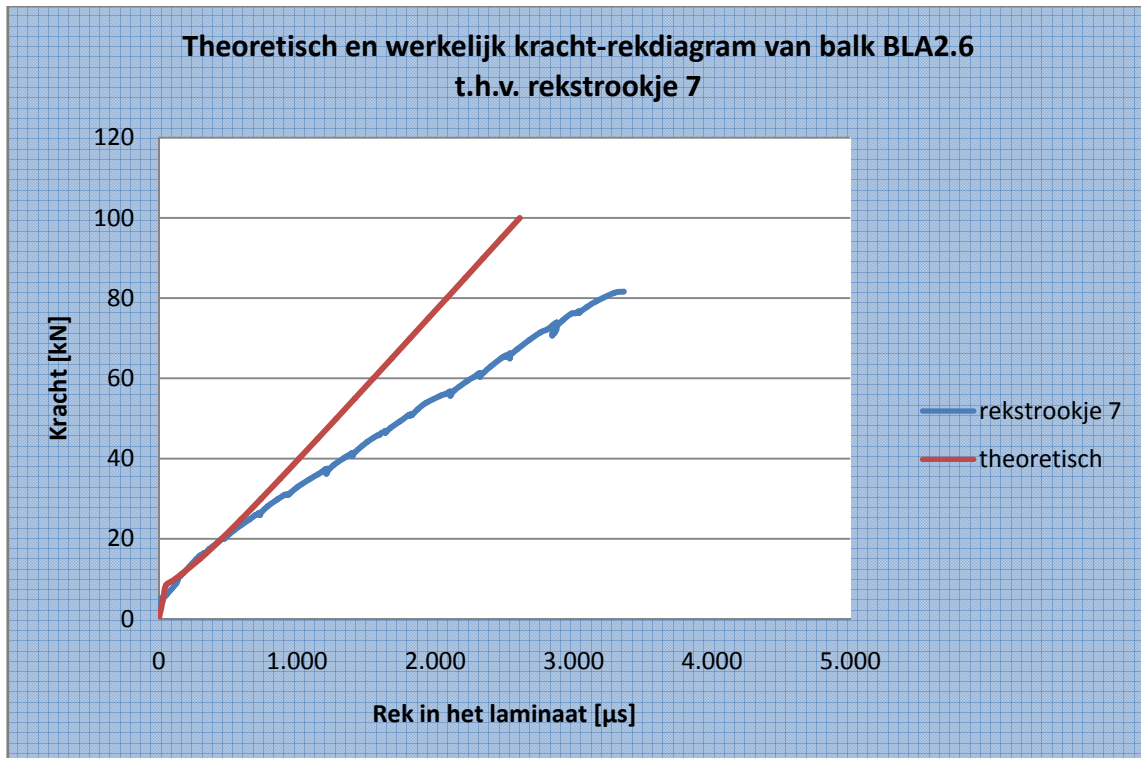
Grafiek 115 tot Grafiek 118 vergelijken de theoretisch berekende rek en de empirisch bepaalde rek met elkaar.



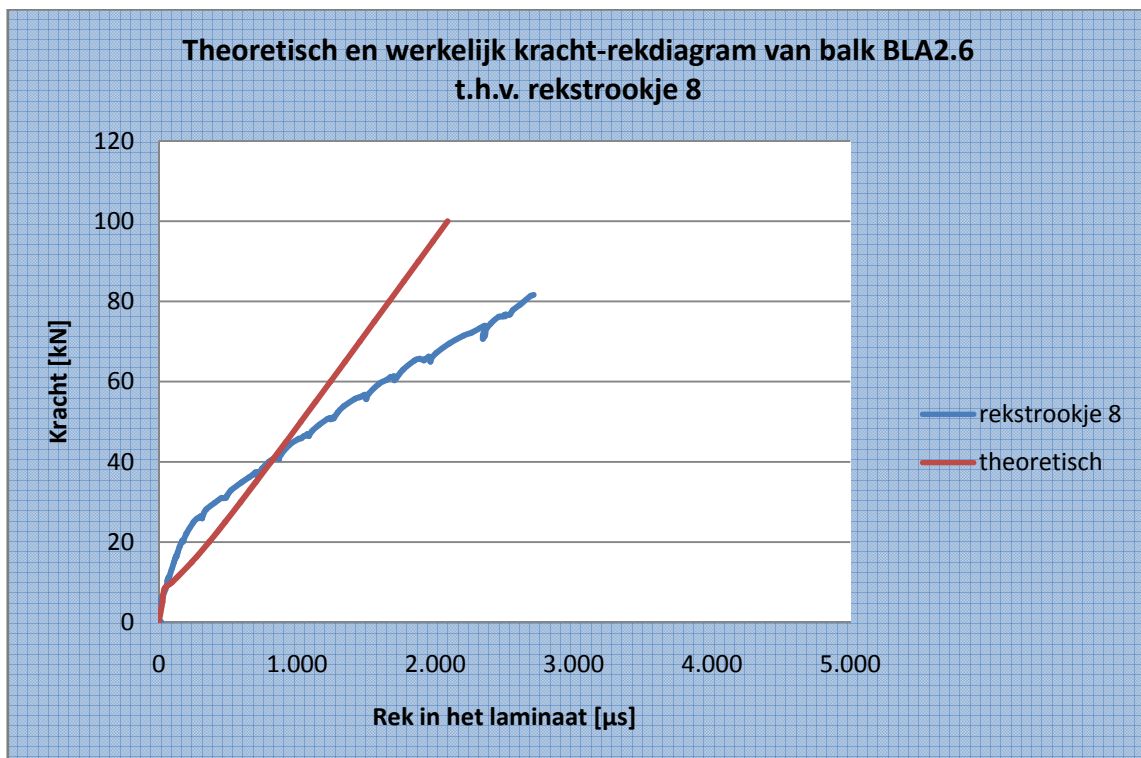
Grafiek 115: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.6 t.h.v. rekstrookje 3



Grafiek 116: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.6 t.h.v. rekstrookje 6



Grafiek 117: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.6 t.h.v. rekstrookje 7



Grafiek 118: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.6 t.h.v. rekstrookje 8

Uit de bovenstaande grafieken blijkt dat de klassieke berekeningsmethode niet voldoet om de rek in de koolstofvezelwapening te voorspellen. Verder blijkt de hoofdwapening te vloeien bij een vjzkelkracht van 74,5 kN. Dit is af te leiden uit de knik in bovenstaande grafieken. Deze waarneming bleek ook reeds uit **Grafiek 108** naar boven te komen. Bijgevolg kan er aangenomen worden dat bij een kracht van 74,5 kN het staal begint te vloeien. Na dit vloeimoment wordt er verondersteld dat de hoofdwapening geen extra last meer kan opnemen. De extra last dient dan bijgevolg door de koolstofvezelwapening opgenomen te worden.

Er kan dus besloten worden dat de hoofdwapening reeds gevloeid heeft vooraleer breuk optrad. Eens het vloeimoment overschreden is, neemt de rek in grote mate toe. De maximale spanning in de koolstofvezelwapening wordt als volgt berekend.

$$\begin{aligned}\sigma &= E \cdot \varepsilon \\ \Leftrightarrow \sigma &= 175000 \times 3716,001 \times 10^{-6} \\ \Leftrightarrow \sigma &= 650,300 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}$$

De maximale spanning in de koolstofvezelwapening bedraagt 650,3 N/mm<sup>2</sup>. Dit is slechts 22,8% van de breukspanning, die 2850 N/mm<sup>2</sup> bedraagt.

#### 5.9.4.6 Breukmechanismen

**Tabel 136** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	51,1 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	43,3 kN m

**Tabel 136: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Indien concrete rip-off buiten beschouwing gelaten wordt, dan is zowel volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 onthechting het bepalende breukmechanisme. Er bestaat wel geen eensgezindheid over de locatie waar de onthechting zich het eerst zou manifesteren. Volgens CUR Aanbeveling 91 zou dit in het midden van de overspanning zijn, terwijl volgens FIB Bulletin 14 dit t.h.v. dwarskrachtenscheuren zou zijn. In werkelijkheid trad inderdaad onthechting op.

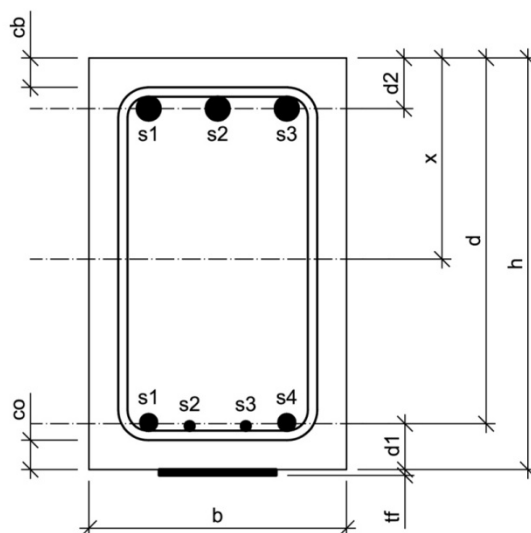
## 5.10 Balk BLA2.7

### 5.10.1 Algemeen

Balk BLA2.7 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening. Aan beide zijden is deze balk bijkomend verankerd met 7 chemische M10 ankers. Deze ankers hebben een lengte van 68 mm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Om concrete rip-off te vermijden, is de koolstofvezelwapening aan beide zijden op 3 cm van de uiteinden bijkomend verankerd met een mechanisch M12 anker. Deze ankers hebben een lengte van 150 mm en worden voorgespannen met een moment van 50 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA2.7.

<b>Ouderdom</b>	141 dagen	
<b>Lengte</b>	4,212 m	
<b>Breedte</b>	0,221 m	
<b>Hoogte</b>	0,352 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

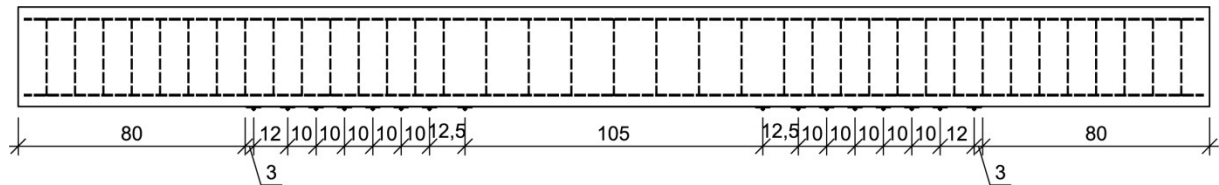
Tabel 137: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.7



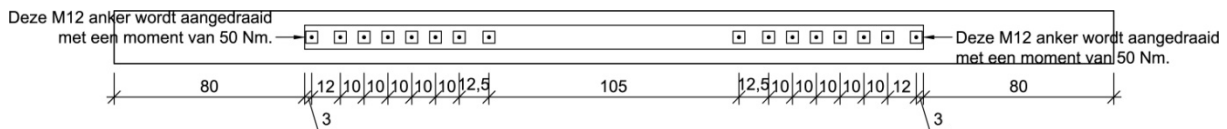
$$h = 353 \text{ mm}$$

$$b = 221 \text{ mm}$$

Figuur 150: Dwarsdoorsnede balk BLA2.7



Figuur 151: Vooraanzicht verankering balk BLA2.7



Figuur 152: Onderaanzicht verankering balk BLA2.7

### 5.10.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{c,x}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 27,005 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 32,554 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA2.1 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi 14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi 8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi 14} = 559,556 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi 8} = 552,660 \frac{N}{mm^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{mm^2}$$

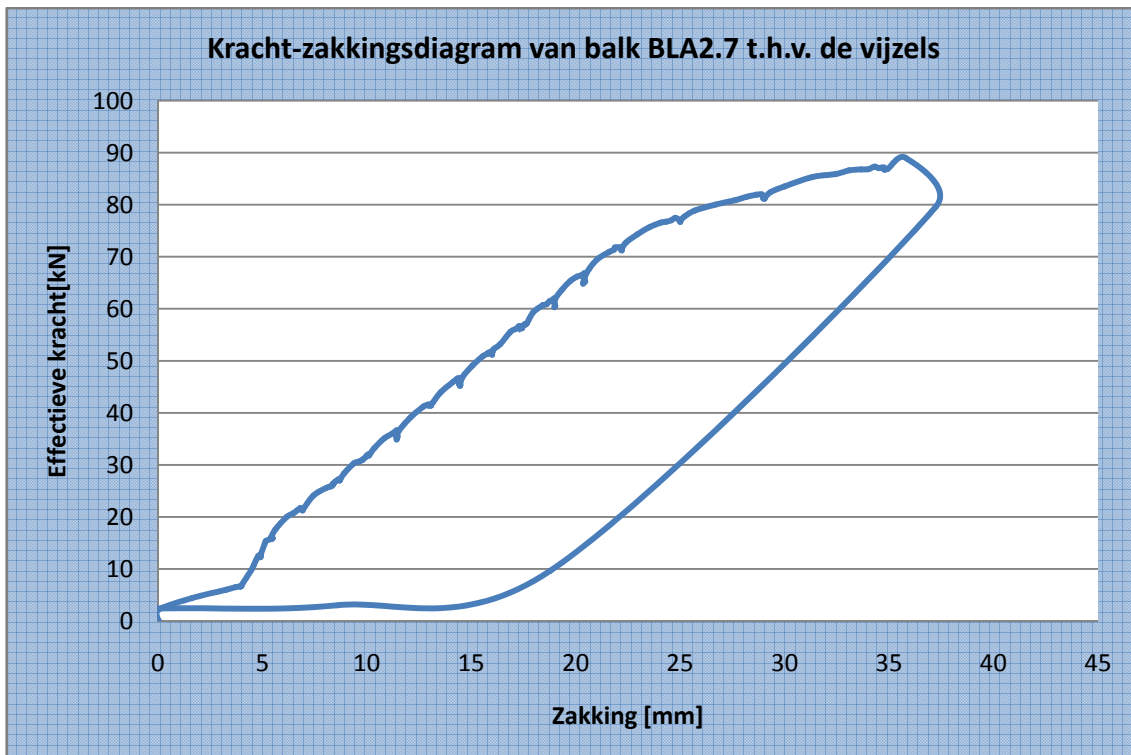
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.10.3 Meetresultaten

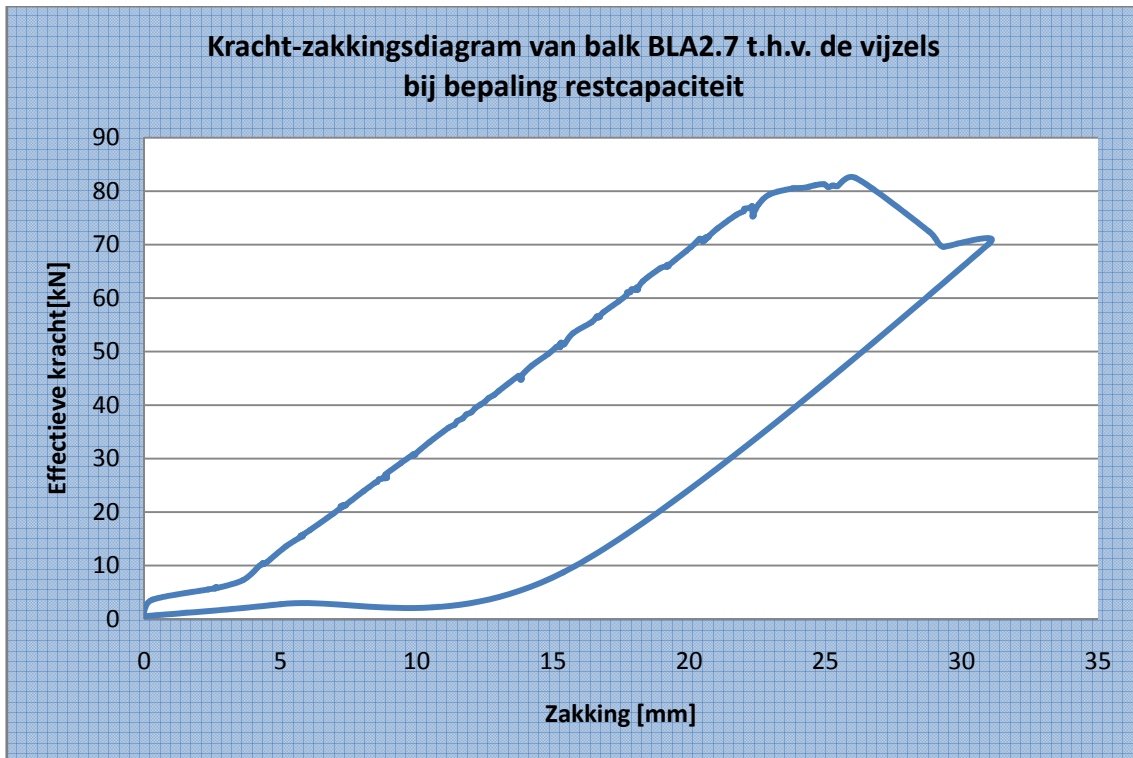
#### 5.10.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

Grafiek 119 toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



Grafiek 119: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 t.h.v. de vijzels

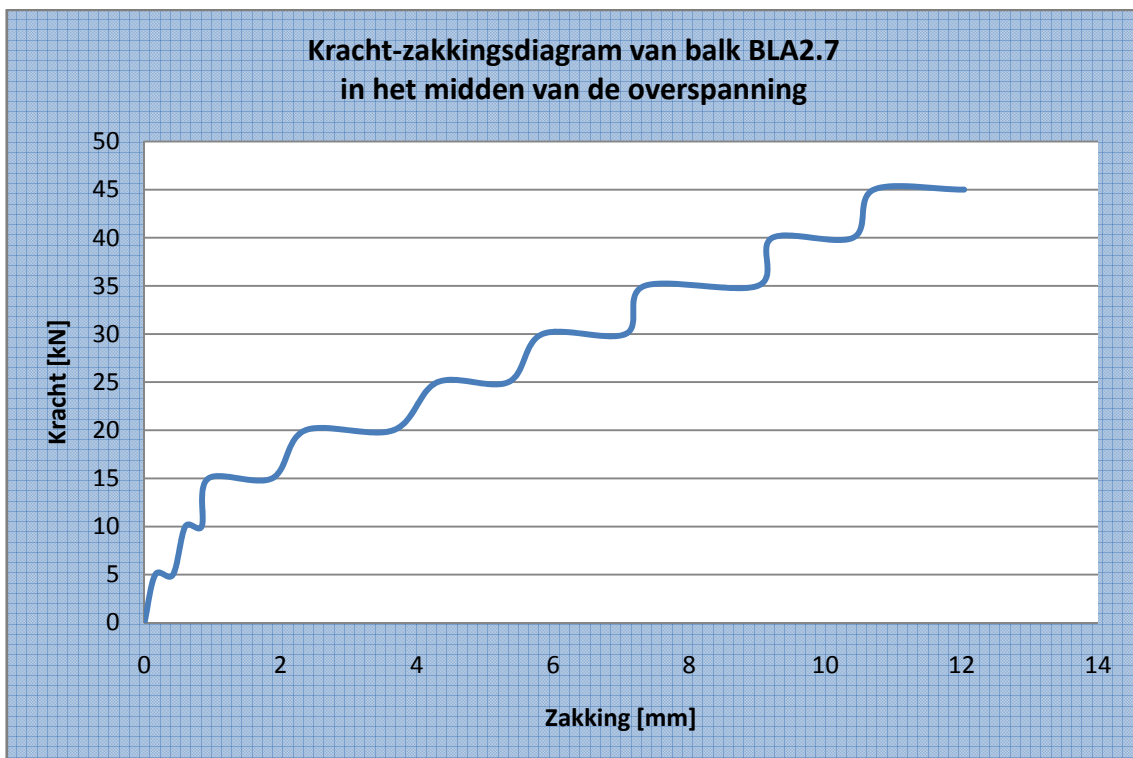
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.



Grafiek 120: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit

### 5.10.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

Grafiek 121 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 121: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 in het midden van de overspanning

Tabel 138 toont de cijferwaarden van Grafiek 121.

Kracht [kN]	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging [mm]
	meetklok 1 (midden)	meetklok 2 (midden)	meetklok 3 (uiteinde)	meetklok 4 (uiteinde)	midden	uiteinde	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
0	0,00	0,00	0,00	n.c	0,00	0,00	0,00
5	0,29	0,31	0,14		0,30	0,14	0,16
5	0,80	0,78	0,37		0,79	0,37	0,42
10	1,13	1,09	0,51		1,11	0,51	0,60
10	1,51	1,47	0,65		1,49	0,65	0,84
15	1,67	1,61	0,70		1,64	0,70	0,94
15	2,81	2,74	0,90		2,78	0,90	1,88
20	3,34	3,23	0,92		3,29	0,92	2,37
20	4,67	4,54	0,95		4,61	0,95	3,66
25	5,34	5,19	0,96		5,27	0,96	4,31
25	6,42	6,23	0,98		6,33	0,98	5,35
30	6,94	6,73	0,99		6,84	0,99	5,85
30	8,19	7,94	1,00		8,07	1,00	7,07
35	8,50	8,21	1,01		8,36	1,01	7,35
35	10,23	9,84	1,03		10,04	1,03	9,01
40	10,46	10,04	1,03		10,25	1,03	9,22
40	11,69	11,20	1,04		11,45	1,04	10,41
45	12,01	11,51	1,05		11,76	1,05	10,71
45	13,37	12,82	1,06		13,10	1,06	12,04
50	13,69	13,13	1,06		13,41	1,06	12,35
50	14,98	14,39	1,08		14,69	1,08	13,61
55	15,47	14,86	1,08		15,17	1,08	14,09
55	16,51	15,89	1,10		16,20	1,10	15,10
60	17,04	16,41	1,10		16,73	1,10	15,63
60	18,17	17,55	1,11		17,86	1,11	16,75
65	18,62	18,00	1,12		18,31	1,12	17,19
65	20,04	19,43	1,13		19,74	1,13	18,61
70	20,55	19,94	1,13		20,25	1,13	19,12
70	22,37	21,78	1,15		22,08	1,15	20,93

Tabel 138: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 in het midden van de overspanning

### 5.10.3.3 Doorbuiging $L/500$ en $L/250$

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging  $L/500$  en de doorbuiging  $L/250$  zijn dus

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2\text{mm}$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4\text{mm}$$



De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 30 kN en 35 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 30kN + 5 \times \frac{7,2mm - 5,85mm}{7,35mm - 5,85mm} = 34,517kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 55 kN en 60 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 55kN + 5 \times \frac{14,4mm - 14,09mm}{15,63mm - 14,09mm} = 55,908kN$$

#### 5.10.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 88,897kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- overwegend buigingsscheuren
- scheuren blijven gesloten
- plotse onthechting

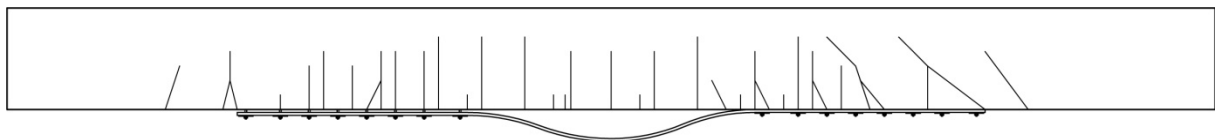
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening wordt vastgesteld, wordt de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

$$F_{rest, \max} = 82,507kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de restcapaciteit werden visueel waargenomen.

- meest linkse ankers scheuren door
- ankers worden geleidelijk uit het beton getrokken

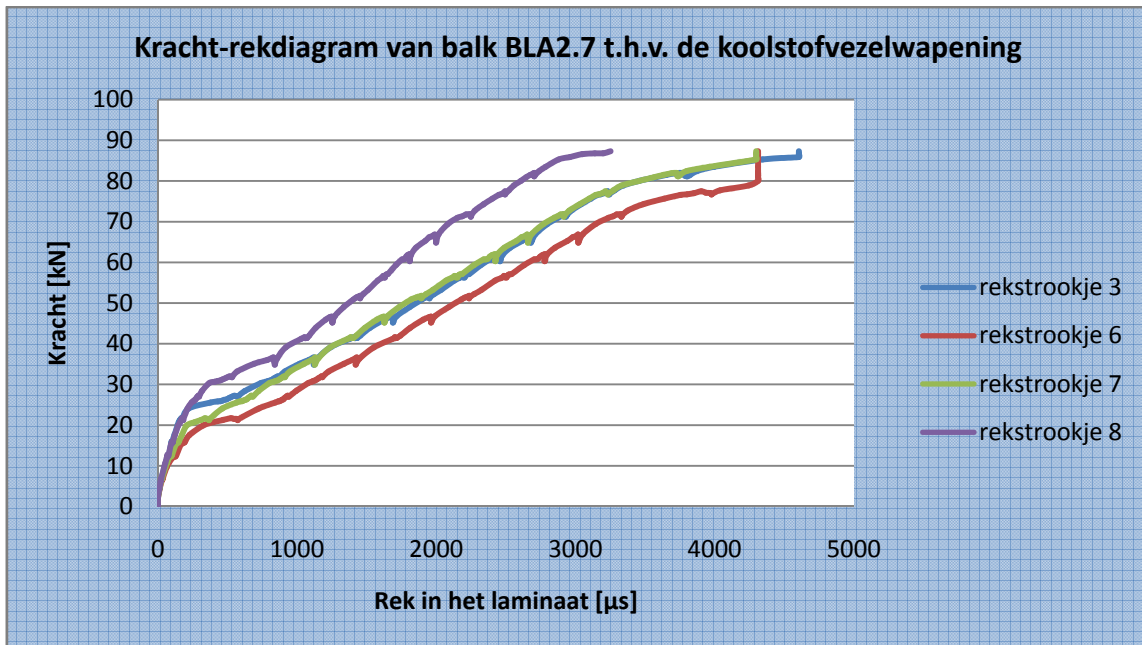
**Figuur 153** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA2.7.



**Figuur 153: Schets scheurvorming balk BLA2.7**

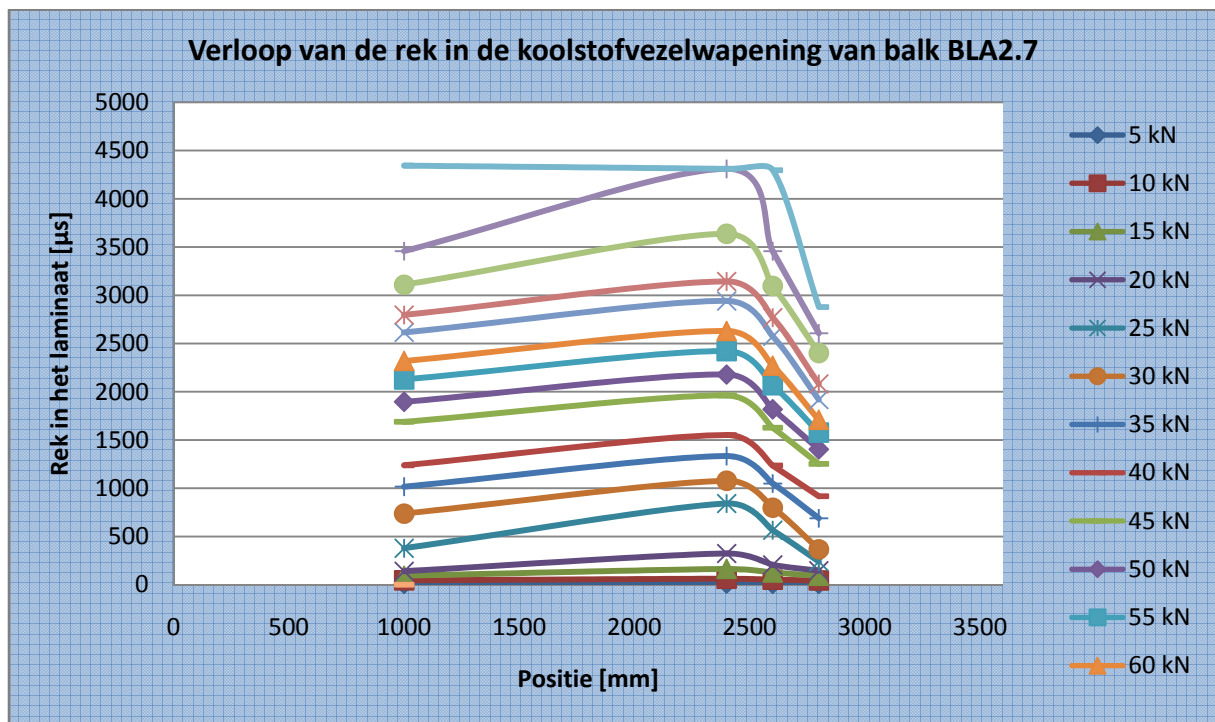
5.10.3.5 *Rek van de koolstofvezelwapening*

**Grafiek 122** toont de rek in de koolstofvezelwapening. Er dient wel opgemerkt te worden dat niet alle rekstroomjes gegevens registreerden tijdens de proef.



**Grafiek 122:** Kracht-rekdiagram van balk BLA2.7 t.h.v. de koolstofvezelwapening

**Grafiek 123** toont het verloop van de rek over de volledige lengte van de balk bij een stijgende belasting.



**Grafiek 123:** Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening van balk BLA2.7

### 5.10.3.6 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BLA2.7.



**Figuur 154: Scheurvorming linkerkant balk BLA2.7**



**Figuur 155: Scheurvorming rechterkant balk BLA2.7**



**Figuur 156: Linkerankers na de eerste belastingsfase**



**Figuur 157: Ankers na de herbelasting**



**Figuur 158: Inscheuringen van meest linkse ankers**

### 5.10.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

#### 5.10.4.1 Lasten

**Tabel 139** vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 106,7 \text{ kN.m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 88,9 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN.m}$
		$P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN.m}$
		$P = 87,2 \text{ kN}$
Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN.m}$	
	$P_u = 70,0 \text{ kN}$	

**Tabel 139: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.7**

#### 5.10.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 140** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

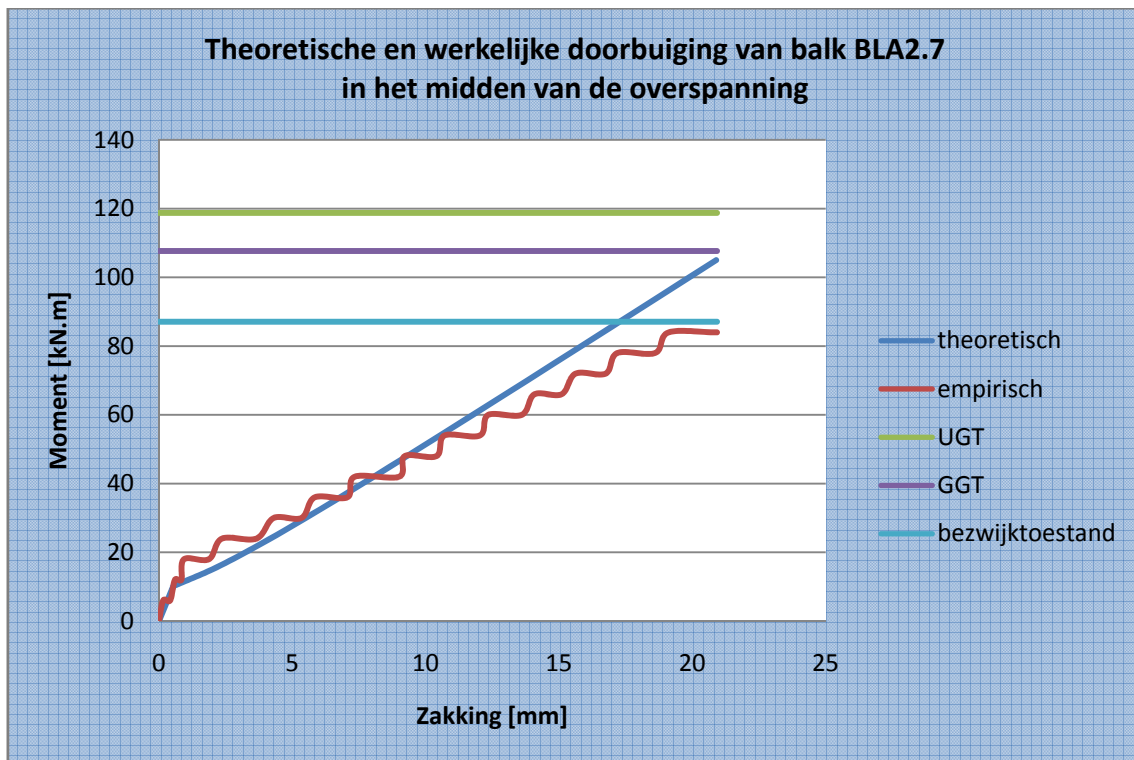
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{\max} = 88,9 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 149,0 \text{ kN}$ (beton: 100%)

**Tabel 140: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.7**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

### 5.10.4.3 Doorbuiging

**Grafiek 124** toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

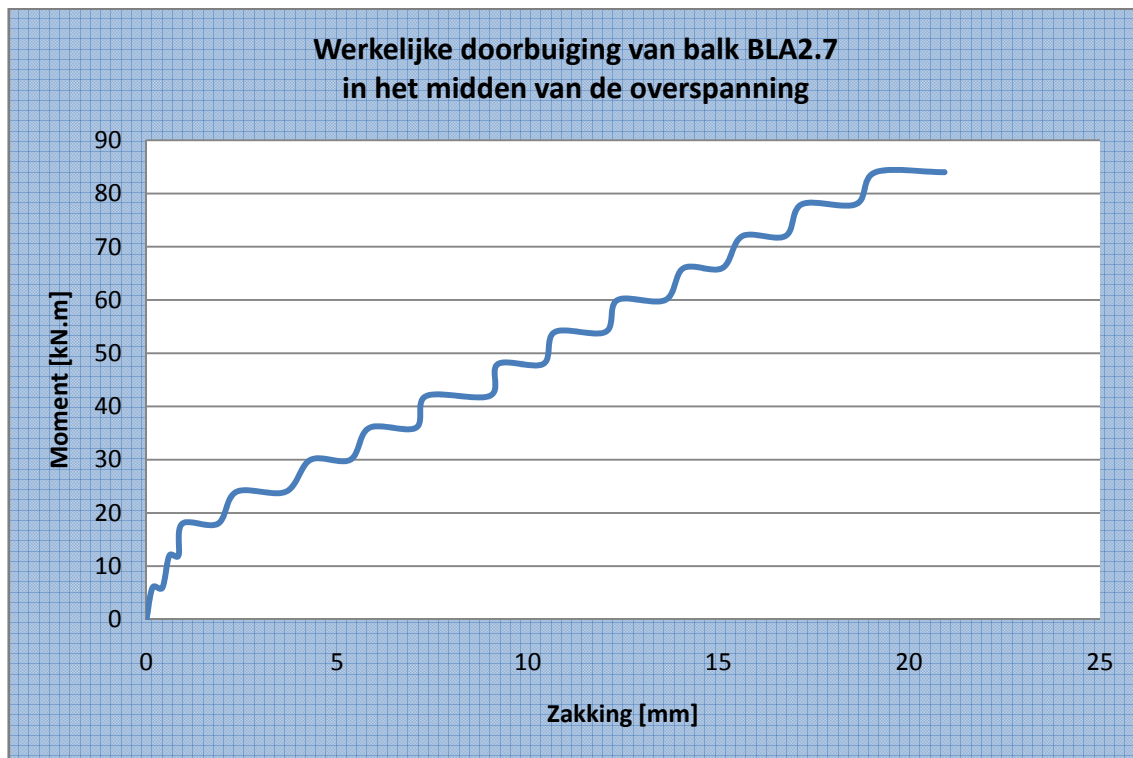


**Grafiek 124:** Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.7 in het midden van de overspanning

In de niet-gescheurde toestand vallen de grafieken aanvankelijk samen. In de gescheurde toestand is de empirisch bepaalde doorbuiging groter dan de theoretisch berekende doorbuiging, indien het opgenomen moment groter is dan 42 kN m.

#### 5.10.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 125** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA2.7 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 125** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 18,0 kN m.

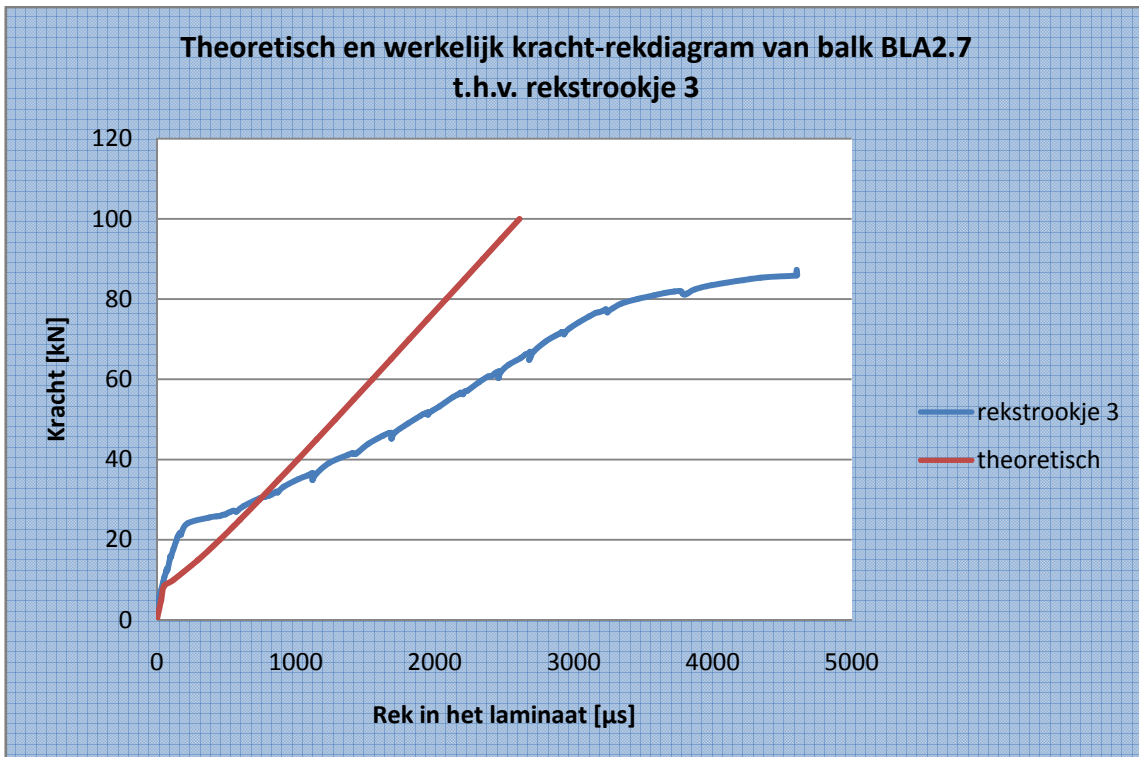


**Grafiek 125: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.7 in het midden van de overspanning**

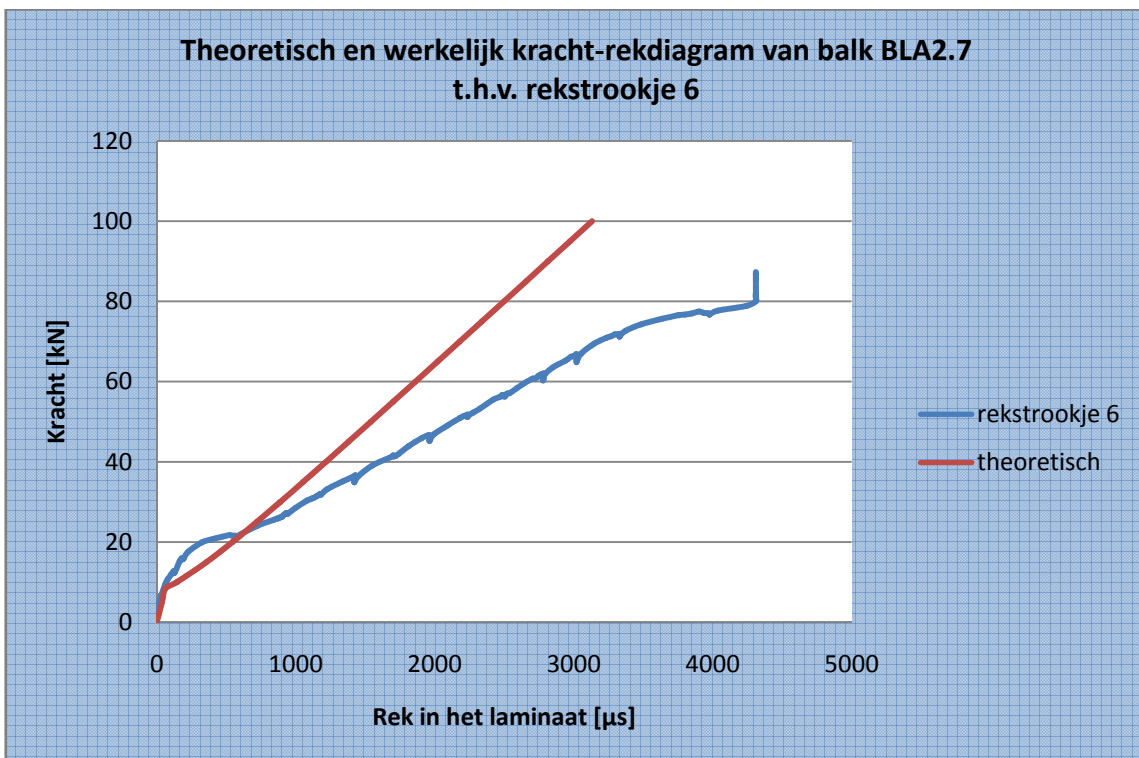
Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 30,0 kN. Dit komt overeen met een moment van 36,0 kN.m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN.m.

5.10.4.5 *Rek van de koolstofvezelwapening*

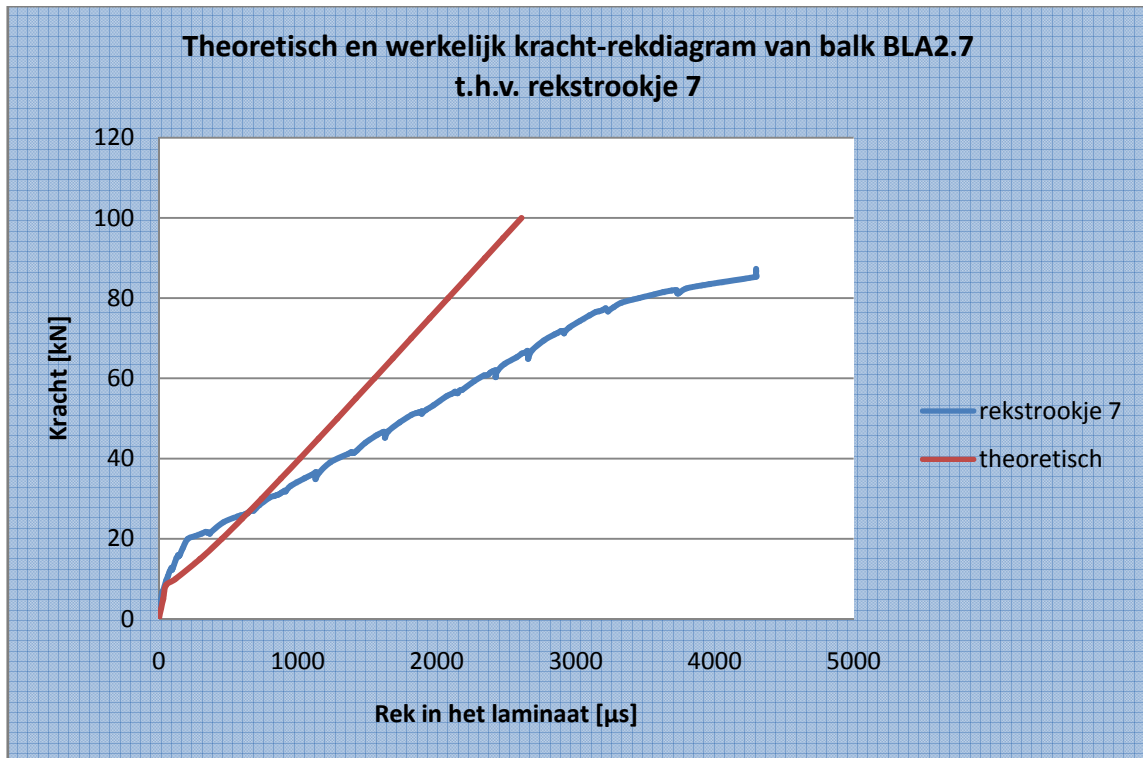
Grafiek 126 tot Grafiek 129 vergelijken de theoretisch berekende rek en de empirisch bepaalde rek met elkaar.



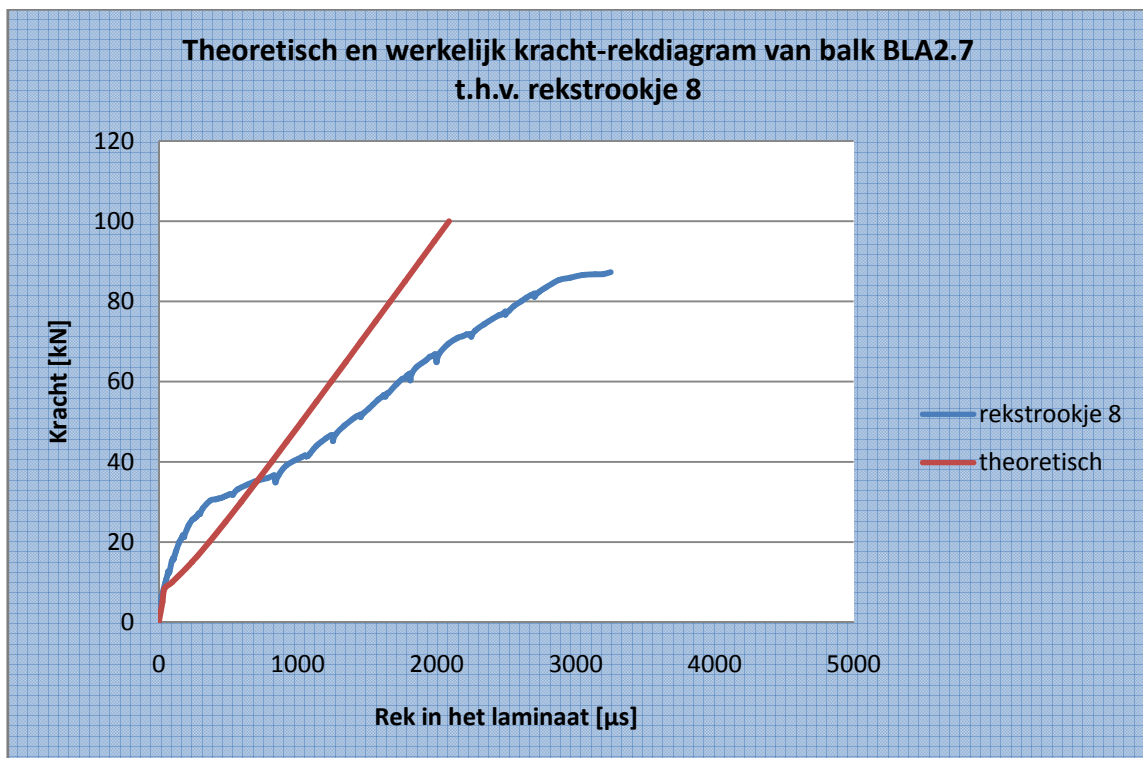
Grafiek 126: Theoretisch en werkelijk kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 t.h.v. rekstrookje 3



Grafiek 127: Theoretisch en werkelijk kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 t.h.v. rekstrookje 6



Grafiek 128: Theoretisch en werkelijk kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 t.h.v. rekstrookje 7



Grafiek 129: Theoretisch en werkelijk kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.7 t.h.v. rekstrookje 8



Uit de bovenstaande grafieken blijkt dat de klassieke berekeningsmethode niet voldoet om de rek in de koolstofvezelwapening te voorspellen. Verder blijkt de hoofdwapening te vloeien bij een vjzelkracht van 72,7 kN. Dit is af te leiden uit de knik in bovenstaande grafieken. Uit **Grafiek 119** bleek dat de hoofdwapening slechts bij een vjzelkracht van 77,7 kN vloeit. Bijgevolg kan er aangenomen worden dat bij een kracht van 72,7 à 77,7 kN het staal begint te vloeien. Na dit vloeimoment wordt er verondersteld dat de hoofdwapening geen extra last meer kan opnemen. De extra last dient dan bijgevolg door de koolstofvezelwapening opgenomen te worden.

Er kan dus besloten worden dat de hoofdwapening reeds gevloeid heeft vooraleer breuk optrad. Eens het vloeimoment overschreden is, neemt de rek in grote mate toe. De maximale spanning in de koolstofvezelwapening wordt als volgt berekend.

$$\begin{aligned}\sigma &= E \cdot \varepsilon \\ \Leftrightarrow \sigma &= 175000 \times 4603,491 \times 10^{-6} \\ \Leftrightarrow \sigma &= 805,611 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}$$

De maximale spanning in de koolstofvezelwapening bedraagt 8056 N/mm<sup>2</sup>. Dit is slechts 28,3% van de breukspanning, die 2850 N/mm<sup>2</sup> bedraagt.

#### 5.10.4.6 Breukmechanismen

**Tabel 141** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	51,1 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	43,3 kN m

**Tabel 141: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Indien concrete rip-off buiten beschouwing gelaten wordt, dan is zowel volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 onthechting het bepalende breukmechanisme. Er bestaat wel geen eensgezindheid over de locatie waar de onthechting zich het eerst zou manifesteren. Volgens CUR Aanbeveling 91 zou dit in het midden van de overspanning zijn, terwijl volgens FIB Bulletin 14 dit t.h.v. dwarskrachtenscheuren zou zijn. In werkelijkheid trad een plotse onthechting op. Bijgevolg was het onmogelijk vast te stellen waar deze onthechting zich het eerst manifesteerde.

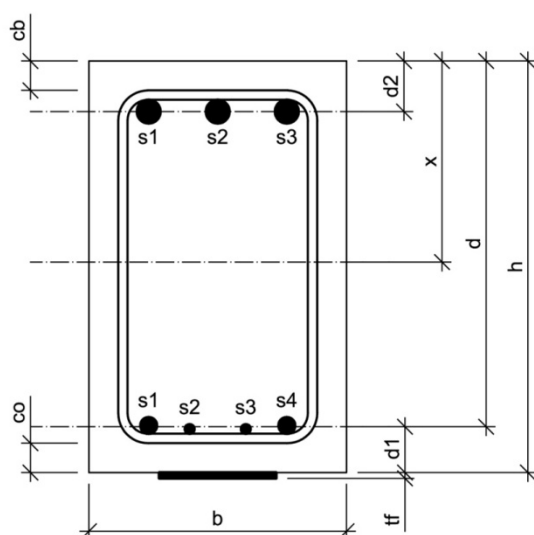
## 5.11 Balk BLA2.8

### 5.11.1 Algemeen

Balk BLA2.8 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening. Aan beide zijden is deze balk bijkomend verankerd met 14 mechanische M8 ankers. Deze ankers hebben een lengte van 75 mm en worden voorgespannen met een moment van 15 N.m. De verdeelplaatjes meten 3,5 cm op 3,5 cm, hebben een dikte van 5 mm en worden bijkomend verlijmd op de koolstofvezelwapening. Om concrete rip-off te vermijden, is de koolstofvezelwapening aan beide zijden op 3 cm van de uiteinden bijkomend verankerd met een mechanisch M12 anker. Deze ankers hebben een lengte van 150 mm en worden voorgespannen met een moment van 50 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA2.8.

<b>Ouderdom</b>	149 dagen	
<b>Lengte</b>	4,204 m	
<b>Breedte</b>	0,221 m	
<b>Hoogte</b>	0,354 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

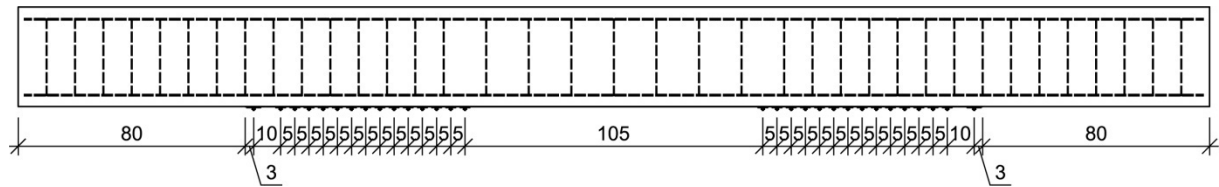
Tabel 142: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.8



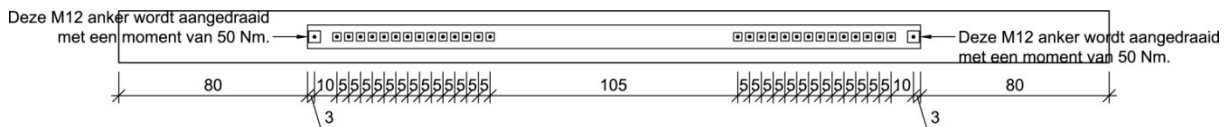
$$h = 354 \text{ mm}$$

$$b = 221 \text{ mm}$$

Figuur 159: Dwarsdoorsnede balk BLA2.8



Figuur 160: Vooraanzicht verankering balk BLA2.8



Figuur 161: Onderaanzicht verankering balk BLA2.8

### 5.11.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{c,x}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 28,054 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 33,818 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA2.8 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308mm^2$$

$$A_{s1,\phi8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi 14} = 559,556 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi 8} = 552,660 \frac{N}{mm^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{mm^2}$$

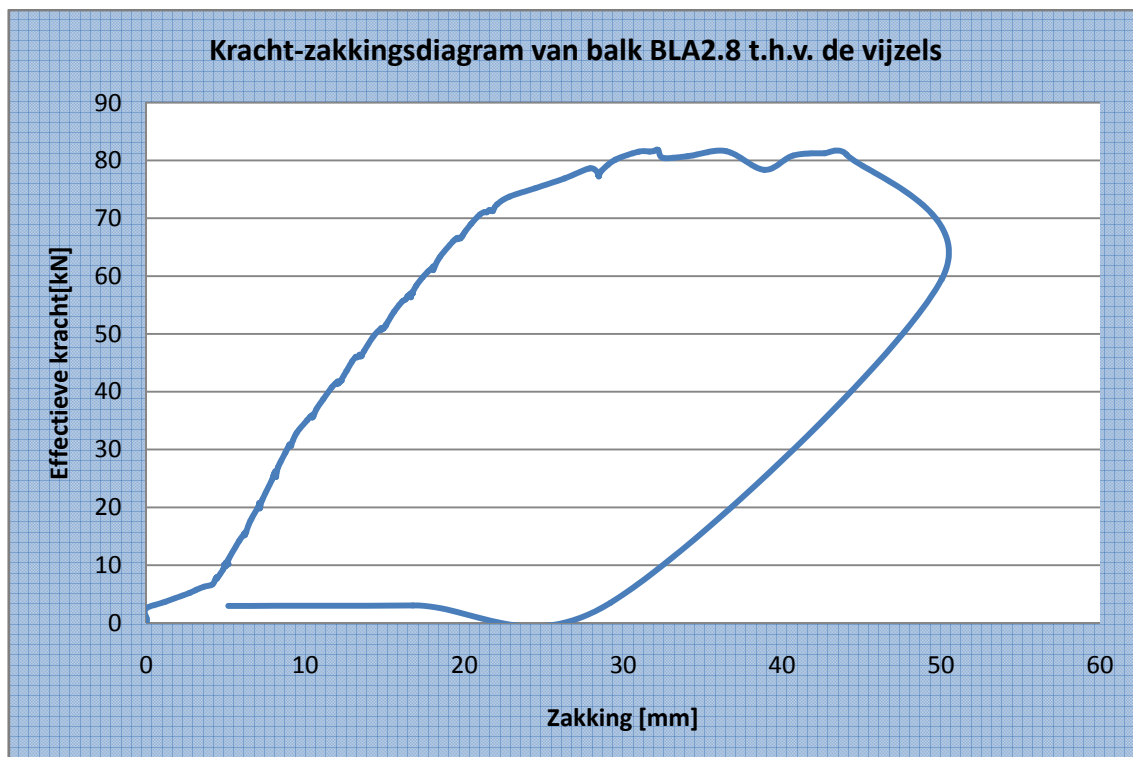
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.11.3 Meetresultaten

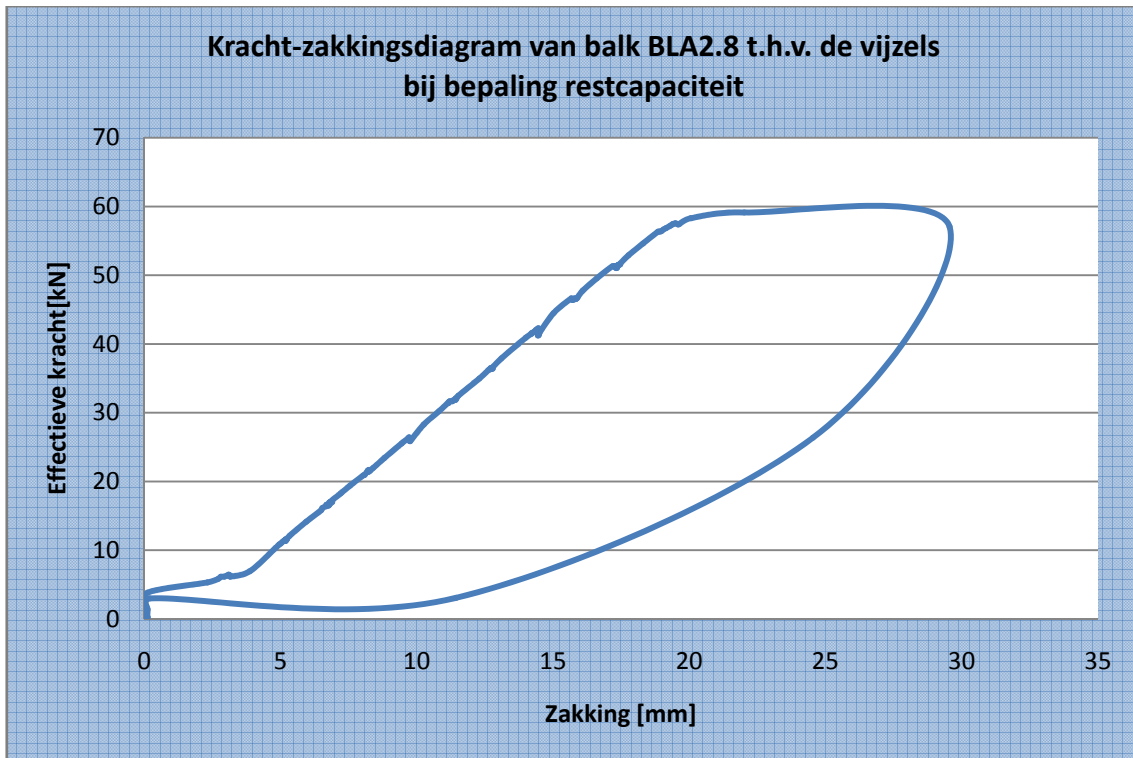
#### 5.11.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

**Grafiek 130** toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



**Grafiek 130: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.8 t.h.v. de vijzels**

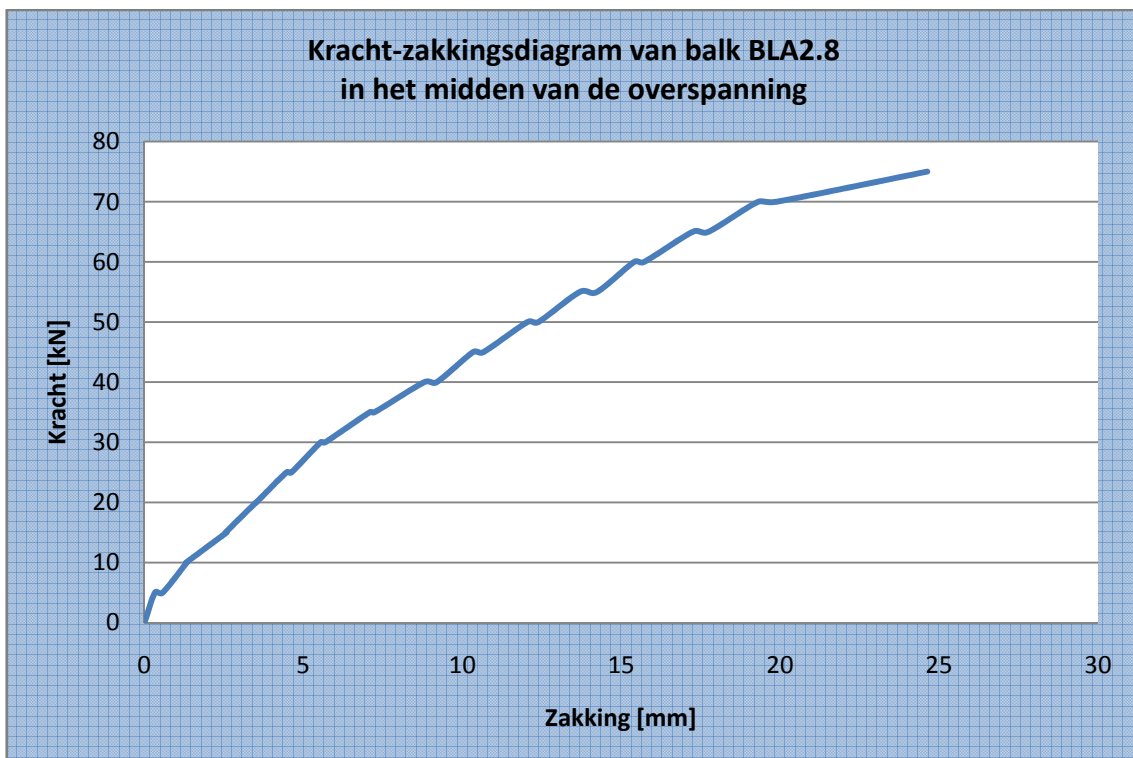
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.



Grafiek 131: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.8 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit

### 5.11.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

Grafiek 132 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 132: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.8 in het midden van de overspanning

**Tabel 143** toont de cijferwaarden van **Grafiek 132**.

Kracht [kN]	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging [mm]
	meetklok 1 (midden)	meetklok 2 (midden)	meetklok 3 (uiteinde)	meetklok 4 (uiteinde)	midden	uiteinde	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
0	0,00	0,00	0,00	n.c.	0,00	0,00	0,00
5	0,35	0,33	0,01		0,34	0,01	0,33
5	0,70	0,53	0,04		0,62	0,04	0,58
10	1,40	1,38	0,06		1,39	0,06	1,33
10	1,39	1,37	0,07		1,38	0,07	1,31
15	2,71	2,68	0,11		2,70	0,11	2,59
15	2,68	2,64	0,11		2,66	0,11	2,55
20	3,66	3,64	0,14		3,65	0,14	3,51
20	3,68	3,64	0,14		3,66	0,14	3,52
25	4,64	4,62	0,16		4,63	0,16	4,47
25	4,81	4,78	0,17		4,80	0,17	4,63
30	5,74	5,73	0,19		5,74	0,19	5,55
30	5,88	5,87	0,19		5,88	0,19	5,69
35	7,31	7,29	0,21		7,30	0,21	7,09
35	7,46	7,44	0,21		7,45	0,21	7,24
40	9,04	9,03	0,23		9,04	0,23	8,81
40	9,43	9,42	0,23		9,43	0,23	9,20
45	10,60	10,58	0,25		10,59	0,25	10,34
45	10,92	10,91	0,25		10,92	0,25	10,67
50	12,32	12,30	0,26		12,31	0,26	12,05
50	12,68	12,65	0,27		12,67	0,27	12,40
55	13,99	13,96	0,28		13,98	0,28	13,70
55	14,54	14,52	0,29		14,53	0,29	14,24
60	15,72	15,70	0,30		15,71	0,30	15,41
60	16,04	16,01	0,30		16,03	0,30	15,73
65	17,58	17,56	0,32		17,57	0,32	17,25
65	18,08	18,05	0,32		18,07	0,32	17,75
70	19,66	19,64	0,34		19,65	0,34	19,31
70	20,23	20,22	0,34		20,23	0,34	19,89
75	24,95	25,02	0,36		24,99	0,36	24,63

**Tabel 143: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk balk BLA2.8 in het midden van de overspanning****5.11.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250**

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 35 kN en 40 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 30kN + 5 \times \frac{7,2mm - 7,09mm}{8,81mm - 7,09mm} = 35,321kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 55 kN en 60 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 55kN + 5 \times \frac{14,4mm - 13,70mm}{15,41mm - 13,70mm} = 57,055kN$$

#### 5.11.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 81,834kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- buigingsscheuren
- dwarskrachtenscheuren vanaf 70 kN
- breuk door peeling t.h.v. een verzwakte laag, namelijk t.h.v. de hoofdwapening

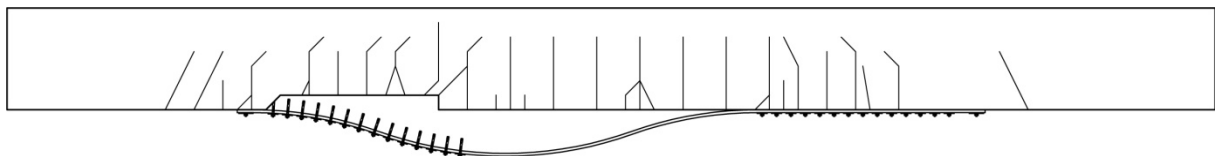
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

$$F_{rest,\max} = 59,133kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de restcapaciteit werden visueel waargenomen.

- verbrokkeling van het beton zet zich voort
- geen inscheuringen in de koolstofvezelwapening door de ankers

**Figuur 162** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA2.8.



**Figuur 162: Schets scheurvorming BLA2.8**

### 5.11.3.5 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BLA2.8.



**Figuur 163: Scheurvorming balk BLA2.8**



**Figuur 164: Linkerankers**



**Figuur 165: Rechterankers**



**Figuur 166: Onthechting t.h.v. een verzwakte laag**



**Figuur 167: Verbrokkeling van het beton na herbelasting**



**Figuur 168: Geen inscheuringen in de koolstofvezelwapening**





Figuur 169: Onthechting t.h.v. een verzwakte laag

#### 5.11.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

##### 5.11.4.1 Lasten

Tabel 144 vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 98,2 \text{ kN.m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 81,8 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN.m}$
		$P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN.m}$
		$P = 87,2 \text{ kN}$
Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN.m}$	
	$P_u = 70,0 \text{ kN}$	

Tabel 144: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.8

##### 5.11.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

Tabel 145 vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

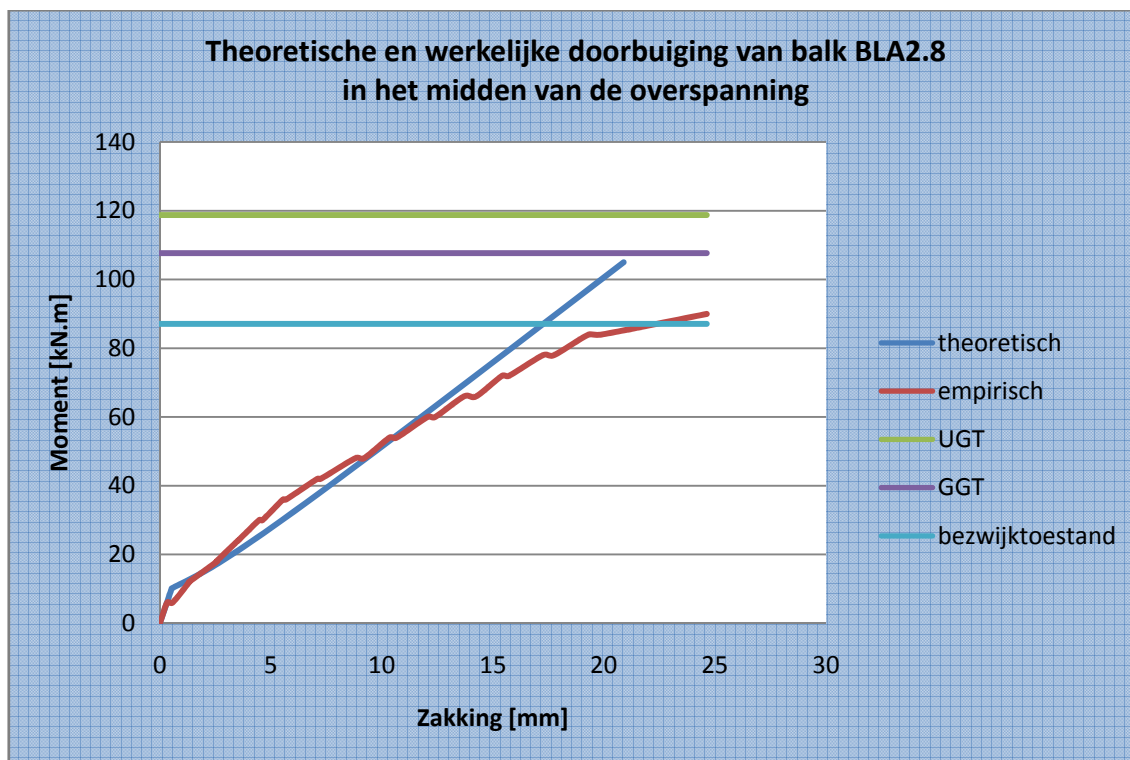
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{\max} = 81,8 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 149,0 \text{ kN}$ (beton: 100%)

Tabel 145: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.8

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd . Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

#### 5.11.4.3 Doorbuiging

**Grafiek 133** toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

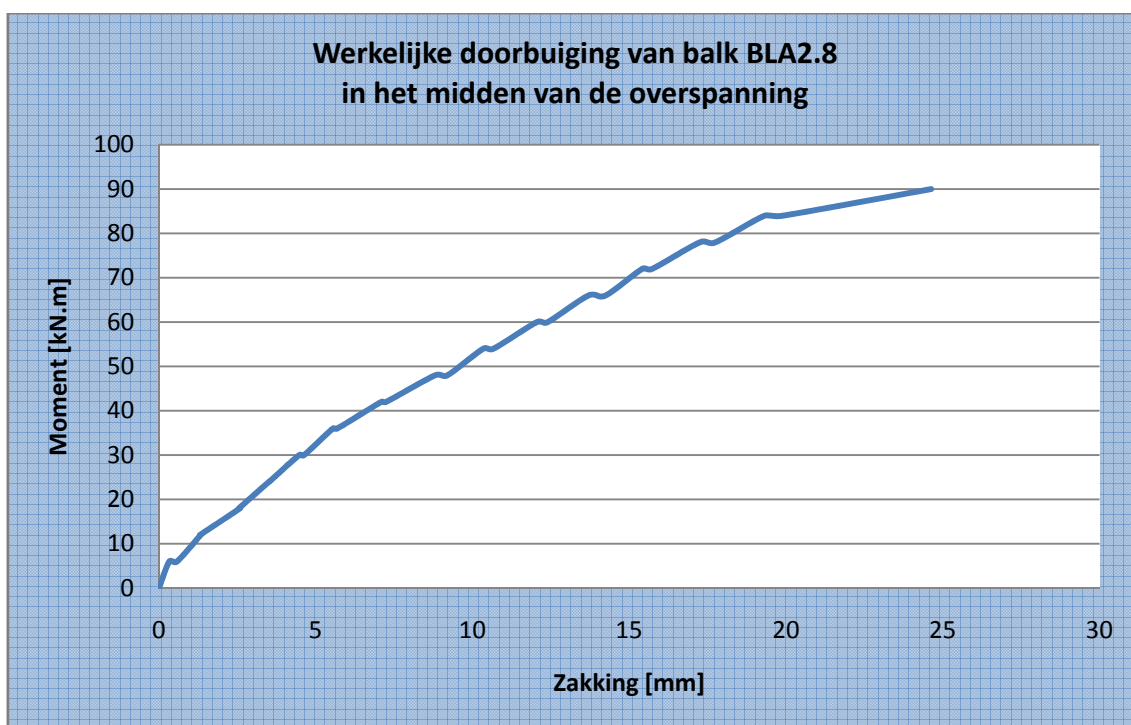


**Grafiek 133: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.8 in het midden van de overspanning**

In de niet-gescheurde toestand is de empirisch bepaalde doorbuiging net iets groter dan de theoretisch berekende doorbuiging. In de gescheurde toestand is de empirisch bepaalde doorbuiging kleiner dan de theoretisch berekende doorbuiging indien het opgenomen moment groter is dan 18 kN m en kleiner dan 48 kN m.

#### 5.11.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 134** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA2.8 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 134** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 6,0 kN m.



**Grafiek 134: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.8 in het midden van de overspanning**

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 20,0 kN. Dit komt overeen met een moment van 24,0 kN.m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN.m.

#### 5.11.4.5 Breukmechanismen

**Tabel 146** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	51,1 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	43,3 kN m

**Tabel 146: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Indien concrete rip-off buiten beschouwing gelaten wordt, dan is zowel volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 onthechting het bepalende breukmechanisme. Er bestaat wel geen eensgezindheid over de locatie waar de onthechting zich het eerst zou manifesteren. Volgens CUR Aanbeveling 91 zou dit in het midden van de overspanning zijn, terwijl volgens FIB Bulletin 14 dit t.h.v. dwarskrachtenscheuren zou zijn. In werkelijkheid trad onthechting. In werkelijkheid trad zowel onthechting waarbij nog een dun laagje beton aan de koolstofvezelwapening hangt en onthechting t.h.v. een verzwakte laag, namelijk t.h.v. de hoofdwapening op. Dit laatst breukmechanisme wordt echter noch door CUR Aanbeveling 91 noch door FIB Bulletin 14 beschouwd.

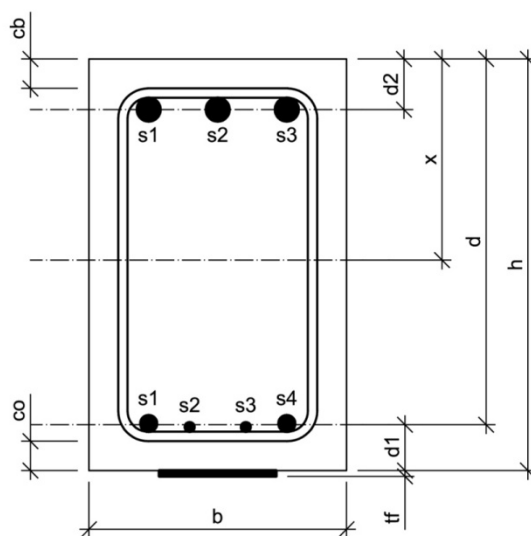
## 5.12 Balk BLA2.9

### 5.12.1 Algemeen

Balk BLA2.9 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening. Aan beide zijden is deze balk bijkomend verankerd met 7 mechanische M10 ankers. Deze ankers hebben een lengte van 140 mm en worden voorgespannen met een moment van 30 N.m. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Om concrete rip-off te vermijden, is de koolstofvezelwapening aan beide zijden op 3 cm van de uiteinden bijkomend verankerd met een mechanisch M12 anker. Deze ankers hebben een lengte van 150 mm en worden voorgespannen met een moment van 50 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA2.9.

<b>Ouderdom</b>	143 dagen	
<b>Lengte</b>	4,193 m	
<b>Breedte</b>	0,223 m	
<b>Hoogte</b>	0,350 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

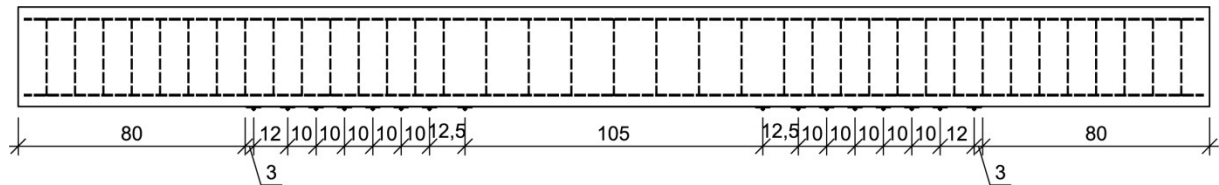
Tabel 147: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.9



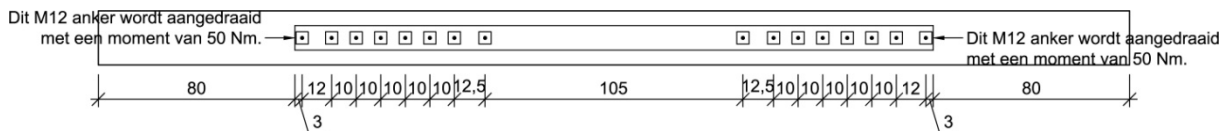
$$h = 350 \text{ mm}$$

$$b = 223 \text{ mm}$$

Figuur 170: Dwarsdoorsnede balk BLA2.9



Grafiek 135: Vooraanzicht verankering balk BLA2.9



Grafiek 136: Onderaanzicht verankering balk BLA2.9

### 5.12.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{c,x}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 27,175 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 32,759 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA2.9 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308mm^2$$

$$A_{s1,\phi8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi 14} = 559,556 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi 8} = 552,660 \frac{N}{mm^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{mm^2}$$

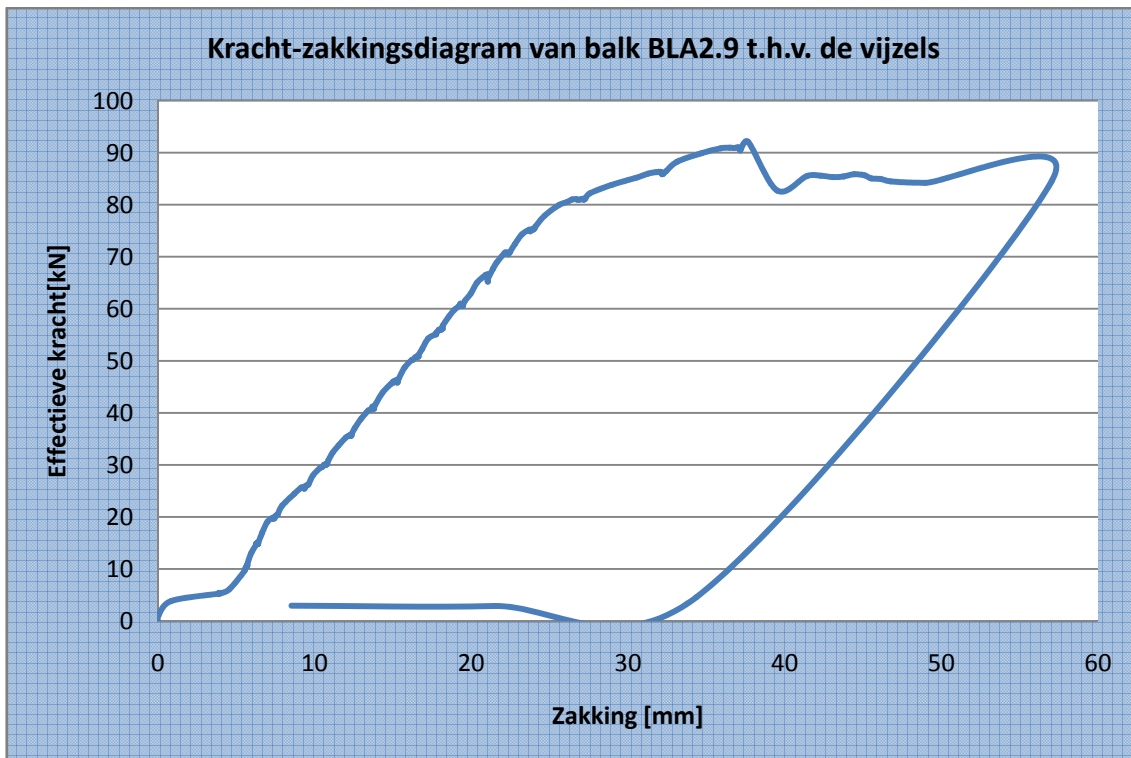
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.12.3 Meetresultaten

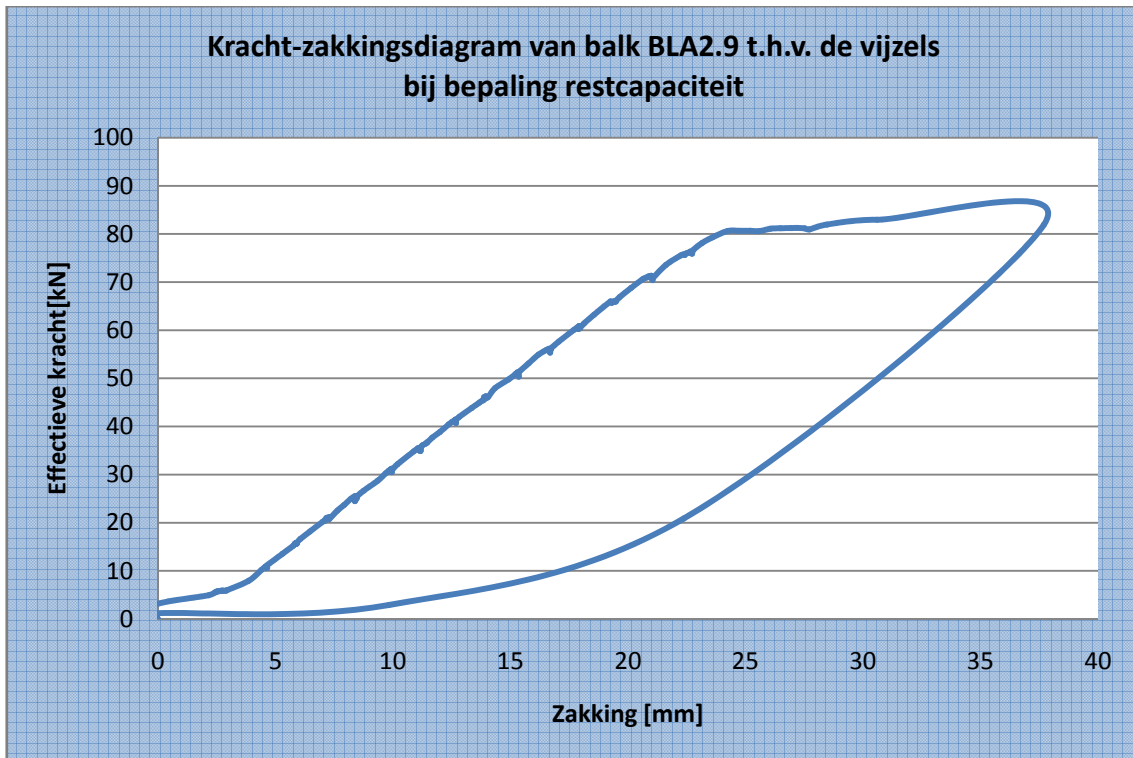
#### 5.12.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

Grafiek 137 toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



Grafiek 137: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.9 t.h.v. de vijzels

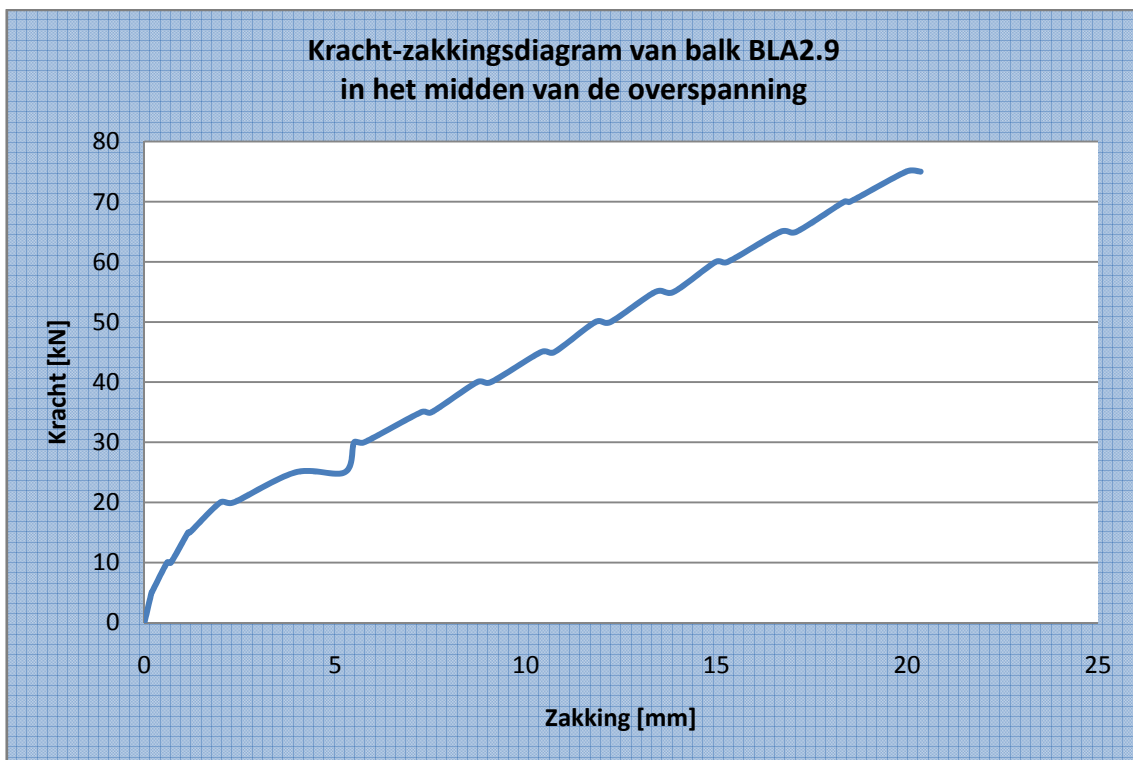
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.



Grafiek 138: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.9 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit

5.12.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

Grafiek 139 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 139: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.9 in het midden van de overspanning

**Tabel 148** toont de cijferwaarden van **Grafiek 139**.

Kracht [kN]	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging [mm]
	meetklok 1 (midden)	meetklok 2 (midden)	meetklok 3 (uiteinde)	meetklok 4 (uiteinde)	midden	uiteinde	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
0	0,00	0,00	n.c	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,16	0,25		0,02	0,21	0,02	0,19
5	0,16	0,26		0,02	0,21	0,02	0,19
10	0,57	0,82		0,10	0,70	0,10	0,60
10	0,68	0,95		0,12	0,82	0,12	0,70
15	1,27	1,60		0,29	1,44	0,29	1,15
15	1,31	1,65		0,29	1,48	0,29	1,19
20	2,32	2,72		0,53	2,52	0,53	1,99
20	2,69	3,11		0,56	2,90	0,56	2,34
25	4,36	4,84		0,64	4,60	0,64	3,96
25	5,67	6,19		0,68	5,93	0,68	5,25
30	5,92	6,44		0,68	6,18	0,68	5,50
30	6,19	6,72		0,69	6,46	0,69	5,77
35	7,68	8,27		0,72	7,98	0,72	7,26
35	7,95	8,55		0,72	8,25	0,72	7,53
40	9,15	9,78		0,74	9,47	0,74	8,73
40	9,51	10,16		0,75	9,84	0,75	9,09
45	10,82	11,52		0,77	11,17	0,77	10,40
45	11,18	11,88		0,78	11,53	0,78	10,75
50	12,25	12,98		0,79	12,62	0,79	11,83
50	12,65	13,39		0,80	13,02	0,80	12,22
55	13,83	14,60		0,82	14,22	0,82	13,40
55	14,31	15,10		0,83	14,71	0,83	13,88
60	15,42	16,24		0,85	15,83	0,85	14,98
60	15,73	16,56		0,85	16,15	0,85	15,30
65	17,12	17,98		0,87	17,55	0,87	16,68
65	17,54	18,41		0,88	17,98	0,88	17,10
70	18,80	19,70		0,90	19,25	0,90	18,35
70	18,95	19,85		0,90	19,40	0,90	18,50
75	20,43	21,36		0,92	20,90	0,92	19,98
75	20,81	21,75		0,93	21,28	0,93	20,35

**Tabel 148: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.9 in het midden van de overspanning****5.12.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250**

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.



$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging  $L/500$  wordt bereikt bij een kracht tussen 30 kN en 35 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging  $L/500$ .

$$F_{y=L/500} = 30kN + 5 \times \frac{7,2mm - 5,50mm}{7,26mm - 5,50mm} = 34,843kN$$

De doorbuiging  $L/250$  wordt bereikt bij een kracht tussen 55 kN en 60 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging  $L/250$ .

$$F_{y=L/250} = 55kN + 5 \times \frac{14,4mm - 13,40mm}{14,98mm - 13,40mm} = 58,170kN$$

#### 5.12.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 92,068kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- buigings- en dwarskrachtenscheuren
- verbrijzeling van het beton in de drukzone
- geen inscheuringen in de koolstofvezelwapening door de ankers

Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

$$F_{rest, \max} = 82,952kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de restcapaciteit werden visueel waargenomen.

- inscheuringen in de koolstofvezelwapening door de ankers
- ankers worden niet uit het beton getrokken

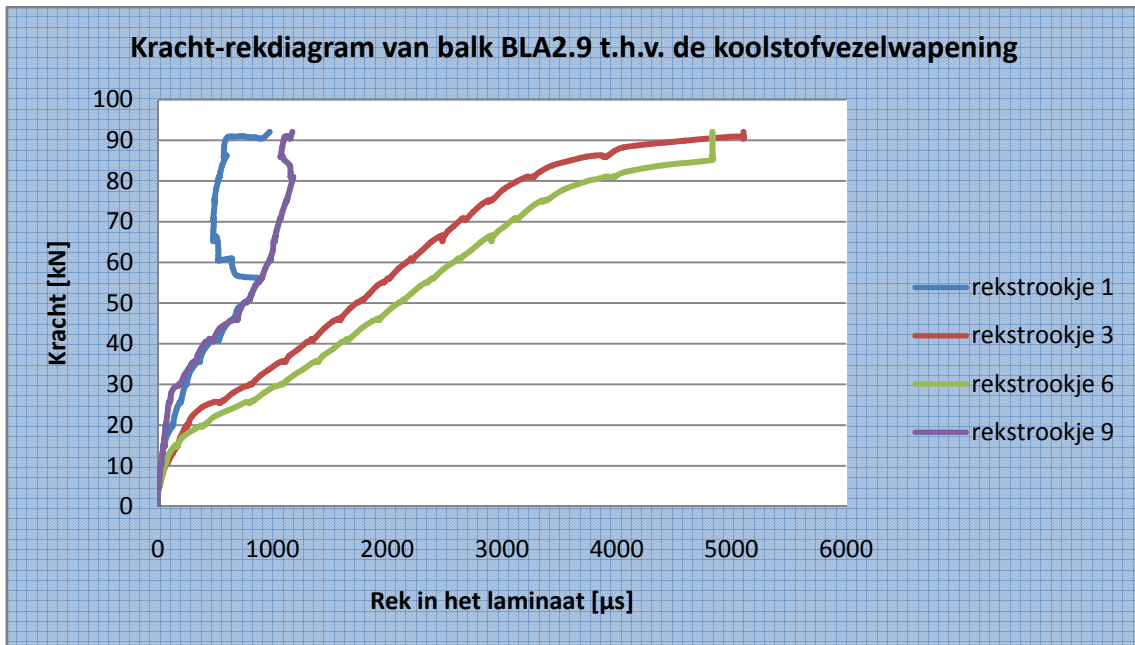
**Figuur 171** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA2.9.



**Figuur 171: Schets scheurvorming BLA2.9**

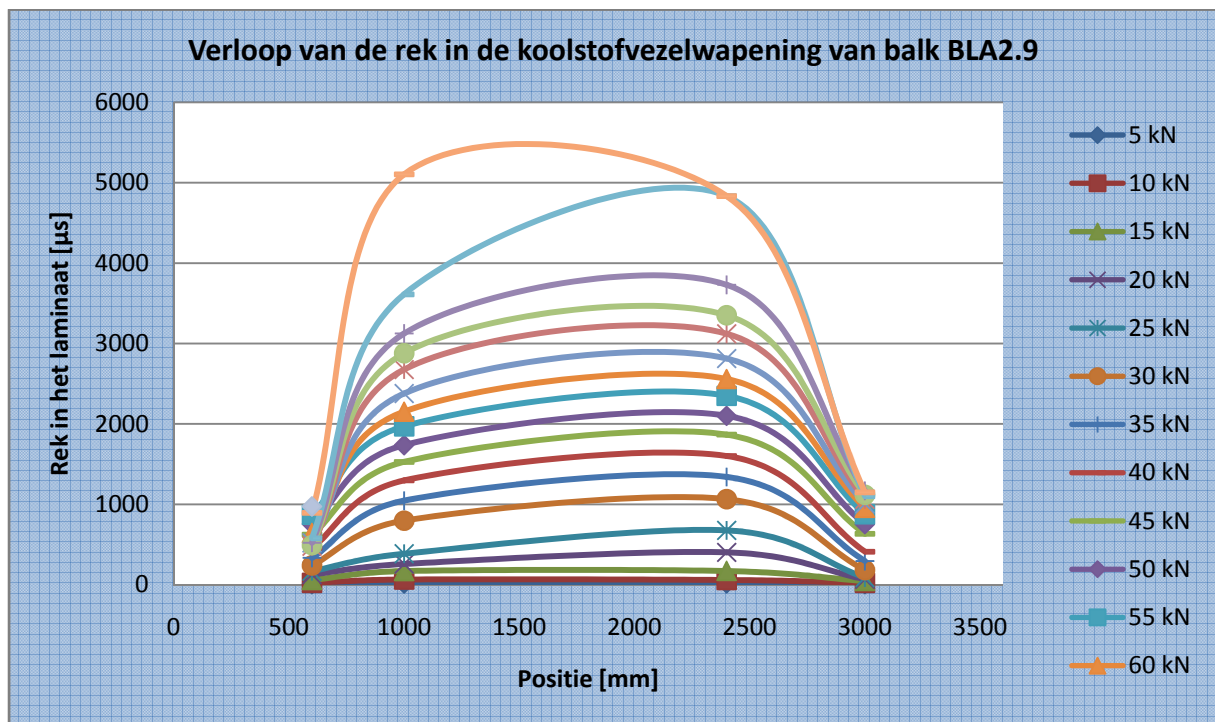
5.12.3.5 *Rek van de koolstofvezelwapening*

**Grafiek 140** toont de rek in de koolstofvezelwapening. Er dient wel opgemerkt te worden dat niet alle rekstrookjes gegevens registreerden tijdens de proef.



**Grafiek 140:** Kracht-rekdiagram van balk BLA2.9 t.h.v. de koolstofvezelwapening

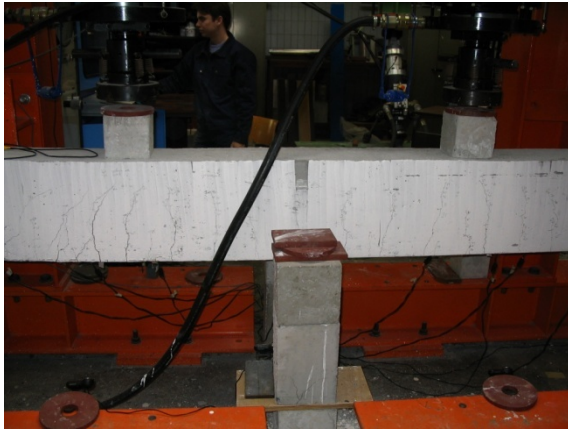
**Grafiek 141** toont het verloop van de rek over de volledige lengte van de balk bij een stijgende belasting.



**Grafiek 141:** Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening van balk BLA2.9

### 5.12.3.6 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BLA2.9.



**Figuur 172: Scheurvorming balk BLA2.9**



**Figuur 173: Ankers worden niet uit het beton getrokken**



**Figuur 174: Inscheuringen in de koolstofvezelwapening**

### 5.12.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

5.12.4.1 Lasten

Tabel 149 vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{max} = 110,5 \text{ kN.m}$
	Maximum kracht	$P_{max} = 92,1 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN.m}$
		$P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN.m}$
		$P = 87,2 \text{ kN}$
Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN.m}$	
	$P_u = 70,0 \text{ kN}$	

Tabel 149: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.9

5.12.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

Tabel 150 vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

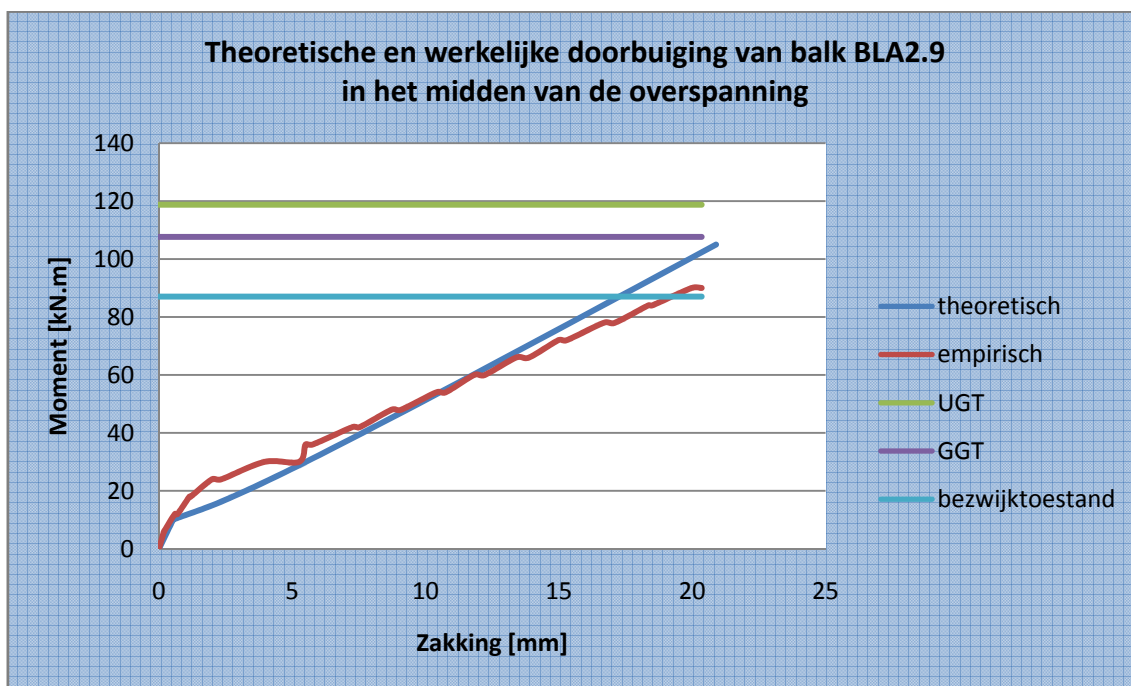
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{max} = 92,1 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 149,0 \text{ kN}$ (beton: 100%)

Tabel 150: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.9

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd . Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

5.12.4.3 Doorbuiging

Grafiek 142 toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

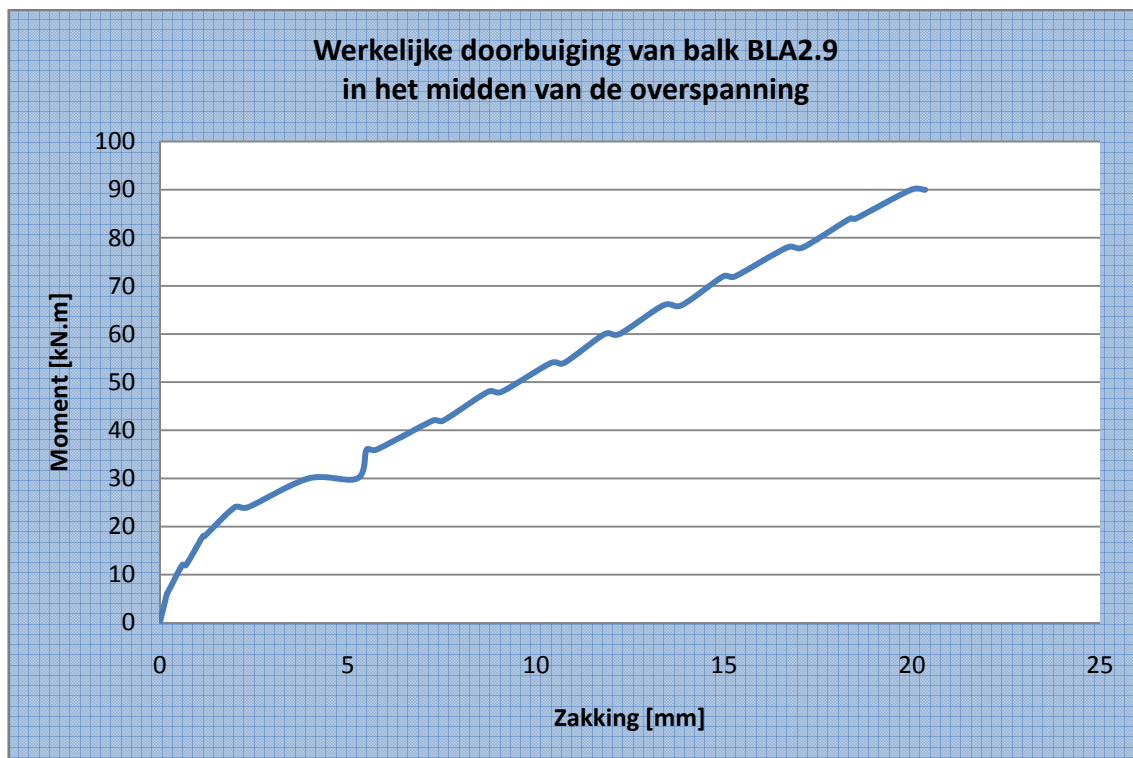


Grafiek 142: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.9 in het midden van de overspanning

In de niet-gescheurde toestand vallen de grafieken aanvankelijk samen. In de gescheurde toestand is de empirisch bepaalde doorbuiging groter dan de theoretisch berekende doorbuiging indien het opgenomen moment groter is dan 54 kN m.

#### 5.12.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 143** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA2.9 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 143** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 18,0 kN m.

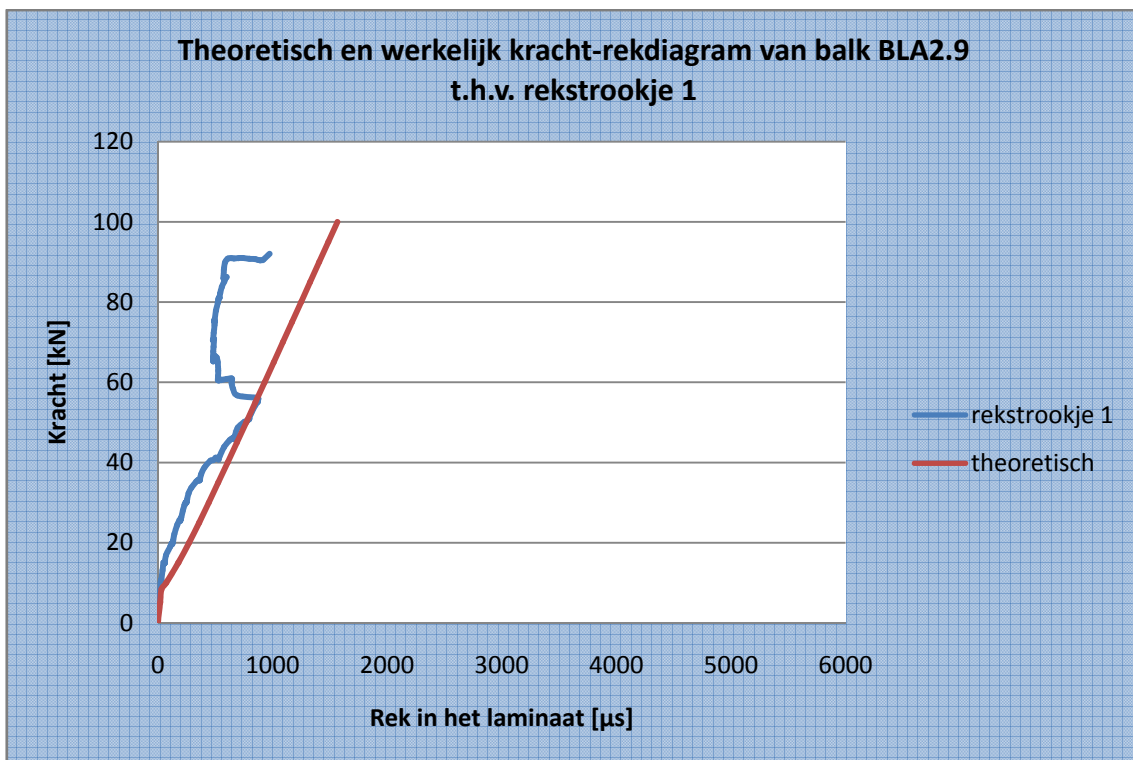


**Grafiek 143: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.9 in het midden van de overspanning**

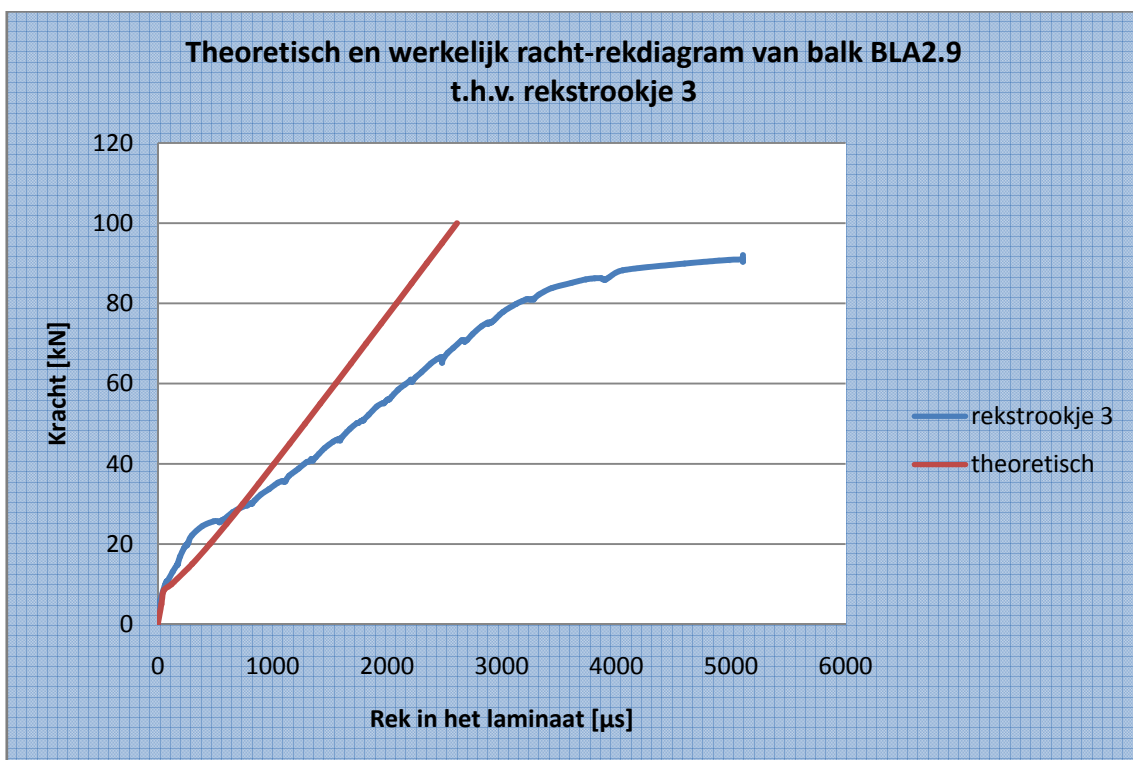
Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 20,0 kN. Dit komt overeen met een moment van 24,0 kN.m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN.m.

5.12.4.5 *Rek van de koolstofvezelwapening*

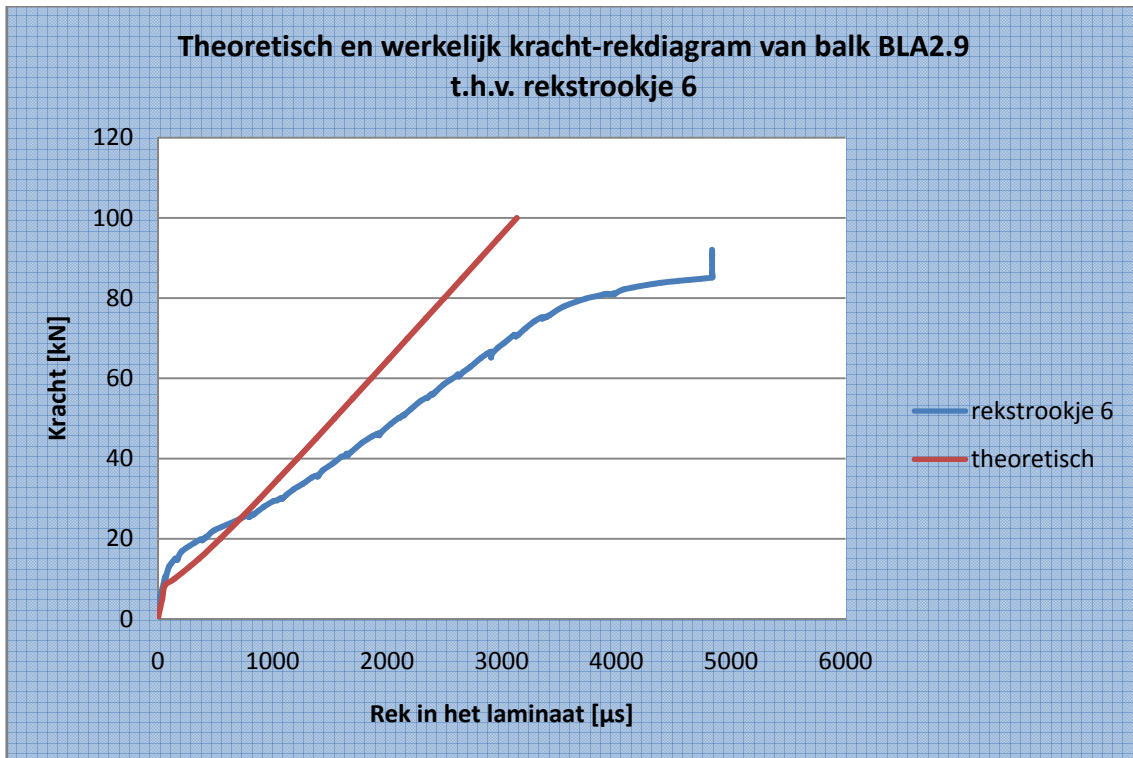
Grafiek 144 tot Grafiek 147 vergelijken de theoretisch berekende rek en de empirisch bepaalde rek met elkaar.



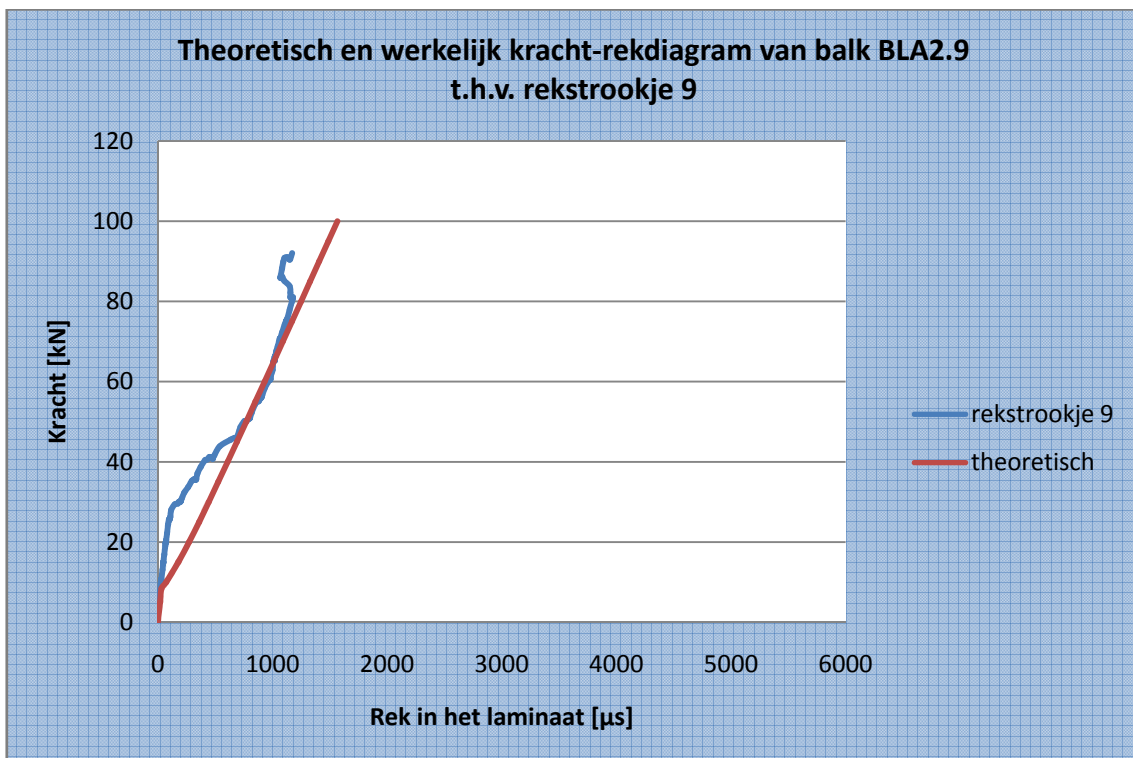
Grafiek 144: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.9 t.h.v. rekstrookje 1



Grafiek 145: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.9 t.h.v. rekstrookje 3



Grafiek 146: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.9 t.h.v. rekstrookje 6



Grafiek 147: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.9 t.h.v. rekstrookje 9

Uit de bovenstaande grafieken blijkt dat de klassieke berekeningsmethode niet voldoet om de rek in de koolstofvezelwapening op alle plaatsen te voorspellen. De rek t.h.v. rekstrookje 1 en rekstrookje 9 voldoen wel aan de theoretisch berekende rek. Verder blijkt de hoofdwapening te vloeien bij een vitzelkracht van 79,9 kN. Dit is af te leiden uit de knik in bovenstaande grafieken. Uit **Grafiek 137** bleek dat de hoofdwapening slechts bij een vitzelkracht van 82,1 kN vloeit. Bijgevolg kan er aangenomen worden dat bij een kracht van 79,9 à 82,1 kN het staal begint te vloeien. Na dit vloeimoment wordt er verondersteld dat de hoofdwapening geen extra last meer kan opnemen. De extra last dient dan bijgevolg door de koolstofvezelwapening opgenomen te worden.

Er kan dus besloten worden dat de hoofdwapening reeds gevloeid heeft vooraleer breuk optrad. Eens het vloeimoment overschreden is, neemt de rek in grote mate toe. De maximale spanning in de koolstofvezelwapening wordt als volgt berekend.

$$\begin{aligned}\sigma &= E \cdot \varepsilon \\ \Leftrightarrow \sigma &= 175000 \times 5104,258 \times 10^{-6} \\ \Leftrightarrow \sigma &= 893,245 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}$$

De maximale spanning in de koolstofvezelwapening bedraagt 893,2 N/mm<sup>2</sup>. Dit is slechts 31,3% van de breukspanning, die 2850 N/mm<sup>2</sup> bedraagt.

#### 5.12.4.6 Breukmechanismen

**Tabel 151** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	51,1 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	43,3 kN m

**Tabel 151: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Indien concrete rip-off buiten beschouwing gelaten wordt, dan is zowel volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 onthechting het bepalende breukmechanisme. Er bestaat wel geen eensgezindheid over de locatie waar de onthechting zich het eerst zou manifesteren. Volgens CUR Aanbeveling 91 zou dit in het midden van de overspanning zijn, terwijl volgens FIB Bulletin 14 dit t.h.v. dwarskrachtenscheuren zou zijn. In werkelijkheid manifesteerde de onthechting zich geleidelijk aan.



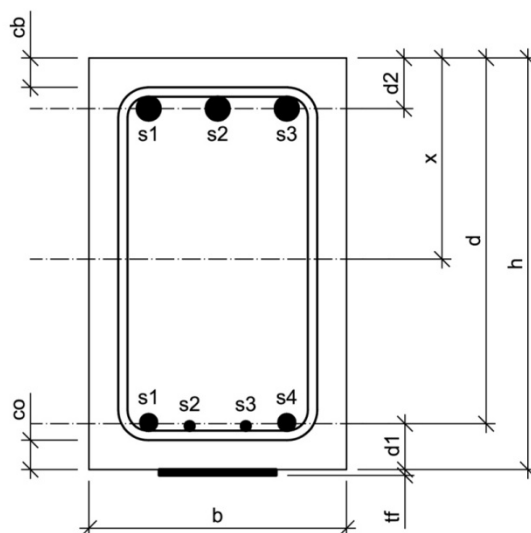
## 5.13 Balk BLA2.10

### 5.13.1 Algemeen

Balk BLA2.10 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening. Aan beide zijden is deze balk bijkomend verankerd met 7 mechanische M12 ankers. Deze ankers hebben een lengte van 150 mm en worden voorgespannen met een moment van 50 N.m. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Om concrete rip-off te vermijden, is de koolstofvezelwapening aan beide zijden op 3 cm van de uiteinden bijkomend verankerd met een mechanisch M12 anker. Deze ankers hebben een lengte van 150 mm en worden voorgespannen met een moment van 50 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA2.10.

<b>Ouderdom</b>	143 dagen	
<b>Lengte</b>	4,199 m	
<b>Breedte</b>	0,220 m	
<b>Hoogte</b>	0,350 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

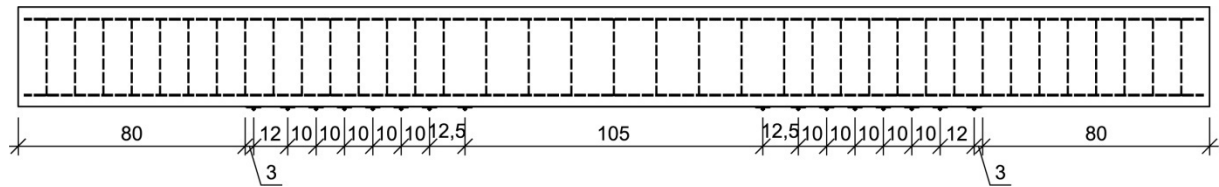
Tabel 152: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.10



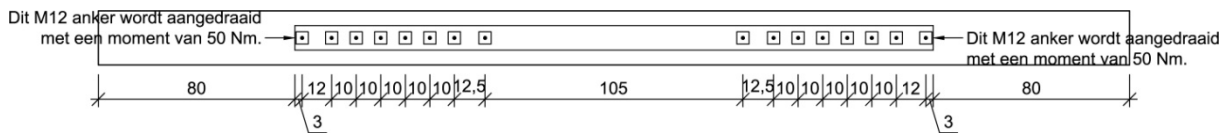
$$h = 350 \text{ mm}$$

$$b = 220 \text{ mm}$$

Figuur 175: Dwarsdoorsnede balk BLA2.10



Figuur 176: Vooraanzicht verankering balk BLA2.10



Figuur 177: Onderaanzicht verankering balk BLA2.10

### 5.13.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{c,x}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 29,044 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 35,011 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA2.10 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi 14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi 8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi 14} = 559,556 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi 8} = 552,660 \frac{N}{mm^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{mm^2}$$

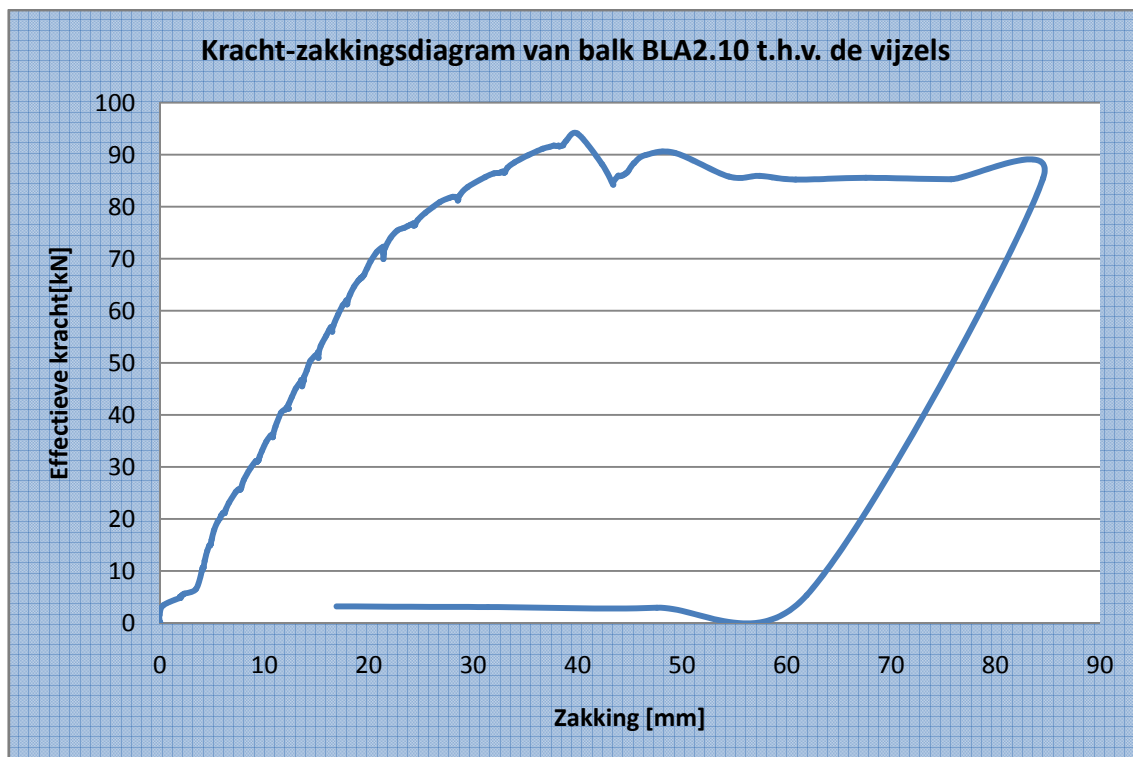
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.13.3 Meetresultaten

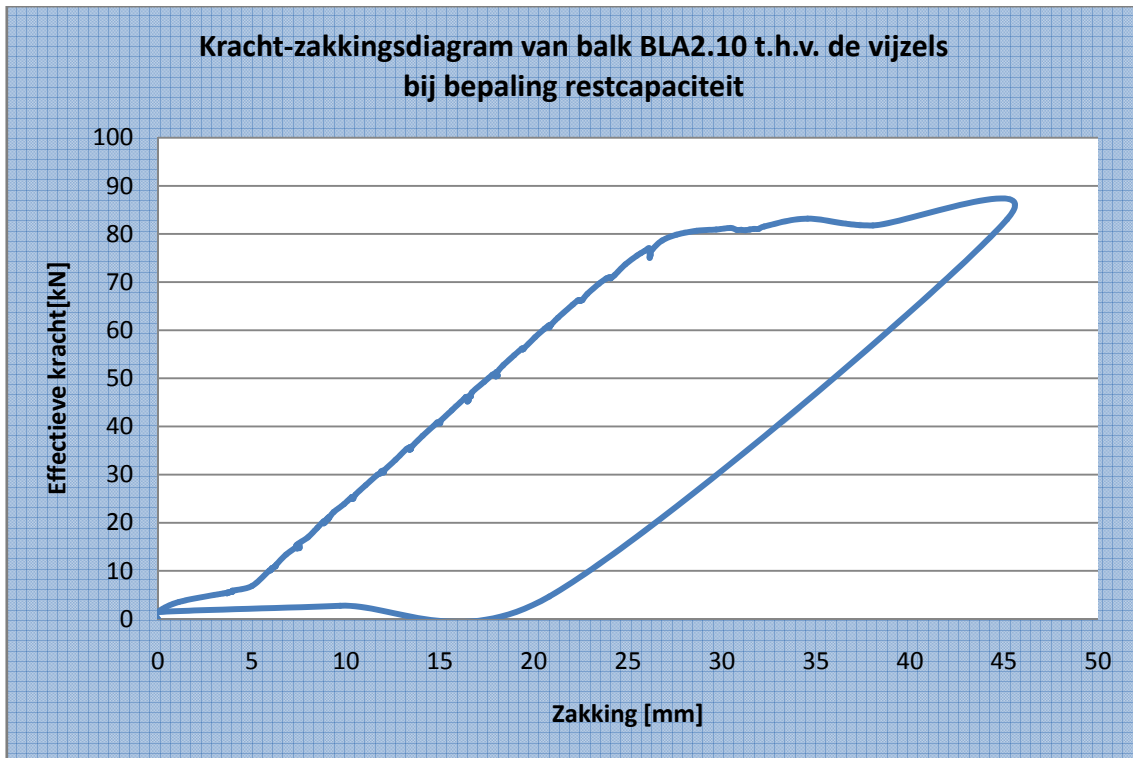
#### 5.13.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

**Grafiek 148** toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



**Grafiek 148: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.10 t.h.v. de vijzels**

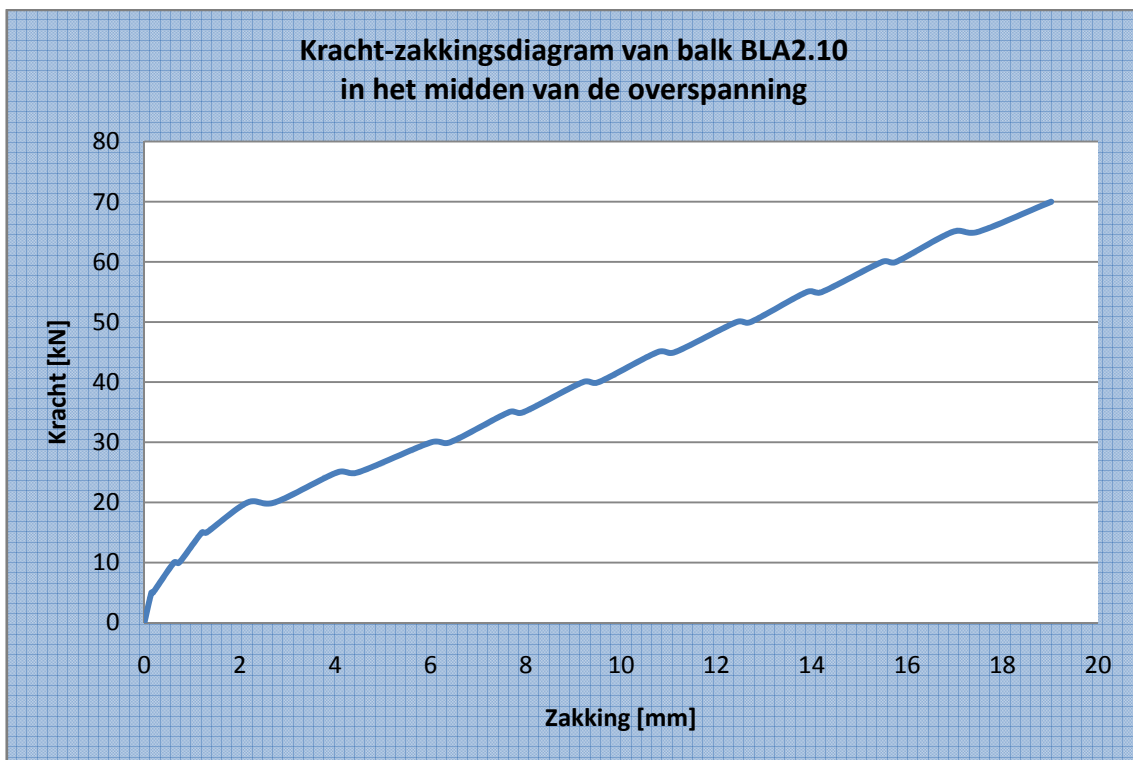
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.



Grafiek 149: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.10 t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit

### 5.13.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

Grafiek 150 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 150: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.10 in het midden van de overspanning

**Tabel 153** toont de cijferwaarden van **Grafiek 150**.

Kracht	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging
	meetklok 1 (midden)	meetklok 2 (midden)	meetklok 3 (uiteinde)	meetklok 4 (uiteinde)	midden	uiteinde	
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	0,00	0,00	n.c	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,14	0,15		0,00	0,15	0,00	0,15
5	0,19	0,19		0,01	0,19	0,01	0,18
10	0,62	0,72		0,05	0,67	0,05	0,62
10	0,72	0,84		0,05	0,78	0,05	0,73
15	1,20	1,37		0,08	1,29	0,08	1,21
15	1,30	1,47		0,08	1,39	0,08	1,31
20	2,15	2,38		0,10	2,27	0,10	2,17
20	2,72	2,97		0,11	2,85	0,11	2,74
25	4,02	4,33		0,13	4,18	0,13	4,05
25	4,46	4,76		0,13	4,61	0,13	4,48
30	6,00	6,33		0,15	6,17	0,15	6,02
30	6,40	6,72		0,15	6,56	0,15	6,41
35	7,64	7,99		0,17	7,82	0,17	7,65
35	7,95	8,28		0,17	8,12	0,17	7,95
40	9,20	9,57		0,19	9,39	0,19	9,20
40	9,55	9,90		0,20	9,73	0,20	9,53
45	10,80	11,15		0,21	10,98	0,21	10,77
45	11,17	11,53		0,22	11,35	0,22	11,13
50	12,47	12,85		0,24	12,66	0,24	12,42
50	12,78	13,13		0,24	12,96	0,24	12,72
55	13,97	14,34		0,26	14,16	0,26	13,90
55	14,30	14,66		0,27	14,48	0,27	14,21
60	15,58	15,95		0,29	15,77	0,29	15,48
60	15,88	16,25		0,30	16,07	0,30	15,77
65	17,08	17,45		0,31	17,27	0,31	16,96
65	17,63	17,98		0,32	17,81	0,32	17,49
70	19,19	19,55		0,35	19,37	0,35	19,02

**Tabel 153: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.10 in het midden van de overspanning****5.13.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250**

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 30 kN en 35 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 30kN + 5 \times \frac{7,2mm - 6,02mm}{7,65mm - 6,02mm} = 33,635kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 55 kN en 60 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 55kN + 5 \times \frac{14,4mm - 13,90mm}{15,48mm - 13,90mm} = 56,598kN$$

#### 5.13.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 94,064kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- buigingsscheuren en dwarskrachtenscheuren
- inscheuringen in de koolstofvezelwapening t.h.v. de 5 meest linkse M12 ankers
- verbrijzeling van het beton in de drukzone
- onthechting enkel t.h.v. het linkeruiteinde

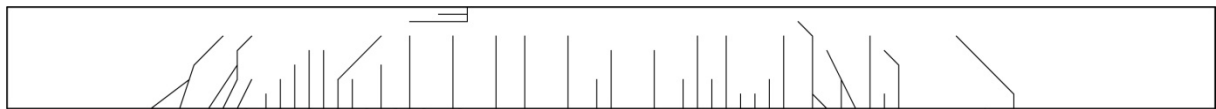
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

$$F_{rest, \max} = 83,038kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de restcapaciteit werden visueel waargenomen.

- inscheuringen t.h.v. de linkerankers
- onthechting van de linkerrand tot de positie van de rechtermijzel

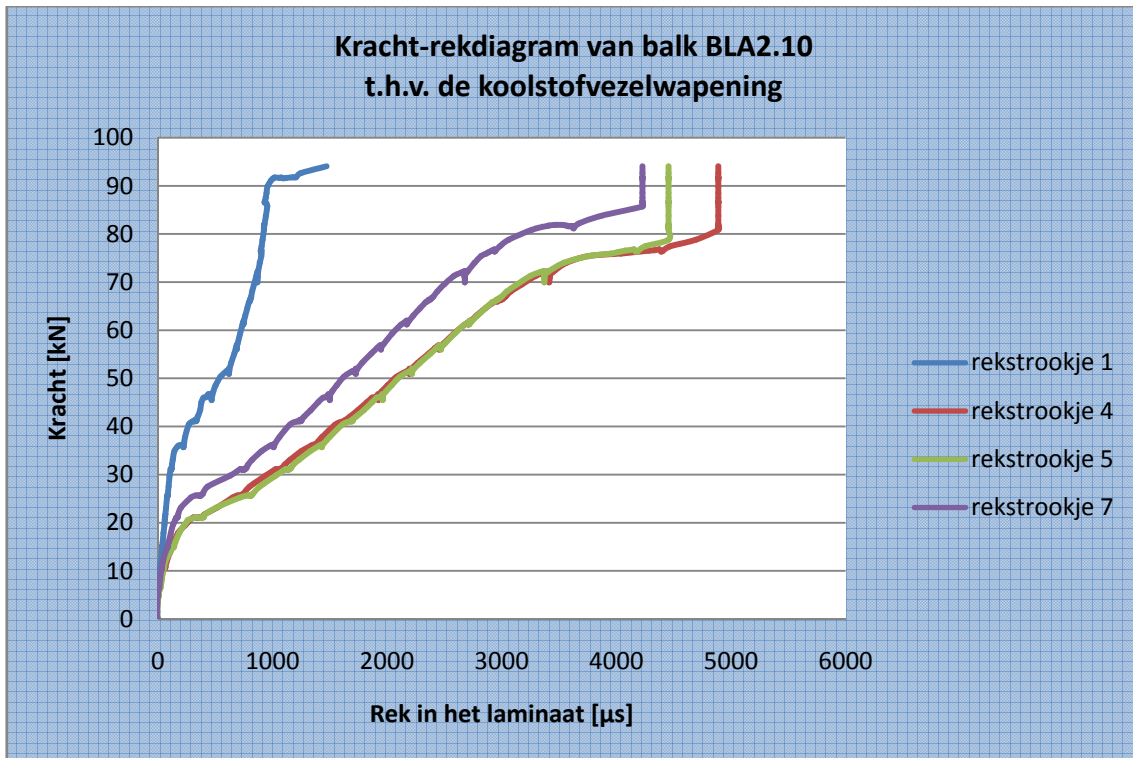
**Figuur 178** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA2.10.



**Figuur 178: Schets scheurvorming balk BLA2.10**

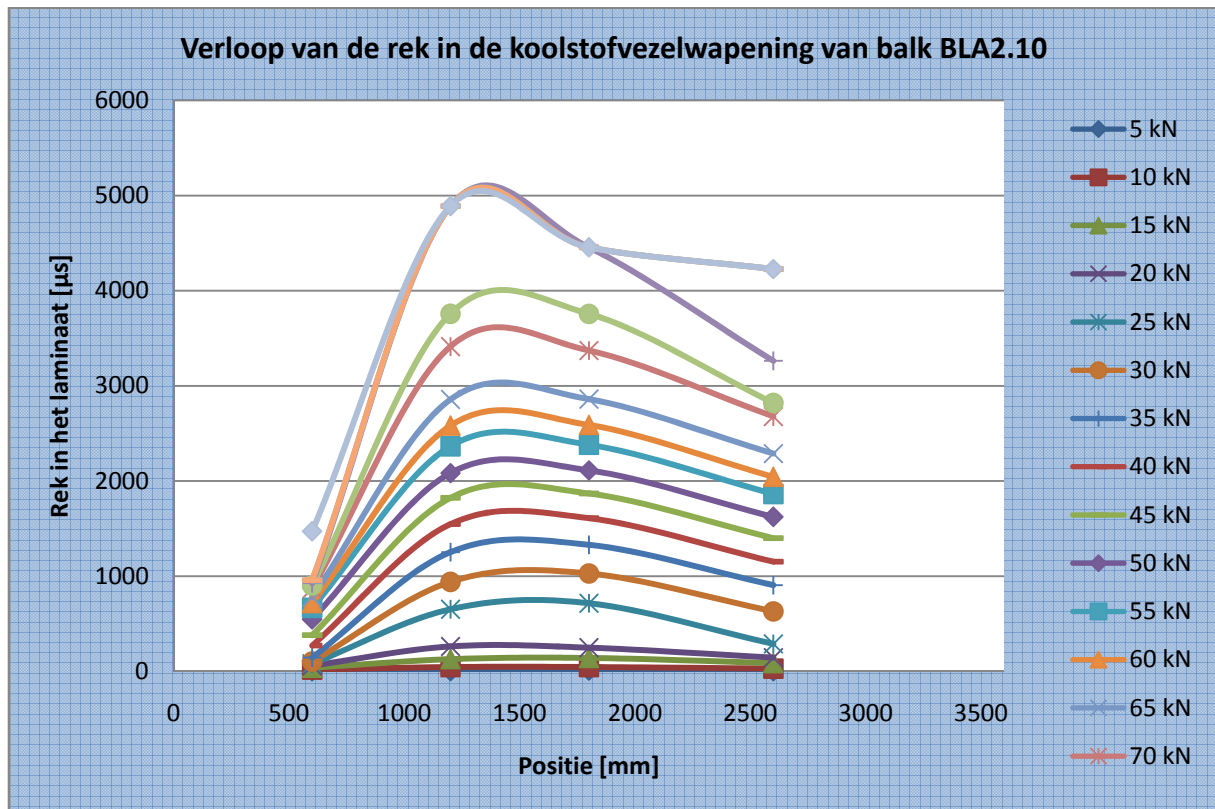
#### 5.13.3.5 Rek van de koolstofvezelwapening

**Grafiek 151** toont de rek in de koolstofvezelwapening. Er dient wel opgemerkt te worden dat niet alle rekstrookjes gegevens registreerden tijdens de proef.



Grafiek 151: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.10 t.h.v. de koolstofvezelwapening

Grafiek 152 toont het verloop van de rek over de volledige lengte van de balk bij een stijgende belasting.



Grafiek 152: Verloop van de rek in de koolstofvezelwapening van balk BLA2.10

### 5.13.3.6 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BLA2.10.



**Figuur 179: Scheurvorming balk BLA2.10**



**Figuur 180: Verbrijzeling van het beton in de drukzone**



**Figuur 181: Inscheuringen in de koolstofvezelwapening**



**Figuur 182: Inscheuringen na de herbelasting**



### 5.13.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

#### 5.13.4.1 Lasten

**Tabel 154** vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 112,9 \text{ kN.m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 94,1 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN.m}$ $P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN.m}$ $P = 87,2 \text{ kN}$
	Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN.m}$
		$P_u = 70,0 \text{ kN}$

**Tabel 154: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.10**

#### 5.13.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 155** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

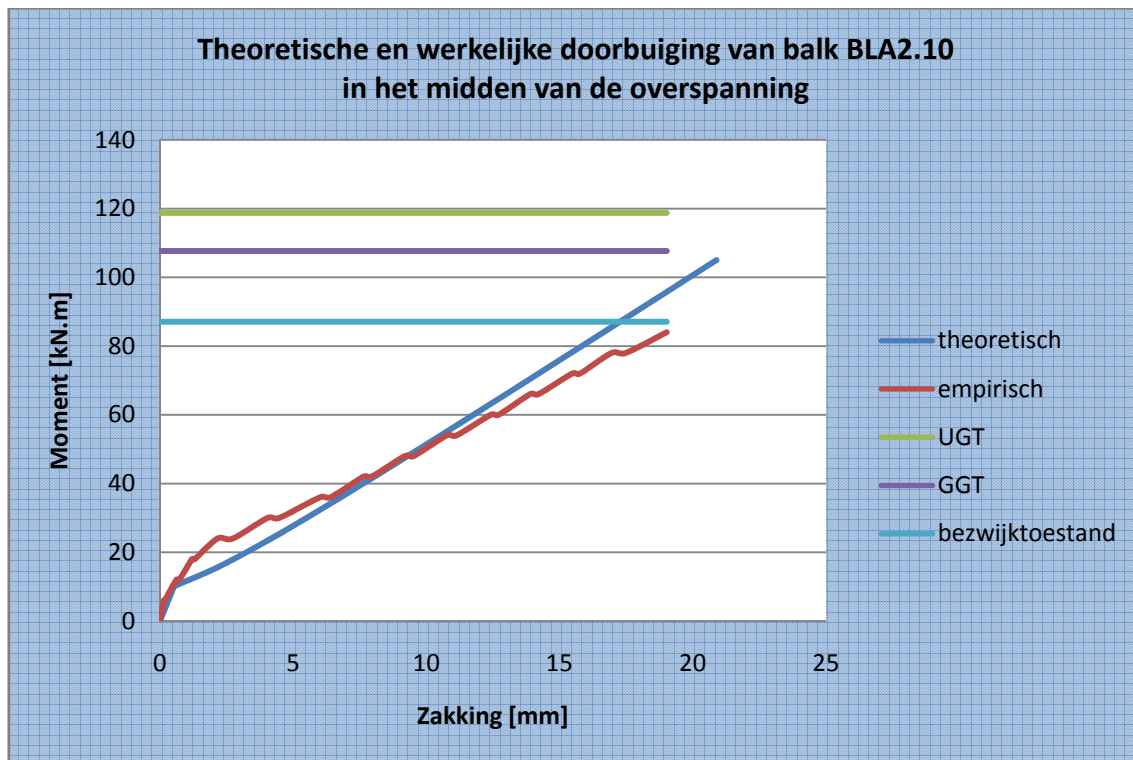
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{\max} = 94,1 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 149,0 \text{ kN}$ (beton: 100%)

**Tabel 155: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.10**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

### 5.13.4.3 Doorbuiging

Grafiek 153 toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

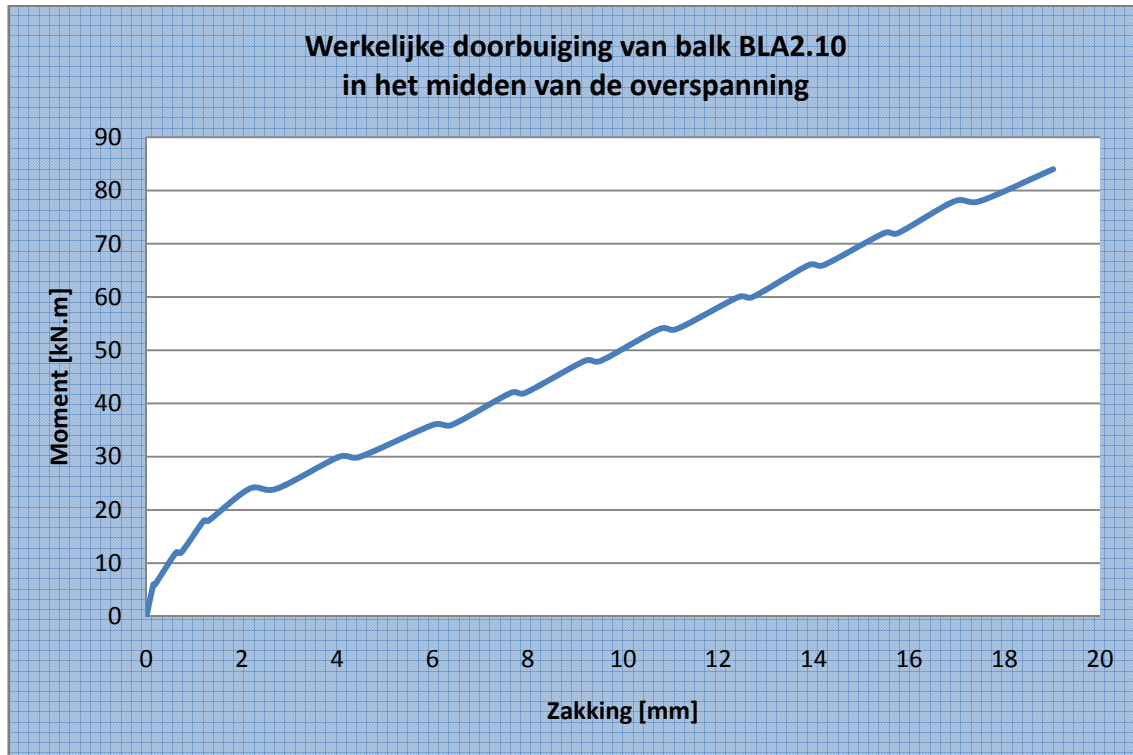


Grafiek 153: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.10 in het midden van de overspanning

In de niet-gescheurde toestand vallen beide grafieken aanvankelijk samen. In de gescheurde toestand is de empirisch bepaalde doorbuiging kleiner dan de theoretisch berekende doorbuiging indien het opgenomen moment kleiner is dan 48 kN m.

#### 5.13.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 154** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA2.10 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 154** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 18,0 kN m.

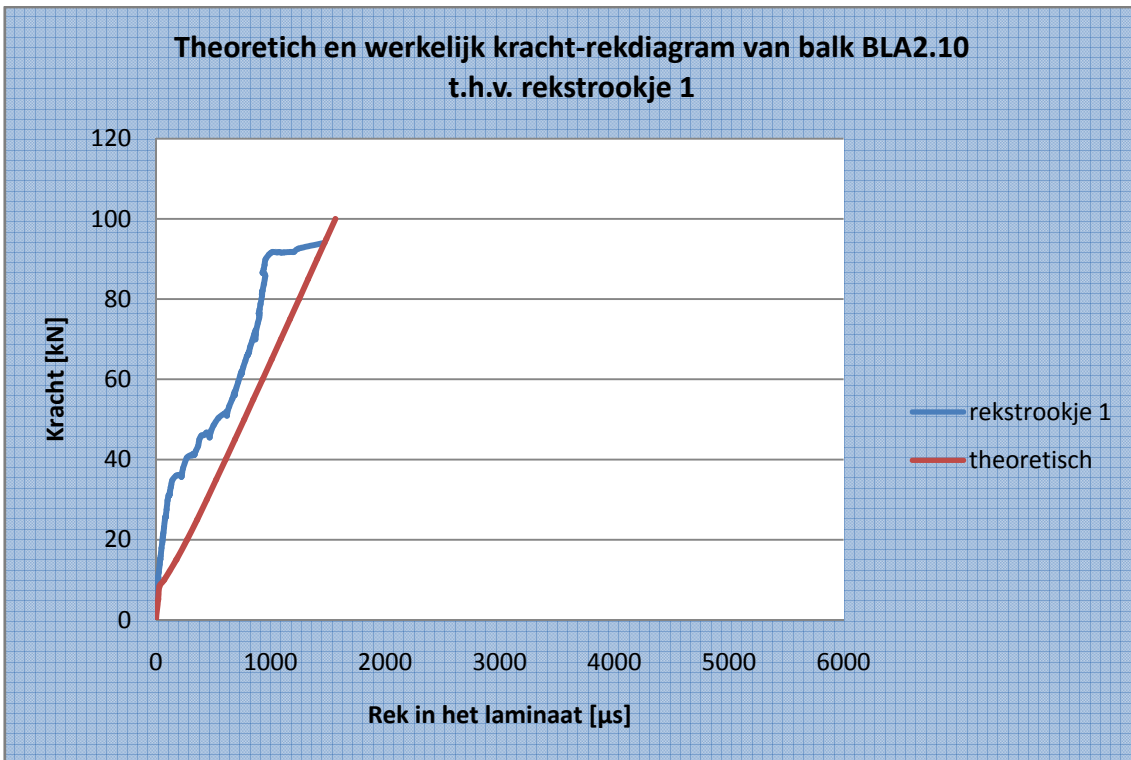


**Grafiek 154: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.10 in het midden van de overspanning**

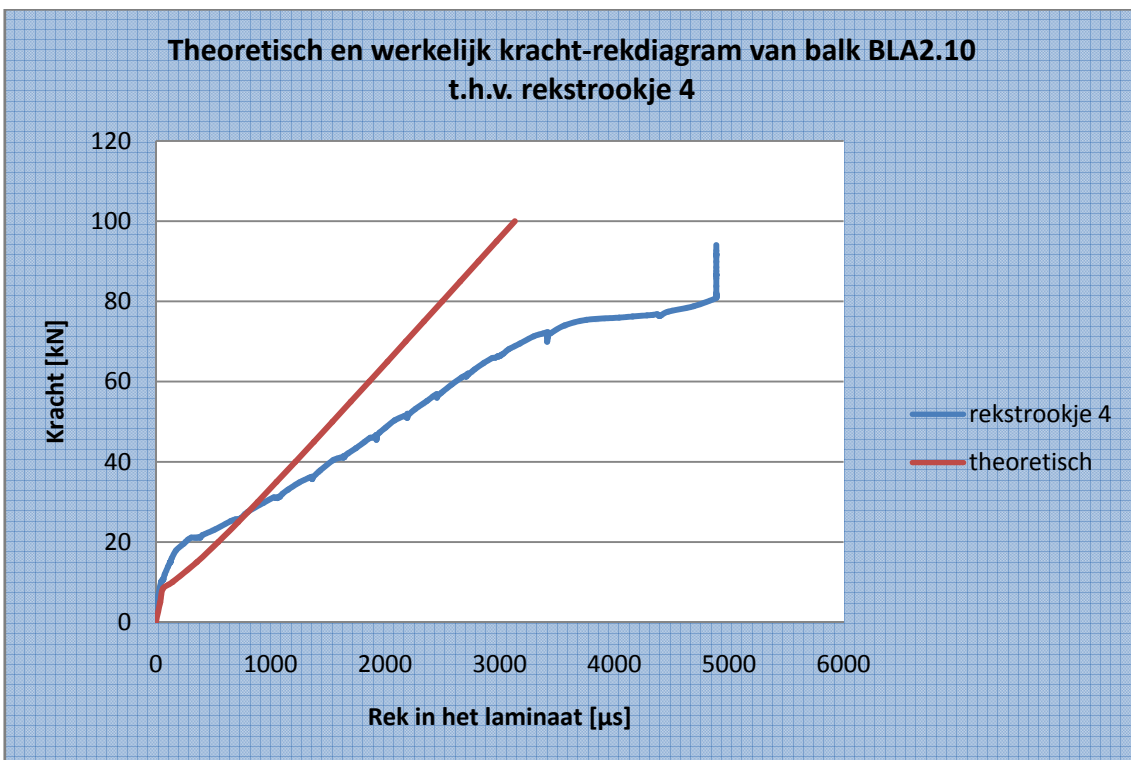
Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 15,0 kN. Dit komt overeen met een moment van 18,0 kN.m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN.m.

5.13.4.5 *Rek van de koolstofvezelwapening*

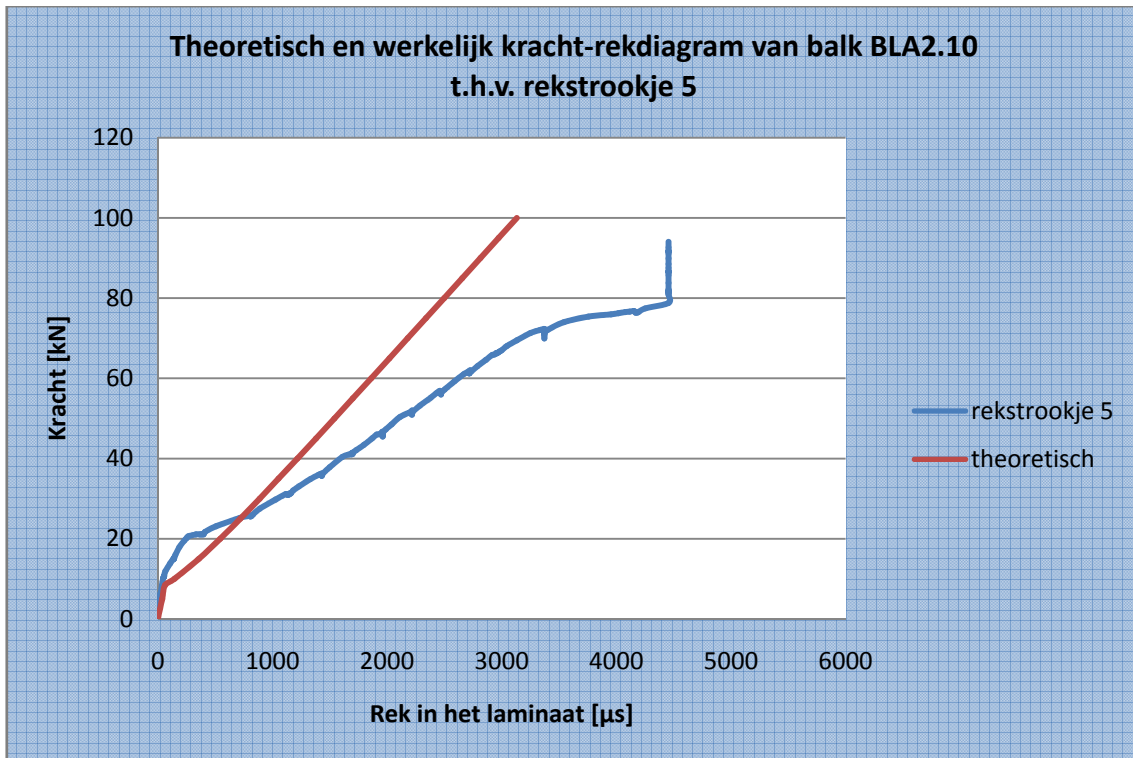
**Grafiek 155** tot **Grafiek 158** vergelijken de theoretisch berekende rek en de empirisch bepaalde rek met elkaar.



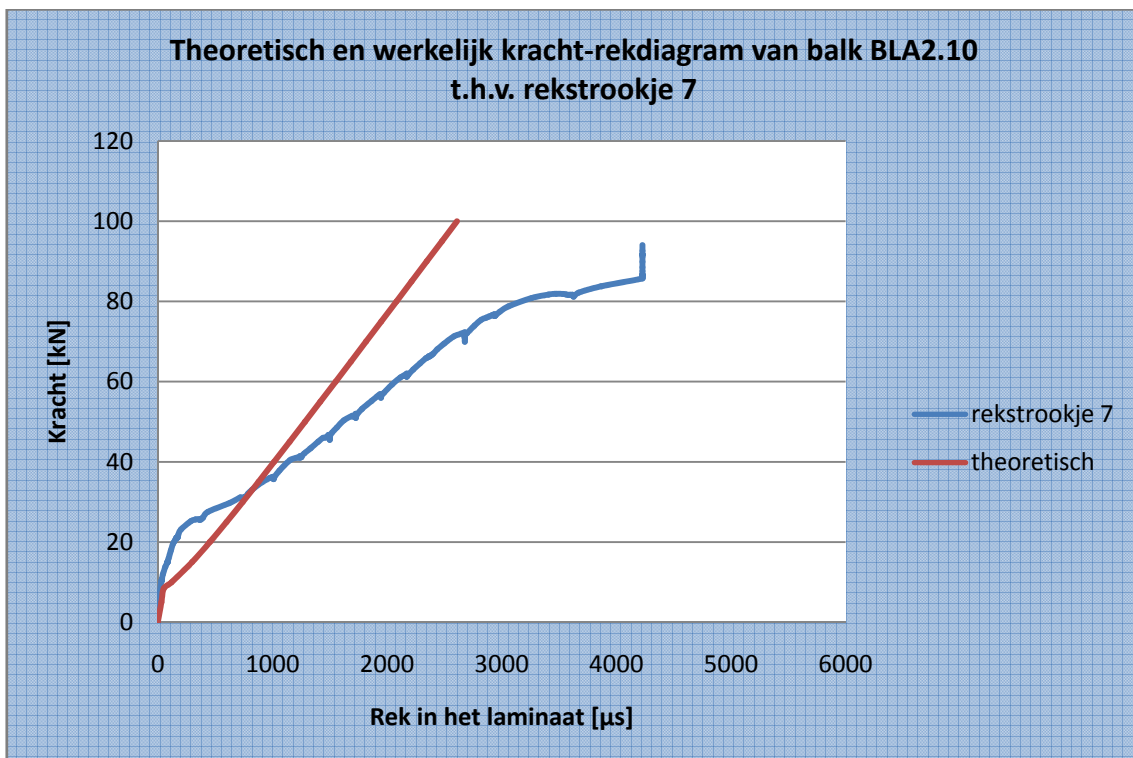
Grafiek 155: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.10 t.h.v. rekstrookje 1



Grafiek 156: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.10 t.h.v. rekstrookje 4



Grafiek 157: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.10 t.h.v. rekstrookje 5



Grafiek 158: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.10 t.h.v. rekstrookje 7

Uit de bovenstaande grafieken blijkt dat de klassieke berekeningsmethode niet voldoet om de rek in de koolstofvezelwapening te voorspellen. Enkel de rek t.h.v. rekstrookje 1 voldoet aan de theoretisch berekende rek. Verder blijkt de hoofdwapening te vloeien bij een vitzelkracht van 72,3 kN. Dit is af te leiden uit de knik in bovenstaande grafieken. Uit **Grafiek 148** bleek dat de hoofdwapening slechts begint te vloeien vanaf een vitzelkracht gelijk aan 74,0 kN. Bijgevolg kan er aangenomen worden dat bij een kracht van 72,3 à 740 kN het staal begint te vloeien. Na dit vloeimoment wordt er verondersteld dat de hoofdwapening geen extra last meer kan opnemen. De extra last dient dan bijgevolg door de koolstofvezelwapening opgenomen te worden.

Er kan dus besloten worden dat de hoofdwapening reeds gevloeid heeft vooraleer breuk optrad. Eens het vloeimoment overschreden is, neemt de rek in grote mate toe. De maximale spanning in de koolstofvezelwapening wordt als volgt berekend.

$$\begin{aligned}\sigma &= E \cdot \varepsilon \\ \Leftrightarrow \sigma &= 175000 \times 4889,394 \times 10^{-6} \\ \Leftrightarrow \sigma &= 855,644 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}$$

De maximale spanning in de koolstofvezelwapening bedraagt 855,6 N/mm<sup>2</sup>. Dit is slechts 30,0% van de breukspanning, die 2850 N/mm<sup>2</sup> bedraagt.

#### 5.13.4.6 Breukmechanismen

**Tabel 156** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	51,1 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	43,3 kN m

**Tabel 156: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Indien concrete rip-off buiten beschouwing gelaten wordt, dan is zowel volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 onthechting het bepalende breukmechanisme. Er bestaat wel geen eensgezindheid over de locatie waar de onthechting zich het eerst zou manifesteren. Volgens CUR Aanbeveling 91 zou dit in het midden van de overspanning zijn, terwijl volgens FIB Bulletin 14 dit t.h.v. dwarskrachtenscheuren zou zijn.

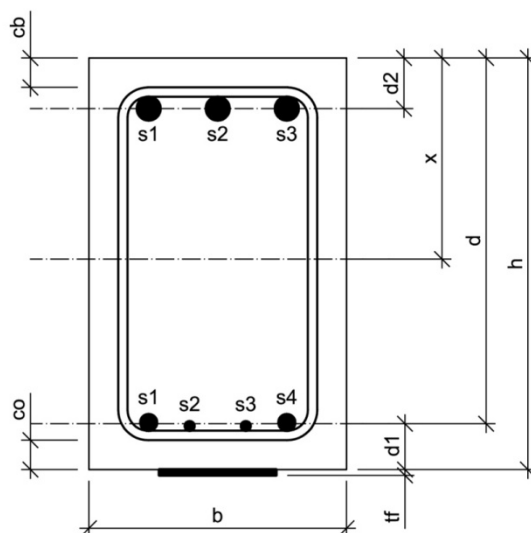
## 5.14 Balk BLA2.11

### 5.14.1 Algemeen

Balk BLA2.11 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening. De koolstofvezelwapening wordt bijkomend vernageld met 5 nagels per beugelpas. De nagels hebben een sectie van 1 à 2 mm<sup>2</sup> en een lengte van 30 à 35 mm. De gebruikte rondellen hebben een buitendiameter van 30 mm en een dikte van 1 mm. Om concrete rip-off te vermijden, is de koolstofvezelwapening aan beide zijden op 3 cm van de uiteinden bijkomend verankerd met een mechanisch M12 anker. Deze ankers hebben een lengte van 150 mm en worden voorgespannen met een moment van 50 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA2.11.

<b>Ouderdom</b>	146 dagen	
<b>Lengte</b>	4,201 m	
<b>Breedte</b>	0,219 m	
<b>Hoogte</b>	0,351 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

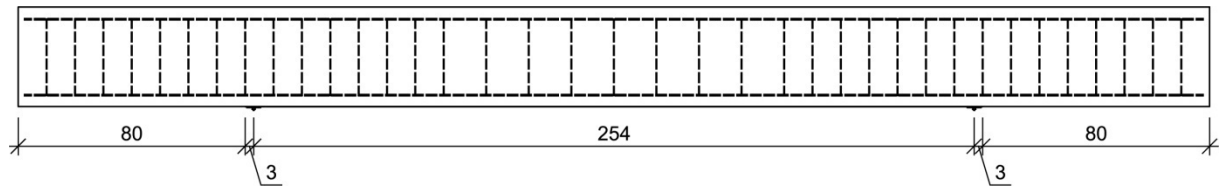
Tabel 157: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.11



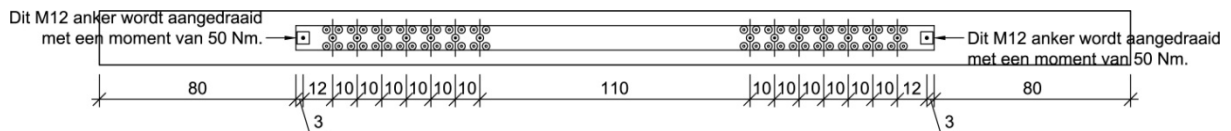
$$h = 351 \text{ mm}$$

$$b = 219 \text{ mm}$$

Figuur 183: Dwarsdoorsnede balk BLA2.11



Figuur 184: Vooraanzicht verankering balk BLA2.11



Figuur 185: Onderaanzicht verankering balk BLA2.11

Er dient wel opgemerkt te worden dat door de vernageling reeds in bepaalde zones onthechting was opgetreden. Blijkbaar kan de epoxylijm de slagen die bij het vernagelen vrij komen, niet weerstaan.

#### 5.14.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{c,x}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 22,917 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 27,626 \frac{N}{mm^2}$$



De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA2.12 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 \text{ mm}^2$$

$$A_{s1,\phi8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 \text{ mm}^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi14} = 559,556 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{v,\phi8} = 552,660 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

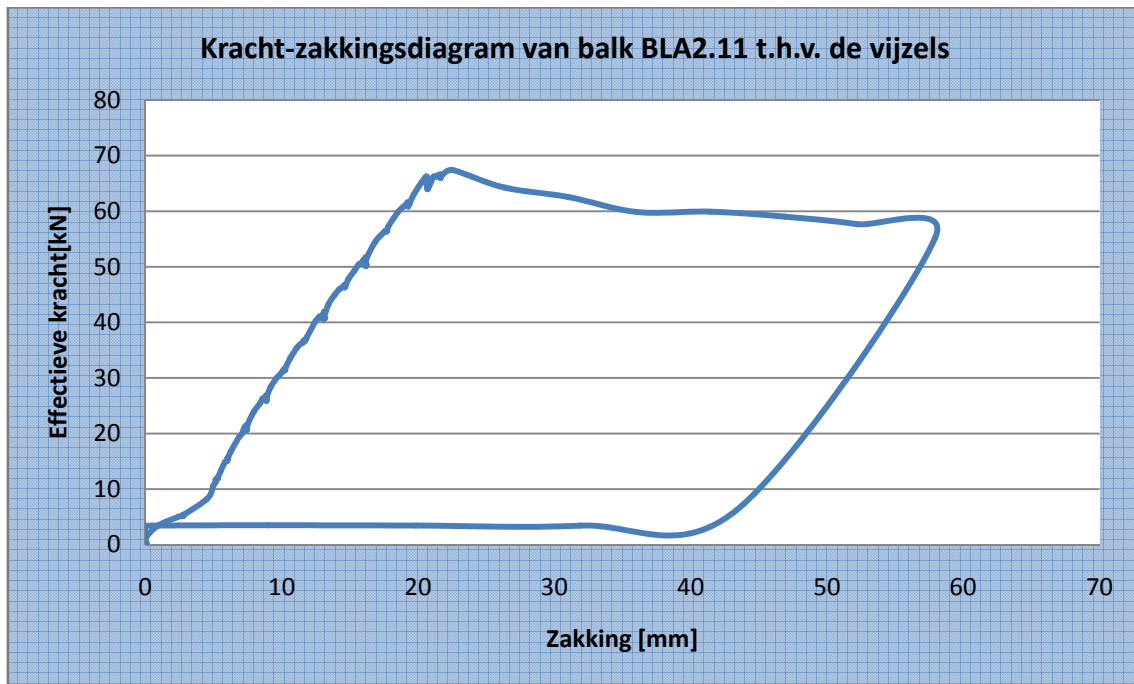
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

### 5.14.3 Meetresultaten

#### 5.14.3.1 Zakking t.h.v. de vizels

Grafiek 159 toont de zakking van de vizels in functie van de belasting.

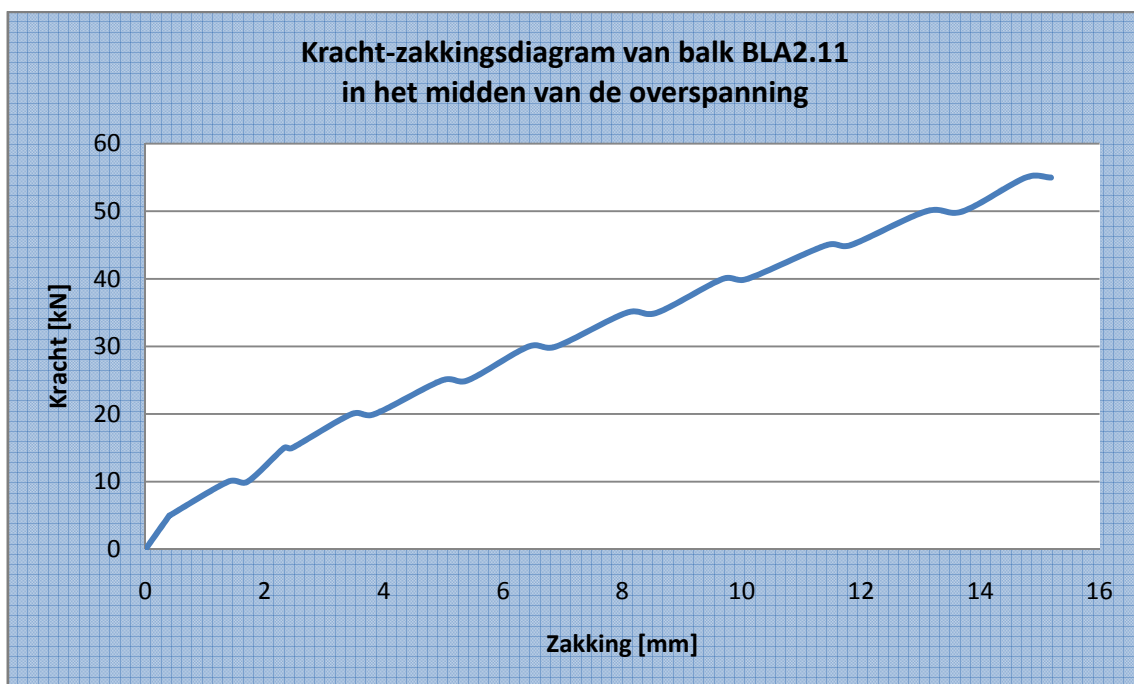


Grafiek 159: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.11 t.h.v. de vizels

#### 5.14.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

Grafiek 160 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting.

Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 160: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.11 in het midden van de overspanning

**Tabel 158** toont de cijferwaarden van **Grafiek 160**.

Kracht	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging
	meetklok 1 (midden)	meetklok 2 (midden)	meetklok 3 (uiteinde)	meetklok 4 (uiteinde)	midden	uiteinde	
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	0,00	0,00	n.c	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,38	0,44		0,01	0,41	0,01	0,40
5	0,38	0,45		0,01	0,42	0,01	0,41
10	1,36	1,53		0,06	1,45	0,06	1,39
10	1,70	1,88		0,08	1,79	0,08	1,71
15	2,33	2,54		0,11	2,44	0,11	2,33
15	2,46	2,68		0,11	2,57	0,11	2,46
20	3,47	3,74		0,15	3,61	0,15	3,46
20	3,86	4,14		0,16	4,00	0,16	3,84
25	5,00	5,31		0,18	5,16	0,18	4,98
25	5,45	5,74		0,19	5,60	0,19	5,41
30	6,46	6,79		0,20	6,63	0,20	6,43
30	6,93	7,26		0,21	7,10	0,21	6,89
35	8,09	8,49		0,22	8,29	0,22	8,07
35	8,61	9,00		0,23	8,81	0,23	8,58
40	9,70	10,14		0,24	9,92	0,24	9,68
40	10,11	10,55		0,24	10,33	0,24	10,09
45	11,43	11,93		0,26	11,68	0,26	11,42
45	11,85	12,34		0,27	12,10	0,27	11,83
50	13,11	13,63		0,28	13,37	0,28	13,09
50	13,73	14,26		0,29	14,00	0,29	13,71
55	14,79	15,33		0,30	15,06	0,30	14,76
55	15,22	15,75		0,30	15,49	0,30	15,19

**Tabel 158: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.11 in het midden van de overspanning**

### 5.14.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 30 kN en 35 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 30kN + 5 \times \frac{7,2mm - 6,43mm}{8,07mm - 6,43mm} = 32,356kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 50 kN en 55 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 50kN + 5 \times \frac{14,4mm - 13,09mm}{14,76mm - 13,09mm} = 53,922kN$$

### 5.14.3.4 Breukkracht

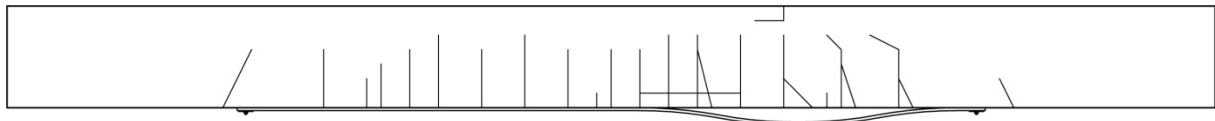
De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 67,395kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- buigingsscheuren en dwarskrachtenscheuren
- verbrijzeling van het beton in de drukzone
- onthechting t.h.v. een verzwakte laag

**Figuur 186** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA2.11.



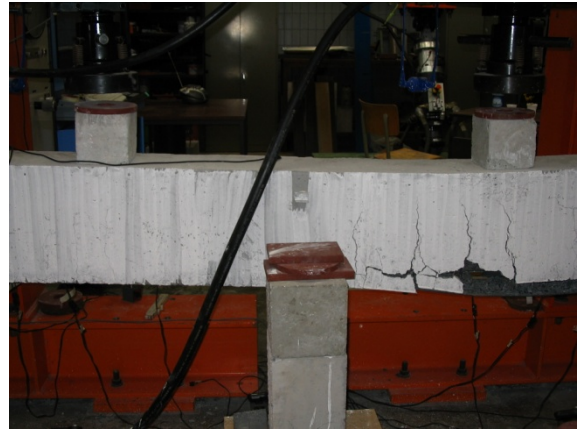
**Figuur 186: Schets scheurvorming van balk BLA2.11**

### 5.14.3.5 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BLA2.11.



Figuur 187: Onthechting door vernageling



Figuur 188: Scheurvorming balk BLA2.11



Figuur 189: Onthechting t.h.v. een verzwakte laag [1]



Figuur 190: Uitgetrokken ankers



Figuur 191: Onthechting t.h.v. een verzwakte laag [2]



Figuur 192: Onthechting t.h.v. een verzwakte laag [3]

#### 5.14.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

##### 5.14.4.1 Lasten

**Tabel 159** vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 80,9 \text{ kN.m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 67,4 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN.m}$
		$P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN.m}$
		$P = 87,2 \text{ kN}$
Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN.m}$	
	$P_u = 70,0 \text{ kN}$	

**Tabel 159: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.11**

##### 5.14.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 160** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

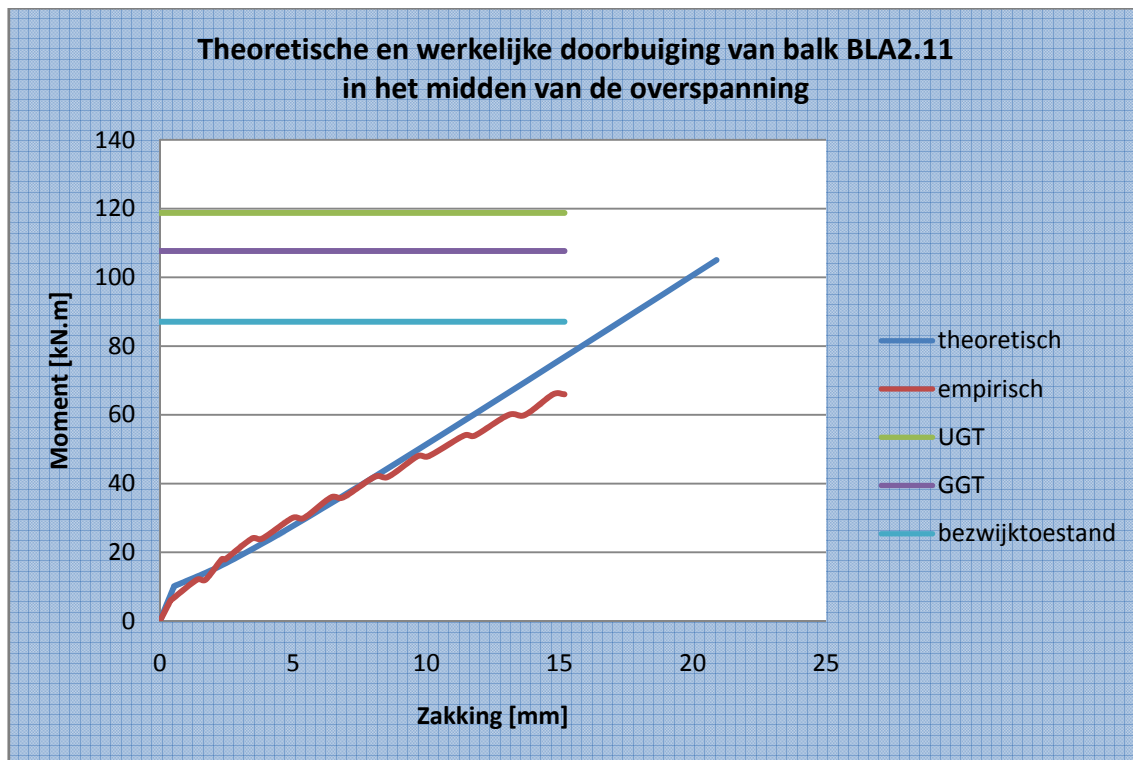
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{\max} = 67,4 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 149,0 \text{ kN}$ (beton: 100%)

**Tabel 160: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.11**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

### 5.14.4.3 Doorbuiging

**Grafiek 161** toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

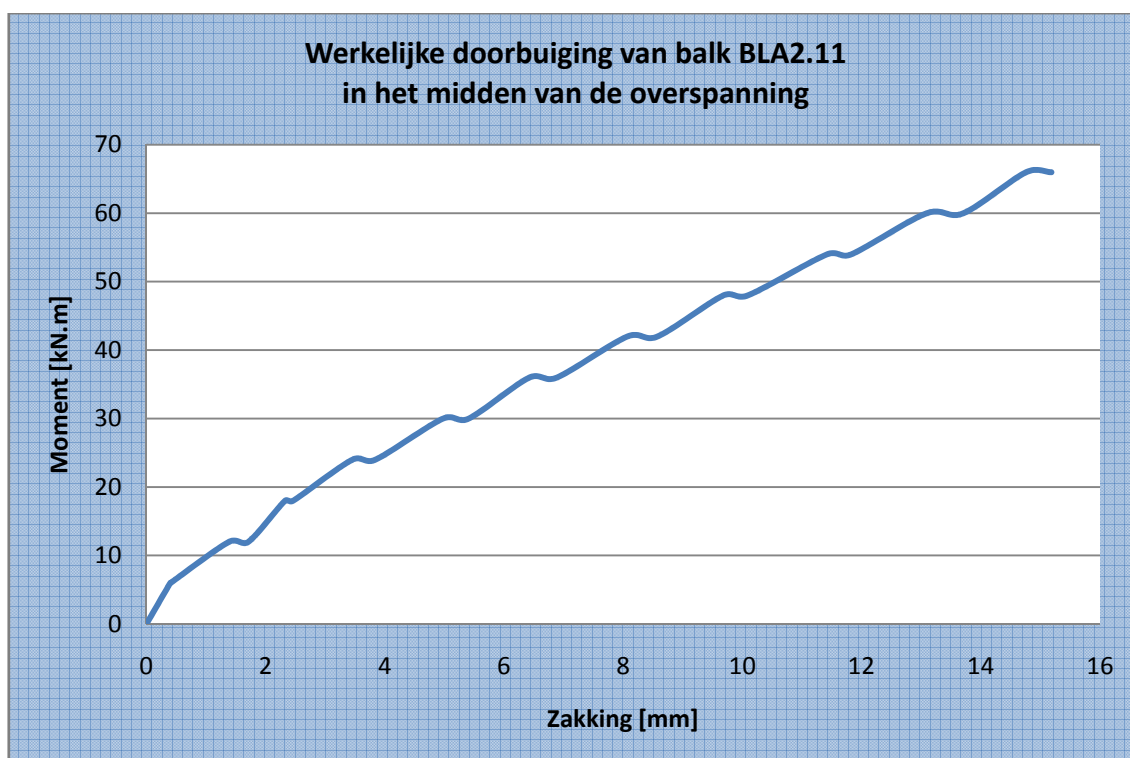


**Grafiek 161:** Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.11 in het midden van de overspanning

In het begin schommelt de empirisch bepaalde doorbuiging constant langs de theoretisch berekende doorbuiging. Indien het opgenomen moment groter is dan 42 kN m, dan is de werkelijke doorbuiging groter dan de theoretisch berekende doorbuiging.

### 5.14.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 162** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA2.11 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 162** blijkt dat het initieel scheurmoment gelijk is aan 6,0 kN m.



**Grafiek 162: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.11 in het midden van de overspanning**

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 20,0 kN. Dit komt overeen met een moment van 24,0 kN.m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN.m.

#### 5.14.4.5 Breukmechanismen

**Tabel 161** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	51,1 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	42,0 kN m

**Tabel 161: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Indien concrete rip-off buiten beschouwing gelaten wordt, dan is zowel volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 onthechting het bepalende breukmechanisme. Er bestaat wel geen eensgezindheid over de locatie waar de onthechting zich het eerst zou manifesteren. Volgens CUR Aanbeveling 91 zou dit in het midden van de overspanning zijn, terwijl volgens FIB Bulletin 14 dit t.h.v. dwarskrachtenscheuren zou zijn. In werkelijkheid trad echter onthechting t.h.v. een verzwakte laag, namelijk t.h.v. de hoofdwapening, op. Dit breukmechanisme wordt wel vermeld in FIB Bulletin 14, maar er bestaan nog geen rekenmodellen m.b.t. dit breukmechanisme.



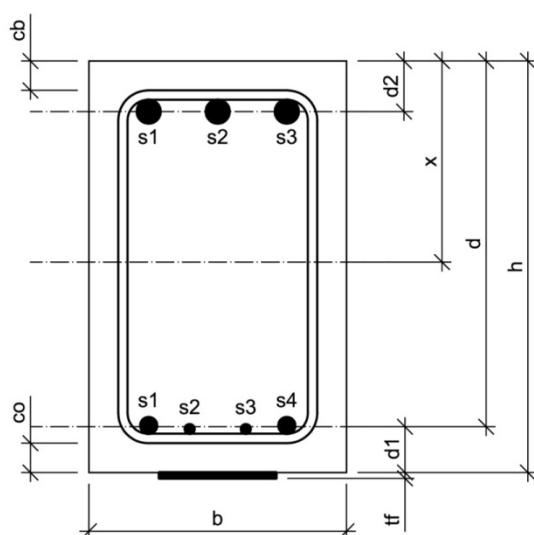
## 5.15 Balk BLA2.12

### 5.15.1 Algemeen

Balk BLA2.12 is een balk versterkt met koolstofvezelwapening die in dit geval echter niet verlijmd is. Aan beide zijden is deze balk bijkomend verankerd met 14 mechanische M8 ankers. Deze ankers hebben een lengte van 75 mm en worden voorgespannen met een moment van 15 N.m. De verdeelplaatjes meten 3,5 cm op 3,5 cm, hebben een dikte van 5 mm en zijn bijkomend verlijmd aan de koolstofvezelwapening. Om concrete rip-off te vermijden, is de koolstofvezelwapening aan beide zijden op 3 cm van de uiteinden bijkomend verankerd met een mechanisch M12 anker. Deze ankers hebben een lengte van 150 mm en worden voorgespannen met een moment van 50 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA2.12.

<b>Ouderdom</b>	148 dagen	
<b>Lengte</b>	4,208 m	
<b>Breedte</b>	0,224 m	
<b>Hoogte</b>	0,354 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

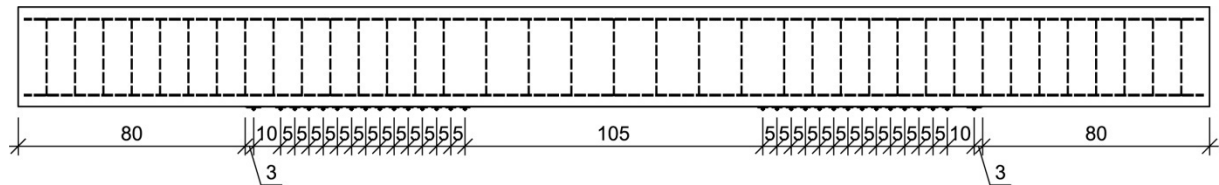
Tabel 162: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.12



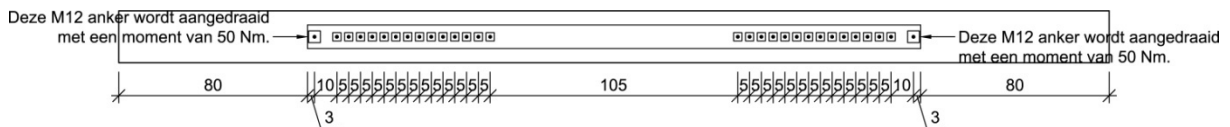
$$h = 354 \text{ mm}$$

$$b = 224 \text{ mm}$$

Figuur 193: Dwarsdoorsnede balk BLA2.12



Figuur 194: Vooraanzicht verankering balk BLA2.12



Figuur 195: Onderaanzicht verankering balk BLA2.12

### 5.15.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{c,x}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 26,845 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 33,361 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA2.12 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi 14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi 8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi 14} = 559,556 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi 8} = 552,660 \frac{N}{mm^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{mm^2}$$

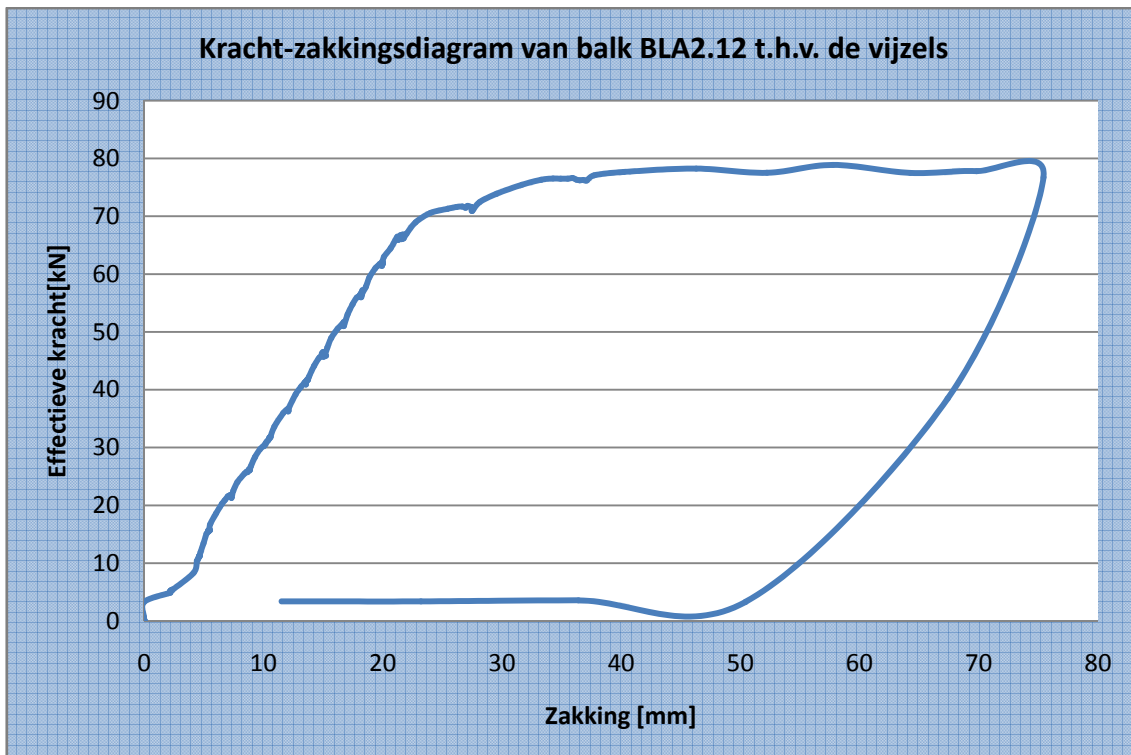
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.15.3 Meetresultaten

#### 5.15.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

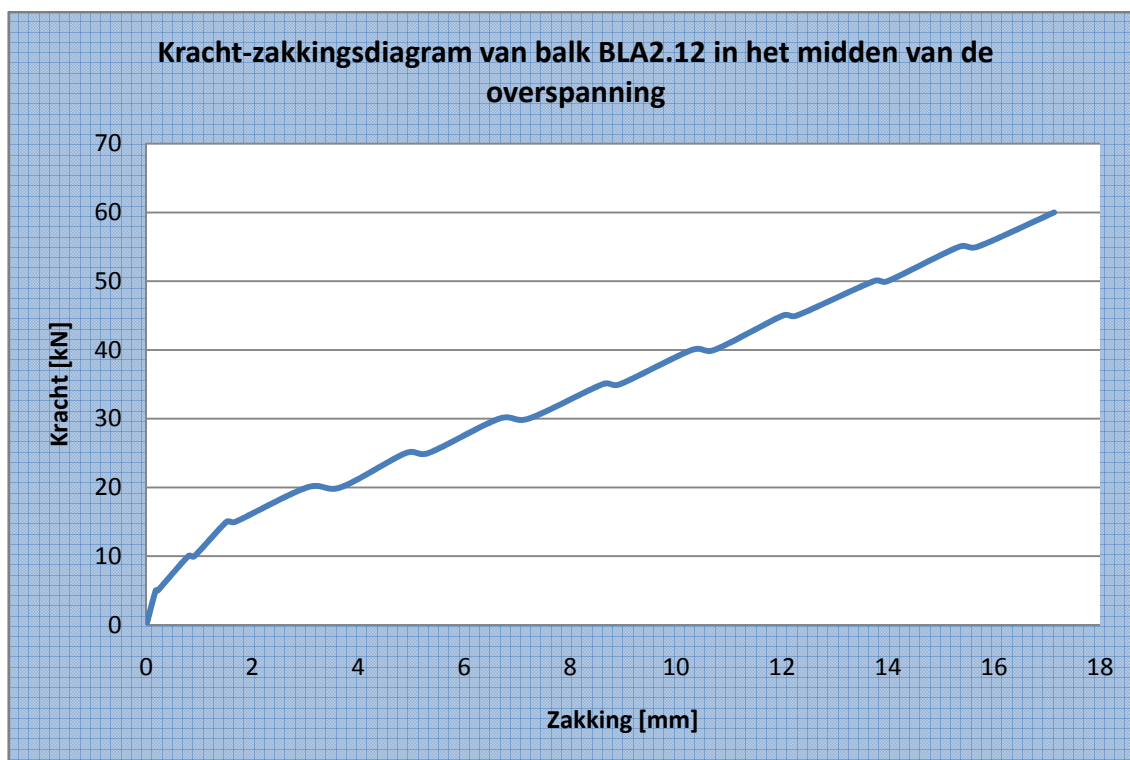
**Grafiek 163** toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



**Grafiek 163: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.12 t.h.v. de vijzels**

### 5.15.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

**Grafiek 164** toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



**Grafiek 164:** Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.12 in het midden van de overspanning

**Tabel 163** toont de cijferwaarden van **Grafiek 164**.

Kracht	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging
	meetklok 1 (midden)	meetklok 2 (midden)	meetklok 3 (uiteinde)	meetklok 4 (uiteinde)	midden	uiteinde	
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	0,00	0,00	0,00	n.c.	0,00	0,00	0,00
5	0,19	0,18	0,01		0,19	0,01	0,18
5	0,24	0,21	0,01		0,23	0,01	0,22
10	0,86	0,82	0,05		0,84	0,05	0,79
10	0,99	0,94	0,06		0,97	0,06	0,91
15	1,63	1,56	0,08		1,60	0,08	1,52
15	1,80	1,72	0,08		1,76	0,08	1,68
20	3,18	3,07	0,09		3,13	0,09	3,04
20	3,83	3,68	0,09		3,76	0,09	3,67
25	5,09	4,91	0,10		5,00	0,10	4,90
25	5,53	5,32	0,10		5,43	0,10	5,33
30	6,90	6,64	0,11		6,77	0,11	6,66
30	7,48	7,19	0,12		7,34	0,12	7,22
35	8,91	8,57	0,13		8,74	0,13	8,61

35	9,25	8,88	0,13	9,07	0,13	8,94
40	10,64	10,24	0,14	10,44	0,14	10,30
40	11,08	10,64	0,14	10,86	0,14	10,72
45	12,40	11,93	0,15	12,17	0,15	12,02
45	12,67	12,18	0,15	12,43	0,15	12,28
50	14,17	13,61	0,16	13,89	0,16	13,73
50	14,46	13,86	0,17	14,16	0,17	13,99
55	15,85	15,19	0,18	15,52	0,18	15,34
55	16,21	15,52	0,18	15,87	0,18	15,69
60	17,71	16,94	0,19	17,33	0,19	17,14

Tabel 163: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.12 in het midden van de overspanning

### 5.15.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 30 kN en 35 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 30kN + 5 \times \frac{7,2mm - 6,66mm}{8,61mm - 6,66mm} = 31,385kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 50 kN en 55 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 50kN + 5 \times \frac{14,4mm - 13,73mm}{15,34mm - 13,73mm} = 52,081kN$$

#### 5.15.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 78,878kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- buigingsscheuren
- de koolstofvezelwapening begint te werken vanaf 30 kN
- inscheuringen in de koolstofvezelwapening
- verbrijzeling van het beton in de drukzone

M.b.t. de ankers werden de volgende verschijnselen visueel waargenomen.

- geen verbuiging van de ankers
- ankers los t.h.v. de buigingsscheuren

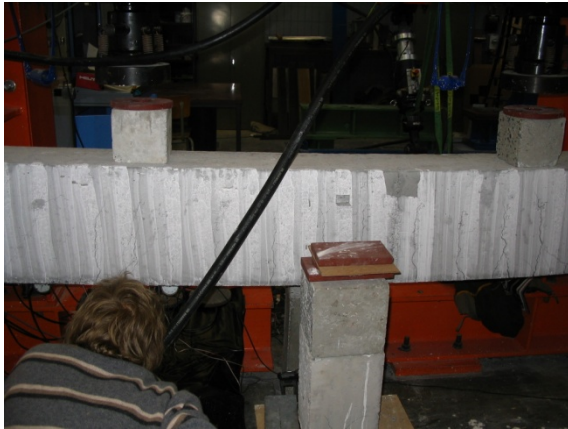
**Figuur 196** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA2.12.



**Figuur 196: Schets scheurvorming BLA2.12**

### 5.15.3.5 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BLA2.12.



**Figuur 197: Scheurvorming balk BLA2.12**



**Figuur 198: Slip koolstofvezelwapening**



**Figuur 199: Linkerkant koolstofvezelwapening**



**Figuur 200: Inscheuringen in de koolstofvezelwapening**



**Figuur 201: Rechterkant koolstofvezelwapening**

### 5.15.3.6 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

### 5.15.3.7 Lasten

**Tabel 164** vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 94,7 \text{ kN.m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 78,9 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN.m}$
		$P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN.m}$
		$P = 87,2 \text{ kN}$
Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN.m}$	
	$P_u = 70,0 \text{ kN}$	

**Tabel 164: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.12**

### 5.15.3.8 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 165** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{\max} = 78,9 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 149,0 \text{ kN}$ (beton: 100%)

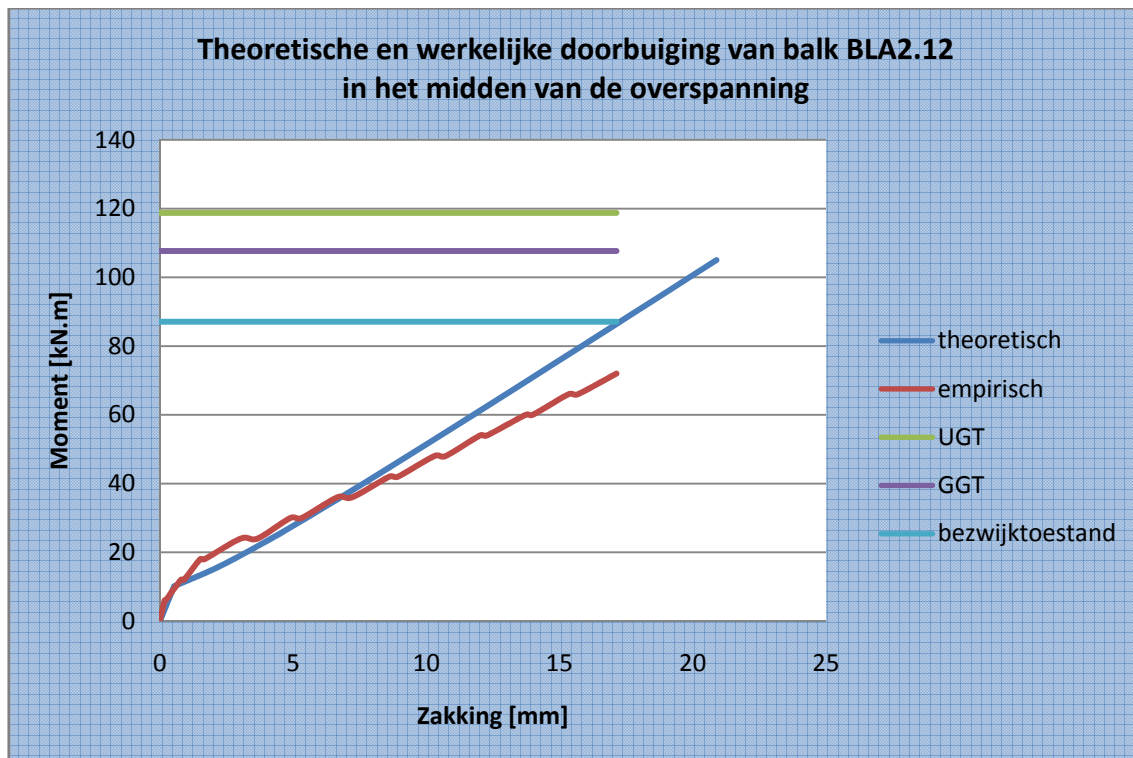
**Tabel 165: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.12**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.



### 5.15.3.9 Doorbuiging

**Grafiek 165** toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

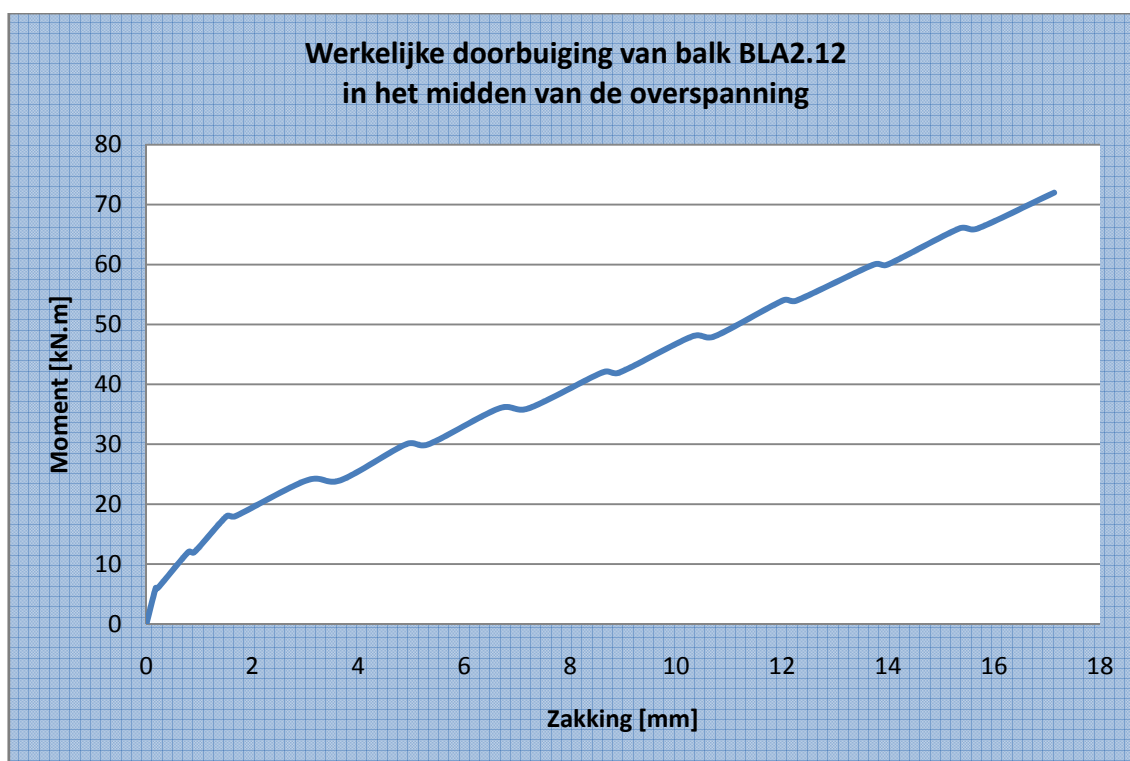


**Grafiek 165:** Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.12 in het midden van de overspanning

In de niet-gescheurde toestand vallen beide grafieken aanvankelijk samen. In de gescheurde toestand is de empirisch bepaalde doorbuiging groter dan de theoretisch berekende doorbuiging indien het opgenomen moment groter dan 36 kN m is.

### 5.15.3.10 Scheurvorming

**Grafiek 166** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA2.12 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 166** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 12,0 kN m.



**Grafiek 166: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.12 in het midden van de overspanning**

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 25,0 kN. Dit komt overeen met een moment van 30,0 kN.m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN.m.

#### 5.15.3.11 *Breukmechanismen*

**Tabel 166** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	51,1 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	43,3 kN m

**Tabel 166: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Het is moeilijk deze theoretische breukmechanismen te vergelijken met de werkelijkheid, vermits de koolstofvezelwapening in dit geval niet verlijmd was.

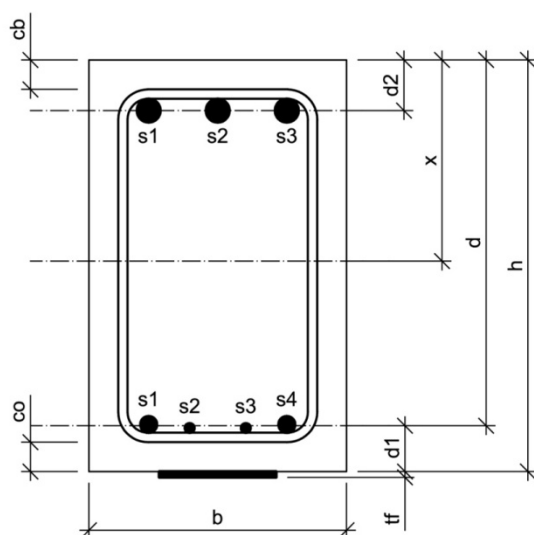
## 5.16 Balk BLA2.13

### 5.16.1 Algemeen

Balk BLA2.13 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening. Over de ganse lengte is deze balk bijkomend verankerd met 24 mechanische M10 ankers. Deze ankers hebben een lengte van 68 mm en worden voorgespannen met een moment van 30 N.m. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Om concrete rip-off te vermijden, is de koolstofvezelwapening aan beide zijden op 3 cm van de uiteinden bijkomend verankerd met een mechanisch M12 anker. Deze ankers hebben een lengte van 150 mm en worden voorgespannen met een moment van 50 Nm. De verdeelplaatjes meten 5 cm op 5 cm en hebben een dikte van 3 mm. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuren geven meer informatie over balk BLA2.13.

<b>Ouderdom</b>	147 dagen	
<b>Lengte</b>	4,200 m	
<b>Breedte</b>	0,220 m	
<b>Hoogte</b>	0,351 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

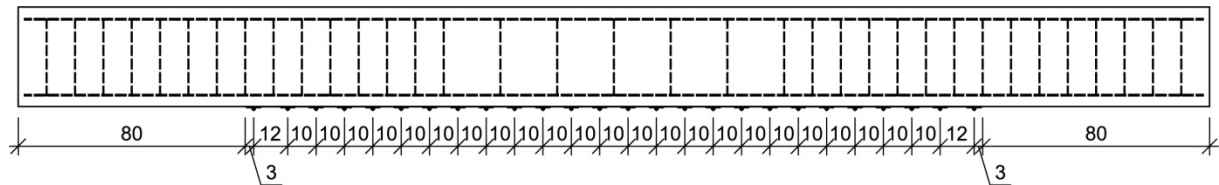
Tabel 167: Opbouw en dimensionering van balk BLA2.13



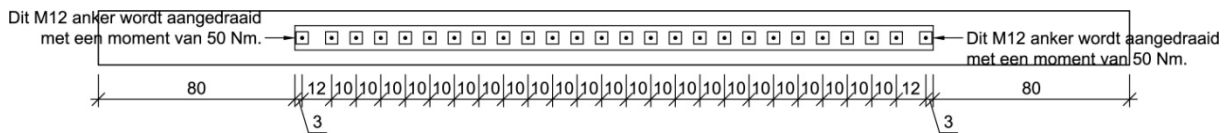
$$h = 351 \text{ mm}$$

$$b = 220 \text{ mm}$$

Figuur 202: Dwarsdoorsnede balk BLA2.13



Figuur 203: Vooraanzicht verankering BLA2.13



Figuur 204: Onderaanzicht verankering BLA2.13

### 5.16.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{c,x}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 26,180 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 31,560 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BLA2.13 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi 14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi 8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi 14} = 559,556 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{v,\phi 8} = 552,660 \frac{N}{mm^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{mm^2}$$

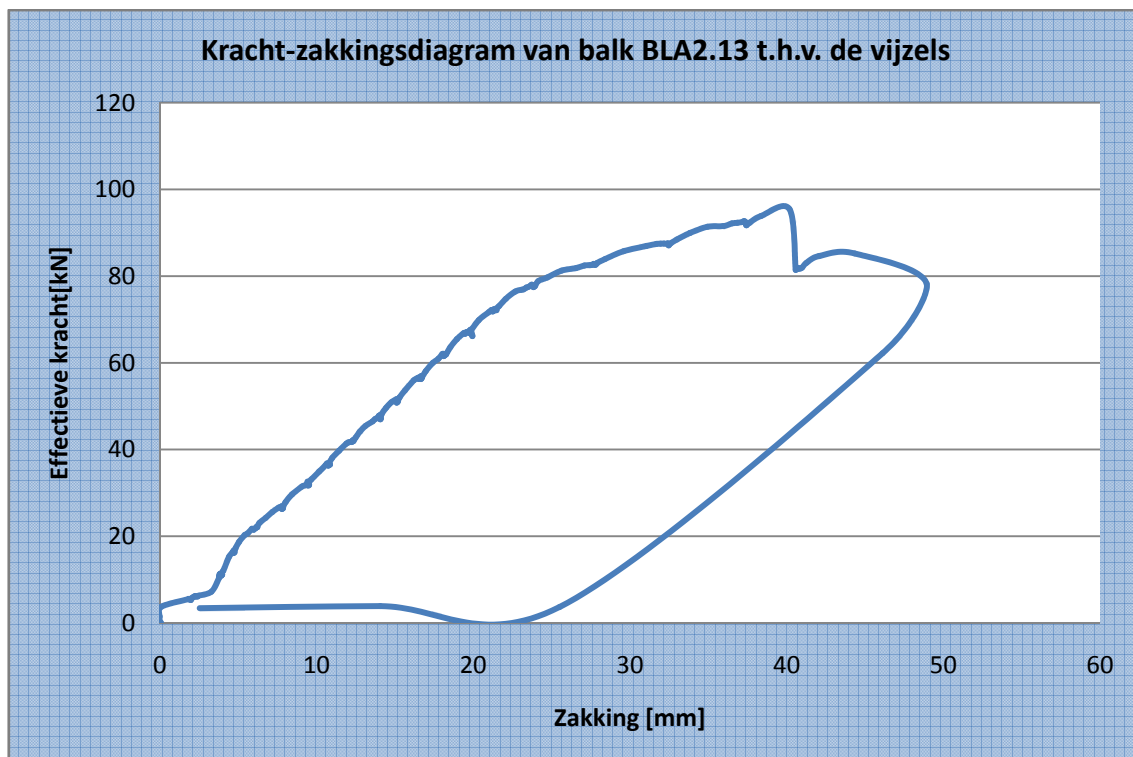
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.16.3 Meetresultaten

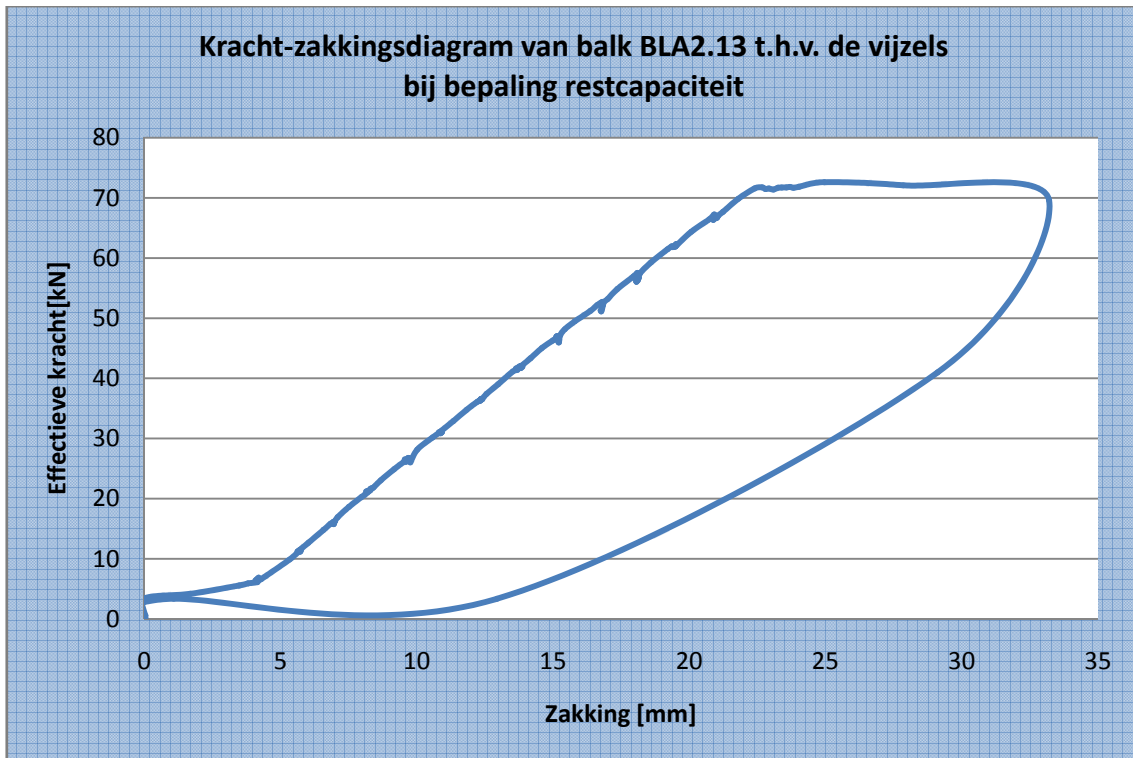
#### 5.16.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

Grafiek 167 toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



Grafiek 167: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.13 t.h.v. de vijzels

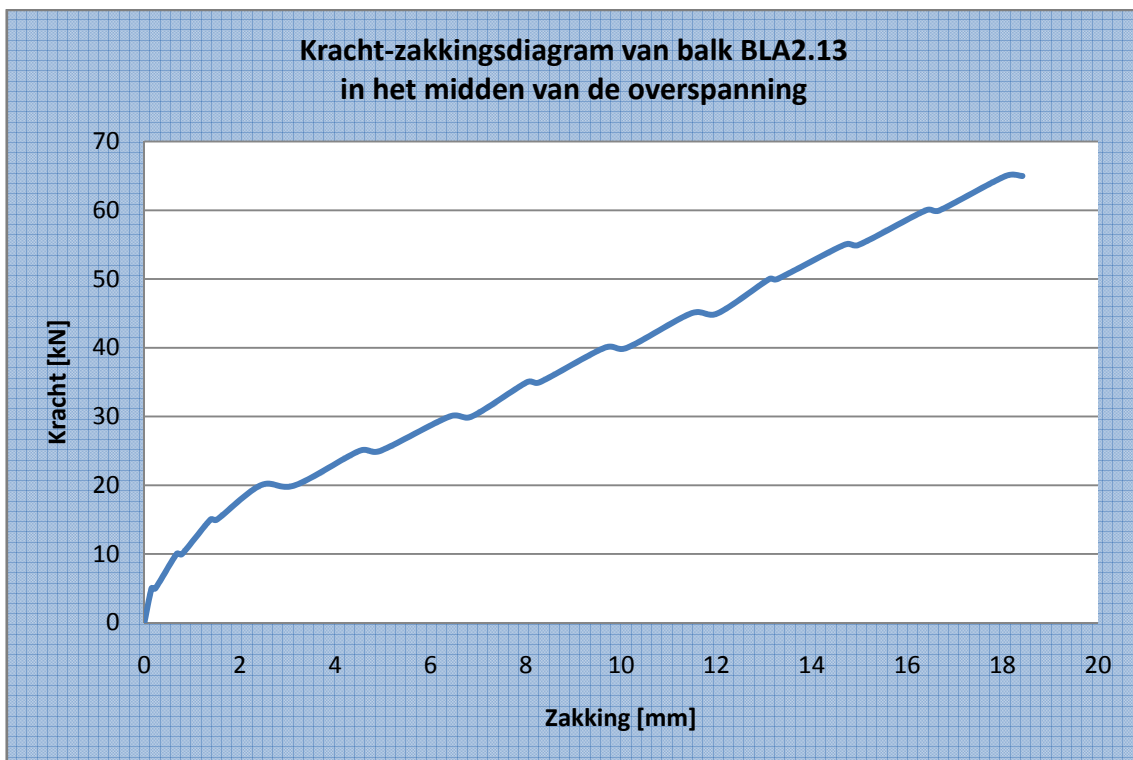
Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.



Grafiek 168: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.13 t.h.v. de vizels bij de bepaling van de restcapaciteit

### 5.16.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

Grafiek 169 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 169: Kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.13 in het midden van de overspanning

Tabel 168 toont de cijferwaarden van Grafiek 169.

Kracht	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging
	meetklok 1 (midden)	meetklok 2 (midden)	meetklok 3 (uiteinde)	meetklok 4 (uiteinde)	midden	uiteinde	
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	0,00	0,00	n.c	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,13	0,19		0,01	0,16	0,01	0,15
5	0,19	0,29		0,01	0,24	0,01	0,23
10	0,64	0,81		0,05	0,73	0,05	0,68
10	0,76	0,94		0,06	0,85	0,06	0,79
15	1,39	1,58		0,10	1,49	0,10	1,39
15	1,53	1,71		0,10	1,62	0,10	1,52
20	2,49	2,65		0,13	2,57	0,13	2,44
20	3,24	3,36		0,14	3,30	0,14	3,16
25	4,62	4,70		0,15	4,66	0,15	4,51
25	5,10	5,11		0,16	5,11	0,16	4,95
30	6,57	6,59		0,18	6,58	0,18	6,40
30	7,03	7,06		0,18	7,05	0,18	6,87
35	8,18	8,25		0,19	8,22	0,19	8,03
35	8,46	8,53		0,20	8,50	0,20	8,30
40	9,81	9,91		0,21	9,86	0,21	9,65
40	10,28	10,40		0,22	10,34	0,22	10,12
45	11,59	11,80		0,23	11,70	0,23	11,47
45	12,15	12,37		0,24	12,26	0,24	12,02
50	13,23	13,48		0,25	13,36	0,25	13,11
50	13,40	13,65		0,25	13,53	0,25	13,28
55	14,82	15,09		0,27	14,96	0,27	14,69
55	15,12	15,40		0,27	15,26	0,27	14,99
60	16,53	16,83		0,29	16,68	0,29	16,39
60	16,82	17,11		0,29	16,97	0,29	16,68
65	18,22	18,53		0,31	18,38	0,31	18,07
65	18,57	18,88		0,31	18,73	0,31	18,42

Tabel 168: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BLA2.13 in het midden van de overspanning

### 5.16.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 30 kN en 35 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 30kN + 5 \times \frac{7,2mm - 6,40mm}{8,03mm - 6,40mm} = 32,462kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 50 kN en 55 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 50kN + 5 \times \frac{14,4mm - 13,11mm}{14,69mm - 13,11mm} = 54,098kN$$

### 5.16.3.4 Breukkracht

De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 95,466kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- buigingsscheuren en dwarskrachtenscheuren
- 5 meest rechtse M10 ankers worden uit het beton getrokken
- onthechting door scheuroverbrugging
- aanzet tot onthechting t.h.v. een verzwakte laag

Nadat een breukverschijnsel m.b.t. de koolstofvezelwapening werd vastgesteld, werd de balk ontlast en vervolgens opnieuw belast om de zogenaamde restcapaciteit te bepalen. De restcapaciteit is een maat voor de werking van de verankering.

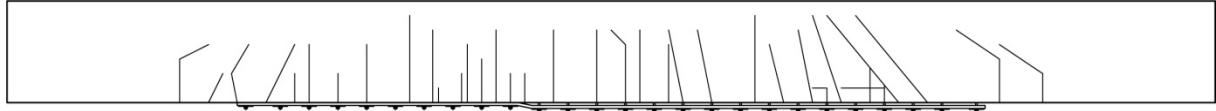
$$F_{rest,\max} = 72,617kN$$



De volgende verschijnselen m.b.t. de restcapaciteit werden visueel waargenomen.

- verbrijzeling van het beton in de drukzone
- onthechting zet zich verder voort, maar de ankers worden niet uitgetrokken

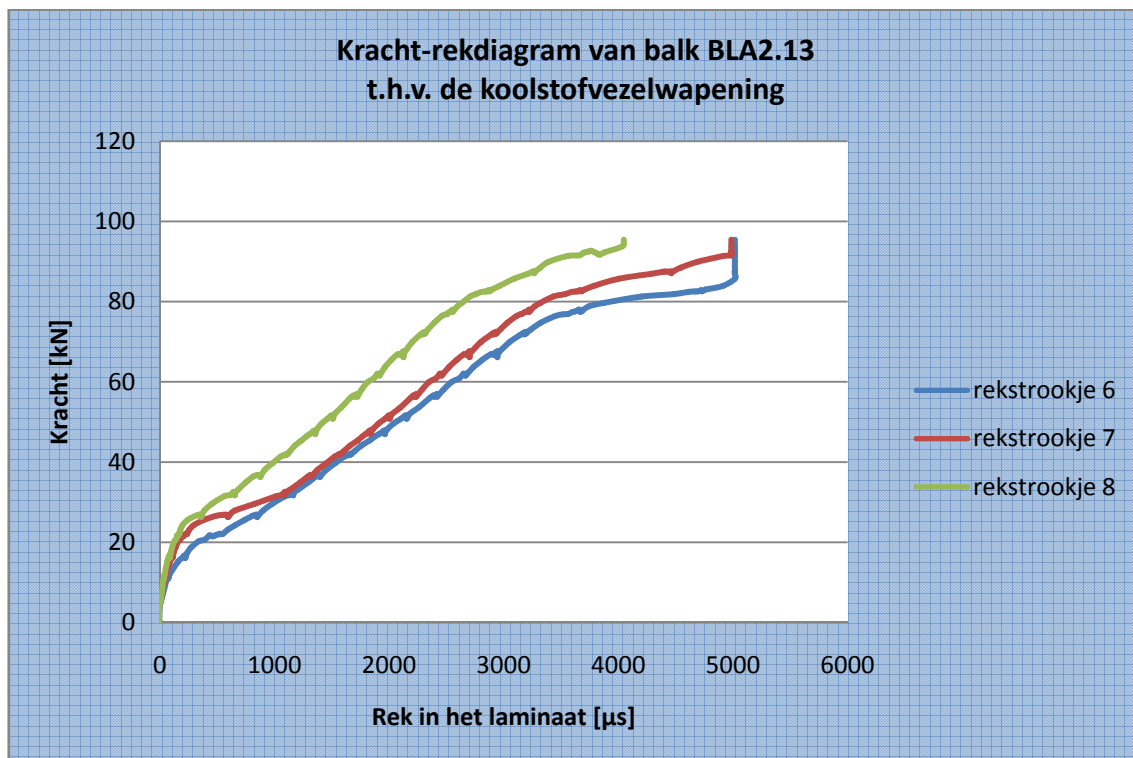
**Figuur 205** toont een schets van de scheurvorming van balk BLA2.13.



**Figuur 205: Schets scheurvorming BLA2.13**

### 5.16.3.5 Rek van de koolstofvezelwapening

**Grafiek 170** toont de rek in de koolstofvezelwapening. Er dient wel opgemerkt te worden dat niet alle rekstrookjes gegevens registreerden tijdens de proef.



**Grafiek 170: Kracht-rekdiagram van balk BLA2.13 t.h.v. de koolstofvezelwapening**

### 5.16.3.6 Foto's

De onderstaande foto's geven een duidelijker beeld van het breukmechanisme van balk BLA2.13.



**Figuur 206: Scheurvorming balk BLA2.13**



**Figuur 207: Onthechting**



**Figuur 208: Onthechting door scheuroverbrugging**



**Figuur 209: Aanzet tot onthechting t.h.v. verzwakte laag**



**Figuur 210: Uitgetrokken ankers**



**Figuur 211: Na de herbelasting**

### 5.16.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

#### 5.16.4.1 Lasten

**Tabel 169** vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 114,6 \text{ kN.m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 95,5 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN.m}$ $P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN.m}$ $P = 87,2 \text{ kN}$
	Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN.m}$
		$P_u = 70,0 \text{ kN}$

**Tabel 169: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BLA2.13**

#### 5.16.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 170** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

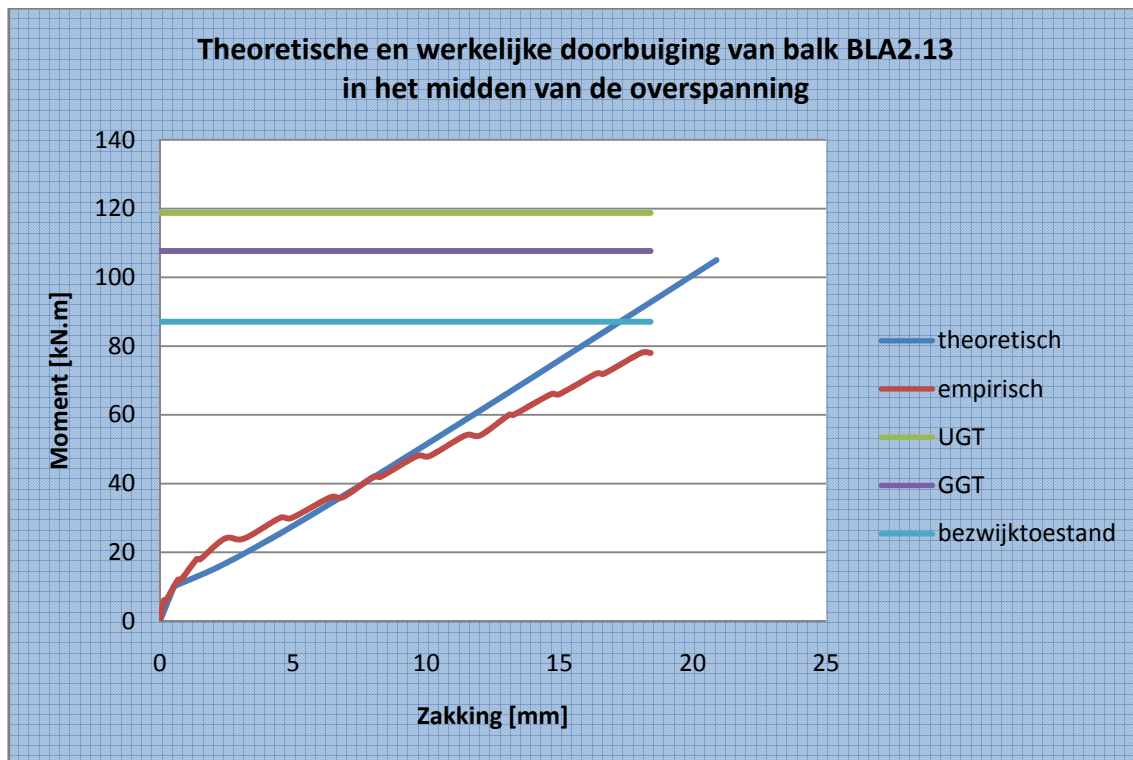
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{\max} = 95,5 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 149,0 \text{ kN}$ (beton: 100%)

**Tabel 170: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BLA2.13**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

### 5.16.4.3 Doorbuiging

Grafiek 171 toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

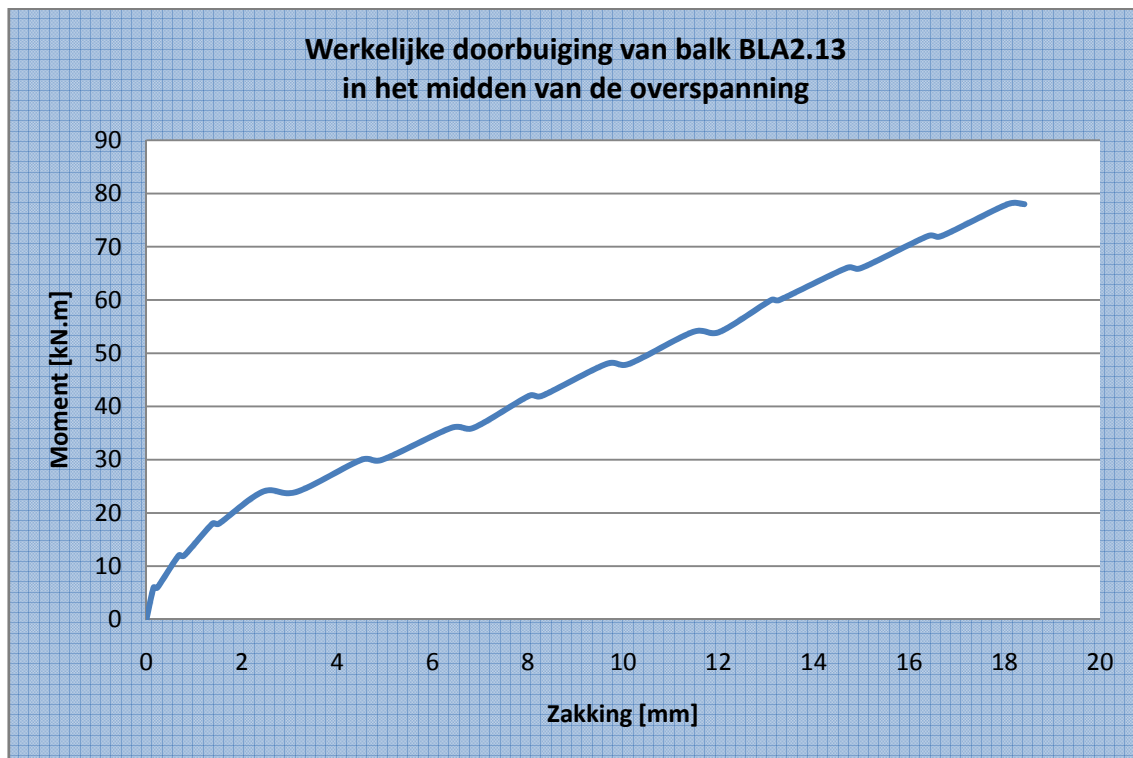


Grafiek 171: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BLA2.13 in het midden van de overspanning

In de niet-gescheurde toestand vallen beide grafieken aanvankelijk samen. In de gescheurde toestand is de empirisch bepaalde doorbuiging groter dan de theoretisch berekende doorbuiging indien het opgenomen moment groter is dan 42 kN m.

#### 5.16.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 172** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA1.1 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. Uit **Grafiek 172** blijkt het initieel scheurmoment gelijk te zijn aan 12,0 kN m.

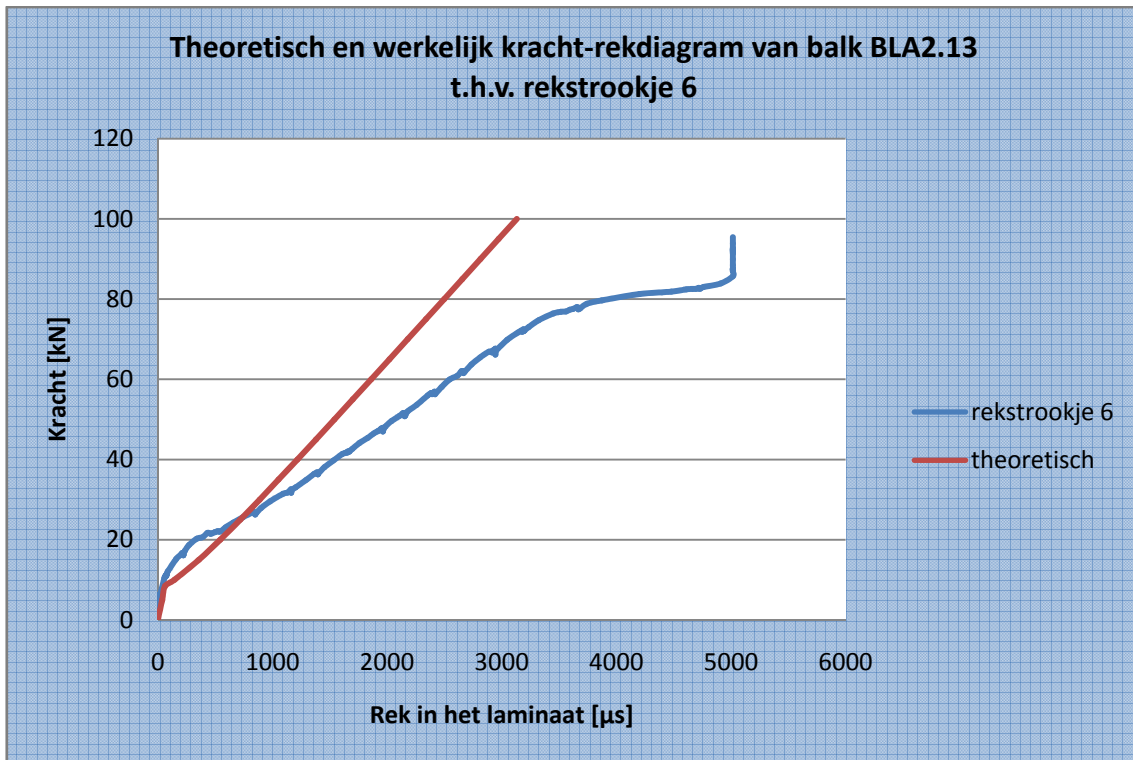


**Grafiek 172: Werkelijke doorbuiging van balk BLA2.13 in het midden van de overspanning**

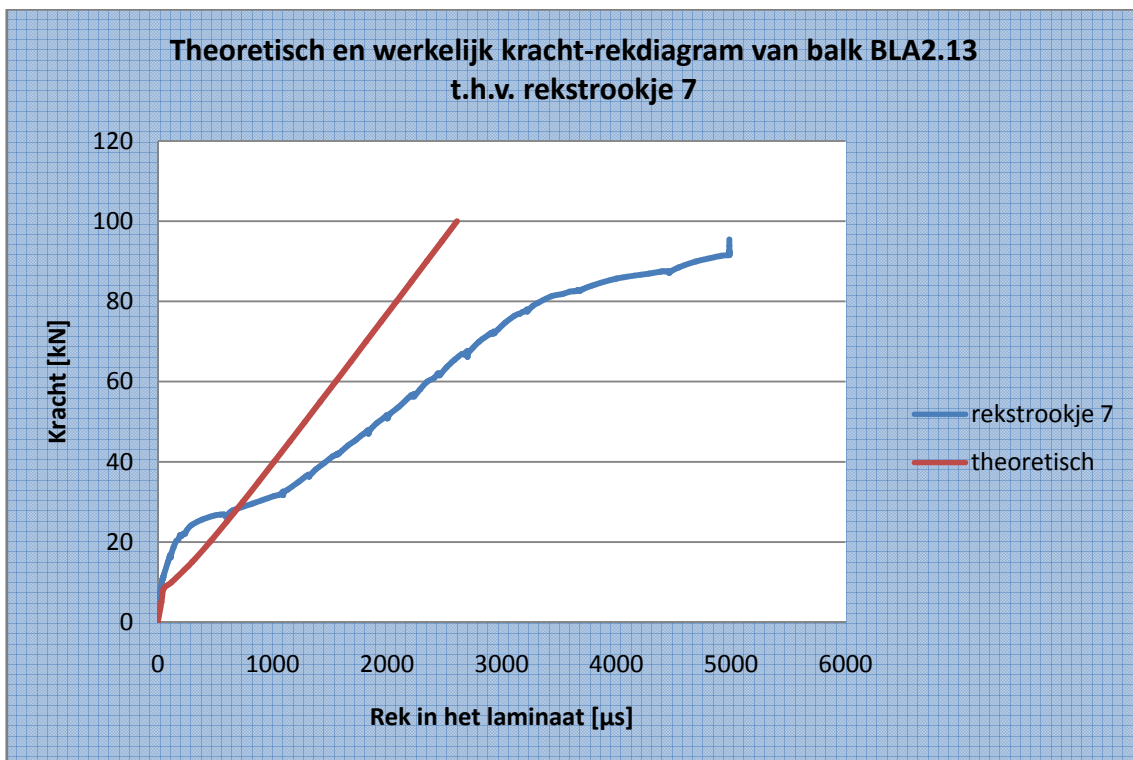
Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 20,0 kN. Dit komt overeen met een moment van 24,0 kN.m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN.m.

5.16.4.5 *Rek van de koolstofvezelwapening*

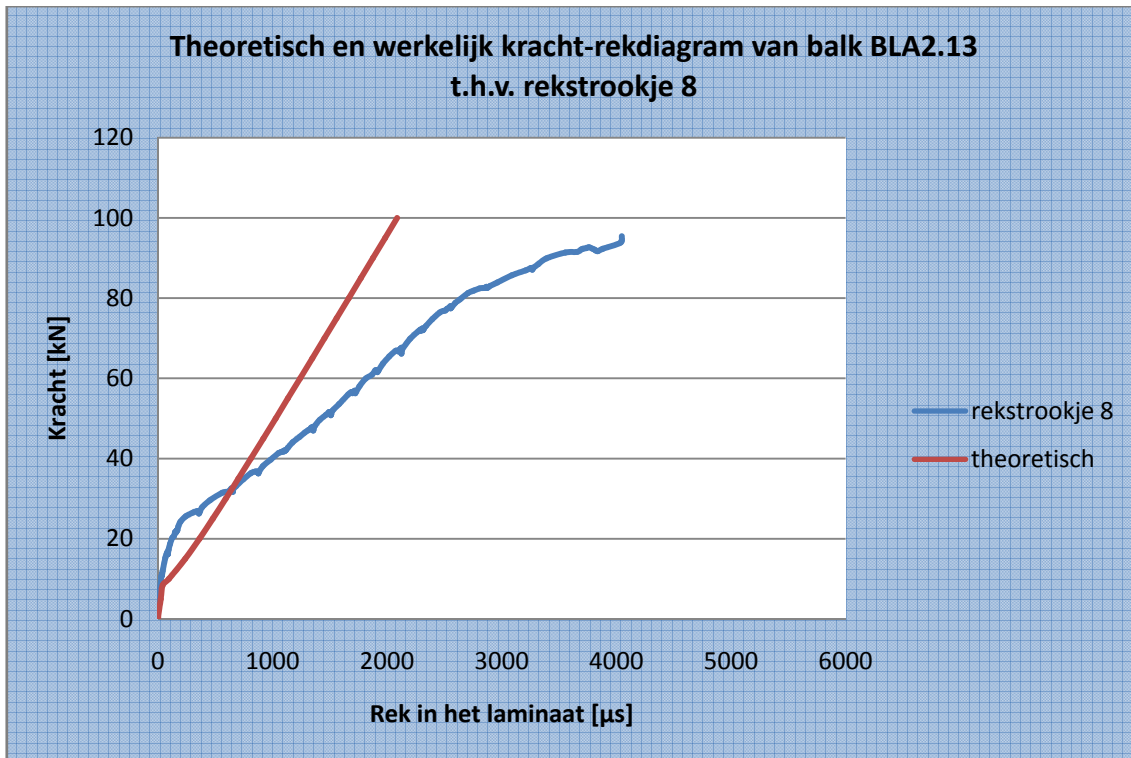
Grafiek 173 tot Grafiek 175 vergelijken de theoretisch berekende rek en de empirisch bepaalde rek met elkaar.



Grafiek 173: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.13 t.h.v. rekstrookje 6



Grafiek 174: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.13 t.h.v. rekstrookje 7



Grafiek 175: Theoretisch en werkelijk kracht-rekdiagram van balk BLA2.13 t.h.v. rekstrookje 8

Uit de bovenstaande grafieken blijkt dat de klassieke berekeningsmethode niet voldoet om de rek in de koolstofvezelwapening te voorspellen. Verder blijkt de hoofdwapening te vloeien bij een vjzselkracht van 78,6 kN. Dit is af te leiden uit de knik in bovenstaande grafieken. Deze waarneming bleek ook reeds uit **Grafiek 167** naar boven te komen. Bijgevolg kan er aangenomen worden dat bij een kracht van 78,6 kN het staal begint te vloeien. Na dit vloeimoment wordt er verondersteld dat de hoofdwapening geen extra last meer kan opnemen. De extra last dient dan bijgevolg door de koolstofvezelwapening opgenomen te worden.

Er kan dus besloten worden dat de hoofdwapening reeds gevloeid heeft vooraleer breuk optrad. Eens het vloeimoment overschreden is, neemt de rek in grote mate toe. De maximale spanning in de koolstofvezelwapening wordt als volgt berekend.

$$\begin{aligned}\sigma &= E \cdot \varepsilon \\ \Leftrightarrow \sigma &= 175000 \times 5016,420 \times 10^{-6} \\ \Leftrightarrow \sigma &= 877,874 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}$$

De maximale spanning in de koolstofvezelwapening bedraagt 877,9 N/mm<sup>2</sup>. Dit is slechts 30,8% van de breukspanning, die 2850 N/mm<sup>2</sup> bedraagt.

#### 5.16.4.6 Breukmechanismen

Tabel 171 vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	51,1 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	42,0 kN m

**Tabel 171: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Indien concrete rip-off buiten beschouwing gelaten wordt, dan is zowel volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14 onthechting het bepalende breukmechanisme. Er bestaat wel geen eensgezindheid over de locatie waar de onthechting zich het eerst zou manifesteren. Volgens CUR Aanbeveling 91 zou dit in het midden van de overspanning zijn, terwijl volgens FIB Bulletin 14 dit t.h.v. dwarskrachtenscheuren zou zijn. In werkelijkheid trad onthechting op door de overbrugging van een dwarskrachtenscheur. FIB Bulletin 14 lijkt het dus bij het rechte eind te hebben.



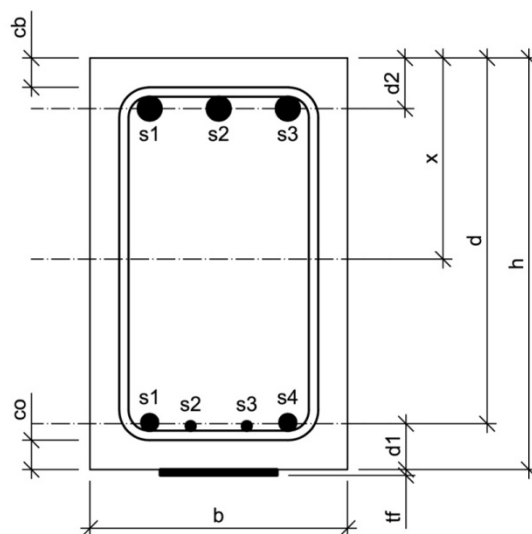
## 5.17 Balk BL2.2

### 5.17.1 Algemeen

Balk BL2.2 is een versterkte balk, d.i. een balk uit gewapend beton met opgelijmde koolstofvezelwapening, maar zonder bijkomende verankering. Bij de aanvang van de proef werden de werkelijke afmetingen nauwkeurig opgemeten. Onderstaande tabel en figuur geven meer informatie over balk BL2.2.

<b>Ouderdom</b>	142 dagen	
<b>Lengte</b>	4,208 m	
<b>Breedte</b>	0,221 m	
<b>Hoogte</b>	0,352 m	
<b>Wapening</b>	Onderwapening	2x $\phi 14$ + 2x $\phi 8$ $A_{s1} = 409 \text{ mm}^2$
	Bovenwapening	3x $\phi 20$ $A_{s2} = 942 \text{ mm}^2$
	Beugels	7x $\phi 8$ in de middenzone tussen de vijzels, met een tussenafstand van $\pm 15 \text{ cm}$ 15x $\phi 8$ aan de uiteinden van de balk, met een tussenafstand van $\pm 10 \text{ cm}$

Tabel 172: Opbouw en dimensionering van balk BL2.2



$$h = 351 \text{ mm}$$

$$b = 223 \text{ mm}$$

Figuur 212: Dwarsdoorsnede balk BL2.2

### 5.17.2 Materiaalkarakteristieken

De betondruksterkte wordt afgeleid uit drukproeven op geboorde kernen. Deze kernen hebben een diameter van 113 mm en een hoogte van 100 mm. Er bestaan formules en omrekenfactoren die het verband leggen tussen de weerstand  $f_c$  bekomen op deze kernen en de overeenstemmende weerstand  $f_{cx}$ , die men zou bekomen op een cilindervorming proefstuk met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm, of  $f_{c,cub}$ , die men zou bekomen op een kubusvorming proefstuk met een riblengte van 150 mm. Met deze formules en omrekenfactoren worden nadien de gemiddelden van de weerstanden  $f_c$  en  $f_{c,cub}$  berekend.

$$f_{cm} = 22,917 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{c,cub,m} = 27,626 \frac{N}{mm^2}$$

De treksterkte van het wapeningsstaal wordt afgeleid uit trekproeven. Uit deze trekproeven werd vastgesteld dat de effectieve vloeigrens niet alleen afhankelijk is van de staalkwaliteit, maar ook van de diameter. Aangezien de hoofdwapening van balk BL2.2 uit staven van verschillende diameters bestaat, wordt de effectieve vloeigrens van de hoofdwapening gelijk gesteld aan een gewogen gemiddelde van de effectieve vloeigrenzen van de verschillende staven. Als gewichten worden de oppervlaktes van de staven met de verschillende diameters genomen.

$$A_{s1,\phi14} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{14}{2}\right)^2 = 308 mm^2$$

$$A_{s1,\phi8} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2 \times \pi \times \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 101 mm^2$$

De effectieve vloeigrenzen van deze staven werden reeds eerder experimenteel bepaald.

$$\sigma_{v,\phi14} = 559,556 \frac{N}{mm^2} \quad \text{en} \quad \sigma_{v,\phi8} = 552,660 \frac{N}{mm^2}$$

De effectieve vloeigrens van de hoofdwapening wordt als volgt berekend.

$$f_y = \frac{\sum_i A_{s1,i} \cdot \sigma_{v,i}}{\sum_i A_{s1,i}} = \frac{308 \times 559,556 + 101 \times 552,660}{308 + 101} = 557,853 \frac{N}{mm^2}$$

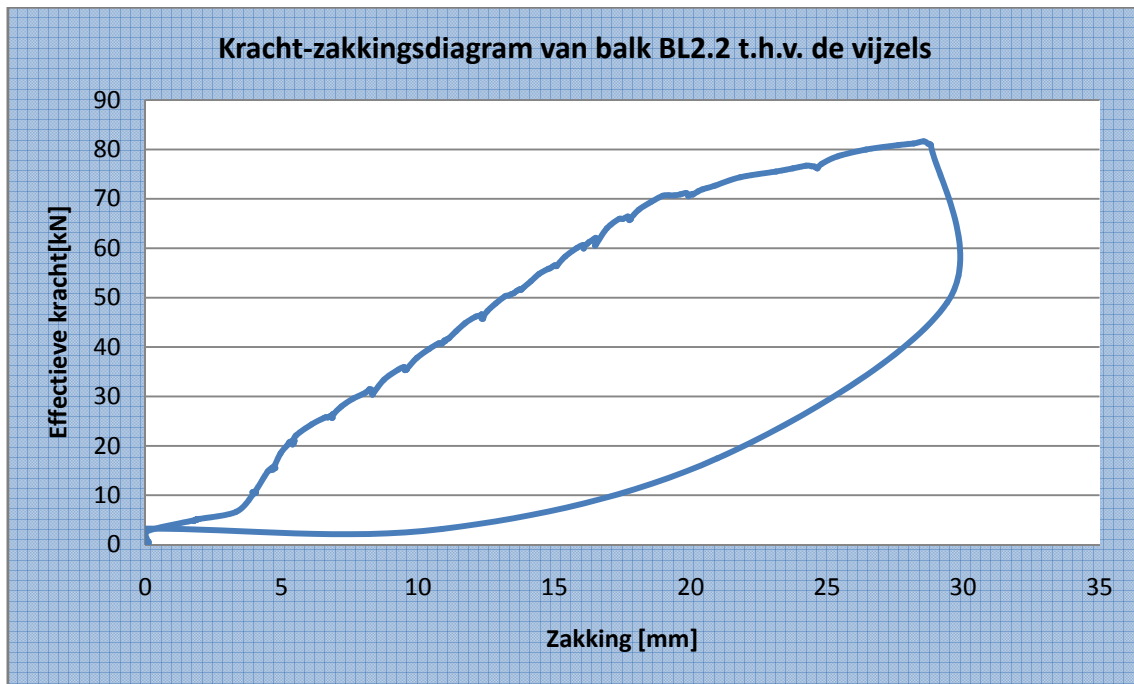
Ook de effectieve vloeigrens van de dwarskrachtenwapening werd experimenteel bepaald.

$$f_w = 546,819 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.17.3 Meetresultaten

#### 5.17.3.1 Zakking t.h.v. de vijzels

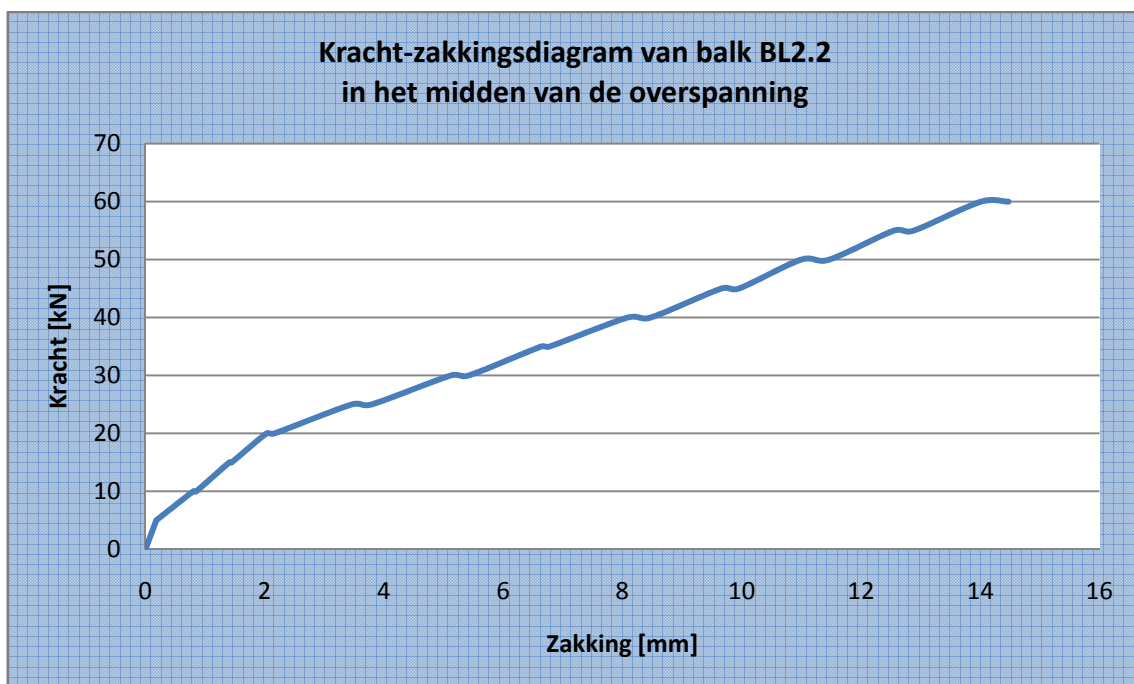
Grafiek 176 toont de zakking van de vijzels in functie van de belasting.



Grafiek 176: Kracht-zakkingsdiagram van balk BL2.2 t.h.v. de vijzels

#### 5.17.3.2 Zakking in het midden van de overspanning

Grafiek 177 toont de zakking in het midden van de overspanning in functie van de belasting. Deze zakking werd opgemeten m.b.v. meetklokken.



Grafiek 177: Kracht-zakkingsdiagram van balk BL2.2 in het midden van de overspanning

Tabel 173 toont de cijferwaarden van Grafiek 177.

Kracht	Zakking				Gemiddelde zakking		Doorbuiging
	meetklok 1	meetklok 2	meetklok 3	meetklok 4	midden	uiteinde	
	(midden)	(midden)	(uiteinde)	(uiteinde)			
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
0	0,00	0,00	0,00	n.c	0,00	0,00	0,00
5	0,18	0,18	0,00		0,18	0,00	0,18
5	0,18	0,18	0,00		0,18	0,00	0,18
10	0,85	0,85	0,05		0,85	0,05	0,80
10	0,90	0,90	0,05		0,90	0,05	0,85
15	1,47	1,48	0,07		1,48	0,07	1,41
15	1,51	1,52	0,07		1,52	0,07	1,45
20	2,11	2,13	0,09		2,12	0,09	2,03
20	2,24	2,26	0,09		2,25	0,09	2,16
25	3,54	3,58	0,10		3,56	0,10	3,46
25	3,88	3,92	0,11		3,90	0,11	3,79
30	5,21	5,27	0,12		5,24	0,12	5,12
30	5,51	5,57	0,12		5,54	0,12	5,42
35	6,74	6,81	0,14		6,78	0,14	6,64
35	6,88	6,95	0,14		6,92	0,14	6,78
40	8,20	8,27	0,15		8,24	0,15	8,09
40	8,59	8,67	0,16		8,63	0,16	8,47
45	9,78	9,87	0,17		9,83	0,17	9,66
45	10,07	10,17	0,17		10,12	0,17	9,95
50	11,13	11,24	0,19		11,19	0,19	11,00
50	11,60	11,71	0,19		11,66	0,19	11,47
55	12,70	12,82	0,21		12,76	0,21	12,55
55	13,03	13,15	0,21		13,09	0,21	12,88
60	14,17	14,29	0,22		14,23	0,22	14,01
60	14,64	14,77	0,23		14,71	0,23	14,48

Tabel 173: Cijferwaarden kracht-zakkingsdiagram van balk BL2.2 in het midden van de overspanning

### 5.17.3.3 Doorbuiging L/500 en L/250

De overspanning bedraagt 3600 mm. De doorbuiging L/500 en de doorbuiging L/250 zijn dus gelijk aan onderstaande waarden.

$$y_{L/500} = \frac{L}{500} = \frac{3600}{500} = 7,2mm$$

$$y_{L/250} = \frac{L}{250} = \frac{3600}{250} = 14,4mm$$

De doorbuiging L/500 wordt bereikt bij een kracht tussen 35 kN en 40 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/500.

$$F_{y=L/500} = 35kN + 5 \times \frac{7,2mm - 6,64mm}{8,09mm - 6,64mm} = 36,948kN$$

De doorbuiging L/250 wordt bereikt bij een kracht tussen 55 kN en 60 kN. Lineaire interpolatie tussen deze waarden levert de kracht bij doorbuiging L/250.

$$F_{y=L/250} = 55kN + 5 \times \frac{14,4mm - 12,88mm}{14,48mm - 12,88mm} = 59,765kN$$

### 5.17.3.4 Breukkracht

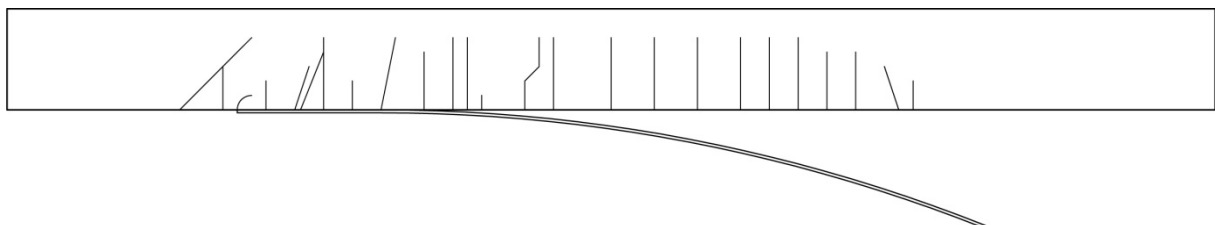
De breukkracht is de kracht waarbij een breukverschijnsel optreedt.

$$F_{\max} = 81,634kN$$

De volgende verschijnselen m.b.t. de breuk werden visueel waargenomen.

- buigingsscheuren en dwarskrachtenscheuren
- aanzet tot breuk door concrete rip-off
- onthechting waarbij nog een dun laagje beton aan de koolstofvezelwapening kleeft.

**Figuur 213** toont een schets van de scheurvorming van balk BL2.2.



**Figuur 213: Schets scheurvorming balk BL2.2**

### 5.17.3.5 Foto's

De onderstaande foto's verduidelijken het breukmechanisme van balk BL2.2.



Figuur 214: Scheurvorming linkerkant balk BL2.2



Figuur 215: Scheurvorming rechterkant balk BL2.2



Figuur 216: Breukmechanisme van balk BL2.2

### 5.17.4 Besluit

De bekomen meetresultaten worden tot slot vergeleken met de theoretisch berekende waarden. Uit deze vergelijkingen kunnen besluiten getrokken worden omtrent de overeenkomst tussen de verschillende rekenmodellen en de realiteit. Alle opgemeten parameters worden hierbij vergeleken met hun theoretisch berekende tegenhanger.

#### 5.17.4.1 Lasten

Tabel 174 vat de verschillende lasten en momenten samen.

<b>Meetresultaten</b>	Maximum moment	$M_{\max} = 98,0 \text{ kN.m}$
	Maximum kracht	$P_{\max} = 81,6 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	UGT	$M_d = 118,8 \text{ kN.m}$
		$P_d = 95,6 \text{ kN}$
	GGT	$M = 107,7 \text{ kN.m}$
		$P = 87,2 \text{ kN}$
Bezwijktoestand	$M_u = 87,1 \text{ kN.m}$	
	$P_u = 70,0 \text{ kN}$	

Tabel 174: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde momenten en lasten bij balk BL2.2

### 5.17.4.2 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 175** vergelijkt de empirische dwarskracht met de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit.

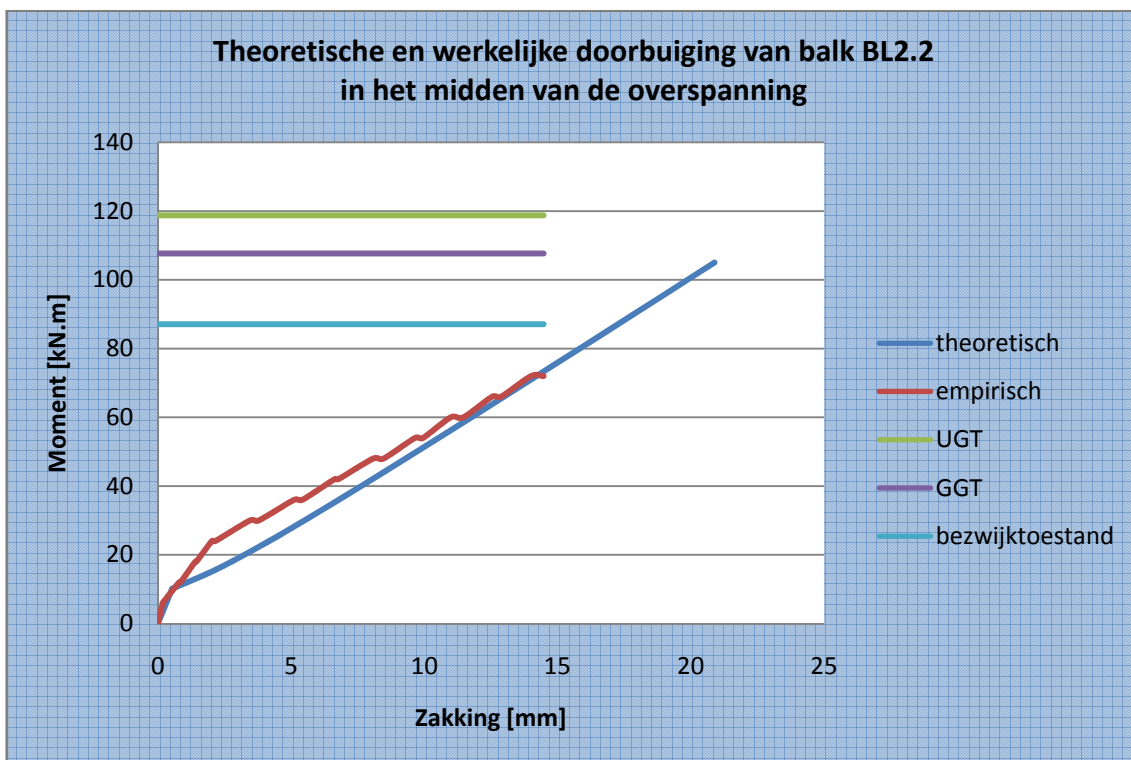
<b>Meetresultaten</b>	Maximum dwarskracht	$V_{max} = 81,6 \text{ kN}$
<b>Berekende resultaten</b>	Dwarskrachtencapaciteit	$V_d = 122,8 \text{ kN}$ (beton: 0%)
		$V_d = 149,0 \text{ kN}$ (beton: 100%)

**Tabel 175: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit van balk BL2.2**

De totaal opneembare dwarskracht is beduidend groter dan de maximale kracht die bij de vierpuntsbuigproef wordt gegenereerd. Er is een duidelijke overbewapening tegen breuk door dwarskrachten. Deze overbewapening is een gevolg van het grote aantal beugels aanwezig in de balk.

### 5.17.4.3 Doorbuiging

**Grafiek 178** toont zowel de werkelijke zakking als de theoretisch berekende zakking.

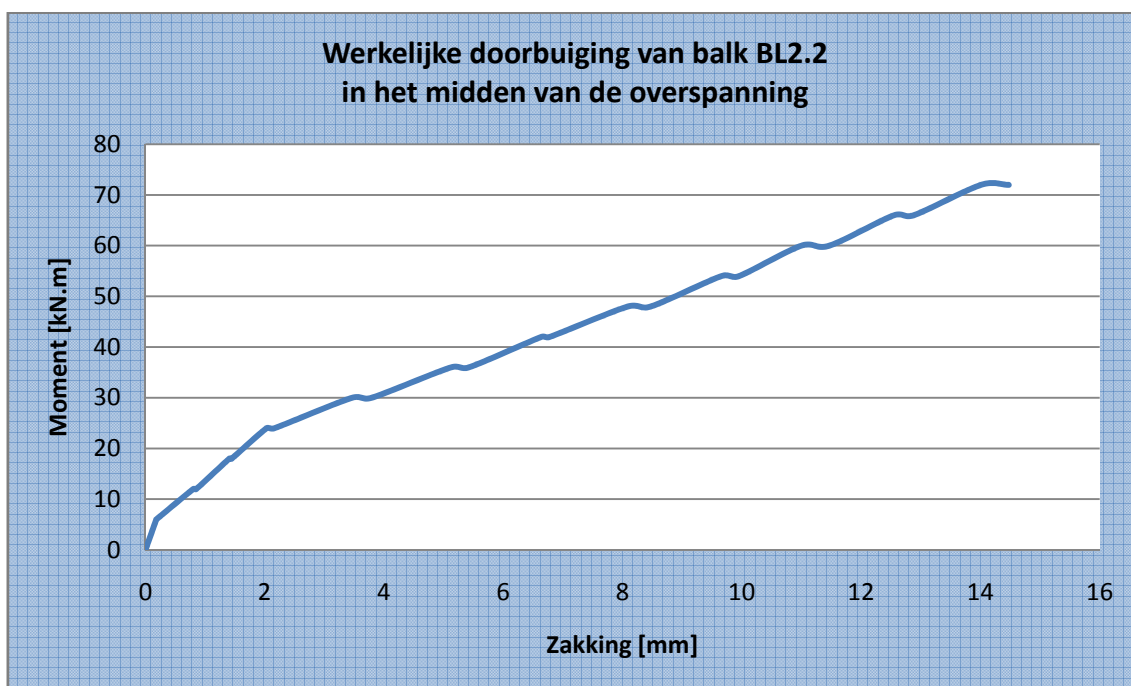


**Grafiek 178: Theoretische en werkelijke doorbuiging van balk BL2.2 in het midden van de overspanning**

In de niet-gescheurde toestand vallen beide grafieken aanvankelijk samen. In de gescheurde toestand is de werkelijke doorbuiging over de ganse meting kleiner dan de theoretisch berekende doorbuiging. De empirisch bepaalde doorbuiging is gelijk aan de theoretisch berekende doorbuiging op het moment dat de metingen van de doorbuiging in het midden van de overspanning stopten.

#### 5.17.4.4 Scheurvorming

**Grafiek 179** toont de werkelijke doorbuiging van balk BLA1.1 in het midden van de overspanning. Uit deze grafiek kan het initieel scheurmoment afgeleid worden. Dit is immers het moment waarbij een knik terug te vinden is in de grafiek. Dit betekent dat het beton in de trekzone steeds minder trek zal opnemen. **Grafiek 179** toont echter twee knikpunten, één bij een moment van 6,0 kN m en één bij een moment van 24,0 kN m.



**Grafiek 179: Werkelijke doorbuiging van balk BL2.2 in het midden van de overspanning**

Tijdens de vierpuntsbuigproef werden de scheuren opgetekend. De eerste scheur werd opgetekend bij een kracht van 20 kN. Dit komt overeen met een moment van 24,0 kN.m. Het theoretische berekende scheurmoment bedraagt 10,1 kN m.

#### 5.17.4.5 Breukmechanismen

**Tabel 176** vat de berekende waarden van de breukmechanismen volgens verschillende methoden samen.

<b>CUR 91</b>	Onthechting bij dwarskrachtenscheuren	85,3 kN m
	Onthechting door hoge schuifspanningen	60,7 kN m
	Eindverankering-dwarskrachtenbreuk	51,1 kN m
<b>FIB</b>	Vloeien van het staal gevolgd door verbrijzeling van het beton	111,4 kN m
	Peeling-off caused at shear cracks	59,6 kN m
	Peeling-off at the end anchorage and at flexural cracks	81,0 kN m
	End shear failure	43,3 kN m

**Tabel 176: Breukmomenten volgens CUR Aanbeveling 91 en FIB Bulletin 14**

Volgens CUR Aanbeveling 91 zou het eerst optredende breukmechanisme eindverankering-dwarskrachtenbreuk zijn. Ook volgens FIB Bulletin 14 zou concrete rip-off het bepalende breukmechanisme zijn. In werkelijkheid was een aanzet tot concrete rip-off merkbaar, maar het uiteindelijke breukmechanisme was toch onthechting.



## 5.18 Analyse resultaten reeks 2

### 5.18.1 Breukkracht

**Tabel 177** vat de breukkrachten van de balken van reeks 2 samen.

Balk	Breukkracht			
	[kN]	t.o.v. B2 [%]	t.o.v. BL2.1 [%]	t.o.v. BL2.2 [%]
B2	56,8	0,0%	-33,6%	-30,4%
BL2.1	85,6	50,6%	0,0%	4,9%
BLA2.1	85,9	51,1%	0,3%	5,2%
BLA2.2	92,6	63,0%	8,2%	13,5%
BLA2.3 *	96,0	68,9%	12,2%	17,6%
BLA2.4 *	74,9	31,8%	-12,5%	-8,2%
BLA2.5	84,9	49,4%	-0,8%	4,0%
BLA2.6 *	86,0	51,3%	0,4%	5,3%
BLA2.7 *	88,9	56,4%	3,9%	8,9%
BLA2.8 *	81,8	44,0%	-4,4%	0,2%
BLA2.9 *	92,1	62,0%	7,6%	12,8%
BLA2.10 *	94,1	65,5%	9,9%	15,2%
BLA2.11 *	67,4	18,6%	-21,3%	-17,4%
BLA2.12 *	78,9	38,8%	-7,8%	-3,4%
BLA2.13 *	95,5	68,0%	11,5%	16,9%
BL2.2 *	81,6	43,6%	-4,6%	0,0%

**Tabel 177: Breukkrachten van reeks 2**

Uit **Tabel 177** blijkt dat het gebruik van koolstofvezelwapening steeds een positieve invloed heeft op de draagkracht van een onversterkte balk. Indien balk BLA2.12 buiten beschouwing gelaten wordt – de koolstofvezelwapening van deze balk werd niet verlijmd – dan blijkt de verankering niet in alle gevallen de draagkracht nog te verbeteren. Uit het meetresultaat van balk BLA2.4 lijkt de veronderstelling dat enkel de ankers die het meest in het midden gelegen zijn, werken, foutief te zijn.

**Tabel 178** tot **Tabel 186** groeperen telkens de breukkrachten van enkele balken die rechtstreeks met elkaar vergeleken kunnen worden.

Balk	Breukkracht				
	[kN]	t.o.v. B2 [%]	t.o.v. BL2.1 [%]	t.o.v. BL2.2 [%]	t.o.v. BLA2.11 [%]
B2	56,8	0,0%	-33,6%	-30,4%	-15,7%
BL2.1	85,6	50,6%	0,0%	4,9%	27,0%
BL2.2 *	81,6	43,6%	-4,6%	0,0%	21,1%
BLA2.5	84,9	49,4%	-0,8%	4,0%	26,0%
BLA2.6 *	86,0	51,3%	0,4%	5,3%	27,6%
BLA2.11 *	67,4	18,6%	-21,3%	-17,4%	0,0%

**Tabel 178: Effect type anker op de breukkracht [1]**

**Tabel 178** vergelijkt het gebruik van mechanisch M6 ankers, chemische M6 ankers en vernageling. De doorsnedes van de verankering per beugelpas zijn steeds ongeveer gelijk aan elkaar. Het verankeren door vernageling blijkt een grote negatieve invloed te hebben op de draagkracht van een versterkte balk zonder bijkomende verankering. Er kan geen besluit genomen worden omtrent de overige balken, vermits de verschillen in breukkracht te klein zijn.

Balk	Breukkracht				
	[kN]	t.o.v. B2 [%]	t.o.v. BL2.1 [%]	t.o.v. BL2.2 [%]	t.o.v. BLA2.7 [%]
B2	56,8	0,0%	-33,6%	-30,4%	-36,1%
BL2.1	85,6	50,6%	0,0%	4,9%	-3,7%
BL2.2 *	81,6	43,6%	-4,6%	0,0%	-8,2%
BLA2.2	92,6	63,0%	8,2%	13,5%	4,2%
BLA2.7 *	88,9	56,4%	3,9%	8,9%	0,0%

**Tabel 179: Effect type anker op de breukkracht [2]**

**Tabel 179** vergelijkt het gebruik van mechanische M10 ankers met chemische M10 ankers. Beide types ankers blijken de draagkracht van een versterkte balk zonder bijkomende verankering nog te kunnen verbeteren. Mechanische ankers lijken de draagkracht meer te verhogen dan chemische ankers.

Balk	Breukkracht				
	[kN]	t.o.v. B2 [%]	t.o.v. BL2.1 [%]	t.o.v. BL2.2 [%]	t.o.v. BLA2.5 [%]
B2	56,8	0,0%	-33,6%	-30,4%	-33,1%
BL2.1	85,6	50,6%	0,0%	4,9%	0,8%
BL2.2 *	81,6	43,6%	-4,6%	0,0%	-3,9%
BLA2.2	92,6	63,0%	8,2%	13,5%	9,1%
BLA2.5	84,9	49,4%	-0,8%	4,0%	0,0%

**Tabel 180: Effect ankerdiameter op de breukkracht [1]**

**Tabel 180** vergelijkt de invloed van de ankerdiameter bij mechanische ankers op de breukkracht. De doorsnedes van de verankering per beugelpas zijn steeds ongeveer gelijk aan elkaar. Uit **Tabel 180** lijkt dat het beter is grotere ankerdiameters te verkiezen boven een groter aantal doorboringen in de koolstofvezelwapening.

Balk	Breukkracht				
	[kN]	t.o.v. B2 [%]	t.o.v. BL2.1 [%]	t.o.v. BL2.2 [%]	t.o.v. BLA2.6 [%]
B2	56,8	0,0%	-33,6%	-30,4%	-33,9%
BL2.1	85,6	50,6%	0,0%	4,9%	-0,4%
BL2.2 *	81,6	43,6%	-4,6%	0,0%	-5,1%
BLA2.6 *	86,0	51,3%	0,4%	5,3%	0,0%
BLA2.7 *	88,9	56,4%	3,9%	8,9%	3,4%

**Tabel 181: Effect ankerdiameter op de breukkracht [2]**

**Tabel 181** vergelijkt de invloed van de ankerdiameter bij chemische ankers op de breukkracht. De doorsnedes van de verankering per beugelpas zijn steeds ongeveer gelijk aan elkaar. Net zoals bij mechanische ankers lijkt het beter een grotere ankerdiameter te verkiezen boven een groter aantal doorboringen in de koolstofvezelwapening.

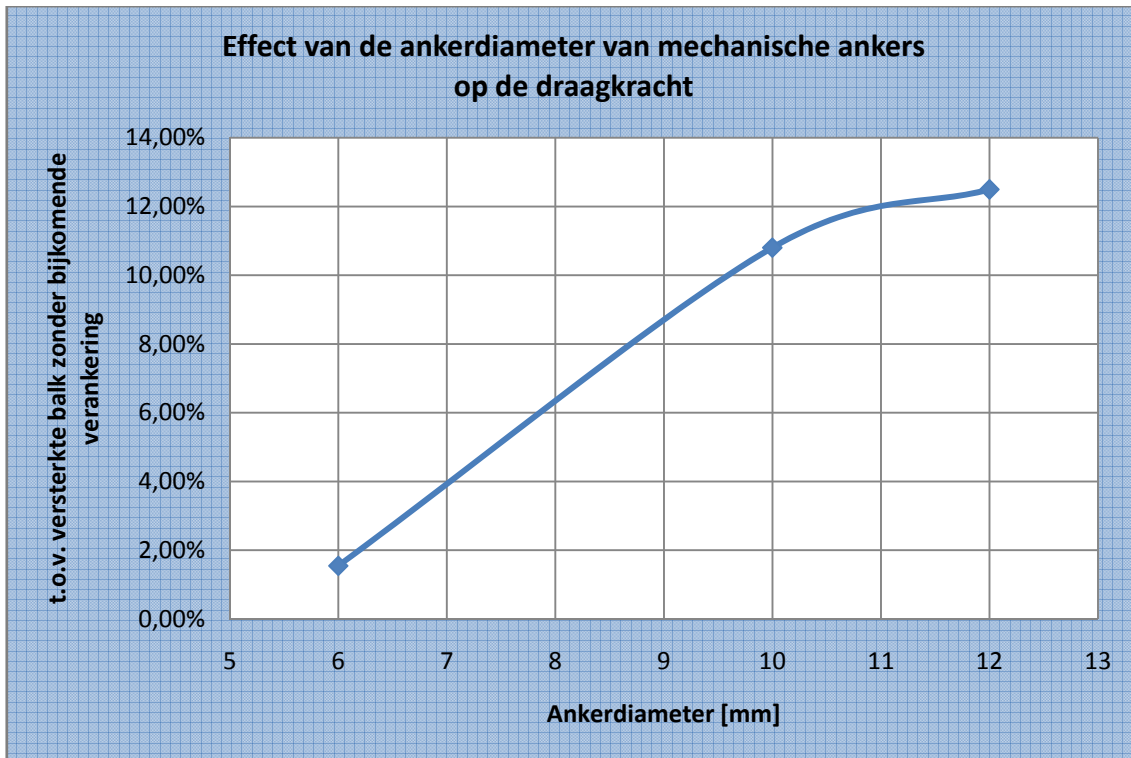
Balk	Breukkracht				
	[kN]	t.o.v. B2 [%]	t.o.v. BL2.1 [%]	t.o.v. BL2.2 [%]	t.o.v. BLA2.9 [%]
B2	56,8	0,0%	-33,6%	-30,4%	-38,3%
BL2.1	85,6	50,6%	0,0%	4,9%	-7,0%
BL2.2 *	81,6	43,6%	-4,6%	0,0%	-11,3%
BLA2.9 *	92,1	62,0%	7,6%	12,8%	0,0%
BLA2.10 *	94,1	65,5%	9,9%	15,2%	2,2%

**Tabel 182: Effect ankerdiameter op de breukkracht [3]**

**Tabel 182** vergelijkt de invloed van de ankerdiameter bij mechanische ankers. In dit geval worden M10 en M12 ankers met elkaar vergeleken. Opnieuw blijkt dat het opportuun is een grotere diameter te verkiezen. De verhoging van de draagkracht door voor een grotere diameter te kiezen is in dit geval wel kleiner dan eerder het geval was. Het is mogelijk dat de invloed van een grotere diameter afvlakt en eventueel zelfs daalt. Deze waarneming lijkt bevestigd te worden door **Grafiek 180**.

Balk	Breukkracht				
	[kN]	t.o.v. B2 [%]	t.o.v. BL2.1 [%]	t.o.v. BL2.2 [%]	t.o.v. BLA2.1 [%]
B2	56,8	0,0%	-33,6%	-30,4%	-33,8%
BL2.1	85,6	50,6%	0,0%	4,9%	-0,3%
BL2.2 *	81,6	43,6%	-4,6%	0,0%	-4,9%
BLA2.1	85,9	51,1%	0,3%	5,2%	0,0%
BLA2.2	92,6	63,0%	8,2%	13,5%	7,9%

**Tabel 183: Effect van voorspanning op de breukkracht**



Grafiek 180: Effect van de ankerdiameter van mechanische ankers

Uit **Tabel 183** blijkt dat het gebruik van voorgespannen mechanische ankers te verkiezen is boven niet-voorgespannen mechanische ankers.

Balk	Breukkracht				
	[kN]	t.o.v. B2 [%]	t.o.v. BL2.1 [%]	t.o.v. BL2.2 [%]	t.o.v. BLA2.9 [%]
B2	56,8	0,0%	-33,6%	-30,4%	-38,3%
BL2.1	85,6	50,6%	0,0%	4,9%	-7,0%
BL2.2 *	81,6	43,6%	-4,6%	0,0%	-11,3%
BLA2.2 *	92,6	63,0%	8,2%	13,5%	0,6%
BLA2.9 *	92,1	62,0%	7,6%	12,8%	0,0%

Tabel 184: Effect van de verankeringslengte van mechanische ankers op de breukkracht

Uit **Tabel 184** blijkt dat de verankeringslengte van de ankers nauwelijks een invloed heeft op de breukkracht.

Balk	Breukkracht				
	[kN]	t.o.v. B2 [%]	t.o.v. BL2.1 [%]	t.o.v. BL2.2 [%]	t.o.v. BLA2.2 [%]
B2	56,8	0,0%	-33,6%	-30,4%	-38,6%
BL2.1	85,6	50,6%	0,0%	4,9%	-7,6%
BL2.2 *	81,6	43,6%	-4,6%	0,0%	-11,9%
BLA2.2	92,6	63,0%	8,2%	13,5%	0,0%
BLA2.3 *	96,0	68,9%	12,2%	17,6%	3,6%

Tabel 185: Effect verlijming van de verdeelplaatjes op de breukkracht

Uit **Tabel 185** blijkt dat de verlijming van de verdeelplaatjes op de koolstofvezelwapening naast het verhinderen van inscheuringen in de koolstofvezelwapening ook het verhogen van de draagkracht als voordeel heeft.

Balk	Breukkracht				
	[kN]	t.o.v. B2 [%]	t.o.v. BL2.1 [%]	t.o.v. BL2.2 [%]	t.o.v. BLA2.12 [%]
B2	56,8	0,0%	-33,6%	-30,4%	-27,9%
BL2.1	85,6	50,6%	0,0%	4,9%	8,5%
BL2.2 *	81,6	43,6%	-4,6%	0,0%	3,5%
BLA2.8 *	81,8	44,0%	-4,4%	0,2%	3,7%
BLA2.12 *	78,9	38,8%	-7,8%	-3,4%	0,0%

**Tabel 186: Effect verlijming van de koolstofvezelwapening**

Uit **Tabel 186** blijkt dat de verlijming van de koolstofvezelwapening een positieve invloed op de draagkracht heeft.

Uit de voorgaande tabellen is het mogelijk een overzicht van genomen maatregelen en hun respectievelijke bijdrage tot de draagkracht van een versterkte balk zonder bijkomende verankering te maken.

MAATREGEL	t.o.v. BLx.x
geen bijkomende verankering	0%
niet-voorgespannen M10 anker	3%
voorgespannen M10 anker	11%
voorgespannen M10 anker met grotere verankeringslengte	10%
voorgespannen M10 anker en verlijmd verdeelplaatje	15%

**Tabel 187: Genomen maatregelen en hun respectievelijke bijdrage**

**Tabel 189** zet de empirisch bepaalde breukkrachten naast de theoretisch berekende krachten. Het is echter onmogelijk om uit deze gegevens een besluit te nemen omtrent de theoretische berekeningen, vermits het verschil tussen de rekenwaarden en de werkelijke waarden van de materiaalkarakteristieken te groot is.

Balk	Breukkracht		UGT		GGT		$P_u$	
	[kN]	[kN]	t.o.v. breukkracht [%]	[kN]	t.o.v. breukkracht [%]	[kN]	t.o.v. breukkracht [%]	
B2	56,8	37,7	-33,7%	26,2	-53,9%	36,7	-35,4%	
BL2.1	85,6	95,6	11,6%	87,2	1,9%	70,0	-18,2%	
BL2.2 *	81,6	95,6	17,1%	87,2	6,8%	70,0	-14,2%	
BLA2.1	85,9	95,6	11,3%	87,2	1,6%	70,0	-18,4%	
BLA2.2	92,6	95,6	3,1%	87,2	-5,9%	70,0	-24,4%	
BLA2.3 *	96,0	95,6	-0,5%	87,2	-9,2%	70,0	-27,1%	
BLA2.4 *	74,9	95,6	27,6%	87,2	16,4%	70,0	-6,5%	
BLA2.5	84,9	95,6	12,6%	87,2	2,7%	70,0	-17,5%	
BLA2.6 *	86,0	95,6	11,2%	87,2	1,4%	70,0	-18,5%	
BLA2.7 *	88,9	95,6	7,5%	87,2	-1,9%	70,0	-21,2%	
BLA2.8 *	81,8	95,6	16,8%	87,2	6,6%	70,0	-14,4%	
BLA2.9 *	92,1	95,6	3,8%	87,2	-5,3%	70,0	-23,9%	
BLA2.10 *	94,1	95,6	1,6%	87,2	-7,3%	70,0	-25,5%	
BLA2.11 *	67,4	95,6	41,8%	87,2	29,4%	70,0	3,9%	
BLA2.12 *	78,9	95,6	21,2%	87,2	10,6%	70,0	-11,2%	
BLA2.13 *	95,5	95,6	0,1%	87,2	-8,6%	70,0	-26,6%	

**Tabel 188: Breukkrachten en theoretisch berekende krachten van reeks 2**

### 5.18.2 Andere kenmerkende krachten

Tabel 190 toont de krachten waarbij de doorbuiging respectievelijk L/500 en L/250 bedraagt.

Balk	Andere kenmerkende krachten							
	doorbuiging = L/500				doorbuiging = L/250			
	[kN]	t.o.v. B2 [%]	t.o.v. BL2.1 [%]	t.o.v. BL2.2 [%]	[kN]	t.o.v. B2 [%]	t.o.v. BL2.1 [%]	t.o.v. BL2.2 [%]
B2	29,0	0,0%	-15,3%	-21,6%	46,0	0,0%	-18,1%	-23,1%
BL2.1	34,2	18,1%	0,0%	-7,4%	56,1	22,1%	0,0%	-6,1%
BLA2.1	34,0	17,3%	-0,6%	-8,0%	57,5	25,1%	2,5%	-3,8%
BLA2.2	30,8	6,2%	-10,1%	-16,7%	51,7	12,6%	-7,8%	-13,4%
BLA2.3 *	36,1	24,8%	5,7%	-2,2%	60,9	32,5%	8,6%	1,9%
BLA2.4 *	35,2	21,5%	2,9%	-4,7%	60,4	31,5%	7,7%	1,1%
BLA2.5	26,9	-7,1%	-21,3%	-27,1%	42,4	-7,7%	-24,4%	-29,0%
BLA2.6 *	33,2	14,7%	-2,9%	-10,1%	57,9	26,0%	3,2%	-3,1%
BLA2.7 *	34,5	19,1%	0,9%	-6,6%	55,9	21,7%	-0,3%	-6,5%
BLA2.8 *	35,3	21,9%	3,3%	-4,4%	57,1	24,2%	1,7%	-4,5%
BLA2.9 *	34,8	20,3%	1,9%	-5,7%	58,2	26,6%	3,7%	-2,7%
BLA2.10 *	33,6	16,1%	-1,7%	-9,0%	56,6	23,2%	0,9%	-5,3%
BLA2.11 *	32,4	11,7%	-5,4%	-12,4%	53,9	17,3%	-3,9%	-9,8%
BLA2.12 *	31,5	8,8%	-7,8%	-14,7%	52,1	13,3%	-7,2%	-12,9%
BLA2.13 *	32,5	12,0%	-5,1%	-12,1%	54,1	17,7%	-3,6%	-9,5%
BL2.2 *	36,9	27,5%	8,0%	0,0%	59,8	30,0%	6,5%	0,0%

Tabel 189: Andere kenmerkende krachten van reeks 2

De koolstofvezelwapening blijkt in de meeste gevallen de stijfheid van een onversterkte balk te verhogen. Dit is echter niet het geval bij balk BLA2.5. De bijkomende verankering lijkt over het algemeen een negatieve invloed te hebben op de stijfheid van een versterkte balk zonder bijkomende verankering. Dit lijkt logisch, vermits de koolstofvezelwapening steeds beschadigd wordt bij een verankering.

### 5.18.3 Dwarskrachtencapaciteit

**Tabel 191** vergelijkt de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit van de balken met de empirisch bepaalde dwarskrachten.

Balk	Theoretische $V_{\max}$ [kN]		Empirische
	beton: 0%	beton: 100%	$V_{\max}$ [kN]
B2	122,8	149,0	56,8
BL2.1	122,8	149,0	85,6
BL2.2	122,8	149,0	85,9
BLA2.1	122,8	149,0	92,6
BLA2.2	122,8	149,0	96,0
BLA2.3	122,8	149,0	74,9
BLA2.4	122,8	149,0	84,9
BLA2.5	122,8	149,0	86,0
BLA2.6	122,8	149,0	88,9
BLA2.7	122,8	149,0	81,8
BLA2.8	122,8	149,0	92,1
BLA2.9	122,8	149,0	94,1
BLA2.10	122,8	149,0	67,4
BLA2.11	122,8	149,0	78,9
BLA2.12	122,8	149,0	95,5
BLA2.13	122,8	149,0	81,6

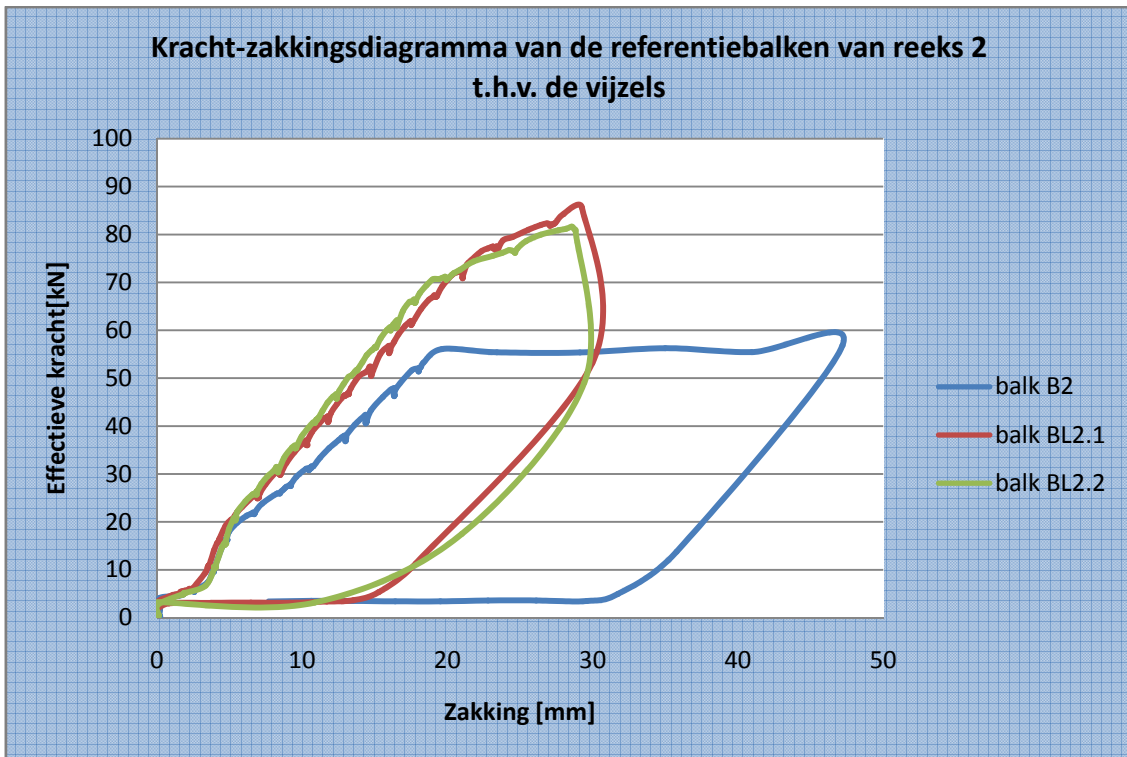
**Tabel 190: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde dwarskrachtencapaciteit**

In geen enkel geval wordt de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit overschreden. Hierbij is echter geen rekening gehouden met het eigengewicht van de balken. Maar zelf rekening houdende met het eigengewicht, dan nog zou de theoretisch berekende dwarskrachtencapaciteit niet overschreden worden.

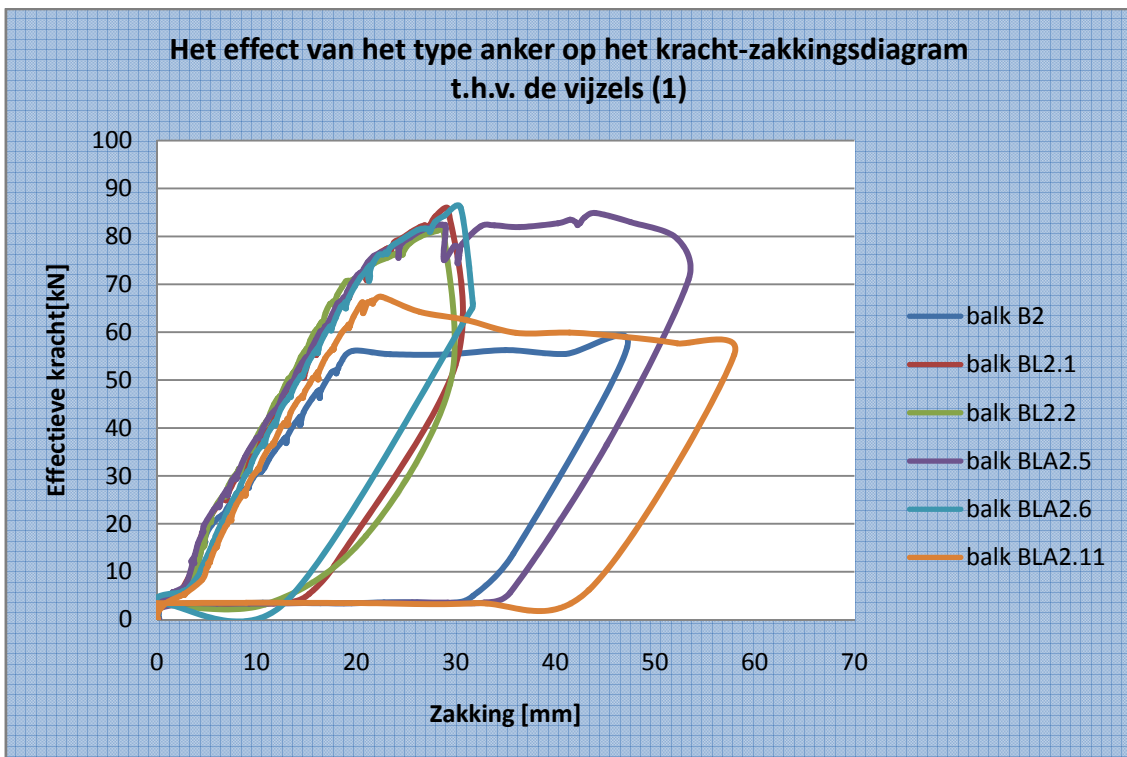


5.18.4 Doorbuiging

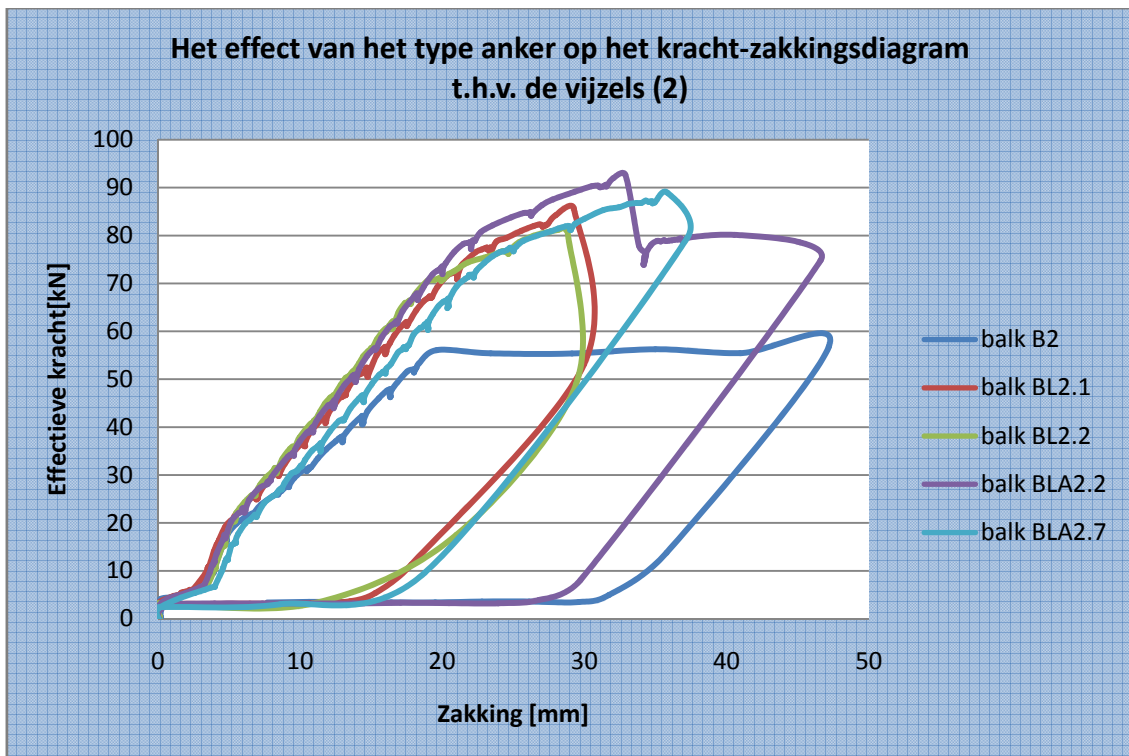
Grafiek 181 tot Grafiek 190 vergelijken de verschillende kracht-zakkingsdiagramma van reeks 2 t.h.v. de vijzels met elkaar.



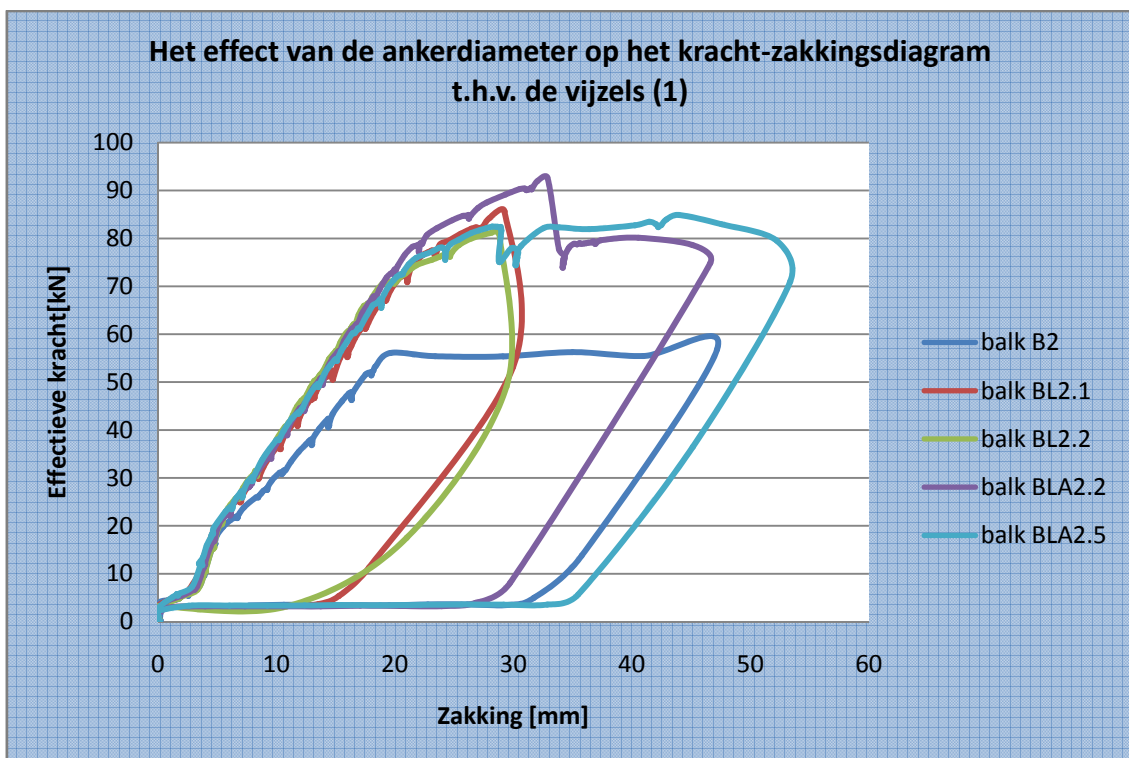
Grafiek 181: Kracht-zakkingsdiagramma van de referentiebalken van reeks 2 t.h.v. de vijzels



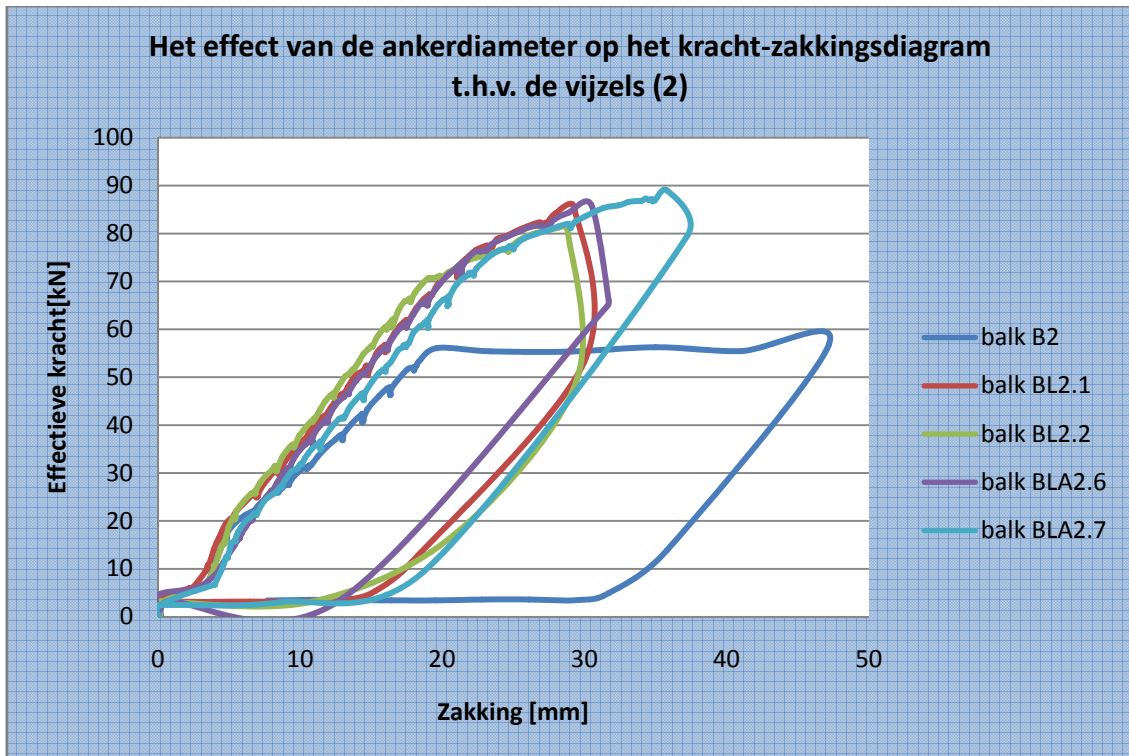
Grafiek 182: Effect type anker op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels [1]



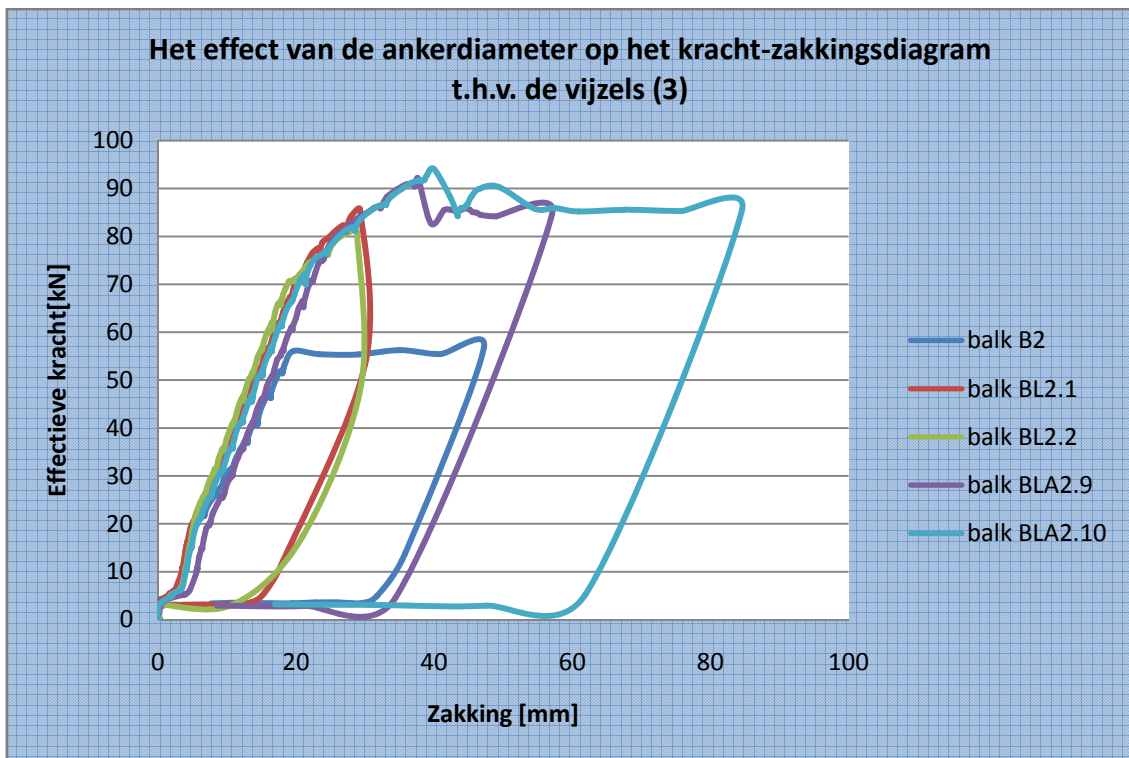
Grafiek 183: Effect type anker op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels [2]



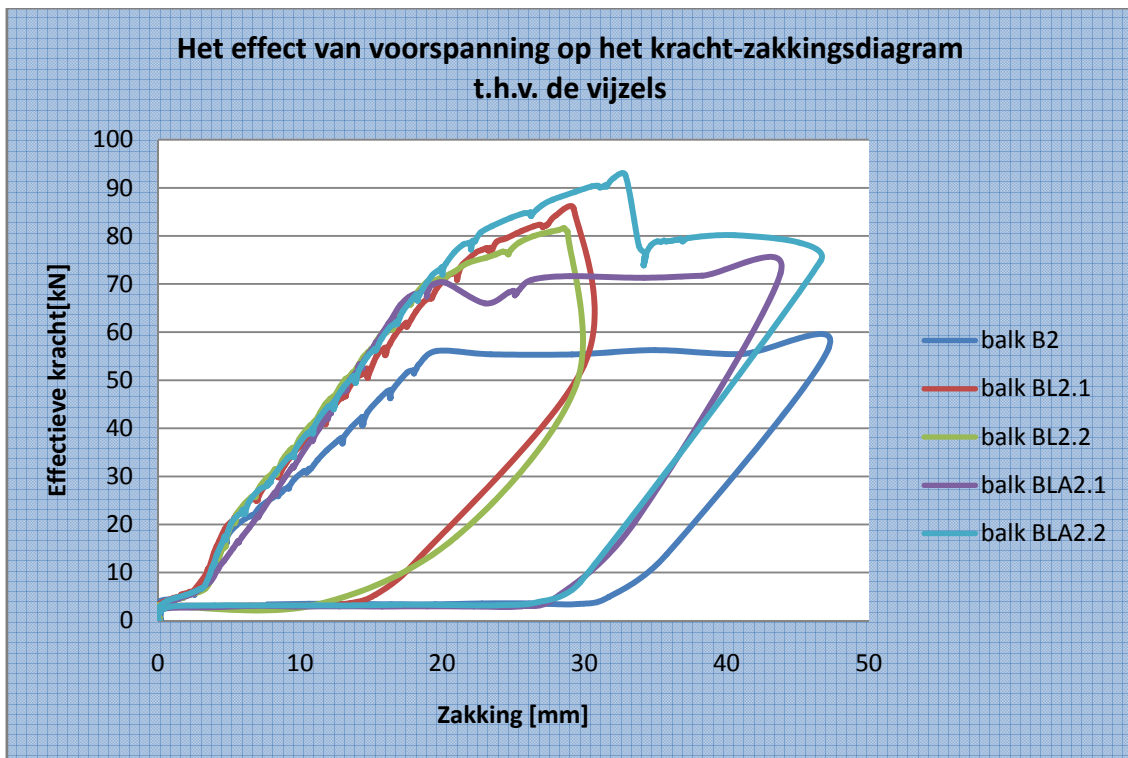
Grafiek 184: Effect ankerdiameter op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels [1]



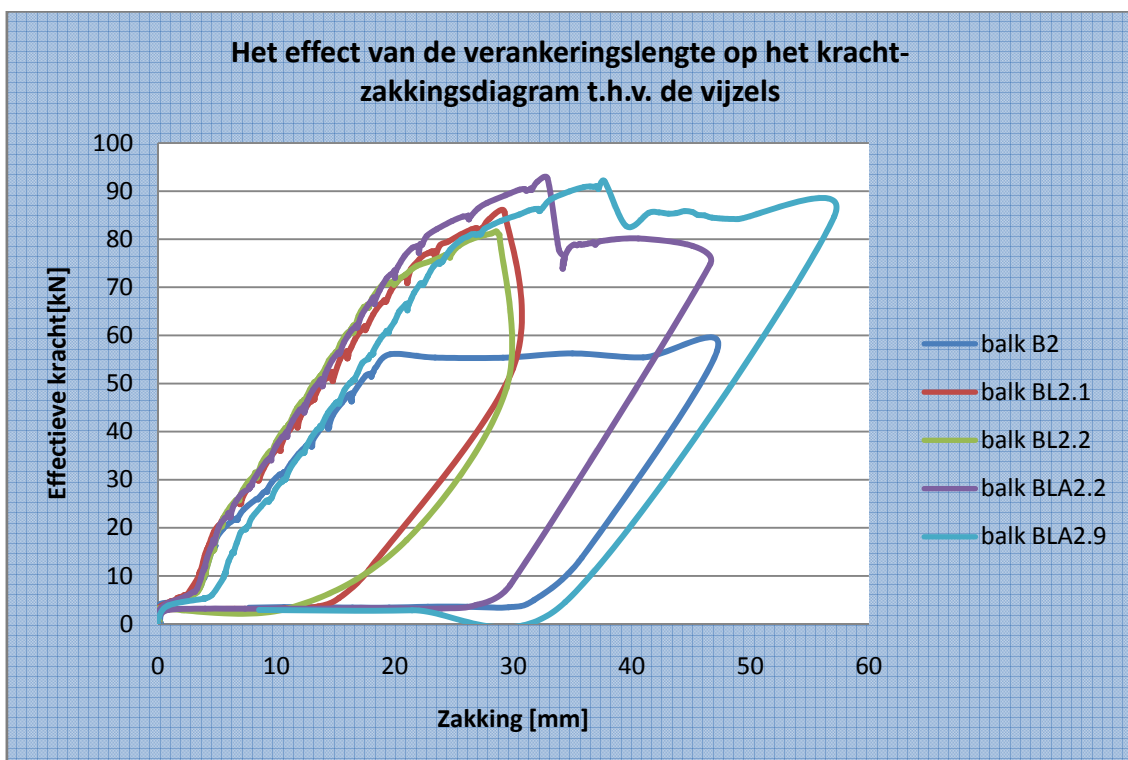
Grafiek 185: Effect ankerdiameter op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels [2]



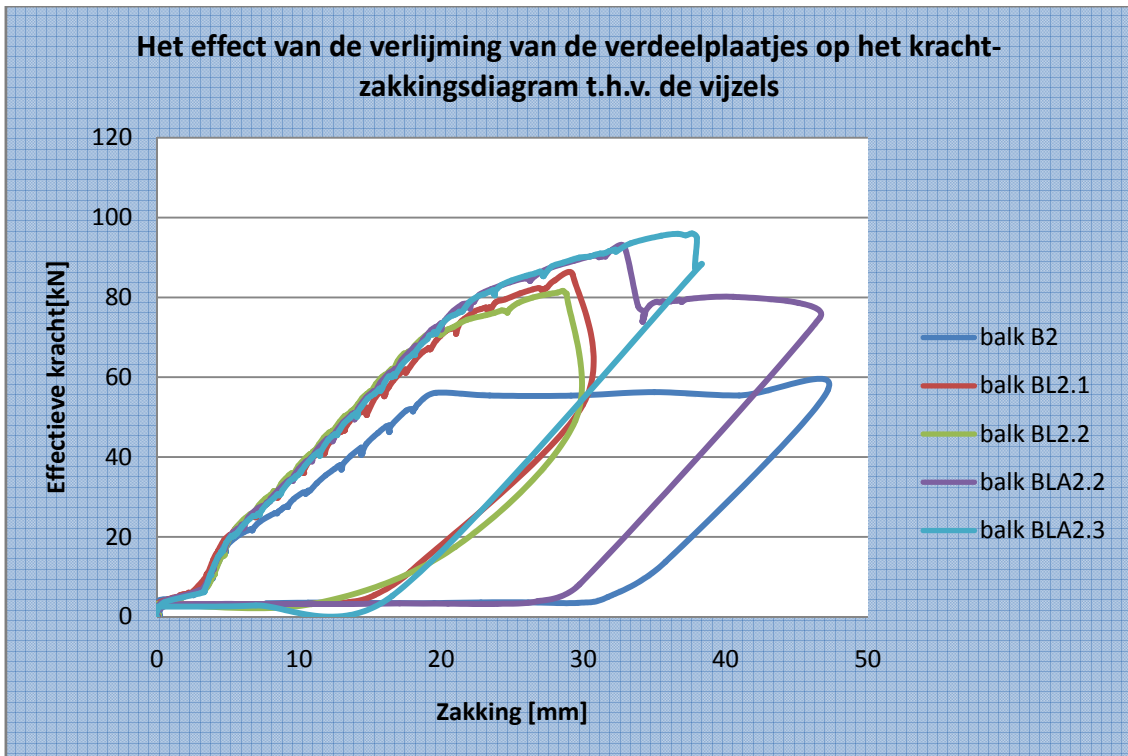
Grafiek 186: Effect ankerdiameter op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels [3]



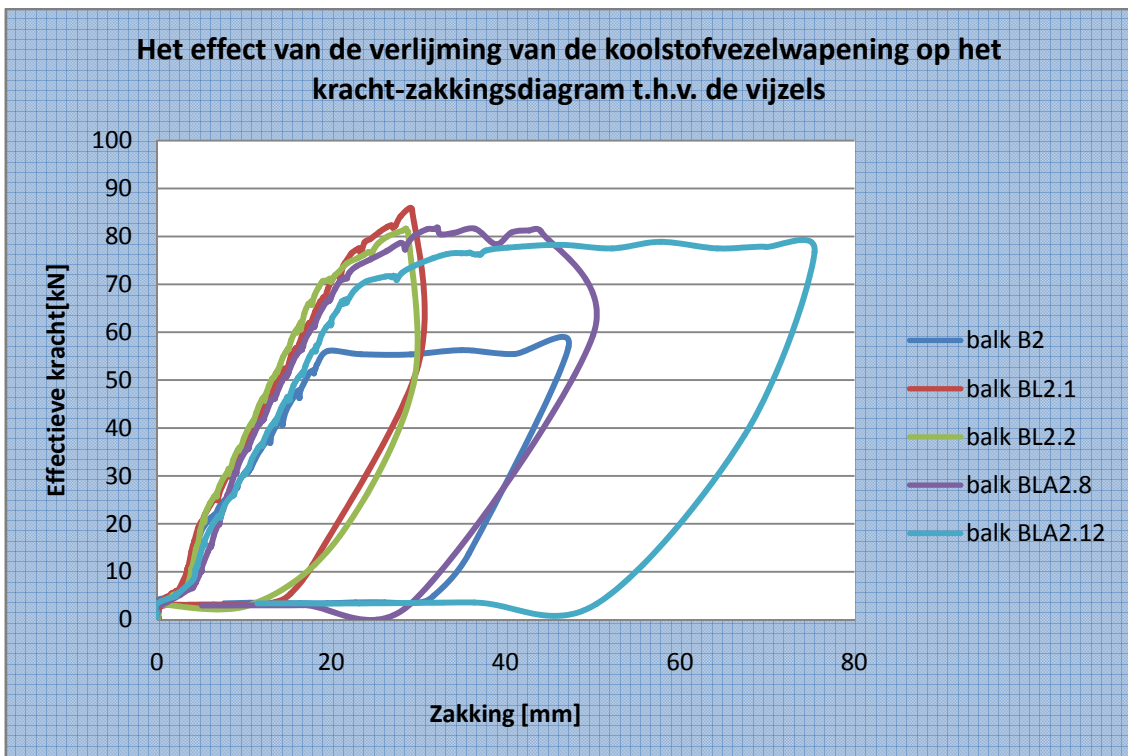
Grafiek 187: Effect voorspanning op het kracht-zakkingdiagram t.h.v. de vijzels



Grafiek 188: Effect verankeringslengte op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels



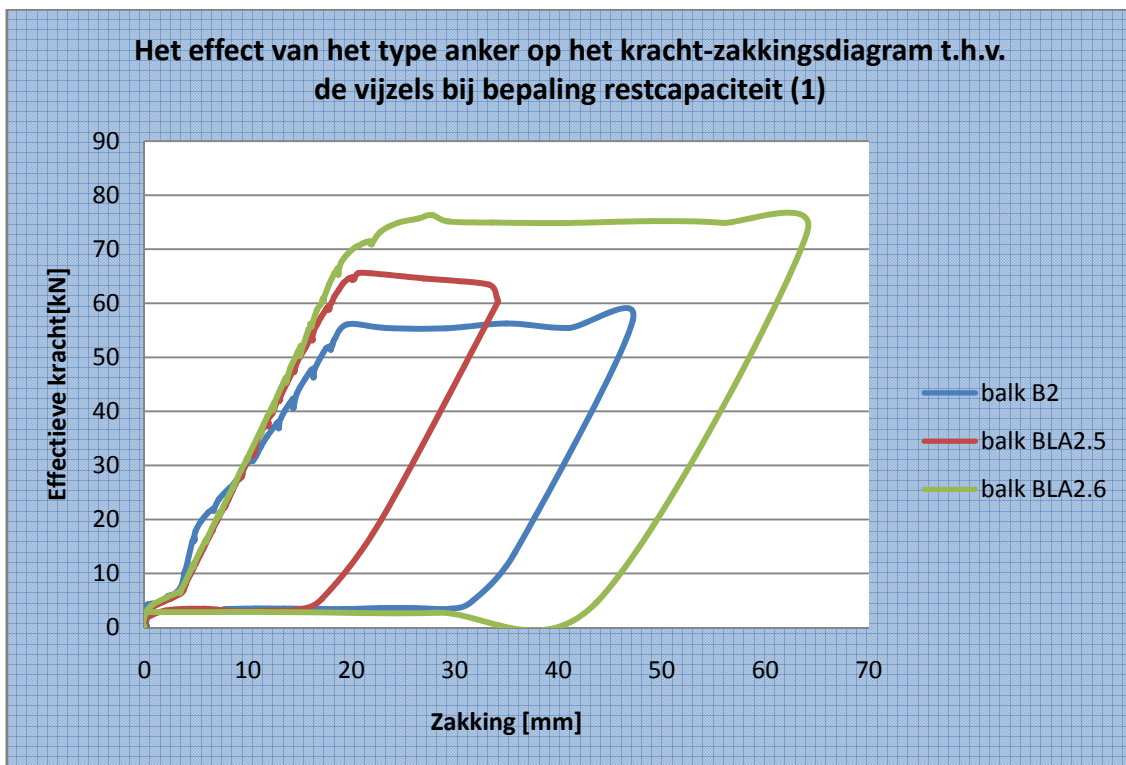
Grafiek 189: Effect verlijming van de verdeelplaatjes op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels



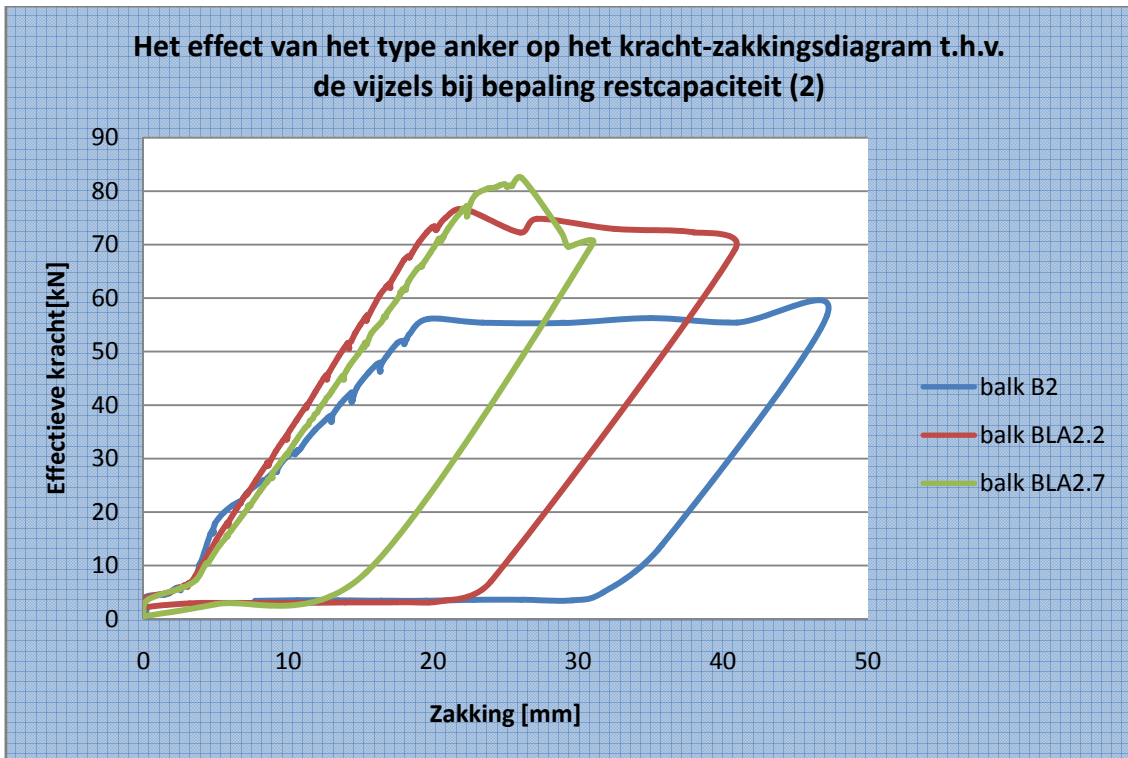
Grafiek 190: Effect verlijming van de koolstofvezelwapening op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels

De grafieken van de versterkte balken kennen steeds een steiler verloop dan de grafiek van balk B1. Dit wijst op een hogere stijfheid van de versterkte balken. Meestal schommelen de grafieken van de versterkte balken met bijkomende verankering rond de grafieken van de balken BL2.1 en BL2.2.

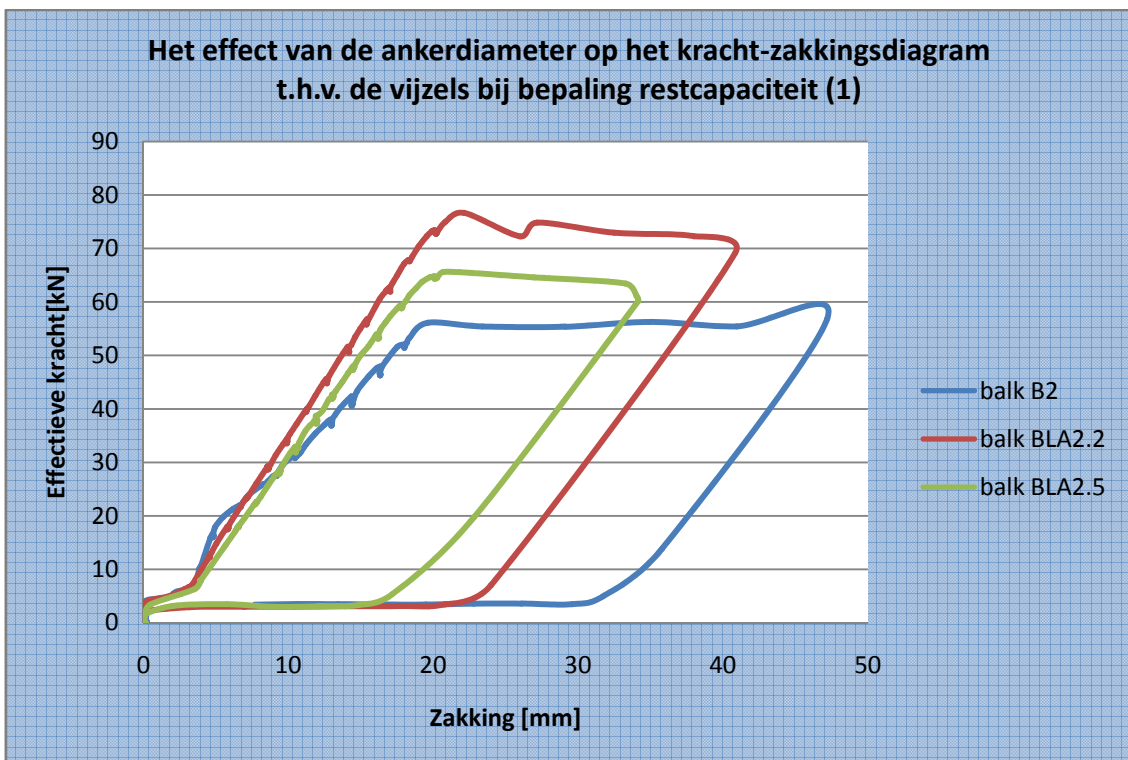
**Grafiek 191** tot **Grafiek 198** vergelijken de verschillende kracht-zakkingsdiagramma van de versterkte balken met bijkomende verankering t.h.v. de vijzels bij de bepaling van de restcapaciteit. De restcapaciteit blijkt steeds hoger te zijn dan de draagkracht van balk B2.



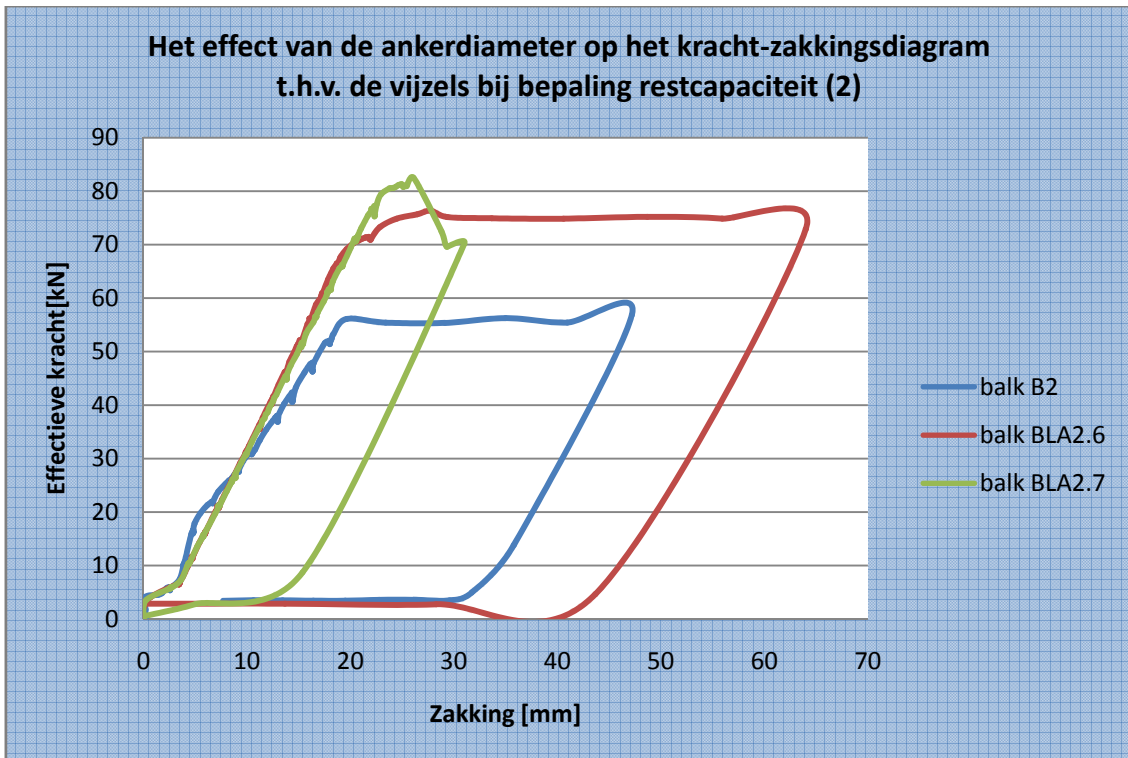
Grafiek 191: Effect type anker op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit [1]



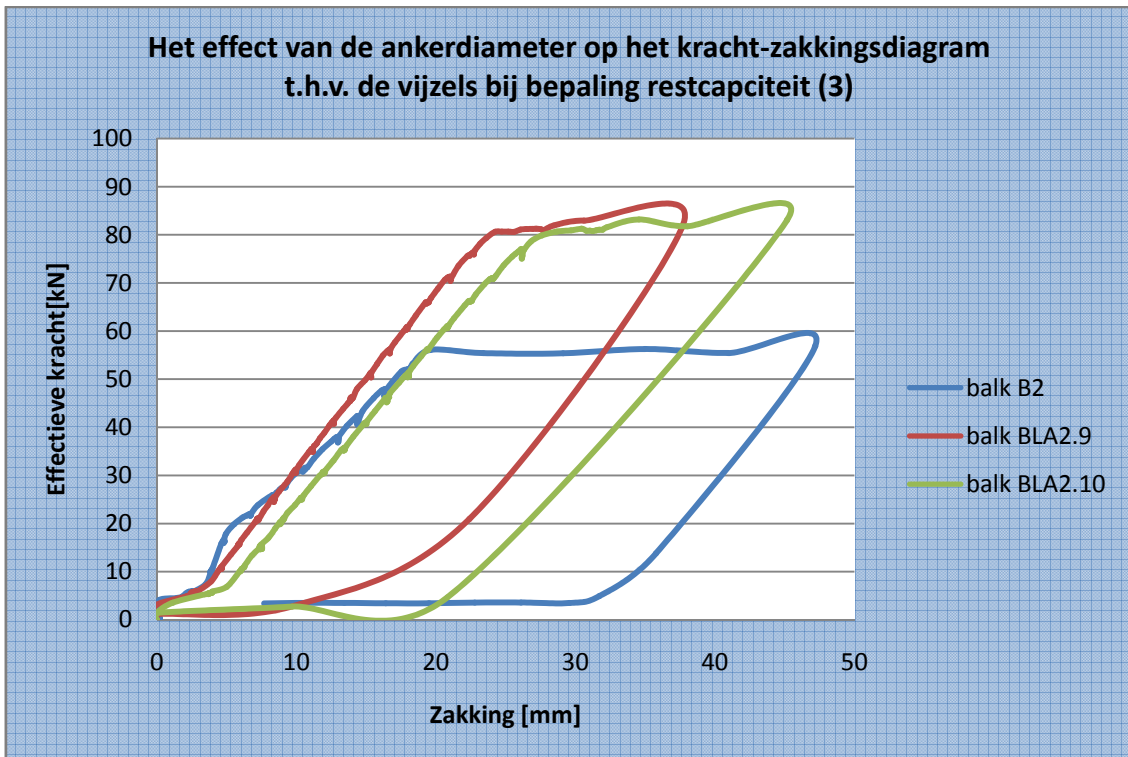
Grafiek 192: Effect type anker op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit [2]



Grafiek 193: Effect ankerdiameter op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit [1]

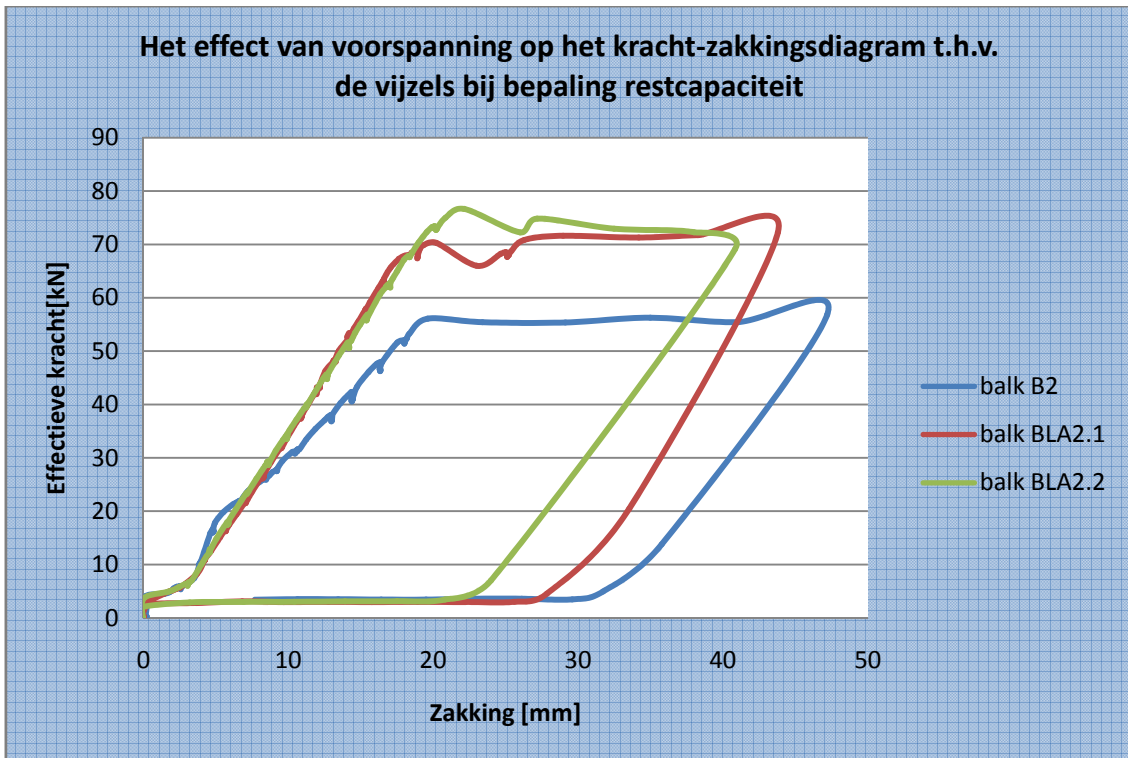


Grafiek 194: Effect ankerdiameter op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit [2]

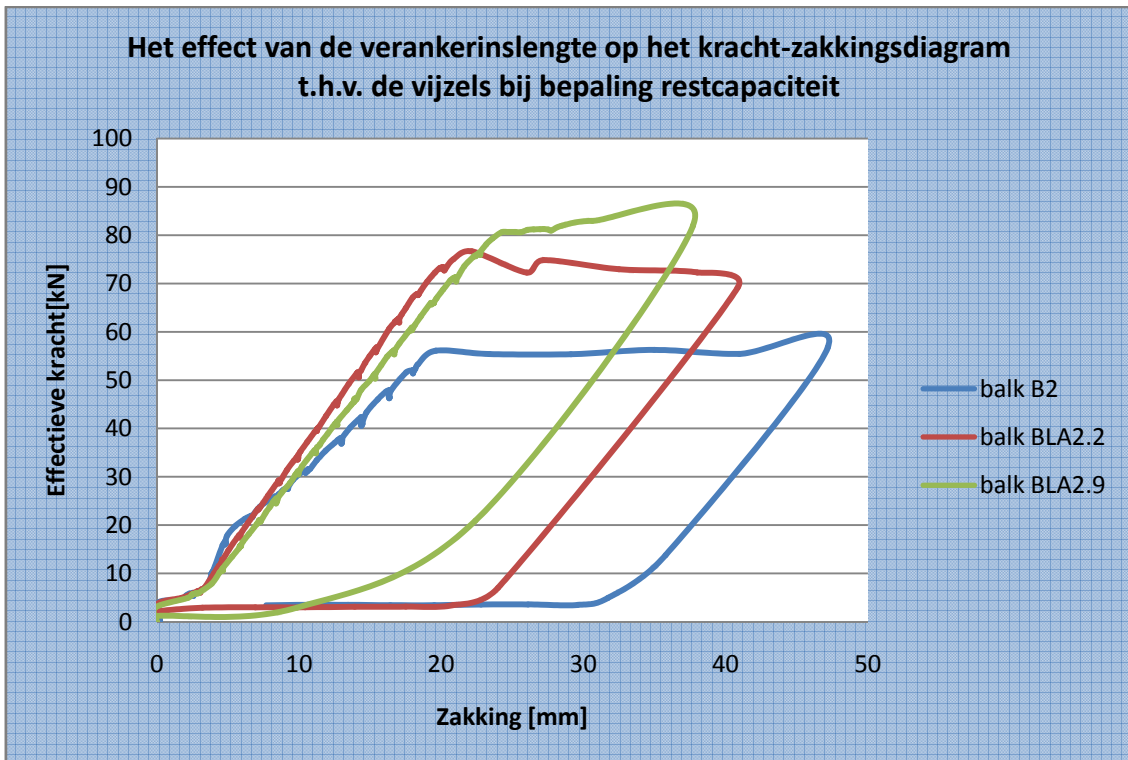


Grafiek 195: Effect ankerdiameter op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit [3]

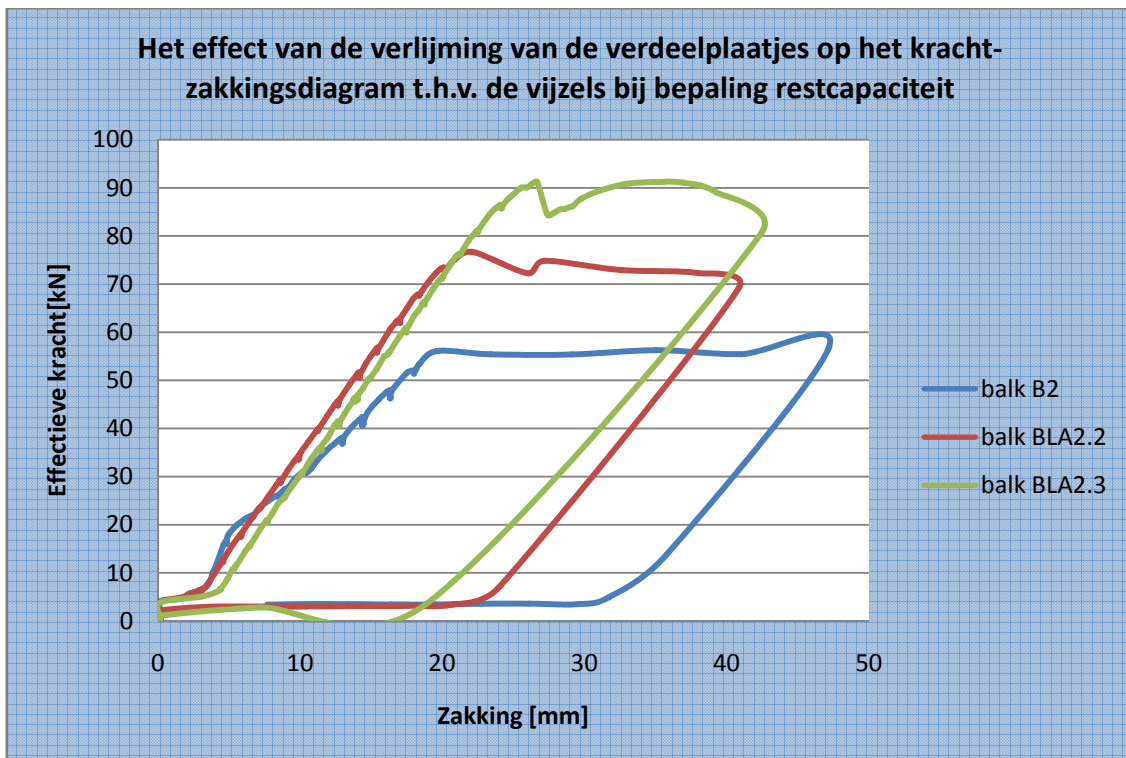




Grafiek 196: Effect voorspanning op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vizels bij bepaling restcapaciteit



Grafiek 197: Effect verankeringslengte op kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vizels bij bepaling restcapaciteit



**Grafiek 198: Effect verlijming verdeelplaatjes op het kracht-zakkingsdiagram t.h.v. de vijzels bij bepaling restcapaciteit**

Uit deze grafieken blijkt dat chemische ankers een voordeel hebben t.o.v. mechanische ankers. Mogelijks vermindert de werking van mechanische ankers wanneer het beton scheurt. Door de scheurvorming vermindert mogelijks de spankracht in het boorgat rond de conus en de ring van de mechanische verankering. Ook de ankerdiameter heeft een invloed op de restcapaciteit. Net zoals bij de breukkracht lijkt deze invloed af te vlakken bij groter wordende diameters. Het al of niet voorspannen van de mechanische ankers beïnvloedt de restcapaciteit bijna niet. Zoals reeds eerder vermeld vermindert mogelijks de spankracht in het beton, zodat een voorspanning weinig nut heeft. Een grotere verankeringslengte daarentegen heeft wel een grote invloed op de restcapaciteit. De conus van de ankers bevindt zich immers dieper in het beton, waar de scheuren minder wijd zijn, zodat er minder spankracht verloren gaat. Ook de verlijming van de verdeelplaatjes beïnvloedt de restcapaciteit op een positieve manier. Het verlijmen van de verdeelplaatjes verhindert immers het inscheuren, waardoor de koolstofvezelwapening langer kan meewerken.

### 5.18.5 Scheurvorming

**Tabel 192** vergelijkt de verschillende waarden van het initieel scheurmoment met elkaar.

Balk	Theoretisch scheurmoment [kN m]	Empirisch scheurmoment [kN m]	
		Uit het kracht- Zakkingsdiagram [kN.m]	Uit het optekenen van de scheuren [kN.m]
B2	9,9	12,0	24,0
BL2.1	10,1	18,0	30,0
BL2.2	10,1	???	24,0
BLA2.1	10,1	6,0	24,0
BLA2.2	10,1	18,0	30,0
BLA2.3	10,1	18,0	24,0
BLA2.4	10,1	6,0	18,0
BLA2.5	10,1	11,0	24,0
BLA2.6	10,1	???	30,0
BLA2.7	10,1	18,0	36,0
BLA2.8	10,1	6,0	24,0
BLA2.9	10,1	18,0	24,0
BLA2.10	10,1	18,0	18,0
BLA2.11	10,1	6,0	24,0
BLA2.12	10,1	12,0	30,0
BLA2.13	10,1	12,0	24,0

**Tabel 191: Theoretisch berekende en empirisch bepaalde waarden voor het initieel scheurmoment**

De waarden voor het initieel scheurmoment liggen meestal dicht bij elkaar. De invloed van de koolstofvezelwapening op het initieel scheurmoment blijkt verwaarloosbaar te zijn. Ook in de theoretische berekeningen komt dit naar voren. De invloed van de koolstofvezelwapening beperkt zich tot het traagheidsmoment en de ligging van de neutrale vezel.

### 5.18.6 Besluit

Bij de aanvang van reeks 2 werd een verdubbeling van de momentenlijn van een onversterkte balk als doel gesteld. **Tabel 193** geeft de procentuele verbeteringen weer die bereikt zijn gedurende de proeven.

Balk	[kNm]	t.o.v. B2		
		UGT [%]	Mu [%]	proef [%]
B2	68,2	38,4%	44,9%	0,0%
BL2.1	102,7	108,4%	118,1%	50,6%
BL2.2 *	98,0	98,7%	108,0%	43,6%
BLA2.1	103,1	109,1%	118,9%	51,1%
BLA2.2	111,2	125,6%	136,1%	63,0%
BLA2.3 *	115,2	133,8%	144,7%	68,9%
BLA2.4 *	89,9	82,4%	90,9%	31,8%
BLA2.5	101,9	106,7%	116,4%	49,4%
BLA2.6 *	103,2	109,3%	119,1%	51,3%
BLA2.7 *	106,7	116,4%	126,6%	56,4%
BLA2.8 *	98,2	99,2%	108,6%	44,0%
BLA2.9 *	110,5	124,1%	134,6%	62,0%
BLA2.10 *	112,9	129,0%	139,7%	65,5%
BLA2.11 *	80,9	64,1%	71,8%	18,6%
BLA2.12 *	94,7	92,0%	101,0%	38,8%
BLA2.13 *	114,6	132,4%	143,3%	68,0%

**Tabel 192: Behaalde resultaten**

## Algemeen besluit

---

In sommige gevallen kan het noodzakelijk zijn bestaande constructies te versterken. Een mogelijke manier is het lijmen van koolstofvezelwapening. De goede werking van deze techniek is gebaseerd op de samenwerking tussen de opgelijmde koolstofvezelwapening en het beton. Deze samenwerking is gerealiseerd door de verlijming van de koolstofvezelwapening. Indien de toelaatbare spanningen overschreden worden, kan breuk optreden door concrete rip-off of door peeling. In deze Masterproef is op zoek gegaan naar een model voor een bijkomende verankering bij balken in gewapend beton die versterkt zijn met gelijmde multidirectionele koolstofvezelwapening.

Van de vele parameters die een invloed kunnen hebben, werden de volgende onderzocht:

- het type anker;
- de ankerdiameter;
- de verankeringslengte van de ankers;
- de tussenafstand tussen de ankers;
- de verlijming van de verdeelplaatjes.

Het gebruik van koolstofvezelwapening blijkt steeds een positieve invloed te hebben op de draagkracht van een onversterkte balk. Door de koolstofvezelwapening bijkomend te verankeren in de dwarskrachtenzone kan het optreden van concrete rip-off en peeling voorkomen worden. De voorspanning van de bouten blijkt hier een zekere invloed te hebben. Zo wordt met voorgespannen bouten een hogere bezwijklast bereikt dan met niet-voorgespannen bouten. Ook blijkt de koolstofvezelwapening vaak door te scheuren door deze bijkomende verankering. Dit kan deels verholpen worden door de verdeelplaatjes te lijmen op de koolstofvezelwapening.

Het gebruik van nagels blijkt geen succes te zijn. Door het vernagelen kan zelfs een vroegtijdige onthechting optreden.

Het gebruik van chemische ankers en van ankers met een grotere verankeringslengte doet de restcapaciteit stijgen. De ankers worden immers minder snel uit het beton getrokken, waardoor meer trekkrachten opgenomen kunnen worden door de koolstofvezelwapening.

Verder is ook ondervonden dat korte koolstofvezelwapening gevoeliger is voor concrete rip-off dan lange koolstofvezelwapening. Deze concrete rip-off kan uitgesteld worden door een bijkomende mechanische verankering op de uiteinden van de koolstofvezelwapening.

1. Aanbeveling 91. (2002). *Versterken van gewapend-betonconstructies met uitwendig gelijmde koolstofvezelwapening*. Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving.
2. Adriaenssens, M., P. Coudijzer, et al. (2005). *Beproeving gewapende betonbalken voorzien van koolstofvezelwapening met of zonder bijkomende verankering*. Departement Industriële Wetenschappen. Gent, Hogeschool Gent. **Industrieel Ingenieur Bouwkunde**.
3. Bank, L.C., M.G. Oliva, et al. (2006). *Double-Layer Prefabricated FRP Grids for Rapid Bridge Deck Construction: Case Study*. Journal of Composites for Construction **10**(3): 204-212.
4. *Betontechnologie*. (2006) Brussel, Belgische BetonGroepering.
5. *Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced Polymer (FRP) for Nuclear Power Plant*. Geraadpleegd op 8 mei 2008 via [http://www.quakewrap.com/ConcreteBeamsStrengthenedwithFiberReinforcedPolymer\(FRP\)forNUCLEARPOWERPLANT.php](http://www.quakewrap.com/ConcreteBeamsStrengthenedwithFiberReinforcedPolymer(FRP)forNUCLEARPOWERPLANT.php)
6. FIB Bulletin 14. (2001). *Externally bonded FRP reinforcement for RC Structures*. CEB-FIP.
7. *Kledingzaak H&M Brussel*. Geraadpleegd op 8 mei 2008 via <http://www.ecc-belgium.be/default.aspx?lc=nl&NavCatID=162>
8. Matthys, S. (2000). *Constructief gedrag en ontwerp van betonconstructies versterkt met uitwendig gelijmde vezelcomposietwapening*. Faculteit Toegepaste Wetenschappen. Gent, Universiteit Gent. **Doctor in de Toegepaste Wetenschappen, richting Bouwkunde**.
9. Nishizaki, I., N. Takeda, et al. (2006). *A Case Study of Life Cycle Cost based on a Real FRP Bridge*. Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Miami: 99-102.
10. Ritzen, J., R. Smet (2006). *Betonbouw: Berekenen, dimensioneren, constructie. Deel 1: Grondbegrippen, courante gevallen*. Academia Press. Gent.

11. Saïdi Mazarou, N., W. Van Audenhove, et al. (2006). *Studie naar het effect van bijkomende verankering van opgelijmde koolstofvezelwapening op betonbalken, met in het bijzonder de invloed op het breukmechanisme*. Departement Industriële Wetenschappen. Gent, Hogeschool Gent. **Industrieel Ingenieur Bouwkunde**.
12. Tuakta, C. (2005) *Use of fiber reinforced polymer composite in bridge structures*. Department of Civil and Environmental Engineering. Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology. **S.B. Civil Engineering**.
13. Van den Maegdenbergh, G., A.-S. Dewitte, et al. (2007). *Parametrisch onderzoek naar het structureel gedrag van balken in gewapend beton, die verstevigd worden met opgelijmde koolstoflaminaten, na verhoging van de buigstijfheid met een spacer*. Departement Toegepaste Ingenieurswetenschappen. Gent, Hogeschool Gent. **Industrieel Ingenieur Bouwkunde**.
14. Watanabe, D. (2005). *Fibre Reinforcement Polymer (FRP) Composites*. Geraadpleegd op 8 mei 2008 via <http://www.testing-engineers.com/cs3.html>

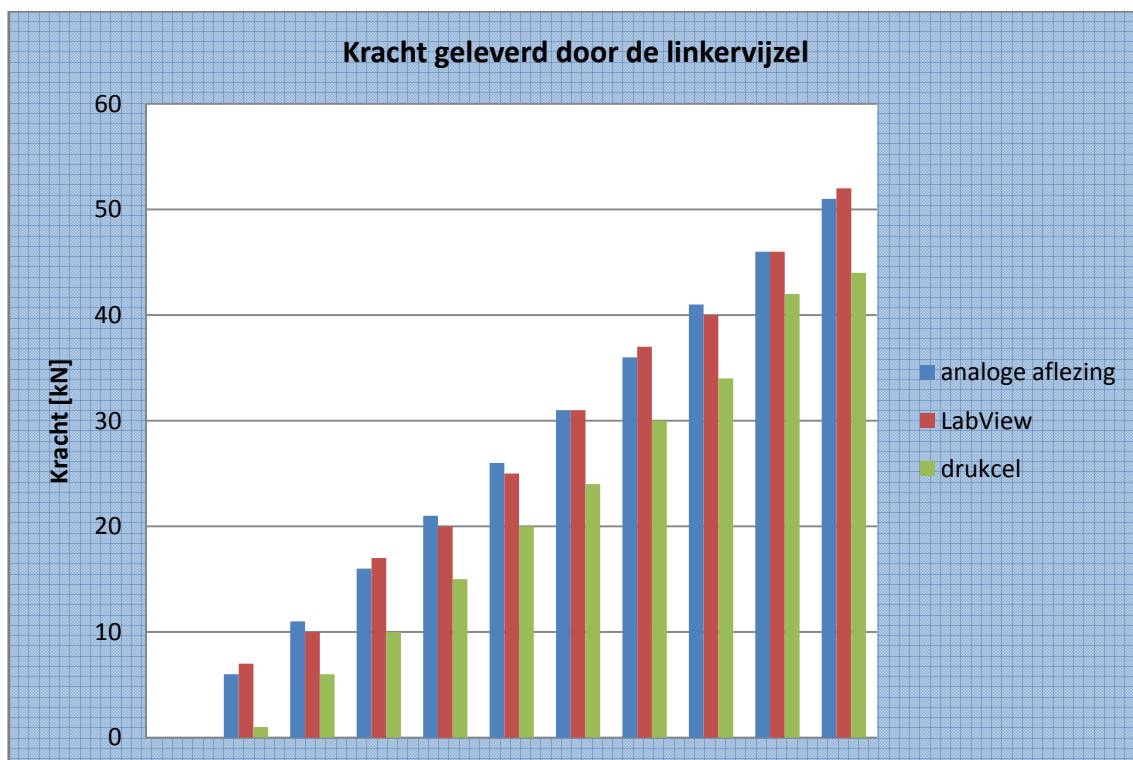
## Controle van de proefstand

Na het beëindigen van de vierpuntsbuigproeven werd de proefopstelling aan een grondige controle onderworpen. Allereerst werd de vijnzelkracht op 3 verschillende manieren afgelezen:

- analoge aflezing;
- digitale aflezing m.b.v. LabView;
- aflezing m.b.v. een drukcel onder de vijnzels.

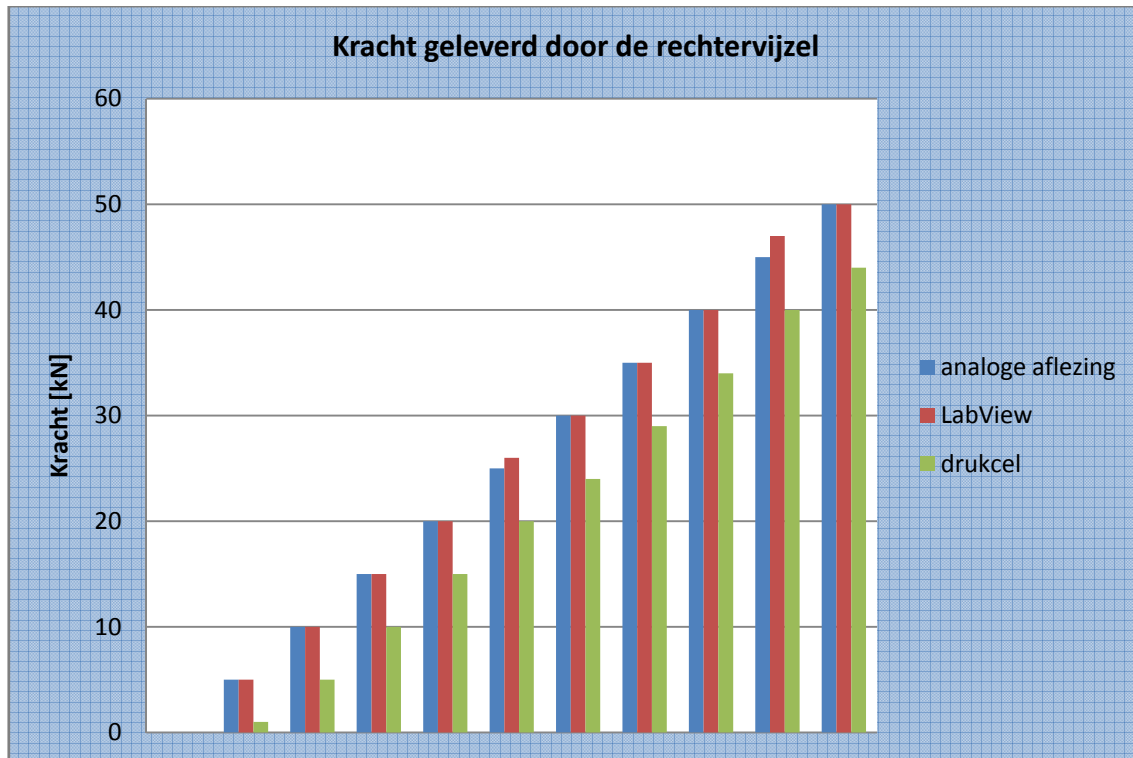
**Grafiek 199** en **Grafiek 200** geven de resultaten van deze controle weer. Allereerst blijkt er een klein verschil te zijn tussen de krachten geleverd door de linker- en de rechtervijnzel. Dit verschil valt echter eenvoudig te verklaren door het verschil in wrijvingsverliezen in de olieleidingen die naar de vijnzels leiden.

Verder geven de analoge en de digitale aflezing steeds ongeveer dezelfde resultaten weer. Hier en daar treden kleine verschillen op. De aflezing m.b.v. een drukcel onder de vijnzels blijkt echter steeds kleinere waarden, d.i. ongeveer 5 kN minder, weer te geven.



Grafiek 199: Kracht geleverd door de linkervijnzel





Grafiek 200: Kracht geleverd door de rechtersijzel

Verder bleek één van de vijzels 1 cm verschoven te zijn, zodat de hartafstand tussen de vijzels 121 cm i.p.v. de optimale afstand van 120 cm.

Alvorens dit onderzoek verder te zetten is het aan te raden de vijzels correct te positioneren.

**Technische fiche PC Carbocomp Plus**

---

**Technische fiche PC 5800/BL**

---

**Technische fiche HSA Stud Anchor**

---

Bijlagen

---

## **Detailtekeningen**

---