

Rotatiecapaciteit van plastische scharnieren in beton

Bepaling van de plastische lengte van een plastisch scharnier in beton als functie van de wapening



Begeleiders:

Prof. Ir. C.S. Kleinman
Ir. F.J.M. Lijten

Studenten:

R. Daniëls - 0538392
R.A.C. Riep - 0556885

Masterproject: Onderzoek
september 2006 - januari 2007

INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING	- 1 -
1.1. Plastische rotatiecapaciteit	- 1 -
1.2. Vastleggen van rotatiecapaciteit	- 3 -
1.3. Doel van het onderzoek	- 4 -
2. OPZET VAN HET ONDERZOEK.....	- 5 -
2.1. Doelstelling onderzoek	- 5 -
2.2. Proefstukken	- 6 -
2.3. Proefopstelling	- 8 -
2.2. Metingen	- 10 -
3. MATERIAALEIGENSCHAPPEN.....	- 14 -
3.1. Beton.....	- 14 -
3.3. Betonstaal	- 18 -
3.4. Samenvatting gegevens	- 22 -
4. THEORETISCHE BENADERING	- 24 -
4.1. Rotatie.....	- 24 -
4.2. Krommingen.....	- 26 -
4.3. Vergelijken theorie en proevenserie.....	- 30 -
5. PROEFRESULTATEN	- 31 -
5.1. Bezwijkbelastingen	- 31 -
5.2. Rotatie.....	- 32 -
5.2. Krommingen.....	- 33 -
6. PLASTISCHE LENGTE	- 36 -
6.1. Plastische lengte volgens theorie	- 36 -
6.2. Plastische lengte uit proeven	- 38 -
7. CONCLUSIE	- 39 -
8. AANBEVELINGEN.....	- 40 -
BRONNENLIJST	- 41 -
BIJLAGE A: KALIBRATIEGRAFIEKEN.....	- 42 -
BIJLAGE B: Σ-E-DIAGRAMMEN STAAL.....	- 46 -
BIJLAGE C: M-K-DIAGRAMMEN.....	- 49 -
BIJLAGE D: F-U-DIAGRAMMEN	- 61 -
BIJLAGE E: UITWERKING PROEVEN	- 65 -
BIJLAGE F: TEKENINGEN.....	- 76 -

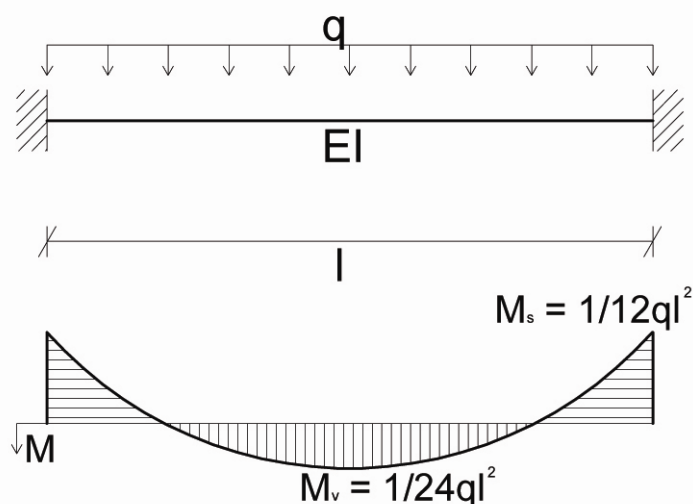
1. INLEIDING

Dit onderzoeksverslag heeft als onderwerp de plastische rotatiecapaciteit van betonbalken. In de periode september 2006 tot en met januari 2007 is onderzoek gedaan naar dit onderwerp. Het onderzoek is in drie fasen opgesplitst: een theoretisch vooronderzoek, het beproeven van betonbalken in het laboratorium en als laatste het verwerken van de meetgegevens die verkregen zijn bij de beproevingen.

Plastische rotatiecapaciteit is een begrip dat niet meteen tot de verbeelding spreekt, daarom is nadere uitleg wellicht vereist. De maximale plastische rotatie van de plastische scharnieren die ontstaan in een betonbalk bepalen de plastische rotatiecapaciteit. De rotatiecapaciteit van een plastisch scharnier is afhankelijk van de lengte waarover het scharnier kan ontstaan, de plastische lengte. Deze lengte is de gewenste uitkomst van het onderzoek en vormt het criterium waar conclusies aan verbonden kunnen worden. Natuurlijk is er ook een variabel aspect nodig om de gevonden plastische lengte aan te kunnen koppelen. De variabele van dit onderzoek is de hoeveelheid wapeningsstaal onderin een betonbalk. Dit impliceert dat verder alle denkbare factoren constant zijn gehouden. Andere factoren zijn onder andere: betonkwaliteit, afmetingen van de balk, staalkwaliteit, temperaturen, uithardingstijd, tijd tot ontkisten, gebruikte meetinstrumenten en de meetopstelling.

1.1. PLASTISCHE ROTATIECAPACITEIT

Om het begrip plastische rotatiecapaciteit nader toe te lichten wordt een voorbeeld uitgewerkt. In dit voorbeeld is gebruik gemaakt van een rechthoekige balk, met lengte l die aan 2 zijden is ingeklemd. Op deze balk staat een gelijkmatig verdeelde belasting ter grootte van q . Door boven- en onderwapening zodanig te kiezen kan aangenomen worden dat het maximaal opneembare moment in het veld even groot is als het maximaal opneembare moment ter plaatse van de steunpunten. Afbeelding 1.1 toont het mechanicaschema van dit model.



Afbeelding 1.1: Schematisatie ingeklemdde balk en elastische momentenverdeling

Elasticiteitstheorie

Volgens een elastische benadering moet het totale moment gelijk zijn aan:

$$M_{\text{totaal}} = \frac{1}{8} q \ell^2$$

Bovenstaande momentenverdeling laat zien hoe dit totale moment verdeeld is in een steunpuntsmoment en een veldmoment. Hieruit blijkt:

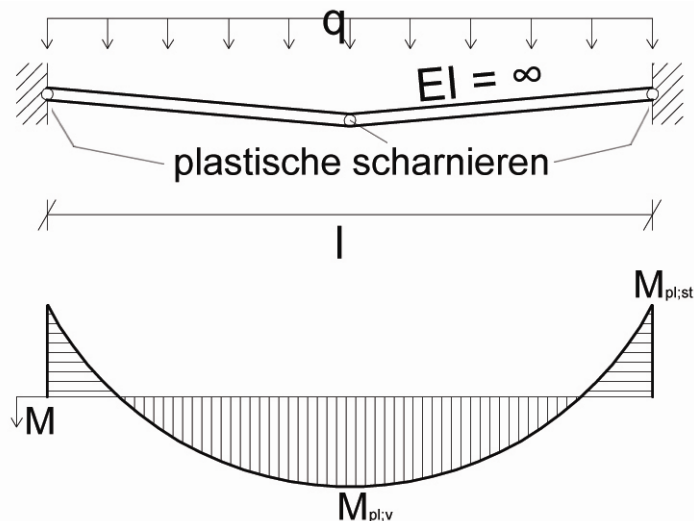
$$M_{\text{steunpunt}} = \frac{1}{12} q \ell^2 \text{ en } M_{\text{veld}} = \frac{1}{24} q \ell^2 \text{ welke samen } M_{\text{totaal}} \text{ vormen.}$$

Het steunpuntsmoment is precies twee keer zo groot als het veldmoment. Dit houdt bij een gelijkblijvende maximale momentcapaciteit in dat de balk zal bezwijken ter plaatse van één van de twee steunpunten. De bezwijkbelasting, uitgedrukt in q , luidt dan:

$$q_{\text{max}} = 12 \frac{M_u}{\ell^2}$$

Elementaire bezwijkanalyse

In werkelijkheid zal de betonbalk echter nog niet bezwiken zijn wanneer deze maximale bezwijkbelasting volgens de elasticiteitstheorie wordt bereikt. Hierna zal worden gerekend met dezelfde balk als zojuist is geïntroduceerd. Echter wordt bij deze analyse het model van afbeelding 1.1 vertaald naar een bezwijkmechanisme zoals getoond in afbeelding 1.2. In dit bezwijkmechanisme zijn drie plastische scharnieren getekend met daartussenin twee oneindig stijve liggers. Het toepassen van deze methode is niet altijd toegestaan, dit zal later worden toegelicht.



Afbeelding 1.2: Bezwijkmechanisme ingeklemde balk en plastische momentenverdeling

Dit mechanisme zal er voor zorgen dat de maximale belasting groter wordt doordat niet alleen ter plaatse van de steunpunten het maximaal opneembare moment wordt bereikt, maar ook in het veld. Omdat nu het veldmoment even groot is als het steunpuntsmoment geldt de volgende eis:

$$M_{su} + M_{vu} = 2M_u = \frac{1}{8}q\ell^2$$

Dit betekent:

$$M_{su} = M_{vu} = \frac{1}{16}q\ell^2 \text{ (wanneer } M_{su} = M_{vu} \text{)}$$

En ook hieruit kan een maximale bezwijkbelasting worden bepaald:

$$q_{\max} = 16 \frac{M_u}{\ell^2}$$

Wanneer de twee bezwijkbelastingen met elkaar vergeleken worden kan geconcludeerd worden dat de bezwijkbelasting volgens de elementaire bezwijkanalyse 33% groter is dan de bezwijkbelasting volgens de elasticiteitstheorie. Deze 'winst' wordt veroorzaakt door het plastisch gedrag van de plastische scharnieren. Om deze winst te realiseren moeten deze plastische scharnieren echter wel voldoende vermogen tot plastisch roteren hebben (plastische rotatiecapaciteit).

Bovendien moet onderzocht worden of het gekozen bezwijkmechanisme inderdaad maatgevend is en of dit mechanisme in werkelijkheid kan optreden.

1.2. VASTLEGGEN VAN ROTATIECAPACITEIT

De formule voor de plastische rotatiecapaciteit luidt:

$$\varphi_{pl} = \ell_p \cdot (\kappa_u - \kappa_e) \quad (1.1)$$

Waarin:

- φ_{pl} = plastische rotatiecapaciteit
- ℓ_p = plastische lengte
- κ_u = uiterste kromming
- κ_e = elastische kromming

Het verschil tussen de uiterste en de elastische kromming wordt ook wel de plastische kromming genoemd. De uiterste kromming is de kromming bij bezwijken, ofwel wanneer ε_{su} of ε'_{bu} wordt bereikt. De elastische kromming is de kromming waarbij de hoofdwapening begint te vloeien.

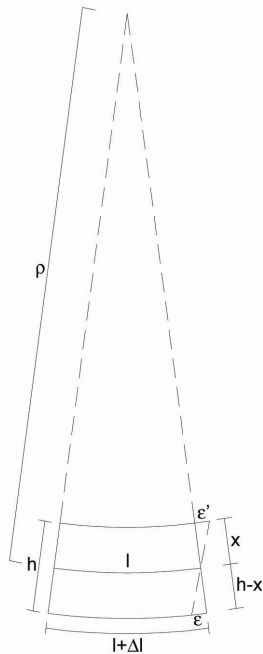
Het begrip kromming is gedefinieerd als het verschil tussen de horizontale rekken aan de boven- en onderzijde van de betonbalk gedeeld door de hoogte tussen deze punten. Om dit duidelijk te maken is afbeelding 1.3 en de volgende formule weergegeven:

$$\kappa = \frac{\varepsilon_{onder} - \varepsilon_{boven}}{h} \quad (1.2)$$

Waarin:

- κ = kromming
- h = verticale afstand tussen de posities waar de rekken gemeten worden
- ε_{onder} = rek onder
- ε_{boven} = rek boven

De plastische lengte is de lengte waarover plastische vervormingen optreden in de balk ter plaatse van een denkbeeldig plastisch scharnier. Deze lengte is enkel vast te leggen door de rekken over verschillende lengten, ofwel trajecten, te meten. De lengten van deze verschillende trajecten bepalen de precisie waarmee de plastische lengte per balk kan worden vastgesteld.



Afbeelding 1.3: Uitwerking van het begrip kromming (ρ is de kromtestraal)

1.3. DOEL VAN HET ONDERZOEK

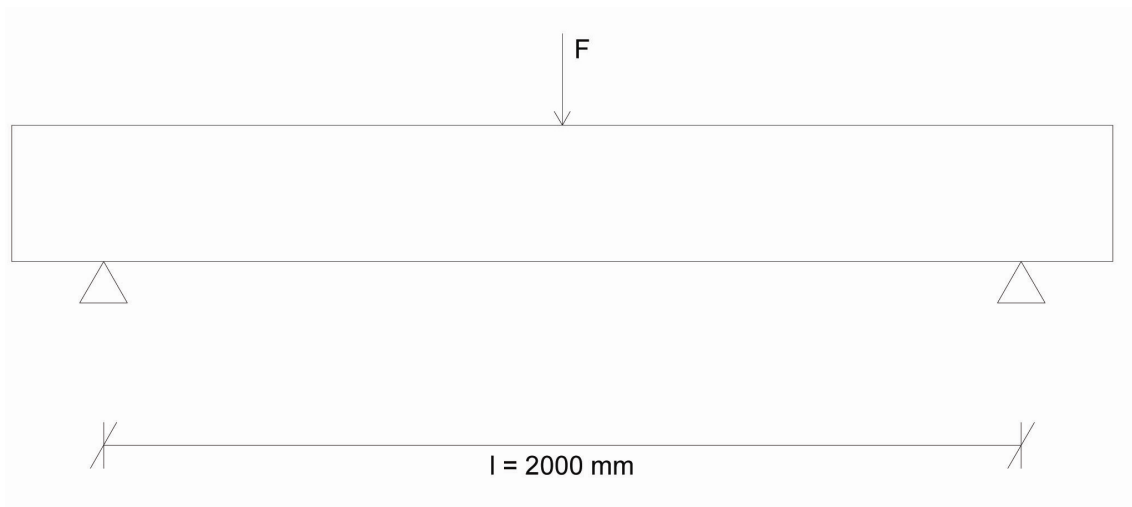
De aanleiding van dit onderzoek is CUR-rapport 108. In dit rapport staat dat de plastische lengte van een betonbalk belast op buiging en dwarskracht gelijk is aan de nuttige hoogte van de balk. Deze aanname is niet onderbouwd. Het doel van dit onderzoek is het nauwkeurig vaststellen van deze plastische lengte, als functie van de hoeveelheid wapening. Tijdens het onderzoek worden de betonbalken, conform CUR-rapport 108, belast op buiging en dwarskracht.

2. OPZET VAN HET ONDERZOEK

2.1. DOELSTELLING ONDERZOEK

Nadat een theoretisch vooronderzoek is voltooid zijn de werkelijke beproevingen uitgevoerd. Een tiental betonbalken is in het laboratorium belast door een puntlast. Afbeelding 2.1 laat het mechanicaschema van de uitgevoerde drie-punts-buigproeven zien.

Ten gevolge van de aangebrachte puntlast zal de balk vervormen tot een gekromde balk. Op een gegeven moment zal het wapeningsstaal onder in de betonbalk vloeien en in een later stadium zal de betonbalk bezwijken. Tussen deze twee stadia vervormt de betonbalk plastisch, er ontstaat een plastisch scharnier ter plaatse van het maximale moment, hier direct onder de aangebrachte puntlast.



Afbeelding 2.1: Mechanicaschema betonbalk

Aangezien het doel van de beproevingen is om de plastische rotatiecapaciteit van de plastische scharnieren in de betonbalken te bepalen is het traject tussen vloeien van de onderwapening en bezwijken van de balk erg belangrijk omdat de balk in dit traject plastisch vervormt. Twee aspecten worden tijdens elk van de tien proeven nauwkeurig vastgelegd:

- De zakking van de betonbalk bij de aangebrachte kracht
- De rekken aan de boven- en onderzijde van de betonbalk bij de aangebrachte kracht

Door deze twee aspecten te combineren kan de plastische lengte worden bepaald met behulp van formule (1.1).

2.2. PROEFSTUKKEN

Er worden vijf verschillende balken beproefd, welke alleen van elkaar verschillen qua buigtrekwapening. Alle proeven worden twee keer uitgevoerd, dit houdt een totaal in van tien proeven. In dit verslag zijn de resultaten gegeven van elk van de balken afzonderlijk, echter is wel gekeken of de resultaten van balken met dezelfde wapening met elkaar in overeenstemming zijn. De gegevens welke in de theoretische benadering worden gebruikt zijn vaak gemiddelden. Toegepaste buigtrekwapening is (zie afbeelding 2.2):

- $\varnothing 8$ mm
- $\varnothing 10$ mm
- $\varnothing 12$ mm
- $\varnothing 16$ mm
- $\varnothing 20$ mm

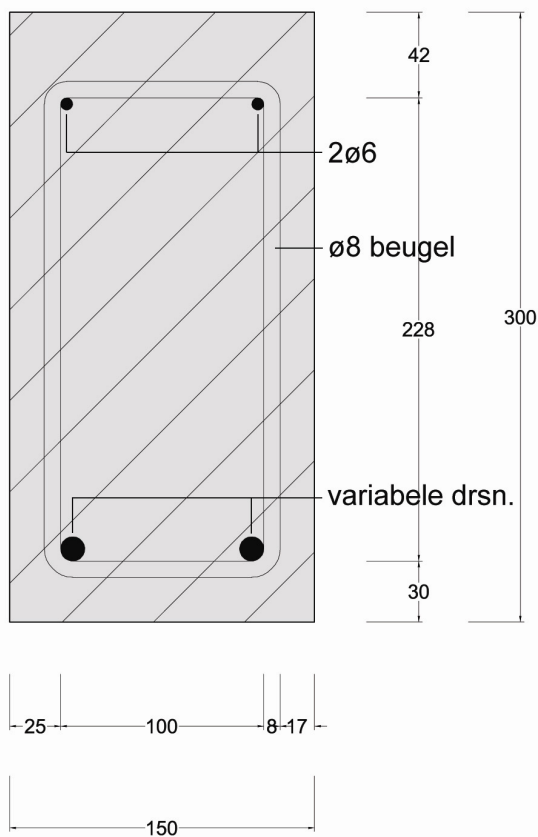
De betonbalken bevatten naast deze onderwapening ook bovenwapening en dwarskrachtwapening in de vorm van beugels. Tabel 2.1 geeft een volledig overzicht van de eigenschappen van de betonbalk.

Balke eigenschappen	
eigenschap	waarde
balklengte	2400 mm
balkhoogte	300 mm
balkbreedte	150 mm
lengte tussen de oplegpunten	2000 mm
bovenwapening	2x $\varnothing 6$ mm
beugelwapening	Beugels $\varnothing 8$ mm
betonkwaliteit*	B35
staalkwaliteit*	FeB500
bijzonderheden	uitsparing in het midden van de balk

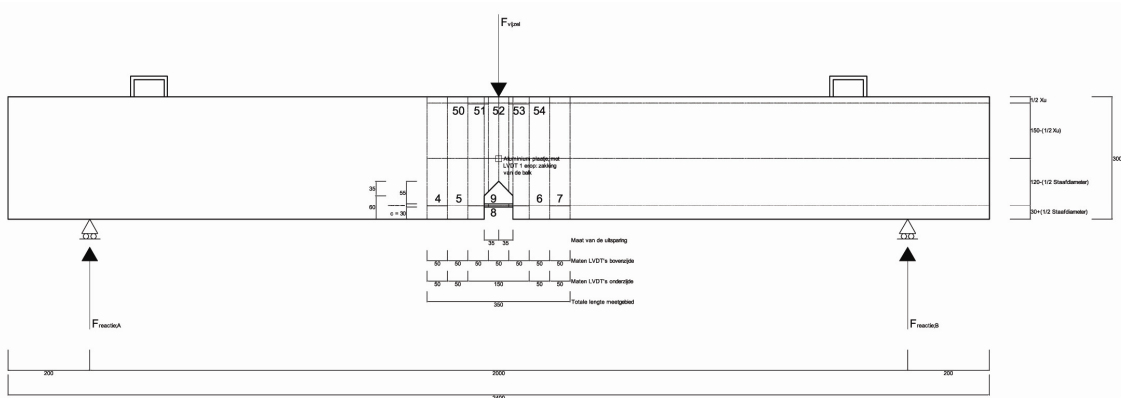
Tabel 2.1: Constante eigenschappen van de proefstukken

- * De gegeven waarden van de beton- en staalkwaliteit zijn door de fabrikant gegeven, de werkelijke waarden zijn vastgesteld in het hoofdstuk 3.

Afbeelding 2.2 en 2.3 laten de doorsnede en een zijaanzicht van de balk zien. Het zijaanzicht laat duidelijk de vorm van de uitsparing zien. Deze uitsparing is aangebracht om de horizontale rek rechtstreeks op de onderwapening te kunnen meten.



Afbeelding 2.2: Doorsnede betonbalk



Afbeelding 2.3: Zijaanzicht betonbalk (zie bijlage voor grotere afbeelding)

Tijdens de vervaardiging van de proefstukken is getracht de betondekking op het wapeningsstaal constant te houden. Aangezien de betonbalken handmatig zijn vervaardigd wijkt de betondekking op sommige plaatsen af van de vooraf vastgestelde waarde.



Afbeelding 2.4: Wapeningskorven in de bekisting voor het storten



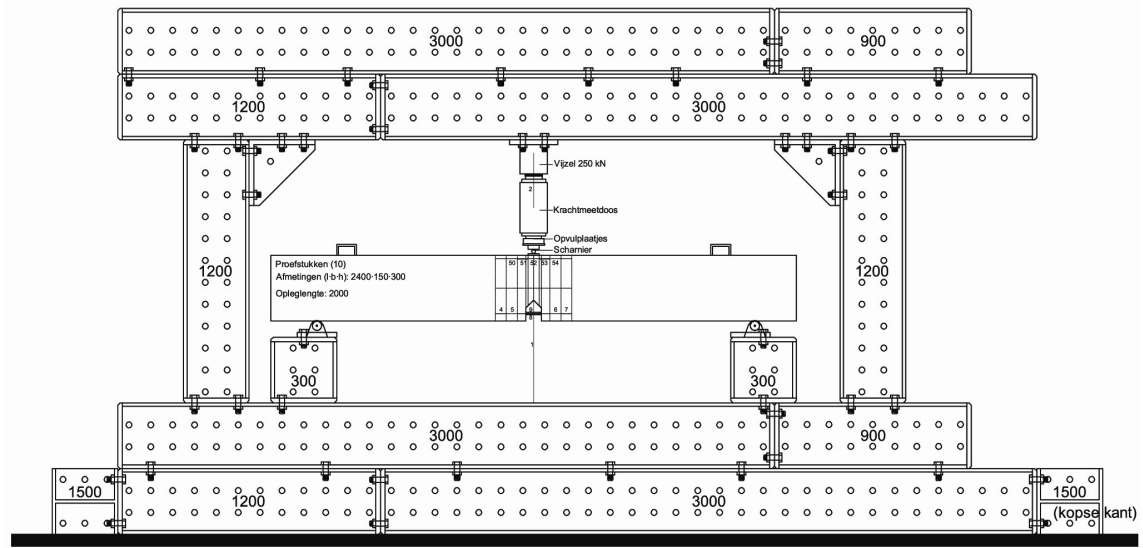
Afbeelding 2.5: Storten van de balken

2.3. PROEFOPSTELLING

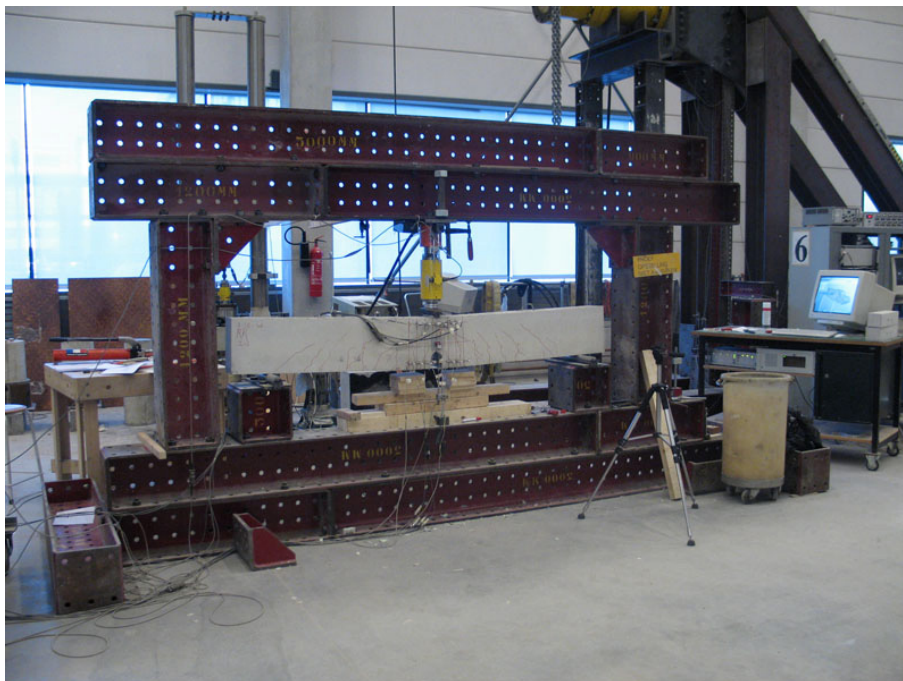
De proefopstelling is opgebouwd uit zware stalen profielen. Van belang is dat de opstelling voldoende stijf is, zodat de aangebrachte puntlast in de betonbalk terecht komt en niet in de opstelling. Bovendien is de stabiliteit van de opstelling belangrijk. De meetapparatuur is namelijk erg gevoelig en de kleinste trillingen worden al geregistreerd. Deze stabiliteit is gewaarborgd door twee stalen profielen haaks op de opstelling aan te brengen.

In het midden boven de betonbalk is een krachtmeetdoos met een vijzel aangebracht. De krachtmeetdoos geeft de mogelijkheid de kracht in de vijzel direct te registreren en af te lezen tijdens de beproeving. De vijzel van 250 kN

brengt de kracht opgewekt via een hydraulisch pompsysteem over op de betonbalk. De krachtmeetdoos geeft de weerstand van de balk op deze beweging aan zodat men de opgewekte kracht kan aflezen. Tussen de vijzel en de betonbalk zijn diverse vulplaatjes en een scharnier geplaatst voor een goede krachtsinleiding. Afbeelding 2.6 laat de opstelling zien, in bijlage F is een groter exemplaar te vinden.



Afbeelding 2.6: De gebruikte profopstelling voor de drie-punts-buigproeven



Afbeelding 2.7: Foto van de werkelijke opstelling

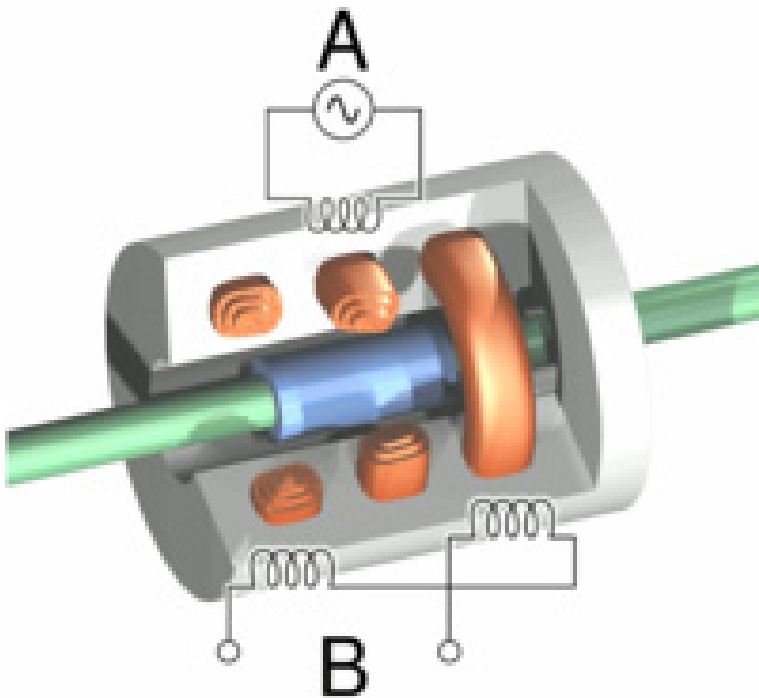
2.2. METINGEN

Om de benodigde gegevens vast te leggen tijdens de beproevingen zijn twee meetmethoden gebruikt. De eerste methode is via LVDT's. Er zijn LVDT's gebruikt met verschillende afmetingen en nauwkeurigheden. Bij elk van de tien proeven zijn LVDT's gebruikt

De tweede meetmethode is ESPI, dit is een lasersysteem dat veel nauwkeuriger werkt dan de gebruikte LVDT's. ESPI is gebruikt bij twee van de tien beproevingen.

LVDT's

Een LVDT is een Linear Variable Differential Transformer ¹². Dit houdt in dat de LVDT een sensor is die lineaire verplaatsingen kan meten. De LVDT is in werkelijkheid een cilindrische transformator waarin een primaire spoel en minstens één secundaire spoel zijn ondergebracht. Door de primaire spoel (A in afbeelding 2.8) stroomt een wisselstroom wat een inductiespanning in de secundaire spoel (B in afbeelding 2.8) veroorzaakt. In de cilindrische LVDT is een cilindrische opening aangebracht waar een weekijzeren kern in kan worden geschoven. Wanneer deze kern door de transformator beweegt verandert de inductiespanning in de secundaire spoel, deze spanning wordt afgelezen en kan geconverteerd worden naar de verplaatsing van de weekijzeren kern ten opzichte van de LVDT. Deze conversie kan alleen plaatsvinden wanneer elke transformator voordat de beproevingen aanvangen is gekalibreerd. Dit houdt in dat het voltage wordt gekoppeld aan vooraf bekende verplaatsingen. Met deze ijkpunten is het mogelijk een direct verband tussen voltage en verplaatsing te beschrijven. Deze kalibratie-grafieken zijn voor elke gebruikte LVDT terug te vinden in de bijlagen. Een meetstation gekoppeld aan deze LVDT's registreert het voltage dat in de secundaire spoel van elke LVDT is opgewekt. Deze voltages (in mV) worden direct omgezet naar verplaatsingen (mm). Later kunnen deze gegevensreeksen worden ingelezen in Excel zodat deze bewerkbaar zijn.



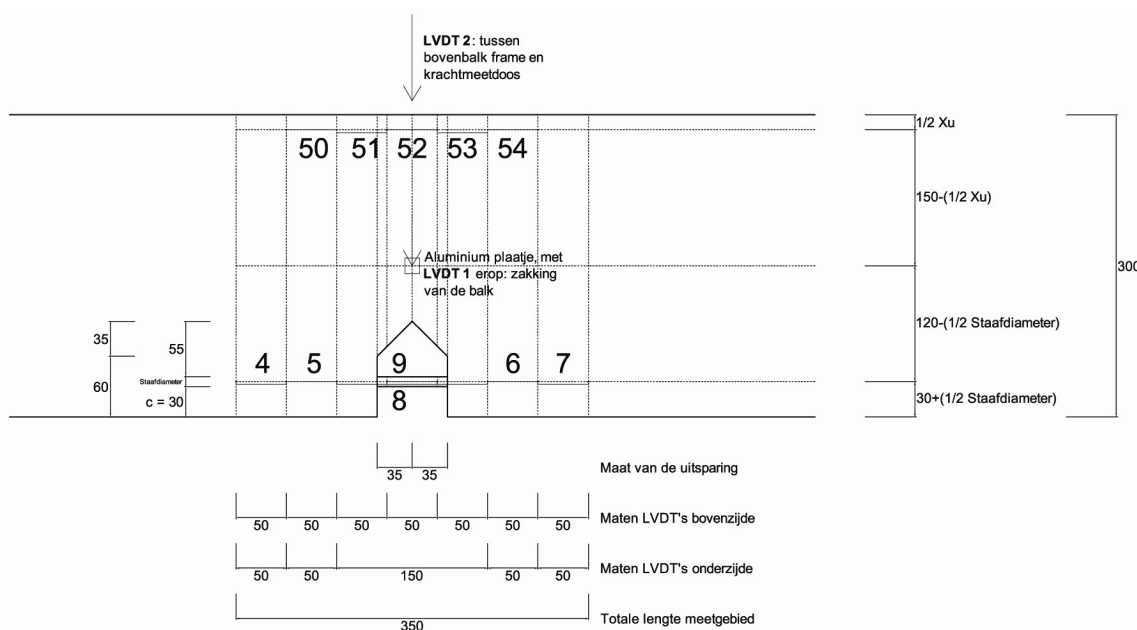
Afbeelding 2.8: Doorsnede van een LVDT, inclusief weekijzeren kern

Verdeling LVDT's

Per proef worden 13 LVDT's als volgt aangebracht:

- Vijf LVDT's geplaatst aan de bovenzijde van de balk op de zwaartelijn van de drukzone. Meettraject: 5 x 50 mm. Nummer: 50 t/m 54.
- Vijf LVDT's geplaatst aan de onderzijde van de balk op het hart van de onderwapening. Meettraject: 4 x 50 mm en 1 x 150 mm. Nummer 4 t/m 8.
- Één LVDT geplaatst direct op de onderwapeningsstaaf. Meettraject: 50 mm. Nummer 9.
- Één LVDT tussen de bovenregel van het stalen frame en de krachtmeetdoos om de verplaatsing van de balk en het frame te meten. Nummer 2.
- Één LVDT tussen het midden van de balk en de onderregel van het stalen frame om de verplaatsing van de balk te meten. Nummer 1.

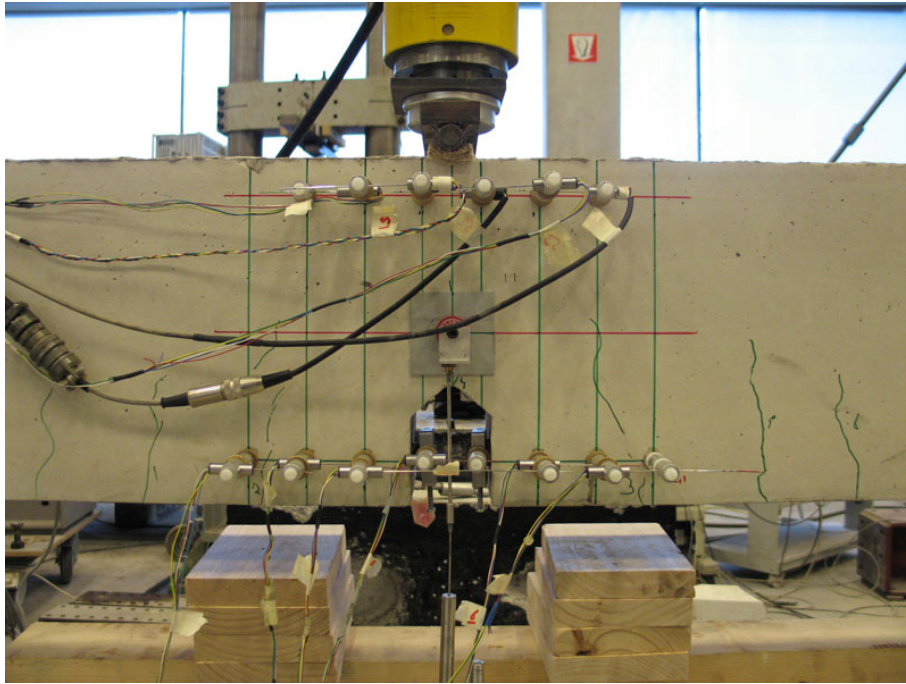
Op onderstaande afbeelding staan deze LVDT's met het toegekende nummer. Dit nummer is nodig om de inputkanalen te kunnen koppelen aan de betreffende LVDT. Naast deze 13 LVDT's ontvangt het meetstation nog een direct signaal van de krachtmeetdoos (nummer 0). Met dit signaal wordt de uitgeoefende kracht elke seconde bepaald en weergegeven. Voor een grotere afbeelding zie de bijlagen.



Afbeelding 2.9: Toegepaste LVDT's met nummer

Op afbeelding 2.10 wordt weergegeven hoe de LVDT's in de praktijk zijn aangebracht. De LVDT's aangebracht aan de boven- en onderzijde van de balk zijn verdeeld in twee lagen, dit is gedaan op de zwaartelijn van de drukzone en op het hart van de onderwapeningsstaaf.

De LVDT's zijn aangebracht op het betonoppervlak met behulp van een klemmetje en een stalen plaatje dat wordt vastgelijmd aan het betonoppervlak. De weekijzeren kern is met eenzelfde klemmetje en stalen plaatje op 50 mm afstand van de LVDT gefixeerd aan het betonoppervlak. De LVDT die rechtstreeks op de wapeningsstaaf is aangebracht is gefixeerd door twee stalen klemmen op de wapeningsstaaf te schroeven en vervolgens de LVDT hierop te monteren. Er zijn ook twee LVDT's gemonteerd welke de zakking van de balk meten. Deze zijn vastgemaakt met een magneet welke op een vastgelijmd stalen plaatje zit.



Afbeelding 2.10: Betonbalk met aangebrachte LVDT's

LVDT's in de praktijk

LVDT 1 en 2 meten de verplaatsing van de balk en de bovenregel van het stalen frame. De overige 11 LVDT's meten spanningsverschillen die ontstaan door de rekken op het betonoppervlak.

De LVDT's aan de bovenzijde van het betonoppervlak zullen door de aangrijpende kracht naar elkaar toe bewegen, een negatieve verplaatsing dus. Aan de onderzijde van het betonoppervlak, inclusief de LVDT gemonteerd op de wapeningsstaaf, zullen de LVDT's van elkaar af bewegen, een positieve verplaatsing.

Doordat de LVDT's in lijn zijn aangebracht, aan zowel boven- als onderzijde, is het mogelijk de rekken te sommeren zodat de rekken over een groter traject beschouwd kunnen worden. Dit is belangrijk bij het bepalen van de plastische lengte.

Resultaten LVDT's

De gegevensreeksen van de LVDT's worden gebruikt om te bepalen wanneer de balk begint met plastisch vervormen en wanneer de betonbalk op het punt staat te bezwijken. Dit gebeurt door het resultaat van de LVDT's (voltages) om te zetten naar verplaatsingen met behulp van de eerder bepaalde kalibratiefactoren. De verplaatsingen per seconde kunnen in een grafiek worden uitgezet tegen de uitgeoefende kracht van de vijzel. Deze grafiek laat zien wanneer het plastische traject begint en eindigt. Om deze gegevens verder te kunnen verwerken zijn niet alleen de gegevens van de LVDT's nodig maar ook de materiaaleigenschappen. De materiaaleigenschappen zijn bepaald en omschreven in hoofdstuk 3.

ESPI

De tweede meetmethode is ESPI. ESPI staat voor Electronic Speckle Pattern Interferometric ¹¹. Dit meetstelsel is gebaseerd op de eigenschappen van oppervlakken, deze zijn namelijk nooit helemaal vlak. ESPI stuurt laserlicht op een ruw oppervlak, het gereflecteerde licht wordt opgevangen door een CCD camera. Aangezien het laserlicht een bepaalde golflengte heeft en de afstand

tussen de laser en het oppervlak afhankelijk is van het beschenen punt op het beton vangt deze camera een ander signaal op per punt (het licht komt namelijk in een fase aan bij de camera). De camera registreert al een verschil van 10 nm. Om deze signalen per punt te kunnen vergelijken moet een referentiepunt worden gekozen. Dit punt wordt het nulpunt, wat inhoudt dat de faseverschillen ten opzichte van dit nulpunt worden bekeken, voor elk belicht punt. Wat de camera ziet is een 'Speckle pattern' ofwel stippenpatroon. Door dit stippenpatroon keer op keer te opnieuw te maken terwijl de kracht op de betonnen balk toeneemt, zal het patroon steeds verschillen van het vorige. De stippenpatronen bieden op zichzelf weinig informatie, waar het om draait is het verschil tussen twee stippenpatronen. Speciale computersoftware maakt het mogelijk deze verschillen in de stippenpatronen zichtbaar te maken. De op deze manier verkregen afbeeldingen laten de rekken zien in de x- of y-richting tussen twee stippenpatronen. Door vervolgens deze afbeeldingen met rekken na elkaar te laten afspelen wordt grafisch zichtbaar hoe de rekken in het betonoppervlak zich gedragen in een specifieke as-richting door de tijd. Dergelijke filmbestanden kunnen worden teruggevonden op de bijgevoegde CD. Hiernaast kunnen op deze CD ook alle afzonderlijke rek- en verplaatsingsweergaven in de x-richting als afbeeldingen gevonden worden.



Afbeelding 2.11: Een ESPI-meetinstrument

Beperkingen

ESPI is een erg nauwkeurig meetinstrument. Deze precisie biedt voordelen, maar ook nadelen. Te grote rekken kan het instrument namelijk niet meten en het maximaal te belichten oppervlak is slechts 200 x 200 mm² groot. Bovendien zal de kleinste aanraking van de proefopstelling al zorgen voor een afwijking in de stippenpatronen wat leidt tot verkeerde afbeeldingen. Daarbij komt dat ESPI laserlicht uitstraalt onder een hoek, wanneer het beschenen oppervlak uit verschillende diepten bestaat ten opzichte van het ESPI-meetinstrument ontstaat er door deze hoek een schaduw, over deze oppervlakte ontvangt de camera dan ook geen informatie. Een ander nadeel is dat, door ESPI beschenen, oppervlakken opgebouwd uit verschillende materialen ingespoten moeten worden met een spray zodat ESPI het oppervlak als één materiaal herkent.

3. MATERIAALEIGENSCHAPPEN

Voordat de werkelijke proef van start kon gaan zijn eerst voorbereidende werkzaamheden uitgevoerd. De wapeningskorven voor de betonbalken moesten worden gelast, de bekisting voor de balken moest in elkaar worden getimmerd nadat de planken gezaagd waren. De betonbalken moesten worden gestort en de experimenten die de werkelijke eigenschappen van de gebruikte materialen aan het licht zouden brengen moesten worden uitgevoerd. Deze voorbereidende experimenten staan hieronder beschreven, de verkregen resultaten staan eveneens in dit hoofdstuk vermeld.

3.1. BETON

In totaliteit zijn er 10 balken gestort met een betonkwaliteit B35. Betonleveranciers leveren beton met een gewaarborgde 5%-ondergrens zodat deze in ieder geval de bestelde kwaliteit overschrijdt. In hoeverre het bestelde beton een grotere druksterkte heeft dan het 'verwachte' beton moet worden vastgesteld aan de hand van drukproeven in het laboratorium. De 10 balken zijn in twee fases gestort: 5 tijdens de eerste stort op 19 september en wederom 5 tijdens de tweede stort op 3 oktober. Gelijktijdig met elk van deze twee storten zijn zes betonkubussen gestort waarmee later de druksterkte en de splijttreksterkte van het beton kan worden vastgesteld. De betonkubussen worden gestort in een mal met de afmetingen: 150 x 150 x 150 mm³. Van belang is dat deze drukproeven pas worden uitgevoerd wanneer de eigenlijke beproevingen van de betonbalken ook worden uitgevoerd. Met andere woorden, de uithardingtijd van de betonkubussen en de betonbalken per stort moet gelijk zijn.

De derde te onderzoeken materiaaleigenschap van het beton is de elasticiteitsmodulus. Om deze te kunnen bepalen zijn per stort drie betonprisma's gestort in een mal met de afmetingen: 100 x 100 x 500 mm³.

Druksterkte

De eerste drie kubussen per stort zijn gebruikt om de druksterkte van het gebruikte beton te bepalen. Dit betekent dat in totaliteit zes drukproeven zijn uitgevoerd waarvan de gemiddelde waarde wordt gebruikt bij de verdere uitwerking van de beproevingen van de betonbalken, uitgaande van een geringe spreiding van de gevonden waarden.

De drukproeven zijn uitgevoerd aan de hand van NEN 5968. De gebruikte drukbank heeft een capaciteit van 4 MN en is van fabrikant Form + Test Prüfsysteme, de locatie is het constructief laboratorium. De drukproeven zijn uitgevoerd op 30 oktober en 23 november.

Voordat de kubussen worden beproefd worden eerst de precieze afmetingen bepaald en wordt het gewicht van de kubus bepaald. Na deze gegevens verzameld te hebben zijn alle kubussen in de drukbank geplaatst. Bij de proeven wordt steeds een centrische kracht uitgeoefend op twee zijden van de kubus, de stortzijde mag niet één van deze twee zijden zijn. Na het plaatsen van de kubussen in de drukbank kan de kracht worden opgevoerd, de kracht stijgt met een snelheid van ongeveer 10 kN/s. Wanneer de kubus bezwijkt wordt de proef automatisch beëindigd door de drukbank waarna de uitgeoefende drukkracht kan worden afgelezen.

Met de afgelezen drukkracht kan op de volgende manier de druksterkte van het beton worden bepaald:

$$f'_{cm} = \frac{F}{A_b} \quad (3.1)$$

Waarin:

- f'_{cm} = gemiddelde kubusdruksterkte beton
- F = uitgeoefende maximale drukkracht
- A_b = belast betonoppervlak (vooraf gemeten)

De uitkomsten van alle zes de drukproeven staan in de tabel 3.1. Aan de hand van deze zes waarden is ook een gemiddelde waarde bepaald.

Drukproeven					
Proefnummer	Riblengte 1	Riblengte 2	A_b	F	f'_{cm}
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[kN]	[N/mm ²]
1-D1	149,5	150,8	22545	905,8	40,2
1-D2	149,5	151,2	22604	852,5	37,7
1-D3	149,5	150,7	22530	862,9	38,3
2-D1	149,5	150,8	22545	947,1	42,0
2-D2	149,5	150,2	22455	946,5	42,2
2-D3	149,5	149,0	22276	948,1	42,6
Gemiddelde druksterkte f'_{cm}					40,5

Tabel 3.1: Resultaten drukproeven



Afbeelding 3.1: De drukkubussen gestort in de mallen

Treksterkte

De splijttreksterkte is eveneens bepaald aan de hand van de resultaten van zes proeven, drie kubussen van beide stortmomenten. Ook hiervan is de gemiddelde waarde bepaald waar in het vervolg mee doorgerekend zal worden. De proeven zijn uitgevoerd volgens de normen van NEN 5969.

Voor deze zes proeven is dezelfde drukbank gebruikt als bij de bepaling van de druksterkte, ook de data waarop deze proeven zijn uitgevoerd zijn gelijk aan de data waarop de drukproeven zijn uitgevoerd.

De kracht van de drukbank wordt echter op een andere manier ingeleid op de kubus dan bij de drukproeven, namelijk via triplex latjes aan boven- en onderzijde, dit wordt de Braziliaanse splijtproof genoemd. Door de latjes aan beide zijden centrisch aan te brengen tussen de drukbank en kubusvlak ontstaat een relatief kleine drukzone (wat een vlak vormt) en een loodrecht op dat vlak gerichte trekkracht. De dwarscontractie die hierdoor ontstaat wordt verwaarloosd. De snelheid waarmee de kracht wordt opgevoerd is ongeveer 5,0 kN/s. Wanneer de treksterkte van het beton wordt bereikt splijt de kubus in twee vrijwel even grote helften waarna het belastingstraject van de drukbank automatisch wordt beëindigd.

De uitgeoefende drukkracht kan wederom worden afgelezen van de drukbank. Vervolgens kan de splijttreksterkte van het beton worden bepaald met de volgende formule:

$$f_{bm} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot \ell \cdot d} \quad (3.2)$$

Waarin:

- f_{bm} = gemiddelde waarde treksterkte beton
- F = uitgeoefende drukkracht
- ℓ = riblengte 1 van het gedrukte oppervlak
- d = riblengte 2 van het gedrukte oppervlak

De uitkomsten van alle zes de splijttrekproeven staan in tabel 3.2. Aan de hand van deze zes waarden is een gemiddelde waarde bepaald.

Drukproeven					
Proefnummer	ℓ	d	A	F	f_b
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[kN]	[N/mm ²]
1-T1	149,5	149,5	22350	116,8	3,33
1-T2	149,5	149,5	22350	114,7	3,27
1-T3	149,5	149,5	22350	112,6	3,21
2-T1	149,5	149,5	22350	99,1	2,82
2-T2	149,5	149,5	22350	101,9	2,90
2-T3	149,5	149,5	22350	104,1	2,97
Gemiddelde treksterkte f_{bm}					3,08

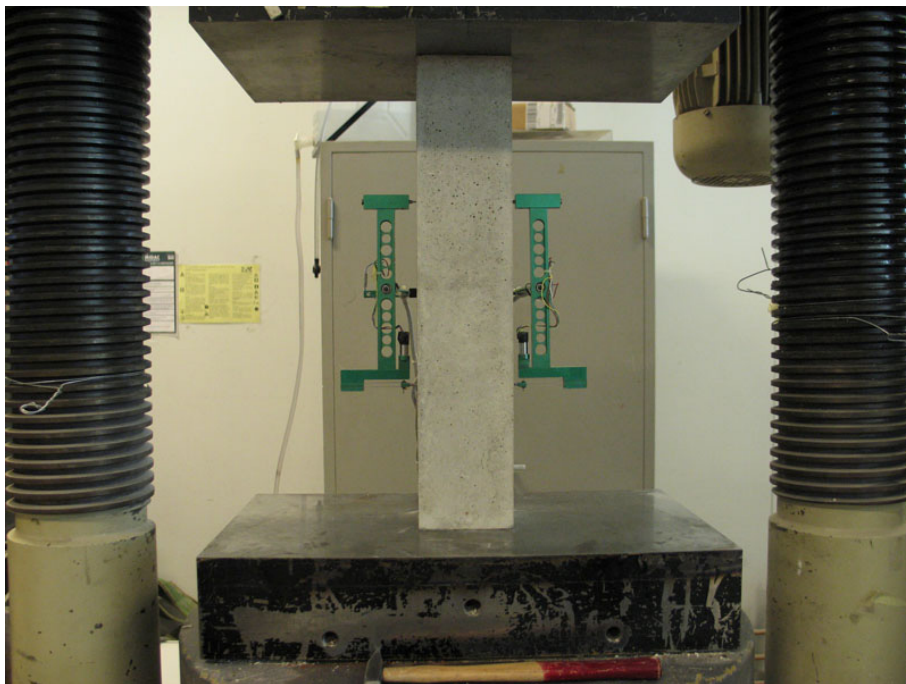
Tabel 3.2: Resultaten splijttrekproeven

Elasticiteitsmodulus

Wat overblijft, is de laatste vast te stellen materiaaleigenschap van beton, de elasticiteitsmodulus. Om deze eigenschap te bepalen zijn geen kubussen maar prisma's gestort met een hoogte van 500 mm en een diepte en breedte van elk

100 mm. Deze zes proeven zijn uitgevoerd volgens de normen beschreven in NEN 3880. De prisma's zijn in lengterichting in een drukbank geplaatst waardoor de twee kleinere vierkante oppervlakken centrisch belast worden. De gebruikte drukbank heeft een capaciteit van 2,5 MN en is van fabrikant Schenk, de locatie is het constructief laboratorium. Deze proeven zijn uitgevoerd op 30 oktober en 23 november.

Op elk van de zes prisma's zijn LVDT's geplaatst die de lengteverandering meten van de prisma's. Er zijn twee LVDT's gebruikt, één links en één rechts, omdat de kleinste excentriciteit van de aangebrachte drukkracht zorgt voor een onnauwkeurigheid bij het bepalen van de lengteverandering. Vandaar worden de twee outputreeksen van de LVDT's gemiddeld, deze gemiddelde reeks wordt gebruikt bij het bepalen van de elasticiteitsmodulus. De twee LVDT's zijn met behulp van een beugel aangebracht op de middellijn van twee evenwijdige zijden van de prisma's die geen stortzijde zijn. De meetlengte van de LVDT's is 200 mm. Onderstaande afbeelding laat zien hoe een dergelijke proef wordt uitgevoerd.



Afbeelding 3.2: Betonprisma in de drukbank

De elasticiteitsmodulus van de prisma's wordt bepaald in het elastische stadium, dus tot ongeveer één derde van de maximaal opneembare drukkracht. De wet van Hooke is van kracht en luidt:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

Waarin:

E = elasticiteitsmodulus
 σ = spanning
 ε = rek

De spanning wordt berekend door de door de drukbank uitgeoefende kracht te delen door het belaste oppervlak van de prisma. De rek kan berekend worden

door de verkorting van de LVDT's te delen door het traject waarover wordt gemeten (200 mm).

Om een elasticiteitsmodulus eenduidig te kunnen bepalen is gekozen om bij elk van de prisma's het spanningstraject van 3 tot 10 N/mm² te analyseren (bij een oppervlak van ongeveer 100 x 100 mm² betekent dit een kracht van ongeveer 30 tot 100 kN) omdat in dit gebied zeker is dat de prisma's zich elastisch gedragen. De elasticiteitsmodulus is verder op twee manieren vastgesteld, zoals te zien is in onderstaande tabel. De computer bij de drukbank berekent zelf een elasticiteitsmodulus aan de hand van het gekozen spanningstraject, daarnaast is met behulp van een Excel op eenzelfde manier de elasticiteitsmodulus bepaald. Deze twee waarden liggen dicht bij elkaar, er zal echter door worden gerekend met de waarde voor de elasticiteitsmodulus die is gevonden met Excel. In onderstaande tabel zijn de resultaten voor elk van de zes prisma's uiteengezet.

Elasticiteitsmodulus-proeven				
Proefnummer	Riblengthe 1	Riblengthe 2	E (Excel)	E (Laboratorium)
	[mm]	[mm]	[N/mm²]	[N/mm²]
1-E1	100,3	100,5	23553	23762
1-E2	100,2	101,0	23818	23832
1-E3	100,2	100,5	24928	24949
2-E1	100,0	100,4	23766	23794
2-E2	100,0	100,4	24202	24181
2-E3	100,0	100,4	25096	25145
Gemiddelde E-modulus (E)			24227	24277

Tabel 3.3: Resultaten elasticiteitsmodulus-proeven

3.3. BETONSTAAL

Naast beton wordt in dit onderzoek gebruikt gemaakt van wapeningsstaal, ook hiervan worden de materiaaleigenschappen bepaald. Het beproefde betonstaal is gelijk aan het betonstaal dat is toegepast in de beproefde betonbalken. Anders dan bij betonproeven zijn staalproeven vrijwel tijdsafhankelijk, er is geen sprake van uithardingstijd en dergelijke. Het tijdstip van beproeven van het betonstaal is dan ook willekeurig. De omstandigheden waarin het staal voor de staalproeven verkeerde was gelijk aan die van het staal in de beproefde betonbalken, afgezien van het beton er omheen.

Treksterkte

De treksterkte van het betonstaal is bepaald door staven met verschillende kenmiddellijnen in te klemmen in een trekbank. De lengte van de proefstukken is ongeveer gelijk gehouden, deze lengte bedraagt 300 mm. De staven zijn ingeklemd in twee bekken, deze brengen de kracht van de trekbank over op de stalen staven. De afstand tussen de twee bekken bedraagt 125 mm. Bij het onderzoek is gebruik gemaakt van staven met zes verschillende kenmiddellijnen, namelijk: 6, 8, 10, 12, 16 en 20 mm. Van elk van deze afzonderlijke staven zijn twee proefstukken voorbereid en beproefd. Op elk proefstuk is een trekkracht losgelaten totdat de staaf bezwijkt. De uitgeoefende kracht is vervolgens af te lezen van de trekbank.

Banksnelheid

De banksnelheden zijn bepaald met behulp van NEN-EN 10 002-1. Er gelden verschillende voorwaarden voor de snelheid in het elastische of het plastische gebied. In de norm wordt een onder- en een bovenwaarde gegeven.

Elastisch gebied

Omdat de elasticiteitsmodulus van het betonstaal groter dan 150.000 N/mm^2 is wordt de minimale spanningstoename $6 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ en de maximale spanningstoename $30 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Met behulp van formule (3.4) kan nu de banksnelheid worden uitgedrukt in mm/min:

$$V_{bank} = \frac{\sigma \cdot L_t}{E_s} \cdot 60 \quad (3.4)$$

Waarin:

$$\begin{aligned} V_{bank} &= \text{banksnelheid [mm/min]} \\ \sigma &= \text{minimale of maximale spanningstoename [N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \\ L_t &= \text{lengte van het proefstuk [mm]} \\ E_s &= \text{elasticiteitsmodulus staal [N/mm}^2] \end{aligned}$$

Hierdoor geldt:

$$V_{bank;\min} = \frac{6 \cdot 125}{200.000} \cdot 60 = 0,225 \text{ mm/min}$$

$$V_{bank;\max} = \frac{30 \cdot 125}{200.000} \cdot 60 = 1,125 \text{ mm/min}$$

Plastisch gebied

In het plastisch gebied is ook een grens gesteld voor de minimale en de maximale snelheid, deze snelheden worden hieronder berekend:

$$V_{bank;\min} = 0,00025 \cdot 125 \cdot 60 = 1,875 \text{ mm/min}$$

$$V_{bank;\max} = 0,0025 \cdot 125 \cdot 60 = 18,75 \text{ mm/min}$$

Gekozen treksnelheden

Voor het elastische gebied is gekozen voor een treksnelheid van 0,8 mm/min. Voor het plastische gebied is gekozen voor een treksnelheid van 10,8 mm/min.

Wanneer wordt waargenomen dat het kracht-verplaatsing diagram van het proefstuk afbuigt van de rechte, elastische lijn wordt de snelheid van de proef opgevoerd.

Spanningen

Om de trekspanning te bepalen wordt gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$f_{s;rep} = \frac{F}{A_s} \quad (3.5)$$

Waarin:

$$\begin{aligned} f_{s;rep} &= \text{uiterste trekspanning staal} \\ F &= \text{uitgeoefende trekkracht} \\ A_s &= \text{belast staaloppervlak (vooraf gemeten)} \end{aligned}$$

Verder is aan de hand van de output van de trekbank bepaald wanneer het staal gaat vloeien, de bijbehorende vloeispanning staat eveneens vermeld in onderstaande tabel. Bij het bepalen van de spanningen wordt de invloed van de insnoering verwaarloosd. Wanneer het staal verder rekt zal het gaan insnoeren, hierdoor wordt het oppervlak kleiner en zou dus de spanning groter zijn.

Rekken

Naast het bepalen van de spanningen is het interessant te weten hoeveel een stalen wapeningsstaaf uitrekt. Om dit te weten te komen zijn alle staven gemeten voor de trekproef en direct na de trekproef. Het verschil tussen deze waarden gedeeld door de afstand tussen de twee bekken van de trekbank geeft deze breukrek, hierin is dus de insnoering meegenomen, slip treedt niet op. In een aantal gevallen is ook nog twee streepjes op de wapeningsstaaf aangebracht, op deze manier kan de rek over een andere afstand, de afstand tussen de streepjes, worden bepaald, deze waarden zijn echter niet in de tabel vermeld. Om de rek te bepalen bij de uiterste kracht is gebruik gemaakt van de verkregen σ - ε -diagrammen, deze zijn te vinden in bijlage B. De toegepaste formule is als volgt:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.6)$$

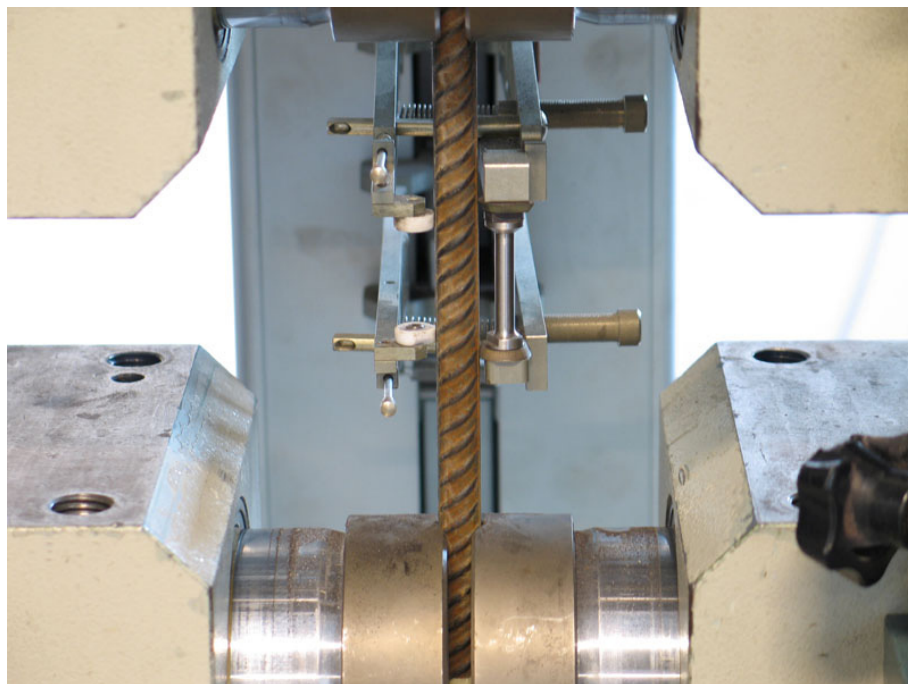
Waarin:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \text{rek} \\ \Delta l &= \text{lengteverandering} \\ l &= \text{lengte op tijdstip 0} \end{aligned}$$

In tabel 3.4 zijn de meest belangrijke eigenschappen van het betonstaal weergegeven. De staven met een diameter van 6 mm, welke als bovenwapening worden gebruikt, wijken in grote mate af van de overige staven. Deze hebben geen vloeiplaau, daarom is hiervan de 0,2%-rekgrens bepaald. Dit impliceert dat de kleinste staven, met een diameter van 6 mm, koudgevormd zijn, de overige staven zijn warmgewalst. De waarden van de kleinste wapeningsstaven zijn buiten beschouwing gelaten bij het bepalen van de gemiddelden. Het verschil in σ - ε -diagram is ook te zien in de bijlagen.

Trekproeven						
Proefnummer	A_s	F	f_s	$f_{s;u}$	ϵ_s	$\epsilon_{s;u}$
	[mm ²]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[‰]	[‰]
1-20 (ø19,7 mm)	305	201,9	561	663	99	264
2-20 (ø19,7 mm)	305	202,3	571	664	104	264
1-16 (ø15,9 mm)	199	136,8	594	689	99	216
2-16 (ø15,9 mm)	199	137,2	589	691	91	208
1-12 (ø11,9 mm)	111	74,2	566	668	100	184
2-12 (ø11,9 mm)	111	75,4	575	678	101	176
1-10 (ø9,9 mm)	77	53,7	598	697	106	160
2-10 (ø9,9 mm)	77	53,0	598	689	101	168
1-8 (ø7,9 mm)	49	32,2	571	656	111	168
2-8 (ø7,9 mm)	49	32,2	571	658	107	168
1-6 (ø5,8 mm)	26	17,5	643	663	27	72
2-6 (ø5,8 mm)	26	18,0	643	682	33	80
Gemiddelden			579	675	102	198

Tabel 3.4: Resultaten trekproeven



Afbeelding 3.3: Wapeningsstaal in de trekbank

3.4. SAMENVATTING GEGEVENS

Hieronder staan alle gegevens nog eens samengevat zoals hier verder mee zal worden gerekend. Omdat het niet om ontwerpberekeningen gaat worden er geen veiligheidsfactoren toegepast. Hierdoor zijn de representatieve waarden gelijk aan de rekenwaarden.

Beton

Druksterkte

Bij beton spelen tijdsafhankelijke effecten een rol. Omdat deze proef kortdurig is hoeft hier geen rekening mee te worden gehouden. Wel moet er een omrekenfactor worden gebruikt om van de kubusdruksterkte naar de druksterkte van een prisma te gaan, deze factor is 0,85. Hierdoor geldt:

$$f'_{cm} = 40,5 \text{ N/mm}^2$$
$$f'_{b;rep} = 0,85 \cdot 40,5 = 34,43 \text{ N/mm}^2$$

Treksterkte

Voor de treksterkte van beton is een waarde van 3,08 N/mm² gevonden. Volgens de norm wordt formule (3.7) gebruikt om vanuit de karakteristieke kubusdruksterkte de treksterkte te berekenen:

$$f_{b;rep} = 0,7 \cdot (1,05 + 0,05 \cdot f'_{ck}) \quad (3.7)$$

Omdat dit niet om een lange duur proef gaat mag de factor 0,7 worden verhoogd naar 1,0.

$$f_{b;rep} = 1,0 \cdot (1,05 + 0,05 \cdot 40,5) = 3,08 \text{ N/mm}^2$$

Deze waarde komt precies overeen met de waarde welke is gevonden tijdens de slijttrekproef. Hieruit volgt:

$$f_{b;rep} = 3,08 \text{ N/mm}^2$$
$$f_{bm;rep} = 6,15 \text{ N/mm}^2$$

Elasticiteitsmodulus

Er is gekozen om de waarde te gebruiken welke is gevonden door met behulp van Excel een regressielijn te bepalen over het elastische gebied zoals hiervoor is aangegeven. Hierdoor geldt:

$$E_{beton} = 24227 \text{ N/mm}^2$$

Betonstaal

Treksterkte

De gemiddelden zoals deze hierboven zijn gevonden zijn aangenomen. De waarden van de wapeningsstaven van $\varnothing 6$ mm zijn niet meegenomen bij het bepalen van de gemiddelde waarden. Hieruit volgt:

$$f_s = 579 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{s,u} = 675 \text{ N/mm}^2$$

Druksterkte

Voor de druksterkte zijn bij staal dezelfde waarden aangehouden als voor de treksterkte. Hierdoor geldt:

$$f'_s = 579 \text{ N/mm}^2$$

$$f'_{s,u} = 675 \text{ N/mm}^2$$

Elasticiteitsmodulus

Voor de elasticiteitsmodulus is de waarde uit de norm aangehouden. Hierdoor geldt:

$$E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$$

Deze waarde is niet experimenteel bepaald zodat een geringe afwijking kan ontstaan in de verdere berekeningen.

4. THEORETISCHE BENADERING

Het doel van de proef is het bepalen van de plastische lengte. Deze lengte komt voor in de formule voor de plastische rotatiecapaciteit. Deze formule is hieronder gegeven:

$$\varphi_{pl} = \ell_p \cdot (\kappa_U - \kappa_e) \quad (4.1)$$

Waarin:

- φ_{pl} = plastische rotatiecapaciteit
- ℓ_p = plastische lengte
- κ_U = uiterste kromming (bij bezwijken)
- κ_e = elastische kromming (bij ε_{se})

In deze formule komt het verschil tussen de uiterste kromming en de elastische kromming, ook wel plastische kromming (κ_{pl}) genoemd, voor. Nu is het mogelijk om de rotatie te bepalen met behulp van de zakkingen uit de proef, dit wordt dus niet theoretisch gedaan. De krommingen kunnen bepaald worden met behulp van M- κ -diagrammen. Deze krommingen worden dus wel theoretisch bepaald met de in hoofdstuk 3 gevonden materiaaleigenschappen. Wanneer de plastische rotatie en de bijbehorende krommingen gevonden zijn kan de plastische lengte eenvoudig worden berekend, dit zal worden gedaan in hoofdstuk 6.

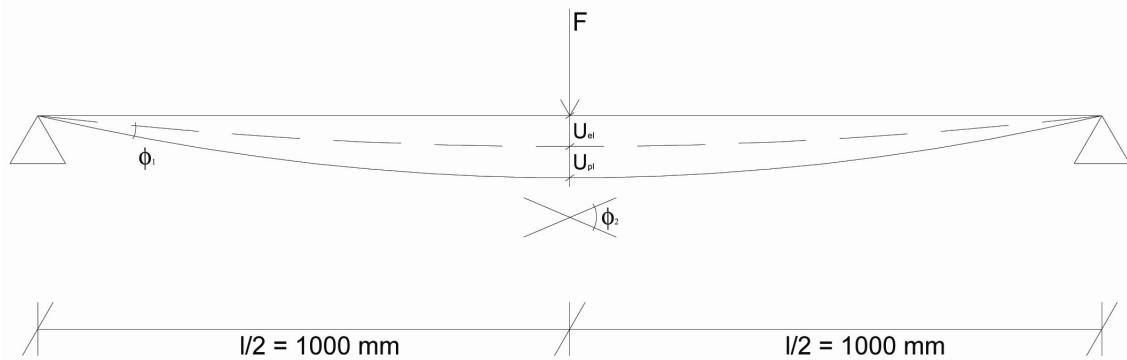
4.1. ROTATIE

Voor het bepalen van de plastische rotatie is gebruik gemaakt van de zakking van de balk. Deze gegevens zijn te vinden in bijlage D. Als eerste is gekeken naar de zakking, er is bepaald op welk gebied deze zakking lineair is. Hierna is over dit gebied de regressie bepaald met de lineaire regressielijnen methode, zo zijn er vier regressielijnen per diameter bepaald. Omdat de lijnen van de twee beproevingen goed overeenkomen is verder gerekend met het gemiddelde hiervan. Zo ontstaan er dus twee nieuwe regressielijnen, één voor het elastische en één voor het plastische gebied. Door te kijken waar deze lijnen elkaar snijden wordt het mogelijk om de elastische zakking en de elastische kracht welke daarbij hoort te bepalen. Ook kan de zakking worden bepaald welke correspondeert met de maximale kracht, dit is te zien in de bijlage. Wanneer de plastische zakking bekend is wordt het mogelijk om de bijbehorende plastische rotatie te bepalen. Afbeelding 4.1 en 4.2 illustreren het geheel. Met behulp van de volgende formules is het dan mogelijk om de rotatie te berekenen:

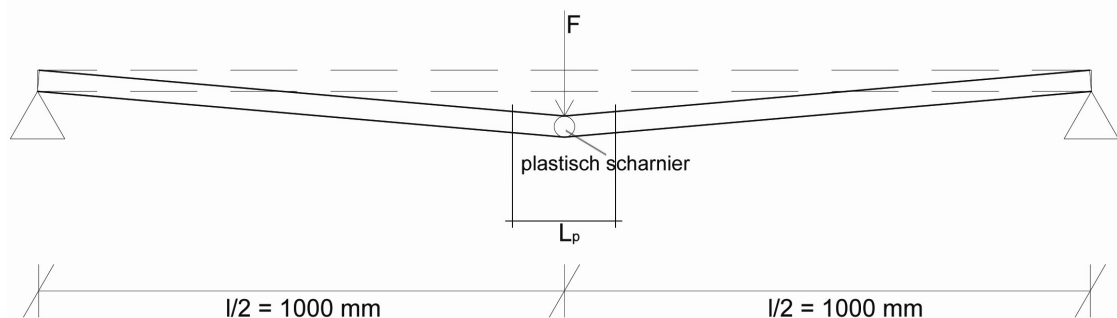
$$\varphi_1 = \frac{U}{\frac{1}{2} \cdot \ell}$$
$$\varphi_2 = 2 \cdot \varphi_1$$

Bij de beproeving was de afstand tussen de opleggingen 2000 mm, hieruit volgt:

$$\varphi_1 = \frac{U}{\frac{1}{2} \cdot 2000} \Rightarrow \varphi_2 = \frac{U}{500}$$



Afbeelding 4.1: Zakking en rotatie van de proefstukken



Afbeelding 4.2: Bezwijkmechanisme proefstukken

In onderstaande tabel zijn plastische rotaties bepaald voor de theoretische benadering. De waarden voor de zakkingen zijn af te lezen uit de grafieken in de bijlagen.

Overzicht plastische rotaties				
wapening	u_e	u_u	u_{pl}	$\Phi_{2,pl}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[rad]
ø8 (0,25%)	2,74	23,32	20,57	0,04115
ø10 (0,40%)	4,05	22,93	18,88	0,03776
ø12 (0,57%)	5,04	20,60	15,56	0,03112
ø16 (1,02%)	6,97	19,76	12,80	0,02559
ø20 (1,61%)	8,93	19,22	10,29	0,02058

Tabel 4.1: Plastische rotaties voor de theoretische benadering

4.2. KROMMINGEN

Nu de zakkingen bekend zijn is het mogelijk om via de krommingen te bepalen. Dit wordt gedaan met de gegevens zoals deze in hoofdstuk 3 zijn bepaald. Het berekenen van krommingen wordt gedaan met M- κ -diagrammen.

M- κ -diagrammen

M- κ -diagrammen geven de verhouding weer tussen het moment en de bijbehorende kromming van de balk. Dit diagram bestaat uit een aantal karakteristieke punten welke in volgorde kunnen variëren. Het gaat om:

- beton scheurt (M_r)
- hoofdwapening vloeit (M_e)
- beton stuikt (M_{pl})
- beton kapot (M_u)
- hoofdwapening kapot ($\omega > \omega_{max}$)

Bij dunnere wapeningsstaven zal het uiterste moment worden bereikt wanneer staalbreuk optreedt. Bij staven met een grotere diameter gaat de balk kapot doordat de betondrukzone bezwijkt. Het wapeningspercentage heeft ook invloed op de volgorde van de stappen. Zo zal bij balken met een laag wapeningspercentage de hoofdwapening eerder gaan vloeien dan dat het beton plastisch begint te vervormen ($M_{pl} > M_e$). Bij balken met wapeningsstaven met een groter oppervlak zal het beton eerder gaan stuiken dan dat de wapening zal gaan vloeien ($M_e > M_{pl}$). Het kan soms voorkomen dat bij een zeer geringe betondrukzone de bovenwapening gaat meedoen als trekwapening. In de beproevingen is er geen normaalkracht, daarom hoeven we niet te spreken over M-N- κ -diagrammen.

Berekenen M- κ -diagrammen

Voor het berekenen van de M- κ -diagrammen is met behulp van Excel een programma gemaakt. Hierin kunnen gemakkelijk verschillende parameters worden veranderd, om zo het resultaat te zien. In dit programma wordt gerekend met bi-lineaire diagrammen waarvan de plastische takken geen constante waarden hoeven te hebben. De invloed van de bovenwapening is meegenomen bij het opstellen van de vergelijkingen. In bepaalde gevallen zal de bovenwapening mee kunnen doen als trekwapening en ook gaan vloeien. Dit is te zien in de M- κ -diagrammen. Meer over de formules welke zijn gebruikt voor het opstellen van de vergelijkingen zijn te vinden in bijlage C. Ook is hier voor de balk met $\varnothing 10$ mm de berekening uitgewerkt.

Gegevens voor M- κ -diagrammen

Hieronder zijn de verschillende eigenschappen van de materialen uiteengezet zoals deze in de berekeningen gebruikt zijn. Ook zullen de rekken worden berekend om zo de σ - ϵ -diagrammen weer te kunnen geven. De materiaalgegevens worden uit hoofdstuk 3 overgenomen.

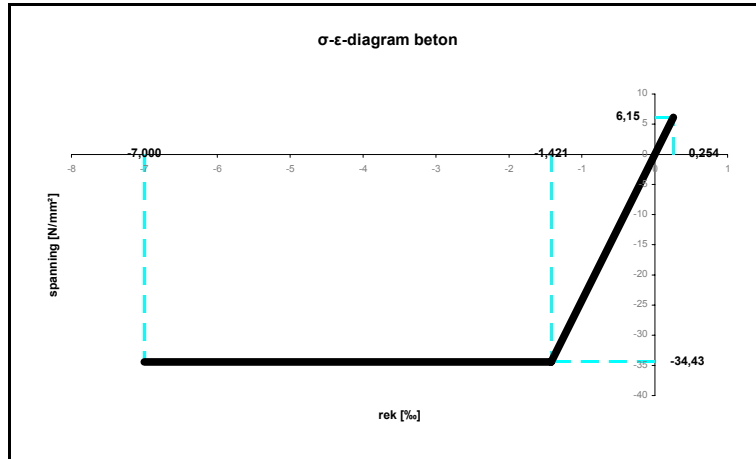
Beton

Door het toepassen van de wet van Hooke (3.3) wordt het mogelijk om de rekken te berekenen welke bij de verschillende punten in de σ - ϵ -diagrammen horen. Er is voor gekozen om de uiterste betonrek op 7,00‰ te stellen. Deze waarde wordt ook in de literatuur gebruikt. Deze waarde is twee keer zo groot als de waarde welke normaal in de norm wordt gebruikt. Hierdoor geldt:

$$\varepsilon'_{b;u} = 0,00700 = 7,000\text{‰}$$

$$\varepsilon'_b = \frac{34,43}{24227} = 0,00142 = 1,421\text{‰}$$

$$\varepsilon_b = \frac{6,15}{24227} = 0,00025 = 0,254\text{‰}$$



Afbeelding 4.3: σ - ε -diagram beton

Betonstaal

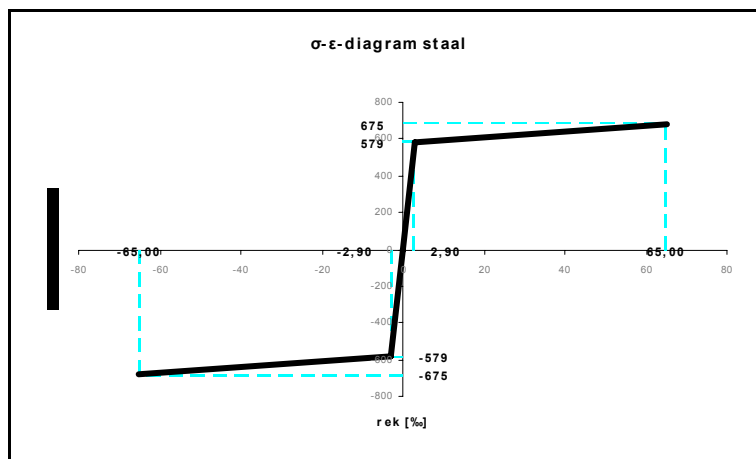
Bij het betonstaal wordt gewerkt met een σ - ε -diagram waarvan de spanning tijdens het vloeien toeneemt. Uit de proeven kwam een erg hoge rek na breuk. Ook de rek bij de maximale kracht was erg hoog. Volgens de norm moest de rek bij de maximale kracht minimaal 50‰ zijn. Wij hebben ervoor gekozen deze rek te verhogen tot 65‰, dit is ook weer twee keer zo groot als de waarde die normaal in de norm wordt gebruikt. Hierdoor geldt:

$$\varepsilon'_{s;u} = 0,06500 = 65,000\text{‰}$$

$$\varepsilon'_s = \frac{579}{200000} = 0,00290 = 2,895\text{‰}$$

$$\varepsilon_s = \frac{579}{200000} = 0,00290 = 2,895\text{‰}$$

$$\varepsilon_{s;u} = 0,06500 = 65,000\text{‰}$$



Afbeelding 4.4: σ - ε -diagram staal

Resultaten M- κ -diagrammen

De gebruikte formules en de uitwerking zijn te vinden in bijlage C. In onderstaande tabellen zijn de optredende momenten en de bijbehorende krommingen per balk samengevat. Bij de balken met een laag wapeningspercentage gaat ook de bovenwapening vloeien. Daardoor zijn hier 5 markante punten te vinden.

Overzicht gegevens $\phi 8$ mm (0,25%)				
Momenten	Gebeurtenis	M	κ	EI
		[kNm]	[m ⁻¹]	[kNm ²]
M_r	scheurmoment (2)	14,604	0,00170	8571
$M_{e,2}$	vloeien staal (2)	14,520	0,01333	1089
M_{pl}	betonstuik (1)	15,716	0,05225	301
$M_{e,1}$	vloeien staal (1)	17,291	0,13615	127
$M_{u,s;2}$	staal kapot trek (2)	18,545	0,26661	70

Tabel 4.2: Momenten en krommingen wapening $\phi 8$ mm

Overzicht gegevens $\phi 10$ mm (0,40%)				
Momenten	Gebeurtenis	M	κ	EI
		[kNm]	[m ⁻¹]	[kNm ²]
M_r	scheurmoment (2)	14,956	0,00172	8712
$M_{e,2}$	vloeien staal (2)	22,258	0,01405	1584
M_{pl}	betonstuik (1)	23,446	0,03830	612
$M_{e,1}$	vloeien staal (1)	26,503	0,18884	140
M_u	beton kapot (1)	27,178	0,23767	114

Tabel 4.3: Momenten en krommingen wapening $\phi 10$ mm

Overzicht gegevens $\phi 12$ mm (0,57%)				
Momenten	Gebeurtenis	M	κ	EI
		[kNm]	[m ⁻¹]	[kNm ²]
M_r	scheurmoment (2)	15,375	0,00173	8875
$M_{e,2}$	vloeien staal (2)	31,490	0,01482	2125
M_{pl}	betonstuik (1)	32,592	0,02815	1158
M_u	beton kapot (1)	36,670	0,19567	187

Tabel 4.4: Momenten en krommingen wapening $\phi 12$ mm

Overzicht gegevens $\varnothing 16$ mm (1,02%)				
Momenten	Gebeurtenis	M	κ	EI
		[kNm]	[m ⁻¹]	[kNm ²]
M_r	scheurmoment (2)	16,391	0,00177	9258
M_{pl}	betonstuik (1)	53,814	0,01640	3281
$M_{e;2}$	vloeien staal (2)	54,153	0,01651	3281
M_u	beton kapot (1)	59,195	0,13597	435

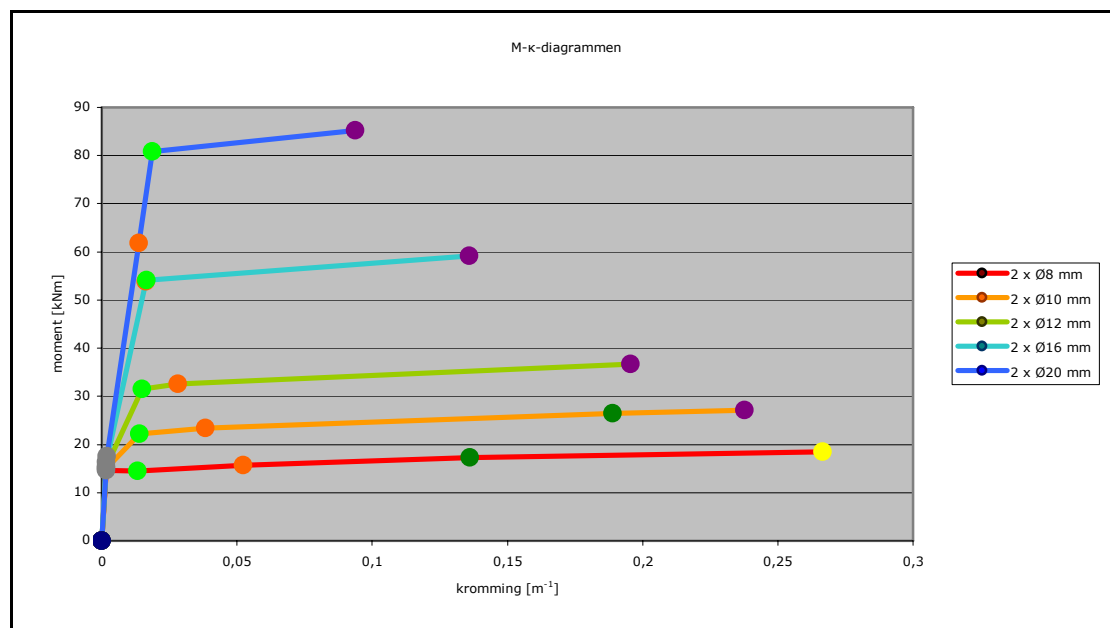
Tabel 4.5: Momenten en krommingen wapening $\varnothing 16$ mm

Overzicht gegevens $\varnothing 20$ mm (1,61%)				
Momenten	Gebeurtenis	M	κ	EI
		[kNm]	[m ⁻¹]	[kNm ²]
M_r	scheurmoment (2)	17,610	0,00182	9692
M_{pl}	betonstuik (1)	61,755	0,01385	4459
$M_{e;2}$	vloeien staal (2)	80,852	0,01877	4307
M_u	beton kapot (1)	85,160	0,09376	908

Tabel 4.6: Momenten en krommingen wapening $\varnothing 20$ mm

Alle M- κ -diagrammen zijn in de bijlage te vinden. Een overzicht van alle M- κ -diagrammen staat in afbeelding 4.3. In deze figuur zijn de verschillende punten met verschillende kleuren aangegeven, de kleuren zijn ook terug te vinden in de tabellen hierboven.

Bij de balk waarin staven van $\varnothing 8$ mm zitten is het scheurmoment groter dan het elastische moment, hierdoor zakt de grafiek een beetje. Dit verschijnsel komt doordat vanaf het scheurmoment de trekkracht die het beton nog opneemt wordt verwaarloosd. De kracht moet op dat moment geheel worden opgenomen door het staal, terwijl in de werkelijkheid het beton in de trekzone nog niet helemaal is gescheurd tot het omslagpunt.



Afbeelding 4.5: Overzicht van alle M- κ -diagrammen

Hieronder zijn de plastische krommingen nog eens bij elkaar gezet.

Overzicht krommingen				
wapening	bezwijkvorm	K_u	K_e	K_{pl}
		[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]
ø8 (0,25%)	staalbreuk	0,26661	0,01333	0,25328
ø10 (0,40%)	betonstuik	0,23767	0,01405	0,22362
ø12 (0,57%)	betonstuik	0,19567	0,01482	0,18085
ø16 (1,02%)	betonstuik	0,13597	0,01651	0,11946
ø20 (1,61%)	betonstuik	0,09376	0,01877	0,07498

Tabel 4.7: Overzicht krommingen

4.3. VERGELIJKEN THEORIE EN PROEVENSERIE

Nu de gegevens uit de M-κ-diagrammen bekend zijn is het mogelijk om deze te vergelijken met de waarden uit de praktijk. Er wordt gekeken naar het elastische en het uiterste moment. De gemiddelde waarden die hiervoor werden gevonden zijn uit de regressielijnen gehaald van de in bijlage D weergegeven diagrammen. In de grafieken staan de krachten in kN, terwijl uit de M-κ-diagrammen momenten in kNm komen. De lengte tussen de opleggingen (ℓ) is hier 2 m (2000 mm). Hieruit volgt:

$$M = \frac{1}{4} \cdot F \cdot \ell \quad \Rightarrow \quad M = \frac{1}{4} \cdot F \cdot 2 \quad \Rightarrow \quad F = 2 \cdot M$$

Hieronder staat een overzicht van de gegevens en de bijbehorende afwijkingen.

Verschil tussen theorie- en praktijkwaarden						
wapening	F_e (praktijk)	F_e (theorie)	Verschil	F_u (praktijk)	F_u (theorie)	Verschil
	[kN]	[kN]	[%]	[kN]	[kN]	[%]
ø8 (0,25%)	28,96	29,04	-0,29	37,96	37,09	+2,35
ø10 (0,40%)	45,27	44,52	+1,69	57,34	54,36	+5,48
ø12 (0,57%)	63,37	62,98	+0,62	76,38	73,34	+4,15
ø16 (1,02%)	112,31	108,31	+3,70	124,35	118,39	+5,04
ø20 (1,61%)	161,71	161,70	+0,00	171,62	170,32	-0,25

Tabel 4.8: Verschil tussen theorie- en proeven

Hieruit blijkt dat de waarden volgens de theorie in de meeste gevallen iets lager voorspeld waren. Dit kan een aantal oorzaken hebben. Zo zou de omrekenfactor die wordt gebruikt om van een kubus naar een prisma te gaan waarschijnlijk wel wat verhoogd mogen worden, omdat de overspanning relatief klein is gezien de hoogte van de balk. Ook wordt er bij het maken van de M-κ-diagrammen gebruik gemaakt van geschematiseerde σ-ε-diagrammen. De uiterste rekken van het beton en het staal zijn niet exact bekend. Na het scheurmoment wordt de trekkracht van het beton verwaarloosd, wanneer dit niet wordt gedaan zal het moment worden verhoogd. De waarden komen goed overeen, dus kan hiermee verder worden gerekend. In hoofdstuk 6 zullen de hier gevonden gegevens worden gebruikt voor het bepalen van de plastische lengte volgens theorie en praktijk.

5. PROEFRESULTATEN

5.1. BEZWIJKBELASTINGEN

Het doel tijdens de beproevingen was om de betonbalken te laten bezwijken. Door de aangrijpende puntlast groter te laten worden vervormden de balken en uiteindelijk bezweken ze. De maximale kracht waaraan de betonbalk weerstand heeft gegeven is terug te lezen uit de informatie die de krachtmeetdoos tijdens elke beproeving verschaft. Aan deze maximale kracht (puntlast) kan een maximaal moment gekoppeld worden op de volgende manier:

$$M = \frac{1}{4} \cdot F \cdot \ell$$

De lengte tussen de opleggingen (ℓ) is hier 2 m (2000 mm), hieruit volgt:

$$M = \frac{1}{4} \cdot F \cdot 2 \quad \Rightarrow \quad M = \frac{1}{2} \cdot F$$

Er zijn twee manieren waarop de betonbalken kunnen bezwijken. De eerste manier is op betonstuik, de tweede manier is op staalbreuk. Dit wil dus zeggen dat in het eerste geval het staal nog niet bezweken is wanneer het beton aan de bovenzijde op stuik kapot gaat. In het tweede geval is het beton aan de bovenzijde van de balk nog niet bezweken, maar de onderwapening in de betonbalk is gebroken.

Met behulp van de uitvoer welke is verkregen tijdens de metingen zijn de grafieken in bijlage D gemaakt. Hierin is de kracht uitgezet tegen de zakking. Wanneer nu de grafieken worden geschematiseerd is het mogelijk om per proef de elastische en de uiterste kracht te bepalen. Wanneer deze kracht bekend is kan met bovenstaande formule het bijbehorende moment worden berekend. De resultaten zijn te zien in tabel 5.1.

Overzicht zakkingen en rotaties				
wapening	bezwijkvorm	u_u	u_{pl}	$\Phi_{2;pl}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[rad]
ø8 (1-5)	staalbreuk	21,49	18,76	0,03752
ø8 (2-5)	staalbreuk	25,02	22,26	0,04453
ø10 (1-5)	betonstuik	23,71	19,82	0,03964
ø10 (2-5)	betonstuik	22,14	17,92	0,03585
ø12 (1-3)	betonstuik	20,32	15,27	0,03055
ø12 (2-3)	betonstuik	20,57	15,52	0,03105
ø16 (1-4)	betonstuik	19,34	12,50	0,02500
ø16 (2-4)	betonstuik	19,95	12,86	0,02572
ø20 (1-5)	betonstuik	20,11	10,89	0,02178
ø20 (2-5)	betonstuik	19,23	10,72	0,02144

Tabel 5.1: Overzicht van uiterste en plastische zakkingen en de daarbij behorende rotatie

5.2. ROTATIE

Voordat de plastische lengte kan worden berekend, moet eerst de plastische rotatiecapaciteit bepaald worden. Om de plastische rotatie in het midden van de balk te bepalen is de plastische zakking op dit punt nodig. De zakking van de balk is rechtstreeks gemeten door LVDT 1. Om het plastische traject van deze zakking te bepalen moeten twee punten worden vastgesteld: het punt waarop het staal begint te vloeien en het punt waarop de kracht maximaal is. Door de zakking bij maximale kracht te verminderen met de zakking bij de kracht wanneer het staal begint te vloeien wordt de plastische zakking zichtbaar.

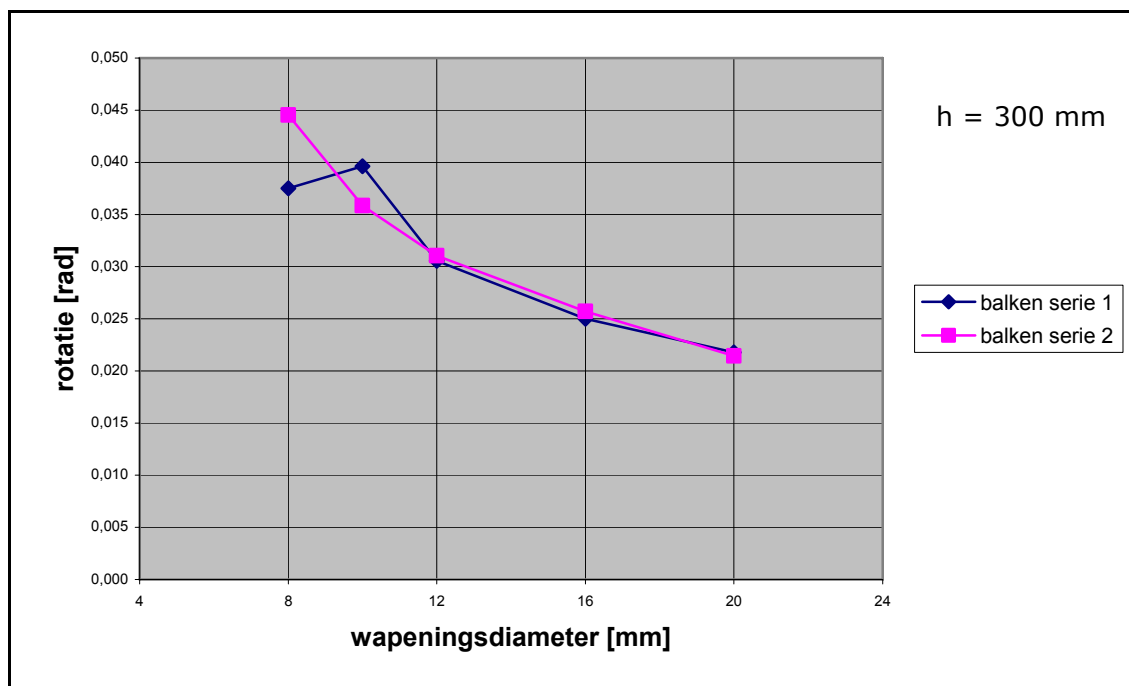
De manier waarop de momenten van vloeien en bezwijken zijn bepaald is te zien in de bijlage D. De zakkinggrafieken van de betonbalken zijn aangevuld met lineaire regressielijnen welke de elastische kracht en kromming en de uiterste kracht en kromming aangeven. Er zijn vijf grafieken getekend, in elke grafiek zijn de twee betonbalken met eenzelfde onderwapening beschouwd.

Om de plastische zakking te bepalen worden de meetgegevens van LVDT 1 geraadpleegd. De gegevens van LVDT 1 zijn belangrijk op het moment dat de aangrijpende puntlast de vloeikracht bereikt, of de maximale kracht. Met deze gegevens zijn de zakking bij de vloeikracht en uiterste kracht bekend. De in 5.1 berekende krachten worden hiervoor aangenomen. Wanneer de plastische zakking per proefstuk bekend is kan de opgetreden plastische rotatie berekend worden. Deze plastische rotatie is de maximaal opneembare rotatie, de plastische rotatiecapaciteit dus, omdat gekeken wordt naar het traject tussen de vloeikracht en de kracht bij bezwijken. In afbeelding 4.1 en 4.2 is te zien hoe de plastische rotatie en de plastische zakking zich met elkaar verhouden. Ook de formules voor het bepalen van de rotatie uit de zakking zijn in hoofdstuk 4 te vinden. In tabel 5.2 is een overzicht gegeven van alle zakkingen en de daarbij behorende plastische rotatie.

Overzicht plastische rotaties				
wapening	u_e	u_u	u_{pl}	$\Phi_{2;pl}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[rad]
ø8 (1-5)	2,73	21,49	18,76	0,03752
ø8 (2-5)	2,76	25,02	22,26	0,04453
ø10 (1-4)	3,89	23,71	19,82	0,03964
ø10 (2-4)	4,21	22,14	17,92	0,03585
ø12 (1-3)	5,05	20,32	15,27	0,03055
ø12 (2-3)	5,04	20,57	15,52	0,03105
ø16 (1-2)	6,84	19,34	12,50	0,02500
ø16 (2-2)	7,09	19,95	12,86	0,02572
ø20 (1-1)	9,22	20,11	10,89	0,02178
ø20 (2-1)	8,51	19,23	10,72	0,02144

Tabel 5.2: Plastische rotaties van de praktijkresultaten

Om de verschillen in plastische rotatie per proefstuk overzichtelijk te maken is de volgende grafiek opgesteld. Zoals te zien is in de grafiek zijn de verschillen tussen de twee reeksen bij eenzelfde wapeningsdiameter gering.



Afbeelding 5.1: verschil tussen de plastische rotaties bij de verschillende proeven

De maximaal opneembare rotatie neemt af naarmate de wapeningsdoorsnede toeneemt. Dit wil zeggen dat de rotatiecapaciteit afneemt als de wapeningsdoorsnede van de twee wapeningsstaven onderin de betonbalken toeneemt.

Nu de rotatiecapaciteit bekend is kan de plastische lengte, dus de lengte waarover een plastisch scharnier gevormd wordt, bepaald worden. Dit gebeurt in het volgende hoofdstuk.

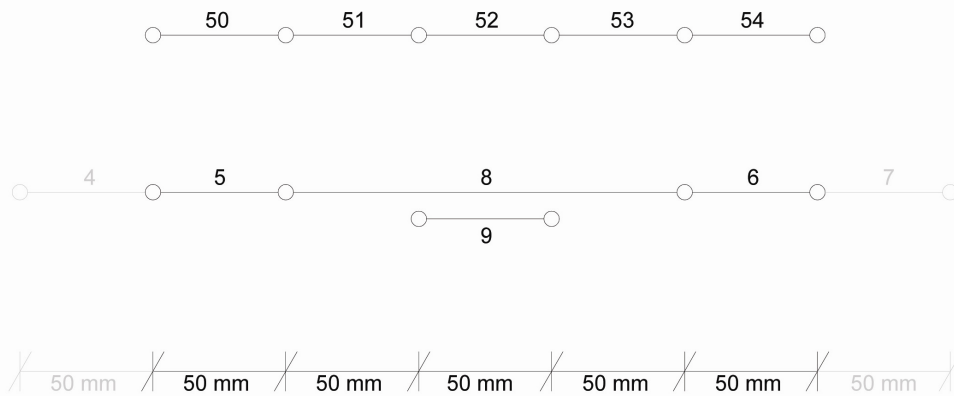
5.2. KROMMINGEN

De plaatsing van de LVDT's op de proefstukken is eerder al vermeld. Om de krommingen te bepalen zijn de gegevens van de volgende LVDT's benodigd:

- De vijf LVDT's geplaatst aan de bovenzijde van de balk op de zwaartelij van de drukzone. Meettraject: 5 x 50 mm. Nummer: 50 t/m 54.
- De vijf LVDT's geplaatst aan de onderzijde van de balk op het hart van de onderwapening. Meettraject: 4 x 50 mm en 1 x 150 mm. Nummer 4 t/m 8.
- De LVDT direct op de onderwapeningsstaaf geplaatst. Meettraject: 50 mm. Nummer 9.

De meeste meettrajecten van de LVDT's zijn dus 50 mm groot, met uitzondering van één LVDT, deze heeft een meettraject van 150 mm.

Onderstaande afbeelding laat zien hoe de LVDT's zijn gerangschikt over het betonoppervlak. LVDT nummer 9 is rechtstreeks op de wapeningsstaaf geplaatst.



Afbeelding 5.2: Overzicht van de LVDT's benodigd om de plastische lengte te bepalen

Om de kromming van de betonbalk over een bepaald traject vast te leggen wordt de volgende formule gebruikt:

$$\kappa = \frac{\varepsilon_{onder} - \varepsilon_{boven}}{h_m} \quad (5.1)$$

Waarin:

- κ = kromming van de balk over het meettraject van de LVDT's
- ε_{onder} = rek onderin de balk over het meettraject van de beschouwde LVDT
- ε_{boven} = rek bovenin de balk over het meettraject van de beschouwde LVDT
- h_m = afstand tussen de LVDT boven en de LVDT onder

De rek onderaan het betonoppervlak is positief, de rek bovenaan het betonoppervlak is negatief. Wanneer deze waarden nu van elkaar af worden getrokken ontstaat dus een getal dat in absolute zin groter is. Zie afbeelding 1.3.

Om de rekken te bepalen is onderstaande formule gebruikt:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5.2)$$

Waarin:

- ε = rek
- Δl = lengteverandering
- l_0 = lengte op tijdstip 0

Er zijn verschillende trajecten te gebruiken voor het bepalen van de plastische lengte. Ook de krommingen moeten dus over deze verschillende trajecten worden bepaald. De grootte van deze trajecten hangt samen met de onderlinge afstand tussen de LVDT's. Hieronder staat uiteengezet welke trajecten mogelijk zijn en welke LVDT's hierbij van toepassing zijn.

Omdat het plastische scharnier vanuit het midden van het proefstuk beschouwd wordt zijn de waarden van de LVDT's aan beide zijden van het midden opgeteld en gemiddeld.

Beschikbare trajecten		
Lengte traject	Relevante LVDT's boven	Relevante LVDT's onder
[mm]		
50	52	9*
100	$\frac{1}{2} \cdot (51 + 53) + 52$	$\frac{1}{3} \cdot 8 + 9^*$
150	51 + 52 + 53	8
200	$\frac{1}{2} \cdot (50 + 54) + 51 + 52 + 53$	$\frac{1}{2} \cdot (5 + 6) + 8$
250	50 + 51 + 52 + 53 + 54	5 + 6 + 8

Tabel 5.3: Beschikbare trajecten om krommingen te bepalen, inclusief relevante LVDT's

- * LVDT nummer 9 is rechtstreeks op het staal bevestigd. Wanneer het staal gaat vloeien wordt de doorsnede van de wapeningsstaaf langzaam kleiner waardoor de LVDT uiteindelijk los aan de staaf komt te hangen. Dit wil dus zeggen dat de gemeten rekken van LVDT nummer 9, ergens tussen vloeimoment en het uiterste moment, onbetrouwbaar worden.

De krommingen per proefstuk zijn nu globaal bepaald. Hiervoor is gebruik gemaakt van de praktijkwaarden van de beproevingen. Deze krommingen hangen af van het gebied waarover wordt bekeken. Daarom is de kromming niet eenduidig uit te drukken. In het volgende hoofdstuk zullen de krommingen gebruikt worden voor het bepalen van de plastische lengte. Dit wordt ook gedaan met behulp van de waarden die middels de theorie gevonden zijn.

6. PLASTISCHE LENGTE

In dit hoofdstuk wordt de plastische lengte van de plastische scharnieren per proefstuk vastgelegd. Dit is het hoofddoel van dit onderzoek. Om de plastische lengte te bepalen zijn de krommingen en de plastische zakkingen van de betonbalken nodig. In onderstaande formule is het verband nogmaals weergegeven:

$$\varphi_{pl} = \ell_p \cdot (\kappa_u - \kappa_e) \quad (6.1)$$

Wanneer de plastische lengte onbekend is, kan deze formule worden omgeschreven tot de volgende:

$$\ell_p = \frac{\varphi_{pl}}{(\kappa_u - \kappa_e)} \quad \text{met } (\kappa_u - \kappa_e) = \kappa_{pl} \quad (6.2)$$

Waarin:

- ℓ_p = plastische lengte
- φ_{pl} = plastische rotatiecapaciteit
- κ_u = uiterste kromming
- κ_e = elastische kromming

De plastische rotatiecapaciteit volgt uit de plastische zakking van de proefstukken, berekend in het vorige hoofdstukken. Ook de krommingen zijn berekend in het voorgaande hoofdstuk. Hierbij moet opgemerkt worden dat de gegevens uit de praktijk, de gemeten rekken, slechts kunnen resulteren in een plastische lengte die een veelvoud van 50 mm is. De reden hiervan is dat de LVDT's op 50 mm afstand van elkaar zijn geplaatst.

6.1. PLASTISCHE LENGTE VOLGENS THEORIE

In hoofdstuk 4 zijn de plastische rotaties bepaald uit de praktijkresultaten. Hiervoor is het gemiddelde genomen van de twee proeven, dit kon doordat de proefresultaten dicht bij elkaar lagen. In hetzelfde hoofdstuk zijn ook de krommingen bepaald met behulp van M- κ -diagrammen. In tabel 6.1 is een overzicht te vinden van de eerder berekende gegevens. Nu de plastische rotaties en de plastische krommingen bekend zijn is het mogelijk om met formule (6.2) de plastische lengte te berekenen. De resultaten zijn ook in de tabel te vinden. Hieruit blijkt dat de plastische lengte toeneemt naarmate het wapeningspercentage hoger wordt.

Overzicht krommingen				
wapening	$\Phi_{2;pl}$	κ_{pl}	ℓ_p	$\ell_p/A_{s;2}$
	[rad]	[m ⁻¹]	[mm]	[m ⁻¹]
ø8 (0,25%)	0,04115	0,25328	162,4552	1,615972
ø10 (0,40%)	0,03776	0,22362	168,8404	1,074871
ø12 (0,57%)	0,03112	0,18085	172,0635	0,760688
ø16 (1,02%)	0,02559	0,11946	214,2305	0,532748
ø20 (1.61%)	0,02058	0,07498	274,4489	0,436799

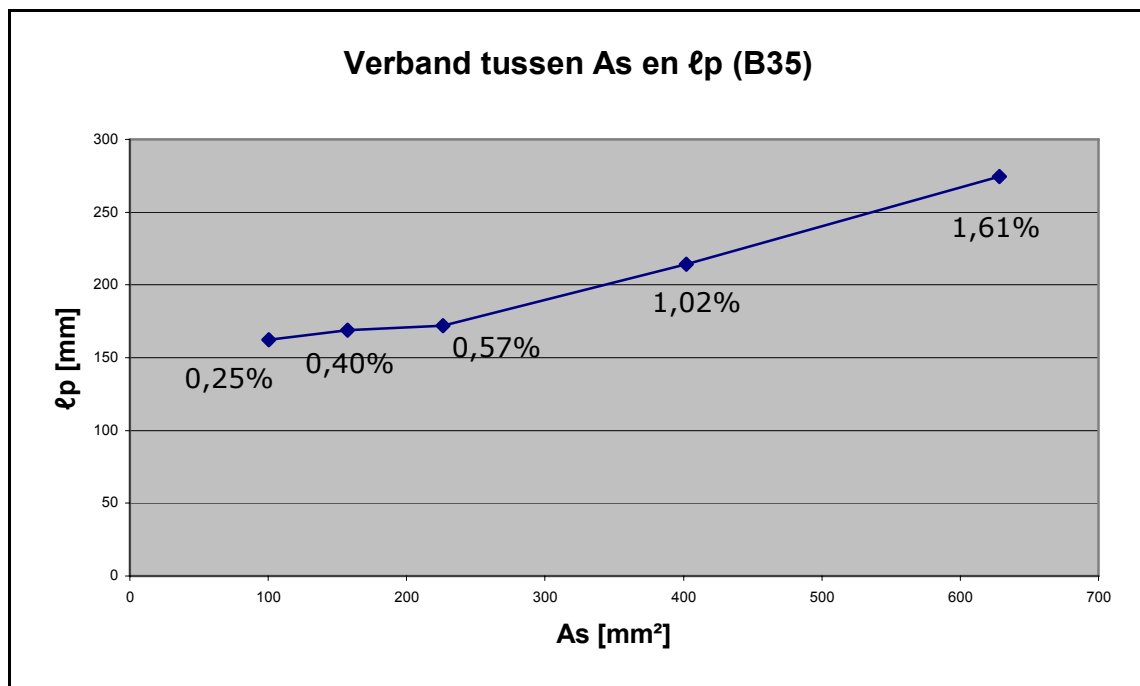
Tabel 6.1: Overzicht krommingen

Verband tussen plastische lengte en wapening

Er is geprobeerd een verband tussen de plastische lengte en de wapening welke in de balk aanwezig is te vinden. Er is naar verschillende factoren gekeken. Het is erg moeilijk om hieruit conclusies te trekken, omdat bij onze proeven alleen de wapening variabel was. We weten dus niet de invloed van de hoogte van de balk op de plastische lengte. Er is uiteindelijk voor gekozen om naar het verband tussen de plastische lengte en het staaloppervlak van de hoofdwapening te kijken. Door deze op elkaar te delen wordt de waarde gevonden welke in tabel 6.1 te vinden is. Met deze gegevens is grafiek 6.1 geplot. Wat opvalt is dat wanneer de balk duidelijk op betonstuik bezwijkt de grafiek een lineaire lijn is. Bij de proef met het laagste wapeningspercentage gaat de balk kapot doordat de hoofdwapening bezwijkt. Ook bij de balk met 2 x $\varnothing 10$ mm bezwijkt de balk bijna op staalbreuk (dit is te zien in de uitwerking in bijlage C). Wanneer bij deze balk de betondrukzone bezwijkt heeft de hoofdwapening een rek van 64,3%, net iets kleiner dan de bezwijkrek van 65,0%. Hierdoor is te verklaren de grafiek hier al afbuigt. Omdat we te weinig gegevens hebben over dit gebied is hiervoor geen formule afgeleid. Wanneer het wapeningspercentage hoger wordt is een constante lijn te zien. Er is geprobeerd om hiervoor een verband te vinden. Dit verband ziet er als volgt uit:

$$\ell_p = 100 \cdot \omega_{0,2} + \frac{4}{9} \cdot d_2 \quad (6.3)$$

In deze formule komt dus de nuttige hoogte van de balk voor. Omdat de hoogte van de balken niet wisselend was is het moeilijk vast te stellen of deze formule ook voor andere afmetingen van de balk geldt. Hoe de omslag van het ene naar het andere deel eruit ziet is niet geheel bekend.



Afbeelding 6.1: verband tussen het oppervlak van de wapening en de plastische lengte

6.2. PLASTISCHE LENGTE UIT PROEVEN

Om de plastische lengte te bepalen moet het volgende stappenplan aangehouden worden:

- Zoek de relevante LVDT's onder en boven op in tabel 5.3 voor het te beschouwen meettraject.
- Bepaal de elastische en uiterste rek van de relevante LVDT's onder en boven.
- Bepaal met deze rekken de elastische en uiterste kromming volgens formule
- Aan de hand van de plastische rotatiecapaciteit die eerder is vastgesteld kan de plastische lengte worden bepaald met formule (6.2).

Herhaal voorafgaande stappen voor de andere beschikbare meettrajecten.

Het verwerken van de krommingen voor de verschillende meettrajecten is al beschreven in het vorige hoofdstuk. Deze gegevens hangen nauw samen en moeten ook steeds vergeleken worden.

Wanneer de plastische lengte is bepaald voor elk beschikbaar meettraject kunnen de lengte van dit meettraject en de bijbehorende plastische lengte worden uitgezet in dezelfde grafiek. Hierbij moet vermeld worden dat louter het juiste traject waarbinnen de werkelijke plastische lengte valt vast te stellen is. Er kan geconcludeerd worden binnen welke twee meettrajecten de werkelijke plastische lengte valt. De resultaten zijn opgesomd in de volgende tabel. De verdere uitwerking hiervan is te vinden in bijlage E.

Plastische lengte		
wapening	ondergrens	bovengrens
	[mm]	[mm]
ø8 (1-5)	150	200
ø8 (2-5)	200	250
ø10 (1-4)	150	200
ø10 (2-4)	150	200
ø12 (1-3)	150	200
ø12 (2-3)	200	250
ø16 (1-2)	150	200
ø16 (2-2)	150	200
ø20 (1-1)	150	200
ø20 (2-1)	150	200

Tabel 6.2: Onder- en bovengrens van de plastische lengte per proefstuk

Een extra onnauwkeurigheid wordt geïntroduceerd door het fluctuerende verloop van de rekken die gemeten zijn door de LVDT's aan de boven- en onderzijde op het betonoppervlak. De gemeten rekken zijn slechts momentopnamen. Wanneer bijvoorbeeld net een scheurtje ontstaat binnen het meettraject van de LVDT zal de rek op dat ogenblik relatief veel veranderen. Door de rekken te beschouwen over een langere tijdsduur, daar een gemiddelde stijging van te bepalen en die afgevlakte rekken te gebruiken bij de bepaling van de plastische lengte zou deze onnauwkeurigheid wellicht kunnen worden uitgeschakeld.

7. CONCLUSIE

De conclusies van dit onderzoek zijn gebaseerd op het onderzoeksdoel: het bepalen van de plastische lengte van het plastische scharnier dat gevormd wordt in een betonbalk. Om tot de plastische lengte te komen is het vereist om de krommingen en de rotatie van de balk vast te leggen.

De eerste conclusie die getrokken kan worden is dat de zakking van de balk afneemt naarmate de diameter van de onderwapening groter wordt. Hiermee hangt samen dat de plastische rotatiecapaciteit afneemt naarmate de diameter van de gebruikte onderwapening toeneemt.

De tweede conclusie is dat de plastische kromming van de betonbalken eveneens afneemt naarmate de diameter van de gebruikte onderwapening groter wordt.

Uit de resultaten uit de theorie is gebleken dat de plastische lengte groter wordt naarmate de diameter van de onderwapening wordt vergroot. Aangezien de afname van de krommingen groter is dan de toename van de plastische lengte komt hieruit naar voren dat de plastische rotatiecapaciteit afneemt bij een groter wapeningspercentage.

Wat blijkt is dat de plastische lengte, en daarmee de krommingen en rotatiecapaciteit, wel degelijk afhankelijk is van het toegepaste wapeningsstaal onderin de betonbalken.

In de norm wordt de nuttige hoogte van de balk aangehouden voor de plastische lengte. Uit ons onderzoek is gebleken dat deze waarde in de meeste gevallen te hoog zal zijn. Hierdoor wordt dus een te hoge rotatiecapaciteit berekend.

8. AANBEVELINGEN

Zoals bij veel onderzoek volgen na afloop meer vragen dan waarmee het onderzoek is gestart. Gedurende het onderzoek is gebleken dat het onderzoek in de toekomst zou kunnen worden verbeterd op diverse punten. Deze punten zijn hieronder opgesomd.

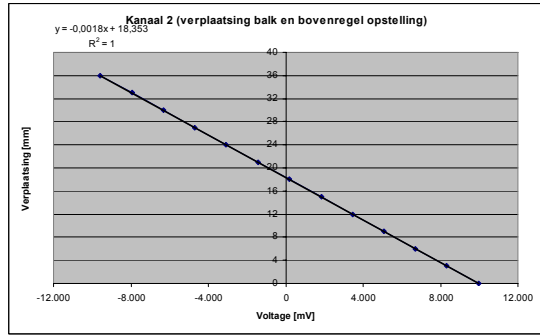
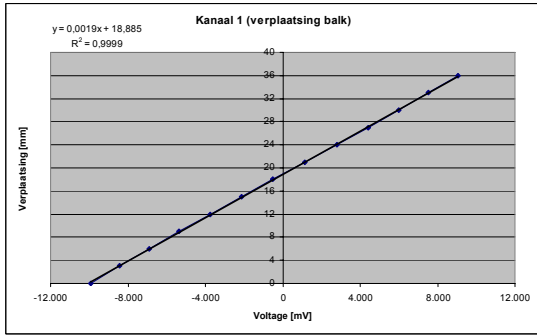
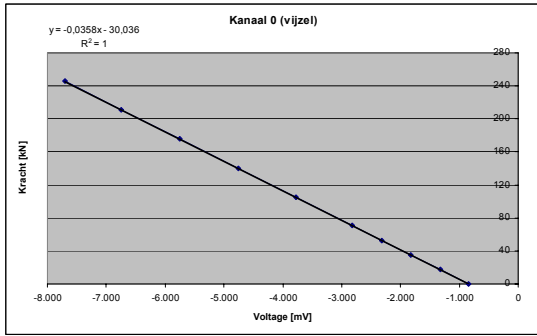
- Om meer zekerheid aan de uitkomsten van het onderzoek te kunnen hechten zou het aantal uit te voeren beproevingen moeten worden verhoogd. Echter hangt dit ook af van de beschikbare tijd. Door meer proeven uit te voeren kunnen afwijkende proefstukken beter worden onderscheiden. Bovendien kan het resulterende verband tussen de toegepaste onderwapening en de plastische lengte beter onderzocht worden.
- Wanneer meer beproevingen uitgevoerd zouden worden kan ook de hoogte van de proefstukken gevarieerd worden. Het is bij dit onderzoek namelijk onmogelijk een verband tussen de hoogte van de balk en de plastische lengte op te stellen. Bij variabele hoogte kan dit aspect wel worden meegenomen.
- Aan het bepalen van de krommingen aan de hand van de rekmeters aangebracht op het betonoppervlak kleven enkele nadelen. De rekmeters hebben een bepaald meettraject, wanneer dit groot is kan de plastische lengte slechts globaal bepaald worden, namelijk tussen twee dergelijke meettrajecten in. Door het aantal rekmeters te vergroten en de onderlinge afstand te verkleinen wordt deze onnauwkeurigheid deels tenietgedaan.
- Gedurende de beproevingen is steeds één LVDT rechtstreeks op het wapeningsstaal onderin de betonbalk geplaatst. Deze opnemer verliest haar betrouwbaarheid wanneer de vloeikracht is gepasseerd. Door ook deze LVDT op het betonoppervlak te plaatsen, net zoals de andere 10 LVDT's, worden de gemeten rekken wellicht betrouwbaarder. Bovendien kan op deze manier het werkelijke scheurmoment in de praktijk bepaald worden omdat er nu geen uitsparing in het beton hoeft te worden aangebracht.
- De krommingen zijn in de praktijk bepaald door de rekgegevens van de LVDT's aangebracht op het betonoppervlak. Aangezien het opvoeren van de puntlast op de betonbalken niet gelijkmatig gebeurt nemen de gemeten rekken ook niet vloeiend toe. Om de krommingen te bepalen moet daarom een bepaald gebied om de vloe- en bezwijkkracht beschouwd worden om de juiste helling van de rekken te bepalen. Hierna kan doorgerekend worden met de afgevlakte rekgegevens, waarmee de juiste kromming kan worden bepaald.
- Wanneer de betonbalk bezwijkt op staalbreuk wijkt de plastische lengte af van de gevonden waarden wanneer de betonbalk op betonstuik bezwijkt. Bij dit onderzoek bezweken louter de twee betonbalken met de kleinste wapeningsstaven onderin op staalbreuk. Een uitspraak over het verband tussen wijze van bezwijken en de plastische lengte kan slechts gedaan worden met deze beperkte gegevens. Dit verband dient nader te worden onderzocht.

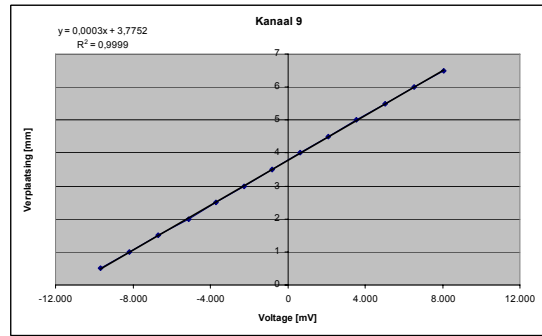
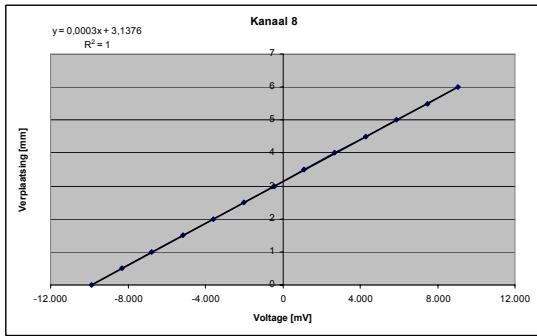
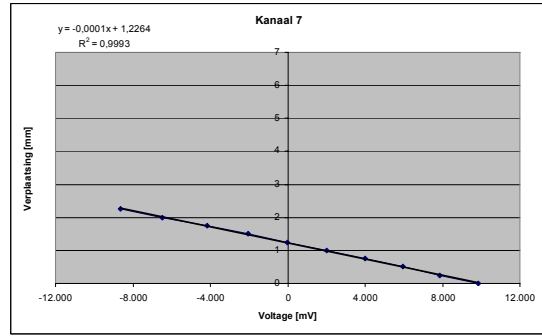
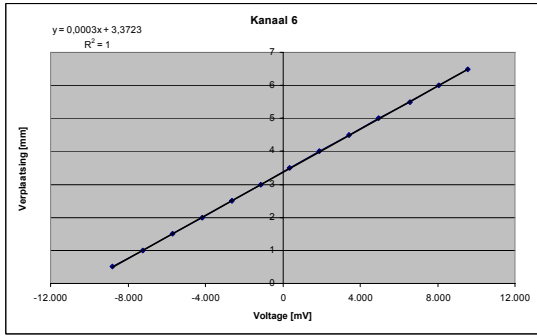
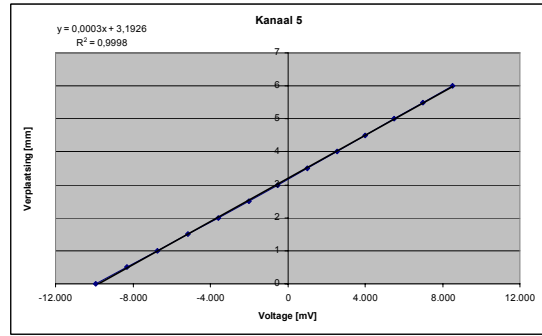
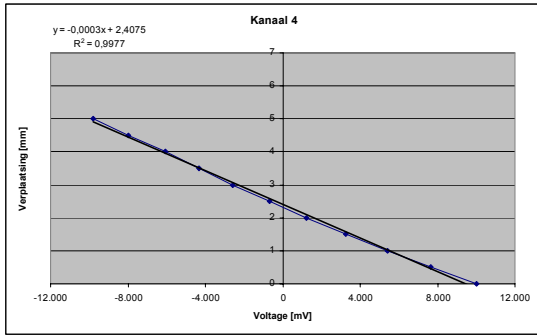
BRONNENLIJST

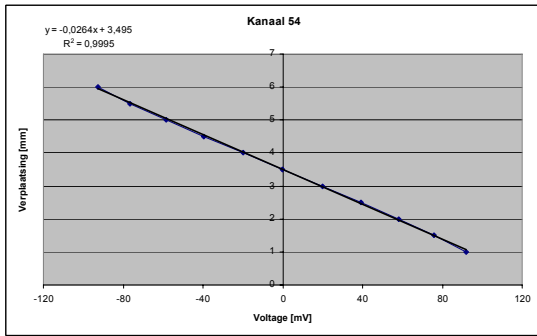
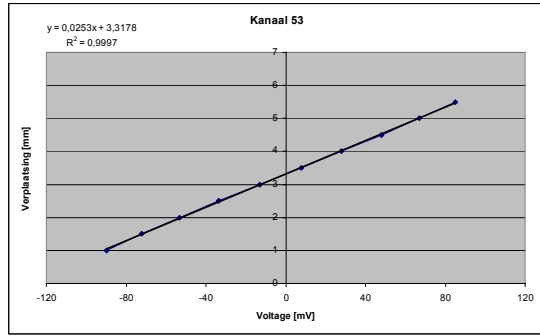
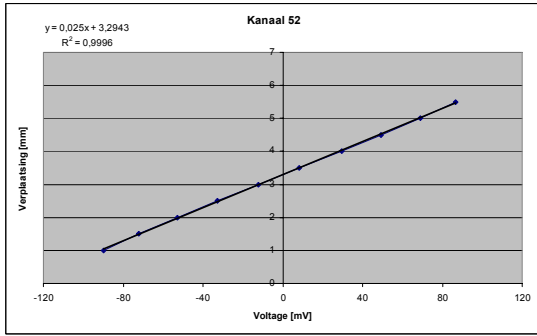
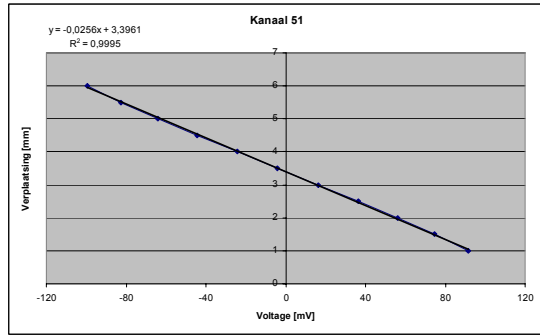
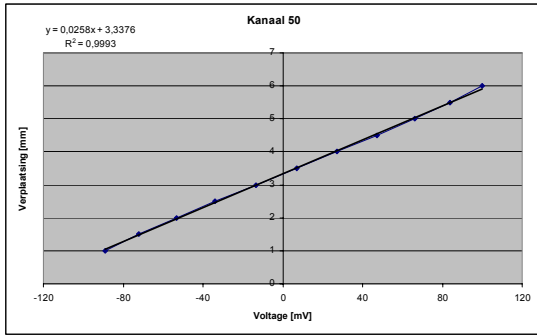
- [1] Marcus, H., *CUR Rapport 83; doorgaande balken van gewapend beton*, Betonvereniging, Zoetermeer, 1980
- [2] Roosmalen, H.A.Ph., *CUR Rapport 108; plastische scharnieren*, Betonvereniging, Zoetermeer, 1982
- [3] Sagel, R. & Vis, W.C., *Cement en beton 24; constructief ontwerpen in beton*, Stichting Betonprisma, 's-Hertogenbosch, 1977
- [4] Sagel, R. & Dongen, A.J. van, *Cement en beton 4; ontwerpen in gewapend beton*, ENCI Media, 's-Hertogenbosch, 2003
- [5] Sagel, R. & Dongen, A.J. van, *Cement en beton 2; constructieleer gewapend beton*, ENCI Media, 's-Hertogenbosch, 2006
- [6] Fenner, Roger T., *Mechanics of Solids*, CRC Press, Boca Raton, 1999
- [7] Groover, Mikell P., *Fundamentals of Modern Manufacturing*, John Wiley & Sons, New York, 2002
- [8] NEN 5968 (Bepaling druksterkte beton)
- [9] NEN 5969 (Bepaling slijttreksterkte beton)
- [10] NEN 3880 – deel G (Bepaling elasticiteitsmodulus beton)
- [11] <http://www.bwk.tue.nl/co/laboratory>
- [12] <http://www.wikipedia.nl>
zoekterm: LVDT

BIJLAGE A: KALIBRATIEGRAFIEKEN

- ***KALIBRATIEGRAFIEKEN KRACHTMEETDOOS***
- ***KALIBRATIEGRAFIEKEN LVDT'S***

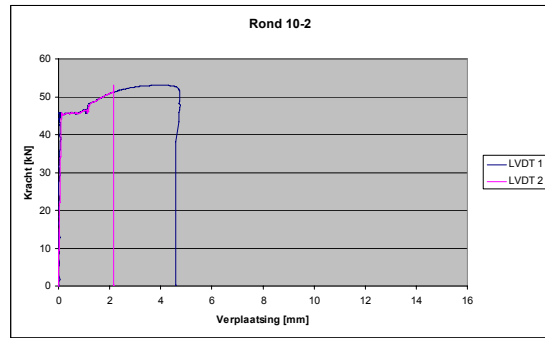
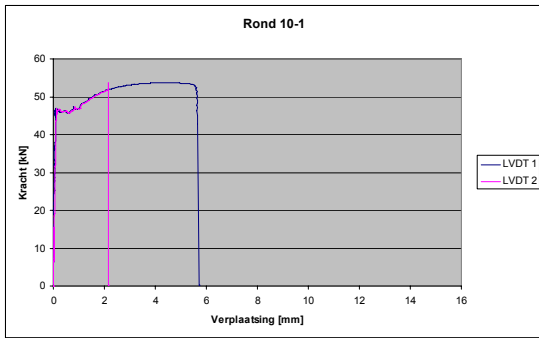
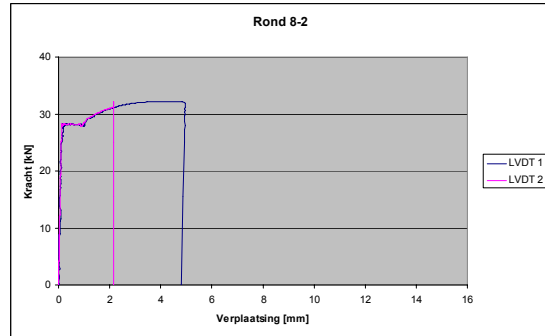
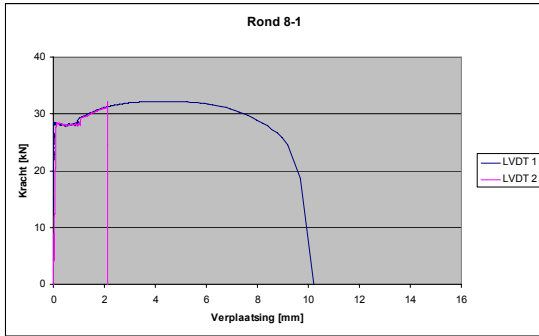
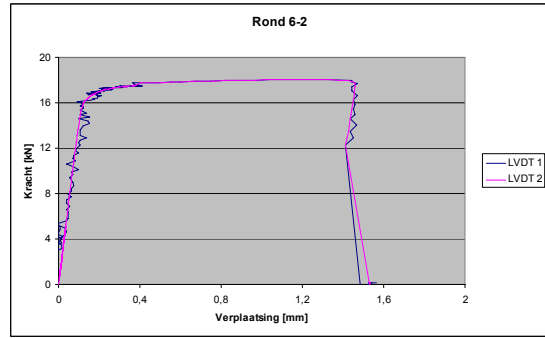
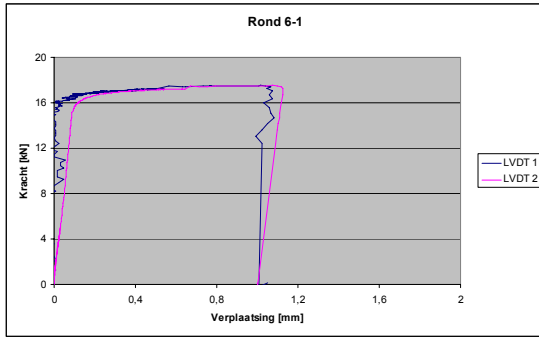


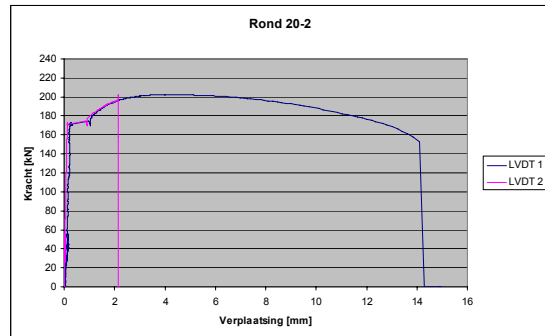
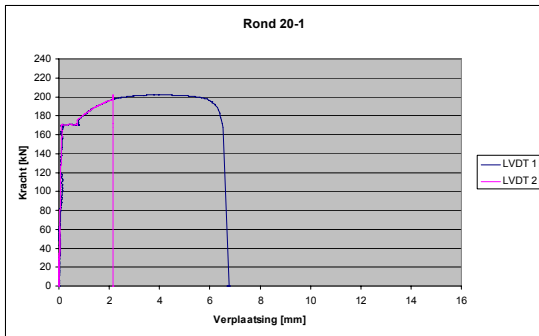
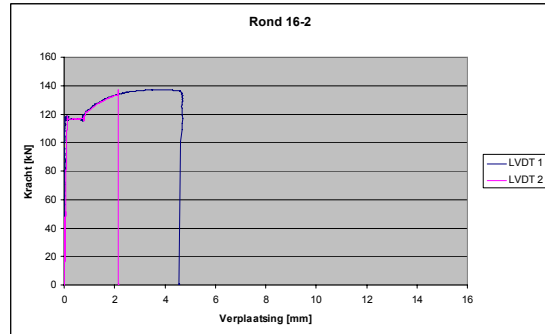
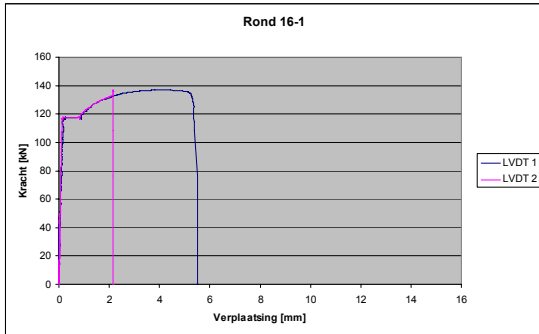
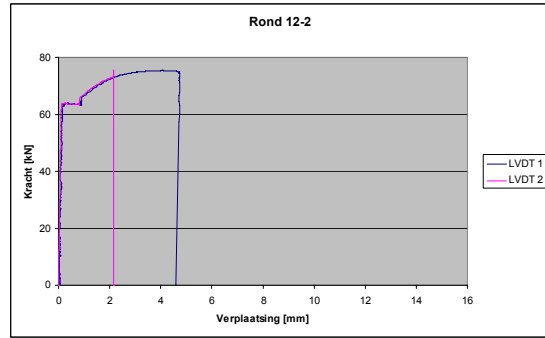
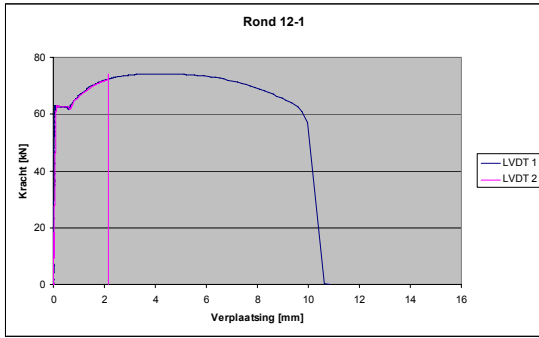




BIJLAGE B: Σ -E-DIAGRAMMEN STAAL

- ***σ - ϵ -DIAGRAMMEN ZOALS VERKREGEN TIJDENS DE TREKPROEVEN***





BIJLAGE C: M-K-DIAGRAMMEN

- ***MANIER VAN BEREKENEN***
- ***BEREKENING Ø10 MM***
- ***OVERZICHT GEGEVENS***

MANIER VAN BEREKENEN

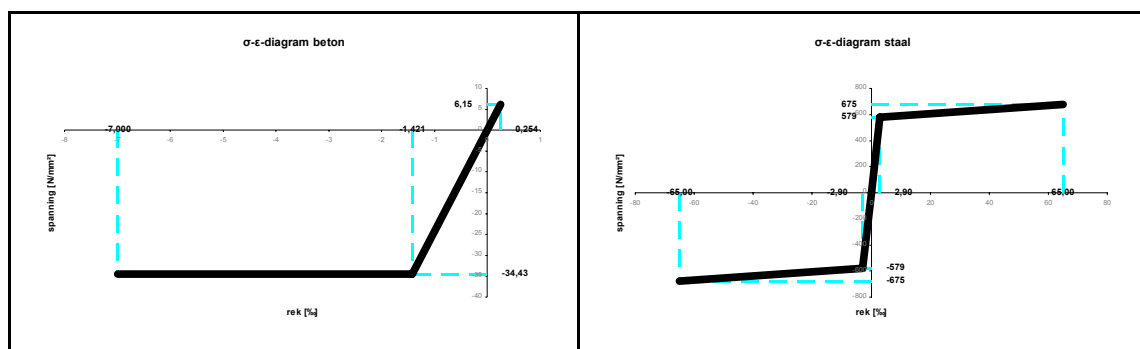
Allereerst zijn de verschillende trajecten van het beton opgedeeld in lineaire stukken. Deze lineaire stukken worden gedefinieerd door een aantal markante punten (3 voor beton en 4 voor staal). Nu worden er vergelijkingen opgesteld op de momenten dat deze punten worden bereikt. De overige materialen zitten dan in een fase (3 voor beton en 4 voor staal). Hierdoor zijn er in het totaal 576 combinaties. Al deze combinaties zijn uitgerekend zodat x_1 , y_1 en y_2 bekend zijn. Wanneer x_1 bekend is kunnen alle rekken worden bepaald. Deze rekken worden dan getoetst aan de voorwaarde van de bepaalde fase. Wanneer een bepaalde combinatie maatgevend is kan vanuit deze rekken de spanning worden bepaald. Vanuit de spanning kunnen de krachten worden bepaald en vanuit de krachten in combinatie met de afstand ten opzichte van de bovenkant het moment. Vanuit de rekken kan ook de kromming worden bepaald. Wanneer deze gegevens bekend zijn kan de EI worden bepaald. In deze gevallen werkt er geen normaalkracht op de constructie. Deze zou wel met hetzelfde programma kunnen worden berekend.

Er wordt gewerkt met bi-lineaire diagrammen zoals te zien is in hoofdstuk 4. De plastische takken van deze diagrammen hoeven geen constante waarde te hebben. Hiervoor is de helling van deze lijn bepaald en de waarde waar deze lijn de y-as snijdt. Bij beton is wel gewerkt met een constante waarde. Daarom is de helling van deze lijn 0. Dit is terug te vinden in het hierna volgende voorbeeld.

Na het scheurmoment is de trekkracht die het beton aan de onderzijde nog op kan nemen verwaarloosd. Hierdoor is er bij $\varnothing 8$ mm een sprong na het scheurmoment.

Er is hier gewerkt met negatieve waarden als het een druk betreft en positieve waarden als het om trek gaat. De waarden voor x_1 en y_1 zijn vanaf de bovenzijde berekend. Bij y_2 is het de afstand tot de onderkant. In dit geval is y_2 altijd 0, omdat het alleen om positieve krommingen gaat. Onderin de balk komen dus nooit drukkrachten, hierdoor komt nu y_2 niet voor. Verder is de uitdrukking 1 voor de bovenzijde en 2 voor de onderzijde. Dit geldt zowel voor het beton als het staal.

Er wordt gebruik gemaakt van onderstaande σ - ϵ -diagrammen.

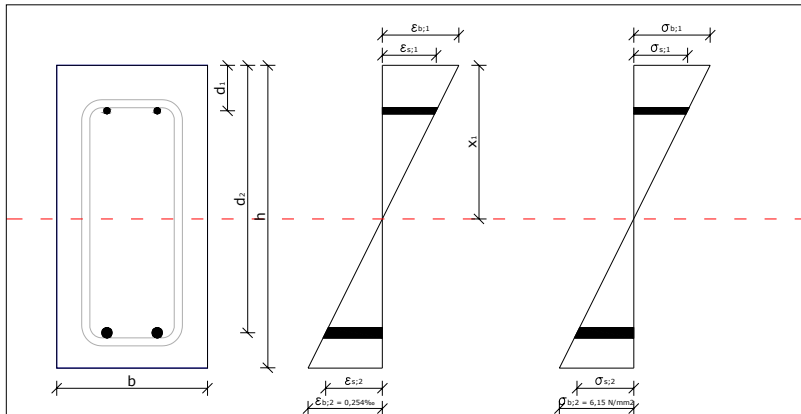


Afbeelding C.1: σ - ϵ -diagram beton

Afbeelding C.2: σ - ϵ -diagram staal

BEREKENING Ø10 MM

Scheurmoment (M_r)



Afbeelding C.3: Overzicht bij scheurmoment

Bij het berekenen van het scheurmoment gelden de volgende formules. De sommatie moet gelijk zijn aan de normaalkracht (hier 0) op de balk.

$$N_{b;1} = \left(\frac{1}{2} \cdot x_1 \cdot \frac{0 - x_1}{h - x_1} \cdot \varepsilon_{b;2} \cdot E_b \right) \cdot b$$

$$N_{s;1} = A_{s;1} \cdot \frac{d_1 - x_1}{h - x_1} \cdot \varepsilon_b \cdot E_{s;1}$$

$$N_{s;2} = A_{s;2} \cdot \frac{d_2 - x_1}{h - x_1} \cdot \varepsilon_b \cdot E_{s;2}$$

$$N_{b;2} = \left(\frac{1}{2} \cdot (h - x_1) \cdot f_{bm} \right) \cdot b \quad \text{met } f_{bm} = \sigma_{b;2}$$

Hieruit ontstaat de volgende vergelijking:

$$\left(\left(\frac{1}{2} \cdot x_1 \cdot \frac{0 - x_1}{300 - x_1} \cdot 6,15 \right) \cdot 150 \right) + \left(56,55 \cdot \frac{45 - x_1}{300 - x_1} \cdot 0,254 \cdot 10^{-3} \cdot 200000 \right) + \left(157,08 \cdot \frac{265 - x_1}{300 - x_1} \cdot 0,254 \cdot 10^{-3} \cdot 200000 \right) + \left(\left(\frac{1}{2} \cdot (300 - x_1) \cdot 6,15 \right) \cdot 150 \right) = 0$$

Nu is het mogelijk om deze vergelijking op te lossen en x_1 te bepalen, hieruit volgt:

$$x_1 = 152,14 \text{ mm}$$

Nu x_1 bekend is wordt het mogelijk om de rekken te bepalen, vanuit deze rekken wordt het dan weer mogelijk om de spanningen en de krachten te bepalen, dit is in onderstaande tabel weergegeven.

$\epsilon_{b;1}$	-0,261 ‰	$\sigma_{b;1}$	-6,33 N/mm ²	$N_{b;1}$	-72207 N	$Z_{b;1}$	50,71 mm
$\epsilon_{s;1}$	-0,184 ‰	$\sigma_{s;1}$	-36,79 N/mm ²	$N_{s;1}$	-2080 N	$Z_{s;1}$	45,00 mm
$\epsilon_{s;2}$	0,194 ‰	$\sigma_{s;2}$	38,75 N/mm ²	$N_{s;2}$	6087 N	$Z_{s;2}$	265,00 mm
$\epsilon_{b;2}$	0,254 ‰	$\sigma_{b;2}$	6,15 N/mm²	$N_{b;2}$	68200 N	$Z_{b;2}$	250,71 mm

Controle inwendig krachteenwicht

0 N

Nu is het mogelijk om het bijbehorende moment, de kromming en de EI te bepalen. Het moment wordt bepaald ten opzichte van de bovenzijde.

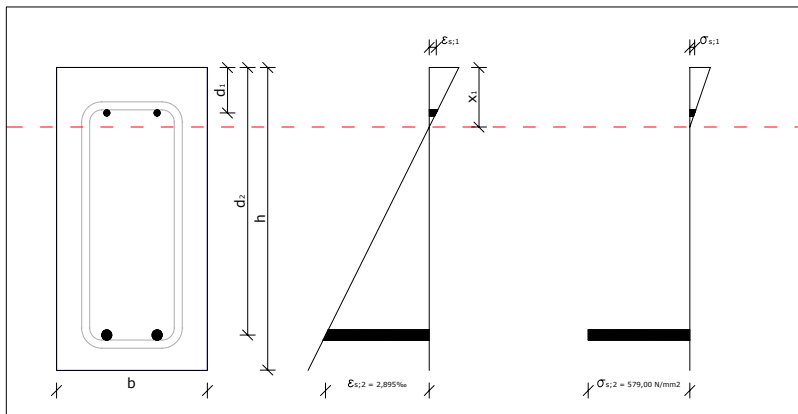
$$M_r = (-72207 \cdot 50,71) + (-2080 \cdot 45,00) + (6097 \cdot 265,00) + (68200 \cdot 250,71)$$

$$M_r = 1,496 \cdot 10^7 \text{ Nmm} = 14,956 \text{ kNm}$$

$$\kappa_r = \frac{(0,254 + 0,261) \cdot 10^{-3}}{300} = 1,717 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^{-1} = 0,00172 \text{ m}^{-1}$$

$$EI_r = \frac{1,496 \cdot 10^7}{1,717 \cdot 10^{-6}} = 8,712 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2 = 8712 \text{ kNm}^2$$

Vloeimoment hoofdwapening ($M_{e;2}$)



Afbeelding C.4: Overzicht bij vloeimoment hoofdwapening

Bij het bereiken van het vloeimoment van de hoofdwapening gelden de volgende formules. De sommatie moet gelijk zijn aan de normaalkracht (hier 0) op de balk.

$$N_{b;1} = \left(\frac{1}{2} \cdot x_1 \cdot \frac{0 - x_1}{d_2 - x_1} \cdot \epsilon_{s;2} \cdot E_b \right) \cdot b$$

$$N_{s;1} = A_{s;1} \cdot \frac{d_1 - x_1}{d_2 - x_1} \cdot \epsilon_{s;2} \cdot E_{s;1}$$

$$N_{s;2} = A_{s;2} \cdot f_{s;2}$$

Hieruit ontstaat de volgende vergelijking:

$$\left(\left(\frac{1}{2} \cdot x_1 \cdot \frac{0 - x_1}{265 - x_1} \cdot 2,895 \cdot 10^{-3} \cdot 24227 \right) \cdot 150 \right) + \left(56,55 \cdot \frac{45 - x_1}{265 - x_1} \cdot 2,895 \cdot 10^{-3} \cdot 200000 \right) + (157,08 \cdot 579) = 0$$

Nu is het mogelijk om deze vergelijking op te lossen en x_1 te bepalen, hieruit volgt:

$$x_1 = 58,95 \text{ mm}$$

Nu x_1 bekend is wordt het mogelijk om de rekken te bepalen, vanuit deze rekken wordt het dan weer mogelijk om de spanningen en de krachten te bepalen, dit is in onderstaande tabel weergegeven.

$\epsilon_{b;1}$	-0,828 ‰	$\sigma_{b;1}$	-20,07 N/mm ²	$N_{b;1}$	-88732 N	$Z_{b;1}$	19,65 mm
$\epsilon_{s;1}$	-0,196 ‰	$\sigma_{s;1}$	-39,21 N/mm ²	$N_{s;1}$	-2217 N	$Z_{s;1}$	45,00 mm
$\epsilon_{s;2}$	2,895 ‰	$\sigma_{s;2}$	579,00 N/mm²	$N_{s;2}$	90949 N	$Z_{s;2}$	265,00 mm
$\epsilon_{b;2}$	3,387 ‰	$\sigma_{b;2}$	0,00 N/mm ²	$N_{b;2}$	0 N	$Z_{b;2}$	0,00 mm

Controle inwendig krachterevenwicht

0 N

Nu is het mogelijk om het bijbehorende moment, de kromming en de EI te bepalen. Het moment wordt bepaald ten opzichte van de bovenzijde.

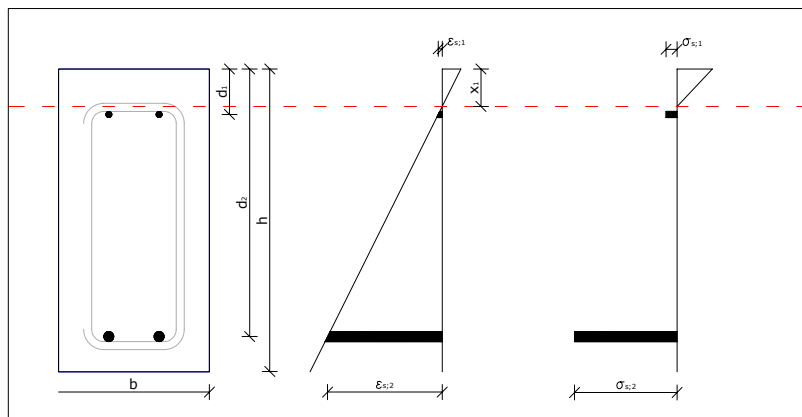
$$M_{e;2} = (-88732 \cdot 19,65) + (-2217 \cdot 45,00) + (90949 \cdot 265,00)$$

$$M_{e;2} = 2,226 \cdot 10^7 \text{ Nmm} = 22,258 \text{ kNm}$$

$$\kappa_{e;2} = \frac{(3,387 + 0,828) \cdot 10^{-3}}{300} = 1,405 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^{-1} = 0,01405 \text{ m}^{-1}$$

$$EI_{e;2} = \frac{2,226 \cdot 10^7}{1,405 \cdot 10^{-5}} = 1,584 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2 = 1584 \text{ kNm}^2$$

Stuikmoment (M_{pl})



Afbeelding C.5: Overzicht bij stuikmoment

Bij het berekenen van het stuikmoment gelden de volgende formules. De sommatie moet gelijk zijn aan de normaalkracht (hier 0) op de balk.

$$N_{b;1} = \left(\frac{1}{2} \cdot x_1 \cdot f'_b \right) \cdot b$$

$$N_{s;1} = A_{s;1} \cdot \frac{d_1 - x_1}{0 - x_1} \cdot \varepsilon'_b \cdot E_{s;1}$$

$$N_{s;2} = A_{s;2} \cdot \left(\frac{d_2 - x_1}{0 - x_1} \cdot \varepsilon'_b \cdot E_{s;2;trek} + f_{s;2;trek} \right)$$

Hieruit ontstaat de volgende vergelijking:

$$\left(\left(\frac{1}{2} \cdot x_1 \cdot -34,43 \right) \cdot 150 \right) + \left(56,55 \cdot \frac{45 - x_1}{0 - x_1} \cdot 1,421 \cdot 10^{-3} \cdot 200000 \right) + \left(157,08 \cdot \left(\frac{265 - x_1}{0 - x_1} \cdot 1,421 \cdot 10^{-3} \cdot 1546 + 575 \right) \right) = 0$$

Nu is het mogelijk om deze vergelijking op te lossen en x_1 te bepalen, hieruit volgt:

$$x_1 = 37,10 \text{ mm}$$

Nu x_1 bekend is wordt het mogelijk om de rekken te bepalen, vanuit deze rekken wordt het dan weer mogelijk om de spanningen en de krachten te bepalen, dit is in onderstaande tabel weergegeven.

$\varepsilon_{b;1}$	-1,421 ‰	$\sigma_{b;1}$	-34,43 N/mm²	$N_{b;1}$	-95788 N	$Z_{b;1}$	12,37 mm
$\varepsilon_{s;1}$	0,303 ‰	$\sigma_{s;1}$	60,51 N/mm ²	$N_{s;1}$	3422 N	$Z_{s;1}$	45,00 mm
$\varepsilon_{s;2}$	8,729 ‰	$\sigma_{s;2}$	588,02 N/mm ²	$N_{s;2}$	92366 N	$Z_{s;2}$	265,00 mm
$\varepsilon_{b;2}$	10,069 ‰	$\sigma_{b;2}$	0,00 N/mm ²	$N_{b;2}$	0 N	$Z_{b;2}$	0,00 mm

Controle inwendig krachtenevenwicht

0 N

Nu is het mogelijk om het bijbehorende moment, de kromming en de EI te bepalen. Het moment wordt bepaald ten opzichte van de bovenzijde.

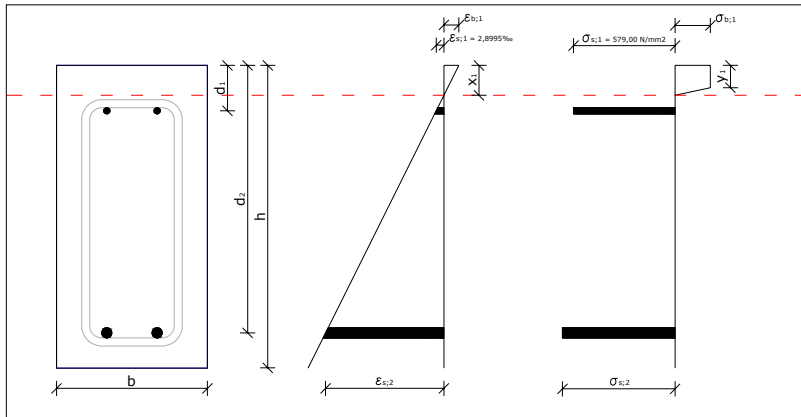
$$M_{pl} = (-95788 \cdot 12,37) + (3422 \cdot 45,00) + (92366 \cdot 265,00)$$

$$M_{pl} = 2,345 \cdot 10^7 \text{ Nmm} = 23,446 \text{ kNm}$$

$$\kappa_{pl} = \frac{(10,069 + 1,421) \cdot 10^{-3}}{300} = 3,830 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^{-1} = 0,03830 \text{ m}^{-1}$$

$$EI_{pl} = \frac{2,345 \cdot 10^7}{3,830 \cdot 10^{-5}} = 6,122 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2 = 612 \text{ kNm}^2$$

Vloeimoment bovenwapening ($M_{e;1}$)



Afbeelding C.6: Overzicht bij vloeimoment bovenwapening

Bij het berekenen van het vloeimoment van de bovenwapening gelden de volgende formules. De sommatie moet gelijk zijn aan de normaalkracht (hier 0) op de balk.

$$N_{b;1} = \left(\frac{1}{2} \cdot (x_1 + y_1) \cdot f'_{b;1} + \frac{1}{2} \cdot y_1 \cdot \left(\left(\frac{0 - x_1}{d_1 - x_1} \cdot \varepsilon_{s;2} \cdot E_{b;druk} + f'_{b;druk} \right) - f'_{b;1} \right) \right) \cdot b$$

$$N_{s;1} = A_{s;1} \cdot f_{s;1}$$

$$N_{s;2} = A_{s;2} \cdot \left(\frac{d_2 - x_1}{d_1 - x_1} \cdot \varepsilon_{s;2} \cdot E_{s;2;trek} + f_{s;2;trek} \right)$$

Hieruit ontstaat de volgende vergelijking:

$$\left(\left(\frac{1}{2} \cdot (x_1 + y_1) \cdot -34,43 + \frac{1}{2} \cdot y_1 \cdot \left(\left(\frac{0 - x_1}{45 - x_1} \cdot 2,895 \cdot 10^{-3} \cdot 0 + -34,43 \right) + 34,43 \right) \right) \cdot 150 \right) + (56,55 \cdot 579) + \left(157,08 \cdot \left(\frac{265 - x_1}{45 - x_1} \cdot 2,895 \cdot 10^{-3} \cdot 1546 + 575 \right) \right) = 0$$

Er zijn nu 2 onbekenden, hierdoor moet er een 2^e vergelijking worden opgesteld, zodat alle onbekenden opgelost kunnen worden. Deze formule geeft aan dat ter hoogte van y_1 de rek van het beton in de drukzone gelijk is aan ε'_b . Hierdoor ontstaat onderstaande vergelijking.

$$\frac{y_1 - x_1}{\varepsilon'_{b;1}} = \frac{d_1 - x_1}{\varepsilon_{s;1}} \Rightarrow \frac{y_1 - x_1}{1,421 \cdot 10^{-3}} = \frac{45 - x_1}{2,895 \cdot 10^{-3}}$$

Nu is het mogelijk om deze vergelijkingen op te lossen en x_1 en y_1 te bepalen, hieruit volgt:

$$x_1 = 29,67 \text{ mm}$$

$$y_1 = 22,14 \text{ mm}$$

Nu x_1 bekend is wordt het mogelijk om de rekken te bepalen, vanuit deze rekken wordt het dan weer mogelijk om de spanningen en de krachten te bepalen, dit is in onderstaande tabel weergegeven.

$\epsilon_{b;1}$	-5,603 ‰	$\sigma_{b;1}$	-34,43 N/mm ²	$N_{b;1}$	-133778 N	$Z_{b;1}$	13,04 mm
$\epsilon_{s;1}$	2,895 ‰	$\sigma_{s;1}$	579,00 N/mm²	$N_{s;1}$	32742 N	$Z_{s;1}$	45,00 mm
$\epsilon_{s;2}$	44,440 ‰	$\sigma_{s;2}$	643,22 N/mm ²	$N_{s;2}$	101036 N	$Z_{s;2}$	265,00 mm
$\epsilon_{b;2}$	51,049 ‰	$\sigma_{b;2}$	0,00 N/mm ²	$N_{b;2}$	0 N	$Z_{b;2}$	0,00 mm

Controle inwendig krachterevenwicht

0 N

Nu is het mogelijk om het bijbehorende moment, de kromming en de EI te bepalen. Het moment wordt bepaald ten opzichte van de bovenzijde.

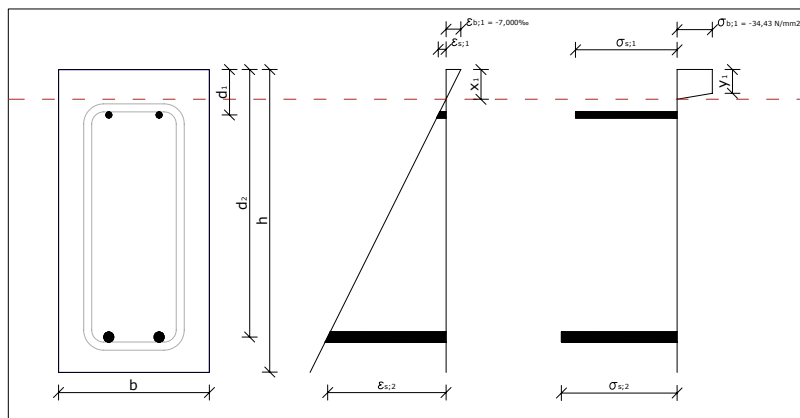
$$M_{e;1} = (-133778 \cdot 13,04) + (32742 \cdot 45,00) + (101036 \cdot 265,00)$$

$$M_{e;1} = 2,650 \cdot 10^7 \text{ Nmm} = 26,503 \text{ kNm}$$

$$\kappa_{e;1} = \frac{(51,049 + 5,603) \cdot 10^{-3}}{300} = 1,888 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^{-1} = 0,18884 \text{ m}^{-1}$$

$$EI_{e;1} = \frac{2,650 \cdot 10^7}{1,888 \cdot 10^{-4}} = 1,403 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2 = 140 \text{ kNm}^2$$

Bezwijkmoment (M_u)



Afbeelding C.7: Overzicht bij bezwijkmoment

Bij het bereiken van het vloeiement van de bovenwapening gelden de volgende formules. De sommatie moet gelijk zijn aan de normaalkracht (hier 0) op de balk.

$$N_{b;1} = \left(\frac{1}{2} \cdot (x_1 + y_1) \cdot f'_b + \frac{1}{2} \cdot y_1 \cdot (f'_{b;u} - f'_b) \right) \cdot b$$

$$N_{s;1} = A_{s;1} \cdot \left(\frac{d_1 - x_1}{0 - x_1} \cdot \epsilon'_{b;u} \cdot E_{s;1;trek} + f_{s;1;trek} \right)$$

$$N_{s;2} = A_{s;2} \cdot \left(\frac{d_2 - x_1}{0 - x_1} \cdot \epsilon'_{b;u} \cdot E_{s;2;trek} + f_{s;2;trek} \right)$$

Hieruit ontstaat de volgende vergelijking:

$$\left(\left(\frac{1}{2} \cdot (x_1 + y_1) \cdot -34,43 + \frac{1}{2} \cdot y_1 \cdot (-34,43 + 34,43) \right) \cdot 150 \right) + \left(56,55 \cdot \left(\frac{45 - x_1}{0 - x_1} \cdot 7,000 \cdot 10^{-3} \cdot 1546 + 575 \right) \right) + \left(157,08 \cdot \left(\frac{265 - x_1}{0 - x_1} \cdot 7,000 \cdot 10^{-3} \cdot 1546 + 575 \right) \right) = 0$$

Er zijn nu 2 onbekenden, hierdoor moet er een 2^e vergelijking worden opgesteld, zodat alle onbekenden opgelost kunnen worden. Deze formule geeft aan dat ter hoogte van y_1 de rek van het beton in de drukzone gelijk is aan ε'_b . Hierdoor ontstaat onderstaande vergelijking.

$$\frac{y_1 - x_1}{\varepsilon'_b} = \frac{0 - x_1}{\varepsilon_{s,1}} \Rightarrow \frac{y_1 - x_1}{1,421 \cdot 10^{-3}} = \frac{0 - x_1}{7,000 \cdot 10^{-3}}$$

Nu is het mogelijk om deze vergelijkingen op te lossen en x_1 en y_1 te bepalen, hieruit volgt:

$$x_1 = 29,45 \text{ mm}$$

$$y_1 = 23,47 \text{ mm}$$

Nu x_1 bekend is wordt het mogelijk om de rekken te bepalen, vanuit deze rekken wordt het dan weer mogelijk om de spanningen en de krachten te bepalen, dit is in onderstaande tabel weergegeven.

$\varepsilon_{b;1}$	-7,000 ‰	$\sigma_{b;1}$	-34,43 N/mm²	$N_{b;1}$	-136651 N	$Z_{b;1}$	13,29 mm
$\varepsilon_{s;1}$	3,695 ‰	$\sigma_{s;1}$	580,24 N/mm ²	$N_{s;1}$	32812 N	$Z_{s;1}$	45,00 mm
$\varepsilon_{s;2}$	55,982 ‰	$\sigma_{s;2}$	661,06 N/mm ²	$N_{s;2}$	103839 N	$Z_{s;2}$	265,00 mm
$\varepsilon_{b;2}$	64,301 ‰	$\sigma_{b;2}$	0,00 N/mm ²	$N_{b;2}$	0 N	$Z_{b;2}$	0,00 mm

Controle inwendig krachterevenwicht

0 N

Nu is het mogelijk om het bijbehorende moment, de kromming en de EI te bepalen. Het moment wordt bepaald ten opzichte van de bovenzijde.

$$M_{e;1} = (-136651 \cdot 13,29) + (32812 \cdot 45,00) + (103839 \cdot 265,00)$$

$$M_{e;1} = 2,718 \cdot 10^7 \text{ Nmm} = 27,178 \text{ kNm}$$

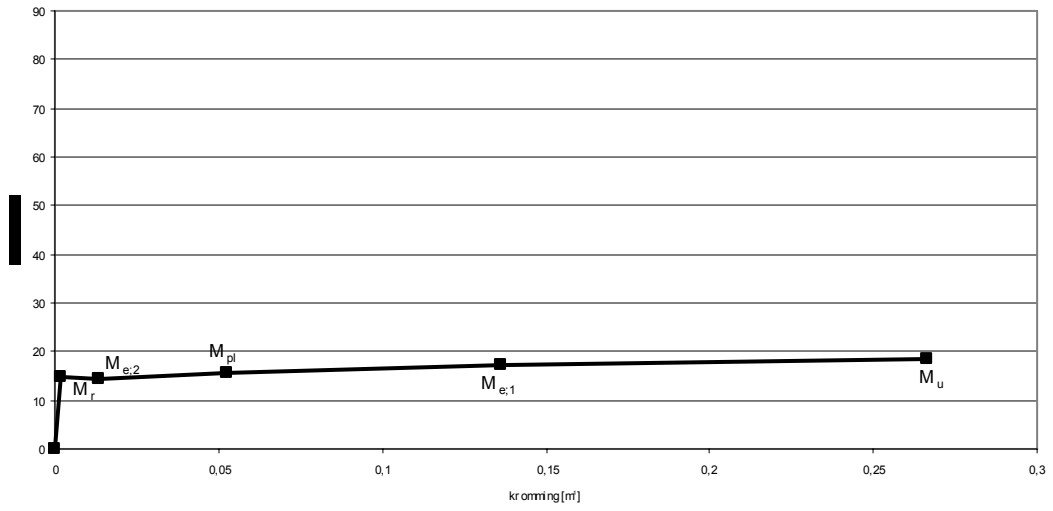
$$\kappa_{e;1} = \frac{(64,301 + 7,000) \cdot 10^{-3}}{300} = 2,377 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^{-1} = 0,23767 \text{ m}^{-1}$$

$$EI_{e;1} = \frac{2,718 \cdot 10^7}{2,377 \cdot 10^{-4}} = 1,144 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2 = 114 \text{ kNm}^2$$

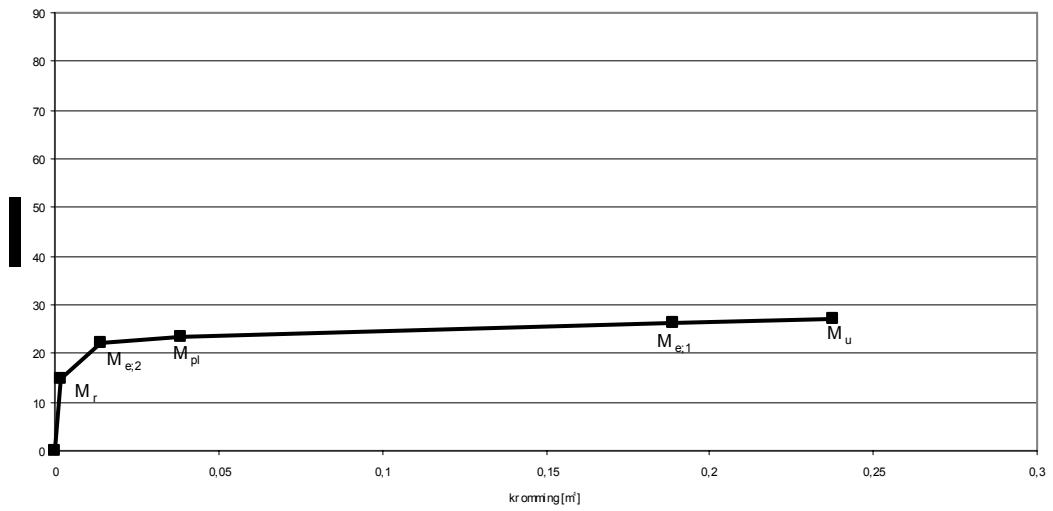
OVERZICHT GEGEVENS

Voor een overzicht van de gegevens wordt verwezen naar hoofdstuk 4. Hierna worden nog alle individuele M- κ -diagrammen gegeven. Ook het samenvattende diagram is nogmaals gegeven.

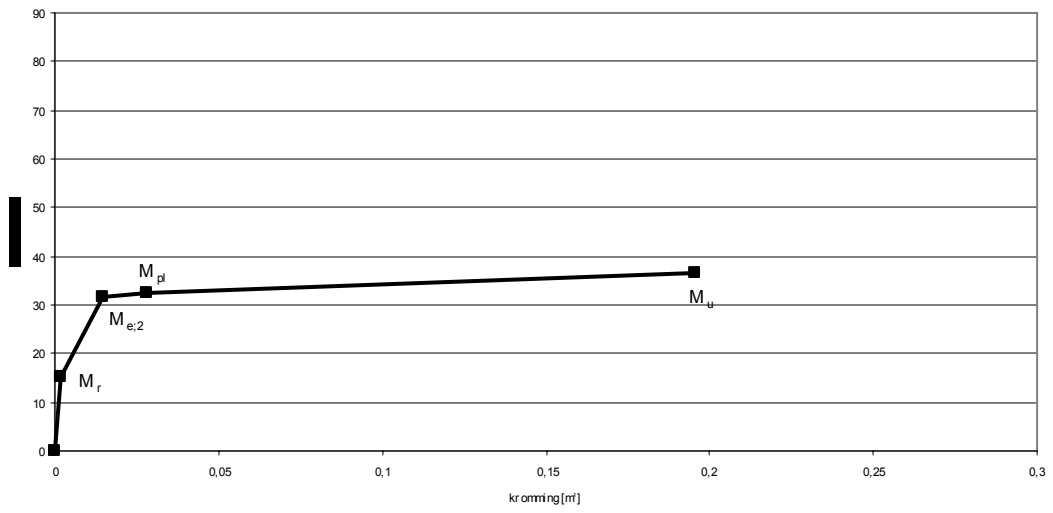
MK rond8



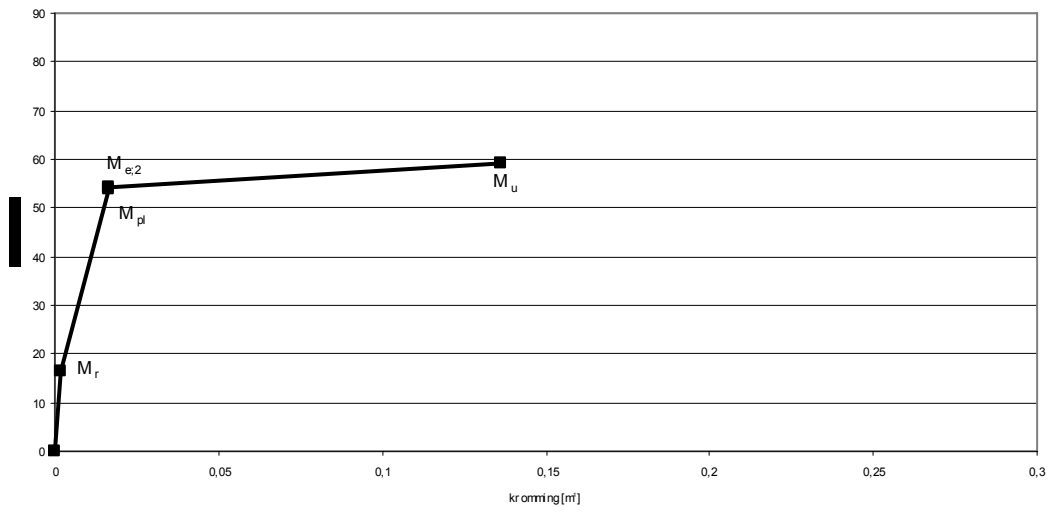
MK rond10



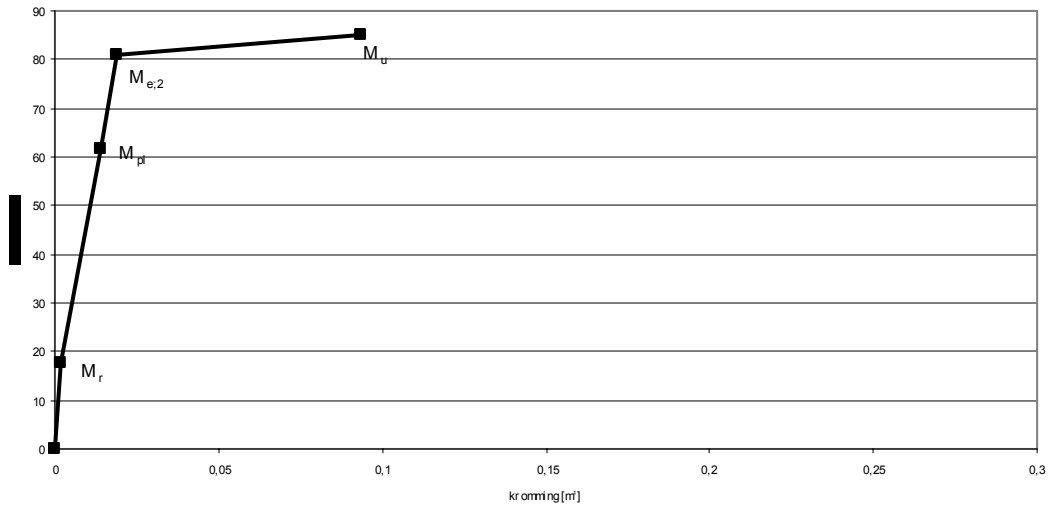
MK rand 12



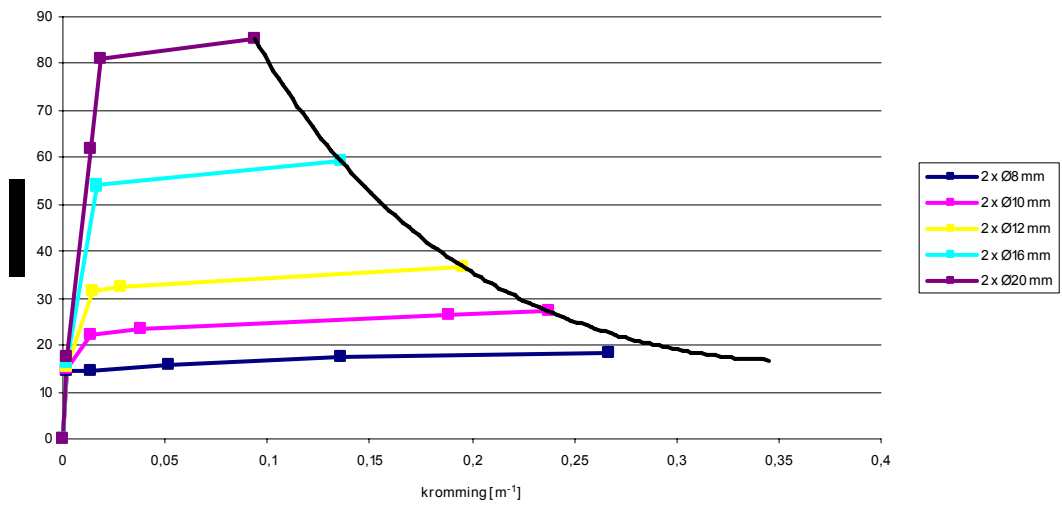
MK rand 16



MK rond20



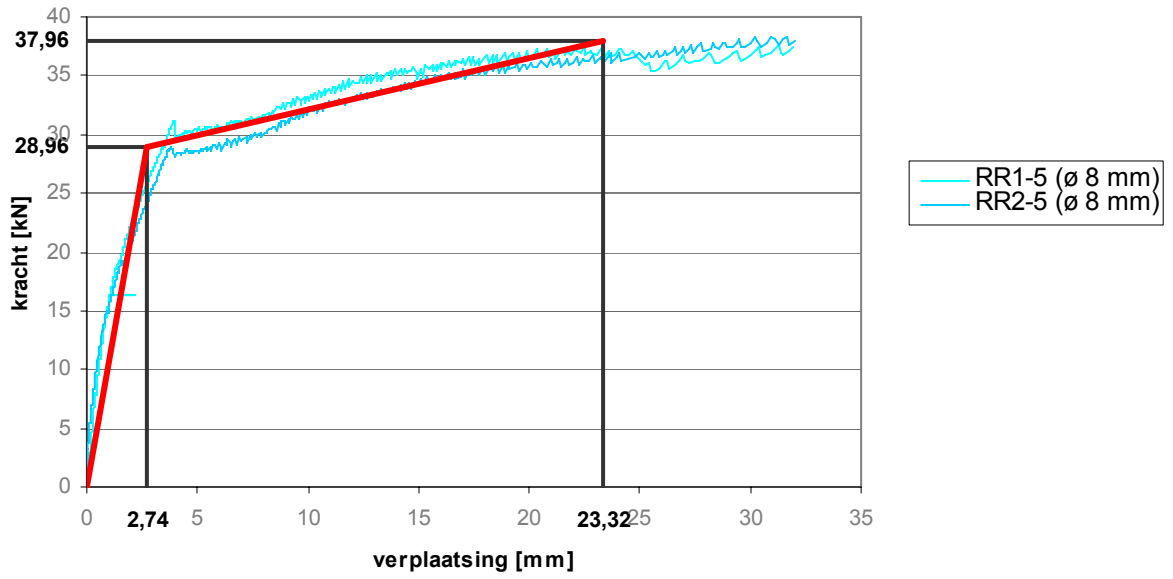
MK overzicht



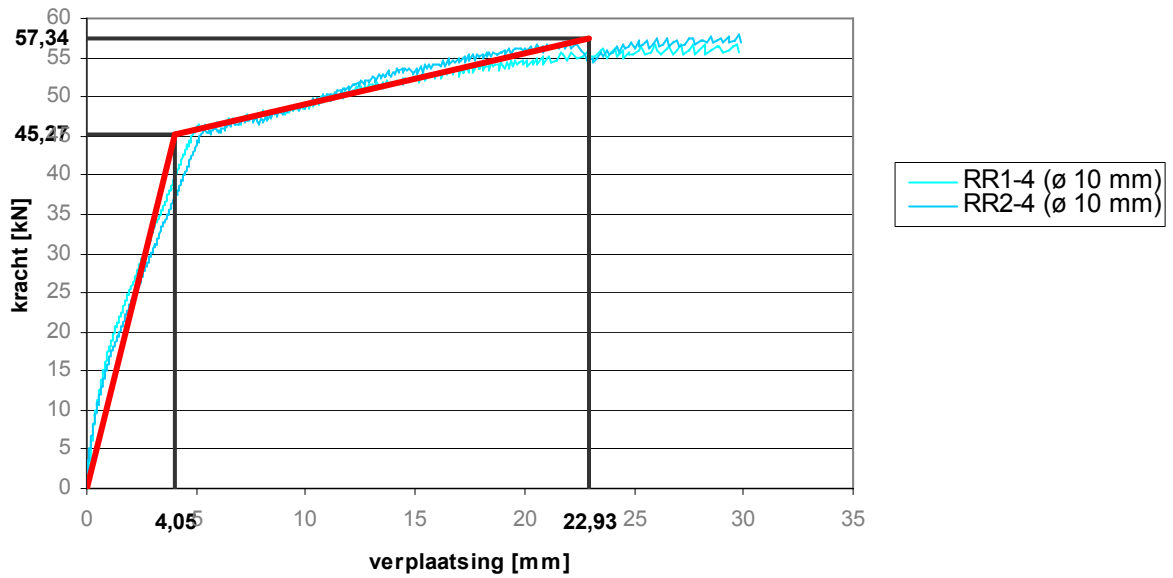
BIJLAGE D: F-U-DIAGRAMMEN

- ***OVERZICHT VAN DE ZAKKINGEN VAN DE PROEVEN***

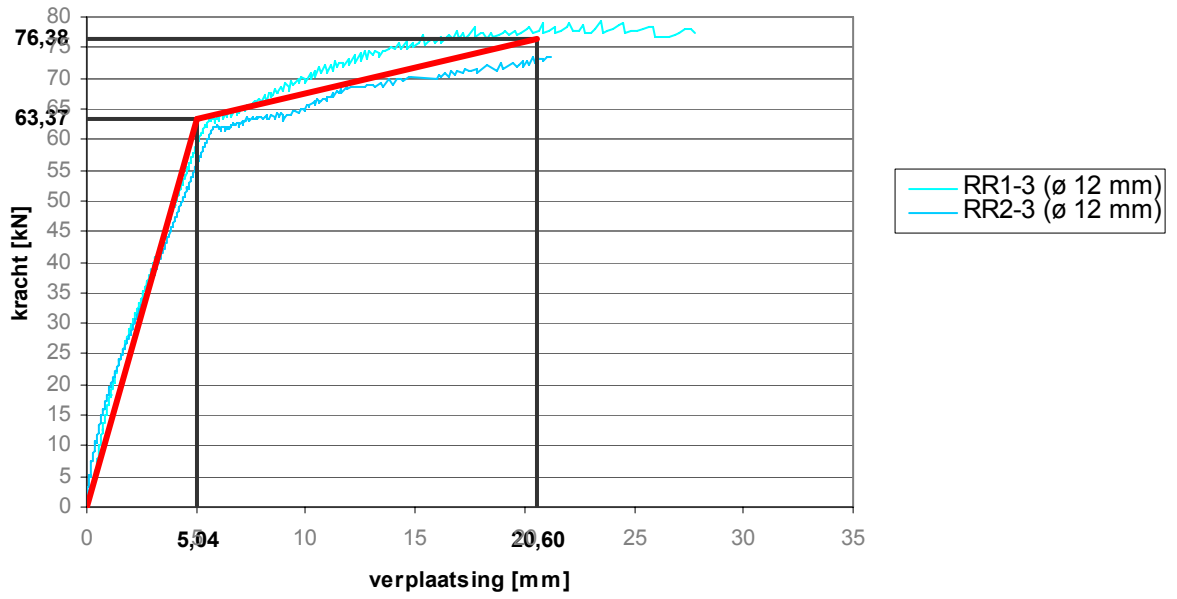
Rond 8



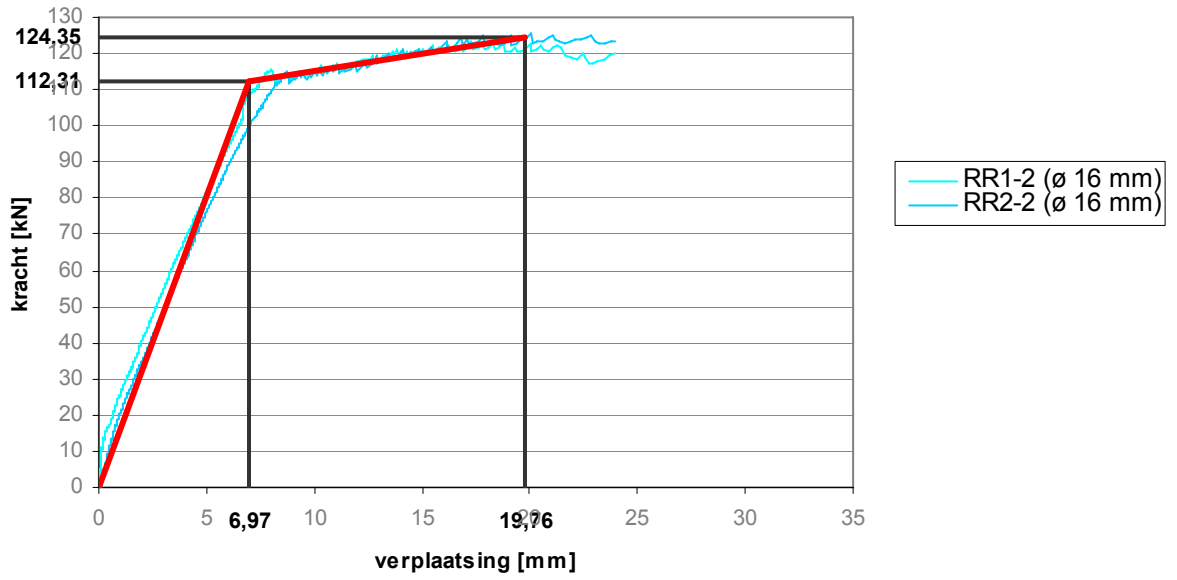
Rond 10



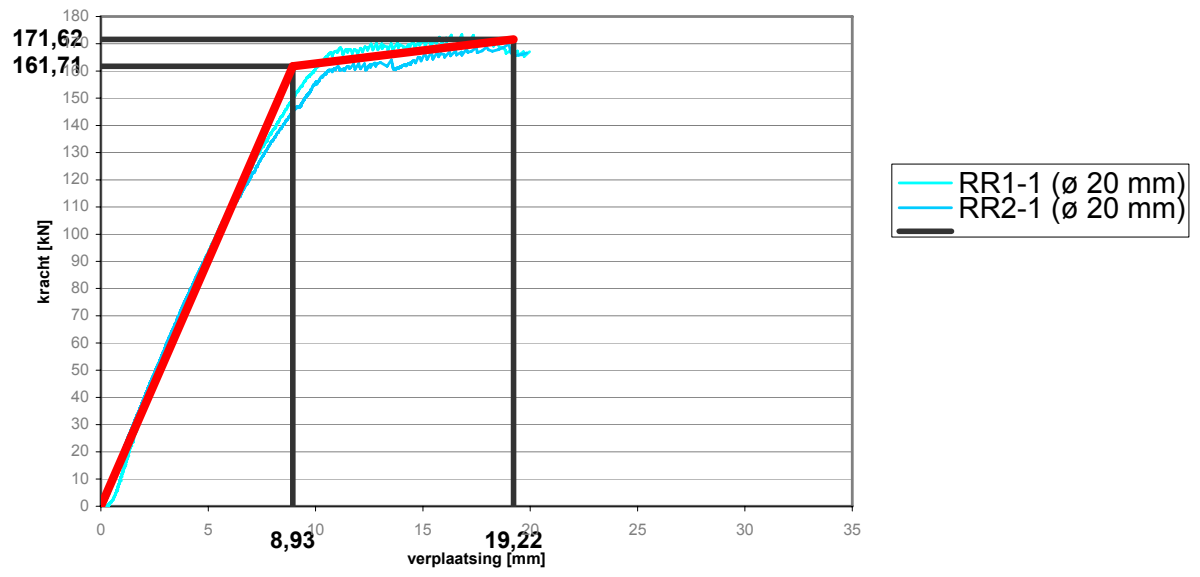
Rond 12



Rond 16



Rond 20



BIJLAGE E: UITWERKING PROEVEN

- ***PROEF 1-5, WAPENING Ø8 MM***
- ***PROEF 2-5, WAPENING Ø8 MM***
- ***PROEF 1-4, WAPENING Ø10 MM***
- ***PROEF 2-4, WAPENING Ø10 MM***
- ***PROEF 1-3, WAPENING Ø12 MM***
- ***PROEF 2-3, WAPENING Ø12 MM***
- ***PROEF 1-2, WAPENING Ø16 MM***
- ***PROEF 2-2, WAPENING Ø16 MM***
- ***PROEF 1-1, WAPENING Ø20 MM***
- ***PROEF 2-1, WAPENING Ø20 MM***

PROEF 1-5, WAPENING Ø8 MM

kracht bij het vloeien van de wapening	29,73 kN
kracht bij het bezwijken van de betonbalk	37,56 kN
moment bij het bezwijken van de betonbalk	18,78 kNm
gemeten plastische zakking	18,76 mm
gemeten plastische rotatie	0,03752 rad

Om de plastische lengte globaal te bepalen is een vijftal meettrajecten beschikbaar. De LVDT's behoren tot een bepaald traject, dit overzicht is terug te vinden in tabel 5.3.

In onderstaande tabel zijn de twee plastische lengten geplaatst die relevant zijn voor deze proef. Deze betreffen de onder- en bovengrens van de plastische lengte voor het beschouwde proefstuk. Bijbehorende rekken, krommingen en plastische rotaties over het gemeten traject zijn ook in de tabel uiteengezet.

Plastische lengte						
traject	locatie	ϵ_e	ϵ_u	K_e	K_u	K_{pl}
				[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]
150 mm	boven	-1,10E+00	-6,36E+00	1,69E-05	2,06E-04	1,89E-04
	onder	3,24E+00	4,65E+01			
200 mm	boven	-1,73E+00	-7,83E+00	1,87E-05	2,11E-04	1,92E-04
	onder	3,05E+00	4,61E+01			

Tabel bijlage E.1: meetgegevens per meettraject

Om de plastische rotatie genoemd bovenaan deze pagina te controleren voor de in de tabel genoemde meettrajecten wordt de volgende formule gebruikt:

$$\varphi_{pl} = \ell_p \cdot (\kappa_u - \kappa_e)$$

Traject 150 mm

$$\varphi_{pl} = 150 \cdot (1,89 \cdot 10^{-4}) = 2,84 \cdot 10^{-2} \text{ rad}$$

Omdat deze plastische rotatie kleiner is dan de gemeten plastische rotatie wordt een groter meettraject beschouwd. De werkelijke plastische lengte is groter dan de lengte van dit meettraject

Traject 200 mm

$$\varphi_{pl} = 200 \cdot (1,92 \cdot 10^{-4}) = 3,84 \cdot 10^{-2} \text{ rad}$$

Deze plastische rotatie is groter dan de gemeten plastische rotatie. Dit betekent dat de plastische lengte kleiner is dan de lengte van dit meettraject

Ondergrens plastische lengte: 150 mm

Bovengrens plastische lengte: 200 mm

PROEF 2-5, WAPENING Ø8 MM

kracht bij het vloeien van de wapening	28,14 kN
kracht bij het bezwijken van de betonbalk	38,36 kN
moment bij het bezwijken van de betonbalk	19,18 kNm
gemeten plastische zakking	22,26 mm
gemeten plastische rotatie	0,04453 rad

Om de plastische lengte globaal te bepalen is een vijftal meettrajecten beschikbaar. De LVDT's behoren tot een bepaald traject, dit overzicht is terug te vinden in tabel 5.3.

In onderstaande tabel zijn de twee plastische lengten geplaatst die relevant zijn voor deze proef. Deze betreffen de onder- en bovengrens van de plastische lengte voor het beschouwde proefstuk. Bijbehorende rekken, krommingen en plastische rotaties over het gemeten traject zijn ook in de tabel uiteengezet.

Plastische lengte						
traject	locatie	ϵ_e	ϵ_u	K_e	K_u	K_{pl}
				[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]
200 mm	boven	-1,81E+00	-8,03E+00	1,55E-05	2,13E-04	1,98E-04
	onder	2,14E+00	4,65E+01			
250 mm	boven	-2,54E+00	-1,07E+01	1,76E-05	2,22E-04	2,04E-04
	onder	1,97E+00	4,61E+01			

Tabel bijlage E.2: meetgegevens per meettraject

Om de plastische rotatie genoemd bovenaan deze pagina te controleren voor de in de tabel genoemde meettrajecten wordt de volgende formule gebruikt:

$$\varphi_{pl} = \ell_p \cdot (\kappa_u - \kappa_e)$$

Traject 200 mm

$$\varphi_{pl} = 200 \cdot (1,98 \cdot 10^{-4}) = 0,0396 \text{ rad}$$

Omdat deze plastische rotatie kleiner is dan de gemeten plastische rotatie wordt een groter meettraject beschouwd. De werkelijke plastische lengte is groter dan de lengte van dit meettraject

Traject 250 mm

$$\varphi_{pl} = 250 \cdot (2,04 \cdot 10^{-4}) = 0,0510 \text{ rad}$$

Deze plastische rotatie is groter dan de gemeten plastische rotatie. Dit betekent dat de plastische lengte kleiner is dan de lengte van dit meettraject

Ondergrens plastische lengte: 200 mm

Bovengrens plastische lengte: 250 mm

PROEF 1-4, WAPENING Ø10 MM

kracht bij het vloeien van de wapening	45,54 kN
kracht bij het bezwijken van de betonbalk	56,81 kN
moment bij het bezwijken van de betonbalk	28,40 kNm
gemeten plastische zakking	19,82 mm
gemeten plastische rotatie	0,03964 rad

Om de plastische lengte globaal te bepalen is een vijftal meettrajecten beschikbaar. De LVDT's behoren tot een bepaald traject, dit overzicht is terug te vinden in tabel 5.3.

In onderstaande tabel zijn de twee plastische lengten geplaatst die relevant zijn voor deze proef. Deze betreffen de onder- en bovengrens van de plastische lengte voor het beschouwde proefstuk. Bijbehorende rekken, krommingen en plastische rotaties over het gemeten traject zijn ook in de tabel uiteengezet.

Plastische lengte						
traject	locatie	ϵ_e	ϵ_u	K_e	K_u	K_{pl}
				[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]
150 mm	boven	-1,82E+00	-1,94E+01	2,08E-05	2,64E-04	2,43E-04
	onder	3,43E+00	4,74E+01			
200 mm	boven	-2,45E+00	-2,16E+01	2,38E-05	2,72E-04	2,48E-04
	onder	3,57E+00	4,71E+01			

Tabel bijlage E.3: meetgegevens per meettraject

Om de plastische rotatie genoemd bovenaan deze pagina te controleren voor de in de tabel genoemde meettrajecten wordt de volgende formule gebruikt:

$$\varphi_{pl} = \ell_p \cdot (\kappa_u - \kappa_e)$$

Traject 150 mm

$$\varphi_{pl} = 150 \cdot (2,43 \cdot 10^{-4}) = 0,0365 \text{ rad}$$

Omdat deze plastische rotatie kleiner is dan de gemeten plastische rotatie wordt een groter meettraject beschouwd. De werkelijke plastische lengte is groter dan de lengte van dit meettraject

Traject 200 mm

$$\varphi_{pl} = 200 \cdot (2,48 \cdot 10^{-4}) = 0,0496 \text{ rad}$$

Deze plastische rotatie is groter dan de gemeten plastische rotatie. Dit betekent dat de plastische lengte kleiner is dan de lengte van dit meettraject

Ondergrens plastische lengte: 150 mm

Bovengrens plastische lengte: 200 mm

PROEF 2-4, WAPENING Ø10 MM

kracht bij het vloeien van de wapening	44,98 kN
kracht bij het bezwijken van de betonbalk	57,87 kN
moment bij het bezwijken van de betonbalk	28,93 kNm
gemeten plastische zakking	17,92 mm
gemeten plastische rotatie	0,03585 rad

Om de plastische lengte globaal te bepalen is een vijftal meettrajecten beschikbaar. De LVDT's behoren tot een bepaald traject, dit overzicht is terug te vinden in tabel 5.3.

In onderstaande tabel zijn de twee plastische lengten geplaatst die relevant zijn voor deze proef. Deze betreffen de onder- en bovengrens van de plastische lengte voor het beschouwde proefstuk. Bijbehorende rekken, krommingen en plastische rotaties over het gemeten traject zijn ook in de tabel uiteengezet.

Plastische lengte						
traject	locatie	ϵ_e	ϵ_u	K_e	K_u	K_{pl}
				[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]
150 mm	boven	-1,71E+00	-6,01E+00	1,84E-05	2,09E-04	1,90E-04
	onder	2,96E+00	4,67E+01			
200 mm	boven	-2,35E+00	-9,19E+00	1,99E-05	2,19E-04	1,99E-04
	onder	2,69E+00	4,63E+01			

Tabel bijlage E.4: meetgegevens per meettraject

Om de plastische rotatie genoemd bovenaan deze pagina te controleren voor de in de tabel genoemde meettrajecten wordt de volgende formule gebruikt:

$$\varphi_{pl} = \ell_p \cdot (\kappa_u - \kappa_e)$$

Traject 150 mm

$$\varphi_{pl} = 150 \cdot (1,90 \cdot 10^{-4}) = 0,0285 \text{ rad}$$

Omdat deze plastische rotatie kleiner is dan de gemeten plastische rotatie wordt een groter meettraject beschouwd. De werkelijke plastische lengte is groter dan de lengte van dit meettraject

Traject 200 mm

$$\varphi_{pl} = 200 \cdot (1,99 \cdot 10^{-4}) = 0,0398 \text{ rad}$$

Deze plastische rotatie is groter dan de gemeten plastische rotatie. Dit betekent dat de plastische lengte kleiner is dan de lengte van dit meettraject

Ondergrens plastische lengte: 150 mm

Bovengrens plastische lengte: 200 mm

PROEF 1-3, WAPENING Ø12 MM

kracht bij het vloeien van de wapening	65,19 kN
kracht bij het bezwijken van de betonbalk	79,23 kN
moment bij het bezwijken van de betonbalk	39,61 kNm
gemeten plastische zakking	15,27 mm
gemeten plastische rotatie	0,03055 rad

Om de plastische lengte globaal te bepalen is een vijftal meettrajecten beschikbaar. De LVDT's behoren tot een bepaald traject, dit overzicht is terug te vinden in tabel 5.3.

In onderstaande tabel zijn de twee plastische lengten geplaatst die relevant zijn voor deze proef. Deze betreffen de onder- en bovengrens van de plastische lengte voor het beschouwde proefstuk. Bijbehorende rekken, krommingen en plastische rotaties over het gemeten traject zijn ook in de tabel uiteengezet.

Plastische lengte						
traject	locatie	ϵ_e	ϵ_u	K_e	K_u	K_{pl}
				[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]
150 mm	boven	-2,41E+00	-4,25E+00	2,55E-05	1,83E-04	1,57E-04
	onder	4,02E+00	4,18E+01			
200 mm	boven	-2,96E+00	-6,02E+00	2,67E-05	1,87E-04	1,60E-04
	onder	3,76E+00	4,10E+01			

Tabel bijlage E.5: meetgegevens per meettraject

Om de plastische rotatie genoemd bovenaan deze pagina te controleren voor de in de tabel genoemde meettrajecten wordt de volgende formule gebruikt:

$$\varphi_{pl} = \ell_p \cdot (\kappa_u - \kappa_e)$$

Traject 150 mm

$$\varphi_{pl} = 150 \cdot (1,57 \cdot 10^{-4}) = 0,0236 \text{ rad}$$

Omdat deze plastische rotatie kleiner is dan de gemeten plastische rotatie wordt een groter meettraject beschouwd. De werkelijke plastische lengte is groter dan de lengte van dit meettraject

Traject 200 mm

$$\varphi_{pl} = 200 \cdot (1,60 \cdot 10^{-4}) = 0,0320 \text{ rad}$$

Deze plastische rotatie is groter dan de gemeten plastische rotatie. Dit betekent dat de plastische lengte kleiner is dan de lengte van dit meettraject

Ondergrens plastische lengte: 150 mm

Bovengrens plastische lengte: 200 mm

PROEF 2-3, WAPENING Ø12 MM

kracht bij het vloeien van de wapening	61,72 kN
kracht bij het bezwijken van de betonbalk	73,54 kN
moment bij het bezwijken van de betonbalk	36,77 kNm
gemeten plastische zakking	15,52 mm
gemeten plastische rotatie	0,03105 rad

Om de plastische lengte globaal te bepalen is een vijftal meettrajecten beschikbaar. De LVDT's behoren tot een bepaald traject, dit overzicht is terug te vinden in tabel 5.3.

In onderstaande tabel zijn de twee plastische lengten geplaatst die relevant zijn voor deze proef. Deze betreffen de onder- en bovengrens van de plastische lengte voor het beschouwde proefstuk. Bijbehorende rekken, krommingen en plastische rotaties over het gemeten traject zijn ook in de tabel uiteengezet.

Plastische lengte						
traject	locatie	ϵ_e	ϵ_u	K_e	K_u	K_{pl}
				[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]
200 mm	boven	-3,53E+00	-9,67E+00	2,56E-05	1,72E-04	1,46E-04
	onder	2,92E+00	3,36E+01			
250 mm	boven	-4,41E+00	-1,20E+01	2,74E-05	1,73E-04	1,46E-04
	onder	2,48E+00	3,17E+01			

Tabel bijlage E.6: meetgegevens per meettraject

Om de plastische rotatie genoemd bovenaan deze pagina te controleren voor de in de tabel genoemde meettrajecten wordt de volgende formule gebruikt:

$$\varphi_{pl} = \ell_p \cdot (\kappa_u - \kappa_e)$$

Traject 200 mm

$$\varphi_{pl} = 200 \cdot (1,46 \cdot 10^{-4}) = 0,0292 \text{ rad}$$

Omdat deze plastische rotatie kleiner is dan de gemeten plastische rotatie wordt een groter meettraject beschouwd. De werkelijke plastische lengte is groter dan de lengte van dit meettraject

Traject 250 mm

$$\varphi_{pl} = 250 \cdot (1,46 \cdot 10^{-4}) = 0,0365 \cdot 10^{-2} \text{ rad}$$

Deze plastische rotatie is groter dan de gemeten plastische rotatie. Dit betekent dat de plastische lengte kleiner is dan de lengte van dit meettraject

Ondergrens plastische lengte: 200 mm

Bovengrens plastische lengte: 250 mm

PROEF 1-2, WAPENING Ø16 MM

kracht bij het vloeien van de wapening	113,19 kN
kracht bij het bezwijken van de betonbalk	123,22 kN
moment bij het bezwijken van de betonbalk	61,61 kNm
gemeten plastische zakking	12,50 mm
gemeten plastische rotatie	0,02500 rad

Om de plastische lengte globaal te bepalen is een vijftal meettrajecten beschikbaar. De LVDT's behoren tot een bepaald traject, dit overzicht is terug te vinden in tabel 5.3.

In onderstaande tabel zijn de twee plastische lengten geplaatst die relevant zijn voor deze proef. Deze betreffen de onder- en bovengrens van de plastische lengte voor het beschouwde proefstuk. Bijbehorende rekken, krommingen en plastische rotaties over het gemeten traject zijn ook in de tabel uiteengezet.

Plastische lengte						
traject	locatie	ϵ_e	ϵ_u	K_e	K_u	K_{pl}
				[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]
150 mm	boven	-2,60E+00	-8,61E+00	3,25E-05	1,96E-04	1,63E-04
	onder	4,87E+00	3,64E+01			
200 mm	boven	-3,76E+00	-6,64E+00	3,84E-05	1,83E-04	1,45E-04
	onder	5,08E+00	3,56E+01			

Tabel bijlage E.7: meetgegevens per meettraject

Om de plastische rotatie genoemd bovenaan deze pagina te controleren voor de in de tabel genoemde meettrajecten wordt de volgende formule gebruikt:

$$\varphi_{pl} = \ell_p \cdot (\kappa_u - \kappa_e)$$

Traject 150 mm

$$\varphi_{pl} = 150 \cdot (1,63 \cdot 10^{-4}) = 0,0245 \text{ rad}$$

Omdat deze plastische rotatie kleiner is dan de gemeten plastische rotatie wordt een groter meettraject beschouwd. De werkelijke plastische lengte is groter dan de lengte van dit meettraject

Traject 200 mm

$$\varphi_{pl} = 200 \cdot (1,45 \cdot 10^{-4}) = 0,0290 \text{ rad}$$

Deze plastische rotatie is groter dan de gemeten plastische rotatie. Dit betekent dat de plastische lengte kleiner is dan de lengte van dit meettraject

Ondergrens plastische lengte: 150 mm

Bovengrens plastische lengte: 200 mm

PROEF 2-2, WAPENING Ø16 MM

kracht bij het vloeien van de wapening	111,29 kN
kracht bij het bezwijken van de betonbalk	125,49 kN
moment bij het bezwijken van de betonbalk	62,75 kNm
gemeten plastische zakking	12,86 mm
gemeten plastische rotatie	0,02572 rad

Om de plastische lengte globaal te bepalen is een vijftal meettrajecten beschikbaar. De LVDT's behoren tot een bepaald traject, dit overzicht is terug te vinden in tabel 5.3.

In onderstaande tabel zijn de twee plastische lengten geplaatst die relevant zijn voor deze proef. Deze betreffen de onder- en bovengrens van de plastische lengte voor het beschouwde proefstuk. Bijbehorende rekken, krommingen en plastische rotaties over het gemeten traject zijn ook in de tabel uiteengezet.

Plastische lengte						
traject	locatie	ϵ_e	ϵ_u	K_e	K_u	K_{pl}
				[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]
150 mm	boven	-2,93E+00	-4,46E+00	2,75E-05	1,52E-04	1,25E-04
	onder	3,39E+00	3,06E+01			
200 mm	boven	-3,75E+00	-2,82E+00	3,98E-05	2,30E-04	1,91E-04
	onder	5,40E+00	5,02E+01			

Tabel bijlage E.8: meetgegevens per meettraject

Om de plastische rotatie genoemd bovenaan deze pagina te controleren voor de in de tabel genoemde meettrajecten wordt de volgende formule gebruikt:

$$\varphi_{pl} = \ell_p \cdot (\kappa_u - \kappa_e)$$

Traject 150 mm

$$\varphi_{pl} = 150 \cdot (1,25 \cdot 10^{-4}) = 0,0188 \text{ rad}$$

Omdat deze plastische rotatie kleiner is dan de gemeten plastische rotatie wordt een groter meettraject beschouwd. De werkelijke plastische lengte is groter dan de lengte van dit meettraject

Traject 200 mm

$$\varphi_{pl} = 200 \cdot (1,91 \cdot 10^{-4}) = 0,0382 \text{ rad}$$

Deze plastische rotatie is groter dan de gemeten plastische rotatie. Dit betekent dat de plastische lengte kleiner is dan de lengte van dit meettraject

Ondergrens plastische lengte: 150 mm

Bovengrens plastische lengte: 200 mm

PROEF 1-1, WAPENING Ø20 MM

kracht bij het vloeien van de wapening	166,33 kN
kracht bij het bezwijken van de betonbalk	173,35 kN
moment bij het bezwijken van de betonbalk	86,67 kNm
gemeten plastische zakking	10,89 mm
gemeten plastische rotatie	0,02178 rad

Om de plastische lengte globaal te bepalen is een vijftal meettrajecten beschikbaar. De LVDT's behoren tot een bepaald traject, dit overzicht is terug te vinden in tabel 5.3.

In onderstaande tabel zijn de twee plastische lengten geplaatst die relevant zijn voor deze proef. Deze betreffen de onder- en bovengrens van de plastische lengte voor het beschouwde proefstuk. Bijbehorende rekken, krommingen en plastische rotaties over het gemeten traject zijn ook in de tabel uiteengezet.

Plastische lengte						
traject	locatie	ϵ_e	ϵ_u	K_e	K_u	K_{pl}
				[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]
150 mm	boven	-8,30E-01	-3,92E+00	2,04E-05	1,19E-04	9,90E-05
	onder	3,81E+00	2,33E+01			
200 mm	boven	-2,85E+00	-1,14E+01	3,06E-05	1,61E-04	1,30E-04
	onder	4,12E+00	2,52E+01			

Tabel bijlage E.9: meetgegevens per meettraject

Om de plastische rotatie genoemd bovenaan deze pagina te controleren voor de in de tabel genoemde meettrajecten wordt de volgende formule gebruikt:

$$\varphi_{pl} = \ell_p \cdot (\kappa_u - \kappa_e)$$

Traject 150 mm

$$\varphi_{pl} = 150 \cdot (9,90 \cdot 10^{-5}) = 0,0149 \text{ rad}$$

Omdat deze plastische rotatie kleiner is dan de gemeten plastische rotatie wordt een groter meettraject beschouwd. De werkelijke plastische lengte is groter dan de lengte van dit meettraject

Traject 200 mm

$$\varphi_{pl} = 200 \cdot (1,30 \cdot 10^{-4}) = 0,0260 \text{ rad}$$

Deze plastische rotatie is groter dan de gemeten plastische rotatie. Dit betekent dat de plastische lengte kleiner is dan de lengte van dit meettraject

Ondergrens plastische lengte: 150 mm

Bovengrens plastische lengte: 200 mm

PROEF 2-1, WAPENING Ø20 MM

kracht bij het vloeien van de wapening	154,45 kN
kracht bij het bezwijken van de betonbalk	169,89 kN
moment bij het bezwijken van de betonbalk	84,95 kNm
gemeten plastische zakking	10,72 mm
gemeten plastische rotatie	0,02144 rad

Om de plastische lengte globaal te bepalen is een vijftal meettrajecten beschikbaar. De LVDT's behoren tot een bepaald traject, dit overzicht is terug te vinden in tabel 5.3.

In onderstaande tabel zijn de twee plastische lengten geplaatst die relevant zijn voor deze proef. Deze betreffen de onder- en bovengrens van de plastische lengte voor het beschouwde proefstuk. Bijbehorende rekken, krommingen en plastische rotaties over het gemeten traject zijn ook in de tabel uiteengezet.

Plastische lengte						
traject	locatie	ϵ_e	ϵ_u	K_e	K_u	K_{pl}
				[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]
150 mm	boven	-6,03E+00	-9,00E+00	4,08E-05	1,43E-04	1,03E-04
	onder	3,27E+00	2,37E+01			
200 mm	boven	-7,51E+00	-1,17E+01	5,12E-05	1,81E-04	1,30E-04
	onder	4,17E+00	2,96E+01			

Tabel bijlage E.10: meetgegevens per meettraject

Om de plastische rotatie genoemd bovenaan deze pagina te controleren voor de in de tabel genoemde meettrajecten wordt de volgende formule gebruikt:

$$\varphi_{pl} = \ell_p \cdot (\kappa_u - \kappa_e)$$

Traject 150 mm

$$\varphi_{pl} = 150 \cdot (1,03 \cdot 10^{-4}) = 0,0155 \text{ rad}$$

Omdat deze plastische rotatie kleiner is dan de gemeten plastische rotatie wordt een groter meettraject beschouwd. De werkelijke plastische lengte is groter dan de lengte van dit meettraject

Traject 200 mm

$$\varphi_{pl} = 200 \cdot (1,30 \cdot 10^{-4}) = 0,0260 \text{ rad}$$

Deze plastische rotatie is groter dan de gemeten plastische rotatie. Dit betekent dat de plastische lengte kleiner is dan de lengte van dit meettraject

Ondergrens plastische lengte: 150 mm

Bovengrens plastische lengte: 200 mm

BIJLAGE F: TEKENINGEN

- ***OVERZICHT OPSTELLING***
- ***OVERZICHT BALK***
- ***PLAATSING VAN DE LVDT'S***

