

MASTER

Maximale dwarskracht- en wringcapaciteit van voorgespannen kokerliggers van lichtgewicht beton : ontwerp, vervaardiging en beproeving van de liggers

Ruijs, Marique

Award date:
2002

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

Maximale dwarskracht- en wringcapaciteit van voorgespannen kokerliggers van Lichtgewicht Beton

ontwerp, vervaardiging en beproeving van de liggers

Bijlagen

Afstudeerproject
Marique Ruijs
Id. nr. 386949

Technische Universiteit Eindhoven
Faculteit Bouwkunde
Capaciteitsgroep Constructief Ontwerpen
augustus 2002

Begeleiding:
Prof. ir. H.W. Bennenk
Prof. ir. C.S. Kleinman
Ir. H.J.M. Janssen
Ir. H.J. Fijneman

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
Bijlage 1: Materiaaleigenschappen Lichtgewicht Beton bij ontwerpberekeningen	4
Bijlage 2: Berekening doorsnede-grootheden	8
Bijlage 3: Berekening aanvangsspanningen	13
Bijlage 4: Berekening werkvoorspanning	18
Bijlage 5: Berekening bezwijkmoment	25
Bijlage 6: Codering proefstukken en proeven	31
Bijlage 7: Resultaten rijpheidsmetingen en bijbehorende kubusdruksterktemetingen	34
Bijlage 8: Slag in de hydraulische vizels	39
Bijlage 9: Rentreemetingen	41
Bijlage 10: Bepaling E-modulus tijdens het aflaten van de voorspanning	44
Bijlage 11: Berekening werkelijke doorsnede-grootheden op het moment van voorspannen	53
Bijlage 12: Berekening werkelijke aanvangsspanningen	55
Bijlage 13: Bepaling E-modulus 28 dagen na de stort en tijdens de dwarskrachtproeven	57
Bijlage 14: Berekening werkelijke werkvoorspanning tijdens de dwarskrachtproeven	71
Bijlage 15: Theoretische hoofdtrekspanningen in een aantal punten tijdens de dwarskrachtproeven	82
Bijlage 16: Theoretische doorbuiging	86
Bijlage 17: (Theoretische) hoofdspansingen t.p.v. de rozetvormige rekstroken	89
Bijlage 18: Theoretische rekken in de buigdruk- en de buigtrekzone	106
Bijlage 19: Intrekken van de voorspanstrengen	109
Bijlage 20: Doorbuiging	112
Bijlage 21: Rekken in de buigdruk- en de buigtrekzone	115
Bijlage 22: Bepaling E-modulus tijdens de wringproeven	121
Bijlage 23: Berekening werkelijke werkvoorspanning tijdens de wringproeven	127
Bijlage 24: Theoretische hoofdtrekspanningen in een aantal punten tijdens de wringproeven	131
Bijlage 25: Theoretische richting hoofddrukspanningen	134
Bijlage 26: Rotatie	136
Bijlage 27: Vervorming van de doorsnede	139
Bijlage 28: Welving	146

Bijlage 1: Materiaaleigenschappen Lichtgewicht Beton bij ontwerpberoeeningen

B1.1 Algemeen

In NEN 6720 wordt bij sterkteberoeeningen gerekend met rekenwaarden lange duur van de sterkten van beton. Aangezien het hier een praktisch onderzoek met korte-duur-proeven betreft, wordt bij de ontwerpberoeeningen gerekend met gemiddelde waarden korte duur van de sterkten van beton. Met welke materiaaleigenschappen van het Lichtgewicht Beton precies gerekend wordt, wordt in deze bijlage behandeld.

B1.2 Druksterkte

Volgens NEN 6720 geldt het volgende voor de druksterkte van beton:

Aan de hand van kubusdruksterktemetingen worden kubusdruksterkten (f'_{cn}) verkregen. Kubusdruksterktemetingen zijn korte-duur-proeven. De gemiddelde kubusdruksterkte korte duur (f'_{cm}) wordt hier uit berekend:

$$f'_{cm} = \frac{\sum (f'_{cn})}{n}$$

waarbij:

n = aantal kubusdruksterktemetingen

De 5%-ondergrens van deze gemeten kubusdruksterkte is de karakteristieke kubusdruksterkte korte duur (f'_{ck}) (NEN 6720: 'karakteristieke kubusdruksterkte'):

$$f'_{ck} = f'_{cm} - 1,53 * \sigma$$

waarbij:

σ = standaardafwijking van de gemeten kubusdruksterkte, f'_{cn}

Vermenigvuldigingsfactor bij het omzetten van de korte-duur-sterkte naar de lange-duur-sterkte:

* 0,85

Vermenigvuldigingsfactor bij het omzetten van de kubusdruksterkte naar de cilinderdruksterkte (éénassig):

* 0,85

Voor de karakteristieke cilinderdruksterkte lange duur (f'_{brep}) (NEN 6720: 'representatieve waarde druksterkte') geldt dus:

$$f'_{brep} = 0,85 * 0,85 * f'_{ck} = 0,72 * f'_{ck}$$

Vermenigvuldigingsfactor bij het omzetten van de karakteristieke sterkte naar de rekenwaarde van de sterkte:

$$* \frac{1}{\gamma_m}$$

waarbij:

γ_m = materiaalfactor

= 1,2

Voor de rekenwaarde cilinderdruksterkte lange duur (f'_b) (NEN 6720: 'rekenwaarde druksterkte') geldt dus:

$$f'_b = \frac{f'_{brep}}{\gamma_m}$$

In NEN 6720 wordt gerekend met de rekenwaarde cilinderdruksterkte lange duur, f'_b . Bij de ontwerpberekeningen van dit praktisch onderzoek met korte-duur-proeven wordt gerekend met de gemiddelde cilinderdruksterkte korte duur, $0,85 \cdot f'_{cm}$.

Volgens CUR Aanbeveling 39 'Beton met grove lichte toeslagmaterialen' is de druksterkte van Lichtgewicht Beton gelijk aan de druksterkte van Normaal Beton.

B1.3 Treksterkte

Volgens NEN 6720 geldt het volgende voor de treksterkte van beton:

De gemiddelde treksterkte korte duur (f_{cm}) kan met behulp van een experimenteel bepaalde relatie uit de gemiddelde kubusdruksterkte korte duur, f'_{cm} , afgeleid worden:

$$f_{cm} = 1,05 + 0,05 \cdot f'_{cm}$$

Dezelfde relatie geldt voor de karakteristieke treksterkte korte duur (f_{bk}) en de karakteristieke kubusdruksterkte korte duur, f'_{ck} :

$$f_{bk} = 1,05 + 0,05 \cdot f'_{ck}$$

Vermenigvuldigingsfactor bij het omzetten van de korte-duur-sterkte naar de lange-duur-sterkte:

$$\cdot 0,7$$

Voor de karakteristieke treksterkte lange duur (f_{brep}) (NEN 6720: 'representatieve waarde treksterkte') geldt dus:

$$f_{brep} = 0,7 \cdot f_{bk}$$

Vermenigvuldigingsfactor bij het omzetten van de karakteristieke sterkte naar de rekenwaarde van de sterkte:

$$\cdot \frac{1}{\gamma_m}$$

waarbij:

$$\begin{aligned} \gamma_m &= \text{materiaalfactor} \\ &= 1,4 \end{aligned}$$

Voor de rekenwaarde treksterkte lange duur (f_b) (NEN 6720: 'rekenwaarde treksterkte') geldt dus:

$$f_b = \frac{f_{brep}}{\gamma_m}$$

In NEN 6720 wordt gerekend met de rekenwaarde treksterkte lange duur, f_b . Bij de ontwerpberekeningen van dit praktisch onderzoek met korte-duur-proeven wordt gerekend met de gemiddelde treksterkte korte duur, f_{cm} .

Volgens CUR Aanbeveling 39 geldt voor de vermenigvuldigingsfactor bij het omzetten van de treksterkte van Normaal Beton naar de treksterkte van Lichtgewicht Beton (k_1):

$$k_1 = 0,4 + 0,6 * \frac{\rho}{2300}$$

waarbij:

ρ = volumieke massa (droog)

B1.4 Buigtreksterkte

Volgens NEN 6720 geldt het volgende voor de buigtreksterkte van beton:

Voor de gemiddelde buigtreksterkte korte duur ($1,4 * f_{br}$) geldt:

$$1,4 * f_{br} = 1,4 * (1,6 - h) * f_{bm} \geq 1,4 * f_{bm}$$

waarbij:

h = hoogte van de doorsnede in meters

$$f_{bm} = 1,4 * f_{brep}$$

Vermenigvuldigingsfactor bij het omzetten van de korte-duur-sterkte naar de lange-duur-sterkte:

* 0,7

Voor de gemiddelde buigtreksterkte lange duur (f_{br}) geldt dus:

$$f_{br} = (1,6 - h) * f_{bm} \geq f_{bm}$$

In NEN 6720 wordt gerekend met de gemiddelde buigtreksterkte lange duur, f_{br} . Bij de ontwerpberekeningen van dit praktisch onderzoek met korte-duur-proeven wordt gerekend met de gemiddelde buigtreksterkte korte duur, $(1,6-h) * f_{cm}$ (anders dan in NEN 6720).

Volgens CUR Aanbeveling 39 geldt voor de vermenigvuldigingsfactor bij het omzetten van de buigtreksterkte van Normaal Beton naar de buigtreksterkte van Lichtgewicht Beton (k_1):

$$k_1 = 0,4 + 0,6 * \frac{\rho}{2300}$$

B1.5 Elasticiteitsmodulus

In NEN 6720 wordt de elasticiteitsmodulus (E'_b) van beton berekend uit de karakteristieke kubusdruksterkte korte duur, f'_{ck} , en *niet* uit de rekenwaarde cilinderdruksterkte lange duur, f'_b :

$$E'_b = 22250 + 250 * f'_{ck}$$

Het lange-duur-effect wordt nl. door de kruip-factor verrekend en de materiaalfactor (γ_m) is gelijk aan 1. Er wordt dus niet berekend uit de cilinderdruksterkte maar uit de kubusdruksterkte.

Bij de ontwerpberekeningen van dit praktisch onderzoek wordt gerekend met een elasticiteitsmodulus die berekend is uit de gemiddelde kubusdruksterkte korte duur, f'_{cm} :

$$E'_b = 22250 + 250 * f'_{cm}$$

Volgens CUR Aanbeveling 39 geldt voor de vermenigvuldigingsfactor bij het omzetten van de elasticiteitsmodulus van Normaal Beton naar de elasticiteitsmodulus van Lichtgewicht Beton (k_2):

$$k_2 = \left(\frac{\rho}{2300} \right)^{1,5}$$

Bijlage 2: Berekening doorsnede-grootheden

B2.1 Algemeen

De doorsnede-grootheden van de voorgespannen kokervormige ligger moeten berekend worden voor zowel het moment waarop de voorspanning afgelaten wordt als 28 dagen na de stort. Voor de relevante materiaaleigenschappen van het Lichtgewicht Beton op deze twee tijdstippen geldt het volgende:

B2.1.1 Materiaaleigenschappen Lichtgewicht Beton op het moment van voorspannen

Betonkwaliteit = B35 (Lichtgewicht Beton)

$$f'_{ckt} = \text{karakteristieke kubusdruksterkte korte duur op het moment van voorspannen} \\ = 35 \text{ N/mm}^2$$

$$f'_{cmt} = \text{gemiddelde kubusdruksterkte korte duur op het moment van voorspannen} \\ \approx 42 \text{ N/mm}^2$$

$$E'_{bt} = \text{elasticiteitsmodulus op het moment van voorspannen} \\ = (22250 + 250 * f'_{cmt}) * k_2$$

$$k_2 = \left(\frac{\rho}{2300} \right)^{1,5}$$

$$\rho = \text{volumieke massa (droog)} \\ = 1850 \text{ kg/m}^3$$

$$k_2 = 0,72$$

$$E'_{bt} = 23625 \text{ N/mm}^2$$

B2.1.2 Materiaaleigenschappen Lichtgewicht Beton na 28 dagen

Betonkwaliteit = B55 (Lichtgewicht Beton)

$$f'_{ck} = \text{karakteristieke kubusdruksterkte korte duur na 28 dagen} \\ = 55 \text{ N/mm}^2$$

$$f'_{cm} = \text{gemiddelde kubusdruksterkte korte duur na 28 dagen} \\ \approx 63 \text{ N/mm}^2$$

$$E'_b = \text{elasticiteitsmodulus na 28 dagen} \\ = (22250 + 250 * f'_{cm}) * k_2$$

$$k_2 = 0,72$$

$$E'_b = 27413 \text{ N/mm}^2$$

B2.2 Doorsnede-grootheden op het moment van voorspannen

$$A_{bn} = A_b - n_{p,tot} * A_p$$

waarbij:

$$A_b = 127550 \text{ mm}^2$$

$$n_{p,tot} = 21$$

$$A_p = 100 \text{ mm}^2$$

Voor A_{bn} geldt dus:

$$A_{bn} = 125450 \text{ mm}^2$$

$$A_{bp} = A_b + (n-1) \cdot n_{p,tot} \cdot A_p$$

waarbij:

$$n = \frac{E_p}{E'_{bt}}$$

$$E_p = 2 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$$E'_{bt} = 23625 \text{ N/mm}^2$$

$$n = 8,47$$

Voor A_{bp} geldt dus:

$$A_{bp} = 143237 \text{ mm}^2$$

$$S_{bn,o} = \sum (z_i \cdot A_{b,i}) - \sum (z_i \cdot A_p)$$

waarbij:

z_i = afstand van de zwaartelij van een deel van de doorsnede tot de onderzijde van de doorsnede

$A_{b,i}$ = oppervlakte van een deel van de betondoorsnede

Voor $S_{bn,o}$ geldt dus:

$$\begin{aligned} S_{bn,o} &= 52,5 \cdot 450 \cdot 105 + 2 \cdot 120 \cdot \frac{1}{2} \cdot 45 \cdot 45 + 2 \cdot 250 \cdot 50 \cdot 290 + 2 \cdot 380 \cdot \frac{1}{2} \cdot 45 \cdot 45 \\ &+ 447,5 \cdot 450 \cdot 105 - 6 \cdot 41 \cdot 100 - 5 \cdot 64 \cdot 100 - 2 \cdot 395 \cdot 100 - 4 \cdot 436 \cdot 100 - 4 \cdot 459 \cdot 100 \\ &= 31393900 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{bp,o} &= \sum (z_i \cdot A_{b,i}) + \sum ((n-1) \cdot z_i \cdot A_p) \\ &= 52,5 \cdot 450 \cdot 105 + 2 \cdot 120 \cdot \frac{1}{2} \cdot 45 \cdot 45 + 2 \cdot 250 \cdot 50 \cdot 290 + 2 \cdot 380 \cdot \frac{1}{2} \cdot 45 \cdot 45 \\ &+ 447,5 \cdot 450 \cdot 105 + 6 \cdot (8,47 - 1) \cdot 41 \cdot 100 + 5 \cdot (8,47 - 1) \cdot 64 \cdot 100 + 2 \cdot (8,47 - 1) \cdot 395 \cdot 100 \\ &+ 4 \cdot (8,47 - 1) \cdot 436 \cdot 100 + 4 \cdot (8,47 - 1) \cdot 459 \cdot 100 \\ &= 35574692 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_{bn} &= \frac{S_{bn,o}}{A_{bn}} \\ &= 250,3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_{bp} &= \frac{S_{bp,o}}{A_{bp}} \\ &= 248,4 \end{aligned}$$

$$I_{yb,n} = \sum (I_{yb,i} + a^2 \cdot A_{b,i}) - \sum (I_{yp} + a^2 \cdot A_p)$$

waarbij:

$I_{yb,i}$ = AKOM van een deel van de betondoorsnede

a = afstand van de zwaartelij van een deel van de doorsnede tot de zwaartelij van de netto betondoorsnede

Bijlagen

I_{yp} = AKOM van de doorsnede van één voorspanstreng

Voor I_{ybn} geldt dus:

$$\begin{aligned} I_{ybn} &= \frac{1}{12} * 450 * 105^3 + 197,8^2 * 450 * 105 + 2 * \frac{1}{36} * 45 * 45^3 + 2 * 130,3^2 * \frac{1}{2} * 45 * 45 \\ &+ 2 * \frac{1}{12} * 50 * 290^3 + 2 * 0,3^2 * 50 * 290 + 2 * \frac{1}{36} * 45 * 45^3 + 2 * 129,7^2 * \frac{1}{2} * 45 * 45 \\ &+ \frac{1}{12} * 450 * 105^3 + 197,2^2 * 450 * 105 - 21 * \frac{1}{64} * \pi * 12,9^4 - 6 * 209,3^2 * 100 - 5 * 186,3^2 * 100 \\ &- 2 * 144,7^2 * 100 - 4 * 185,7^2 * 100 - 4 * 208,7^2 * 100 \\ &= 3965996296 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$I_{ybp} = \sum (I_{yb,i} + a^2 * A_{b,i}) + \sum ((n-1) * (I_{yp} + a^2 * A_p))$$

waarbij:

a = afstand van de zwaartelij van een deel van de doorsnede tot de zwaartelij van de E-zware doorsnede

Voor I_{ybp} geldt dus:

$$\begin{aligned} I_{ybp} &= \frac{1}{12} * 450 * 105^3 + 195,9^2 * 450 * 105 + 2 * \frac{1}{36} * 45 * 45^3 + 2 * 128,4^2 * \frac{1}{2} * 45 * 45 \\ &+ 2 * \frac{1}{12} * 50 * 290^3 + 2 * 1,6^2 * 50 * 290 + 2 * \frac{1}{36} * 45 * 45^3 + 2 * 131,6^2 * \frac{1}{2} * 45 * 45 \\ &+ \frac{1}{12} * 450 * 105^3 + 199,1^2 * 450 * 105 + 21 * (8,47 - 1) * \frac{1}{64} * \pi * 12,9^4 + 6 * (8,47 - 1) * 207,4^2 * 100 \\ &+ 5 * (8,47 - 1) * 184,4^2 * 100 + 2 * (8,47 - 1) * 146,6^2 * 100 + 4 * (8,47 - 1) * 187,6^2 * 100 \\ &+ 4 * (8,47 - 1) * 210,6^2 * 100 \\ &= 4635181461 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$W_{ybn,b} = \frac{I_{ybn}}{h - z_{bn}}$$

waarbij:

h = 500 mm

Voor $W_{ybn,b}$ geldt dus:

$$W_{ybn,b} = 15879884 \text{ mm}^3$$

$$\begin{aligned} W_{ybp,b} &= \frac{I_{ybp}}{h - z_{bp}} \\ &= 18420071 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{ybn,o} &= \frac{I_{ybn}}{z_{bn}} \\ &= 15848118 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{ybp,o} &= \frac{I_{ybp}}{z_{bp}} \\ &= 18662972 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

B2.3 Doorsnede-grootheden na 28 dagen

$$A_{bn} = A_b - n_{p,tot} * A_p$$

$$= 125450 \text{ mm}^2$$

$$A_{bp} = A_b + (n-1) * n_{p,tot} * A_p$$

waarbij:

$$n = \frac{E_p}{E'_b}$$

$$E_p = 2 * 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$$E'_b = 27413 \text{ N/mm}^2$$

$$n = 7,30$$

Voor A_{bp} geldt dus:

$$A_{bp} = 140780 \text{ mm}^2$$

$$S_{bn.o} = \sum (z_i * A_{b,i}) - \sum (z_i * A_p)$$

$$= 31393900 \text{ mm}^3$$

$$S_{bp.o} = \sum (z_i * A_{b,i}) + \sum ((n-1) * z_i * A_p)$$

$$= 52,5 * 450 * 105 + 2 * 120 * \frac{1}{2} * 45 * 45 + 2 * 250 * 50 * 290 + 2 * 380 * \frac{1}{2} * 45 * 45$$

$$+ 447,5 * 450 * 105 + 6 * (7,30 - 1) * 41 * 100 + 5 * (7,30 - 1) * 64 * 100 + 2 * (7,30 - 1) * 395 * 100$$

$$+ 4 * (7,30 - 1) * 436 * 100 + 4 * (7,30 - 1) * 459 * 100$$

$$= 34997180 \text{ mm}^3$$

$$z_{bn} = \frac{S_{bn.o}}{A_{bn}}$$

$$= 250,3$$

$$z_{bp} = \frac{S_{bp.o}}{A_{bp}}$$

$$= 248,6$$

$$I_{ybn} = \sum (I_{yb,i} + a^2 * A_{b,i}) - \sum (I_{yp} + a^2 * A_p)$$

$$= 3965996296 \text{ mm}^4$$

$$I_{ybp} = \sum (I_{yb,i} + a^2 * A_{b,i}) + \sum ((n-1) * (I_{yp} + a^2 * A_p))$$

$$= \frac{1}{12} * 450 * 105^3 + 196,1^2 * 450 * 105 + 2 * \frac{1}{36} * 45 * 45^3 + 2 * 128,6^2 * \frac{1}{2} * 45 * 45$$

$$+ 2 * \frac{1}{12} * 50 * 290^3 + 2 * 1,4^2 * 50 * 290 + 2 * \frac{1}{36} * 45 * 45^3 + 2 * 131,4^2 * \frac{1}{2} * 45 * 45$$

$$+ \frac{1}{12} * 450 * 105^3 + 198,9^2 * 450 * 105 + 21 * (7,30 - 1) * \frac{1}{64} * \pi * 12,9^4$$

$$+ 6 * (7,30 - 1) * 207,6^2 * 100 + 5 * (7,30 - 1) * 184,6^2 * 100 + 2 * (7,30 - 1) * 146,4^2 * 100$$

$$+ 4 * (7,30 - 1) * 187,4^2 * 100 + 4 * (7,30 - 1) * 210,4^2 * 100$$

$$= 4542797785 \text{ mm}^4$$

$$W_{ybn.b} = \frac{I_{ybn}}{h - z_{bn}}$$

$$= 15879884 \text{ mm}^3$$

Bijlagen

$$\begin{aligned}W_{y_{bp}.b} &= \frac{I_{y_{bp}}}{h - z_{bp}} \\ &= 18069627 \text{ mm}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}W_{y_{bn}.o} &= \frac{I_{y_{bn}}}{z_{bn}} \\ &= 15848118 \text{ mm}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}W_{y_{bp}.o} &= \frac{I_{y_{bp}}}{z_{bp}} \\ &= 18273903 \text{ mm}^3\end{aligned}$$

Bijlage 3: Berekening aanvangsspanningen

B3.1 Methode 1

B3.1.1 Krachten en spanningen vóór het aflaten

$$F_{po}(z) = \sigma_{po}(z) * A_p$$

waarbij:

$$\begin{aligned} \sigma_{po}(z_1) = \sigma_{po}(z_2) = \sigma_{po}(z_3) &= 200 \text{ N/mm}^2 \\ \sigma_{po}(z_4) = \sigma_{po}(z_5) &= 1100 \text{ N/mm}^2 \\ A_p &= 100 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Voor $F_{po}(z)$ geldt dus:

$$\begin{aligned} F_{po}(z_1) = F_{po}(z_2) = F_{po}(z_3) &= 20000 \text{ N} \\ F_{po}(z_4) = F_{po}(z_5) &= 110000 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{po.tot} &= \sum(F_{po.i}) \\ &= n_p(z_1) * F_{po}(z_1) + n_p(z_2) * F_{po}(z_2) + n_p(z_3) * F_{po}(z_3) + n_p(z_4) * F_{po}(z_4) + n_p(z_5) * F_{po}(z_5) \end{aligned}$$

waarbij:

$F_{po.i}$ = kracht in een voorspanstreng vóór het aflaten

$$\begin{aligned} n_p(z_1) &= 4 \\ n_p(z_2) &= 4 \\ n_p(z_3) &= 2 \\ n_p(z_4) &= 5 \\ n_p(z_5) &= 6 \end{aligned}$$

Voor $F_{po.tot}$ geldt dus:

$$F_{po.tot} = 1410000 \text{ N}$$

$$z_{po.tot} = z_{bp} - \frac{\sum(F_{po.i} * z_i)}{F_{po.tot}}$$

waarbij:

$$z_{bp} = 248,4 \text{ mm}$$

z_i = afstand van de zwaartelij van een voorspanstreng tot de onderzijde van de doorsnede

Voor $z_{po.tot}$ geldt dus:

$$\begin{aligned} z_{po.tot} &= 248,4 - \frac{4 * 20000 * 459 + 4 * 20000 * 436 + 2 * 20000 * 395 + 5 * 110000 * 64 + 6 * 110000 * 41}{1410000} \\ &= 142,3 \text{ mm} \end{aligned}$$

B3.1.2 Aanvangskrachten en aanvangsspanningen

$$\sigma_{bi}(z) = \sigma_{bo}(z) - \frac{F_{po.tot}}{A_{bp}} - \frac{F_{po.tot} * z_{po.tot} * z}{I_{ybp}}$$

waarbij:

$$\sigma_{bo}(z) = 0 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{bp} = 143237 \text{ mm}^2$$

$$I_{ybp} = 4635181461 \text{ mm}^4$$

Voor $\sigma_{bi}(z)$ geldt dus:

$$\sigma_{bi}(z) = -\frac{1410000}{143237} - \frac{1410000 * 142,3 * z}{4635181461}$$

$$\sigma_{pi}(z) = \sigma_{po}(z) + n * \sigma_{bi}(z)$$

waarbij:

$$\sigma_{po}(z) = 200 \text{ N/mm}^2 \text{ voor } z = z_1, z_2 \text{ en } z_3$$

$$= 1100 \text{ N/mm}^2 \text{ voor } z = z_4 \text{ en } z_5$$

$$n = \frac{E_p}{E'_{bt}} = 8,47$$

Voor $\sigma_{pi}(z)$ geldt dus:

$$\begin{aligned} \sigma_{pi}(z) &= 200 + 8,47 * \left(-\frac{1410000}{143237} - \frac{1410000 * 142,3 * z}{4635181461} \right) \text{ voor } z = z_1, z_2 \text{ en } z_3 \\ &= 1100 + 8,47 * \left(-\frac{1410000}{143237} - \frac{1410000 * 142,3 * z}{4635181461} \right) \text{ voor } z = z_4 \text{ en } z_5 \end{aligned}$$

$$F_{pi}(z) = \sigma_{pi}(z) * A_p$$

$$= \left(200 + 8,47 * \left(-\frac{1410000}{143237} - \frac{1410000 * 142,3 * z}{4635181461} \right) \right) * 100 \text{ voor } z = z_1, z_2 \text{ en } z_3$$

$$= \left(1100 + 8,47 * \left(-\frac{1410000}{143237} - \frac{1410000 * 142,3 * z}{4635181461} \right) \right) * 100 \text{ voor } z = z_4 \text{ en } z_5$$

$$F_{pi.tot} = \sum (F_{pi.i})$$

$$= 4 * F_{pi}(z_1) + 4 * F_{pi}(z_2) + 2 * F_{pi}(z_3) + 5 * F_{pi}(z_4) + 6 * F_{pi}(z_5)$$

waarbij:

$$F_{pi.i} = \text{aanvangskracht in een voorspanstreng}$$

B3.2 Methode 2

B3.2.1 Rek in het beton

Voor de rek in het beton op de hoogten z_1 tot en met z_5 na het aflaten van de voorspanning geldt:

$$\begin{aligned}\varepsilon'_b(z_1) = & \frac{n_p(z_1) * F_{pi}(z_1)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_1) * F_{pi}(z_1) * (z_1)^2}{I_{ybn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_2) * F_{pi}(z_2)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_2) * F_{pi}(z_2) * z_2 * z_1}{I_{ybn} * E'_{bt}} \\ & + \frac{n_p(z_3) * F_{pi}(z_3)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_3) * F_{pi}(z_3) * z_3 * z_1}{I_{ybn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_4) * F_{pi}(z_4)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_4) * F_{pi}(z_4) * z_4 * z_1}{I_{ybn} * E'_{bt}} \\ & + \frac{n_p(z_5) * F_{pi}(z_5)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_5) * F_{pi}(z_5) * z_5 * z_1}{I_{ybn} * E'_{bt}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon'_b(z_2) = & \frac{n_p(z_1) * F_{pi}(z_1)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_1) * F_{pi}(z_1) * z_1 * z_2}{I_{ybn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_2) * F_{pi}(z_2)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_2) * F_{pi}(z_2) * (z_2)^2}{I_{ybn} * E'_{bt}} \\ & + \frac{n_p(z_3) * F_{pi}(z_3)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_3) * F_{pi}(z_3) * z_3 * z_2}{I_{ybn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_4) * F_{pi}(z_4)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_4) * F_{pi}(z_4) * z_4 * z_2}{I_{ybn} * E'_{bt}} \\ & + \frac{n_p(z_5) * F_{pi}(z_5)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_5) * F_{pi}(z_5) * z_5 * z_2}{I_{ybn} * E'_{bt}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon'_b(z_3) = & \frac{n_p(z_1) * F_{pi}(z_1)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_1) * F_{pi}(z_1) * z_1 * z_3}{I_{ybn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_2) * F_{pi}(z_2)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_2) * F_{pi}(z_2) * z_2 * z_3}{I_{ybn} * E'_{bt}} \\ & + \frac{n_p(z_3) * F_{pi}(z_3)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_3) * F_{pi}(z_3) * (z_3)^2}{I_{ybn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_4) * F_{pi}(z_4)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_4) * F_{pi}(z_4) * z_4 * z_3}{I_{ybn} * E'_{bt}} \\ & + \frac{n_p(z_5) * F_{pi}(z_5)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_5) * F_{pi}(z_5) * z_5 * z_3}{I_{ybn} * E'_{bt}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon'_b(z_4) = & \frac{n_p(z_1) * F_{pi}(z_1)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_1) * F_{pi}(z_1) * z_1 * z_4}{I_{ybn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_2) * F_{pi}(z_2)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_2) * F_{pi}(z_2) * z_2 * z_4}{I_{ybn} * E'_{bt}} \\ & + \frac{n_p(z_3) * F_{pi}(z_3)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_3) * F_{pi}(z_3) * z_3 * z_4}{I_{ybn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_4) * F_{pi}(z_4)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_4) * F_{pi}(z_4) * (z_4)^2}{I_{ybn} * E'_{bt}} \\ & + \frac{n_p(z_5) * F_{pi}(z_5)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_5) * F_{pi}(z_5) * z_5 * z_4}{I_{ybn} * E'_{bt}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon'_b(z_5) = & \frac{n_p(z_1) * F_{pi}(z_1)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_1) * F_{pi}(z_1) * z_1 * z_5}{I_{ybn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_2) * F_{pi}(z_2)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_2) * F_{pi}(z_2) * z_2 * z_5}{I_{ybn} * E'_{bt}} \\ & + \frac{n_p(z_3) * F_{pi}(z_3)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_3) * F_{pi}(z_3) * z_3 * z_5}{I_{ybn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_4) * F_{pi}(z_4)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_4) * F_{pi}(z_4) * z_4 * z_5}{I_{ybn} * E'_{bt}} \\ & + \frac{n_p(z_5) * F_{pi}(z_5)}{A_{bn} * E'_{bt}} + \frac{n_p(z_5) * F_{pi}(z_5) * (z_5)^2}{I_{ybn} * E'_{bt}}\end{aligned}$$

waarbij:

$$n_p(z_1) = 4$$

$$n_p(z_2) = 4$$

$$n_p(z_3) = 2$$

$$n_p(z_4) = 5$$

$$n_p(z_5) = 6$$

Bijlagen

$$\begin{aligned}A_{bn} &= 125450 \text{ mm}^2 \\E'_{bt} &= 23625 \text{ N/mm}^2 \\I_{ybn} &= 3965996296 \text{ mm}^4\end{aligned}$$

B3.2.2 Verschil in rek in de voorspanwapening

Voor het verschil in rek in de voorspanwapening tussen de rek vóór en de rek na het aflatens van de voorspanning op de hoogten z_1 tot en met z_5 geldt:

$$\Delta \varepsilon'_p(z_1) = \frac{F_{po}(z_1) - F_{pi}(z_1)}{A_p * E_p}$$

$$\Delta \varepsilon'_p(z_2) = \frac{F_{po}(z_2) - F_{pi}(z_2)}{A_p * E_p}$$

$$\Delta \varepsilon'_p(z_3) = \frac{F_{po}(z_3) - F_{pi}(z_3)}{A_p * E_p}$$

$$\Delta \varepsilon'_p(z_4) = \frac{F_{po}(z_4) - F_{pi}(z_4)}{A_p * E_p}$$

$$\Delta \varepsilon'_p(z_5) = \frac{F_{po}(z_5) - F_{pi}(z_5)}{A_p * E_p}$$

waarbij:

$$\begin{aligned}F_{po}(z_1) = F_{po}(z_2) = F_{po}(z_3) &= 20000 \text{ N} \\F_{po}(z_4) = F_{po}(z_5) &= 110000 \text{ N} \\A_p &= 100 \text{ mm}^2 \\E_p &= 200000 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

B3.2.3 Compatibiliteit

De rek in het beton op een bepaalde hoogte z moet gelijk zijn aan het verschil in rek in de voorspanwapening op dezelfde hoogte z . Er geldt dus:

$$\varepsilon'_b(z_1) = \Delta \varepsilon'_p(z_1)$$

$$\varepsilon'_b(z_2) = \Delta \varepsilon'_p(z_2)$$

$$\varepsilon'_b(z_3) = \Delta \varepsilon'_p(z_3)$$

$$\varepsilon'_b(z_4) = \Delta \varepsilon'_p(z_4)$$

$$\varepsilon'_b(z_5) = \Delta \varepsilon'_p(z_5)$$

Er ontstaan dus vijf vergelijkingen met vijf onbekenden waaruit de waarden van $F_{pi}(z_1)$ tot en met $F_{pi}(z_5)$ berekend kunnen worden. De aanvangsspanning in de voorspanwapening op de hoogte z , $\sigma_{pi}(z)$, kan dan als volgt berekend worden:

$$\sigma_{pi}(z) = \frac{F_{pi}(z)}{A_p}$$

B3.2.4 Aanvangsspanningen in het beton

De aanvangsspanning in het beton op de hoogte z , $\sigma_{bi}(z)$, kan dan als volgt berekend worden:

$$\sigma_{bi}(z) = -\frac{F_{pi,tot}}{A_{bn}} - \frac{F_{pi,tot} * z_{pi,tot} * z}{I_{ybn}}$$

Voor $F_{pi,tot}$ geldt:

$$\begin{aligned} F_{pi,tot} &= \sum(F_{pi,i}) \\ &= 4 * F_{pi}(z_1) + 4 * F_{pi}(z_2) + 2 * F_{pi}(z_3) + 5 * F_{pi}(z_4) + 6 * F_{pi}(z_5) \end{aligned}$$

waarbij:

$F_{pi,i}$ = aanvangskracht in een voorspanstreng

Voor $z_{pi,tot}$ geldt:

$$\begin{aligned} z_{pi,tot} &= z_{bn} - \frac{\sum(F_{pi,i} * z_i)}{F_{pi,tot}} \\ &= 250,3 - \frac{4 * F_{pi}(z_1) * 459 + 4 * F_{pi}(z_2) * 436 + 2 * F_{pi}(z_3) * 395 + 5 * F_{pi}(z_4) * 64 + 6 * F_{pi}(z_5) * 41}{F_{pi,tot}} \end{aligned}$$

Bijlage 4: Berekening werkvoorspanning

B4.1 Spanningsverschil in de voorspanwapening t.g.v. krimp en kruip in het beton

B4.1.1 Rek in het beton t.g.v. ongehinderde krimp en kruip

De rek in het beton t.g.v. krimp en kruip op de hoogten z_1 tot en met z_5 indien deze vervorming *ongehinderd* zou kunnen optreden, wordt gedefiniëerd als $\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_1)$ tot en met $\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_5)$. Voor deze $\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_1)$ tot en met $\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_5)$ geldt:

$$\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_1) = \frac{\sigma_{\text{bi}}(z_1)}{E'_{\text{bt}}} * \phi - \varepsilon'_r$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_2) = \frac{\sigma_{\text{bi}}(z_2)}{E'_{\text{bt}}} * \phi - \varepsilon'_r$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_3) = \frac{\sigma_{\text{bi}}(z_3)}{E'_{\text{bt}}} * \phi - \varepsilon'_r$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_4) = \frac{\sigma_{\text{bi}}(z_4)}{E'_{\text{bt}}} * \phi - \varepsilon'_r$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_5) = \frac{\sigma_{\text{bi}}(z_5)}{E'_{\text{bt}}} * \phi - \varepsilon'_r$$

waarbij:

$\sigma_{\text{bi}}(z)$ = aanvangsspanning in het beton op de hoogte z

$$\sigma_{\text{bi}}(z_1) = -0,73 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{bi}}(z_2) = -1,73 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{bi}}(z_3) = -3,50 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{bi}}(z_4) = -17,82 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{bi}}(z_5) = -18,82 \text{ N/mm}^2$$

$$E'_{\text{bt}} = 23625 \text{ N/mm}^2$$

ϕ = kruipcoëfficiënt volgens NEN 6720 en CUR Aanbeveling 39 (zie hierna)

ε'_r = specifieke krimpverkorting volgens NEN 6720 en CUR Aanbeveling 39 (zie hierna)

Voor ϕ geldt:

$$\phi = k_c * k_d * k_b * k_h * k_t * k_4 \leq \phi_{\text{max}}$$

waarbij:

$$k_c = 2,6 \quad (\text{RV} = 0-60\%)$$

$$k_d = 1,7 \quad (t_c = 1 \text{ dag})$$

$$k_b = 0,7 \quad (f'_{\text{cm}} = 63 \text{ N/mm}^2)$$

$$k_h = 1,1 \quad (h_m = 83 \text{ mm; zie hierna})$$

$$k_t = 0,6 \quad (t = 41 \text{ dagen})$$

$$k_4 = 0,72 \text{ (factor voor Lichtgewicht Beton)}$$

$$\phi_{\max} = 2,2$$

Voor ϕ geldt dus:

$$\phi = 1,5 \leq 2,2$$

Voor ε'_r geldt:

$$\varepsilon'_r = \varepsilon'_c * k_b * k_h * k_p * k_t * k_5 \leq \varepsilon'_{r \max}$$

waarbij:

$$\varepsilon'_c = 0,4 * 10^{-3} \text{ (RV = 0-60\%)}$$

$$k_b = 0,7 \text{ (} f'_{cm} = 63 \text{ N/mm}^2\text{)}$$

$$k_h = 1,1 \text{ (} h_m = 83 \text{ mm)}$$

$$k_p = 0,75 \text{ (} \omega_p = 1,67\% \text{; zie hierna)}$$

$$k_t = 0,6 \text{ (} t_p = 42 \text{ dagen)}$$

$$k_5 = 1,2 \text{ (factor voor Lichtgewicht Beton)}$$

$$\varepsilon'_{r \max} = 0,27 * 10^{-3}$$

Voor ε'_r geldt dus:

$$\varepsilon'_r = 0,17 * 10^{-3} \leq 0,27 * 10^{-3}$$

Voor het wapeningspercentage van het voorspanstaal, ω_p , geldt:

$$\omega_p = \frac{n_{p,\text{tot}} * A_p}{A_{bn}} * 100$$

waarbij:

$$n_{p,\text{tot}} = 21$$

$$A_p = 100 \text{ mm}^2$$

$$A_{bn} = 125450 \text{ mm}^2$$

Voor ω_p geldt dus:

$$\omega_p = 1,67\%$$

Voor de fictieve dikte van de betondoorsnede, h_m , geldt:

$$h_m = \frac{2 * A_b}{O_b}$$

waarbij:

$$A_b = 127550 \text{ mm}^2$$

$$O_b = \text{omtrek van de betondoorsnede}$$

$$= 2 * 500 + 2 * 450 + 2 * 200 + 2 * 260 + 4 * 45 * \sqrt{2}$$

$$= 3075 \text{ mm}$$

Voor h_m geldt dus:

$$h_m = 83 \text{ mm}$$

B4.1.2 Rek in het beton t.g.v. spanningsveranderingen in de voorspanwapening door compatibiliteit

In werkelijkheid zijn het beton en de voorspanwapening met elkaar verbonden. Vanwege de compatibiliteit zullen er in de voorspanwapening op de hoogten z_1 tot en met z_5 spanningsveranderingen optreden. Deze worden gedefiniëerd als $\Delta\sigma_{pkr}(z_1)$ tot en met $\Delta\sigma_{pkr}(z_5)$. De rek in het beton t.g.v. deze, geleidelijk ontstaande, spanningsveranderingen op de hoogten z_1 tot en met z_5 wordt gedefiniëerd als $\Delta\varepsilon_{bp}(z_1)$ tot en met $\Delta\varepsilon_{bp}(z_5)$. Voor deze $\Delta\varepsilon_{bp}(z_1)$ tot en met $\Delta\varepsilon_{bp}(z_5)$ geldt:

$$\Delta\varepsilon_{bp}(z_1) = -\frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_1) \cdot n_p(z_1) \cdot A_p \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{A_{bn} \cdot E'_b} - \frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_1) \cdot n_p(z_1) \cdot A_p \cdot (z_1)^2 \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{I_{ybn} \cdot E'_b}$$

$$-\frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_2) \cdot n_p(z_2) \cdot A_p \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{A_{bn} \cdot E'_b} - \frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_2) \cdot n_p(z_2) \cdot A_p \cdot z_2 \cdot z_1 \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{I_{ybn} \cdot E'_b}$$

$$-\frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_3) \cdot n_p(z_3) \cdot A_p \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{A_{bn} \cdot E'_b} - \frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_3) \cdot n_p(z_3) \cdot A_p \cdot z_3 \cdot z_1 \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{I_{ybn} \cdot E'_b}$$

$$-\frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_4) \cdot n_p(z_4) \cdot A_p \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{A_{bn} \cdot E'_b} - \frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_4) \cdot n_p(z_4) \cdot A_p \cdot z_4 \cdot z_1 \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{I_{ybn} \cdot E'_b}$$

$$-\frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_5) \cdot n_p(z_5) \cdot A_p \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{A_{bn} \cdot E'_b} - \frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_5) \cdot n_p(z_5) \cdot A_p \cdot z_5 \cdot z_1 \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{I_{ybn} \cdot E'_b}$$

$$\Delta\varepsilon_{bp}(z_2) = -\frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_1) \cdot n_p(z_1) \cdot A_p \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{A_{bn} \cdot E'_b} - \frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_1) \cdot n_p(z_1) \cdot A_p \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{I_{ybn} \cdot E'_b}$$

$$-\frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_2) \cdot n_p(z_2) \cdot A_p \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{A_{bn} \cdot E'_b} - \frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_2) \cdot n_p(z_2) \cdot A_p \cdot (z_2)^2 \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{I_{ybn} \cdot E'_b}$$

$$-\frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_3) \cdot n_p(z_3) \cdot A_p \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{A_{bn} \cdot E'_b} - \frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_3) \cdot n_p(z_3) \cdot A_p \cdot z_3 \cdot z_2 \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{I_{ybn} \cdot E'_b}$$

$$-\frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_4) \cdot n_p(z_4) \cdot A_p \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{A_{bn} \cdot E'_b} - \frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_4) \cdot n_p(z_4) \cdot A_p \cdot z_4 \cdot z_2 \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{I_{ybn} \cdot E'_b}$$

$$-\frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_5) \cdot n_p(z_5) \cdot A_p \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{A_{bn} \cdot E'_b} - \frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_5) \cdot n_p(z_5) \cdot A_p \cdot z_5 \cdot z_2 \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{I_{ybn} \cdot E'_b}$$

$$\Delta\varepsilon_{bp}(z_3) = -\frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_1) \cdot n_p(z_1) \cdot A_p \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{A_{bn} \cdot E'_b} - \frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_1) \cdot n_p(z_1) \cdot A_p \cdot z_1 \cdot z_3 \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{I_{ybn} \cdot E'_b}$$

$$-\frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_2) \cdot n_p(z_2) \cdot A_p \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{A_{bn} \cdot E'_b} - \frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_2) \cdot n_p(z_2) \cdot A_p \cdot z_2 \cdot z_3 \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{I_{ybn} \cdot E'_b}$$

$$-\frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_3) \cdot n_p(z_3) \cdot A_p \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{A_{bn} \cdot E'_b} - \frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_3) \cdot n_p(z_3) \cdot A_p \cdot (z_3)^2 \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{I_{ybn} \cdot E'_b}$$

$$-\frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_4) \cdot n_p(z_4) \cdot A_p \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{A_{bn} \cdot E'_b} - \frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_4) \cdot n_p(z_4) \cdot A_p \cdot z_4 \cdot z_3 \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{I_{ybn} \cdot E'_b}$$

$$-\frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_5) \cdot n_p(z_5) \cdot A_p \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{A_{bn} \cdot E'_b} - \frac{\Delta\sigma_{pkr}(z_5) \cdot n_p(z_5) \cdot A_p \cdot z_5 \cdot z_3 \cdot (1 + \rho \cdot \phi)}{I_{ybn} \cdot E'_b}$$

$$\Delta \varepsilon_{bp}(z_4) = - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1) * n_p(z_1) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E'_b} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1) * n_p(z_1) * A_p * z_1 * z_4 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E'_b}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_2) * n_p(z_2) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E'_b} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_2) * n_p(z_2) * A_p * z_2 * z_4 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E'_b}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_3) * n_p(z_3) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E'_b} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_3) * n_p(z_3) * A_p * z_3 * z_4 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E'_b}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_4) * n_p(z_4) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E'_b} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_4) * n_p(z_4) * A_p * (z_4)^2 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E'_b}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_5) * n_p(z_5) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E'_b} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_5) * n_p(z_5) * A_p * z_5 * z_4 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E'_b}$$

$$\Delta \varepsilon_{bp}(z_5) = - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1) * n_p(z_1) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E'_b} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1) * n_p(z_1) * A_p * z_1 * z_5 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E'_b}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_2) * n_p(z_2) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E'_b} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_2) * n_p(z_2) * A_p * z_2 * z_5 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E'_b}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_3) * n_p(z_3) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E'_b} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_3) * n_p(z_3) * A_p * z_3 * z_5 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E'_b}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_4) * n_p(z_4) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E'_b} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_4) * n_p(z_4) * A_p * z_4 * z_5 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E'_b}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_5) * n_p(z_5) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E'_b} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_5) * n_p(z_5) * A_p * (z_5)^2 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E'_b}$$

waarbij:

$$n_p(z_1) = 4$$

$$n_p(z_2) = 4$$

$$n_p(z_3) = 2$$

$$n_p(z_4) = 5$$

$$n_p(z_5) = 6$$

$$\rho = 0,8$$

$$E'_b = 27413 \text{ N/mm}^2$$

$$I_{ybn} = 3965996296 \text{ mm}^4$$

B4.1.3 Rek in de voorspanwapening t.g.v. spanningsveranderingen

De rek in de voorspanwapening t.g.v. de spanningsveranderingen $\Delta \sigma_{pkr}(z_1)$ tot en met $\Delta \sigma_{pkr}(z_5)$ op de hoogten z_1 tot en met z_5 wordt gedefiniëerd als $\Delta \varepsilon_{pkr}(z_1)$ tot en met $\Delta \varepsilon_{pkr}(z_5)$. Voor deze $\Delta \varepsilon_{pkr}(z_1)$ tot en met $\Delta \varepsilon_{pkr}(z_5)$ geldt:

$$\Delta \varepsilon_{pkr}(z_1) = \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1)}{E_p}$$

Bijlagen

$$\Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_2) = \frac{\Delta \sigma_{\text{pkr}}(z_2)}{E_p}$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_3) = \frac{\Delta \sigma_{\text{pkr}}(z_3)}{E_p}$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_4) = \frac{\Delta \sigma_{\text{pkr}}(z_4)}{E_p}$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_5) = \frac{\Delta \sigma_{\text{pkr}}(z_5)}{E_p}$$

waarbij:

$$E_p = 2 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$$

B4.1.4 Compatibiliteit

Het totale verschil in rek in het beton op een bepaalde hoogte z moet gelijk zijn aan het verschil in rek in de voorspanwapening op dezelfde hoogte z . Er geldt dus:

$$\Delta \varepsilon_{\text{bkr}}(z_1) + \Delta \varepsilon_{\text{bp}}(z_1) - \Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_1) = 0$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{bkr}}(z_2) + \Delta \varepsilon_{\text{bp}}(z_2) - \Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_2) = 0$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{bkr}}(z_3) + \Delta \varepsilon_{\text{bp}}(z_3) - \Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_3) = 0$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{bkr}}(z_4) + \Delta \varepsilon_{\text{bp}}(z_4) - \Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_4) = 0$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{bkr}}(z_5) + \Delta \varepsilon_{\text{bp}}(z_5) - \Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_5) = 0$$

Er ontstaan dus vijf vergelijkingen met vijf onbekenden waaruit de waarden van $\Delta \sigma_{\text{pkr}}(z_1)$ tot en met $\Delta \sigma_{\text{pkr}}(z_5)$ berekend kunnen worden.

B4.2 Spanningsverschil in de voorspanwapening t.g.v. relaxatie van het voorspanstaal

Voor $\Delta \sigma_p(z)$ geldt:

$$\Delta \sigma_p(z) = -\Delta \sigma_{\text{prel}}(z) * \left(1 - 2 * \frac{-\Delta \sigma_{\text{pkr}}(z)}{\sigma_{\text{pi}}(z)} \right)$$

waarbij:

$\Delta \sigma_{\text{prel}}(z)$ = relaxatie van het voorspanstaal na 1000 uur volgens NEN 6720 (zie tabel B4.1)

aanvangsspanning als percentage van f_{purep}	$\Delta\sigma_{prel}$ als percentage van de aanvangsspanning	
	draden en strengen	staven
< 30	0	0
60	1.5	1.5
70	2.5	4.0
80	4.5	7.0

tabel B4.1 $\Delta\sigma_{prel}$ als percentage van de aanvangsspanning

Voor tabel B4.1 geldt: bij aanvangsspanningen tussen 30% en 60% van f_{purep} mag rechtlijnig worden geïnterpoleerd tussen 0% en 1,5%.

Bij de berekening van $\Delta\sigma_p(z)$ wordt uitgegaan van de relaxatie van het voorspanstaal na 1000 uur. Op het moment van beproeven van de liggers is de ouderdom 42 dagen en dus $42 * 24 = 1008$ uur.

B4.3 Werkvoorspanning in de voorspanwapening

De waarden van de verschillende relevante grootheden op verschillende hoogten in de doorsnede zijn te vinden in tabel B4.2. Ook de waarde van de werkvoorspanning in de voorspanwapening, σ_{pw} , op verschillende hoogten staat in deze tabel.

Z	Z	σ_{pi}	σ_{bi}	$\Delta\sigma_{pkr}$	σ_{pi}/f_{purep}	$\Delta\sigma_{prel}/\sigma_{pi}$	$\Delta\sigma_{prel}$	$\Delta\sigma_p$	σ_{pw}
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
z_b	-249.7		1.04						
z_1	-208.7	193.82	-0.73	-38.83	10.4	0	0	0	154.99
z_2	-185.7	185.39	-1.73	-48.14	10.0	0	0	0	137.25
z_3	-144.7	170.37	-3.50	-64.71	9.2	0	0	0	105.66
z_4	186.3	949.11	-17.82	-198.51	51.0	1.05	9.98	-5.80	744.80
z_5	209.3	940.69	-18.82	-207.81	50.6	1.03	9.68	-5.40	727.48
z_0	250.3		-20.59						

tabel B4.2 Waarden van verschillende grootheden op verschillende hoogten in de doorsnede

B4.4 Werkvoorspanning in het beton

Voor $\sigma_{bw}(z)$ geldt:

$$\sigma_{bw}(z) = -\frac{F_{pw.tot}}{A_{bn}} - \frac{F_{pw.tot} * z_{pw.tot} * z}{I_{ybn}}$$

waarbij:

$F_{pw.tot}$ = totale werkvoorspankracht in de voorspanstrengen samen; zie hierna

$z_{pw.tot}$ = afstand van het zwaartepunt van $F_{pw.tot}$ tot de zwaartelij van de netto betondoorsnede; zie hierna

Voor $F_{pw.tot}$ geldt:

$$F_{pw.tot} = \sum (F_{pw.i})$$

$$= 4 * F_{pw}(z_1) + 4 * F_{pw}(z_2) + 2 * F_{pw}(z_3) + 5 * F_{pw}(z_4) + 6 * F_{pw}(z_5)$$

waarbij:

$F_{pw.i}$ = werkvoorspankracht in een voorspanstreng

$F_{pw}(z)$ = werkvoorspankracht per voorspanstreng op de hoogte z

$$= \sigma_{pw}(z) * A_p$$

Voor $z_{pw.tot}$ geldt:

$$z_{pw.tot} = z_{bn} - \frac{\sum (F_{pw.i} * z_i)}{F_{pw.tot}}$$

$$= 250,3 - \frac{4 * F_{pw}(z_1) * 459 + 4 * F_{pw}(z_2) * 436 + 2 * F_{pw}(z_3) * 395 + 5 * F_{pw}(z_4) * 64 + 6 * F_{pw}(z_5) * 41}{F_{pw.tot}}$$

waarbij:

z_i = afstand van de zwaartelij van een voorspanstreng tot de onderzijde van de doorsnede

De waarden van de verschillende krachten en spanningen op verschillende hoogten in de doorsnede zijn te vinden in tabel B4.3.

z	z	n_p	σ_{pw}	F_{pw}	σ_{bw}
[-]	[mm]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]
z_b	-249.7				0.92
z_1	-208.7	4	154.99	15.5	-0.47
z_2	-185.7	4	137.25	13.7	-1.25
z_3	-144.7	2	105.66	10.6	-2.64
z_4	186.3	5	744.80	74.5	-13.87
z_5	209.3	6	727.48	72.7	-14.65
z_0	250.3				-16.04
totaal				946.9	

tabel B4.3 Werkvoorspanningen en werkvoorspankrachten op verschillende hoogten in de doorsnede

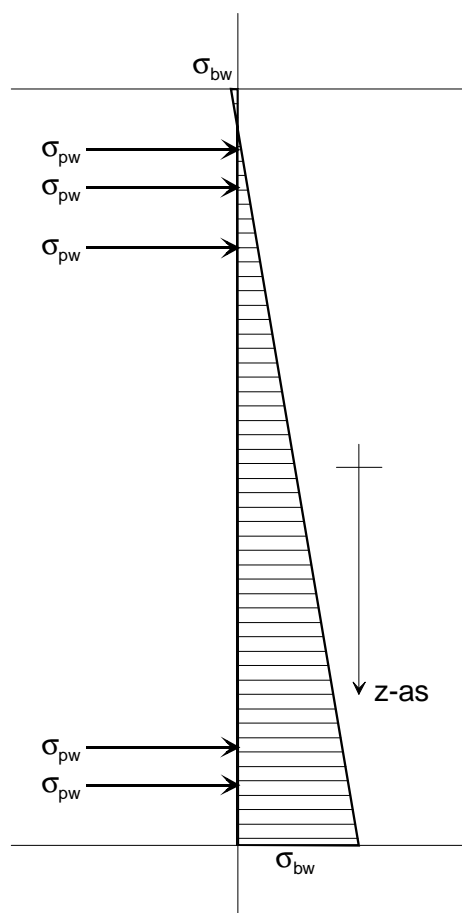
Voor $z_{pw.tot}$ geldt:

$$z_{pw.tot} = 142,1 \text{ mm}$$

Bijlage 5: Berekening bezwijkmoment

B5.1 Uitgangssituatie

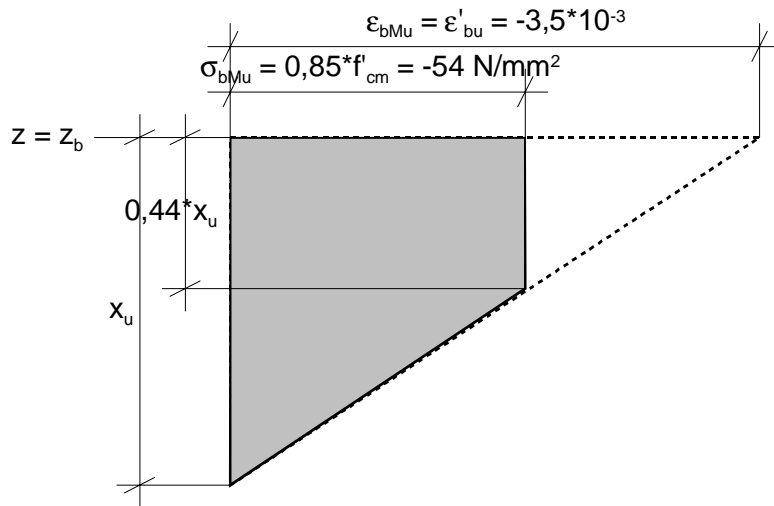
Voordat de ligger belast wordt, heersen in de voorspanwapening en in het beton de werkvoorspanningen, resp. $\sigma_{pw}(z)$ en $\sigma_{bw}(z)$. Figuur B5.1 toont deze spanningen in de doorsnede. In de doorsnede heerst een horizontaal evenwicht en een momenten-evenwicht.



figuur B5.1 Werkvoorspanningen in de doorsnede

B5.2 Bezwijksituatie

Bij het bezwijkmoment, M_u , is de rek aan de bovenzijde van de doorsnede zo groot dat het beton bezwijkt op stuijk. Deze rek, ϵ'_{bu} , bedraagt $-3,5 \cdot 10^{-3}$. Om bros bezwijken te voorkomen, moet de voorspanwapening in de onderflens al vloeien bij het bezwijkmoment, M_u . Figuur B5.2 toont de spanningsverdeling in de drukzone van de doorsnede bij het bezwijkmoment, M_u , (zie ook figuur 1.8).



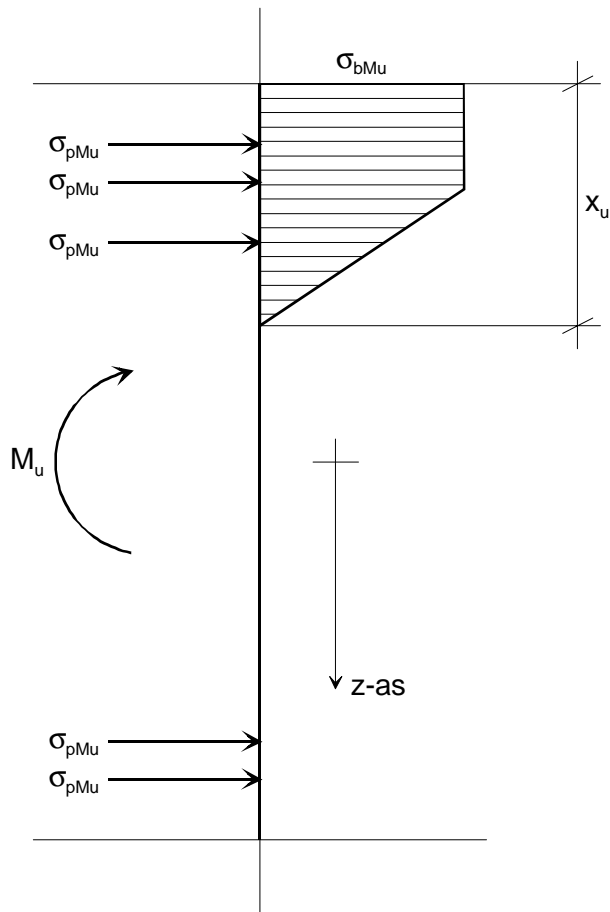
figuur B5.2 Spanningsverdeling in de betondrukzone bij het bezwijkmoment

Voor figuur B5.2 geldt:

$\epsilon_{bMu}(z)$ = rek in het beton op de hoogte z bij het bezwijkmoment, M_u

$\sigma_{bMu}(z)$ = spanning in het beton op de hoogte z bij het bezwijkmoment, M_u

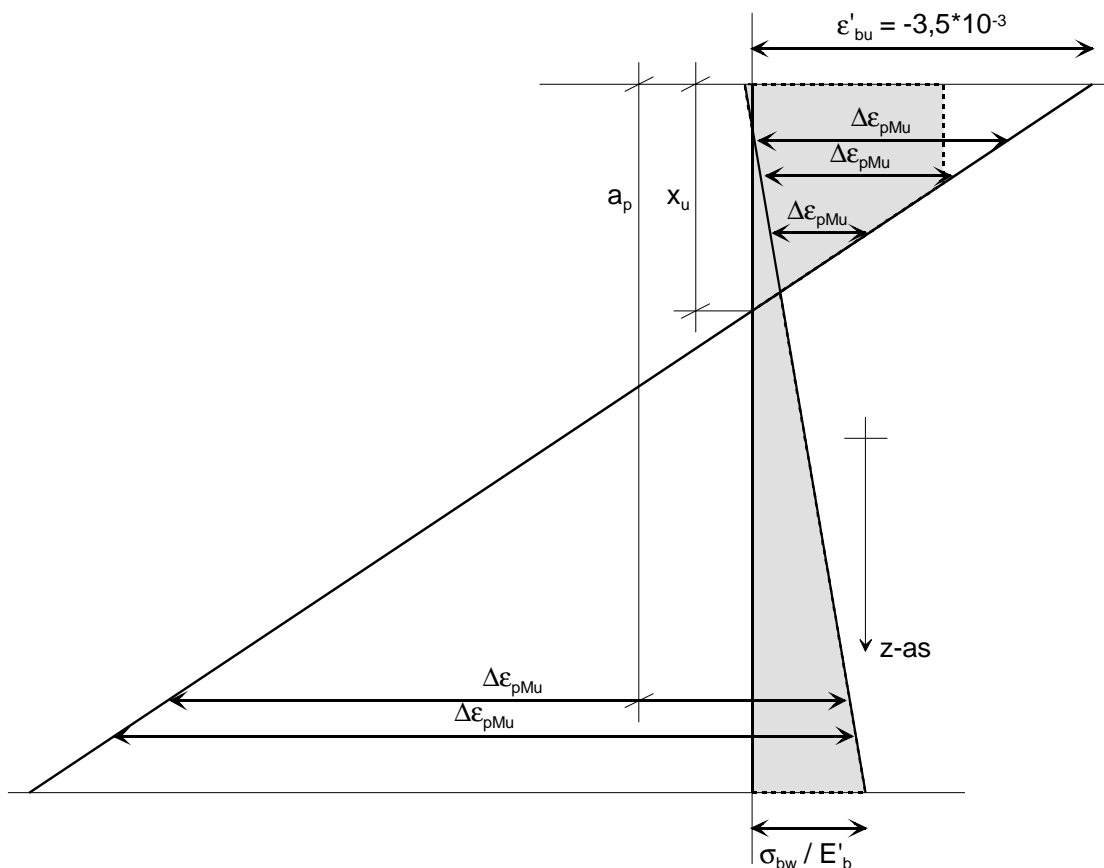
In figuur B5.3 zijn de spanningen in de voorspanwapening en in het beton op de hoogte z bij het bezwijkmoment, resp. $\sigma_{pMu}(z)$ en $\sigma_{bMu}(z)$, te zien. In de doorsnede heerst een horizontaal evenwicht en een momenten-evenwicht.



figuur B5.3 Spanningen in de doorsnede bij het bezwijkmoment

B5.3 Berekening bezwijkmoment

Figuur B5.4 toont het verschil in rek tussen de uitgangssituatie en de bezwijksituatie.



figuur B5.4 Verschil in rek tussen de uitgangssituatie en de bezwijksituatie

Voor het verschil in rek van de voorspanwapening op de hoogte z, $\Delta\epsilon_{pMu}(z)$, geldt:

$$\Delta\epsilon_{pMu}(z) = -\frac{\sigma_{bw}(z)}{E'_b} - \frac{\epsilon'_{bu}}{x_u} * a_p(z) + \epsilon'_{bu}$$

waarbij:

$$E'_b = 27413 \text{ N/mm}^2$$

Voor de spanning in de voorspanwapening op de hoogte z bij het bezwijkmoment, $\sigma_{pMu}(z)$, geldt (zie ook figuur 1.4):

$$\sigma_{pMu}(z) = \sigma_{pw}(z) + \Delta\epsilon_{pMu}(z) * E_p \quad \text{voor } \sigma_{pMu} < 0,9 * f_{purep}$$

$$= \frac{\sigma_{pw}(z) + \Delta\epsilon_{pMu}(z) * E_p - 0,9 * f_{purep}}{E_p} * \frac{f_{purep} - 0,9 * f_{purep}}{\epsilon_{pu} - \epsilon_p(0,9 * f_{purep})} + 0,9 * f_{purep} \quad \text{voor } \sigma_{pMu} > 0,9 * f_{purep}$$

waarbij:

$$E_p = 2 * 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{purep} = 1860 \text{ N/mm}^2$$

$$0,9 * f_{purep} = 1675 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_{pu} = 3,5 \%$$

$$\epsilon_p(0,9 * f_{purep}) = 0,84 \%$$

Voor de kracht per voorspanstreng op de hoogte z bij het bezwijkmoment, $F_{pMu}(z)$, geldt:

$$F_{pMu}(z) = \sigma_{pMu}(z) * A_p$$

waarbij:

$$A_p = 100 \text{ mm}^2$$

De totale drukkracht in het beton bij het bezwijkmoment, F_{bMu} , en de afstand van het zwaartepunt van deze kracht tot de bovenzijde van de doorsnede, a_{bMu} , zijn te berekenen uit:

- de spanningen in het beton op de hoogte z bij het bezwijkmoment, $\sigma_{bMu}(z)$, waarvoor geldt:

$$\sigma_{bMu}(z) = \left(-\frac{\varepsilon'_{bu}}{x_u} * a_p(z) + \varepsilon'_{bu} \right) * E'_b \geq 0,85 * f'_{cm} \quad \text{voor } z < z_b + x_u$$

$$= 0 \text{ N/mm}^2 \quad \text{voor } z > z_b + x_u$$

- de afmetingen van de doorsnede, zie figuur 1.9 en figuur 1.10

Figuur B5.5 toont de krachten en momenten in de doorsnede bij het bezwijkmoment, M_u . Voor deze krachten en momenten geldt:

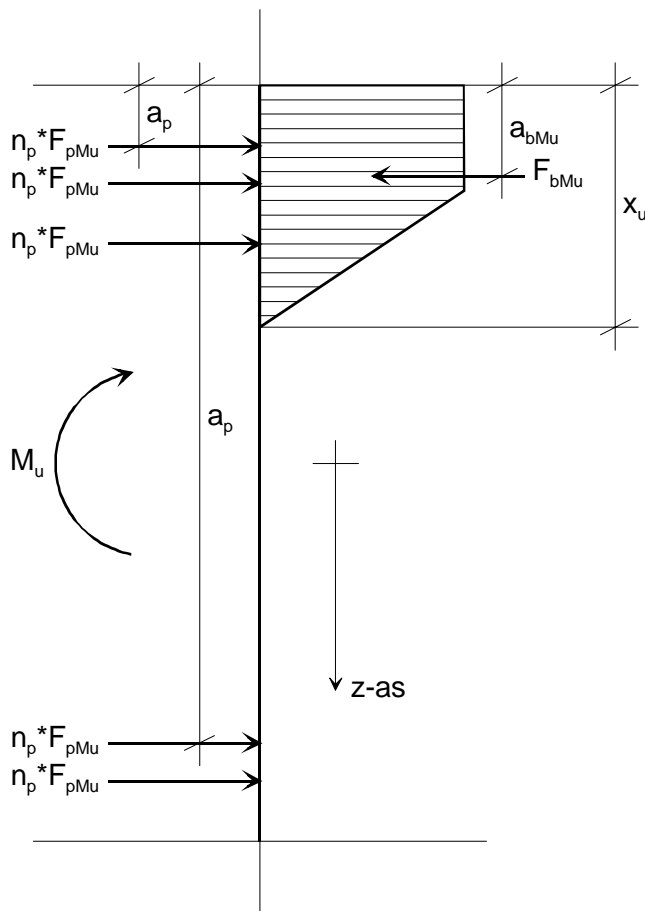
- Er heerst horizontaal evenwicht, dus:

$$F_{bMu} + \sum (n_p(z) * F_{pMu}(z)) = 0$$

- Er heerst momenten-evenwicht, dus:

$$F_{bMu} * a_{bMu} + \sum (n_p(z) * F_{pMu}(z) * a_p(z)) = M_u$$

formule B5.1



figuur B5.5 Krachten en momenten in de doorsnede bij het bezwijkmoment

Deze waarden van de krachten zijn dus afhankelijk van de hoogte van de drukzone, x_u . Er moet dus gezocht worden naar de waarde van x_u waarbij horizontaal evenwicht heerst. Wanneer x_u en dus de krachten bekend zijn, is het bezwijkmoment, M_u , te berekenen met formule B5.1.

Met behulp van de computer is de gezochte waarde van x_u gevonden, hiervoor geldt:

Bijlagen

$$x_u = 104 \text{ mm}$$

De waarden van de verschillende relevante grootheden op verschillende hoogten in de doorsnede zijn te vinden in tabel B5.1.

Z	n_p	σ_{pw}	σ_{bw}	$\Delta\varepsilon_{pMu}$	σ_{pMu}	F_{pMu}	σ_{bMu}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]		[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]
z_b			0.92				-54.00
z_1	4	154.99	-0.47	-0.00210	-265.64	-26.6	-54.00
z_2	4	137.26	-1.25	-0.00130	-122.87	-12.3	-36.90
z_3	2	105.66	-2.64	0.00013	131.65	13.2	0.00
z_4	5	744.80	-13.87	0.01168	1723.88	172.4	0.00
z_5	6	727.48	-14.65	0.01248	1728.86	172.9	0.00
z_o			-16.04				0.00
totaal						1770.2	

tabel B5.1 Spanningen en krachten bij het bezwijkmoment op verschillende hoogten in de doorsnede

Verder geldt:

$$F_{bMu} = -1779,4 \text{ kN}$$

$$a_{bMu} = 39,3 \text{ mm}$$

$$M_u = -1779,4 * 39,3 + 4 * -26,6 * 41 + 4 * -12,3 * 64 + 2 * 13,2 * 105 + 5 * 172,4 * 436 + 6 * 172,9 * 459 = 777,3 \text{ kN*m}$$

In paragraaf B5.2 is gezegd dat de voorspanwapening in de onderflens bij het bezwijkmoment, M_u , al moet vloeien om bros bezwijken te voorkomen. De spanning in de voorspanwapening in de onderflens bij het bezwijkmoment, M_u , bedraagt:

$$\sigma_{pMu}(z_4) = 1723,88 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{pMu}(z_5) = 1728,86 \text{ N/mm}^2$$

Deze spanningen liggen tussen $0,9 * f_{purep}$ en f_{purep} in. De voorspanwapening in de onderflens vloeit dus bij het bezwijkmoment, M_u .

Bijlage 6: Codering proefstukken en proeven

B6.1 Inleiding

In dit onderzoek komen veel verschillende proefstukken voor: 12 balken, 58 kubussen en 24 prisma's. Ook worden veel verschillende proeven uitgevoerd op deze proefstukken: 5 dwarskrachtproeven, 4 wringproeven, 34 kubusdruksterktemetingen en 41 E-modulusmetingen. Om al deze zaken te ordenen, is een codering opgesteld. Deze codering wordt in deze bijlage toegelicht.

B6.2 De stort

In totaal wordt er zes keer gestort. Bij elke stort worden 2 balken, 10 kubussen en 4 prisma's gestort. Bij de eerste vijf storten wordt Lichtgewicht Beton gebruikt. Bij de zesde stort wordt Normaal Beton gebruikt. Voor alle storten wordt dezelfde bekisting gebruikt; de storten vinden dus op verschillende dagen plaats. Hierdoor wordt voor elke stort opnieuw beton gedraaid en kunnen de eigenschappen van het beton van de verschillende storten dus verschillen. Het beton voor elke afzonderlijke stort wordt steeds in één keer gedraaid.

Het volgnummer van de stort en het type beton wordt in de codering van de proefstukken en de proeven aangegeven door 'S' gevolgd door het volgnummer van de stort en door 'LB' voor Lichtgewicht Beton en 'NB' voor Normaal Beton. Tabel B6.1 geeft de verschillende coderingen, de betekenis hiervan en de data en de tijdstippen van de storten.

codering	betekenis	datum stort	tijdstip stort
S1 LB	stort 1 Lichtgewicht Beton	05/04/00	12:10
S2 LB	stort 2 Lichtgewicht Beton	10/04/00	14:40
S3 LB	stort 3 Lichtgewicht Beton	13/04/00	12:10
S4 LB	stort 4 Lichtgewicht Beton	19/04/00	16:00
S5 LB	stort 5 Lichtgewicht Beton	25/04/00	15:10
S6 NB	stort 6 Normaal Beton	27/04/00	15:00

tabel B6.1 Codering van de stort

B6.3 Het proefstuk en het type proef

Per stort worden 2 balken, 10 kubussen en 4 prisma's gestort. Op de balken worden dwarskracht- of wringproeven uitgevoerd. Op alle kubussen worden -op verschillende tijdstippen- kubusdruksterktemetingen gedaan. Op alle prisma's worden -op verschillende tijdstippen- E-modulusmetingen gedaan.

Per stort bestaat de codering van de balken en van de dwarskracht- en wringproeven uit twee delen. Het eerste deel geeft het volgnummer van de balk aan, dus 'B1' en 'B2'. Het volgnummer geeft de positie van de balk bij de vervaardiging aan, zie figuur 3.1. Het tweede

deel geeft het type proef aan dat op de balk uitgevoerd wordt; 'V' voor een dwarskrachtproef en 'T' voor een wringproef.

Per stort bestaat de codering van de kubussen en de kubusdruksterktemetingen uit slechts één deel. Dit deel geeft het volgnummer van de kubus aan, dus 'K1' t/m 'K10'. Deze volgnummers zijn willekeurig. Aangezien op de kubussen *alleen* kubusdruksterktemetingen uitgevoerd worden, hoeft dit niet in de codering vermeld te worden.

Per stort bestaat de codering van de prisma's en de E-modulusmetingen ook uit slechts één deel. Dit deel geeft het volgnummer van de prisma aan, dus 'P1' t/m 'P4'. Deze volgnummers zijn willekeurig. Aangezien op de prisma's *alleen* E-modulusmetingen uitgevoerd worden, hoeft dit niet in de codering vermeld te worden.

Tabel B6.2 geeft de verschillende coderingen en de betekenis hiervan.

codering	betekenis
B1 V	balk 1 dwarskrachtproef
B1 T	balk 1 wringproef
B2 V	balk 2 dwarskrachtproef
B2 T	balk 2 wringproef
KX (1 t/m 10)	kubus X kubusdruksterktemeting
PX (1 t/m 4)	prisma X E-modulusmeting

tabel B6.2 Codering van het proefstuk en het type proef

B6.4 Het tijdstip van de proef

Van elke stort worden de kubussen en de prisma's op vier verschillende tijdstippen beproefd.

- Ten eerste op het moment waarop de voorspanning wordt afgelaten. Dit is wanneer de kubusdruksterkte van het beton ongeveer 35 N/mm^2 bedraagt.
- Ten tweede 28 dagen na de stort.
- Ten derde en ten vierde op de momenten waarop de balken van dezelfde stort beproefd worden.

De balken worden minimaal 28 dagen na de stort beproefd.

Het tijdstip waarop een proef uitgevoerd wordt, wordt in de codering van de proefstukken en de proeven aangegeven door 'T' gevolgd door de tijdsduur na de stort. Tabel B6.3 geeft de verschillende coderingen en de betekenis hiervan.

codering	betekenis
TXu	X uur na de stort beproefd
T28d	28 dagen na de stort beproefd
TXd	X dagen na de stort beproefd

tabel B6.3 Codering van het tijdstip van de proef

B6.5 Totale codering

Hieronder volgen enkele fictieve voorbeelden van coderingen van proefstukken en proeven met hun betekenis:

S1LBB2TT50d	stort 1, Lichtgewicht Beton, balk 2, wringproef, 50 dagen na de stort beproefd
S4LBK9T36d	stort 4, Lichtgewicht Beton, kubus 9, kubusdruksterktemeting, 36 dagen na de stort beproefd
S6NBP1T24u	stort 6, Normaal Beton, prisma 1, E-modulusmeting, 24 uur na de stort beproefd

De kubusdruksterktemetingen op de kubussen en de dwarskracht- en wringproeven op de balken zijn destructief. Op elk van deze proefstukken kan dus maar één proef uitgevoerd worden. In tegenstelling tot de andere proeven zijn de E-modulusmetingen niet-destructief. Deze proeven kunnen dus op verschillende tijdstippen op dezelfde proefstukken uitgevoerd worden. Bijvoorbeeld: Op het proefstuk met de codering S3LBP2 kunnen dus de proeven met de coderingen S3LBP2T22u en S3LBP2T28d uitgevoerd worden.

Bijlage 7: Resultaten rijpheidsmetingen en bijbehorende kubusdruksterktemetingen

B7.1 Algemeen

Tijdens het verharden wordt bij elke stort de rijpheid gemeten van de volgende proefstukken:

- Een balk, de kubus K2 en het prisma P1; deze proefstukken zijn bij elkaar geplaatst en afgedekt met plastic. Hierbij is ook nog de kubus K1 geplaatst; beide kubussen hebben een stalen mal.
- De kubussen K4 en K5 en het prisma P2; deze proefstukken zijn elders opgeslagen en zijn niet afgedekt. Hierbij zijn ook de overige kubussen en prisma's geplaatst. De kubussen K3 en K4 hebben een stalen mal, de overige kubussen hebben een kunststof mal.

Om te controleren of het beton van de balken bij een bepaalde rijpheid de juiste kubusdruksterkte heeft, worden op de kubussen K1 en K2 kubusdruksterktemetingen uitgevoerd. Rond de tijd dat de voorspanning wordt afgelaten, worden ook de kubussen K3 en K4 gedrukt.

B7.2 Resultaten

Tabel B7.1 tot en met tabel B7.2 tonen de resultaten van de rijpheidsmetingen en van de kubusdruksterktemetingen. Per stort wordt aangegeven:

- De (geschatte) rijpheid van de verschillende proefstukken op één bepaald tijdstip vlak voor het aflaten van de voorspanning.
- De kubusdruksterkte van de kubussen K1 t/m K4 op bepaalde tijdstippen en bij bepaalde rijpheden.
- Het tijdstip waarop de voorspanning wordt afgelaten en de tijdsduur tussen het storten en het aflaten van de voorspanning.

Van stort 1 zijn geen meetgegevens bekend. Bij stort 2 zijn acht i.p.v. tien kubussen gestort; twee in stalen mallen en zes in kunststoffen mallen. Er is één kubus (stalen mal) i.p.v. twee bij de balken geplaatst tijdens het verharden. Van deze kubus is de rijpheid gemeten; dit is kubus K2. De tweede kubus in een stalen mal is elders, niet afgedekt, opgeslagen. Van deze kubus is ook de rijpheid gemeten; dit is kubus K4. De kubussen S2LBK1 en S2LBK3 bestaan dus niet!

Grafiek B7.1 toont per stort de gemeten kubusdruksterktes versus de bijbehorende rijpheden. De schaal van de x-as (rijpheden) is logaritmisch.

S2 LB			
proefstuk	tijdstip	rijpheid	kubusdrukst.
	[hh:mm]	[°Ch]	[N/mm²]
<i>rijpheidsmeting</i>			
balk	10:45	659	
kubus bij balken K2	10:45	629	
prisma bij balken P1	10:45	601	
kubus elders staal K4	10:45	416	
kubus elders kunststof K5	10:45	487	
prisma elders P2	10:45	434	
<i>kubusdruksterktemeting</i>			
kubus bij balken K2	10:51	629	35.7
kubus elders K4	11:38	420	25.7
tijdstip aflaten	11:10		
tijdsduur storten tot aflaten	20:30		

tabel B7.1 Resultaten rijpheidsmetingen en kubusdruksterktemetingen van stort 2

S3 LB			
proefstuk	tijdstip	rijpheid	kubusdrukst.
	[hh:mm]	[°Ch]	[N/mm²]
<i>rijpheidsmeting</i>			
balk	10:15	649	
kubus bij balken K2	10:15	652	
prisma bij balken P1	10:15	622	
kubus elders staal K4	10:15	482	
kubus elders kunststof K5	10:15	625	
prisma elders P2	10:15	492	
<i>kubusdruksterktemeting</i>			
kubus bij balken K1	08:04	609	33.5
kubus bij balken K2	10:11	652	34.1
kubus elders K3	08:15	438	27.2
kubus elders K4	10:19	482	29.4
tijdstip aflaten	10:40		
tijdsduur storten tot aflaten	22:30		

tabel B7.2 Resultaten rijpheidsmetingen en kubusdruksterktemetingen van stort 3

S4 LB			
proefstuk	tijdstip	rijpheid	kubusdrukst.
	[hh:mm]	[°Ch]	[N/mm²]
<i>rijpheidsmeting</i>			
balk	10:15	778	
kubus bij balken K2	10:15	878	
prisma bij balken P1	10:15	921	
kubus elders staal K4	10:15	481	
kubus elders kunststof K5	10:15	550	
prisma elders P2	10:15	419	
<i>kubusdruksterktemeting</i>			
kubus bij balken K1	07:35	801	39.6
kubus bij balken K2	10:27	881	41.3
kubus elders K3	07:32	402	27.0
kubus elders K4	10:10	481	32.0
tijdstip aflaten	10:30		
tijdsduur storten tot aflaten	18:30		

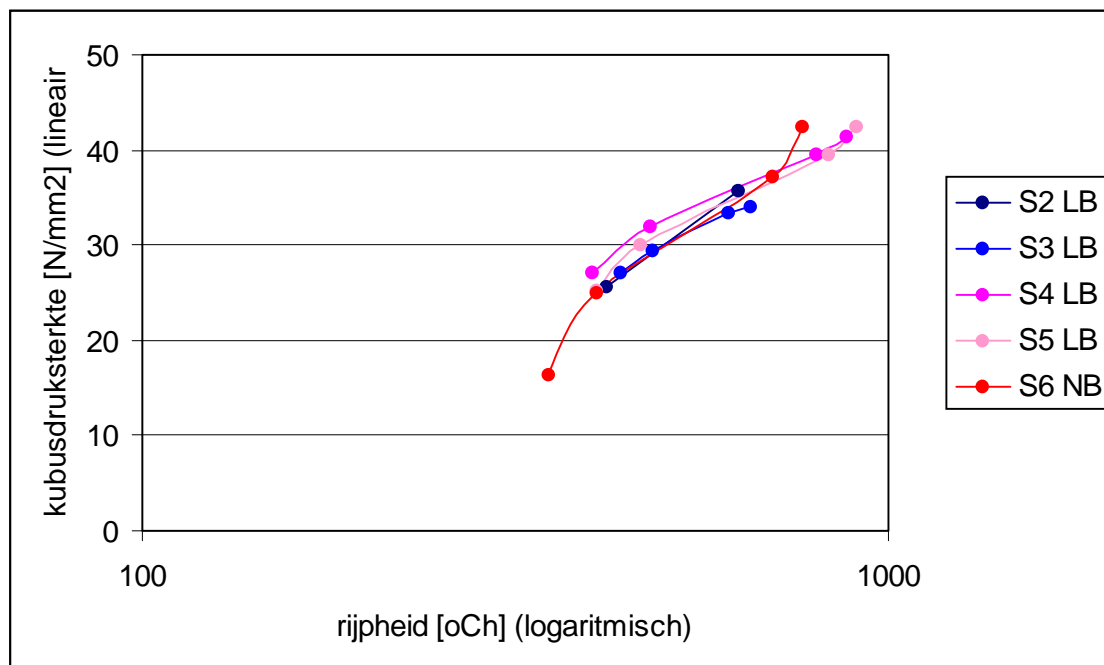
tabel B7.3 Resultaten rijpheidsmetingen en kubusdruksterktemetingen van stort 4

S5 LB			
proefstuk	tijdstip	rijpheid	kubusdrukst.
	[hh:mm]	[°Ch]	[N/mm²]
<i>rijpheidsmeting</i>			
balk	10:00	874	
kubus bij balken K2	10:00	904	
prisma bij balken P1	10:00	788	
kubus elders staal K4	10:00	465	
kubus elders kunststof K5	10:00	678	
prisma elders P2	10:00	451	
<i>kubusdruksterktemeting</i>			
kubus bij balken K1	07:45	830	39.5
kubus bij balken K2	10:01	904	42.4
kubus elders K3	07:49	407	25.3
kubus elders K4	10:03	465	30.0
tijdstip aflaten	10:10		
tijdsduur storten tot aflaten	19:00		

tabel B7.4 Resultaten rijpheidsmetingen en kubusdruksterktemetingen van stort 5

S6 NB			
proefstuk	tijdstip	rijpheid	kubusdrukst.
	[hh:mm]	[°Ch]	[N/mm²]
<i>rijpheidsmeting</i>			
balk	09:00	735	
kubus bij balken K2	09:00	735	
prisma bij balken P1	09:00	646	
kubus elders staal K4	09:00	387	
kubus elders kunststof K5	09:00	465	
prisma elders P2	09:00	416	
<i>kubusdruksterktemeting</i>			
kubus bij balken K1	07:44	700	37.1
kubus bij balken K2	10:15	765	42.5
kubus elders K3	07:30	350	16.4
kubus elders K4	09:59	407	25.0
tijdstip aflaten	10:30		
tijdsduur storten tot aflaten	19:30		

tabel B7.5 Resultaten rijpheidsmetingen en kubusdruksterktemetingen van stort 6



grafiek B7.1

B7.3 Conclusies

Uit tabel B7.1 tot en met tabel B7.5 en grafiek B7.1 zijn de volgende conclusies te trekken:

- De rijpheid en dus de kubusdruksterkte van de balken en van de erbij geplaatste proefstukken loopt sneller op dan van de elders opgeslagen proefstukken. De balken en de erbij geplaatste proefstukken zijn nl. afgedekt met plastic. Hierdoor gaat minder warmte verloren. Als de rijpheid van de kubussen K4 en K5 vergeleken wordt, is te zien dat de rijpheid van de kubus K5 sneller oploopt. De kubus K5 heeft nl. een kunststof mal. Deze mal geleidt minder goed de warmte dan de stalen mal van kubus K4. Er gaat dus minder warmte verloren.
- Wanneer de voorspanning wordt afgelaten, bedraagt de kubusdruksterkte van het beton van de balken van de storten S2LB en S3LB ongeveer 35 N/mm², zoals de bedoeling was. De kubusdruksterkte van het beton van de balken van de storten S4LB, S5LB en S6NB bedraagt bij het aflaten meer dan 40 N/mm².
- In tabel B7.6 zijn per stort de gemeten kubusdruksterkten met de tijdsduur van het storten tot de kubusdruksterktemeting te zien. Hieruit blijkt dat het beton van de storten S4LB, S5LB en S6NB sneller een hogere kubusdruksterkte bereiken dan het beton van de storten S1LB, S2LB en S3LB. Uit grafiek B7.1 blijkt dat de kubusdruksterkte versus de rijpheid bij de verschillende storten niet veel verschilt. Verder zijn de C-waarden van het beton van de verschillende storten ook gelijk, en wel 1,30. Er kan dus geconcludeerd worden dat de temperatuur van het beton van de storten S4LB, S5LB en S6NB bij het verharden hoger is dan de temperatuur van het beton van de storten S1LB, S2LB en S3LB. De rijpheid en de kubusdruksterkte lopen dan dus sneller op.

stort	tijdsduur na storten	kubusdrukst. afgedekt	tijdsduur na storten	kubusdrukst. niet afgedekt
	[hh:mm]	[N/mm ²]	[hh:mm]	[N/mm ²]
S2 LB	20:10	35.7	21:00	25.7
S3 LB	22:00	34.1	22:10	29.4
S4 LB	18:30	41.3	18:10	32.0
S5 LB	18:50	42.4	18:50	30.0
S6 NB	19:15	42.5	19:00	25.0

tabel B7.6

Bijlage 8: Slag in de hydraulische vijzels

B8.1 Inleiding

Zoals in paragraaf 3.6.1 al gezegd is, wordt gebruikt gemaakt van vier hydraulische vijzels om de voorspanning geleidelijk op de balken over te dragen. Deze vijzels worden tussen het spanjuk en het spanblok geplaatst (zie figuur 3.1). Ze worden aangespannen tot de vier stalen blokken tussen het spanjuk en het spanblok verwijderd kunnen worden. Om dit te bereiken, moet de spanning in de voorspanstrengen dus iets toenemen. Hierna worden de vier hydraulische vijzels geleidelijk ontspannen. Het is de bedoeling dat de totale voorspanning in de niet ingestorte delen van de voorspanstrengen hierdoor verwijderd wordt. Als dit gebeurd is, is de voorspanning compleet en geleidelijk op de balken overgedragen.

Na het compleet ontspannen van de vier hydraulische vijzels blijkt er echter nog voorspanning in de niet ingestorte delen van de 11 onderste voorspanstrengen te bestaan. Deze voorspanstrengen waren voorgespannen op 110 kN. Na het ontspannen van de vijzels bestaat in elke streng nog een voorspanning van ongeveer 60 kN. De voorspanning in de niet ingestorte delen van de 10 bovenste voorspanstrengen is na het compleet ontspannen van de vijzels wel geheel verdwenen. Deze voorspanstrengen waren voorgespannen op 20 kN.

In deze bijlage wordt bekeken hoe het mogelijk is dat er nog voorspanning in de niet ingestorte delen van de 11 onderste voorspanstrengen bestaat nadat de hydraulische vijzels compleet zijn ontspannen. Hiervoor worden de aanwezige en de benodigde slag in de twee onderste hydraulische vijzels met elkaar vergeleken.

B8.2 Aanwezige slag in de twee onderste hydraulische vijzels

In principe hebben de hydraulische vijzels een maximale slag van 50 mm. Om de volgende redenen wordt deze slag echter niet helemaal gebruikt voor het aflaten van de voorspanning van 110 kN per voorspanstreng:

- Op het moment dat de vijzels tussen het spanblok en het spanjuk geplaatst worden, bedraagt de voorspanning in de voorspanstrengen 110 kN. De vijzels kunnen dan echter nog niet compleet aangespannen zijn (50 mm slag over). Ze moeten nl. nog verder aangespannen worden tot de stalen blokken tussen het spanjuk en het spanblok verwijderd kunnen worden. Om dit te bereiken, moet de spanning in de voorspanstrengen dus iets toenemen. Vanwege het verwijderen van de stalen blokken gaan enkele millimeters van de slag verloren.
- Voordat de vijzels tussen het spanblok en het spanjuk geplaatst worden, zijn het spanblok en het spanjuk niet parallel aan elkaar. De ruimte tussen het spanblok en het spanjuk is bij de onderste voorspanstrengen kleiner dan bij de bovenste voorspanstrengen. De vier te plaatsen hydraulische vijzels hebben allemaal een even grote maximale slag. Wanneer de twee bovenste vijzels bijna compleet aangespannen (bijna 50 mm slag over) geplaatst worden, kunnen de twee onderste vijzels niet bijna compleet aangespannen geplaatst worden. Hier gaan soms wel enkele centimeters van de slag verloren.

B8.3 Benodigde slag in de twee onderste hydraulische vijzels

Wanneer de voorspanning van 110 kN per voorspanstreng compleet is afgelaten, heerst in de ingestorte delen van de voorspanstrengen de aanvangsspanning. Voor de totale lengte van de ingestorte delen van één voorspanstreng, l_{pi} , geldt (zie figuur 3.1):

$$\begin{aligned} l_{pi} &= 2 * 4100 \\ &= 8200 \text{ mm} \end{aligned}$$

De niet ingestorte delen van de voorspanstrengen zijn spanningsloos wanneer de voorspanning van 110 kN per voorspanstreng compleet is afgelaten. Voor de totale lengte van de niet ingestorte delen van één voorspanstreng, l_{pn} , geldt (zie figuur 3.1):

$$\begin{aligned} l_{pn} &= 1400 + 400 + 5200 \\ &= 7000 \text{ mm} \end{aligned}$$

De verkorting van een voorspanstreng nadat de voorspanning van 110 kN per voorspanstreng compleet en geleidelijk is afgelaten, is gelijk aan de benodigde slag in de twee onderste hydraulische vijzels. Voor deze verkorting, Δl , geldt:

$$\Delta l = \frac{(\sigma_{po.o} - \sigma_{pi.o}) * l_{pi}}{E_p} + \frac{(\sigma_{po.o} - 0) * l_{pn}}{E_p}$$

waarbij:

$$\begin{aligned} \sigma_{po.o} &= \text{spanning in de voorspanwapening in de onderflens vóór het aflaten} \\ &= 1100 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{pi.o} &= \text{aanvangsspanning in de voorspanwapening in de onderflens} \\ &\approx 940 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$E_p = 2 * 10^5 \text{ N/mm}^2$$

Voor Δl geldt dus:

$$\Delta l = 45 \text{ mm}$$

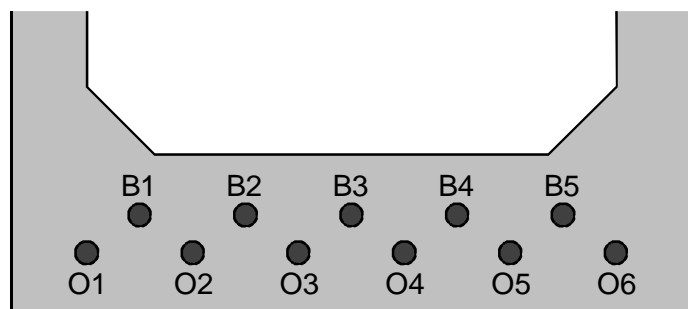
B8.4 Conclusie

De aanwezige slag in de twee onderste hydraulische vijzels is veel kleiner dan de benodigde slag van 45 mm om de voorspanning compleet en geleidelijk over te dragen op de balken. Wanneer de twee onderste hydraulische vijzels compleet ontspannen zijn, is de voorspanning dus nog niet compleet overgedragen.

Bijlage 9: Rentreemetingen

B9.1 Algemeen

In dit onderzoek wordt de rentree bepaald van de 11 onderste voorspanstrengen in de koppen aan de actieve zijden van de balken. Figuur B9.1 toont de nummering van deze 11 voorspanstrengen in de onderflens van de balk. Er wordt gemeten aan zowel balk 1 (B1) als balk 2 (B2) van elke stort.



figuur B9.1 Nummering van de 11 voorspanstrengen in de onderflens

B9.2 Wijze van bepalen van de rentree

In dit onderzoek wordt de rentree als volgt bepaald (zie ook figuur B9.2):

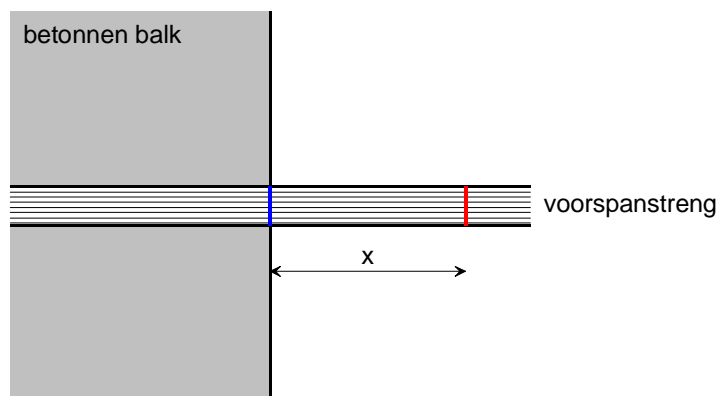
- Vóór het aflaten van de voorspanning heerst in de hele voorspanstreng een spanning σ_{po} . Op een afstand x van de balk wordt een markering aangebracht op de voorspanstreng (rode streep). De afstand x wordt opgemeten.
- Na het aflaten van de voorspanning is de (denkbeeldige) blauwe streep op de voorspanstreng in de betonnen balk verdwenen. Deze verplaatsing van de blauwe streep is de rentree en wordt hier aangegeven met de afstand r .
- Na het aflaten van de voorspanning heerst tussen de blauwe en de rode streep geen spanning in de voorspanstreng. Hierdoor is de afstand tussen de blauwe en de rode streep verkort van x tot $x-\Delta x$, waarbij voor de verkorting Δx geldt:

$$\Delta x = \frac{(\sigma_{po} - 0) \cdot x}{E} \quad \text{formule B9.1}$$

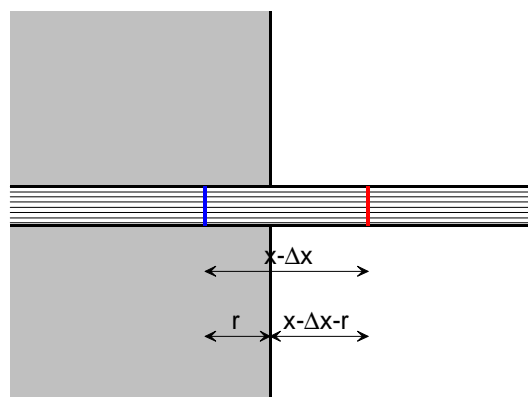
De afstand van de rode streep tot de betonnen balk bedraagt nu $x-\Delta x-r$; deze afstand wordt opgemeten.

- Het verschil tussen de afstand van de rode streep tot de betonnen balk vóór en na het aflaten van de voorspanning bedraagt $\Delta x+r$ en is dus gelijk aan het verschil van de twee gemeten afstanden. Door Δx te berekenen volgens formule B9.1 is de rentree r nu te bepalen.

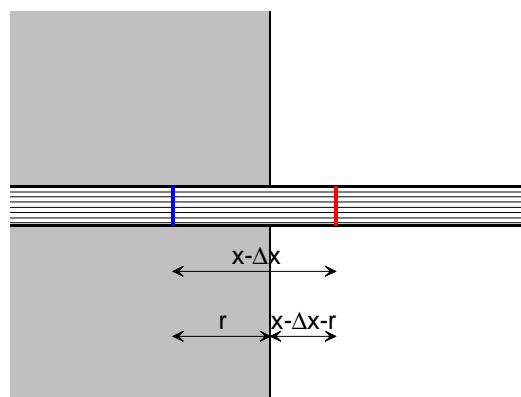
aanvangssituatie vóór het aflaten van de voorspanning



situatie na geleidelijk aflaten



situatie na abrupt aflaten



figuur B9.2 Bepaling rentree

B9.3 Onvolkomenheden

De te meten afstanden (van de aangebrachte markering tot de balk) worden met een rolmaat gemeten. Dit is voor deze meting geen erg nauwkeurig meetinstrument.

Doordat de voorspanstrengen onder spanning doorgeslepen moeten worden, 'slaat' de aangebrachte markering van sommige voorspanstrengen af. Van deze voorspanstrengen zijn dus geen meetresultaten bekend. Bij enkele andere voorspanstrengen beschadigt of verplaatst de markering door het doorslijpen. De meetresultaten van deze voorspanstrengen zijn dus niet erg betrouwbaar.

Aan de balken van stort 1 (S1LBB1 en S1LBB2) zijn geen rentreemetingen gedaan. De rentreemetingen aan de balken van stort 2 (S2LBB1 en S2LBB2) blijken onbruikbaar te zijn.

B9.4 Resultaten en conclusies

Tabel B9.1 toont de rentree van de onderste voorspanstrengen in de koppen aan de actieve zijden van de balken.

rentree aan de actieve zijde van de balk [mm]								
streng	S3LB		S4LB		S5LB		S6NB	
	S3LBB1	S3LBB2	S4LBB1	S4LBB2	S5LBB1	S5LBB2	S6NBB1	S6NBB2
B1	1.4	2.0	1.3	2.0	-0.1	1.5	0.4	0.7
B2	0.9	1.1				2.0		
B3	1.4	1.5	0.4	2.5	-0.5	0.5	1.5	1.2
B4		2.0	2.4					0.7
B5	0.5	1.5		1.4	1.0	0.5	1.5	1.7
O1	0.4	1.0				1.0		
O2	1.4	2.0	3.3	2.4	0.4	1.0	1.9	
O3		1.5						
O4		1.5		0.5	0.9		1.5	
O5		1.5						
O6		0.5		0.9	1.9	1.4	1.8	
gemiddeld	1.0	1.5	1.9	1.6	0.6	1.1	1.4	1.1

tabel B9.1

Geconcludeerd kan worden:

- Vanwege de verschillende onvolkomenheden bij de rentreemetingen zijn niet echt conclusies te trekken uit de resultaten.
- Er is geen opvallend verschil tussen de gemeten rentree van de voorspanstrengen in de koppen aan de actieve zijden van balk 1 en van balk 2.

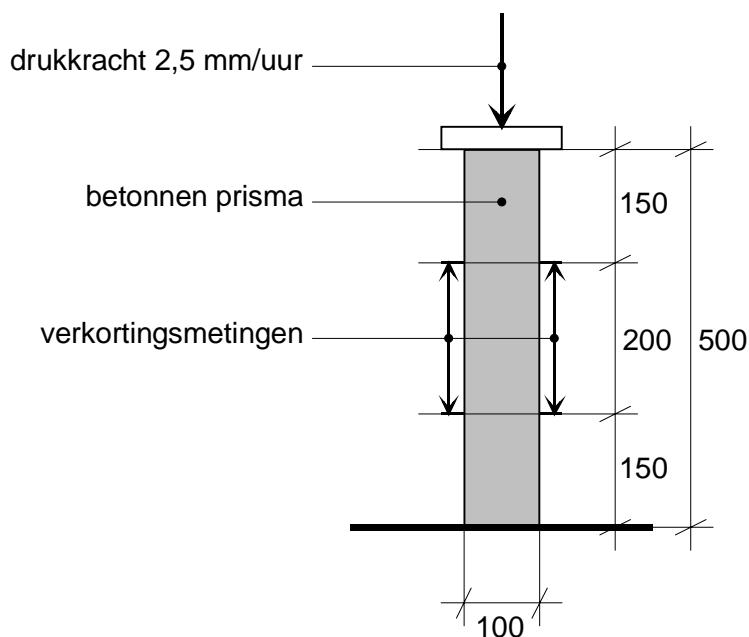
Bijlage 10: Bepaling E-modulus tijdens het aflatenvan de voorspanning

B10.1 Wijze van bepalen

B10.1.1 Uitvoering proef

Voor het bepalen van de E-modulus van het beton, wordt de volgende meting uitgevoerd (zie ook figuur B10.1):

- Een betonnen prisma van 500*100*100 mm wordt in de hoogte in een drukbank geplaatst; het prisma staat dus op een ondervlak van 100*100 mm. De drukbank voert symmetrisch een drukkracht uit op het bovenvlak (100*100 mm) van het prisma. Deze drukkracht loopt verplaatsingsgestuurd op met een belastingsnelheid van 2,5 mm/uur. De drukkracht wordt opgevoerd tot de spanning in het beton ongeveer 40% van de gemiddelde kubusdruksterkte bedraagt. De E-modulusmeting is dus niet-destructief.
- Tijdens het opvoeren van de drukkracht wordt de verkorting van het prisma gemeten m.b.v. LVDT's. Deze verkorting wordt gemeten aan twee tegenover elkaar liggende zijvlakken (500*100 mm); aan beide zijden wordt de verkorting van de middelste 200 mm van het prisma gemeten.



figuur B10.1 Opstelling E-modulusmeting

B10.1.2 Bepaling E-modulus

De spanning in het beton wordt uitgezet tegen de rek aan het linker zijvlak, tegen de rek aan het rechter zijvlak en tegen de gemiddelde rek. Er wordt nu gekeken naar het traject van deze grafieken waarbij de spanning en de verschillende rekken geleidelijk oplopen. Uit het verschil van de spanning over dit traject, $\Delta\sigma$, en het verschil van de gemiddelde rek over dit traject, $\Delta\varepsilon_{gem}$, is de E-modulus van het beton, E'_b , als volgt te bepalen:

$$E'_b = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_{\text{gem}}}$$

B10.2 Meetresultaten

B10.2.1 Algemeen

Zoals in paragraaf B10.1.1 al gezegd is, wordt de drukkracht op de prisma's opgevoerd tot de spanning in het beton ongeveer 40% van de gemiddelde kubusdruksterkte bedraagt. Tijdens het aflaten van de voorspanning bedraagt de gemiddelde kubusdruksterkte van het beton van de verschillende storten ongeveer 35 tot 40 N/mm². De drukkracht kan dus opgevoerd worden tot:

$$\left(\frac{35 + 40}{2}\right) * 100 * 100 * 0,40 = 150000 \text{ N}$$

De spanning in het beton bedraagt dan:

$$\left(\frac{35 + 40}{2}\right) * 0,40 = 15 \text{ N/mm}^2$$

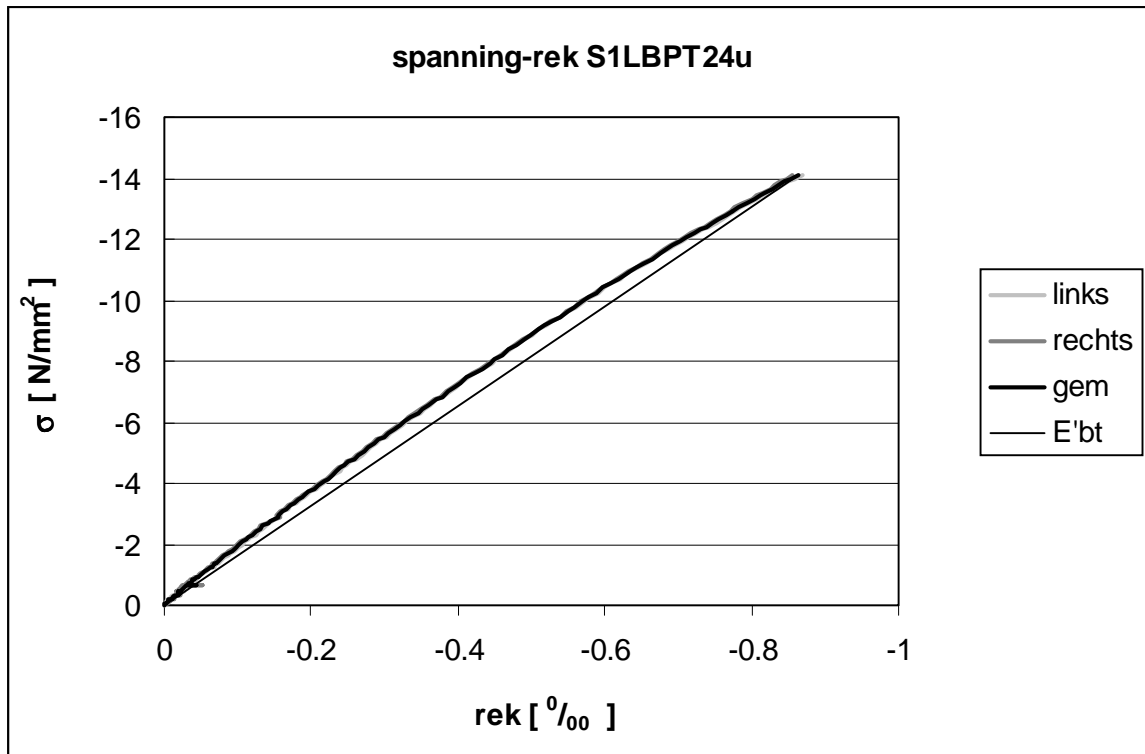
Eén van de twee E-modulusmetingen op de prisma's van stort 1 is mislukt. Van de gelukte E-modulusmeting is niet bekend op welk prisma (P1 of P2) dit was; deze meting heet S1LBPT24u.

B10.2.2 Grafieken

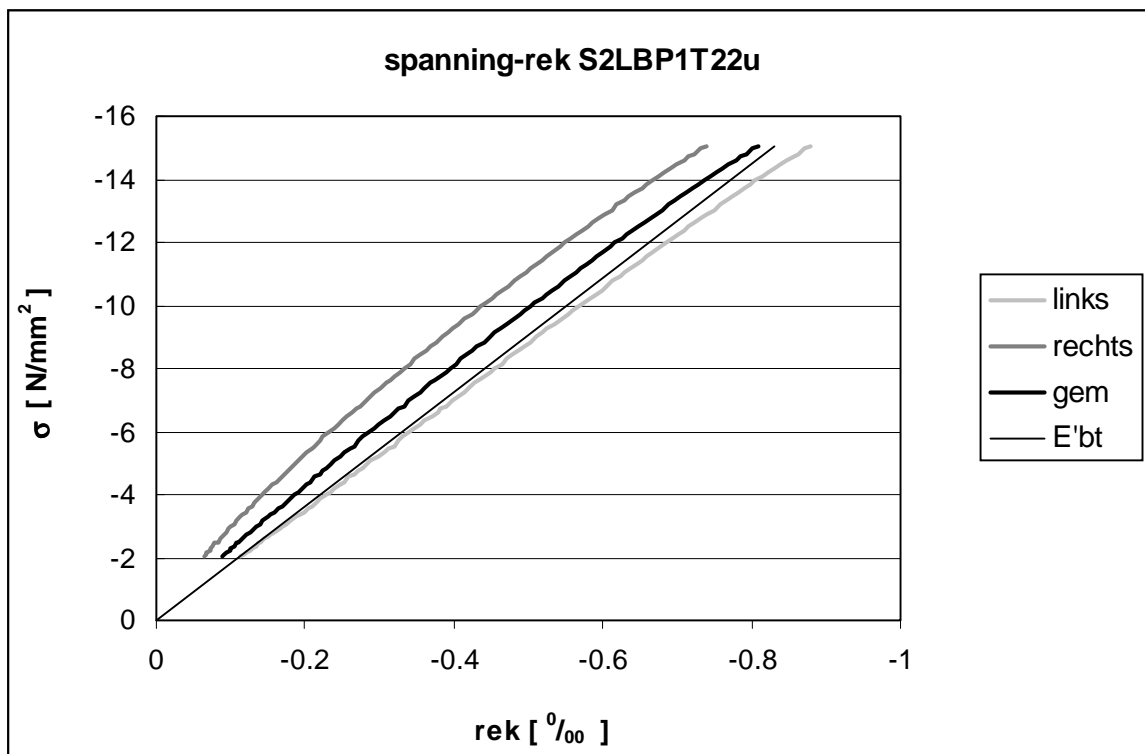
Grafiek B10.1 tot en met grafiek B10.11 tonen per E-modulusmeting de volgende grafieken:

- De spanning in het beton uitgezet tegen de rek aan het linker zijvlak
- De spanning in het beton uitgezet tegen de rek aan het rechter zijvlak
- De spanning in het beton uitgezet tegen de gemiddelde rek
- De richting van de hieruit bepaalde E-modulus, E'_{bt}

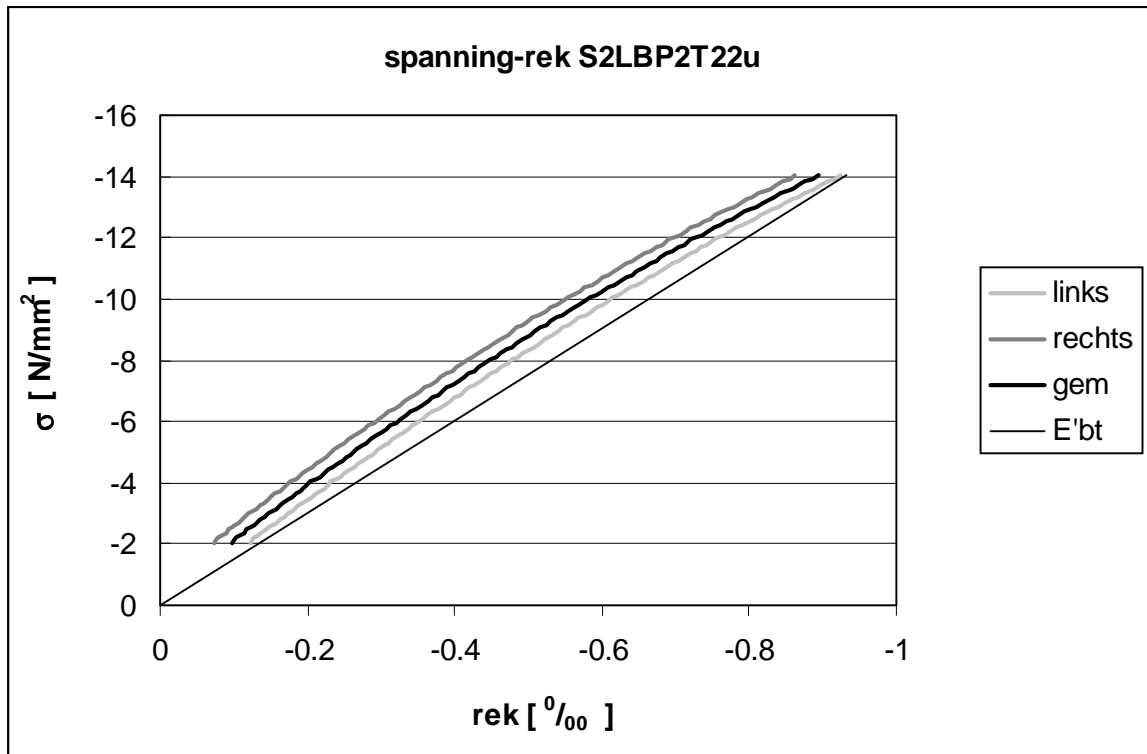
In de grafieken B10.1 tot en met B10.11 worden van de spanning-rek-grafieken alleen de trajecten getoond waarbij de spanning en de verschillende rekken geleidelijk oplopen. De niet getoonde trajecten lieten bv. zien dat het proefstuk zich in het begin van de meting nog moest zetten.



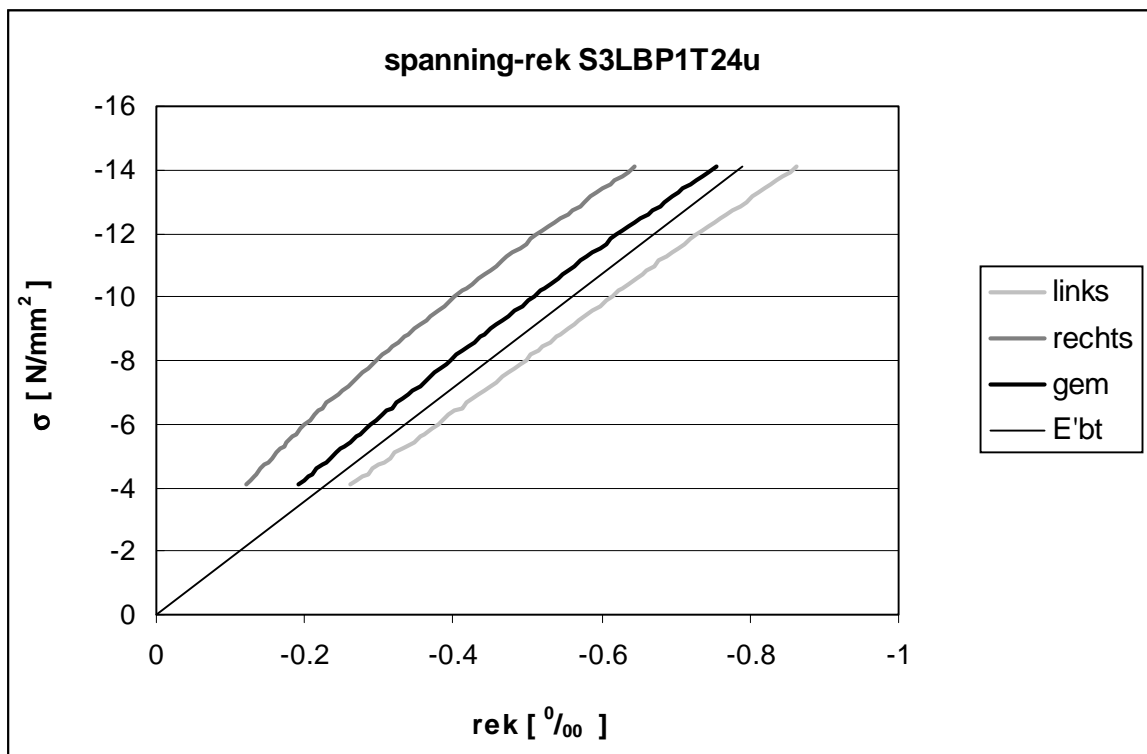
grafiek B10.1



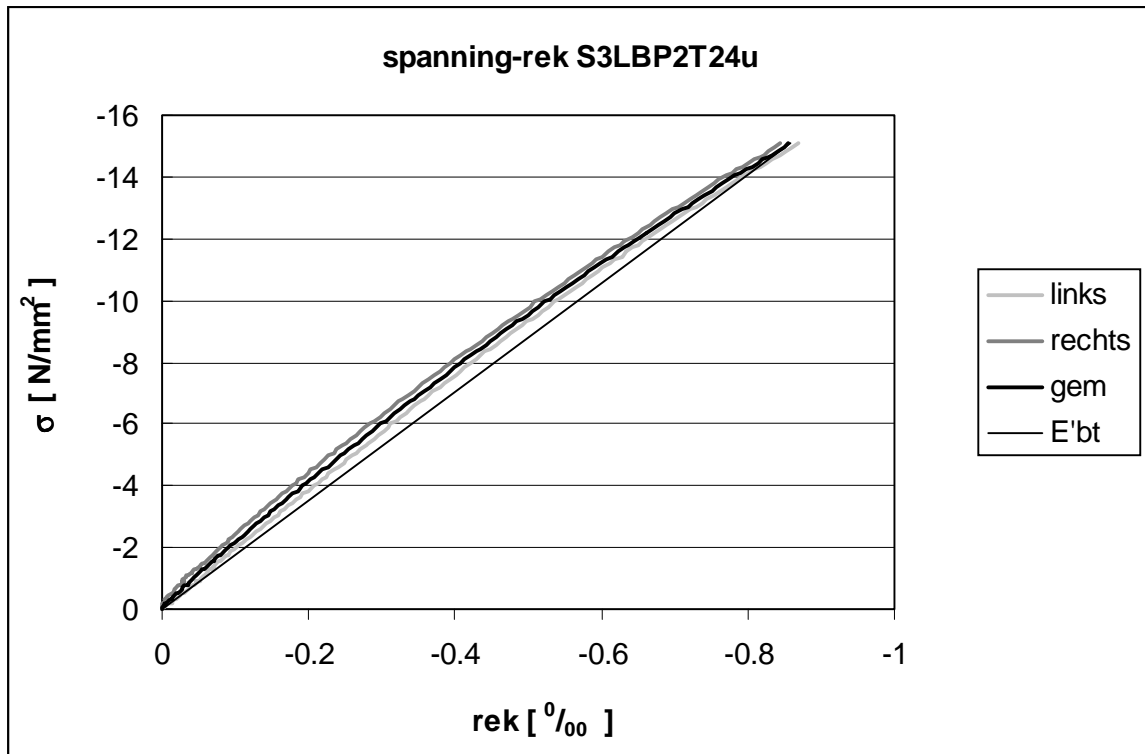
grafiek B10.2



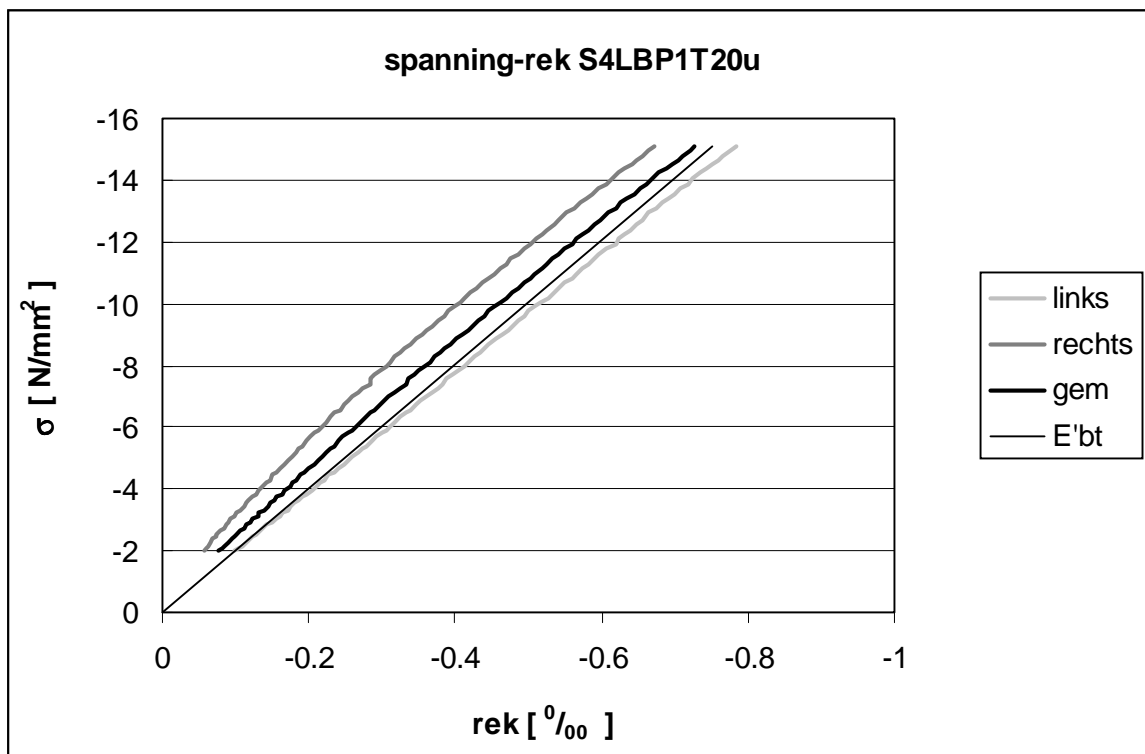
grafiek B10.3



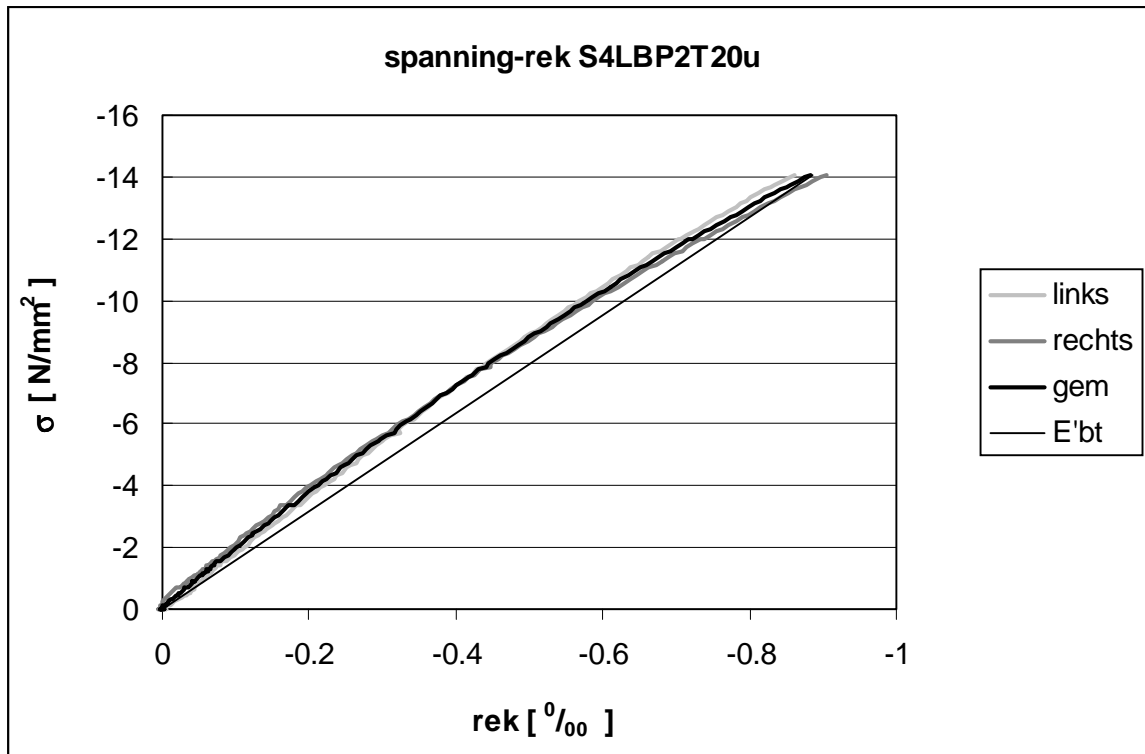
grafiek B10.4



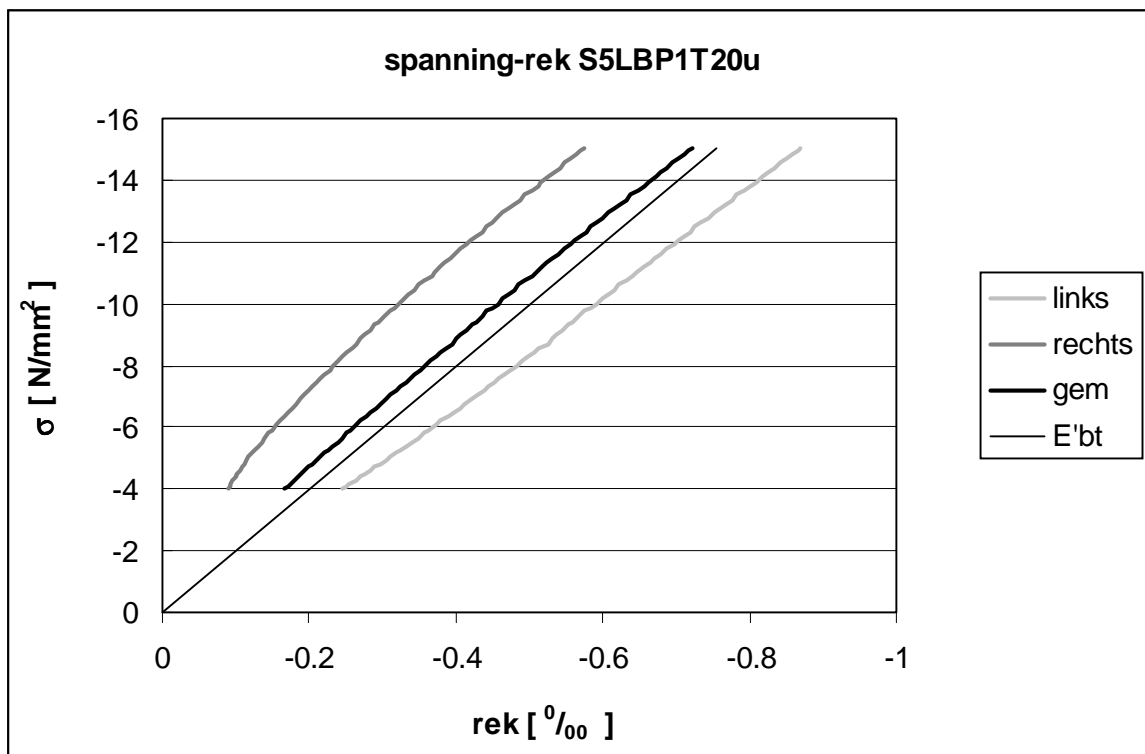
grafiek B10.5



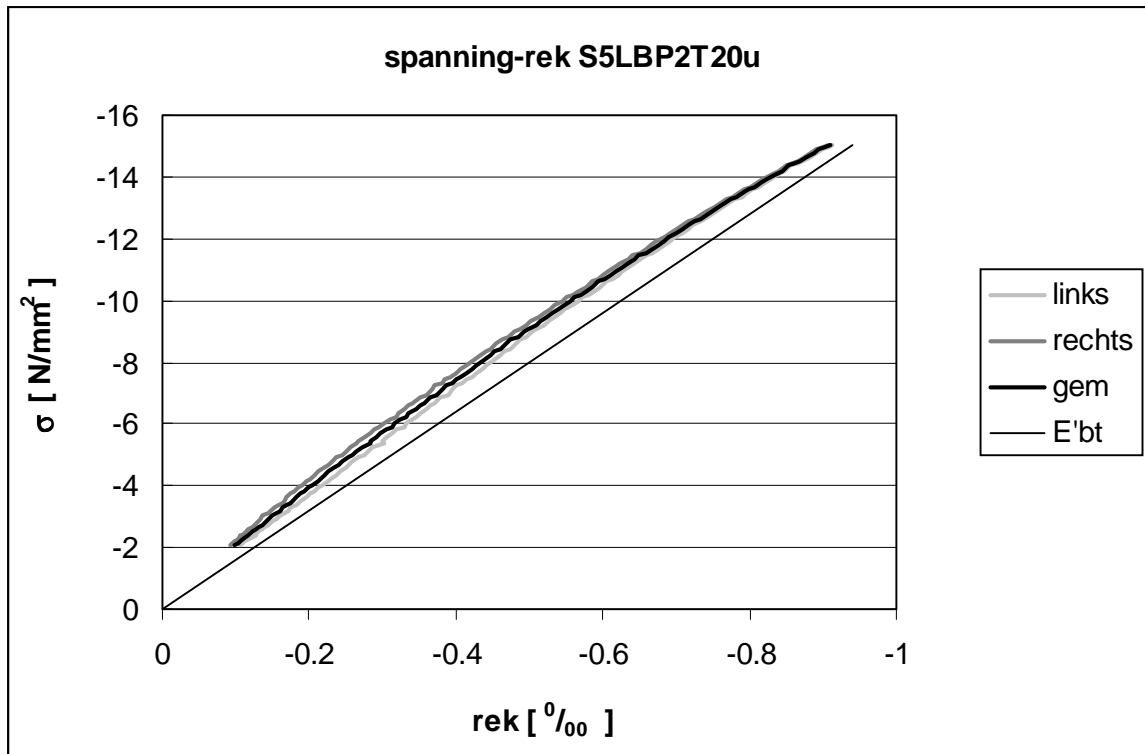
grafiek B10.6



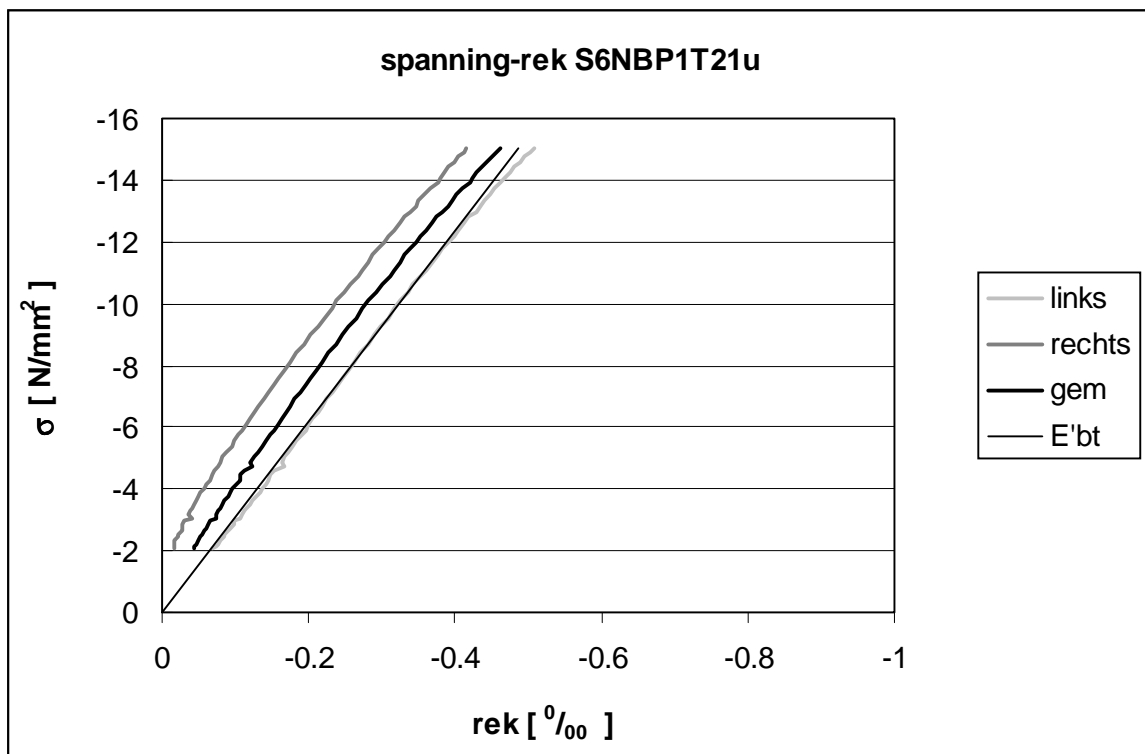
grafiek B10.7



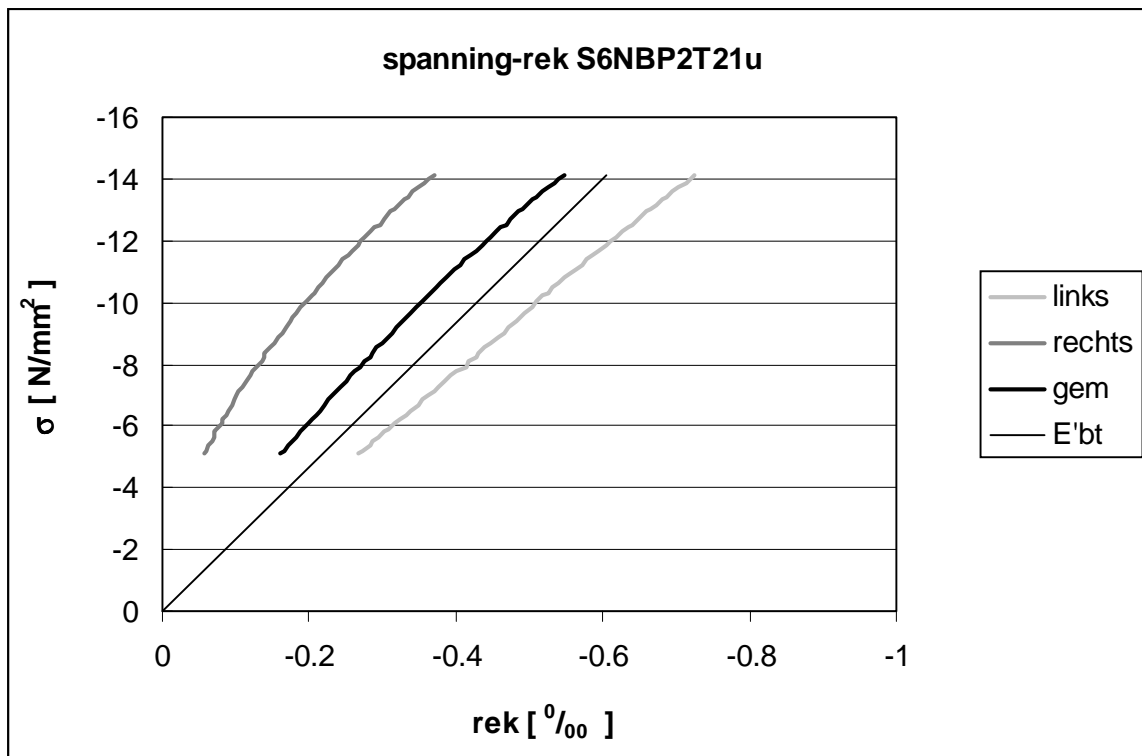
grafiek B10.8



grafiek B10.9



grafiek B10.10



grafiek B10.11

B10.2.3 E-modulus tijdens het aflaten van de voorspanning

Tabel B10.1 toont per E-modulusmeting de bepaalde E-modulus tijdens het aflaten van de voorspanning, E'_{bt} . Ook toont de tabel de gemiddelde E-modulus tijdens het aflaten van de voorspanning van het Lichtgewicht Beton (van de prisma's P1, P2 en van alle prisma's) en van het Normaal Beton.

E-modulusmeting	E'_{bt}
	[N/mm ²]
S1LBPT24u	16372
S2LBP1T22u	18135
S2LBP2T22u	15036
S3LBP1T24u	17866
S3LBP2T24u	17589
S4LBP1T20u	20149
S4LBP2T20u	15893
S5LBP1T20u	19876
S5LBP2T20u	15990
<i>gemiddeld LBP1</i>	<i>19007</i>
<i>gemiddeld LBP2</i>	<i>16127</i>
<i>gemiddeld LB</i>	<i>17434</i>
S6NBP1T21u	30994
S6NBP2T21u	23403
<i>gemiddeld NB</i>	<i>27199</i>

tabel B10.1 E-moduli tijdens het afdalen van de voorspanning

Bijlage 11: Berekening werkelijke doorsnede-grootheden op het moment van voorspannen

$$A_{bn} = A_b - n_{p,tot} * A_p$$

waarbij:

$$A_b = 127550 \text{ mm}^2$$

$$n_{p,tot} = 21$$

$$A_p = 100 \text{ mm}^2$$

Voor A_{bn} geldt dus:

$$A_{bn} = 125450 \text{ mm}^2$$

$$A_{bp} = A_b + (n - 1) * n_{p,tot} * A_p$$

waarbij:

$$n = \frac{E_p}{E'_{bt}(P1)}$$

$$E_p = 2 * 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$E'_{bt}(P1)$ = E-modulus prisma 1 (P1) op het moment van voorspannen (zie tabel 3.3)

Voor A_{bp} geldt dus:

$$A_{bp} = 127550 + (n - 1) * 21 * 100$$

$$S_{bn.o} = \sum(z_i * A_{b,i}) - \sum(z_i * A_p)$$

waarbij:

z_i = afstand van de zwaartelijns van een deel van de doorsnede tot de onderzijde van de doorsnede

$A_{b,i}$ = oppervlakte van een deel van de betondoorsnede

Voor $S_{bn.o}$ geldt dus:

$$\begin{aligned} S_{bn.o} &= 52,5 * 450 * 105 + 2 * 120 * \frac{1}{2} * 45 * 45 + 2 * 250 * 50 * 290 + 2 * 380 * \frac{1}{2} * 45 * 45 \\ &+ 447,5 * 450 * 105 - 6 * 41 * 100 - 5 * 64 * 100 - 2 * 395 * 100 - 4 * 436 * 100 - 4 * 459 * 100 \\ &= 31393900 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{bp.o} &= \sum(z_i * A_{b,i}) + \sum((n - 1) * z_i * A_p) \\ &= 52,5 * 450 * 105 + 2 * 120 * \frac{1}{2} * 45 * 45 + 2 * 250 * 50 * 290 + 2 * 380 * \frac{1}{2} * 45 * 45 \\ &+ 447,5 * 450 * 105 + 6 * (n - 1) * 41 * 100 + 5 * (n - 1) * 64 * 100 + 2 * (n - 1) * 395 * 100 \\ &+ 4 * (n - 1) * 436 * 100 + 4 * (n - 1) * 459 * 100 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_{bn} &= \frac{S_{bn.o}}{A_{bn}} \\ &= 250,3 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$z_{bp} = \frac{S_{bp.o}}{A_{bp}}$$

Bijlagen

$$I_{ybn} = \sum (I_{yb,i} + a^2 * A_{b,i}) - \sum (I_{yp} + a^2 * A_p)$$

waarbij:

$I_{yb,i}$ = AKOM van een deel van de betondoorsnede

a = afstand van de zwaartelij van een deel van de doorsnede tot de zwaartelij van de netto betondoorsnede

I_{yp} = AKOM van de doorsnede van één voerspanstreng

Voor I_{ybn} geldt dus:

$$\begin{aligned} I_{ybn} &= \frac{1}{12} * 450 * 105^3 + 197,8^2 * 450 * 105 + 2 * \frac{1}{36} * 45 * 45^3 + 2 * 130,3^2 * \frac{1}{2} * 45 * 45 \\ &+ 2 * \frac{1}{12} * 50 * 290^3 + 2 * 0,3^2 * 50 * 290 + 2 * \frac{1}{36} * 45 * 45^3 + 2 * 129,7^2 * \frac{1}{2} * 45 * 45 \\ &+ \frac{1}{12} * 450 * 105^3 + 197,2^2 * 450 * 105 - 21 * \frac{1}{64} * \pi * 12,9^4 - 6 * 209,3^2 * 100 - 5 * 186,3^2 * 100 \\ &- 2 * 144,7^2 * 100 - 4 * 185,7^2 * 100 - 4 * 208,7^2 * 100 \\ &= 3965996296 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$I_{ybp} = \sum (I_{yb,i} + a^2 * A_{b,i}) + \sum ((n-1) * (I_{yp} + a^2 * A_p))$$

waarbij:

a = afstand van de zwaartelij van een deel van de doorsnede tot de zwaartelij van de E-zware doorsnede

Voor I_{ybp} geldt dus:

$$\begin{aligned} I_{ybp} &= \frac{1}{12} * 450 * 105^3 + (z_{bp} - 52,5)^2 * 450 * 105 + 2 * \frac{1}{36} * 45 * 45^3 + 2 * (z_{bp} - 120)^2 * \frac{1}{2} * 45 * 45 \\ &+ 2 * \frac{1}{12} * 50 * 290^3 + 2 * (250 - z_{bp})^2 * 50 * 290 + 2 * \frac{1}{36} * 45 * 45^3 + 2 * (380 - z_{bp})^2 * \frac{1}{2} * 45 * 45 \\ &+ \frac{1}{12} * 450 * 105^3 + (447,5 - z_{bp})^2 * 450 * 105 + 21 * (n-1) * \frac{1}{64} * \pi * 12,9^4 \\ &+ 6 * (n-1) * (z_{bp} - 41)^2 * 100 + 5 * (n-1) * (z_{bp} - 64)^2 * 100 + 2 * (n-1) * (395 - z_{bp})^2 * 100 \\ &+ 4 * (n-1) * (436 - z_{bp})^2 * 100 + 4 * (n-1) * (459 - z_{bp})^2 * 100 \end{aligned}$$

$$W_{ybn.b} = \frac{I_{ybn}}{h - z_{bn}}$$

waarbij:

h = 500 mm

Voor $W_{ybn.b}$ geldt dus:

$$W_{ybn.b} = 15879884 \text{ mm}^3$$

$$W_{ybp.b} = \frac{I_{ybp}}{h - z_{bp}}$$

$$\begin{aligned} W_{ybn.o} &= \frac{I_{ybn}}{z_{bn}} \\ &= 15848118 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$W_{ybp.o} = \frac{I_{ybp}}{z_{bp}}$$

Bijlage 12: Berekening werkelijke aanvangsspanningen

B12.1 Krachten en spanningen vóór het aflaten

$$F_{po}(z) = \sigma_{po}(z) * A_p$$

waarbij:

$$\sigma_{po}(z_1) = \sigma_{po}(z_2) = \sigma_{po}(z_3) = 200 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{po}(z_4) = \sigma_{po}(z_5) = 1100 \text{ N/mm}^2$$

$$A_p = 100 \text{ mm}^2$$

Voor $F_{po}(z)$ geldt dus:

$$F_{po}(z_1) = F_{po}(z_2) = F_{po}(z_3) = 20000 \text{ N}$$

$$F_{po}(z_4) = F_{po}(z_5) = 110000 \text{ N}$$

$$F_{po.tot} = \sum(F_{po.i})$$

$$= n_p(z_1) * F_{po}(z_1) + n_p(z_2) * F_{po}(z_2) + n_p(z_3) * F_{po}(z_3) + n_p(z_4) * F_{po}(z_4) + n_p(z_5) * F_{po}(z_5)$$

waarbij:

$F_{po.i}$ = kracht in een voorspanstreng vóór het aflaten

$$n_p(z_1) = 4$$

$$n_p(z_2) = 4$$

$$n_p(z_3) = 2$$

$$n_p(z_4) = 5$$

$$n_p(z_5) = 6$$

Voor $F_{po.tot}$ geldt dus:

$$F_{po.tot} = 1410000 \text{ N}$$

$$z_{po.tot} = z_{bp} - \frac{\sum(F_{po.i} * z_i)}{F_{po.tot}}$$

waarbij:

z_i = afstand van de zwaartelij van een voorspanstreng tot de onderzijde van de doorsnede

Voor $z_{po.tot}$ geldt dus:

$$z_{po.tot} = z_{bp} - \frac{4 * 20000 * 459 + 4 * 20000 * 436 + 2 * 20000 * 395 + 5 * 110000 * 64 + 6 * 110000 * 41}{1410000}$$

B12.2 Aanvangskrachten en aanvangsspanningen

$$\sigma_{bi}(z) = \sigma_{bo}(z) - \frac{F_{po.tot}}{A_{bp}} - \frac{F_{po.tot} * z_{po.tot} * z}{I_{ybp}}$$

waarbij:

Bijlagen

$$\sigma_{bo}(z) = 0 \text{ N/mm}^2$$

Voor $\sigma_{bi}(z)$ geldt dus:

$$\sigma_{bi}(z) = -\frac{1410000}{A_{bp}} - \frac{1410000 * z_{po.tot} * z}{I_{ybp}}$$

$$\sigma_{pi}(z) = \sigma_{po}(z) + n * \sigma_{bi}(z)$$

waarbij:

$$\begin{aligned} \sigma_{po}(z) &= 200 \text{ N/mm}^2 \text{ voor } z = z_1, z_2 \text{ en } z_3 \\ &= 1100 \text{ N/mm}^2 \text{ voor } z = z_4 \text{ en } z_5 \end{aligned}$$

$$n = \frac{E_p}{E'_{bt}(P1)}$$

$$E_p = 2 * 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$E'_{bt}(P1)$ = E-modulus prisma 1 (P1) op het moment van voorspannen (zie tabel 3.3)

Voor $\sigma_{pi}(z)$ geldt dus:

$$\begin{aligned} \sigma_{pi}(z) &= 200 + n * \left(-\frac{1410000}{A_{bp}} - \frac{1410000 * z_{po.tot} * z}{I_{ybp}} \right) && \text{voor } z = z_1, z_2 \text{ en } z_3 \\ &= 1100 + n * \left(-\frac{1410000}{A_{bp}} - \frac{1410000 * z_{po.tot} * z}{I_{ybp}} \right) && \text{voor } z = z_4 \text{ en } z_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{pi}(z) &= \sigma_{pi}(z) * A_p \\ &= \left(200 + n * \left(-\frac{1410000}{A_{bp}} - \frac{1410000 * z_{po.tot} * z}{I_{ybp}} \right) \right) * 100 && \text{voor } z = z_1, z_2 \text{ en } z_3 \\ &= \left(1100 + n * \left(-\frac{1410000}{A_{bp}} - \frac{1410000 * z_{po.tot} * z}{I_{ybp}} \right) \right) * 100 && \text{voor } z = z_4 \text{ en } z_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{pi.tot} &= \sum (F_{pi.i}) \\ &= 4 * F_{pi}(z_1) + 4 * F_{pi}(z_2) + 2 * F_{pi}(z_3) + 5 * F_{pi}(z_4) + 6 * F_{pi}(z_5) \end{aligned}$$

waarbij:

$F_{pi.i}$ = aanvangskracht in een voorspanstreng

Bijlage 13: Bepaling E-modulus 28 dagen na de stort en tijdens de dwarskrachtproeven

B13.1 Algemeen

Zoals in paragraaf B10.1.1 al gezegd is, wordt de drukkracht op de prisma's opgevoerd tot de spanning in het beton ongeveer 40% van de gemiddelde kubusdruksterkte bedraagt.

De gemiddelde kubusdruksterkte van het Lichtgewicht Beton van de storten S1LB t/m S5LB bedraagt 28 dagen na de stort en tijdens de dwarskrachtproeven ongeveer 60 tot 65 N/mm². De drukkracht kan dus opgevoerd worden tot:

$$\left(\frac{60 + 65}{2}\right) * 100 * 100 * 0,40 = 250000 \text{ N}$$

De spanning in het beton bedraagt dan:

$$\left(\frac{60 + 65}{2}\right) * 0,40 = 25 \text{ N/mm}^2$$

De gemiddelde kubusdruksterkte van het Normaal Beton van stort S6NB bedraagt 28 dagen na de stort en dus tijdens de dwarskrachtproef 82,5 N/mm². De drukkracht kan dus opgevoerd worden tot:

$$82,5 * 100 * 100 * 0,40 = 330000 \text{ N}$$

De spanning in het beton bedraagt dan:

$$82,5 * 0,40 = 33 \text{ N/mm}^2$$

De E-modulusmeting S1LBP3T36d is mislukt. Tijdens de dwarskrachtproef S1LBB1VT36d is dus maar één E-modulusmeting gedaan: S1LBP4T36d. Tijdens de dwarskrachtproef S5LBB1VT191d konden geen E-modulusmetingen gedaan worden omdat de drukbank bezet was wegens TNO-kalibraties. Deze E-modulusmetingen zijn dan ook vier dagen later gedaan: S5LBP3T195d en S5LBP4T195d.

B13.2 Grafieken

B13.2.1 Algemeen

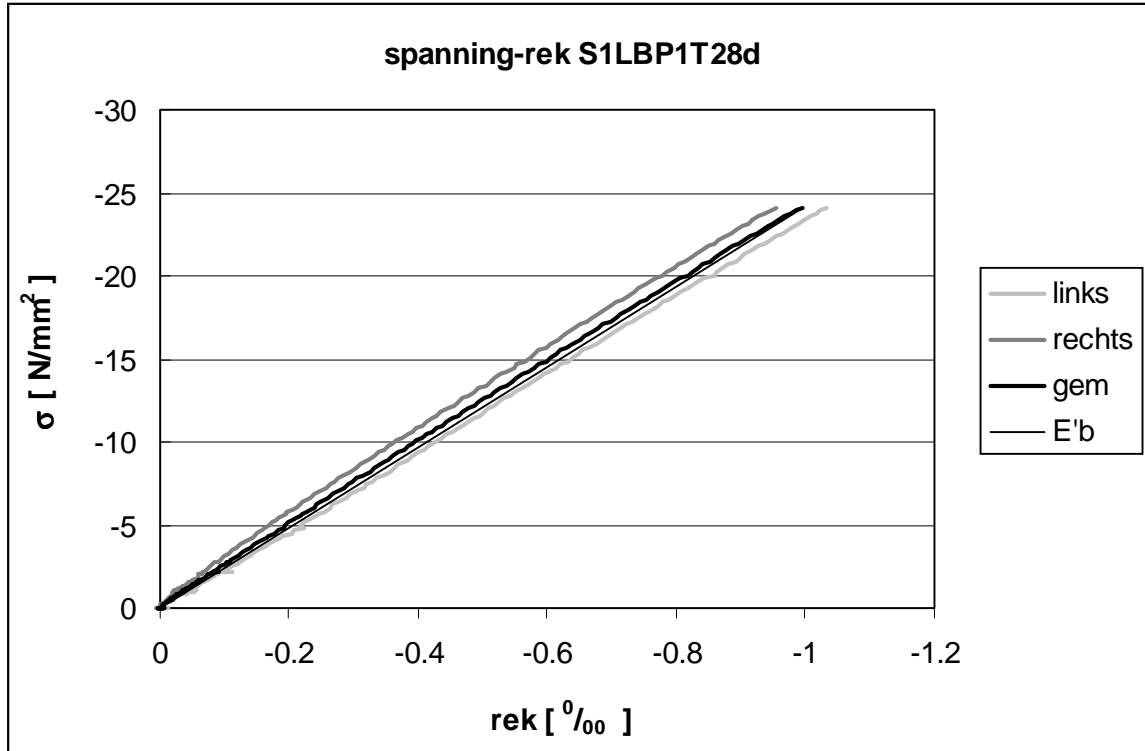
Grafiek B13.1 tot en met grafiek B13.21 tonen per E-modulusmeting de volgende grafieken:

- De spanning in het beton uitgezet tegen de rek aan het linker zijvlak
- De spanning in het beton uitgezet tegen de rek aan het rechter zijvlak
- De spanning in het beton uitgezet tegen de gemiddelde rek
- De richting van de hieruit bepaalde E-modulus, E'_b

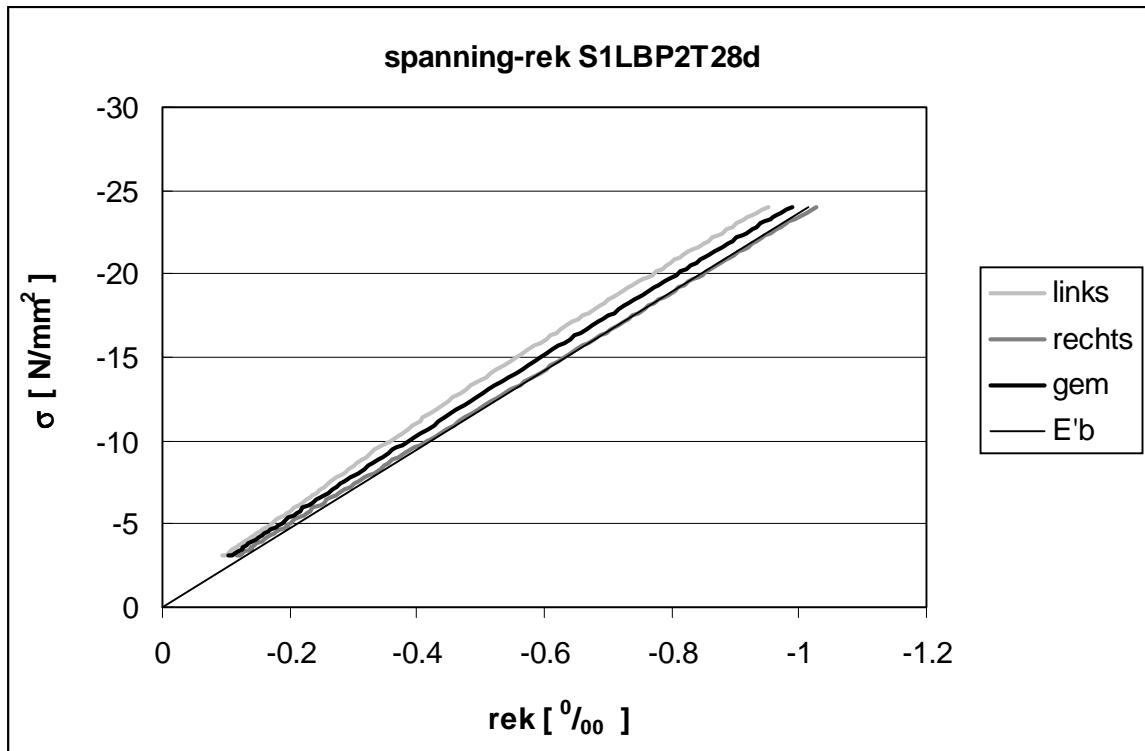
In de grafieken B13.1 tot en met B13.21 worden van de spanning-rek-grafieken alleen de trajecten getoond waarbij de spanning en de rekken geleidelijk oplopen. De niet getoonde trajecten lieten bv. zien dat het proefstuk zich in het begin van de meting nog moest zetten.

B13.2.2 E-modulus 28 dagen na de stort

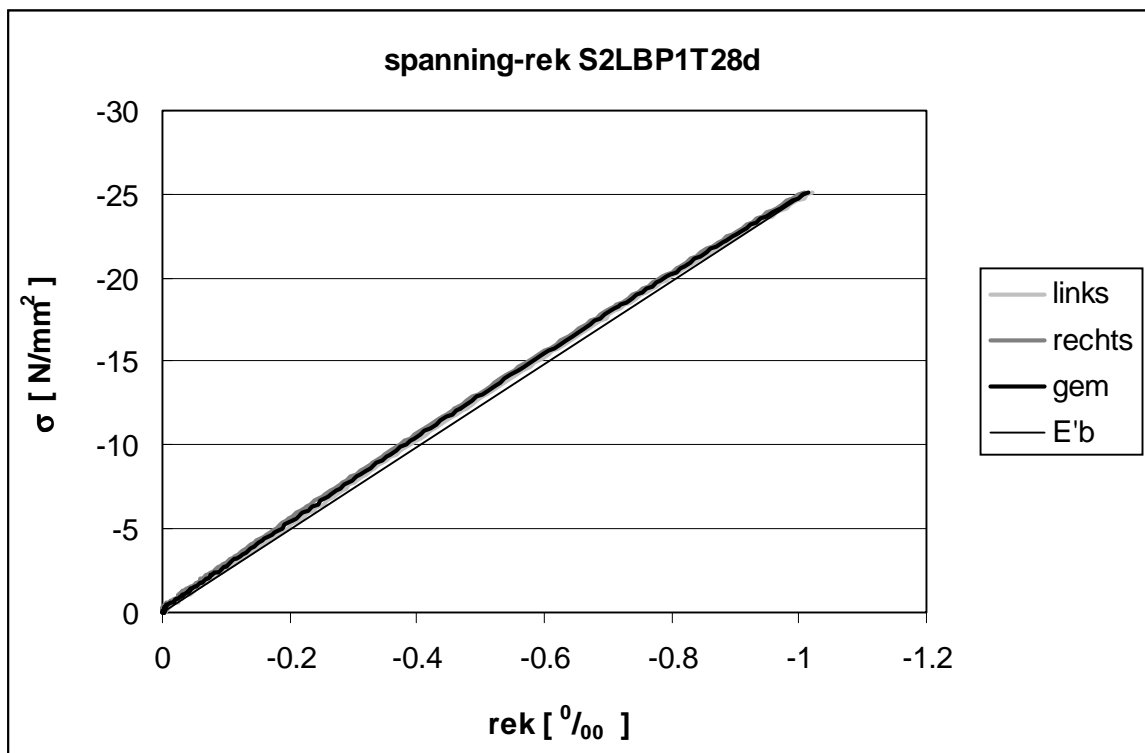
Grafiek B13.1 tot en met B13.12 tonen de resultaten van de E-modulusmetingen 28 dagen na de stort.



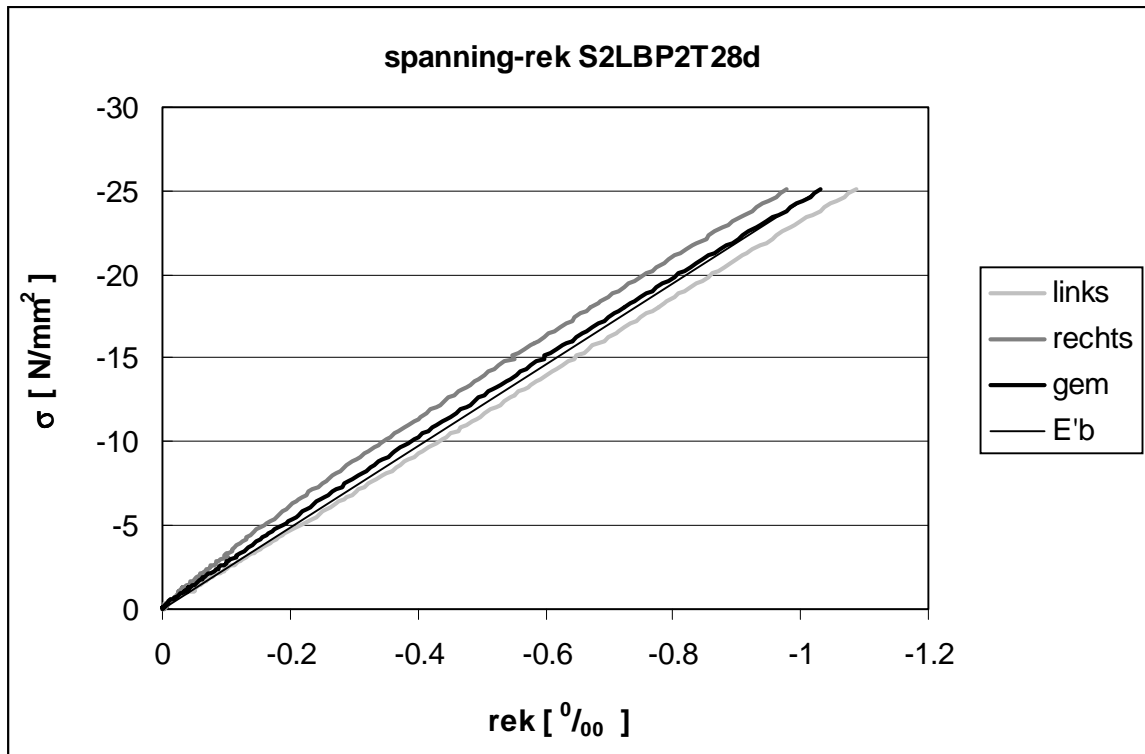
grafiek B13.1



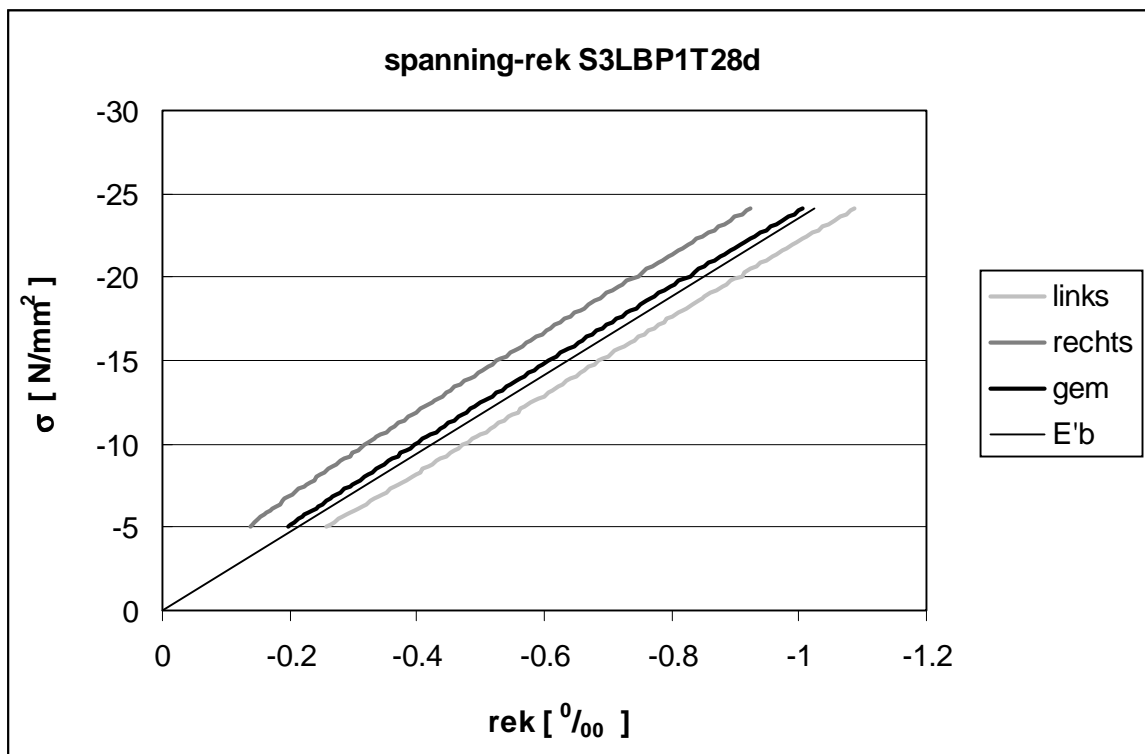
grafiek B13.2



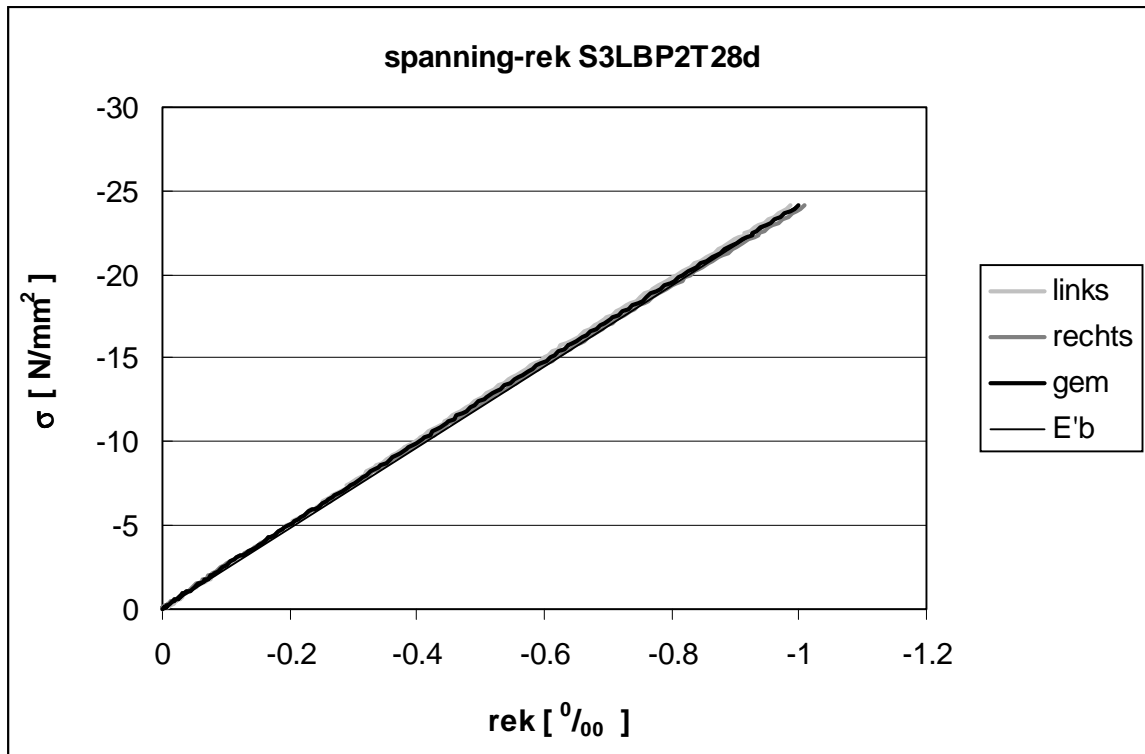
grafiek B13.3



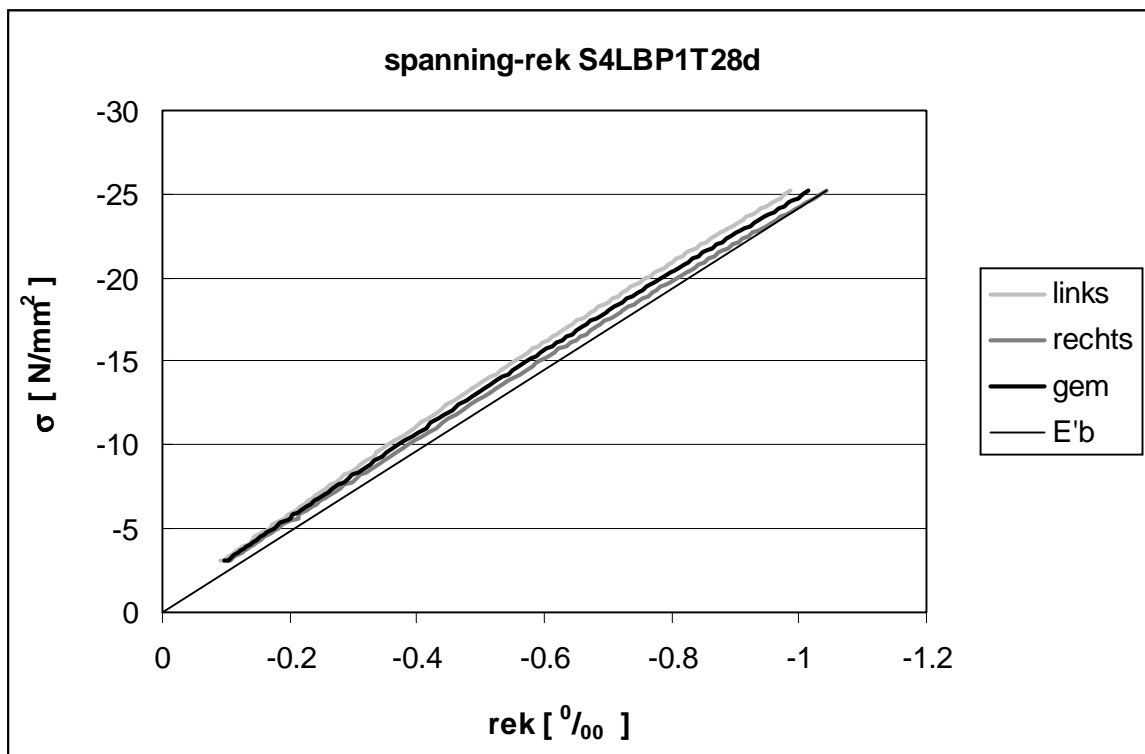
grafiek B13.4



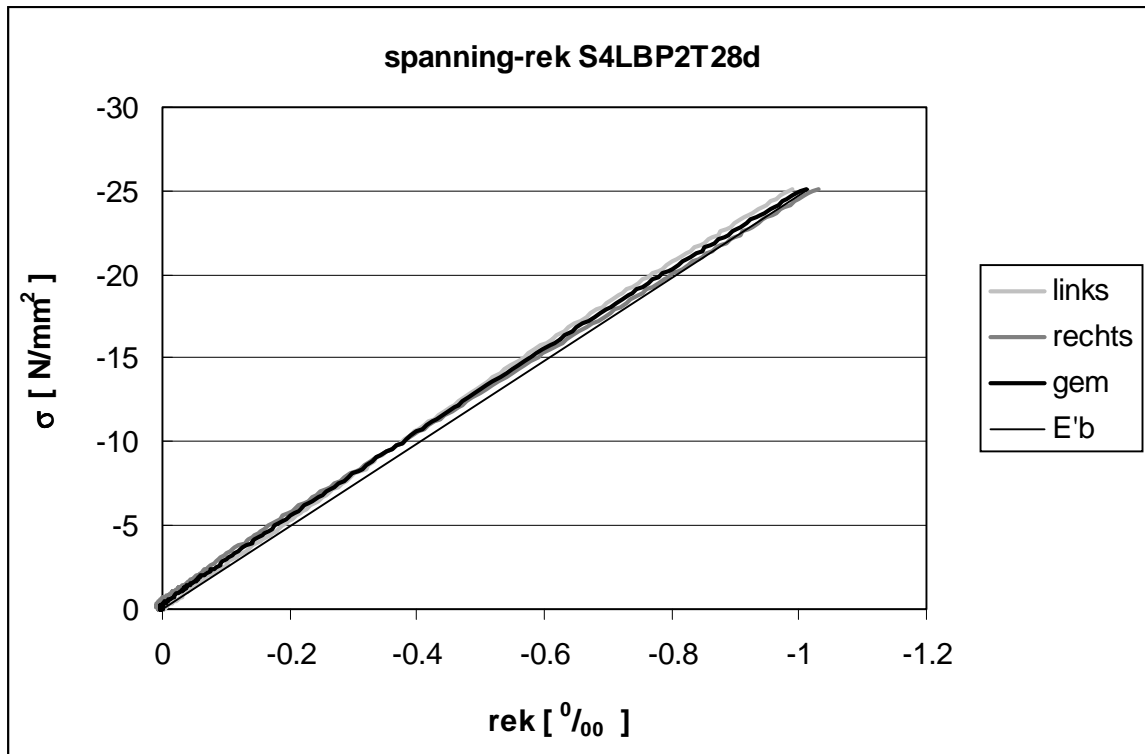
grafiek B13.5



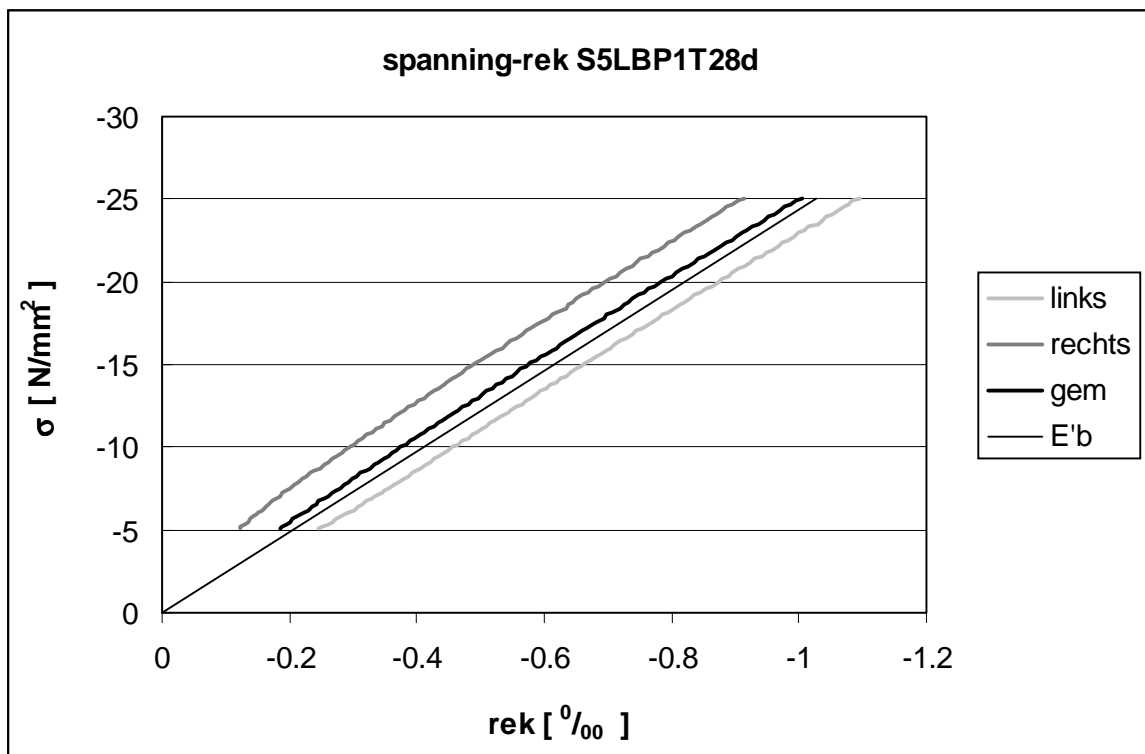
grafiek B13.6



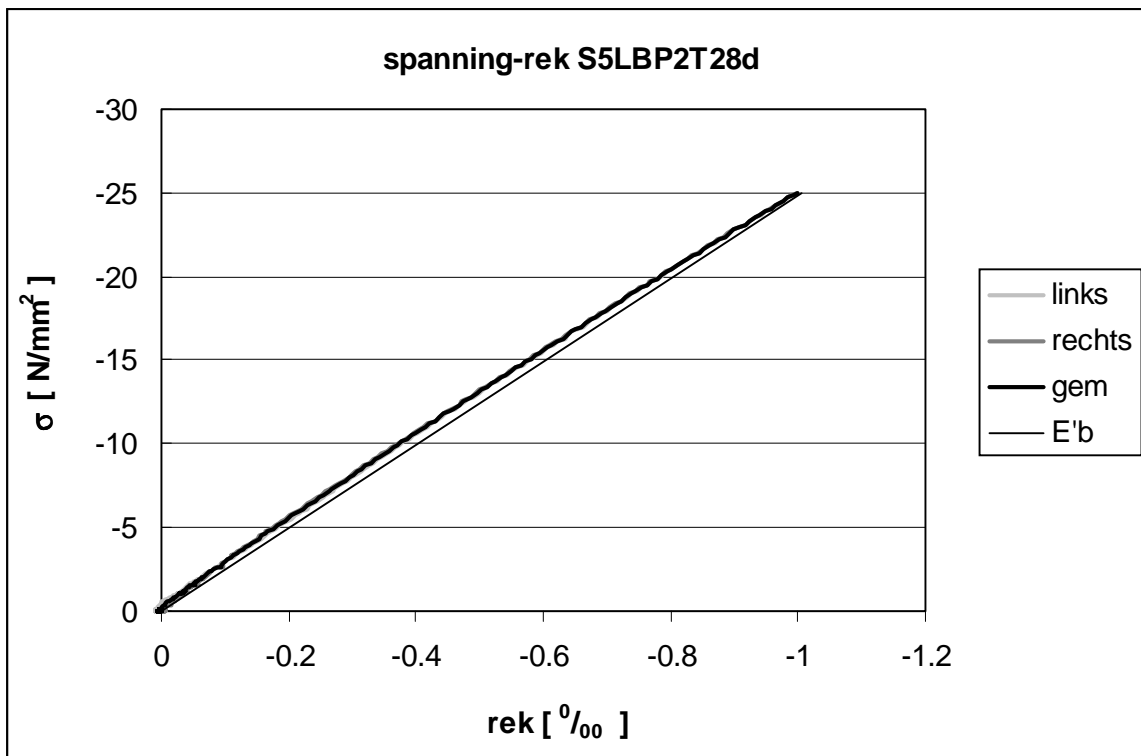
grafiek B13.7



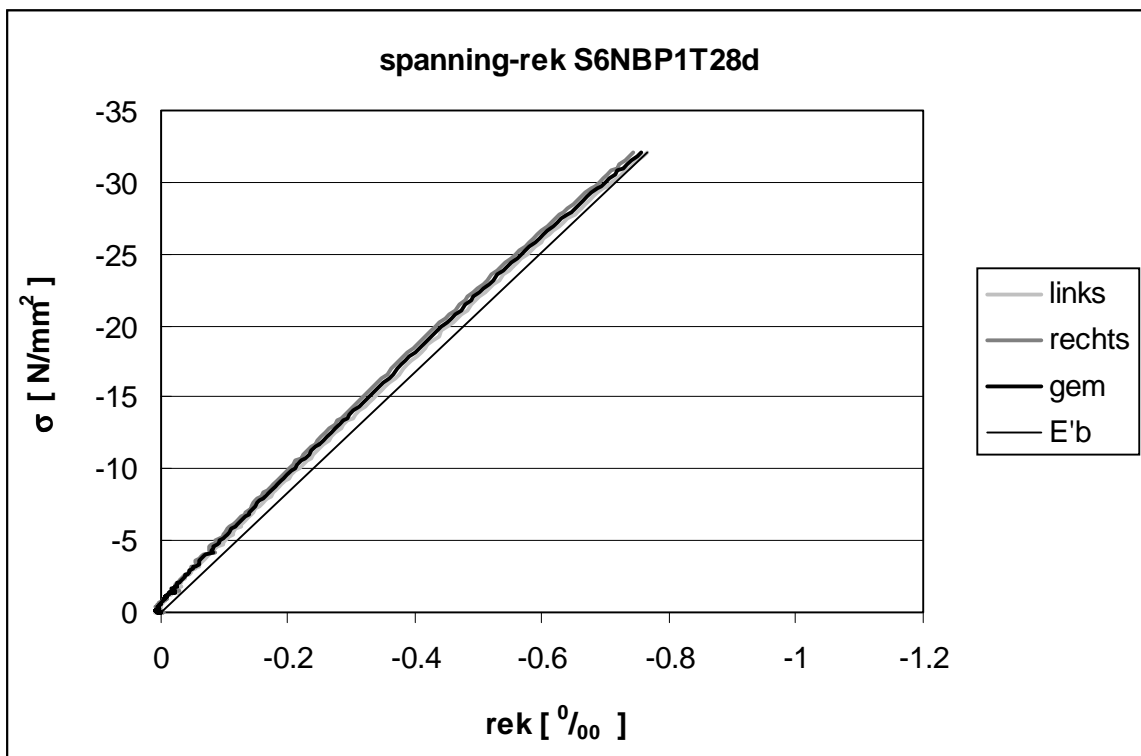
grafiek B13.8



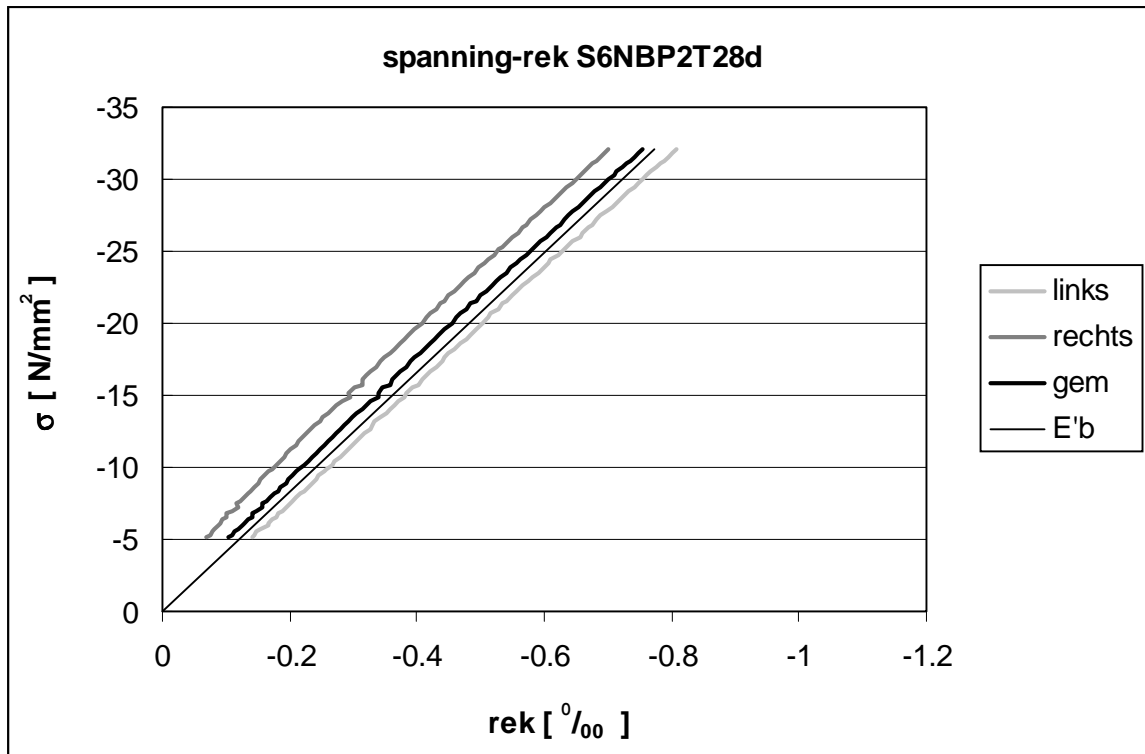
grafiek B13.9



grafiek B13.10



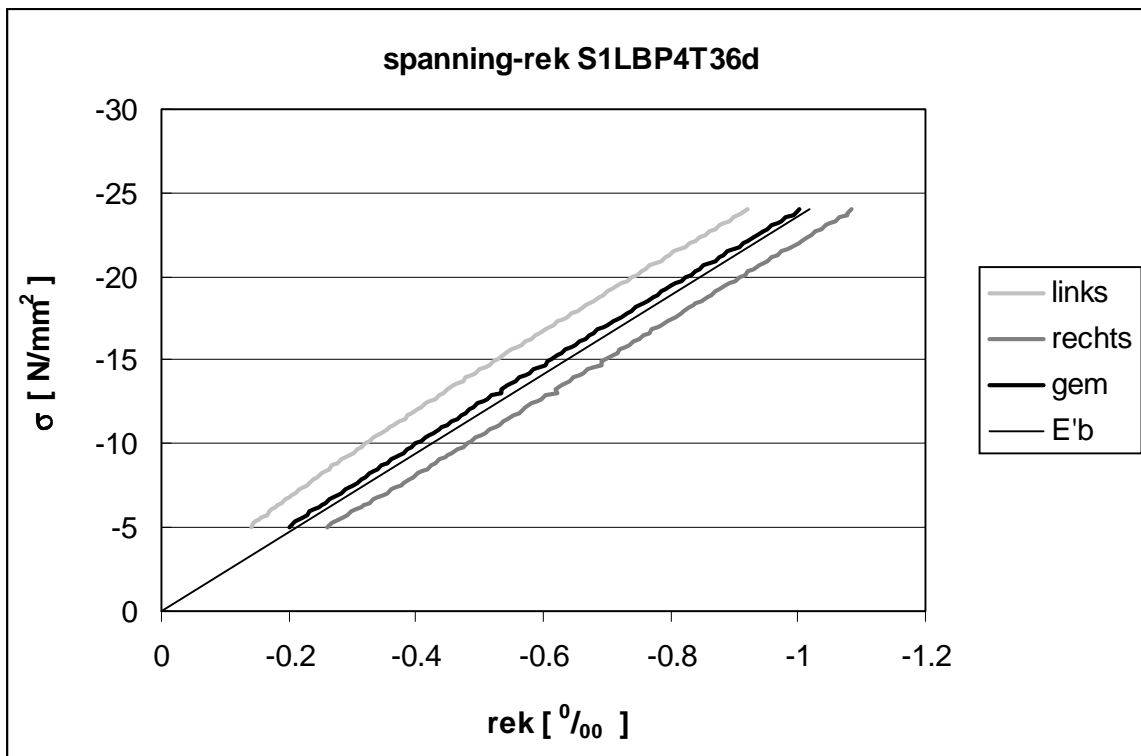
grafiek B13.11



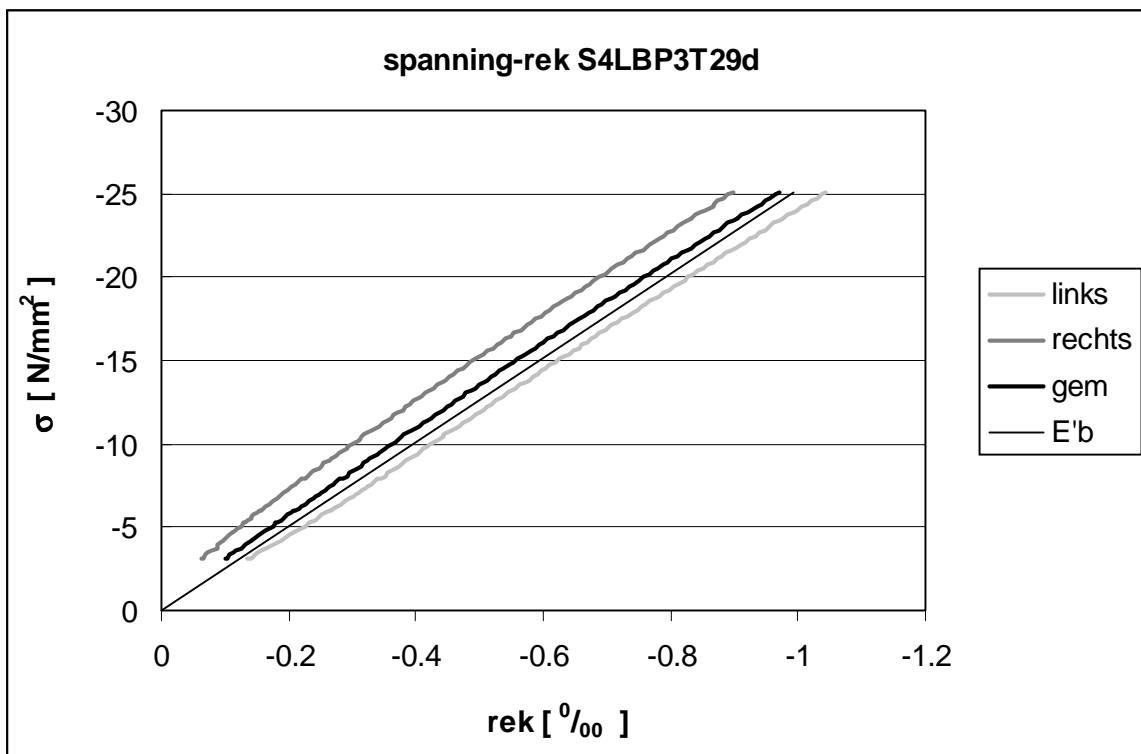
grafiek B13.12

B13.2.3 E-modulus tijdens de dwarskrachtproeven

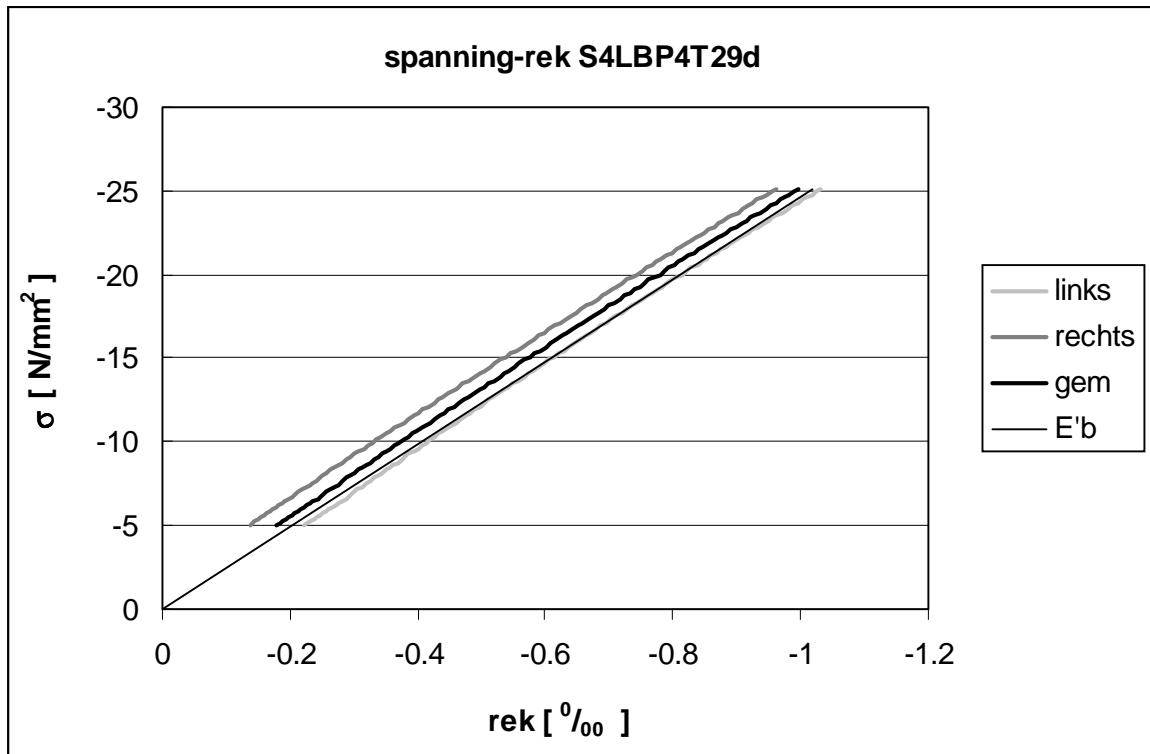
Grafiek B13.13 tot en met B13.21 tonen de resultaten van de E-modulusmetingen tijdens de dwarskrachtproeven.



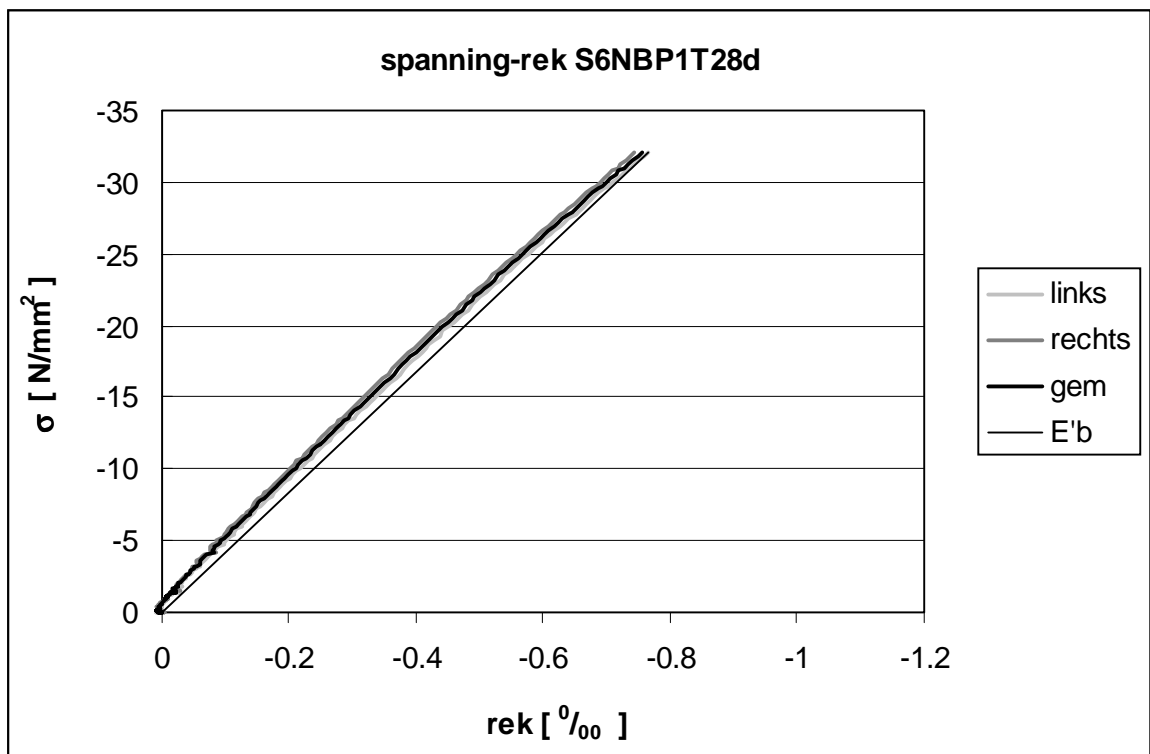
grafiek B13.13



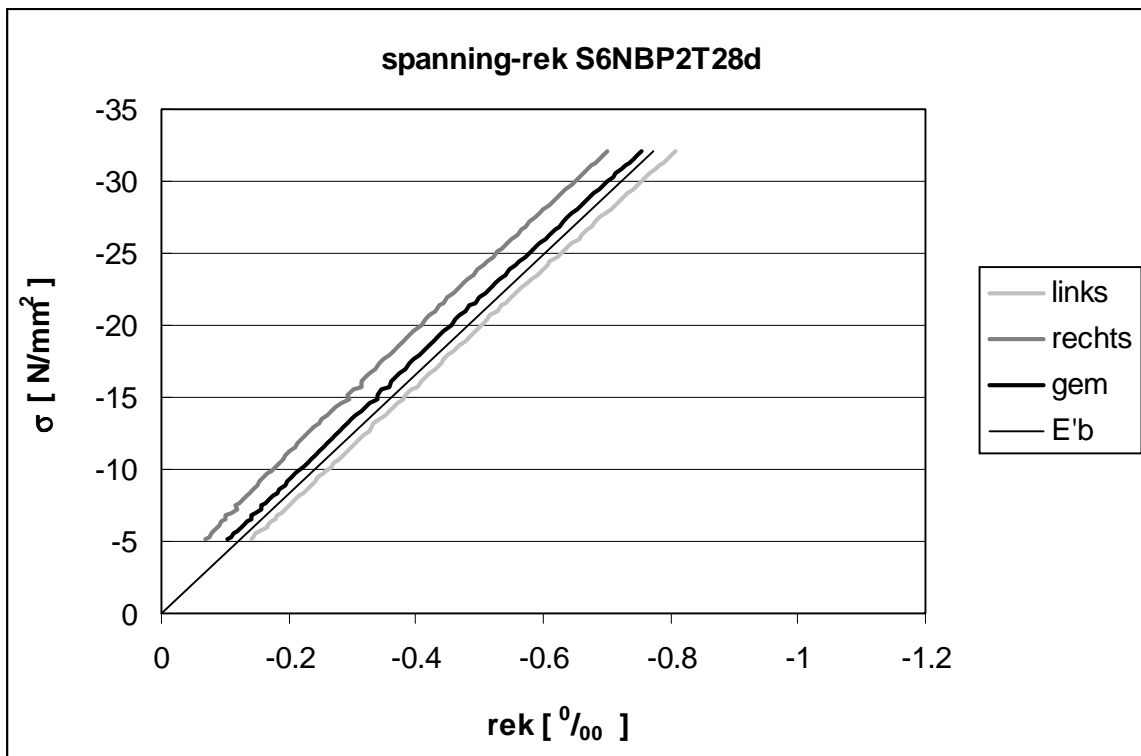
grafiek B13.14



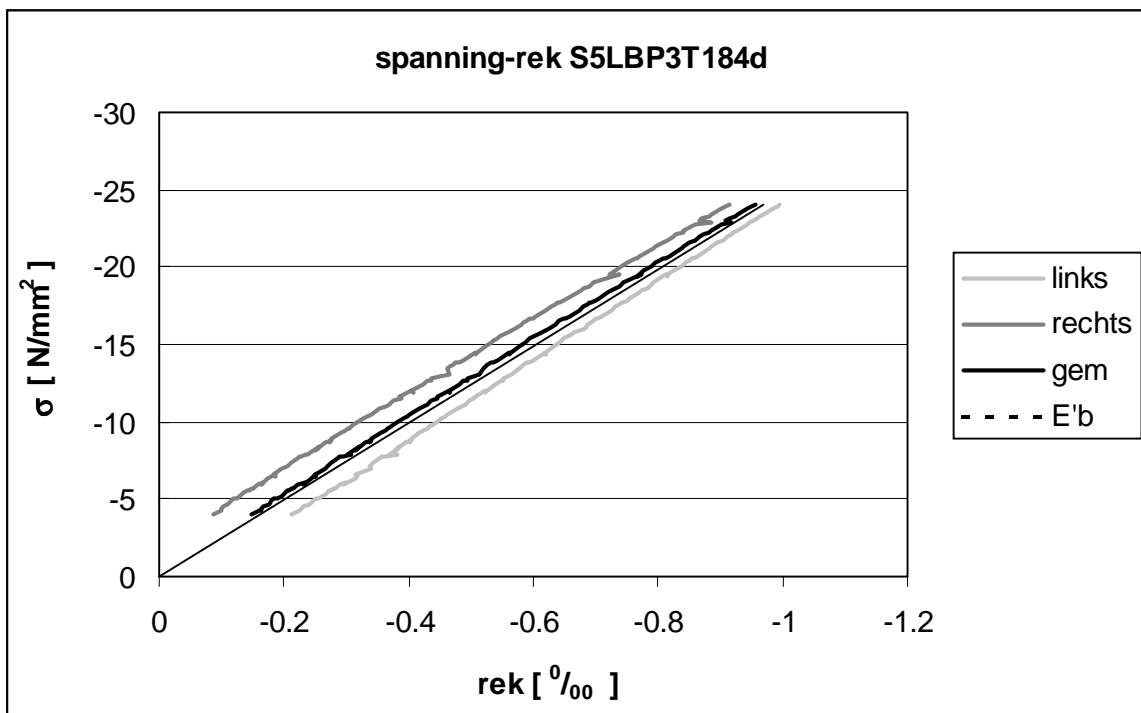
grafiek B13.15



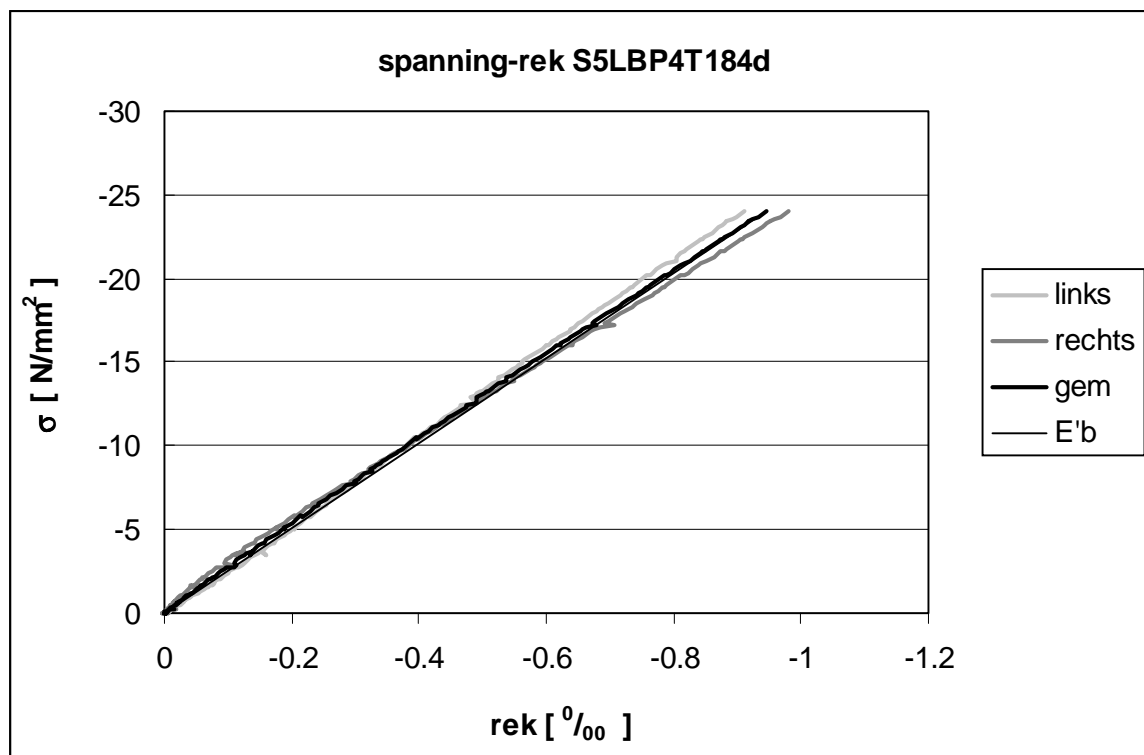
grafiek B13.16



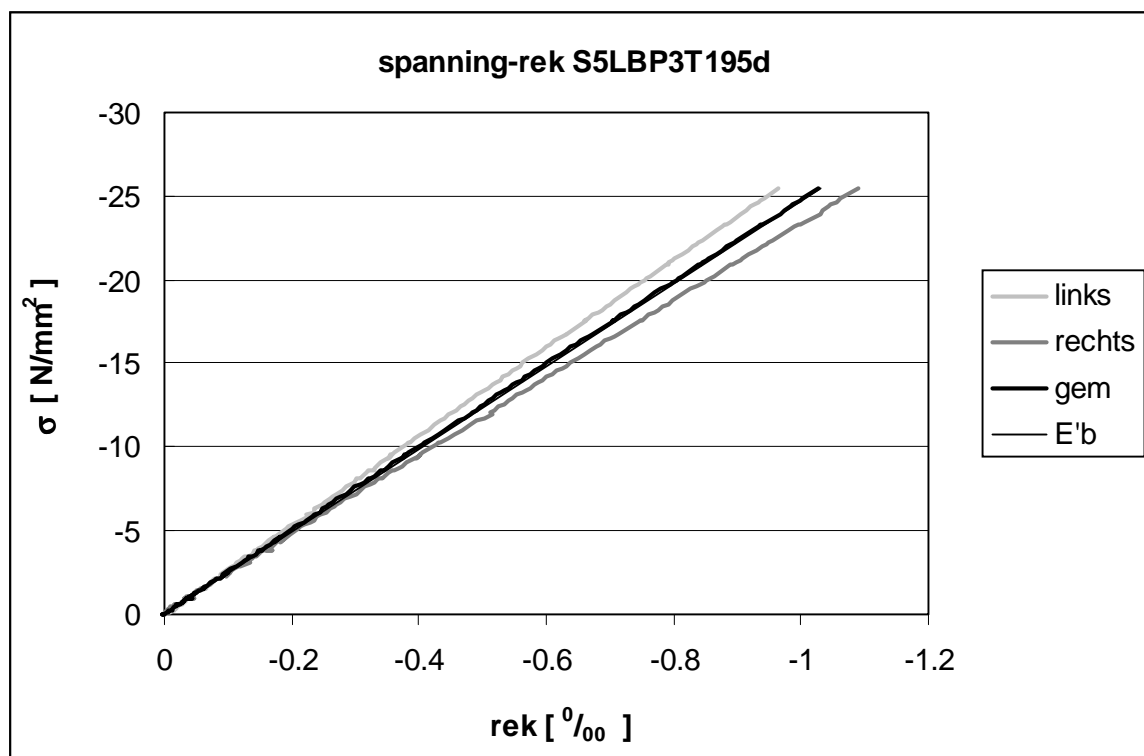
grafiek B13.17



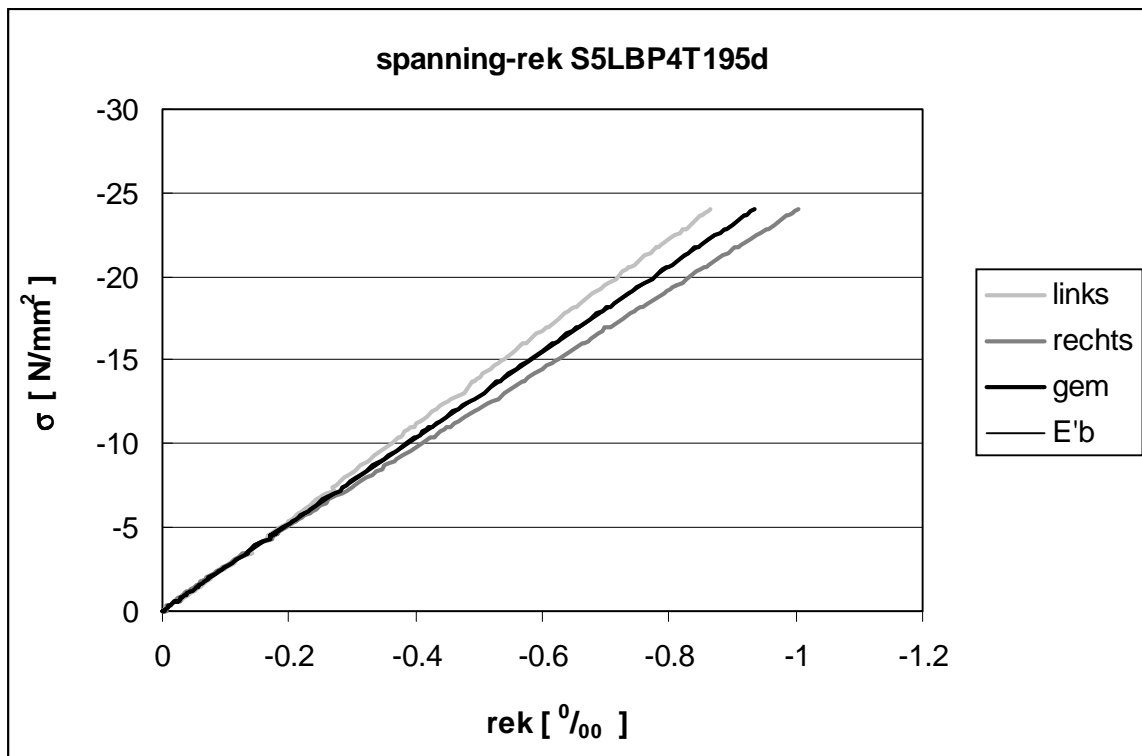
grafiek B13.18



grafiek B13.19



grafiek B13.20



grafiek B13.21

B13.3 E-modulus

B13.3.1 E-modulus 28 dagen na de stort

Tabel B13.1 toont per E-modulusmeting 28 dagen na een stort de bepaalde E-modulus, E'_b . Ook toont de tabel de gemiddelde E-modulus 28 dagen na een bepaalde stort, E'_{bm} .

E-modulusmeting	E'_b	E'_{bm}
	[N/mm ²]	[N/mm ²]
S1LBP1T28d	24235	23973
S1LBP2T28d	23711	
S2LBP1T28d	24823	24558
S2LBP2T28d	24292	
S3LBP1T28d	23552	23861
S3LBP2T28d	24170	
S4LBP1T28d	24107	24421
S4LBP2T28d	24734	
S5LBP1T28d	24384	24638
S5LBP2T28d	24891	
<i>gemiddeld LBT28d</i>		24290
S6NBP1T28d	41982	41695
S6NBP2T28d	41407	
<i>gemiddeld NBT28d</i>		41695

tabel B13.1 E-moduli 28 dagen na de stort

B13.3.2 E-modulus tijdens de dwarskrachtproeven

Tabel B13.2 toont per E-modulusmeting tijdens een dwarskrachtproef de bepaalde E-modulus, E'_b . Ook toont de tabel de gemiddelde E-modulus tijdens een bepaalde dwarskrachtproef, E'_{bm} .

E-modulusmeting	E'_b	E'_{bm}
	[N/mm ²]	[N/mm ²]
S1LBP4T36d	23562	23562
S4LBP3T29d	25286	24950
S4LBP4T29d	24613	
S6NBP1T28d	41982	41695
S6NBP2T28d	41407	
S5LBP3T184d	24828	25131
S5LBP4T184d	25433	
S5LBP3T195d	24727	25220
S5LBP4T195d	25713	

tabel B13.2 E-moduli tijdens de dwarskrachtproeven

Bijlage 14: Berekening werkelijke werkvoorspanning tijdens de dwarskrachtproeven

B14.1 Spanningsverschil in de voorspanwapening t.g.v. krimp en kruip in het beton

B14.1.1 Rek in het beton t.g.v. ongehinderde krimp en kruip

De rek in het beton t.g.v. krimp en kruip op de hoogten z_1 tot en met z_5 indien deze vervorming *ongehinderd* zou kunnen optreden, wordt gedefiniëerd als $\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_1)$ tot en met $\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_5)$. Voor deze $\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_1)$ tot en met $\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_5)$ geldt:

$$\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_1) = \frac{\sigma_{\text{bi}}(z_1)}{E'_{\text{bt}}(P1)} * \phi - \varepsilon'_r$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_2) = \frac{\sigma_{\text{bi}}(z_2)}{E'_{\text{bt}}(P1)} * \phi - \varepsilon'_r$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_3) = \frac{\sigma_{\text{bi}}(z_3)}{E'_{\text{bt}}(P1)} * \phi - \varepsilon'_r$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_4) = \frac{\sigma_{\text{bi}}(z_4)}{E'_{\text{bt}}(P1)} * \phi - \varepsilon'_r$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{bkr}}(z_5) = \frac{\sigma_{\text{bi}}(z_5)}{E'_{\text{bt}}(P1)} * \phi - \varepsilon'_r$$

waarbij:

$\sigma_{\text{bi}}(z)$ = aanvangsspanning in het beton op de hoogte z (zie tabel 3.5 t/m tabel 3.10)

$E'_{\text{bt}}(P1)$ = E-modulus prisma 1 (P1) op het moment van voorspannen (zie tabel 3.3)

ϕ = kruipcoëfficiënt volgens NEN 6720 en CUR Aanbeveling 39 (zie hierna)

ε'_r = specifieke krimpverkorting volgens NEN 6720 en CUR Aanbeveling 39 (zie hierna)

Voor ϕ geldt:

$$\phi = k_c * k_d * k_b * k_h * k_t (* k_4) \leq \phi_{\text{max}}$$

waarbij:

$$k_c = 2,6 \quad (RV = 0-60\%)$$

$$k_d = 1,7 \quad (t_c = 1 \text{ dag})$$

$$k_b = 0,7 \quad (f'_{\text{cm}} \approx 65 \text{ N/mm}^2)$$

$$= 0,6 \quad (f'_{\text{cm}} \geq 75 \text{ N/mm}^2)$$

$$k_h = 1,1 \quad (h_m = 83 \text{ mm; zie hierna})$$

$$k_t = \text{afhankelijk van } t$$

$$k_4 = 0,72 \quad (\text{factor voor Lichtgewicht Beton})$$

$$\phi_{\text{max}} = 2,2 \quad (f'_{\text{cm}} \approx 65 \text{ N/mm}^2)$$

$$= 1,9 \quad (f'_{\text{cm}} \geq 75 \text{ N/mm}^2)$$

Bijlagen

Voor ε'_r geldt:

$$\varepsilon'_r = \varepsilon'_c * k_b * k_h * k_p * k_t (* k_5) \leq \varepsilon'_{r \max}$$

waarbij:

$$\varepsilon'_c = 0,4 * 10^{-3} \text{ (RV = 0-60\%)}$$

$$k_b = 0,7 \text{ (} f'_{cm} \approx 65 \text{ N/mm}^2\text{)}$$

$$= 0,6 \text{ (} f'_{cm} \geq 75 \text{ N/mm}^2\text{)}$$

$$k_h = 1,1 \text{ (} h_m = 83 \text{ mm)}$$

$$k_p = 0,75 \text{ (}\omega_p = 1,67\%; \text{ zie hierna)}$$

$$k_t = \text{afhankelijk van } t_p$$

$$k_5 = 1,2 \text{ (factor voor Lichtgewicht Beton)}$$

$$\varepsilon'_{r \max} = 0,27 * 10^{-3} \text{ (} f'_{cm} \approx 65 \text{ N/mm}^2\text{)}$$

$$= 0,24 * 10^{-3} \text{ (} f'_{cm} \geq 75 \text{ N/mm}^2\text{)}$$

Voor het wapeningspercentage van het voorspanstaal, ω_p , geldt:

$$\omega_p = \frac{n_{p,\text{tot}} * A_p}{A_{bn}} * 100$$

waarbij:

$$n_{p,\text{tot}} = 21$$

$$A_p = 100 \text{ mm}^2$$

$$A_{bn} = 125450 \text{ mm}^2$$

Voor ω_p geldt dus:

$$\omega_p = 1,67\%$$

Voor de fictieve dikte van de betondoorsnede, h_m , geldt:

$$h_m = \frac{2 * A_b}{O_b}$$

waarbij:

$$A_b = 127550 \text{ mm}^2$$

$$O_b = \text{omtrek van de betondoorsnede}$$

$$= 2 * 500 + 2 * 450 + 2 * 200 + 2 * 260 + 4 * 45 * \sqrt{2}$$

$$= 3075 \text{ mm}$$

Voor h_m geldt dus:

$$h_m = 83 \text{ mm}$$

B14.1.2 Rek in het beton t.g.v. spanningsveranderingen in de voorspanwapening door compatibiliteit

In werkelijkheid zijn het beton en de voorspanwapening met elkaar verbonden. Vanwege de compatibiliteit zullen er in de voorspanwapening op de hoogten z_1 tot en met z_5 spanningsveranderingen optreden. Deze worden gedefiniëerd als $\Delta\sigma_{pkr}(z_1)$ tot en met $\Delta\sigma_{pkr}(z_5)$. De rek in het beton t.g.v. deze, geleidelijk ontstaande, spanningsveranderingen op de hoogten z_1 tot en met z_5 wordt gedefiniëerd als $\Delta\varepsilon_{bp}(z_1)$ tot en met $\Delta\varepsilon_{bp}(z_5)$. Voor deze $\Delta\varepsilon_{bp}(z_1)$ tot en met $\Delta\varepsilon_{bp}(z_5)$ geldt:

$$\Delta \varepsilon_{bp}(z_1) = - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1) * n_p(z_1) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1) * n_p(z_1) * A_p * (z_1)^2 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_2) * n_p(z_2) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_2) * n_p(z_2) * A_p * z_2 * z_1 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_3) * n_p(z_3) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_3) * n_p(z_3) * A_p * z_3 * z_1 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_4) * n_p(z_4) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_4) * n_p(z_4) * A_p * z_4 * z_1 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_5) * n_p(z_5) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_5) * n_p(z_5) * A_p * z_5 * z_1 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$\Delta \varepsilon_{bp}(z_2) = - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1) * n_p(z_1) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1) * n_p(z_1) * A_p * z_1 * z_2 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_2) * n_p(z_2) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_2) * n_p(z_2) * A_p * (z_2)^2 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_3) * n_p(z_3) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_3) * n_p(z_3) * A_p * z_3 * z_2 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_4) * n_p(z_4) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_4) * n_p(z_4) * A_p * z_4 * z_2 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_5) * n_p(z_5) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_5) * n_p(z_5) * A_p * z_5 * z_2 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$\Delta \varepsilon_{bp}(z_3) = - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1) * n_p(z_1) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1) * n_p(z_1) * A_p * z_1 * z_3 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_2) * n_p(z_2) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_2) * n_p(z_2) * A_p * z_2 * z_3 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_3) * n_p(z_3) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_3) * n_p(z_3) * A_p * (z_3)^2 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_4) * n_p(z_4) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_4) * n_p(z_4) * A_p * z_4 * z_3 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_5) * n_p(z_5) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_5) * n_p(z_5) * A_p * z_5 * z_3 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$\Delta \varepsilon_{bp}(z_4) = - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1) * n_p(z_1) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1) * n_p(z_1) * A_p * z_1 * z_4 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_2) * n_p(z_2) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_2) * n_p(z_2) * A_p * z_2 * z_4 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_3) * n_p(z_3) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_3) * n_p(z_3) * A_p * z_3 * z_4 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_4) * n_p(z_4) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_4) * n_p(z_4) * A_p * (z_4)^2 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_5) * n_p(z_5) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_5) * n_p(z_5) * A_p * z_5 * z_4 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$\Delta \varepsilon_{bp}(z_5) = - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1) * n_p(z_1) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1) * n_p(z_1) * A_p * z_1 * z_5 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_2) * n_p(z_2) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_2) * n_p(z_2) * A_p * z_2 * z_5 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_3) * n_p(z_3) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_3) * n_p(z_3) * A_p * z_3 * z_5 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_4) * n_p(z_4) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_4) * n_p(z_4) * A_p * z_4 * z_5 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

$$- \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_5) * n_p(z_5) * A_p * (1 + \rho * \phi)}{A_{bn} * E_{bm}} - \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_5) * n_p(z_5) * A_p * (z_5)^2 * (1 + \rho * \phi)}{I_{ybn} * E_{bm}}$$

waarbij:

$$n_p(z_1) = 4$$

$$n_p(z_2) = 4$$

$$n_p(z_3) = 2$$

$$n_p(z_4) = 5$$

$$n_p(z_5) = 6$$

$$\rho = 0,8$$

$$E'_{bm} = \text{gemiddelde E-modulus 28 dagen na de stort (zie tabel 4.6)}$$

B14.1.3 Rek in de voorspanwapening t.g.v. spanningsveranderingen

De rek in de voorspanwapening t.g.v. de spanningsveranderingen $\Delta \sigma_{pkr}(z_1)$ tot en met $\Delta \sigma_{pkr}(z_5)$ op de hoogten z_1 tot en met z_5 wordt gedefiniëerd als $\Delta \varepsilon_{pkr}(z_1)$ tot en met $\Delta \varepsilon_{pkr}(z_5)$. Voor deze $\Delta \varepsilon_{pkr}(z_1)$ tot en met $\Delta \varepsilon_{pkr}(z_5)$ geldt:

$$\Delta \varepsilon_{pkr}(z_1) = \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_1)}{E_p}$$

$$\Delta \varepsilon_{pkr}(z_2) = \frac{\Delta \sigma_{pkr}(z_2)}{E_p}$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_3) = \frac{\Delta \sigma_{\text{pkr}}(z_3)}{E_p}$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_4) = \frac{\Delta \sigma_{\text{pkr}}(z_4)}{E_p}$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_5) = \frac{\Delta \sigma_{\text{pkr}}(z_5)}{E_p}$$

waarbij:

$$E_p = 2 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$$

B14.1.4 Compatibiliteit

Het totale verschil in rek in het beton op een bepaalde hoogte z moet gelijk zijn aan het verschil in rek in de voorspanwapening op dezelfde hoogte z . Er geldt dus:

$$\Delta \varepsilon_{\text{bkr}}(z_1) + \Delta \varepsilon_{\text{bp}}(z_1) - \Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_1) = 0$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{bkr}}(z_2) + \Delta \varepsilon_{\text{bp}}(z_2) - \Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_2) = 0$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{bkr}}(z_3) + \Delta \varepsilon_{\text{bp}}(z_3) - \Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_3) = 0$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{bkr}}(z_4) + \Delta \varepsilon_{\text{bp}}(z_4) - \Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_4) = 0$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{bkr}}(z_5) + \Delta \varepsilon_{\text{bp}}(z_5) - \Delta \varepsilon_{\text{pkr}}(z_5) = 0$$

Er ontstaan dus vijf vergelijkingen met vijf onbekenden waaruit de waarden van $\Delta \sigma_{\text{pkr}}(z_1)$ tot en met $\Delta \sigma_{\text{pkr}}(z_5)$ berekend kunnen worden.

B14.2 Spanningsverschil in de voorspanwapening t.g.v. relaxatie van het voorspanstaal

Voor $\Delta \sigma_p(z)$ geldt:

$$\Delta \sigma_p(z) = n_t \cdot -\Delta \sigma_{\text{prel}}(z) \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{-\Delta \sigma_{\text{pkr}}(z)}{\sigma_{\text{pi}}(z)} \right)$$

waarbij:

$\Delta \sigma_{\text{prel}}(z)$ = relaxatie van het voorspanstaal na 1000 uur volgens NEN 6720 (zie tabel B14.1)

n_t = factor voor het aantal maal 1000 uur dat de ouderdom van het beton op het moment van beproeven (t_p) is
 ≤ 3

aanvangsspanning als percentage van f_{purep}	$\Delta\sigma_{prel}$ als percentage van de aanvangsspanning	
	draden en strengen	staven
< 30	0	0
60	1.5	1.5
70	2.5	4.0
80	4.5	7.0

tabel B14.1 $\Delta\sigma_{prel}$ als percentage van de aanvangsspanning

Voor tabel B14.1 geldt: bij aanvangsspanningen tussen 30% en 60% van f_{purep} mag rechtlijnig worden geïnterpoleerd tussen 0% en 1,5%.

B14.3 Werkvoorspanning in de voorspanwapening

Tabel B14.2 toont de waarden van ϕ , ε'_r en n_t .

grootheid	verm.fct.	S 1LBB 1VT 36d	S 4LBB 2VT 29d	S 6NBB 2VT 28d	S 5LBB 2VT 184d	S 5LBB 1VT 191d
ϕ		1.2	1.2	1.5	2.2	2.2
ε'_r	$\cdot 10^{-3}$	-0.14	-0.14	-0.10	-0.25	-0.25
n_t		1	1	1	3	3

tabel B14.2 Waarden van verschillende grootheden

De waarden van de verschillende relevante grootheden op verschillende hoogten in de doorsnede zijn te vinden in tabel B14.3 tot en met tabel B14.7. Ook de waarde van de werkvoorspanning in de voorspanwapening, σ_{pw} , op verschillende hoogten staat in deze tabellen.

S1LBB1VT36d									
z	z	σ_{pi}	σ_{bi}	$\Delta\sigma_{pkr}$	σ_{pi}/f_{purep}	$\Delta\sigma_{prel}/\sigma_{pi}$	$\Delta\sigma_{prel}$	$\Delta\sigma_p$	σ_{pw}
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
z_b	-249.7		0.88						
z_1	-208.7	190.49	-0.78	-35.98	10.2	0	0	0	154.51
z_2	-185.7	179.12	-1.71	-45.98	9.6	0	0	0	133.13
z_3	-144.7	158.85	-3.37	-63.81	8.5	0	0	0	95.04
z_4	186.3	895.21	-16.76	-207.73	48.1	0.91	8.11	-4.35	683.13
z_5	209.3	883.83	-17.70	-217.73	47.5	0.88	7.74	-3.93	662.18
z_0	250.3		-19.36						

tabel B14.3 Waarden van verschillende grootheden op verschillende hoogten in de doorsnede voor dwarskrachtproef S1LBB1VT36d

S4LBB2VT29d									
Z	Z	σ_{pi}	σ_{bi}	$\Delta\sigma_{pkr}$	σ_{pi}/f_{purep}	$\Delta\sigma_{prel}/\sigma_{pi}$	$\Delta\sigma_{prel}$	$\Delta\sigma_p$	σ_{pw}
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
Z _b	-249.7		0.98						
Z ₁	-208.7	192.54	-0.75	-33.39	10.4	0	0	0	159.15
Z ₂	-185.7	182.92	-1.72	-41.90	9.8	0	0	0	141.02
Z ₃	-144.7	165.78	-3.45	-57.04	8.9	0	0	0	108.74
Z ₄	186.3	927.35	-17.39	-179.30	49.9	0.99	9.21	-5.65	742.40
Z ₅	209.3	917.73	-18.36	-187.80	49.3	0.97	8.87	-5.24	724.69
Z ₀	250.3		-20.09						

tabel B14.4 Waarden van verschillende grootheden op verschillende hoogten in de doorsnede voor dwarskrachtproef S4LBB2VT29d

S6NBB2VT28d									
Z	Z	σ_{pi}	σ_{bi}	$\Delta\sigma_{pkr}$	σ_{pi}/f_{purep}	$\Delta\sigma_{prel}/\sigma_{pi}$	$\Delta\sigma_{prel}$	$\Delta\sigma_p$	σ_{pw}
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
Z _b	-249.7		1.14						
Z ₁	-208.7	195.50	-0.70	-25.53	10.5	0	0	0	169.96
Z ₂	-185.7	188.83	-1.73	-33.63	10.2	0	0	0	155.19
Z ₃	-144.7	176.94	-3.57	-48.09	9.5	0	0	0	128.85
Z ₄	186.3	980.97	-18.45	-164.71	52.7	1.14	11.15	-7.41	808.86
Z ₅	209.3	974.31	-19.48	-172.82	52.4	1.12	10.90	-7.04	794.45
Z ₀	250.3		-21.32						

tabel B14.5 Waarden van verschillende grootheden op verschillende hoogten in de doorsnede voor dwarskrachtproef S6NBB2VT28d

S5LBB2VT184d									
Z	Z	σ_{pi}	σ_{bi}	$\Delta\sigma_{pkr}$	σ_{pi}/f_{purep}	$\Delta\sigma_{prel}/\sigma_{pi}$	$\Delta\sigma_{prel}$	$\Delta\sigma_p$	σ_{pw}
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
Z _b	-249.7		0.97						
Z ₁	-208.7	192.42	-0.75	-57.77	10.3	0	0	0	134.65
Z ₂	-185.7	182.69	-1.72	-72.03	9.8	0	0	0	110.66
Z ₃	-144.7	165.35	-3.44	-97.44	8.9	0	0	0	67.91
Z ₄	186.3	925.36	-17.36	-302.60	49.8	0.99	9.14	-9.49	613.28
Z ₅	209.3	915.64	-18.32	-316.86	49.2	0.96	8.80	-8.13	590.65
Z ₀	250.3		-20.05						

tabel B14.6 Waarden van verschillende grootheden op verschillende hoogten in de doorsnede voor dwarskrachtproef S5LBB2VT184d

S5LBB1VT191d									
Z	Z	σ_{pi}	σ_{bi}	$\Delta\sigma_{pkr}$	σ_{pi}/f_{purep}	$\Delta\sigma_{prel}/\sigma_{pi}$	$\Delta\sigma_{prel}$	$\Delta\sigma_p$	σ_{pw}
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
z_b	-249.7		0.97						
z_1	-208.7	192.42	-0.75	-57.77	10.3	0	0	0	134.65
z_2	-185.7	182.69	-1.72	-72.03	9.8	0	0	0	110.66
z_3	-144.7	165.35	-3.44	-97.44	8.9	0	0	0	67.91
z_4	186.3	925.36	-17.36	-302.60	49.8	0.99	9.14	-9.49	613.28
z_5	209.3	915.64	-18.32	-316.86	49.2	0.96	8.80	-8.13	590.65
z_0	250.3		-20.05						

tabel B14.7 Waarden van verschillende grootheden op verschillende hoogten in de doorsnede voor dwarskrachtproef S5LBB1VT191d

B14.4 Werkvoorspanning in het beton

Voor $\sigma_{bw}(z)$ geldt:

$$\sigma_{bw}(z) = -\frac{F_{pw.tot}}{A_{bn}} - \frac{F_{pw.tot} * z_{pw.tot} * z}{I_{ybn}}$$

waarbij:

$F_{pw.tot}$ = totale werkvoorspankracht in de voorspanstrengen samen; zie hierna

$z_{pw.tot}$ = afstand van het zwaartepunt van $F_{pw.tot}$ tot de zwaartelij van de netto betondoorsnede; zie hierna

Voor $F_{pw.tot}$ geldt:

$$F_{pw.tot} = \sum(F_{pw.i}) \\ = 4 * F_{pw}(z_1) + 4 * F_{pw}(z_2) + 2 * F_{pw}(z_3) + 5 * F_{pw}(z_4) + 6 * F_{pw}(z_5)$$

waarbij:

$F_{pw.i}$ = werkvoorspankracht in een voorspanstreng

$F_{pw}(z)$ = werkvoorspankracht per voorspanstreng op de hoogte z
 $= \sigma_{pw}(z) * A_p$

Voor $z_{pw.tot}$ geldt:

$$z_{pw.tot} = z_{bn} - \frac{\sum(F_{pw.i} * z_i)}{F_{pw.tot}} \\ = 250,3 - \frac{4 * F_{pw}(z_1) * 459 + 4 * F_{pw}(z_2) * 436 + 2 * F_{pw}(z_3) * 395 + 5 * F_{pw}(z_4) * 64 + 6 * F_{pw}(z_5) * 41}{F_{pw.tot}}$$

waarbij:

z_i = afstand van de zwaartelij van een voorspanstreng tot de onderzijde van de doorsnede

De waarden van de verschillende krachten en spanningen op verschillende hoogten in de doorsnede zijn te vinden in tabel B14.8 tot en met tabel B14.12. Ook tonen deze tabellen de waarde van $z_{pw.tot}$.

S1LBB1VT36d					
z	z	n_p	σ_{pw}	F_{pw}	σ_{bw}
[-]	[mm]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]
z_b	-249.7				0.68
z_1	-208.7	4	154.51	15.5	-0.58
z_2	-185.7	4	133.13	13.3	-1.28
z_3	-144.7	2	95.04	9.5	-2.53
z_4	186.3	5	683.13	68.3	-12.65
z_5	209.3	6	662.18	66.2	-13.36
z_o	250.3				-14.61
totaal				872.9	
$z_{pw.tot}$	138.9				

tabel B14.8 Werkelijke werkvoorspanningen en werkvoorspankrachten op verschillende hoogten in de doorsnede tijdens dwarskrachtproef S1LBB1VT36d

S4LBB2VT29d					
z	z	n_p	σ_{pw}	F_{pw}	σ_{bw}
[-]	[mm]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]
z_b	-249.7				0.83
z_1	-208.7	4	159.15	15.9	-0.54
z_2	-185.7	4	141.02	14.1	-1.32
z_3	-144.7	2	108.74	10.9	-2.69
z_4	186.3	5	742.40	74.2	-13.81
z_5	209.3	6	724.69	72.5	-14.59
z_o	250.3				-15.97
totaal				947.8	
$z_{pw.tot}$	140.6				

tabel B14.9 Werkelijke werkvoorspanningen en werkvoorspankrachten op verschillende hoogten in de doorsnede tijdens dwarskrachtproef S4LBB2VT29d

S6NBB2VT28d					
z	z	n_p	σ_{pw}	F_{pw}	σ_{bw}
[-]	[mm]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]
z_b	-249.7				0.91
z_1	-208.7	4	169.96	17.0	-0.60
z_2	-185.7	4	155.19	15.5	-1.45
z_3	-144.7	2	128.85	12.9	-2.95
z_4	186.3	5	808.86	80.9	-15.11
z_5	209.3	6	794.45	79.4	-15.95
z_o	250.3				-17.46
totaal				1036.9	
$Z_{pw.tot}$	140.5				

tabel B14.10 Werkelijke werkvoorspanningen en werkvoorspankrachten op verschillende hoogten in de doorsnede tijdens dwarskrachtproef S6NBB2VT28d

S5LBB2VT184d					
z	z	n_p	σ_{pw}	F_{pw}	σ_{bw}
[-]	[mm]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]
z_b	-249.7				0.76
z_1	-208.7	4	134.65	13.5	-0.38
z_2	-185.7	4	110.66	11.1	-1.02
z_3	-144.7	2	67.91	6.8	-2.15
z_4	186.3	5	613.28	61.3	-11.32
z_5	209.3	6	590.65	59.1	-11.96
z_o	250.3				-13.09
totaal				772.7	
$Z_{pw.tot}$	142.2				

tabel B14.11 Werkelijke werkvoorspanningen en werkvoorspankrachten op verschillende hoogten in de doorsnede tijdens dwarskrachtproef S5LBB2VT184d

S5LBB1VT191d					
z	z	n_p	σ_{pw}	F_{pw}	σ_{bw}
[-]	[mm]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]
z_b	-249.7				0.76
z_1	-208.7	4	134.65	13.5	-0.38
z_2	-185.7	4	110.66	11.1	-1.02
z_3	-144.7	2	67.91	6.8	-2.15
z_4	186.3	5	613.28	61.3	-11.32
z_5	209.3	6	590.65	59.1	-11.96
z_o	250.3				-13.09
totaal				772.7	
$z_{pw.tot}$	142.2				

tabel B14.12 Werkelijke werkvoorspanningen en werkvoorspankrachten op verschillende hoogten in de doorsnede tijdens dwarskrachtproef S5LBB1VT191d

Bijlage 15: Theoretische hoofdtrekspanningen in een aantal punten tijdens de dwarskrachtproeven

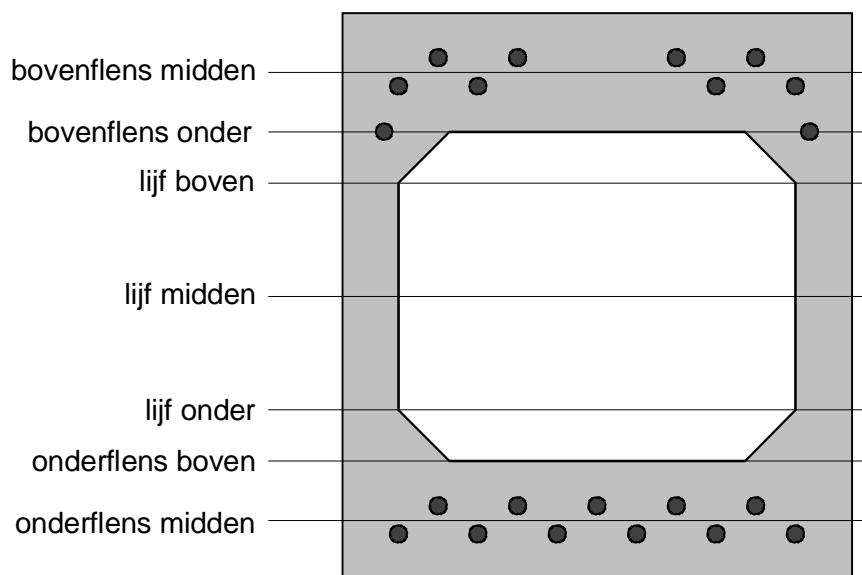
B15.1 Punten waarin de theoretische hoofdtrekspanningen berekend worden

Voor de berekening van de theoretische hoofdtrekspanningen tijdens de dwarskrachtproeven zijn de volgende punten van de balk van belang:

(Zie figuur 4.17) Van belang zijn de doorsnede bij oplegging 1 en de doorsnede bij het aangrijppunt van de vijzelkracht. Tussen deze doorsneden blijven, op een bepaalde hoogte z , σ_{bw} en τ_y constant. Het deel van σ_x t.g.v. de vijzelkracht F_S loopt geleidelijk op. Niet van belang is de doorsnede bij oplegging 2 omdat τ_y in het gebied a_2 kleiner is dan in het gebied a_1 . De waarden van σ_{bw} en van het deel van σ_x t.g.v. de vijzelkracht F_S veranderen in het gebied a_2 niet t.o.v. de waarden in het gebied a_1 .

Er wordt aangenomen dat de dwarskracht en de schuifspanningen τ_y op een bepaalde hoogte z in het hele gebied a_1 constant zijn; dus direct vanaf oplegging 1 en tot aan het aangrijppunt van de vijzelkracht. In werkelijkheid is dit niet het geval. Bovendien treden in werkelijkheid plaatselijke drukspanningen op bij de oplegvlakken bij oplegging 1 en bij het aangrijppunt van de vijzelkracht. Deze plaatselijke drukspanningen zorgen ervoor dat de hoofdtrekspanningen in werkelijkheid kleiner zijn dan volgens de berekeningen. Dit is verder niet van belang omdat later zal blijken dat de hoofdtrekspanningen in deze punten niet maatgevend zijn.

Figuur B15.1 toont welke punten in de doorsnede bij oplegging 1 en bij het aangrijppunt van de vijzelkracht van belang zijn.



figuur B15.1

B15.2 Grafieken

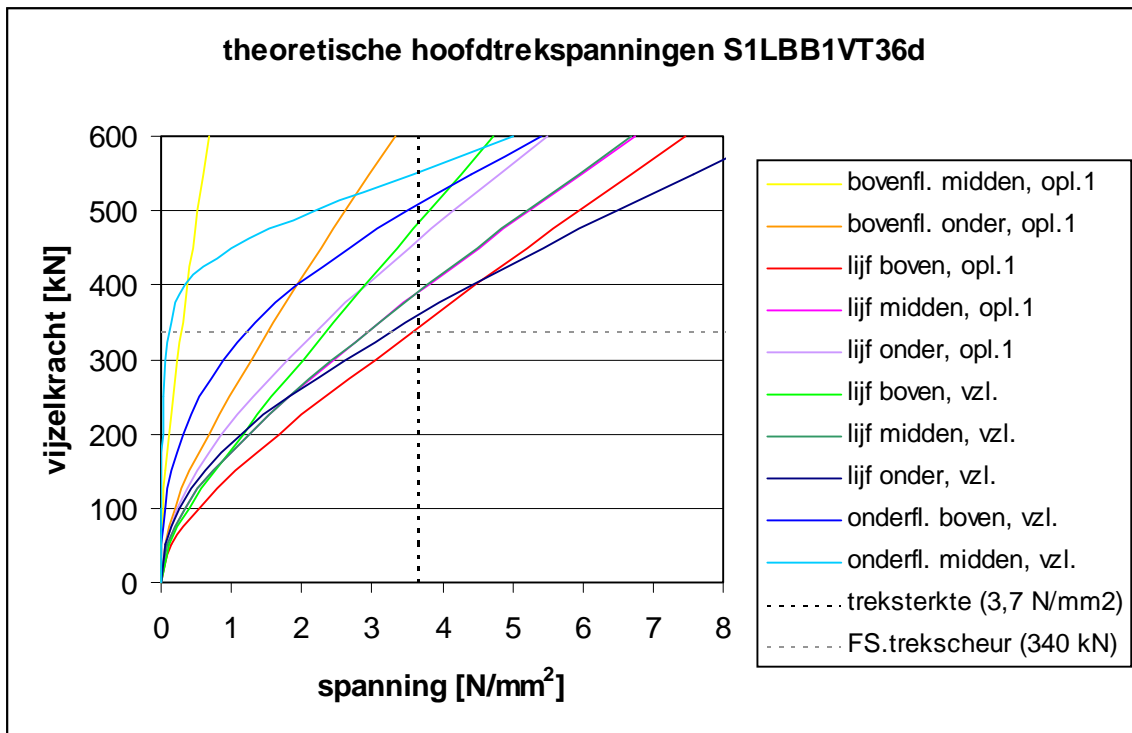
In deze paragraaf zijn per dwarskrachtproef te zien:

- De theoretische hoofdtrekspanningen in de in paragraaf B15.1 genoemde punten van de balk.

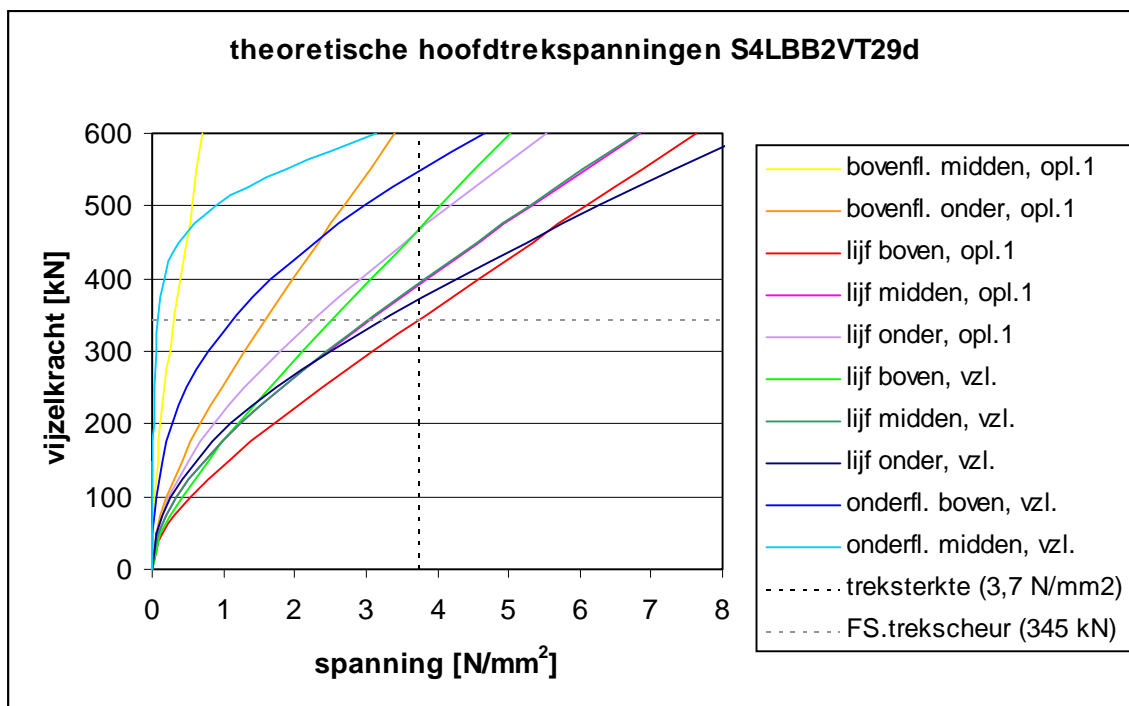
Hierbij betekent 'opl.1': in de doorsnede bij oplegging 1 en betekent 'vzl.': in de doorsnede bij het aangrijppunt van de vijzelkracht.

Bovendien is in de grafieken weergegeven:

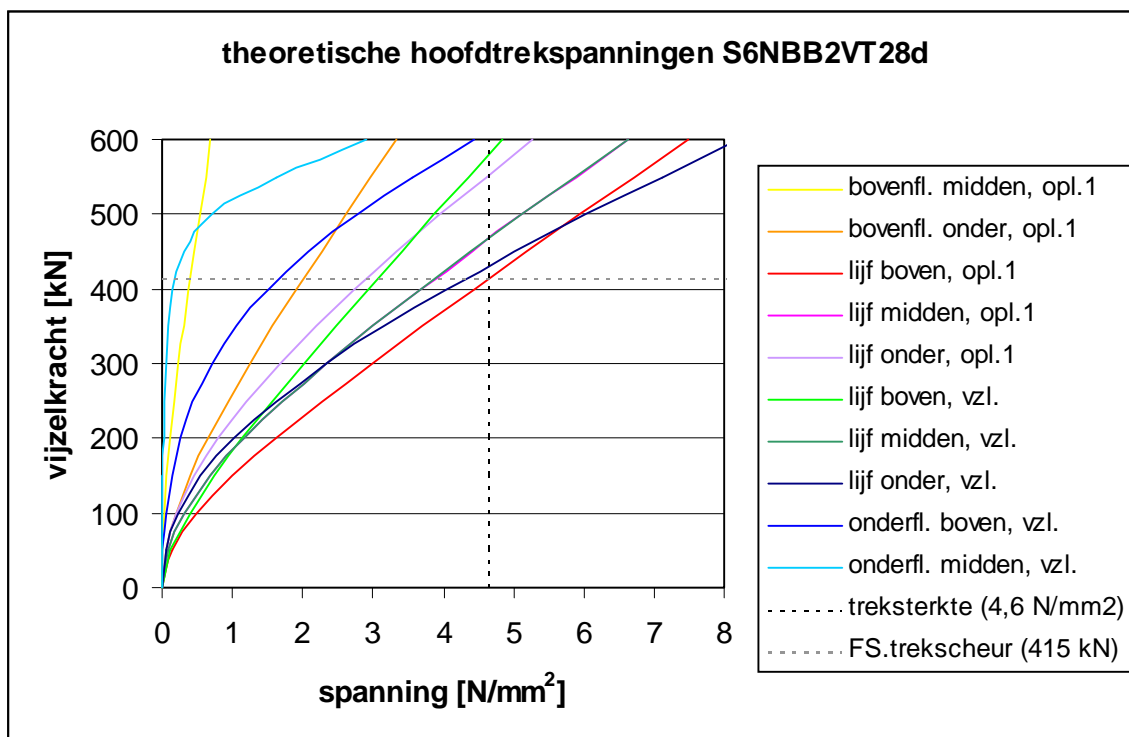
- De gemiddelde treksterkte korte duur van het beton, $f_{cm}(*k_1)$ (zie tabel 4.5)
- De vijzelkracht waarbij theoretisch de eerste trekscheuren ontstaan, $F_{S,trekscheur}$



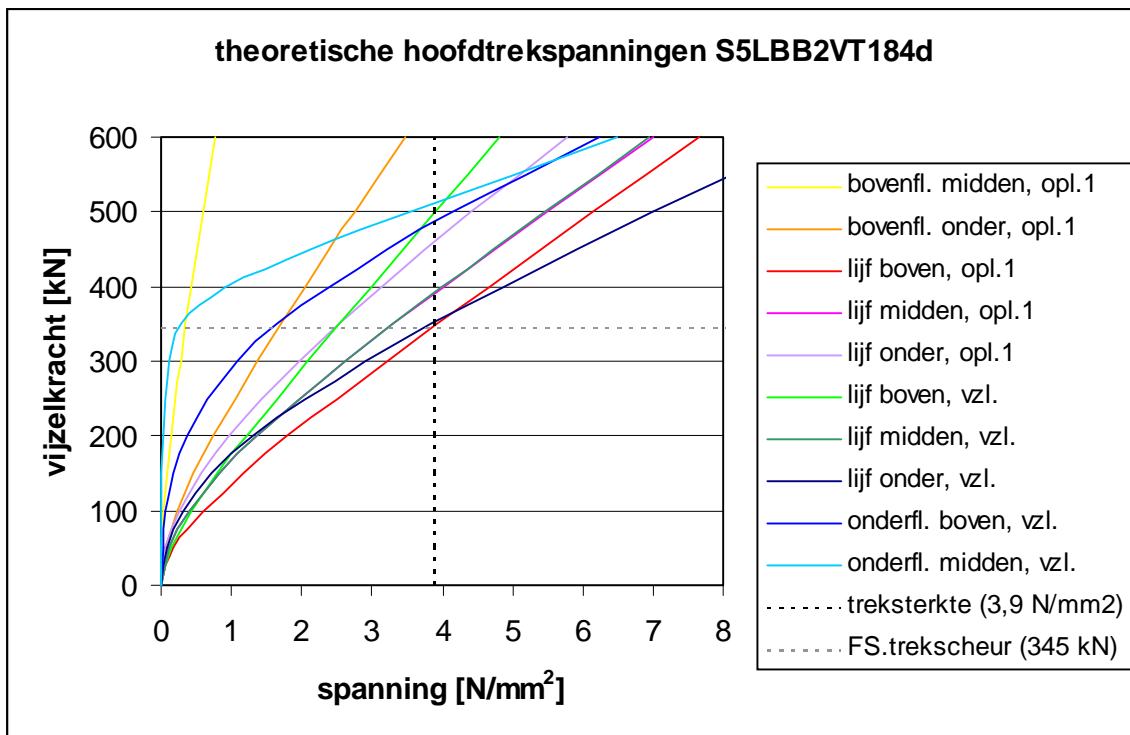
grafiek B15.1



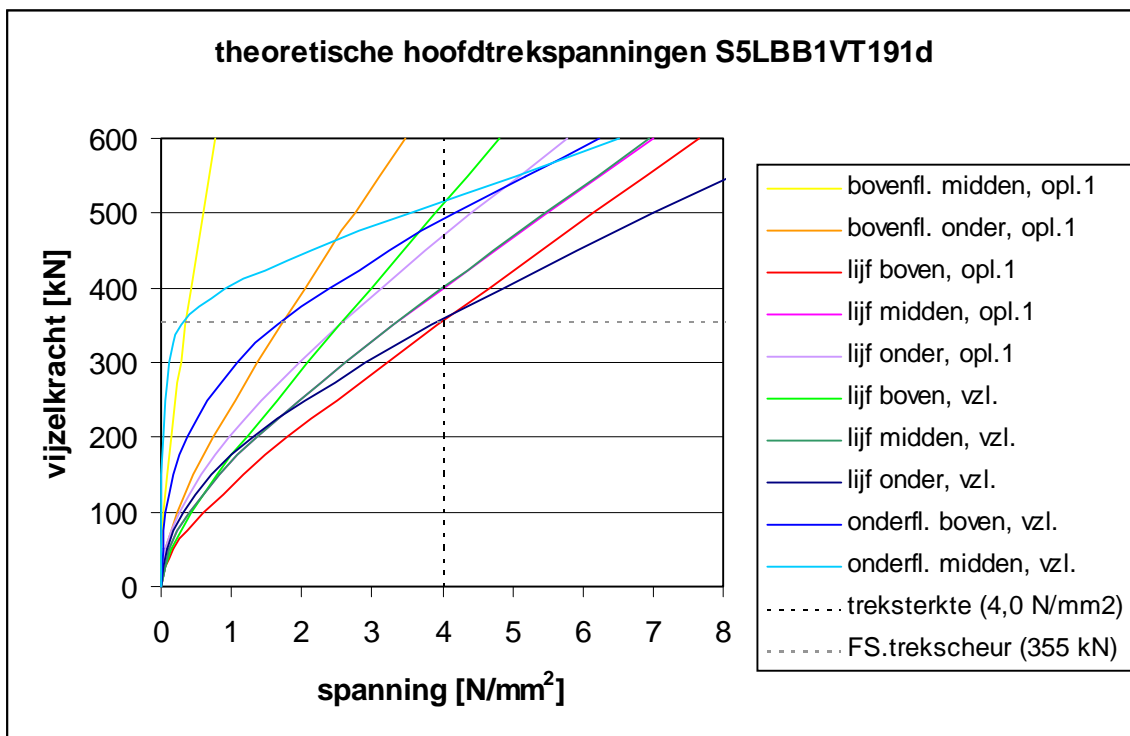
grafiek B15.2



grafiek B15.3



grafiek B15.4

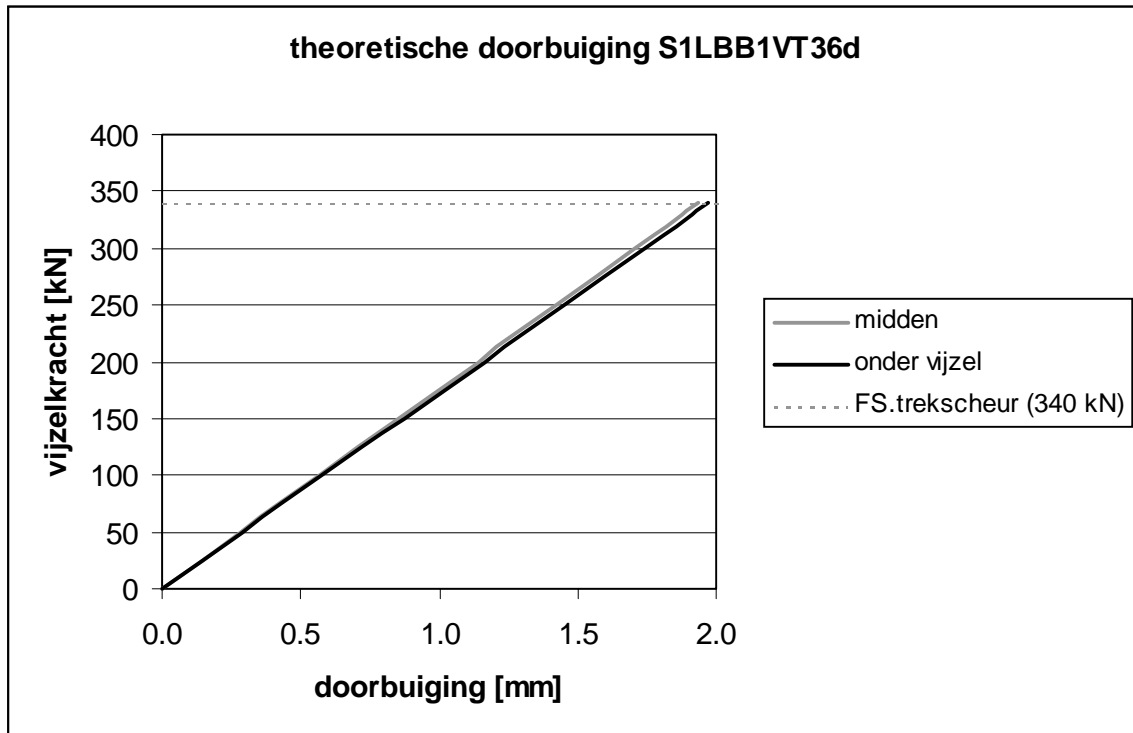


grafiek B15.5

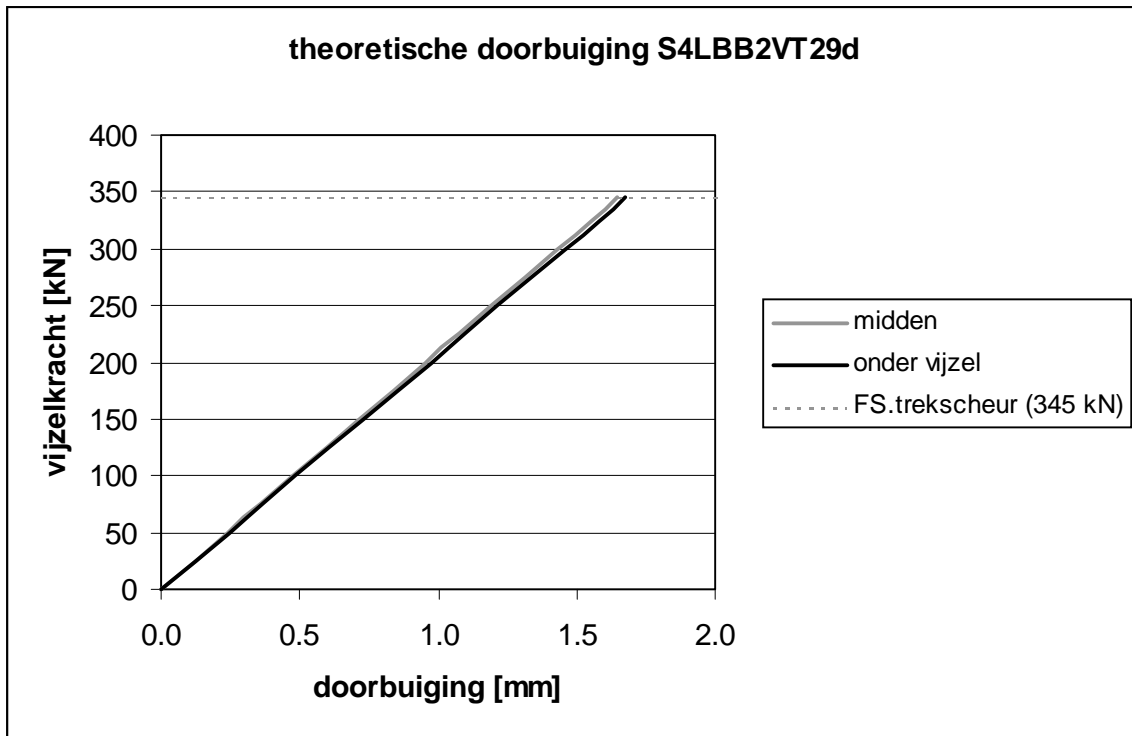
Bijlage 16: Theoretische doorbuiging

In deze bijlage zijn per dwarskrachtproef tot aan het ontstaan van de eerste trekscheuren te zien:

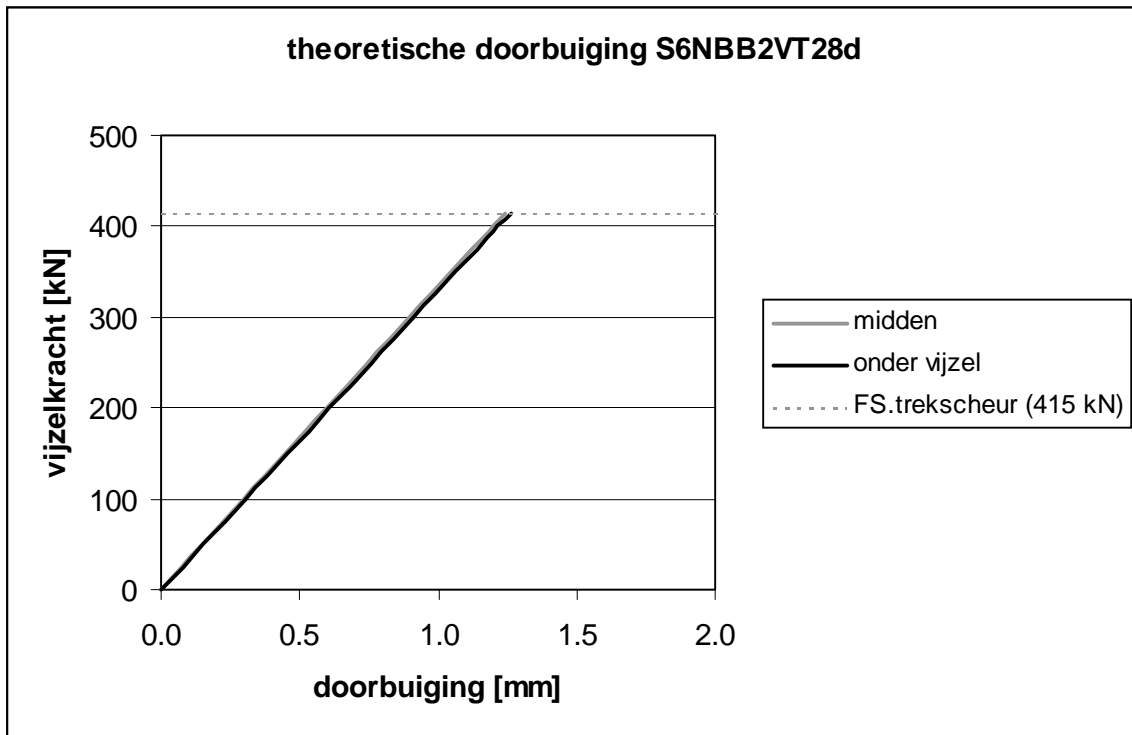
- De theoretische doorbuiging van de balk in het midden van de overspanning en onder de vijzel



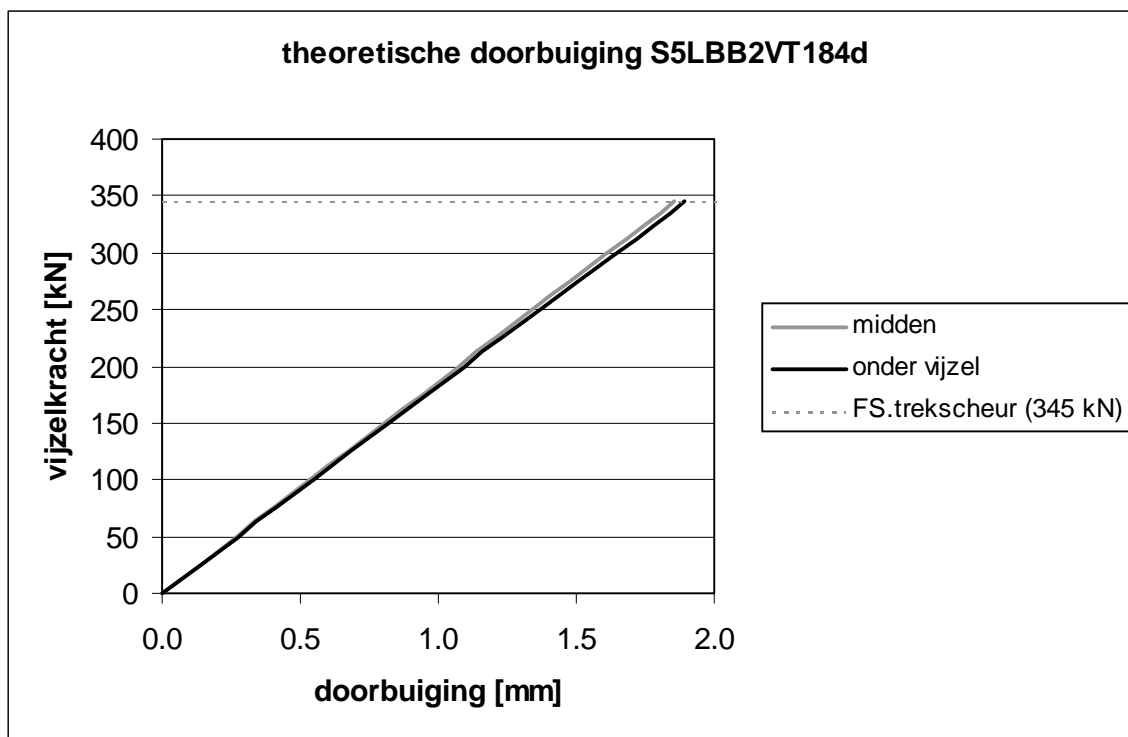
grafiek B16.1



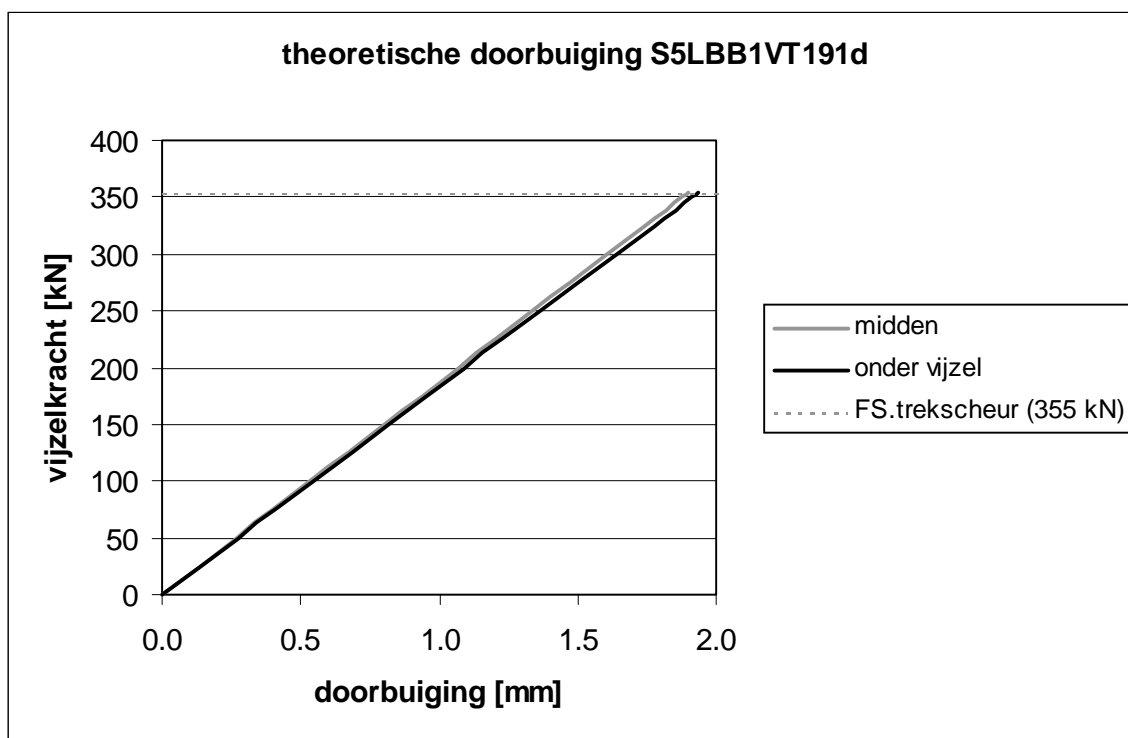
grafiek B16.2



grafiek B16.3



grafiek B16.4



grafiek B16.5

Bijlage 17: (Theoretische) hoofdspansingen t.p.v. de rozetvormige rekstroken

B17.1 Inleiding

In deze bijlage staan de grafieken die de hoofdspansingen en hun richtingen ter plekke van de rozetvormige rekstroken tonen. Zowel de grafieken met de theoretische waarden als de grafieken met de resultaten van de proeven zijn hier te vinden. Op deze manier zijn de grafieken goed te vergelijken. In paragraaf B17.2 wordt behandeld hoe de resultaten van de metingen met de rozetvormige rekstroken verwerkt worden.

B17.2 Verwerking meetresultaten

Tijdens de dwarskrachtproeven worden bij de meetpunten 20 tot en met 28 en bij de meetpunten 32 tot en met 40 alleen de rekken t.g.v. de vijzelkracht gemeten. De rekken t.g.v. de excentrische voorspanning worden niet gemeten. Gemeten worden:

- $\varepsilon_{x,F}$ = rek in de richting van de x-as (horizontaal) t.g.v. de vijzelkracht
- $\varepsilon_{z,F}$ = rek in de richting van de z-as (verticaal) t.g.v. de vijzelkracht
- $\varepsilon_{45,F}$ = rek in de richting 45° met de x-as (diagonaal) t.g.v. de vijzelkracht

Voor de spanningen t.g.v. de vijzelkracht geldt:

$$\begin{aligned}\sigma_{x,F} &= \text{spanning in de richting van de x-as t.g.v. de vijzelkracht} \\ &= \frac{E'_{bm}}{1-\nu^2} * (\varepsilon_{x,F} + \nu * \varepsilon_{z,F})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{z,F} &= \text{spanning in de richting van de z-as t.g.v. de vijzelkracht} \\ &= \frac{E'_{bm}}{1-\nu^2} * (\nu * \varepsilon_{x,F} + \varepsilon_{z,F})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{45,F} &= \text{spanning in de richting } 45^\circ \text{ met de x-as t.g.v. de vijzelkracht} \\ &= \frac{E'_{bm}}{1-\nu^2} * ((1-\nu) * \varepsilon_{45,F} + \nu * (\varepsilon_{x,F} + \varepsilon_{z,F}))\end{aligned}$$

waarbij:

$$\begin{aligned}E'_{bm} &= \text{gemiddelde E-modulus tijdens een bepaalde dwarskrachtproef (zie tabel 4.7)} \\ \nu &= 0,15\end{aligned}$$

Voor de spanningen t.g.v. de vijzelkracht *en* de excentrische voorspanning geldt:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \text{spanning in de richting van de x-as t.g.v. de vijzelkracht en de excentrische} \\ &\quad \text{voorspanning} \\ &= \sigma_{x,F} + \sigma_{bw}(z)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \text{spanning in de richting van de z-as t.g.v. de vijzelkracht en de excentrische} \\ &\quad \text{voorspanning} \\ &= \sigma_{z,F}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{45} &= \text{spanning in de richting } 45^\circ \text{ met de x-as t.g.v. de vijzelkracht en de excentrische} \\ &\quad \text{voorspanning} \\ &= \sigma_{45,F} + \frac{\sigma_{bw}(z)}{2}\end{aligned}$$

waarbij:

$\sigma_{bw}(z)$ = werkvoorspanning in het beton op de hoogte z (zie tabel 4.10 t/m tabel 4.14)

Voor de schuifspanning om de richting van de y -as, τ_y , geldt:

$$\tau_y = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} - \sigma_{45}$$

Voor de hoofdtrek- en hoofdrukkspanningen, resp. σ_1 en σ_2 , en voor de hoek die de richtingen van de hoofdrukkspanningen maken met de x -as, θ , geldt:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_y^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_y^2}$$

$$\tan(\gamma) = \frac{2 \cdot \tau_y}{\sigma_x - \sigma_z}$$

$$\theta = -\frac{\gamma}{2} \quad \text{voor } (\sigma_x - \sigma_z) = \text{negatief en } \tau_y = \text{positief}$$

$$= 90 - \frac{\gamma}{2} \quad \text{voor } (\sigma_x - \sigma_z) = \text{positief en } \tau_y = \text{positief}$$

B17.3 Grafieken

In deze paragraaf zijn per dwarskrachtproef te zien:

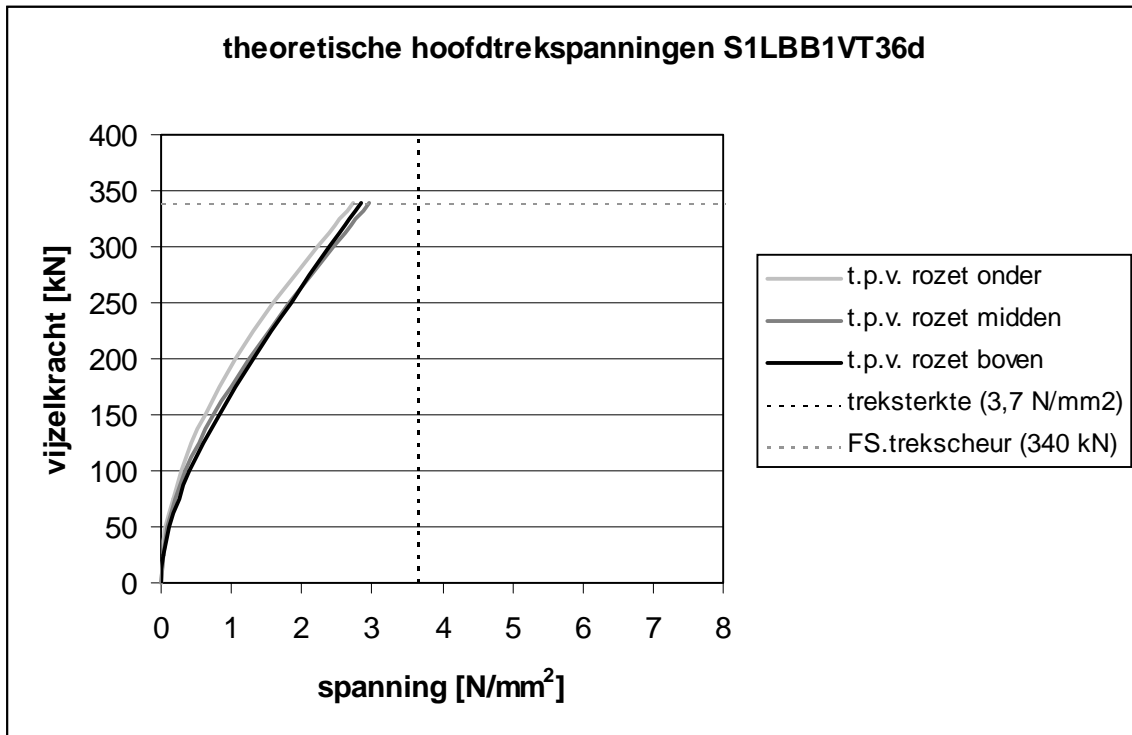
- De theoretische hoofdtrek- en hoofdrukkspanningen ter plekke van de rozetvormige rekstroken tot aan het ontstaan van de eerste trekscheuren
- De hoek die de richtingen van deze theoretische hoofdrukkspanningen maken met de x -as
- De aan de hand van de meetresultaten bepaalde hoofdtrek- en hoofdrukkspanningen ter plekke van de rozetvormige rekstroken. De grafieken stoppen wanneer de eerste rekstrook bezwijkt.
- De hoek die de richtingen van deze gevonden hoofdrukkspanningen maken met de x -as

De in de grafieken gebruikte termen 'rozet onder', 'rozet midden' en 'rozet boven' betekenen het volgende:

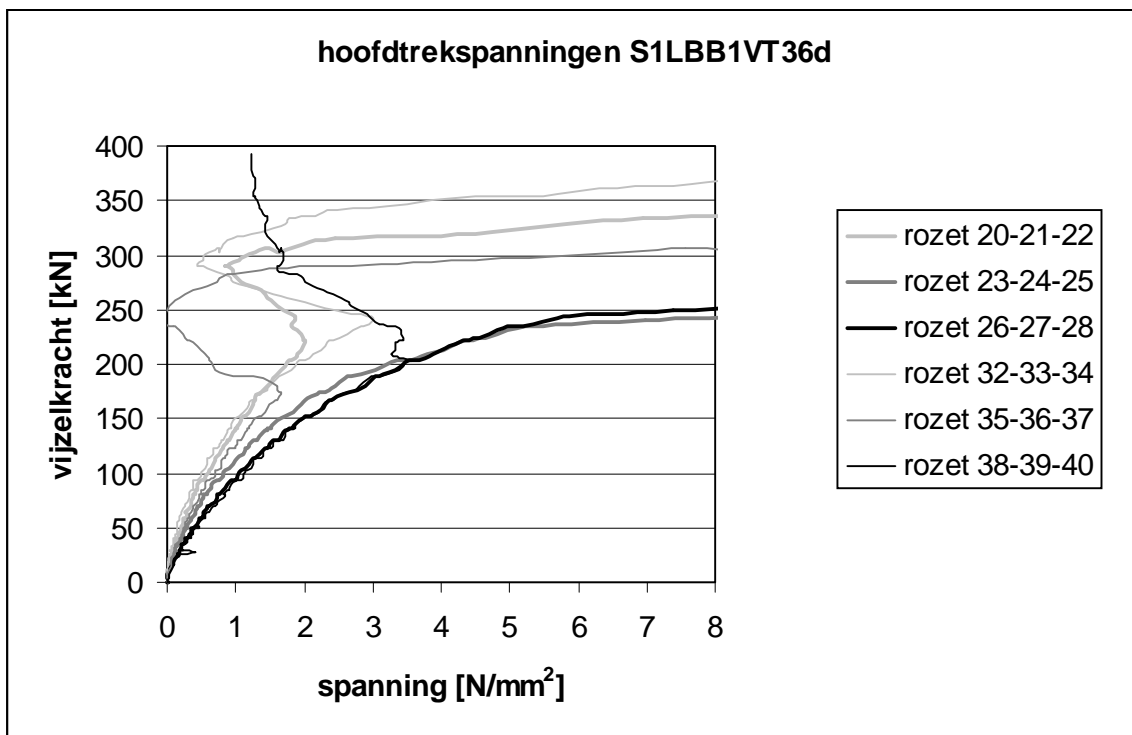
rozet onder: rozet 20-21-22 en rozet 32-33-34

rozet midden: rozet 23-24-25 en rozet 35-36-37

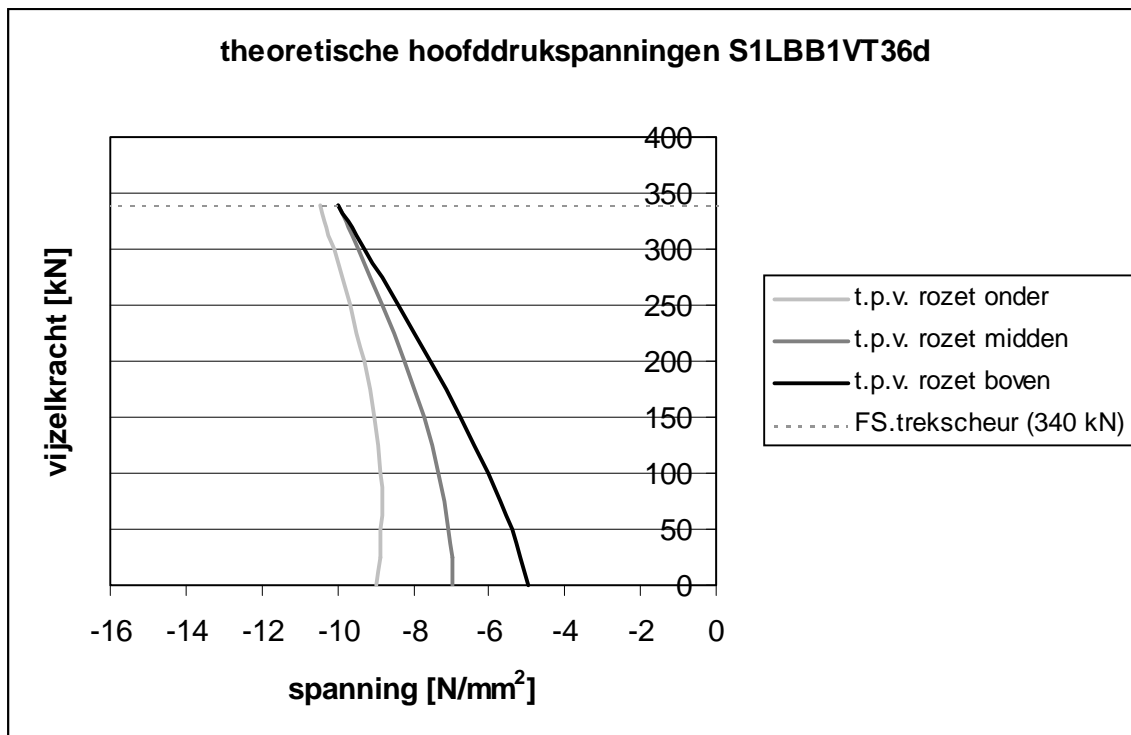
rozet boven: rozet 26-27-28 en rozet 38-39-40



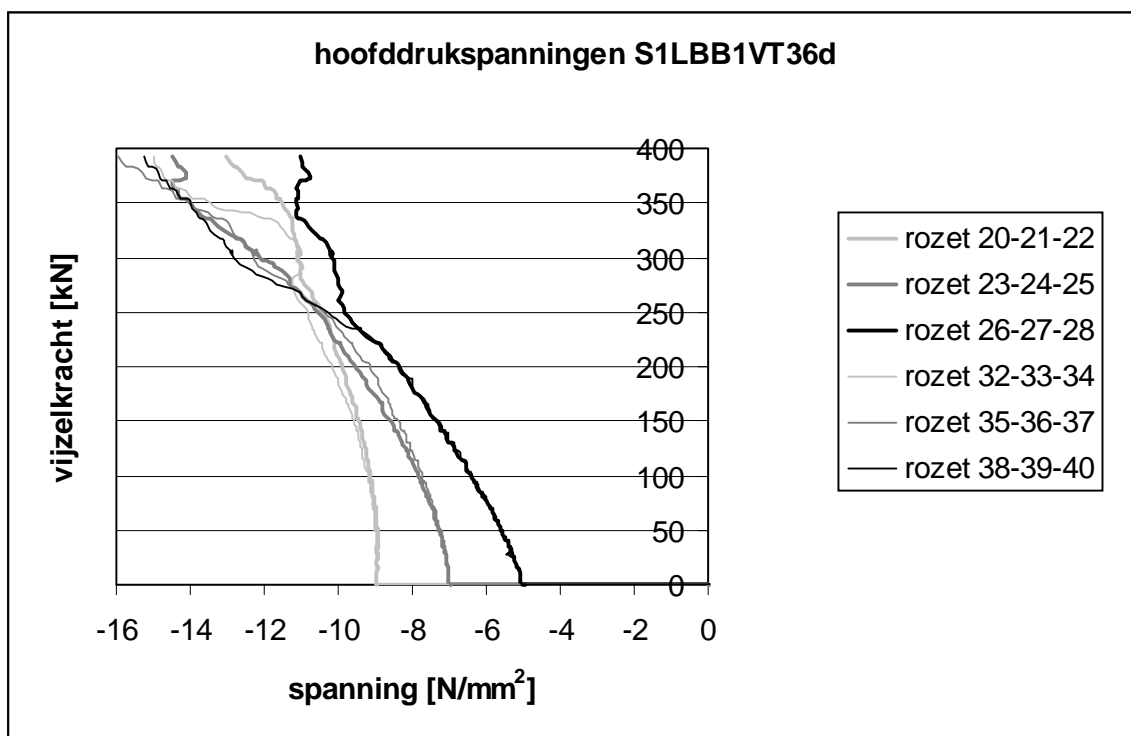
grafiek B17.1



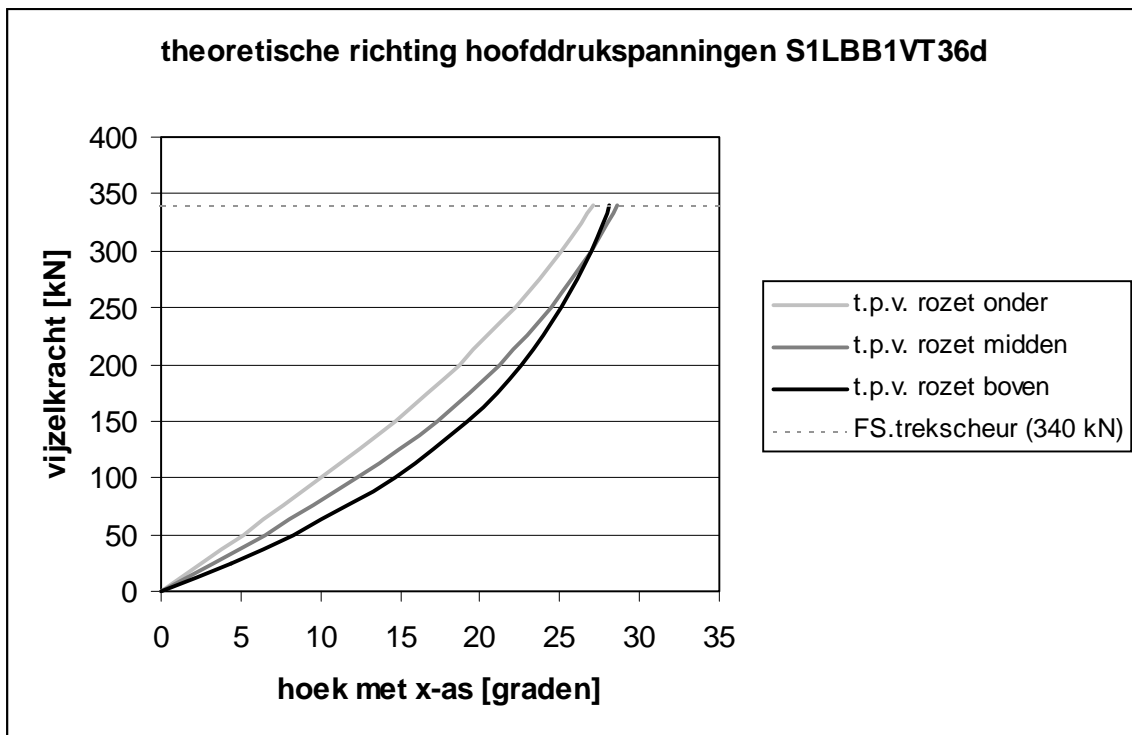
grafiek B17.2



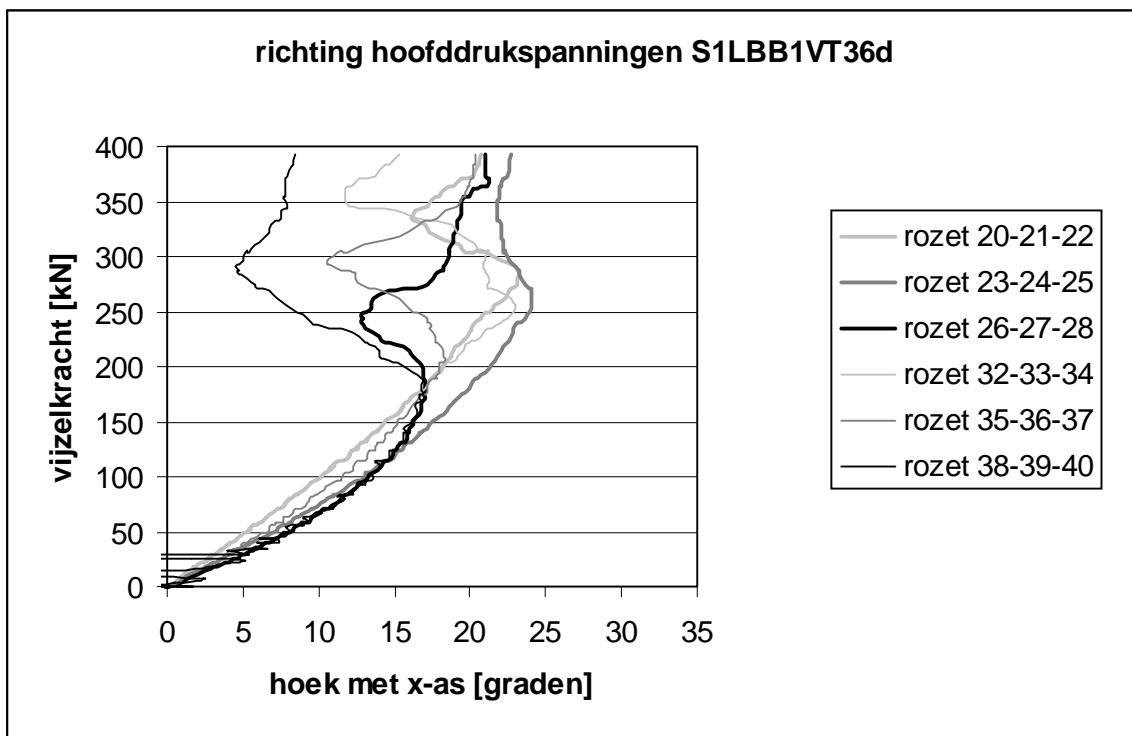
grafiek B17.3



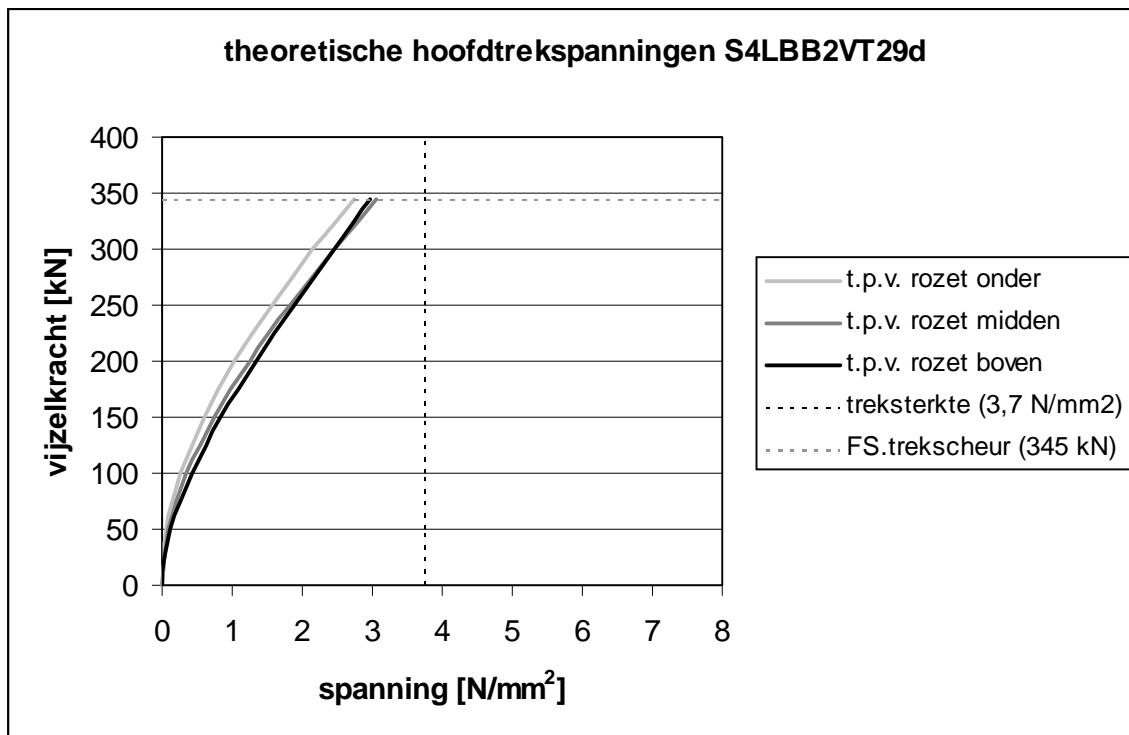
grafiek B17.4



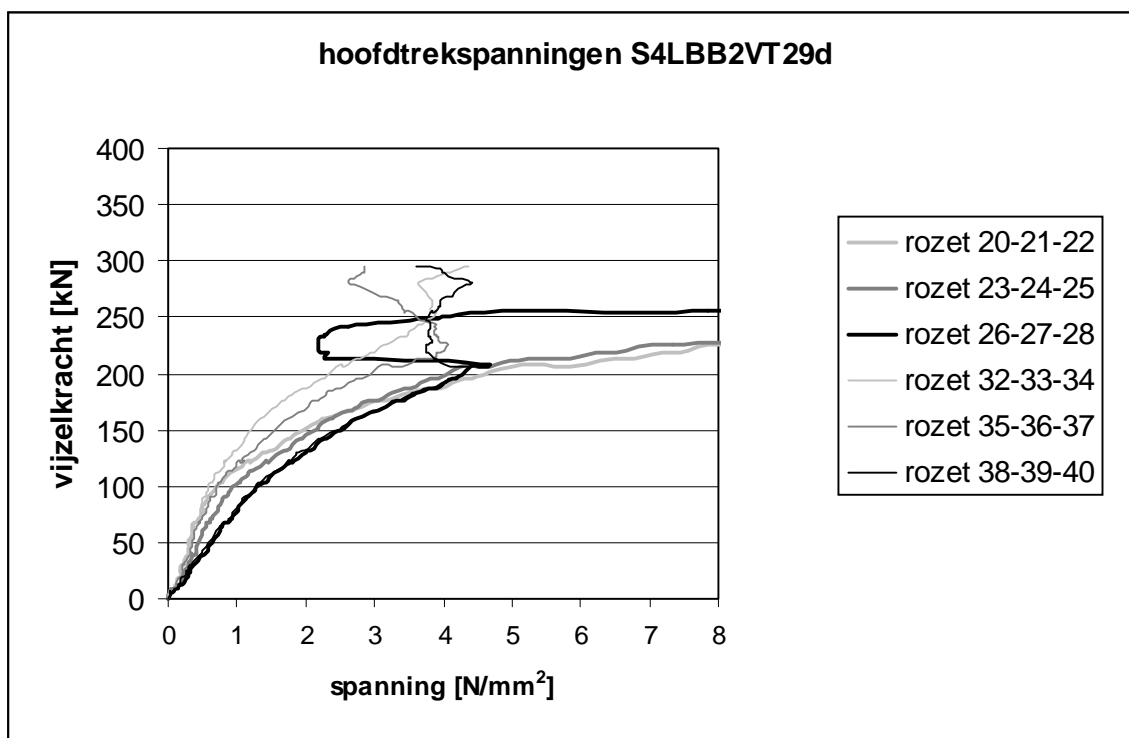
grafiek B17.5



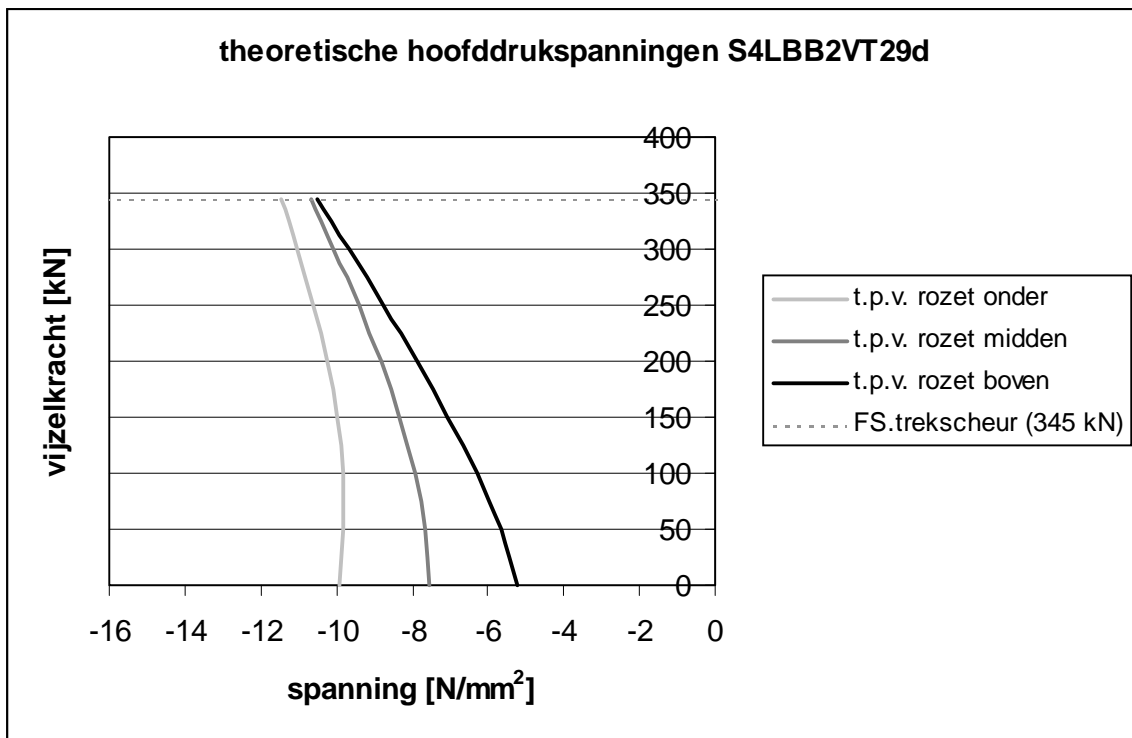
grafiek B17.6



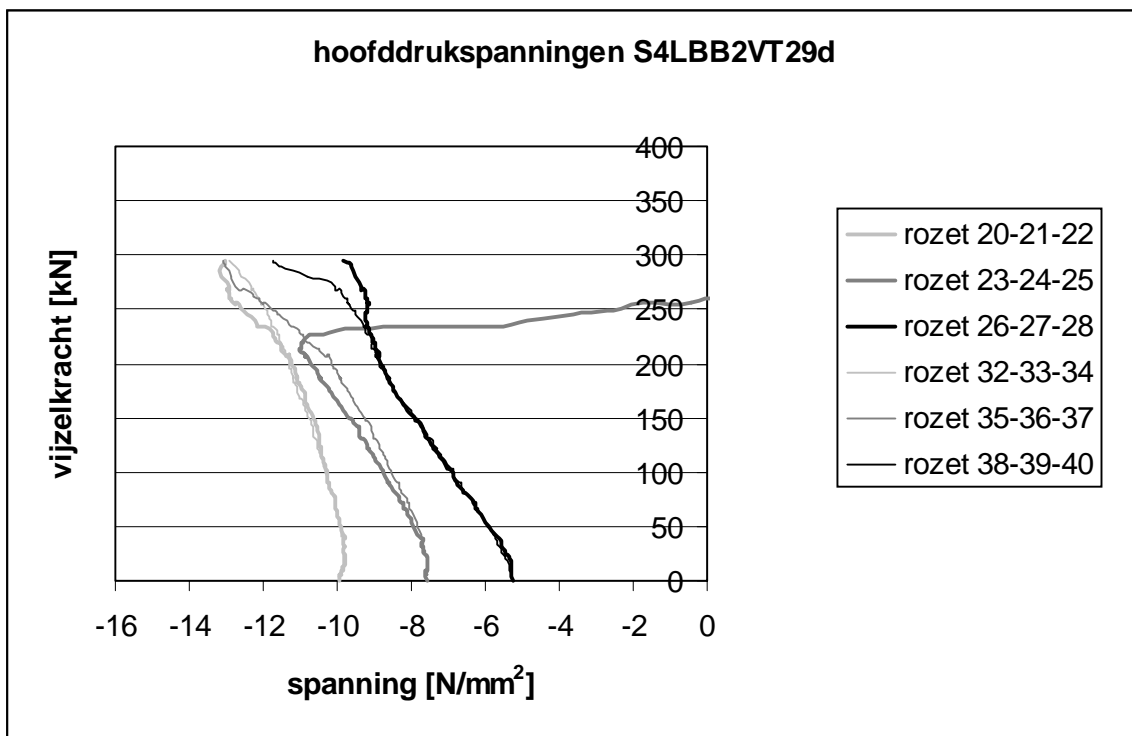
grafiek B17.7



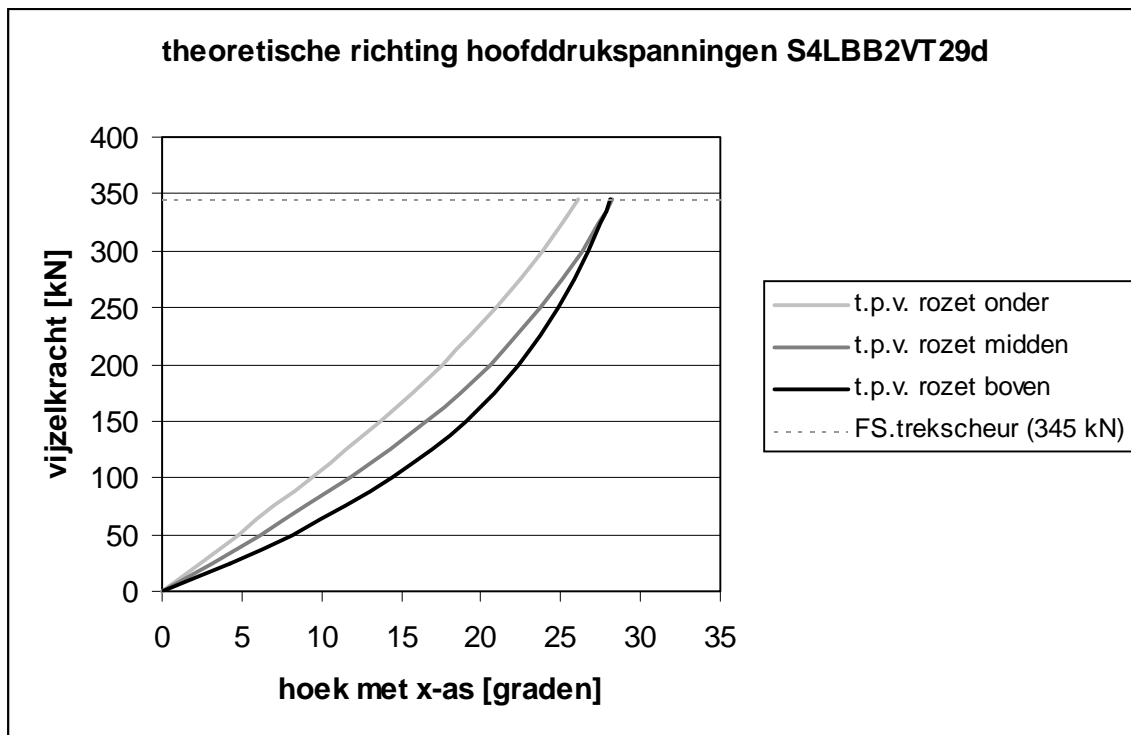
grafiek B17.8



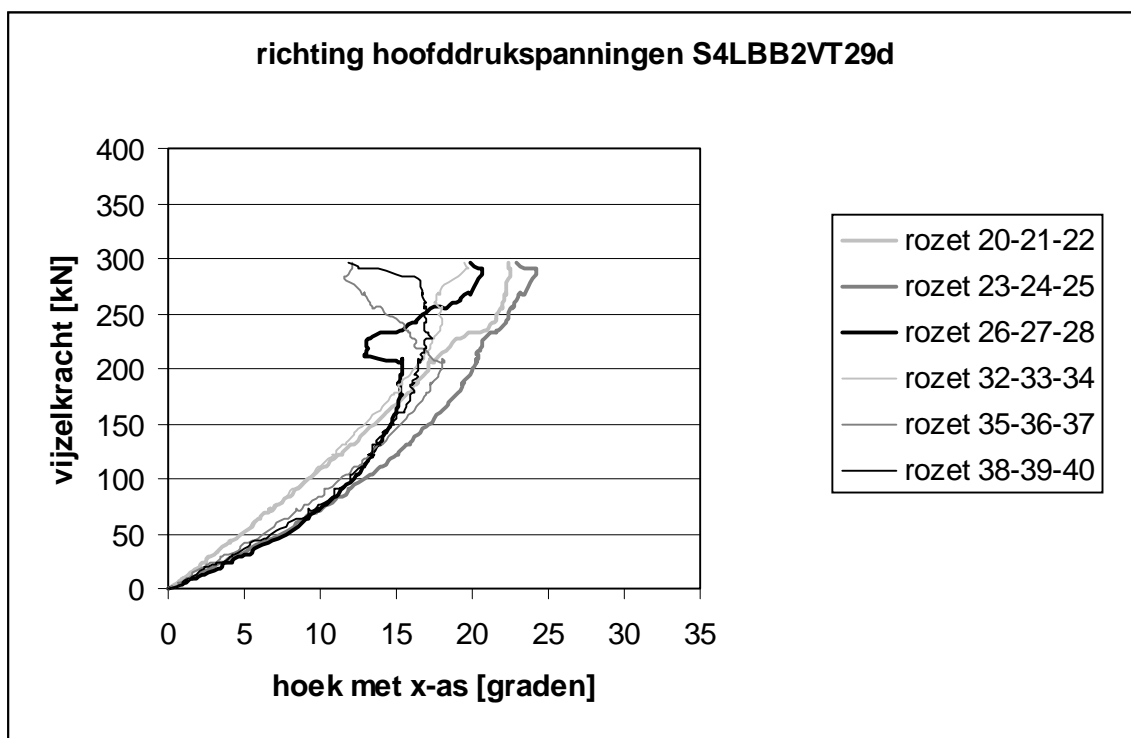
grafiek B17.9



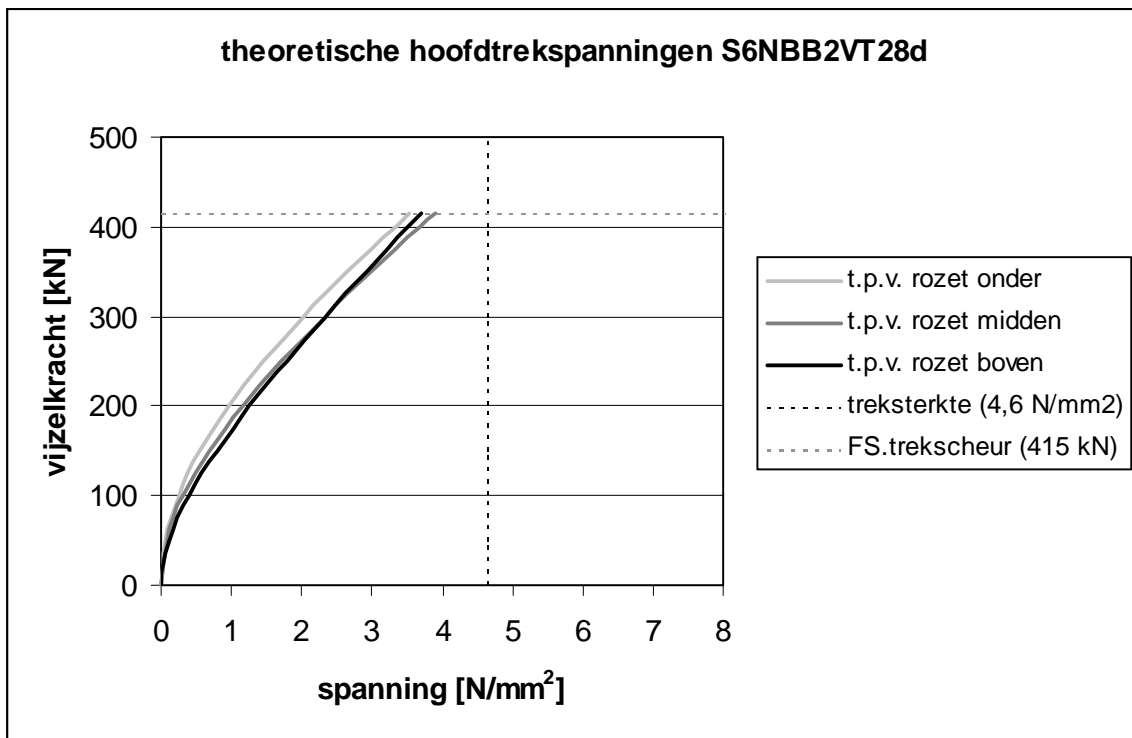
grafiek B17.10



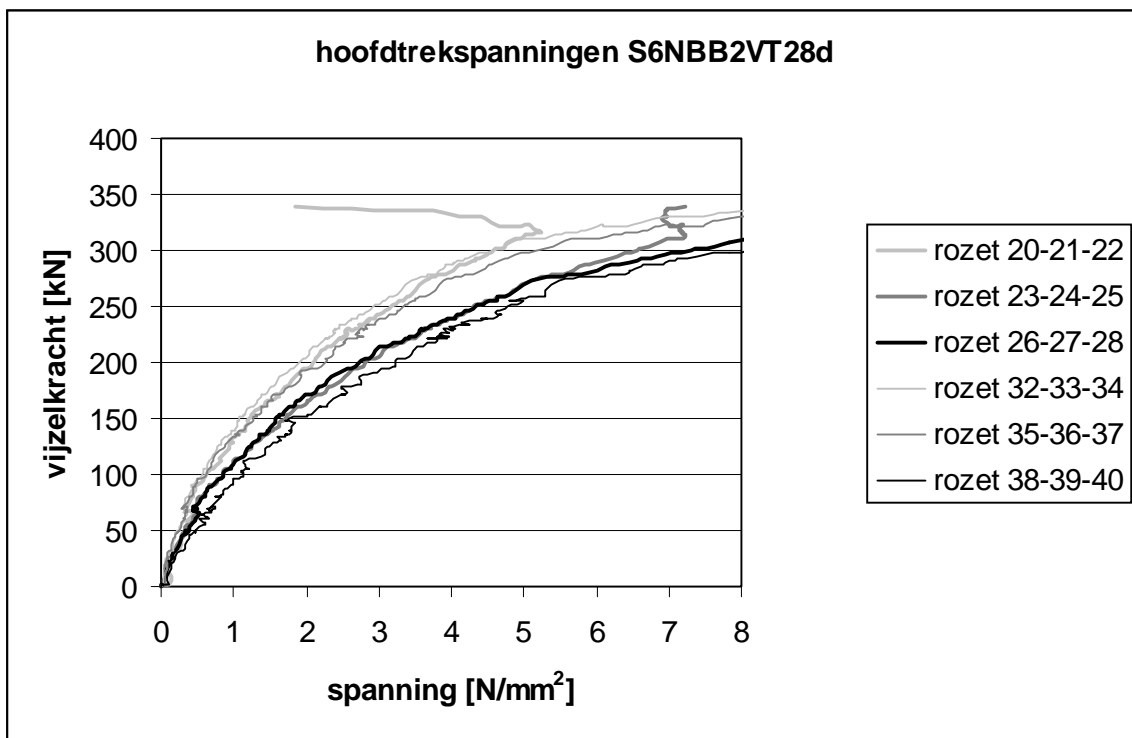
grafiek B17.11



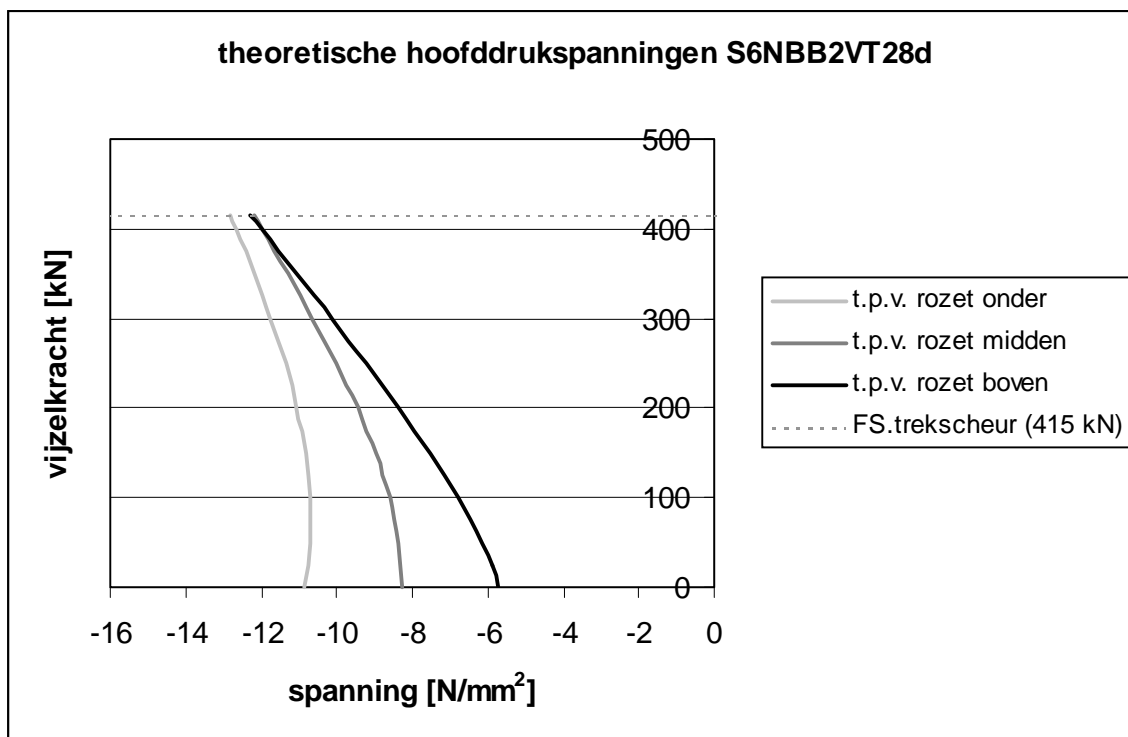
grafiek B17.12



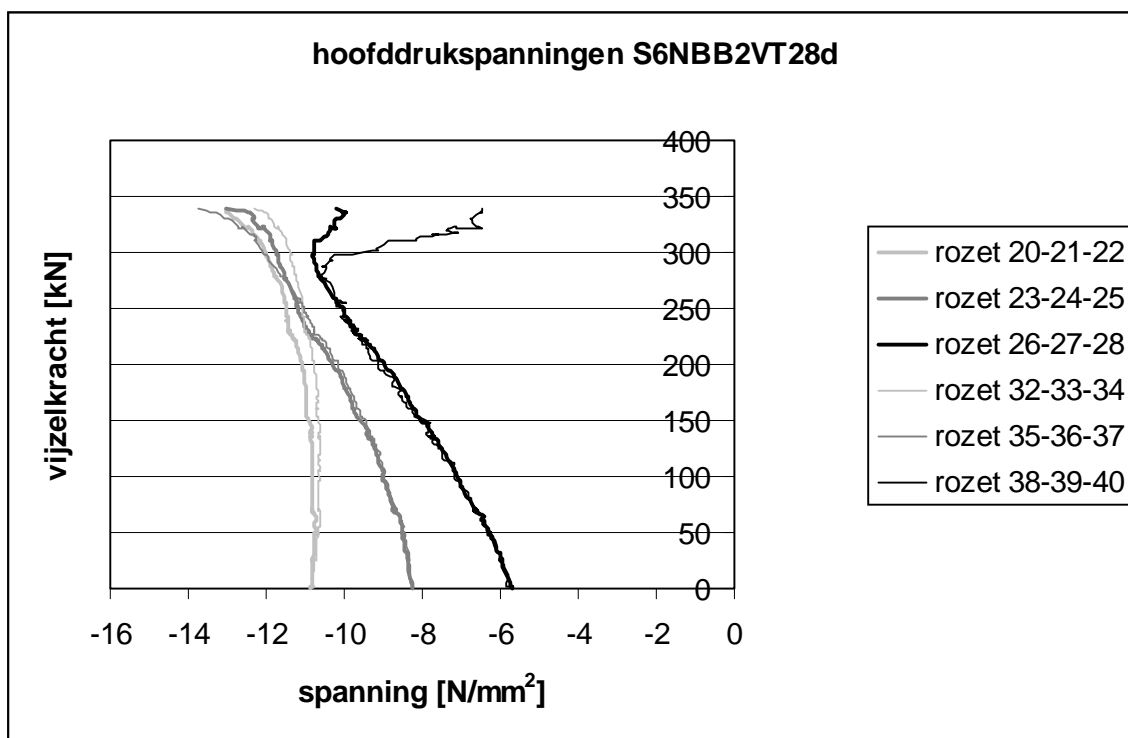
grafiek B17.13



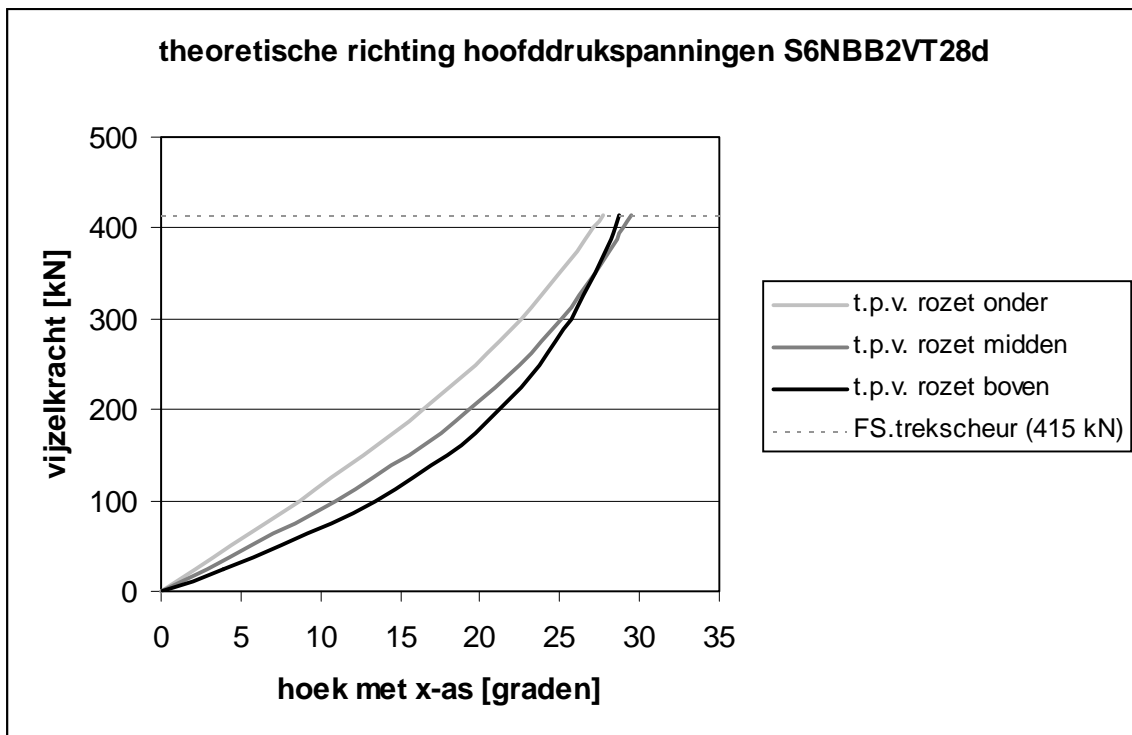
grafiek B17.14



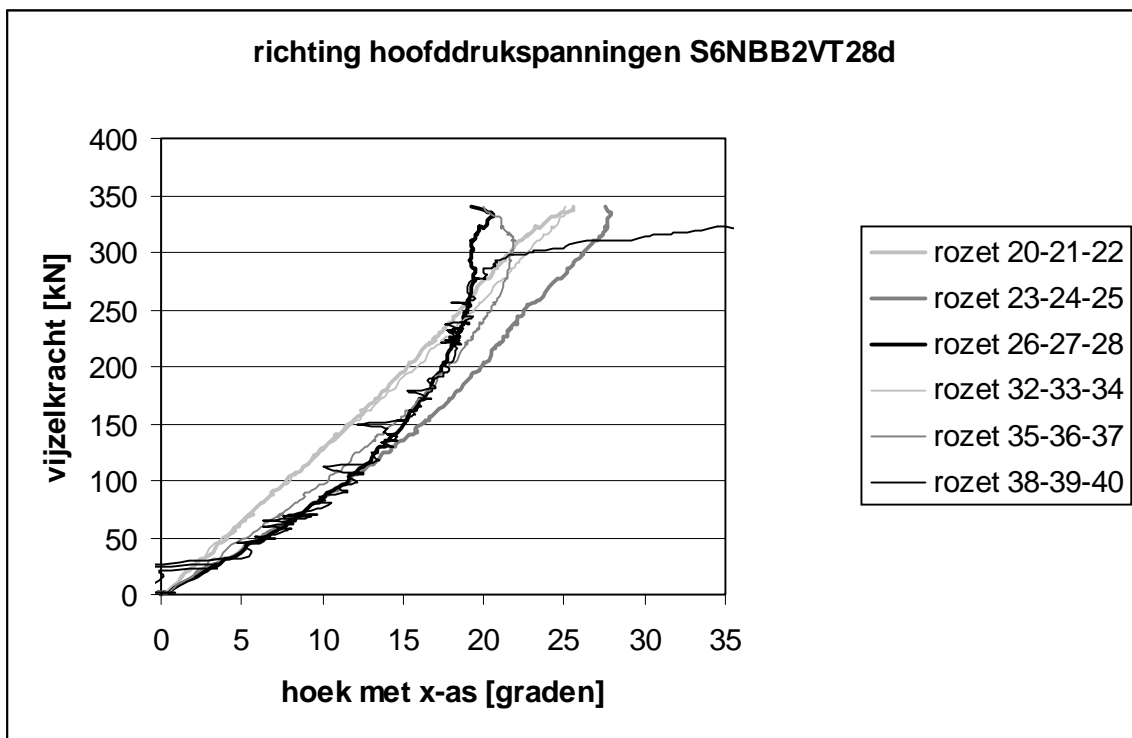
grafiek B17.15



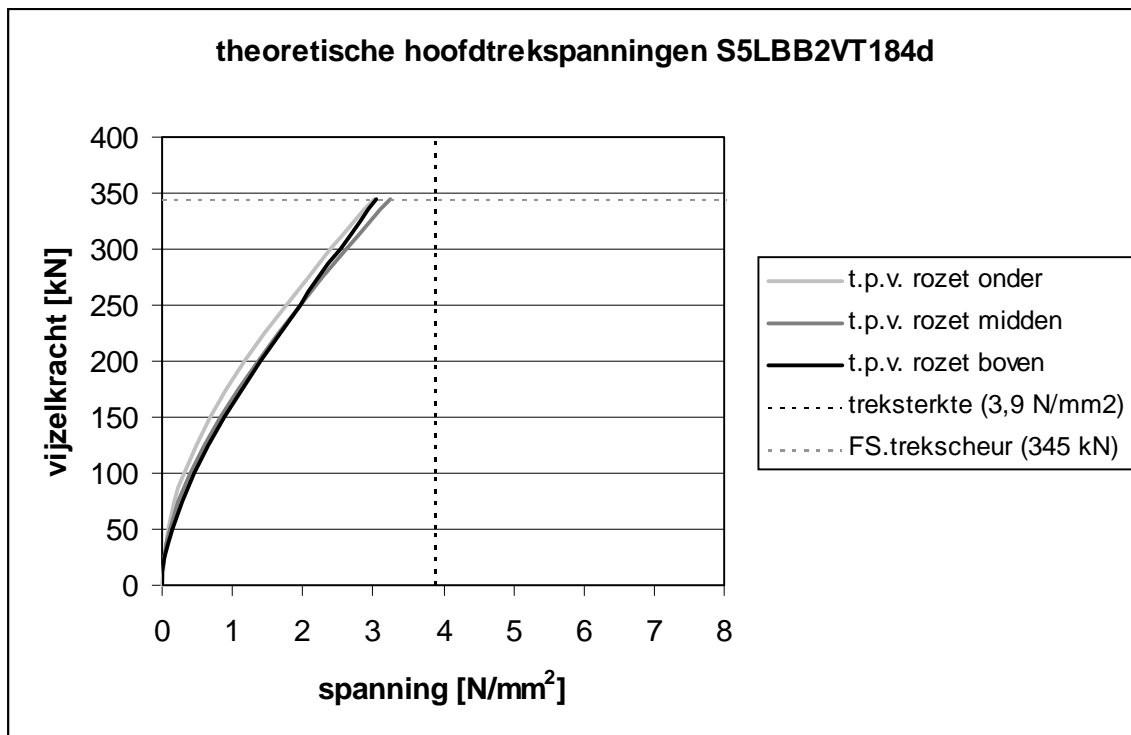
grafiek B17.16



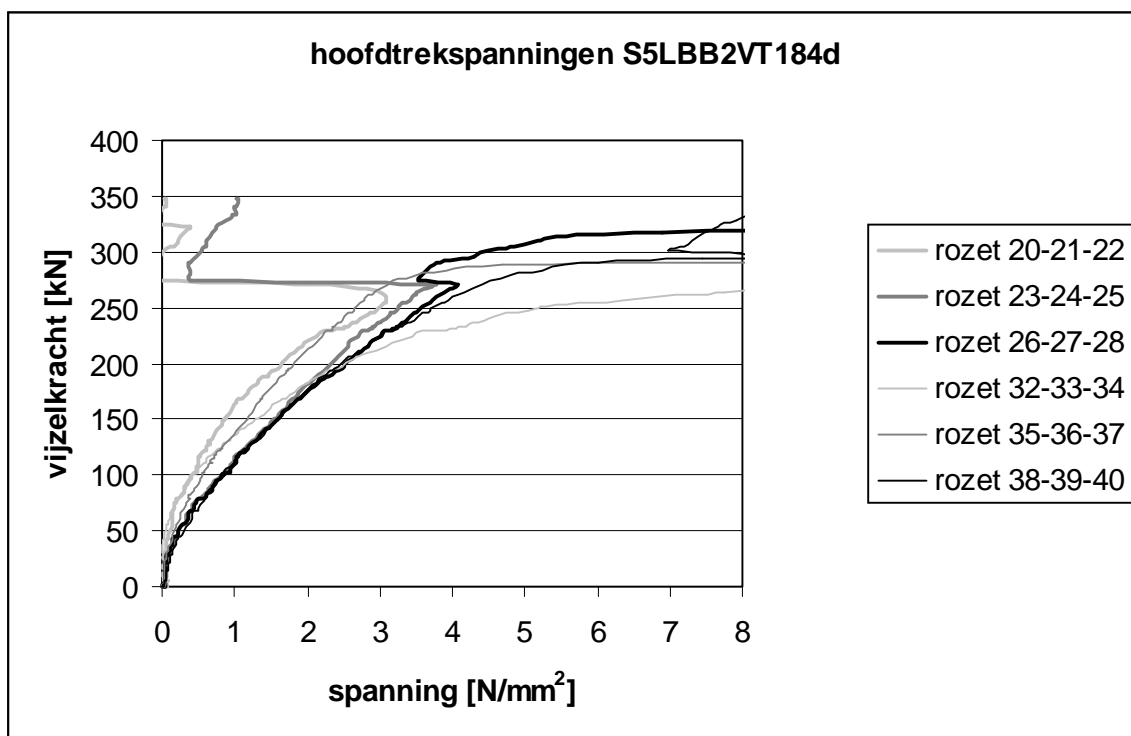
grafiek B17.17



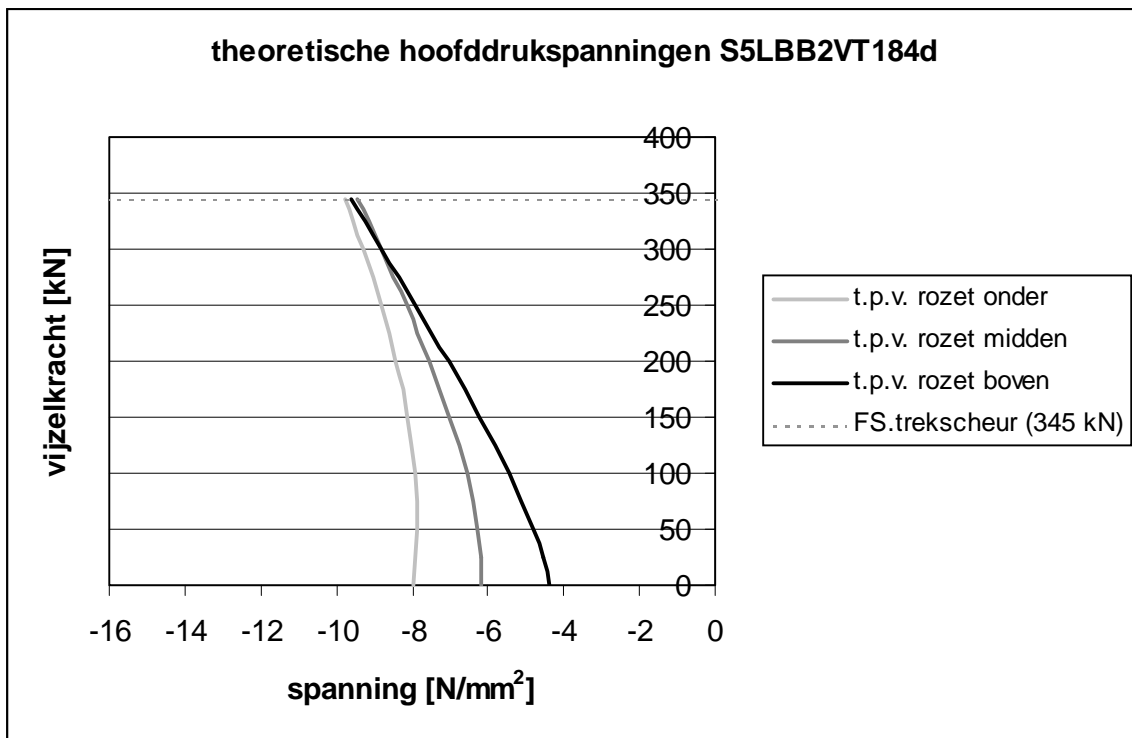
grafiek B17.18



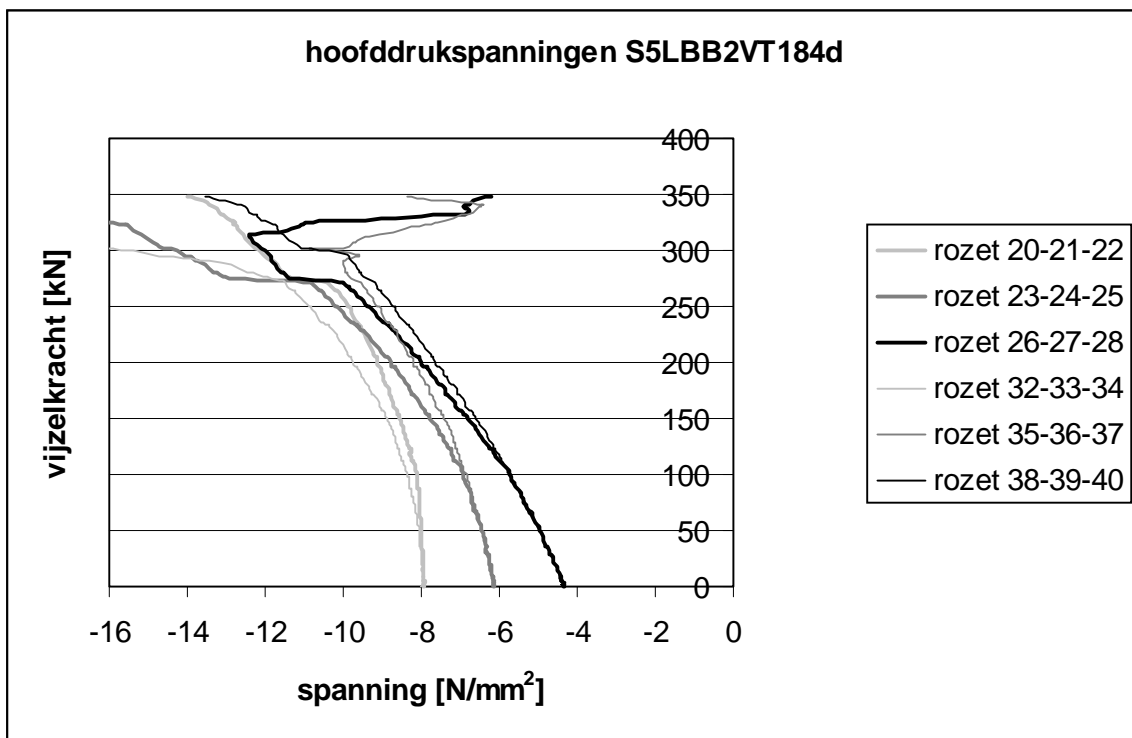
grafiek B17.19



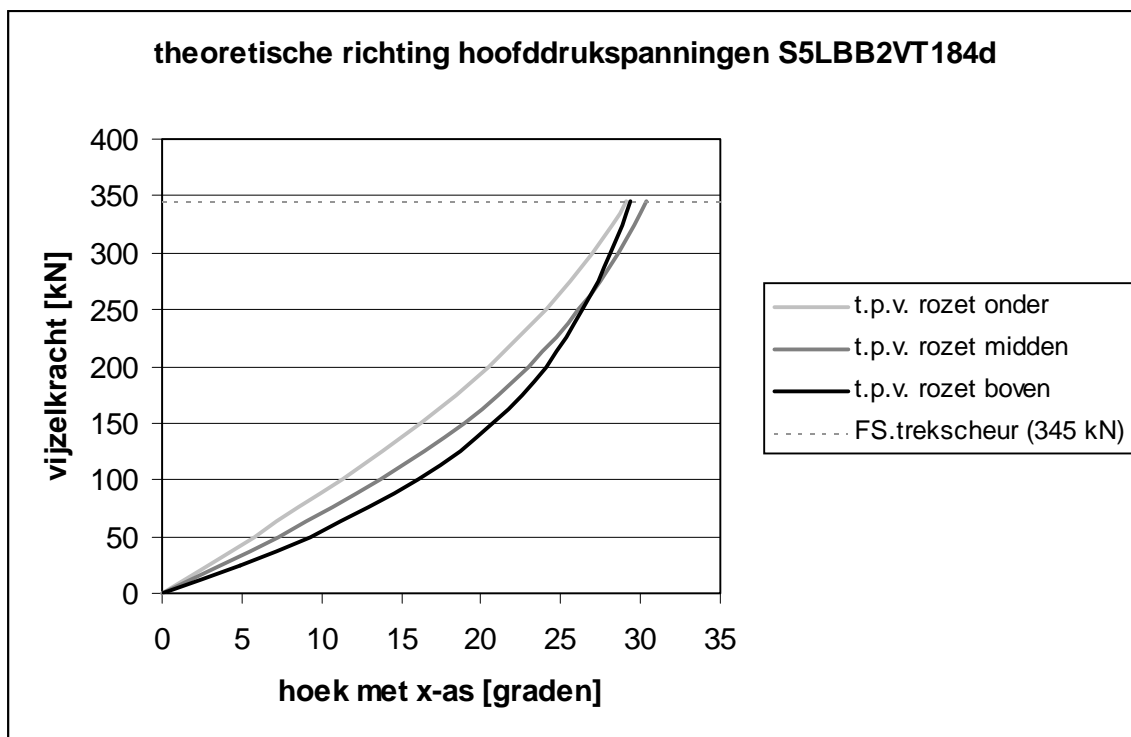
grafiek B17.20



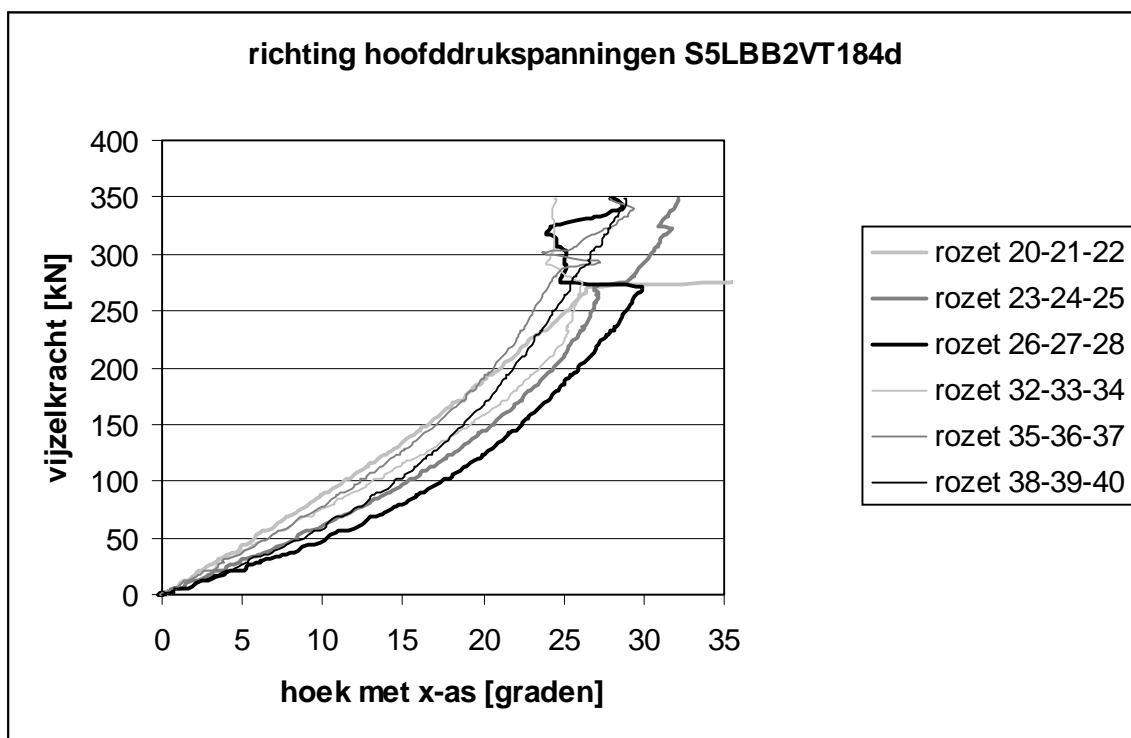
grafiek B17.21



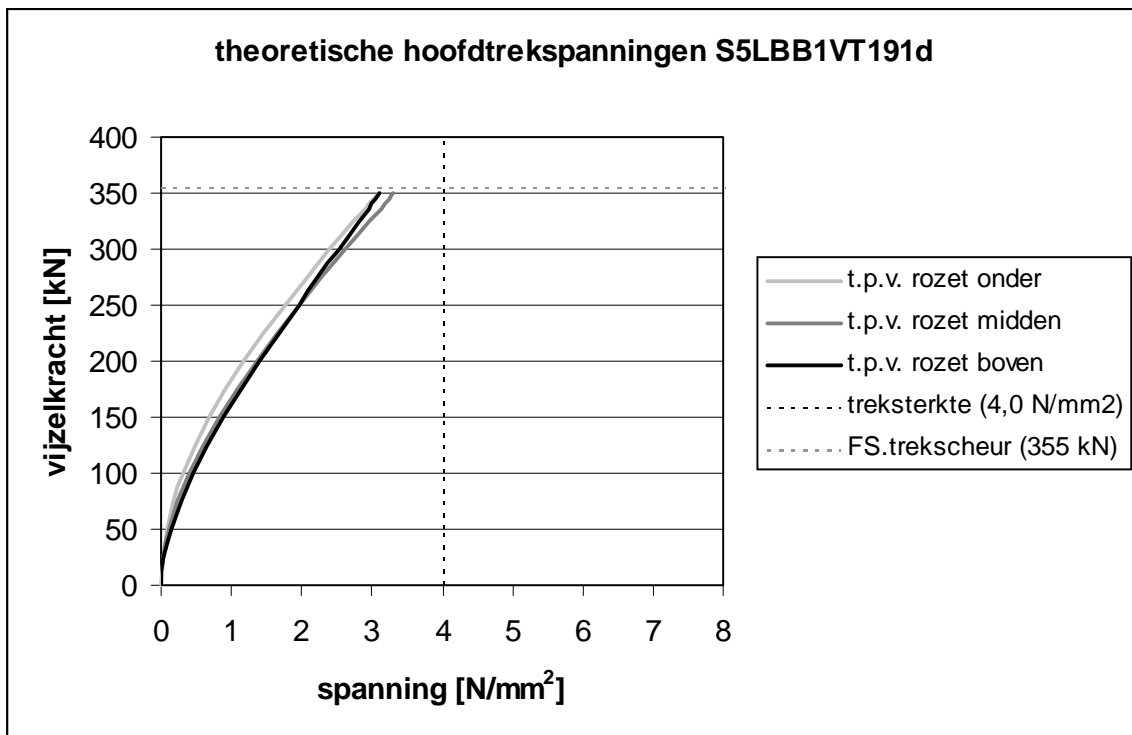
grafiek B17.22



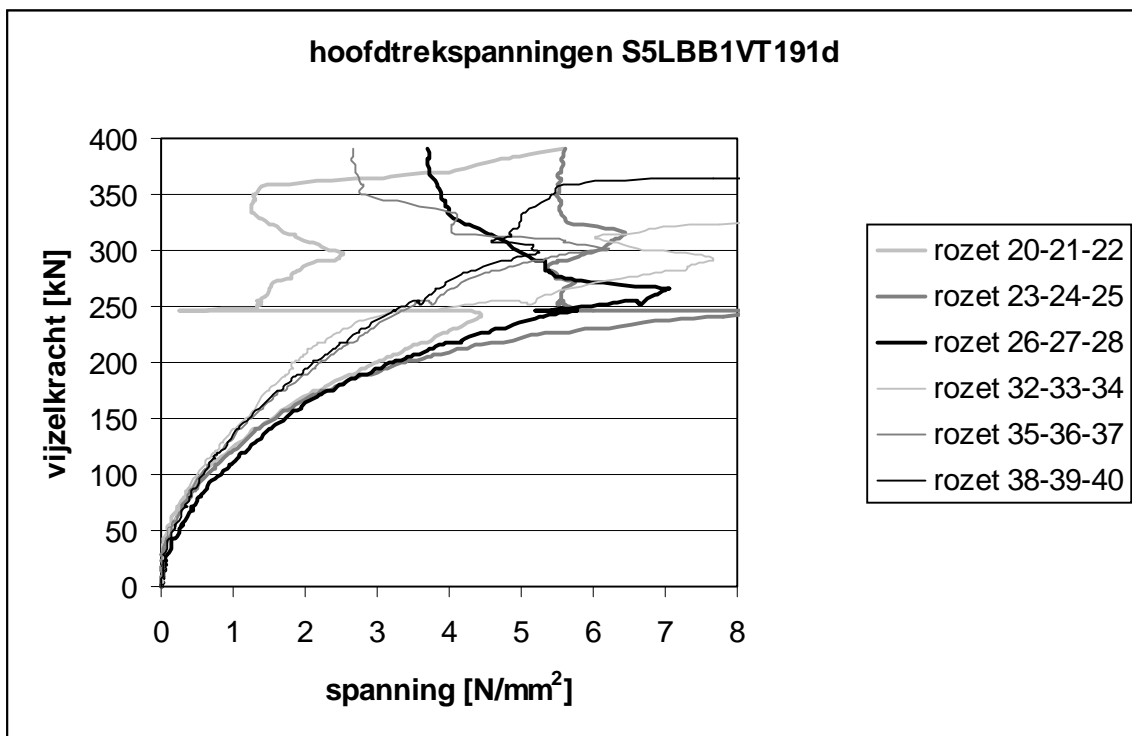
grafiek B17.23



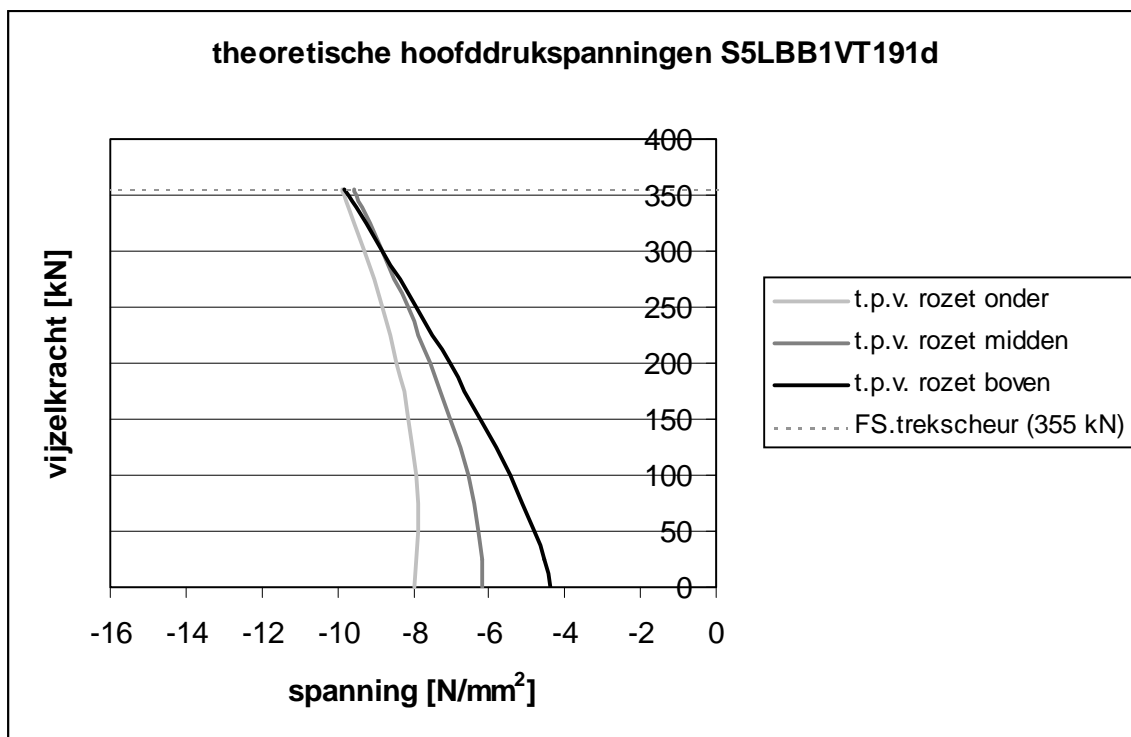
grafiek B17.24



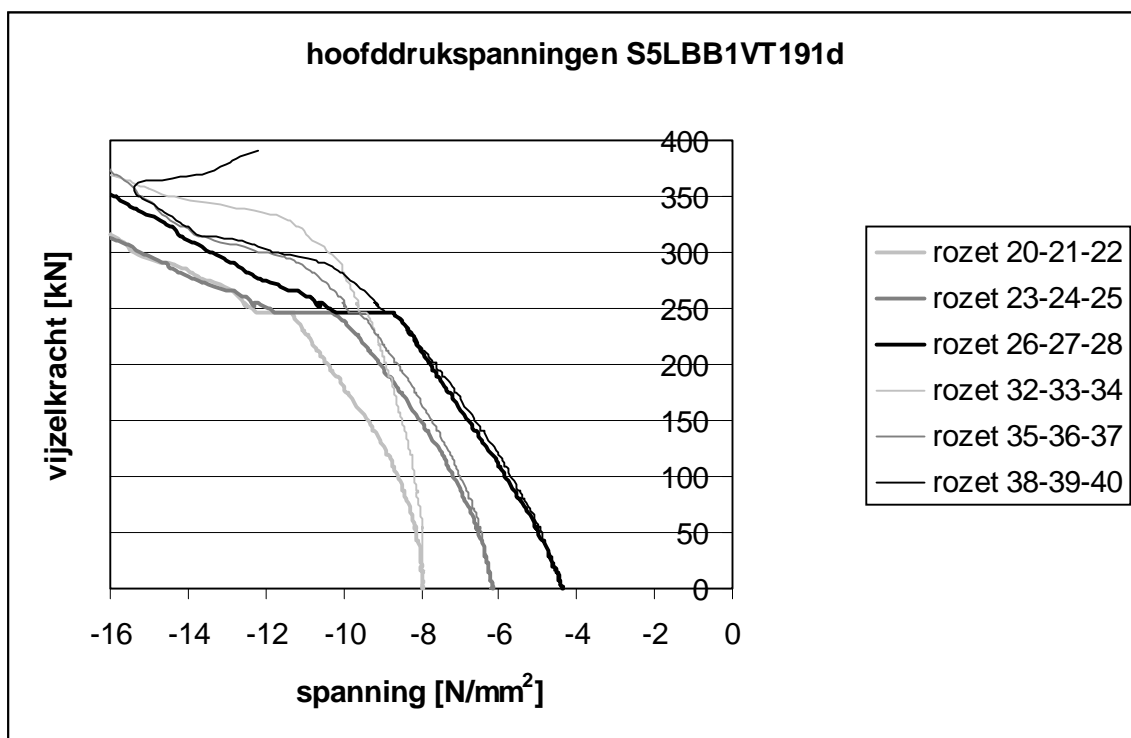
grafiek B17.25



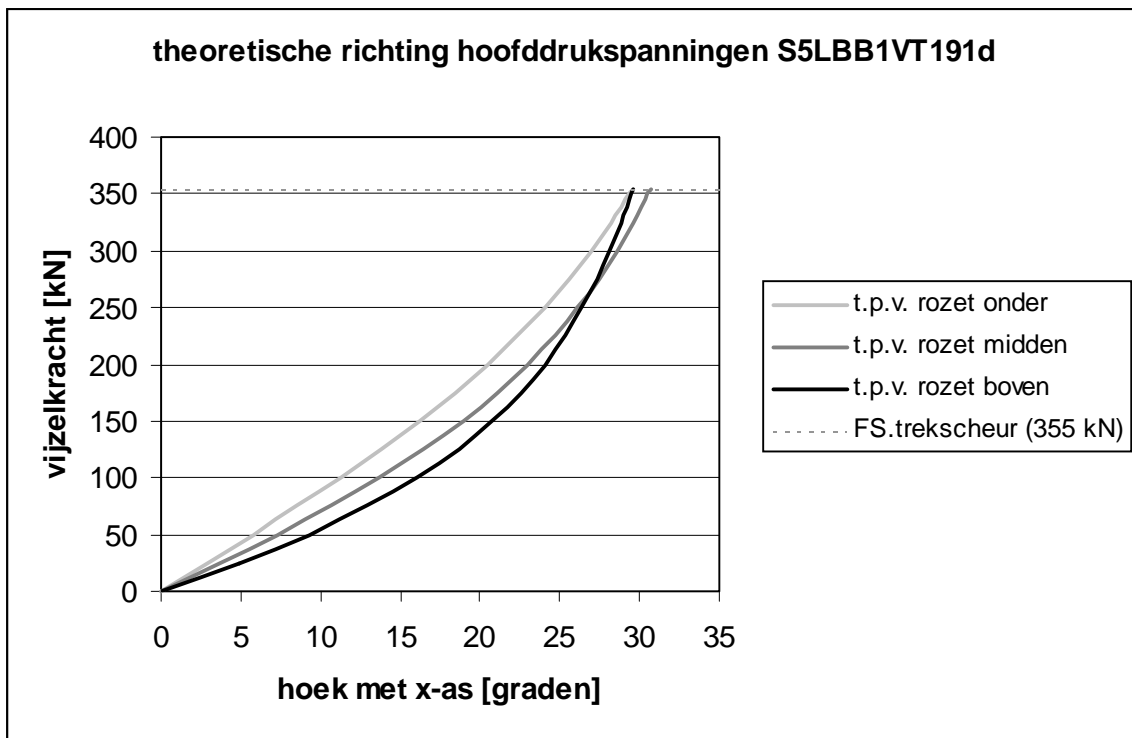
grafiek B17.26



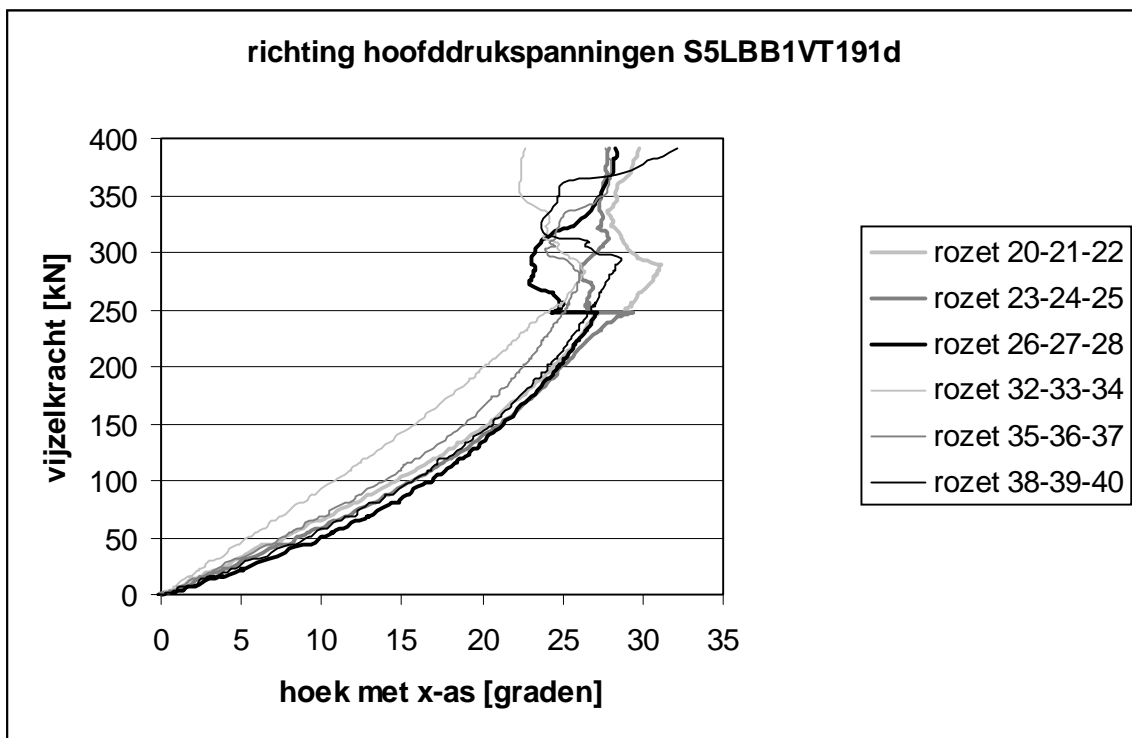
grafiek B17.27



grafiek B17.28



grafiek B17.29

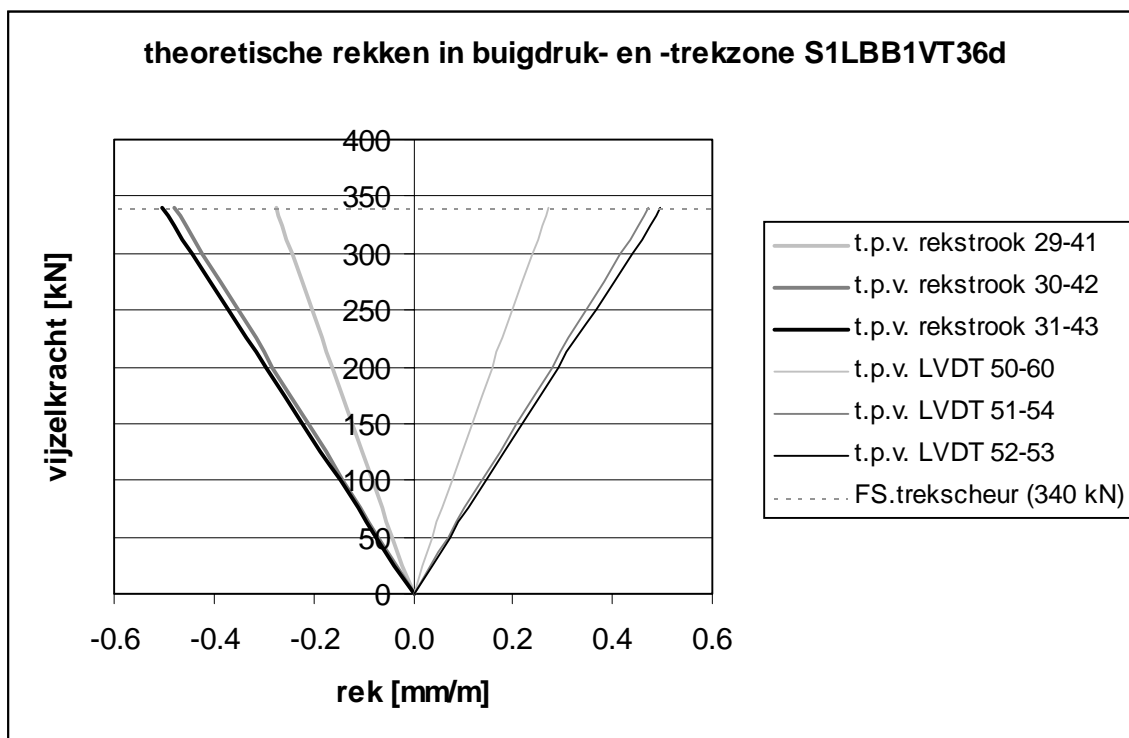


grafiek B17.30

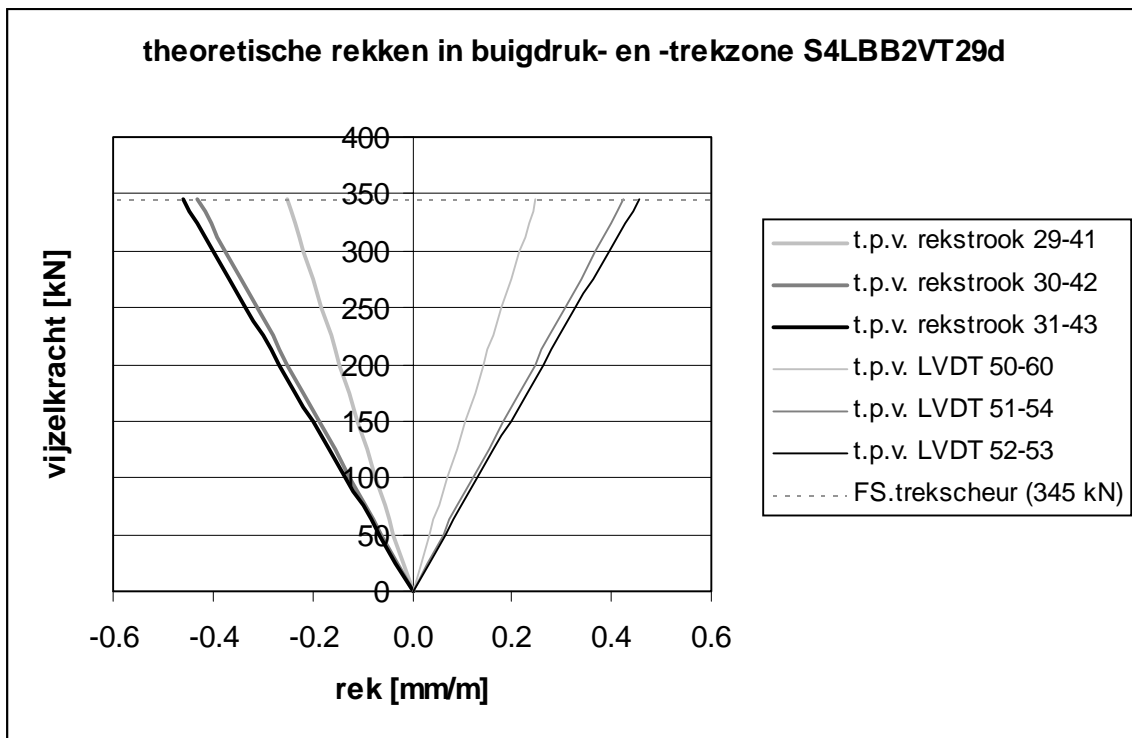
Bijlage 18: Theoretische rekken in de buigdruk- en de buigtrekzone

In deze bijlage zijn per dwarskrachtproef tot aan het ontstaan van de eerste trekscheuren te zien:

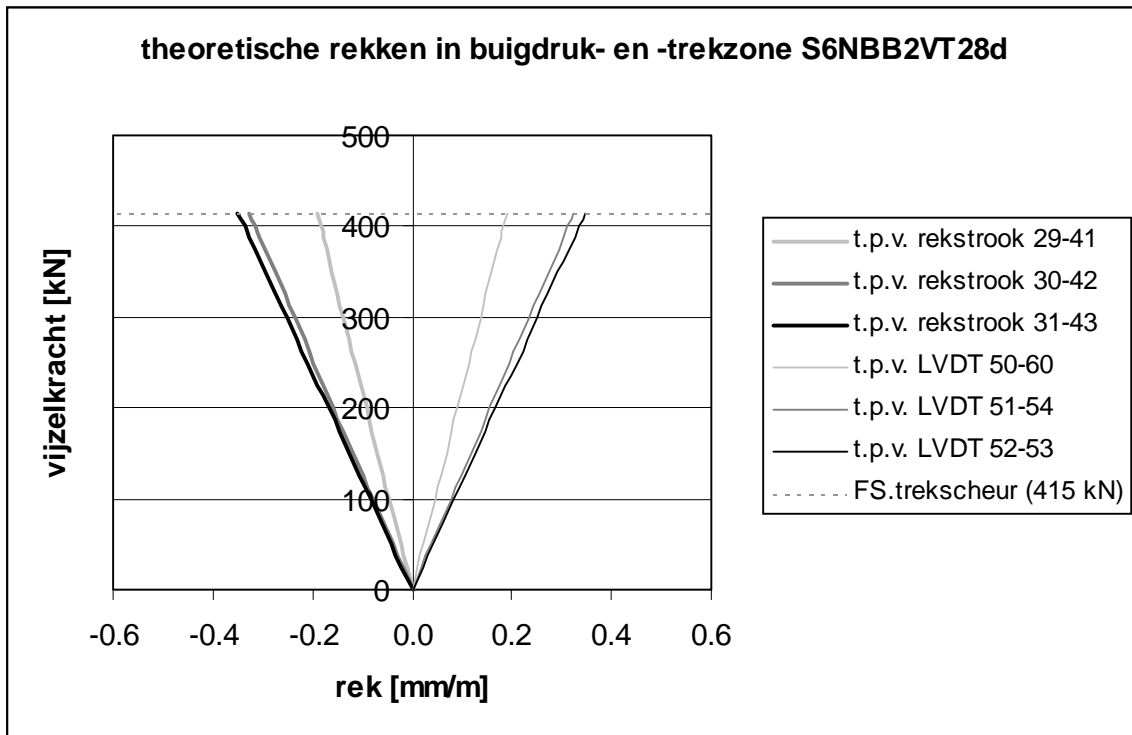
- De theoretische horizontale (hoofd)rekken ter plekke van de rekstroken (in de voorgetrokken buigdrukzone) en van de LVDT's (in de voorgedrukte buigtrekzone)



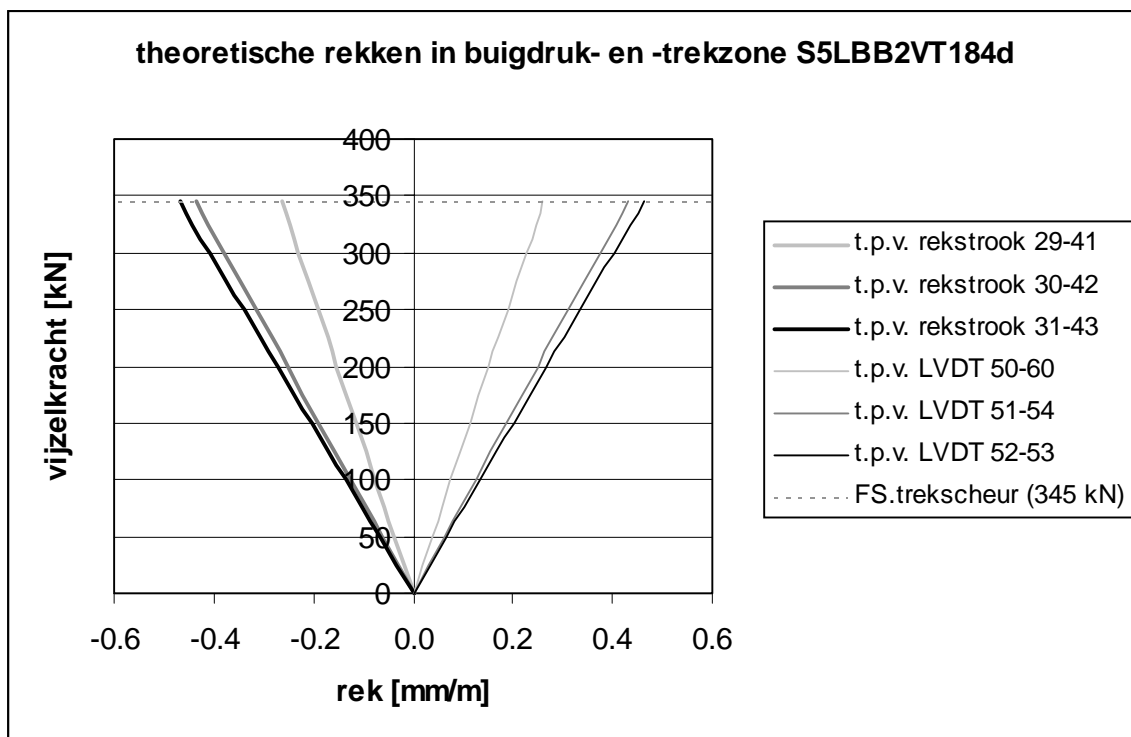
grafiek B18.1



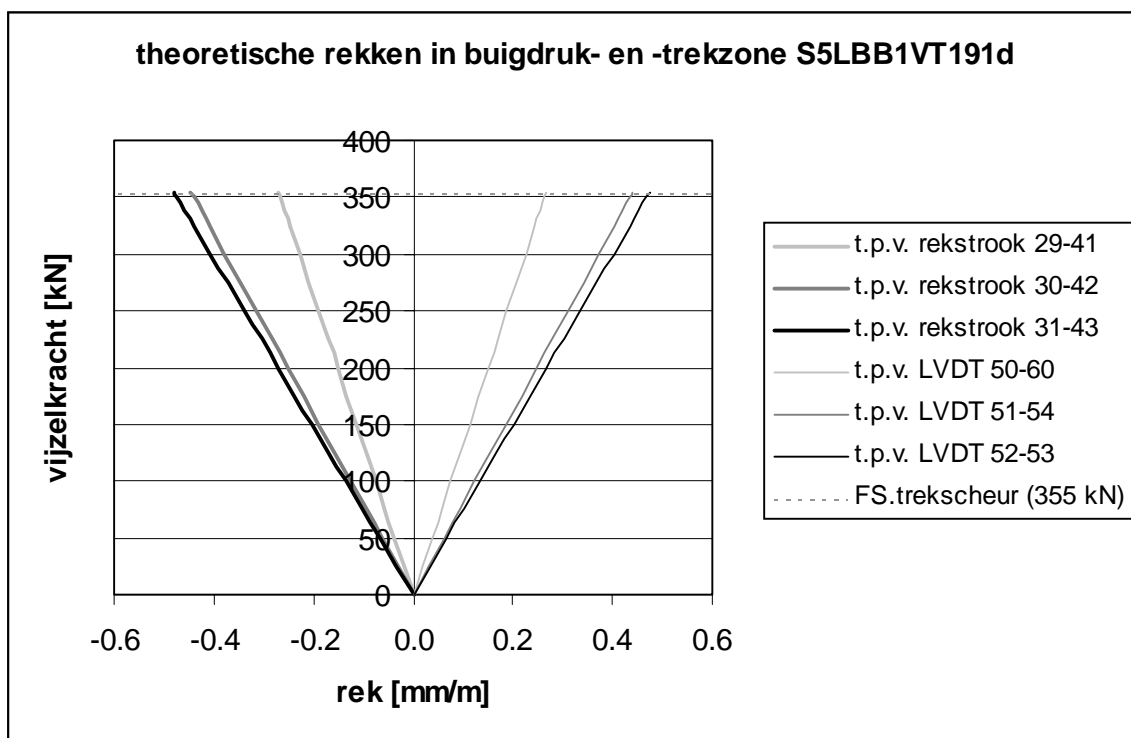
grafiek B18.2



grafiek B18.3



grafiek B18.4



grafiek B18.5

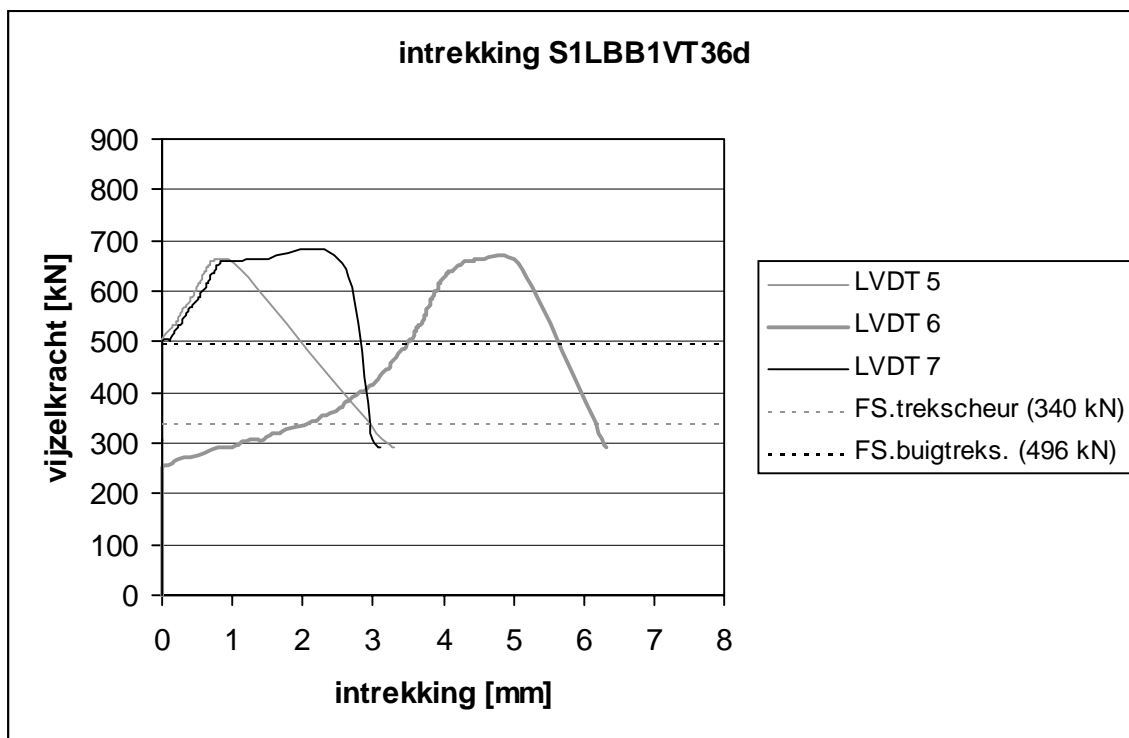
Bijlage 19: Intrekken van de voorspanstrengen

In deze bijlage zijn per dwarskrachtproef te zien:

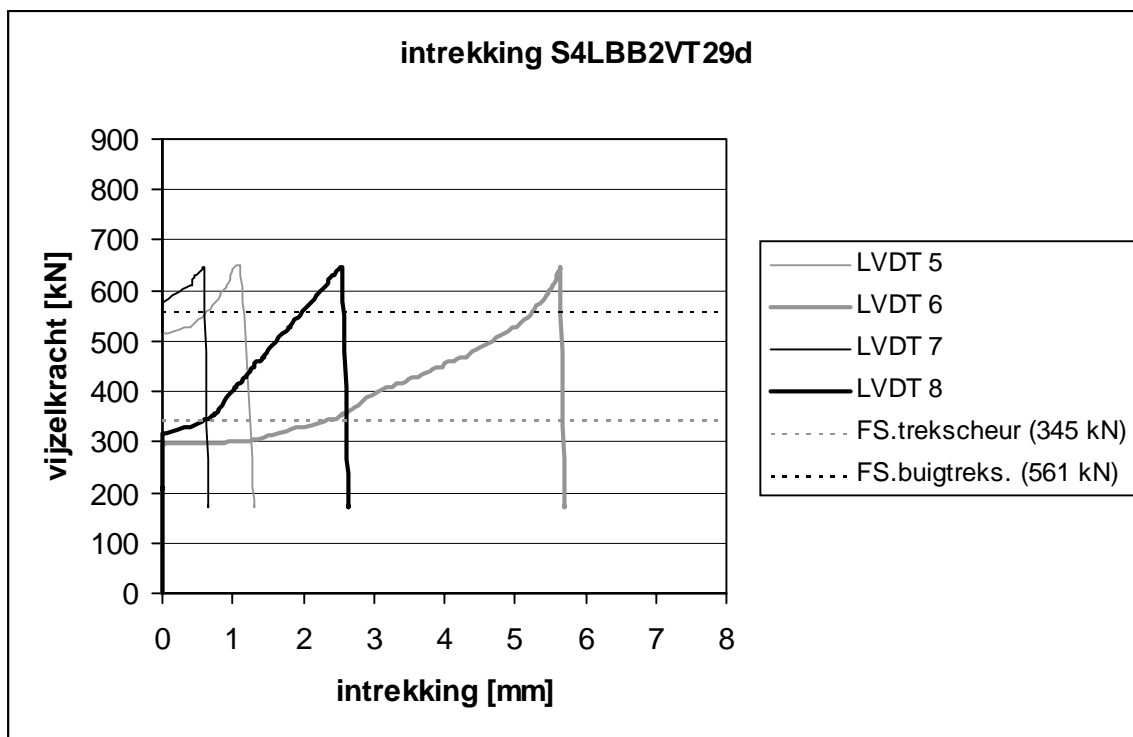
- Het intrekken van enkele voorspanstrengen aan de kop aan de passieve zijde van de balk (de meetpunten 5 tot en met 8).

Bovendien is in de grafieken weergegeven:

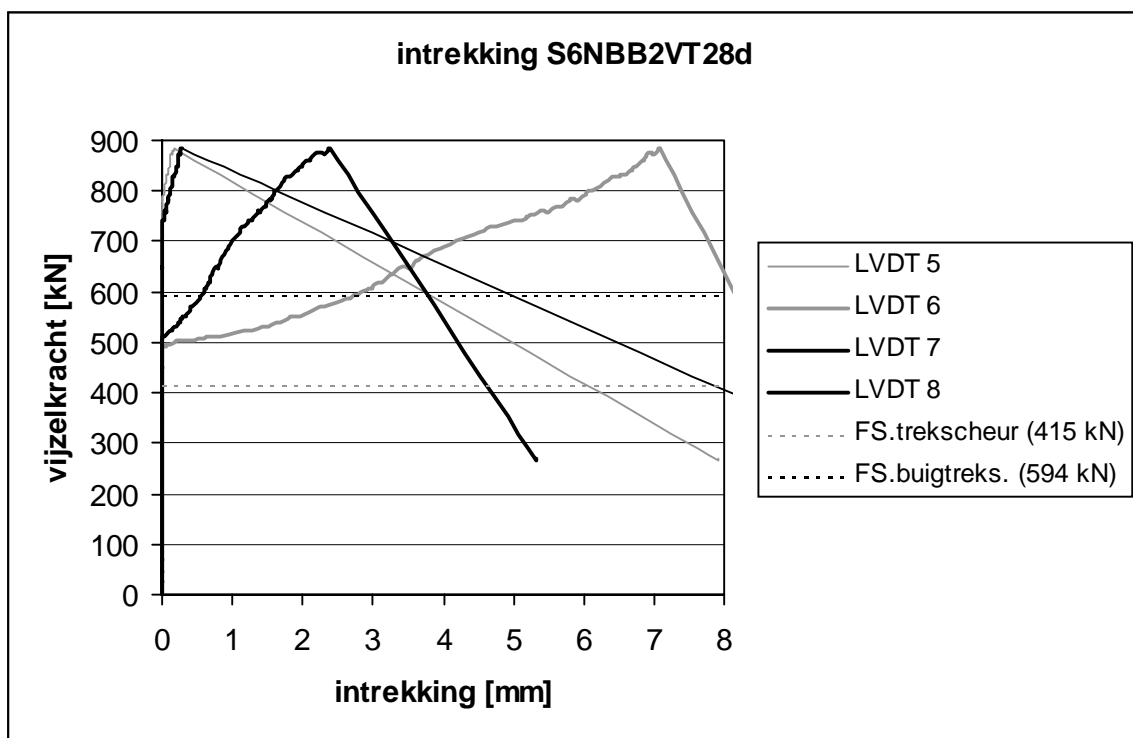
- De vijzelkracht waarbij theoretisch de eerste trekscheuren ontstaan, $F_{S,trekscheur}$ (zie tabel 4.15)
- De vijzelkracht waarbij theoretisch de eerste buigtrekscheuren ontstaan, $F_{S,buigtrekscheur}$ (zie tabel 4.15)



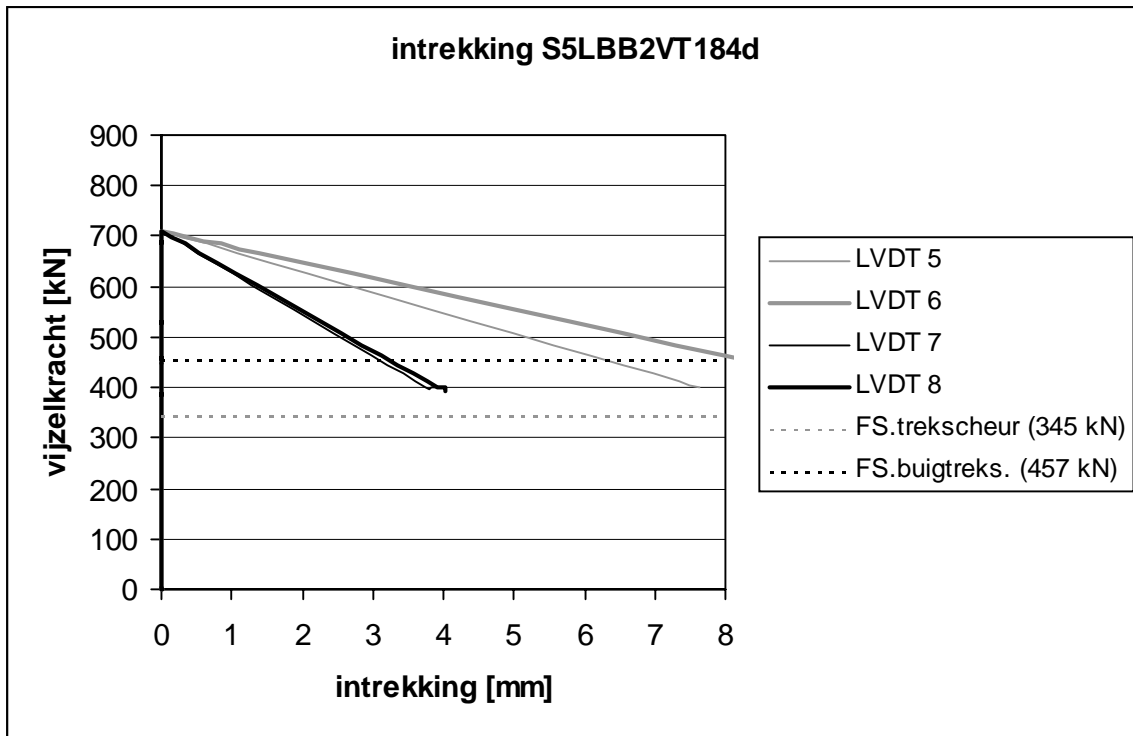
grafiek B19.1



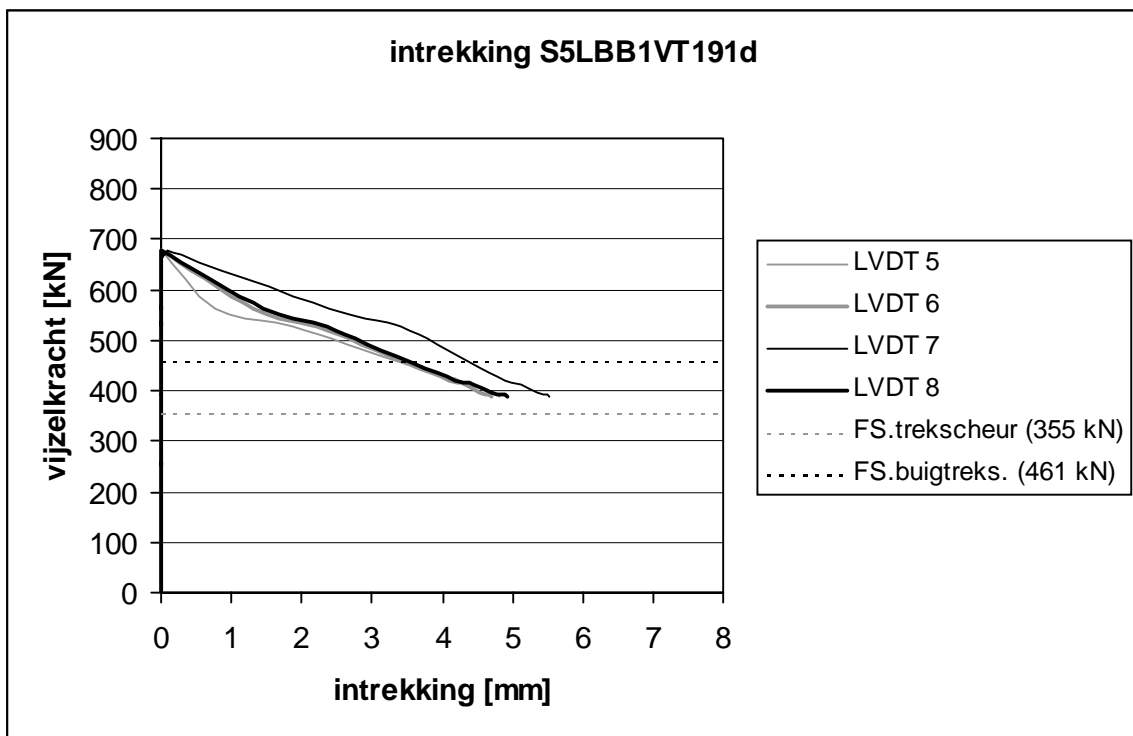
grafiek B19.2



grafiek B19.3



grafiek B19.4



grafiek B19.5

Bijlage 20: Doorbuiging

In deze bijlage zijn per dwarskrachtproef te zien:

- De doorbuiging van de balk in het midden van de overspanning en onder de vijzel.

Bovendien is in de grafieken met de volgende termen weergegeven:

theorie gem: Het gemiddelde van de theoretisch doorbuiging in het midden van de overspanning en onder de vijzel tot aan het ontstaan van de eerste theoretische trekscheuren. Deze twee doorbuigingen verschillen nl. erg weinig van elkaar (zie bijlage 16).

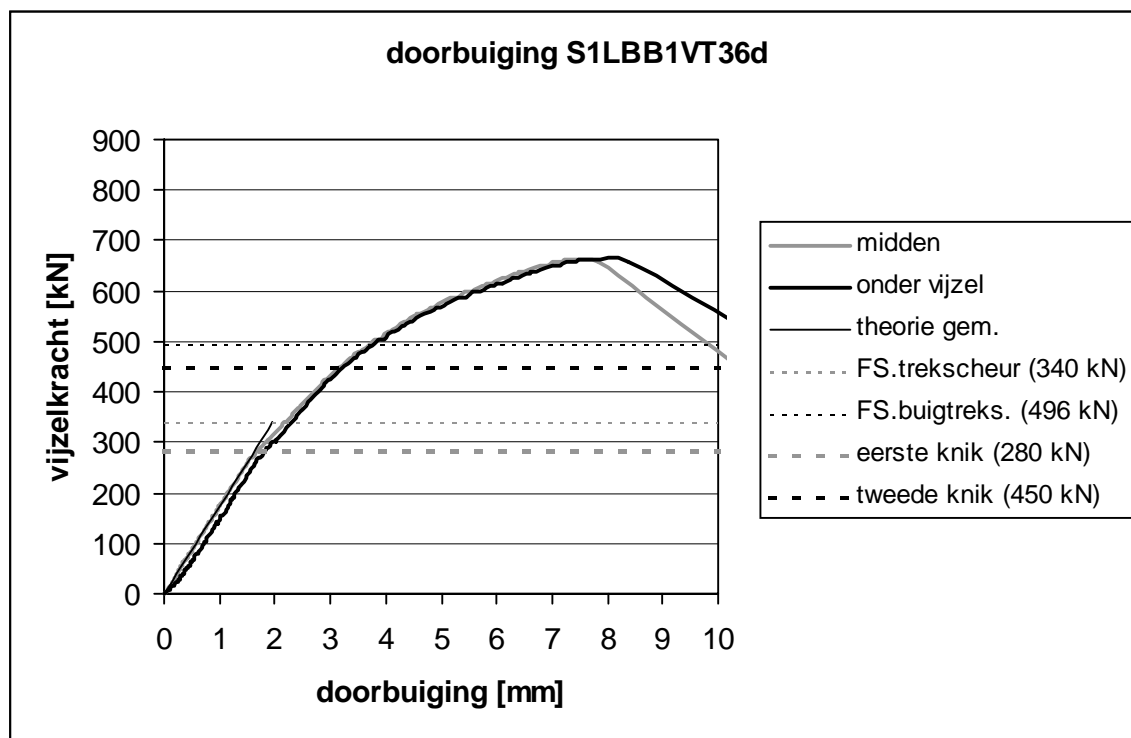
$F_{S.trekscheur}$: De vijzelkracht waarbij theoretisch de eerste trekscheuren ontstaan (zie tabel 4.15)

$F_{S.buigtrekscheur}$: De vijzelkracht waarbij theoretisch de eerste buigtrekscheuren ontstaan (zie tabel 4.15)

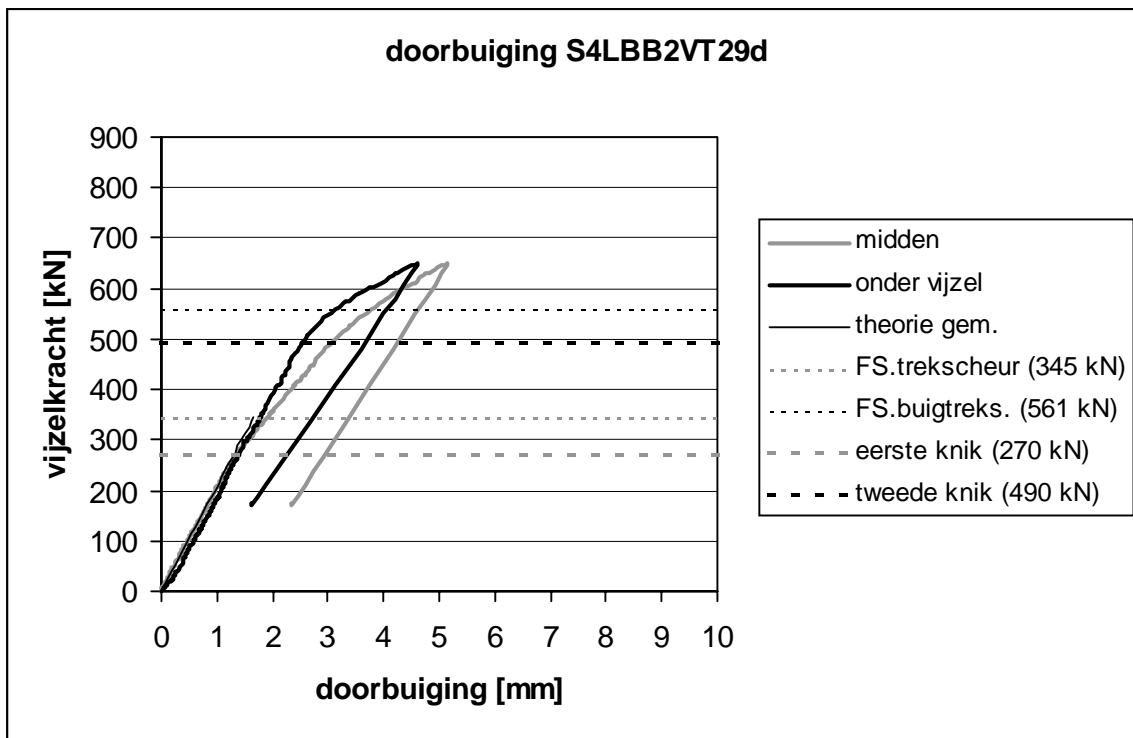
eerste knik: De vijzelkracht waarbij de grafieken de eerste knik vertonen

tweede knik: De vijzelkracht waarbij de grafieken de tweede knik vertonen

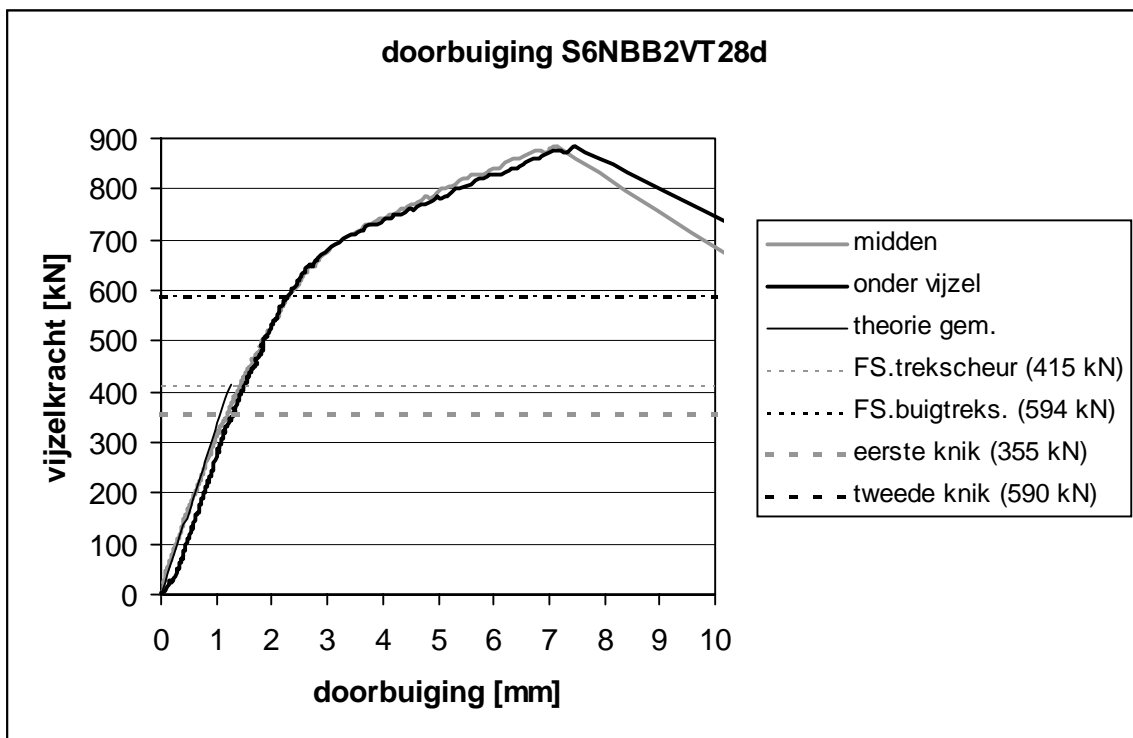
De waarden van de vijzelkracht waarbij de knikken optreden zijn niet altijd exact te bepalen!



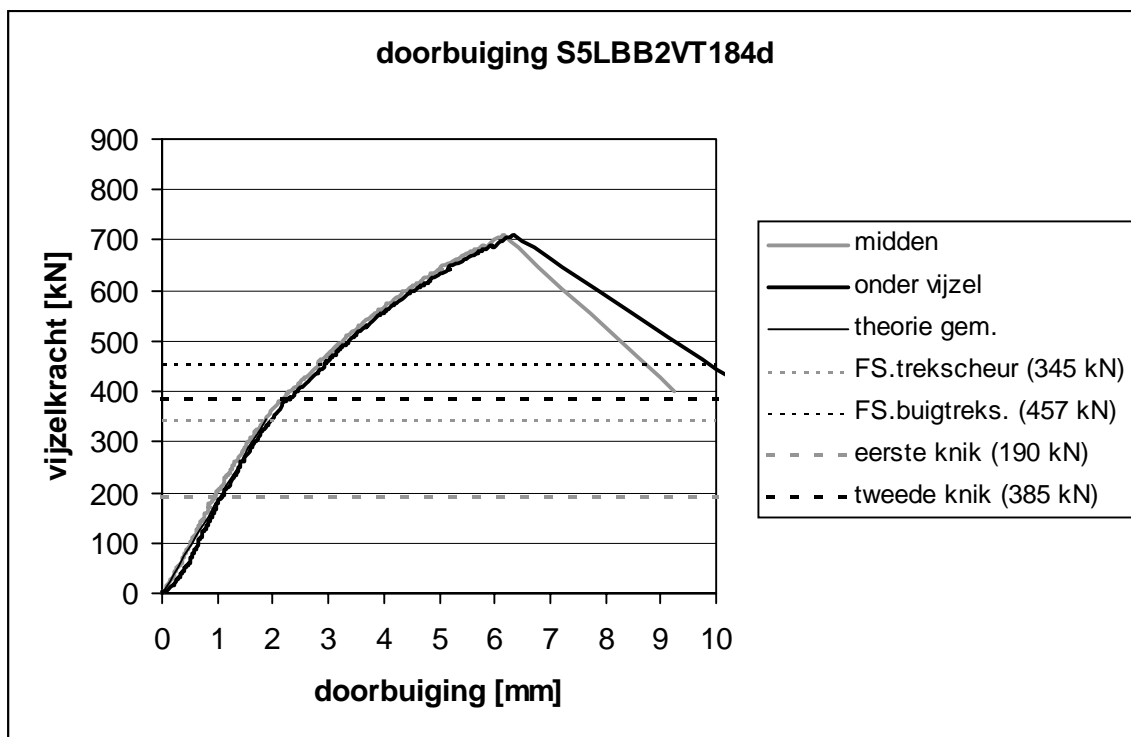
grafiek B20.1



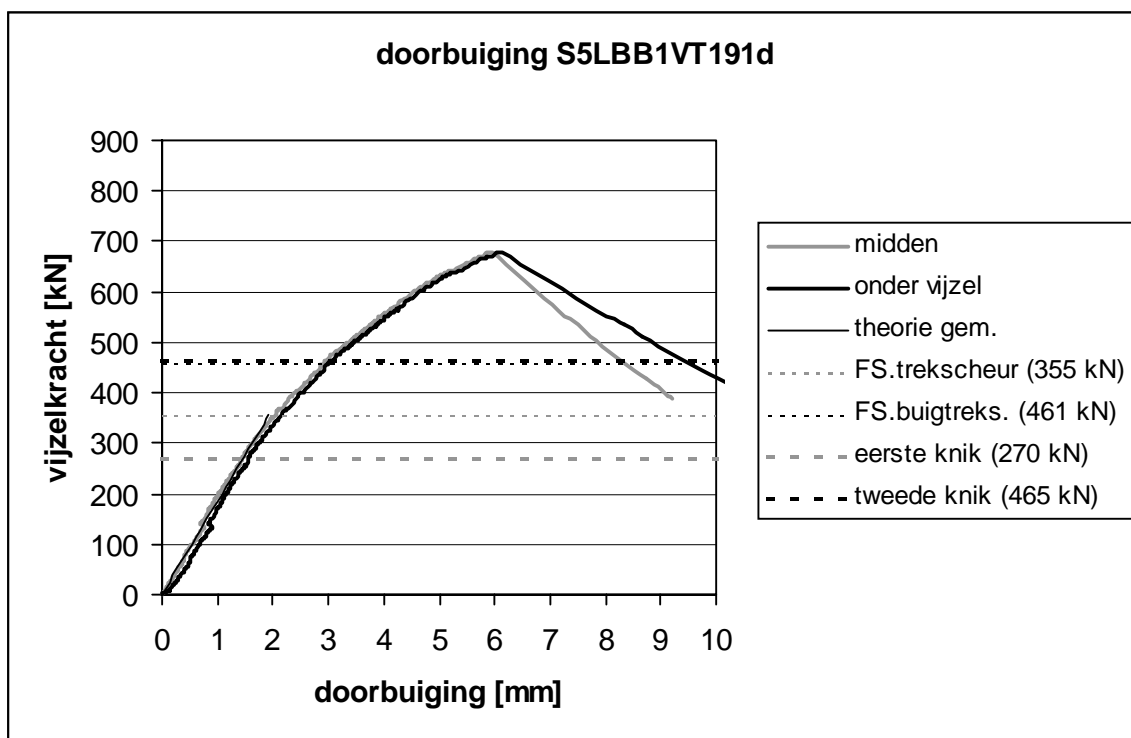
grafiek B20.2



grafiek B20.3



grafiek B20.4



grafiek B20.5

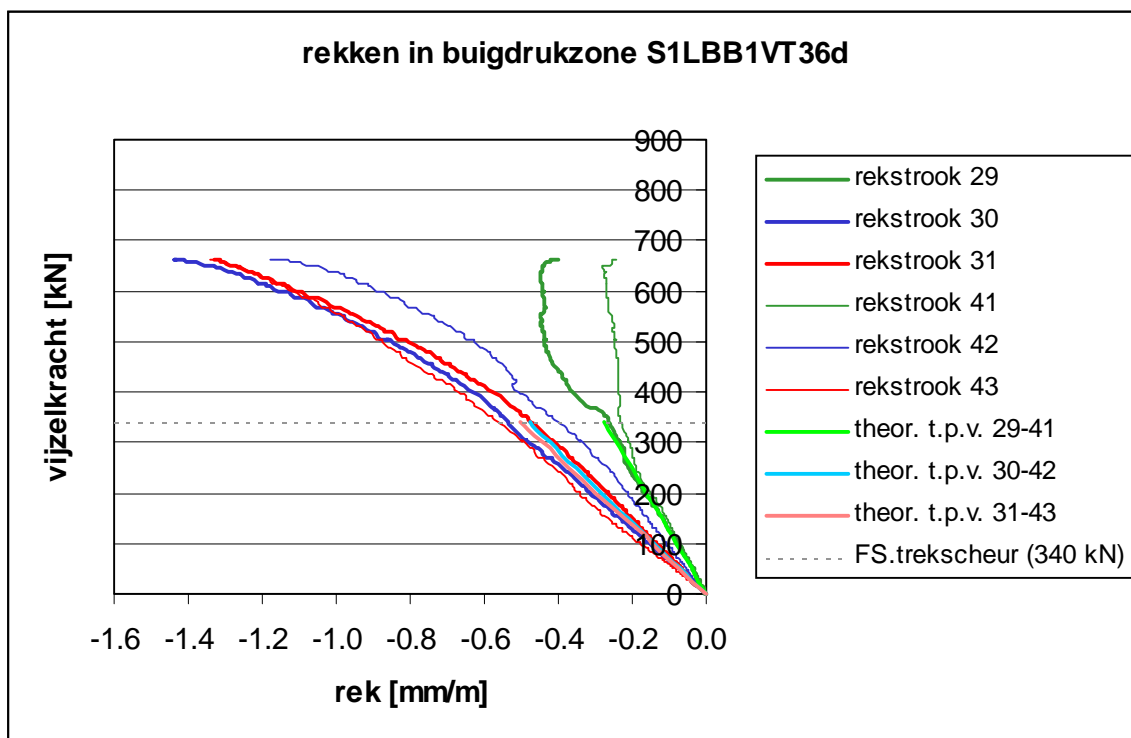
Bijlage 21: Rekken in de buigdruk- en de buigtrekzone

In deze bijlage zijn per dwarskrachtproef te zien:

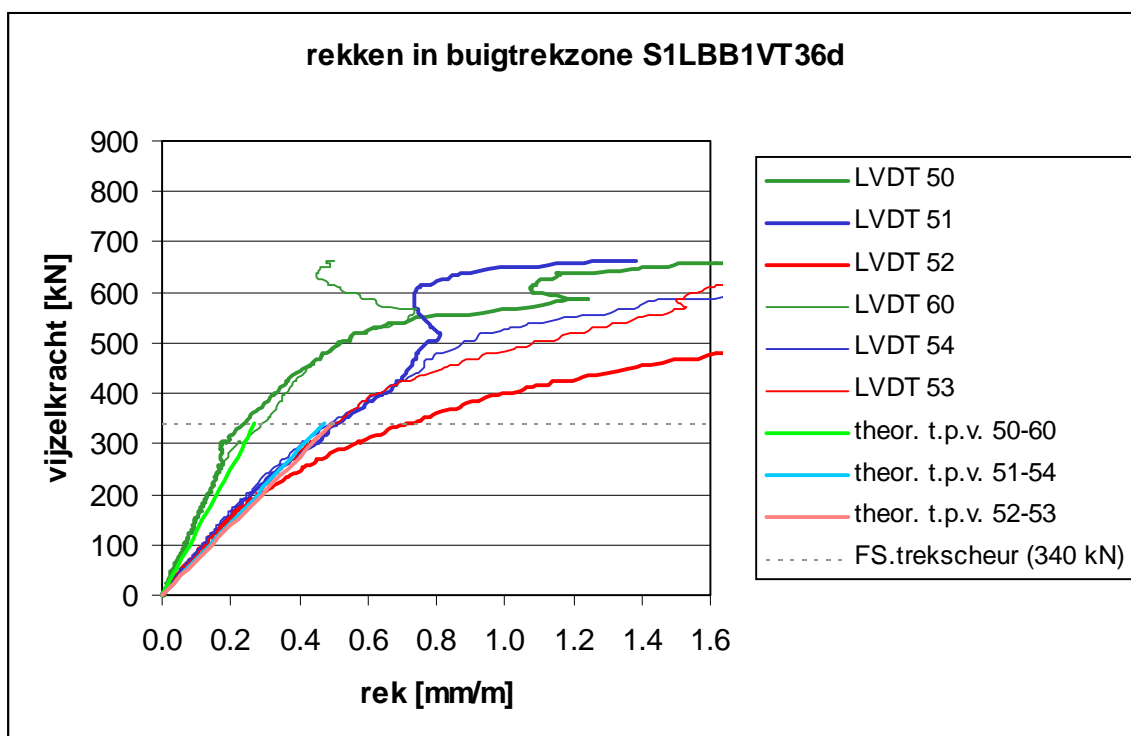
- De horizontale rekken ter plekke van de rekstroken (in de voorgetrokken buigdrukzone) en van de LVDT's (in de voorgedrukte buigtrekzone)

Bovendien is in de grafieken weergegeven:

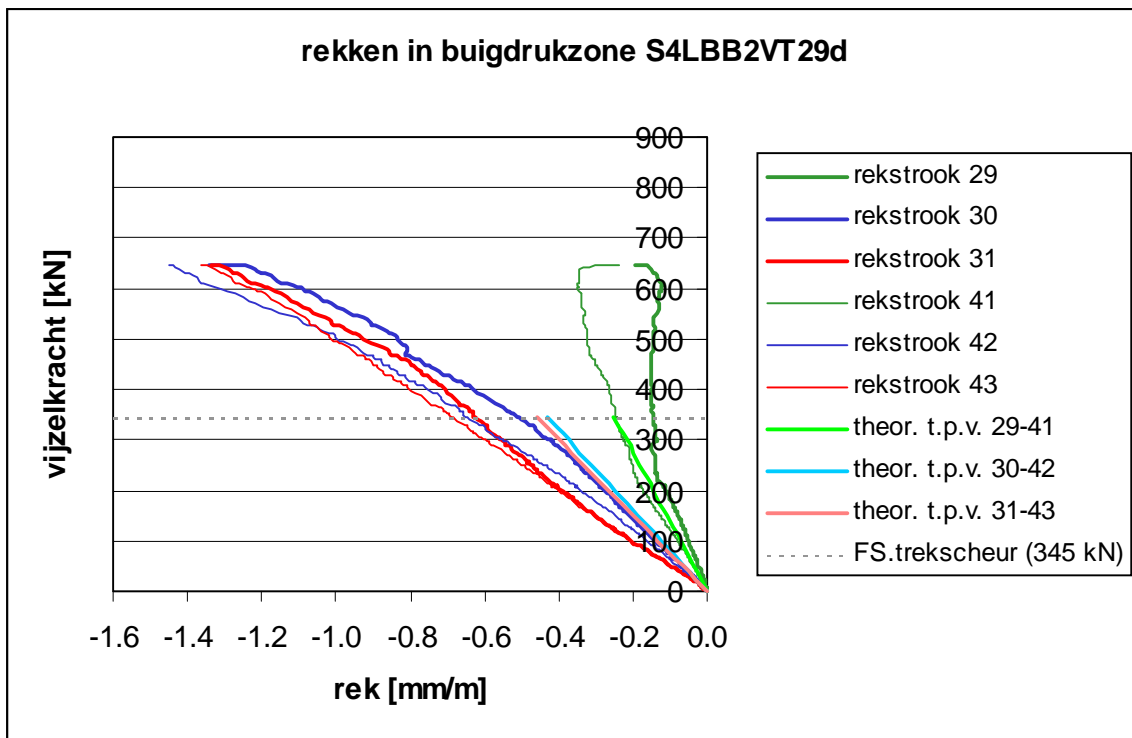
- De theoretische horizontale (hoofd)rekken ter plekke van de rekstroken (in de voorgetrokken buigdrukzone) en van de LVDT's (in de voorgedrukte buigtrekzone) tot aan het ontstaan van de eerste theoretische trekscheuren (zie bijlage 18)



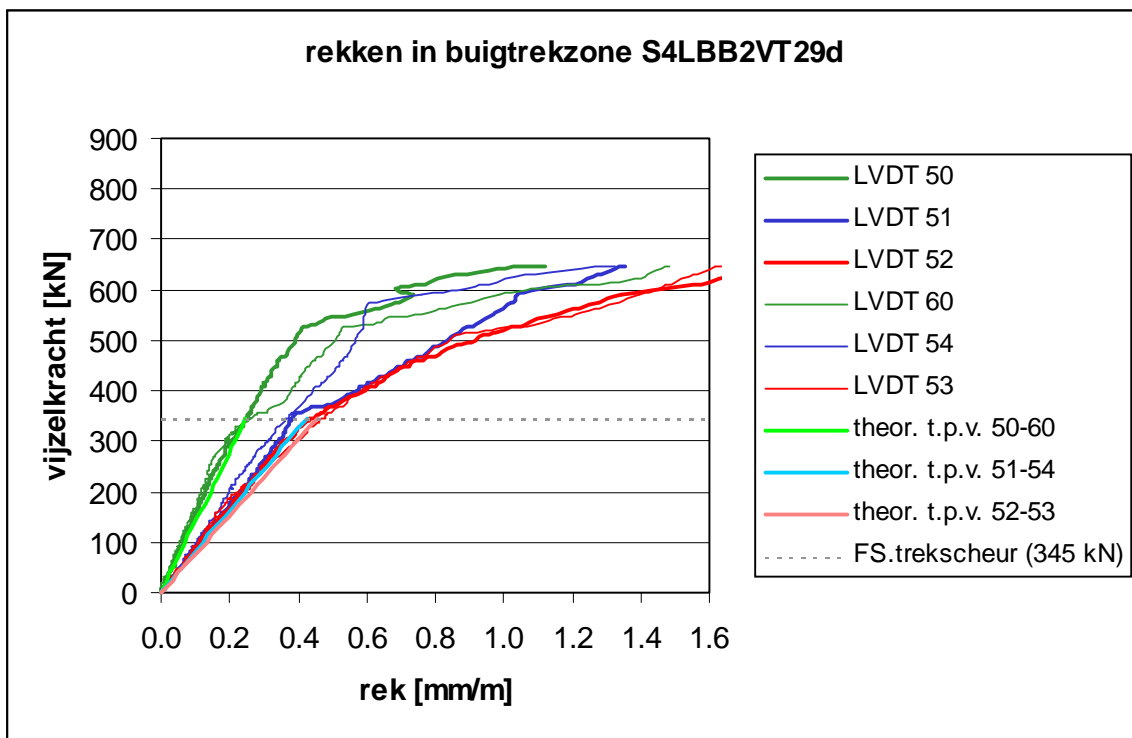
grafiek B21.1



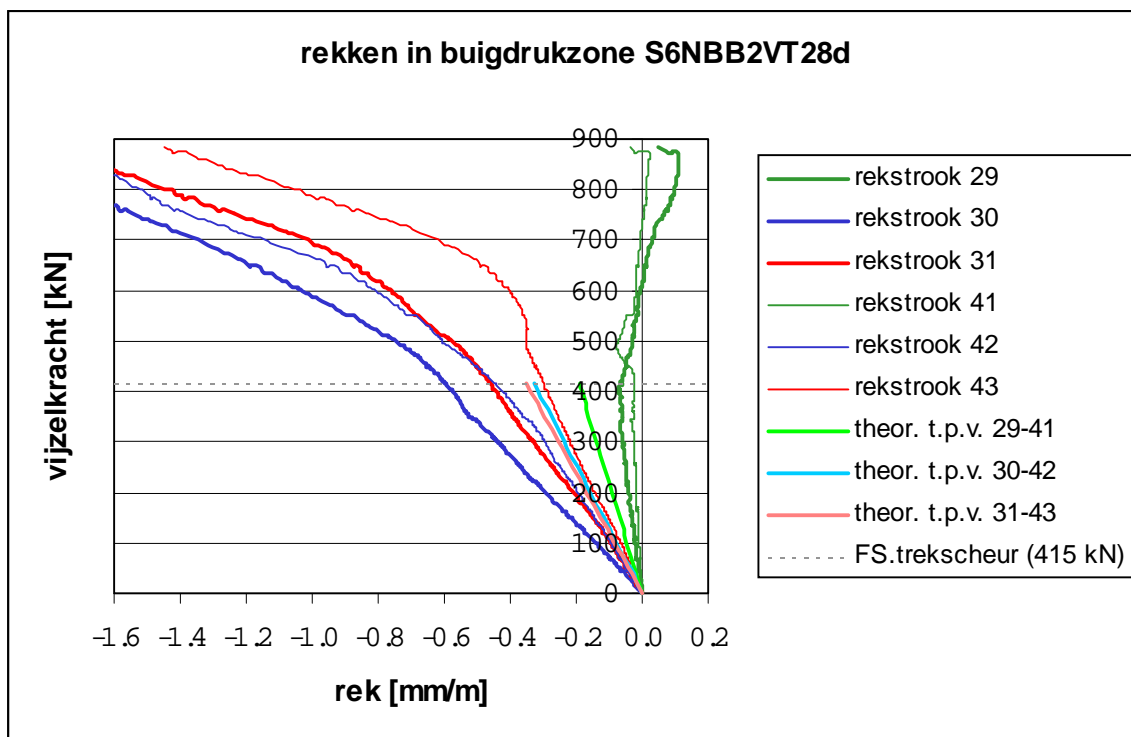
grafiek B21.2



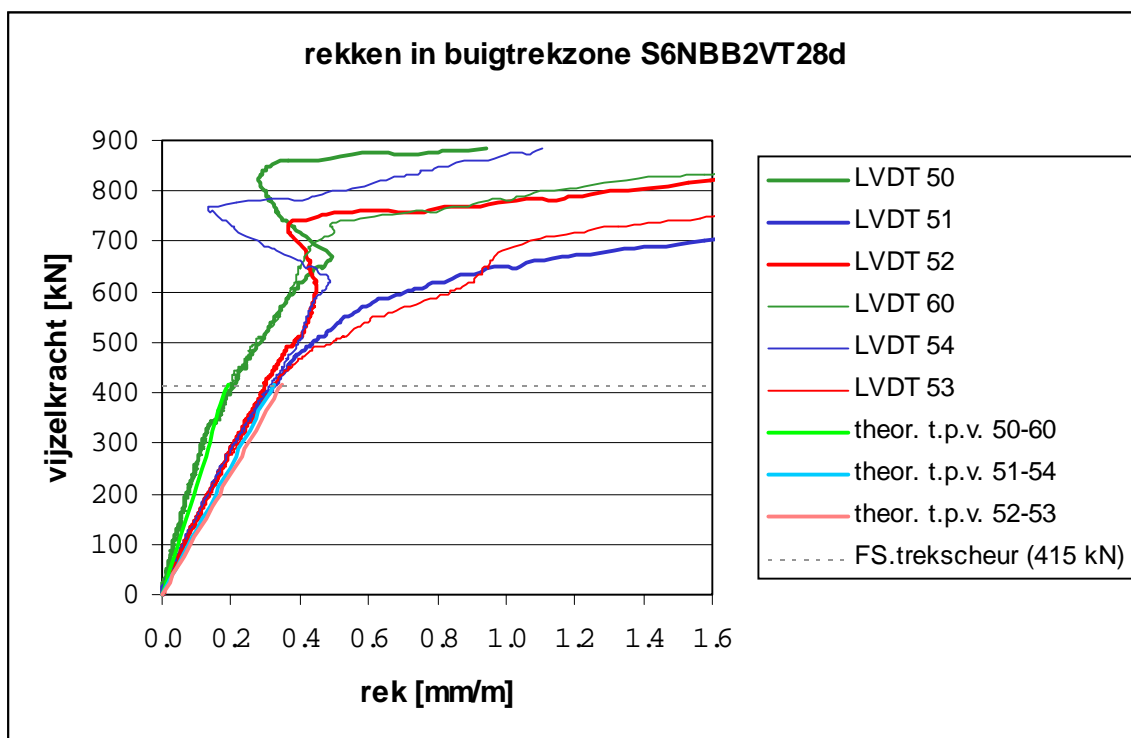
grafiek B21.3



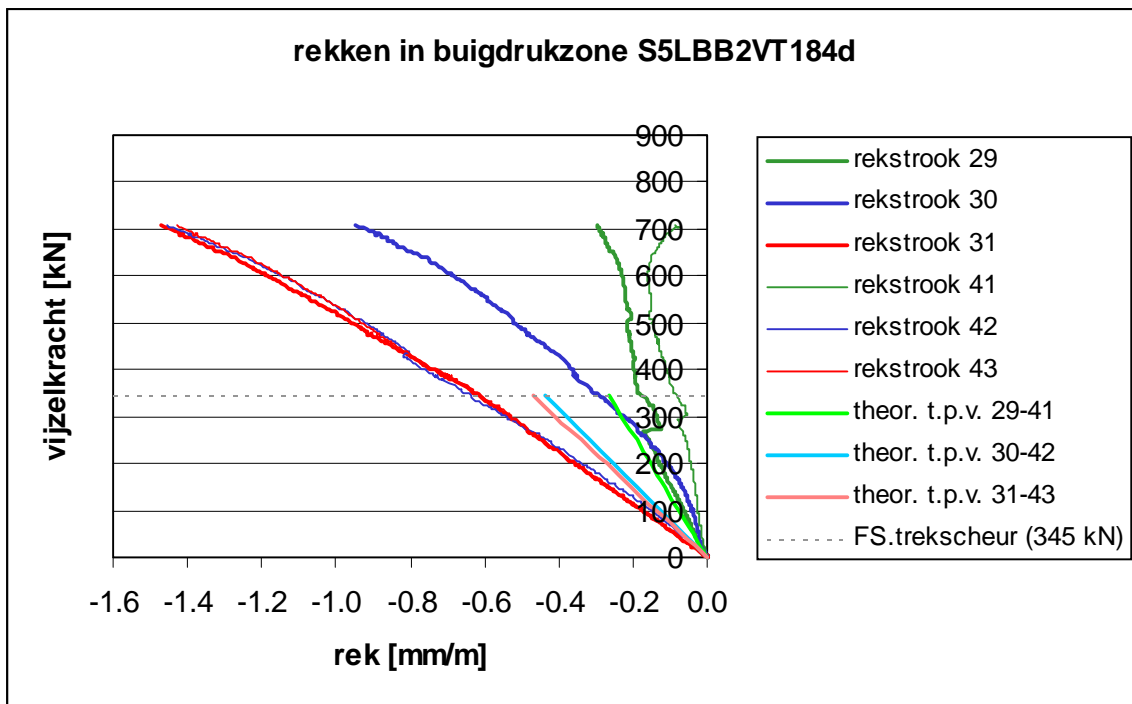
grafiek B21.4



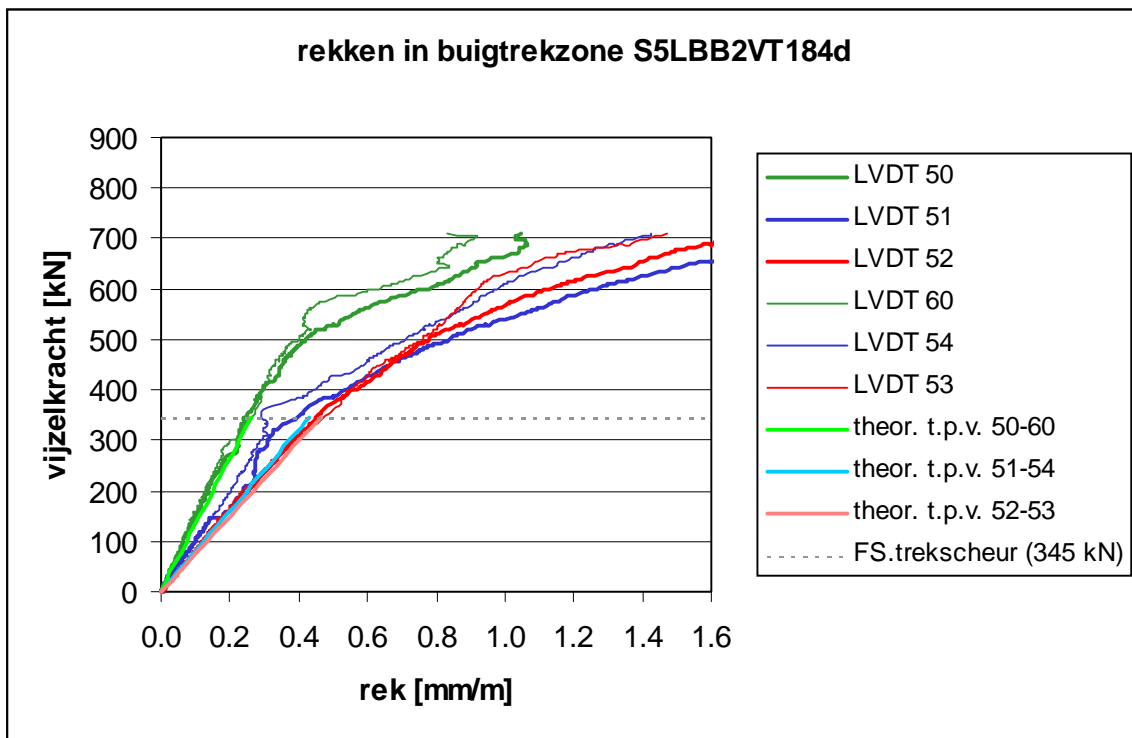
grafiek B21.5



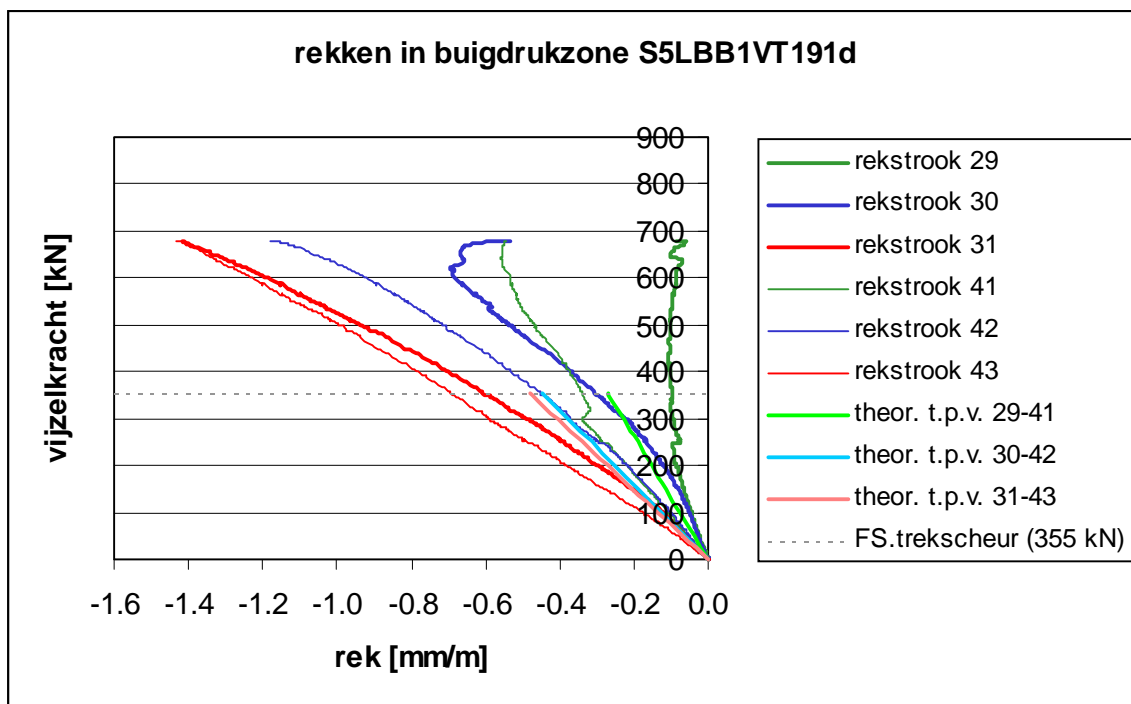
grafiek B21.6



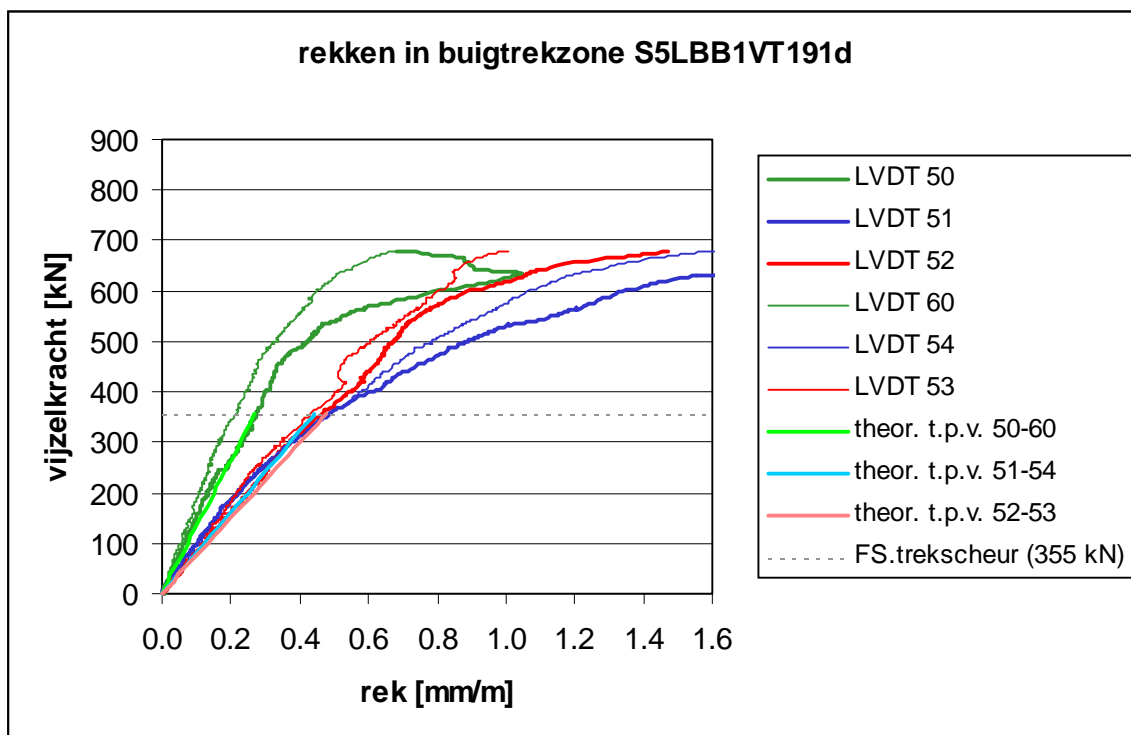
grafiek B21.7



grafiek B21.8



grafiek B21.9



grafiek B21.10

Bijlage 22: Bepaling E-modulus tijdens de wringproeven

B22.1 Algemeen

Zoals in paragraaf B10.1.1 al gezegd is, wordt de drukkracht op de prisma's opgevoerd tot de spanning in het beton ongeveer 40% van de gemiddelde kubusdruksterkte bedraagt.

De gemiddelde kubusdruksterkte van het Lichtgewicht Beton van de sorten S2LB en S3LB bedraagt tijdens de wringproeven ongeveer 70 N/mm^2 . De drukkracht kan dus opgevoerd worden tot:

$$70 * 100 * 100 * 0,40 = 280000 \text{ N}$$

De spanning in het beton bedraagt dan:

$$70 * 0,40 = 28 \text{ N/mm}^2$$

De gemiddelde kubusdruksterkte van het Normaal Beton van stort S6NB bedraagt tijdens de wringproef ongeveer 100 N/mm^2 . De drukkracht kan dus opgevoerd worden tot:

$$100 * 100 * 100 * 0,40 = 400000 \text{ N}$$

De spanning in het beton bedraagt dan:

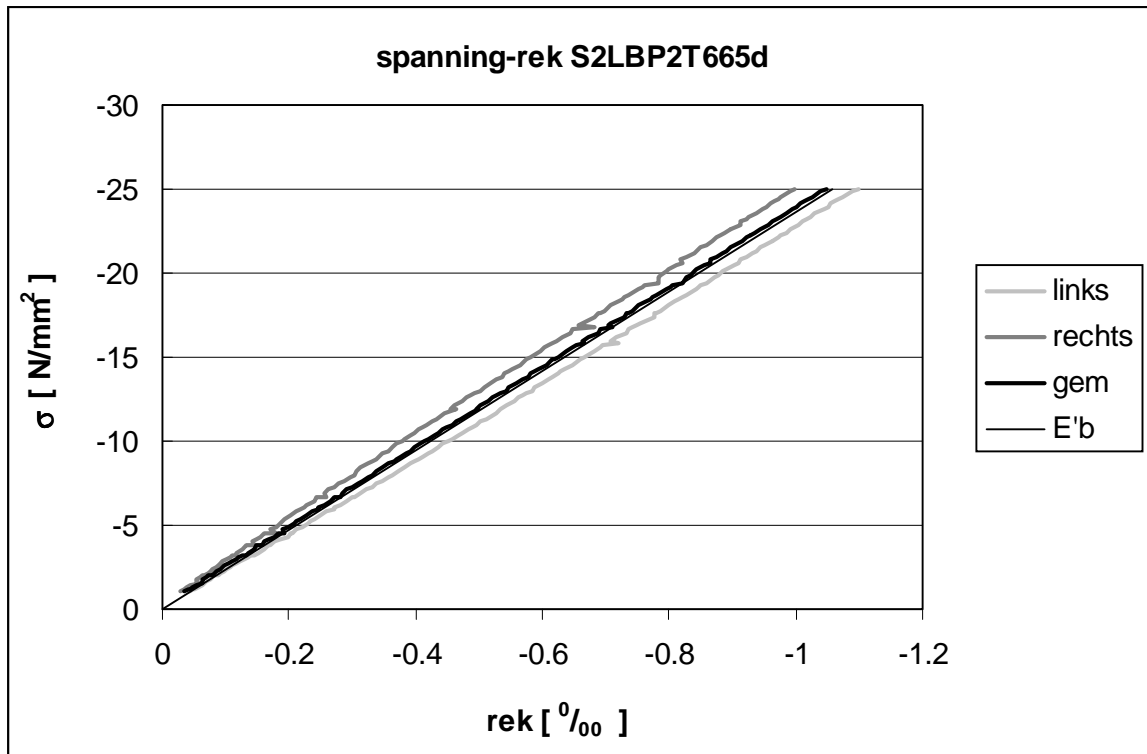
$$100 * 0,40 = 40 \text{ N/mm}^2$$

B22.2 Grafieken

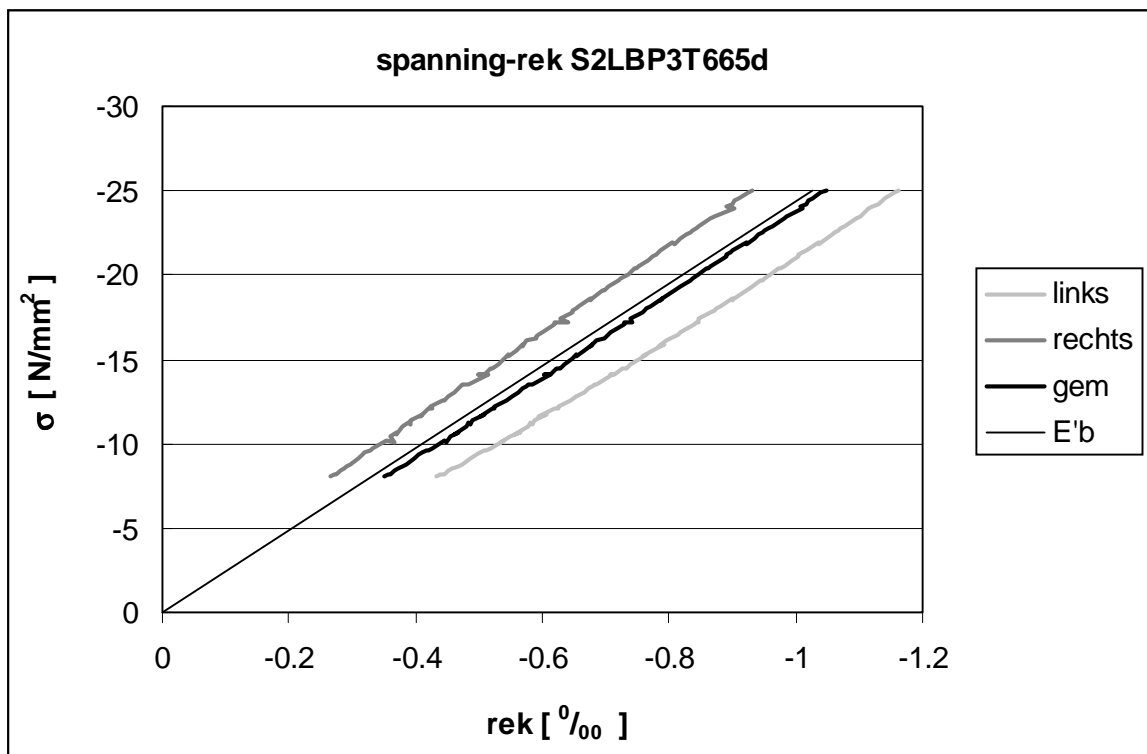
Grafiek B22.1 tot en met grafiek B22.9 tonen per E-modulusmeting de volgende grafieken:

- De spanning in het beton uitgezet tegen de rek aan het linker zijvlak
- De spanning in het beton uitgezet tegen de rek aan het rechter zijvlak
- De spanning in het beton uitgezet tegen de gemiddelde rek
- De richting van de hieruit bepaalde E-modulus, E'_b

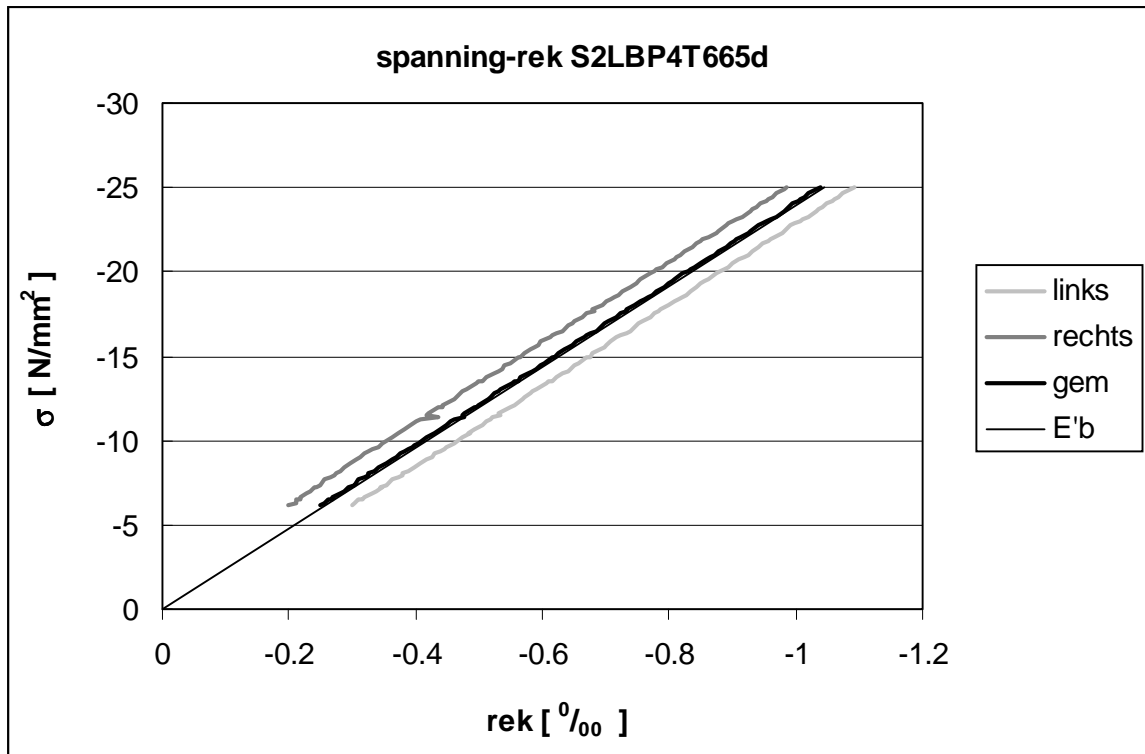
In de grafieken B22.1 tot en met B22.9 worden van de spanning-rek-grafieken alleen de trajecten getoond waarbij de spanning en de rekken geleidelijk oplopen. De niet getoonde trajecten lieten bv. zien dat het proefstuk zich in het begin van de meting nog moest zetten.



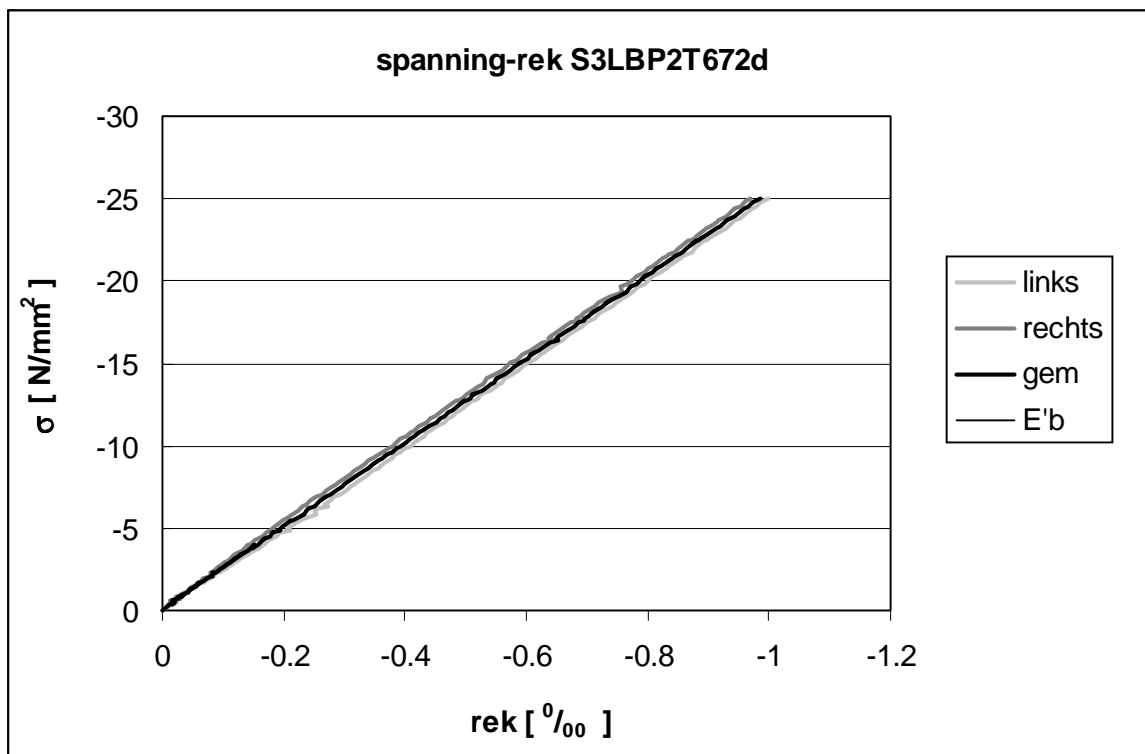
grafiek B22.1



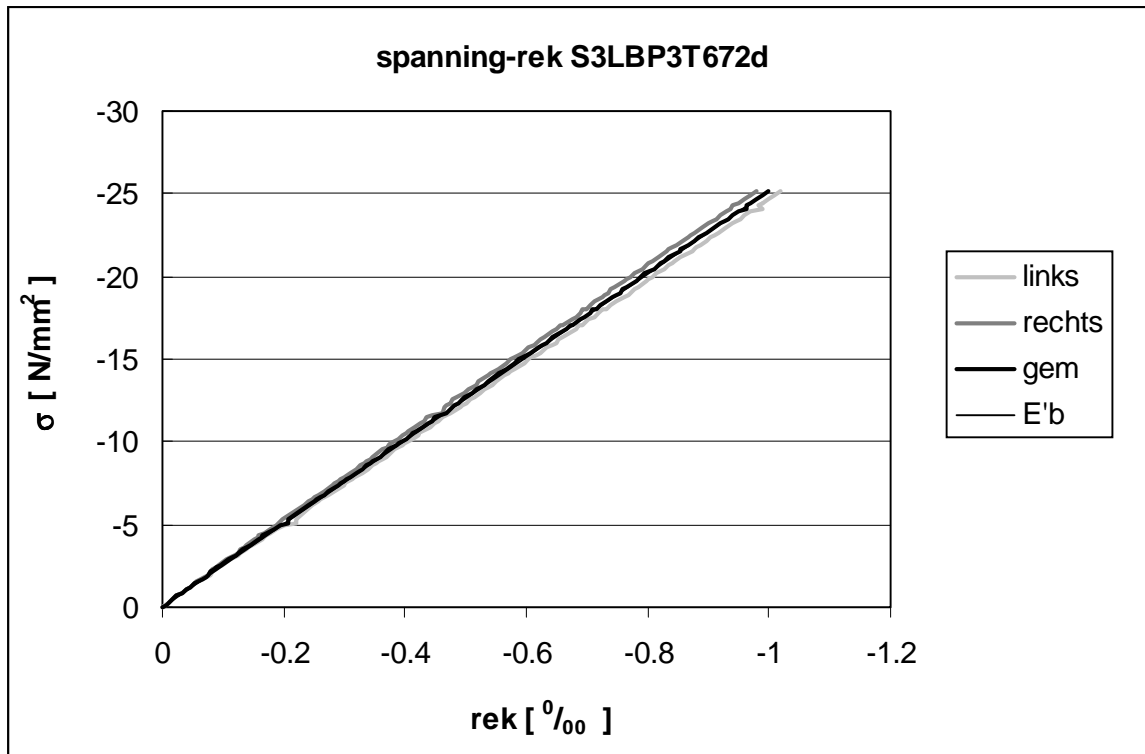
grafiek B22.2



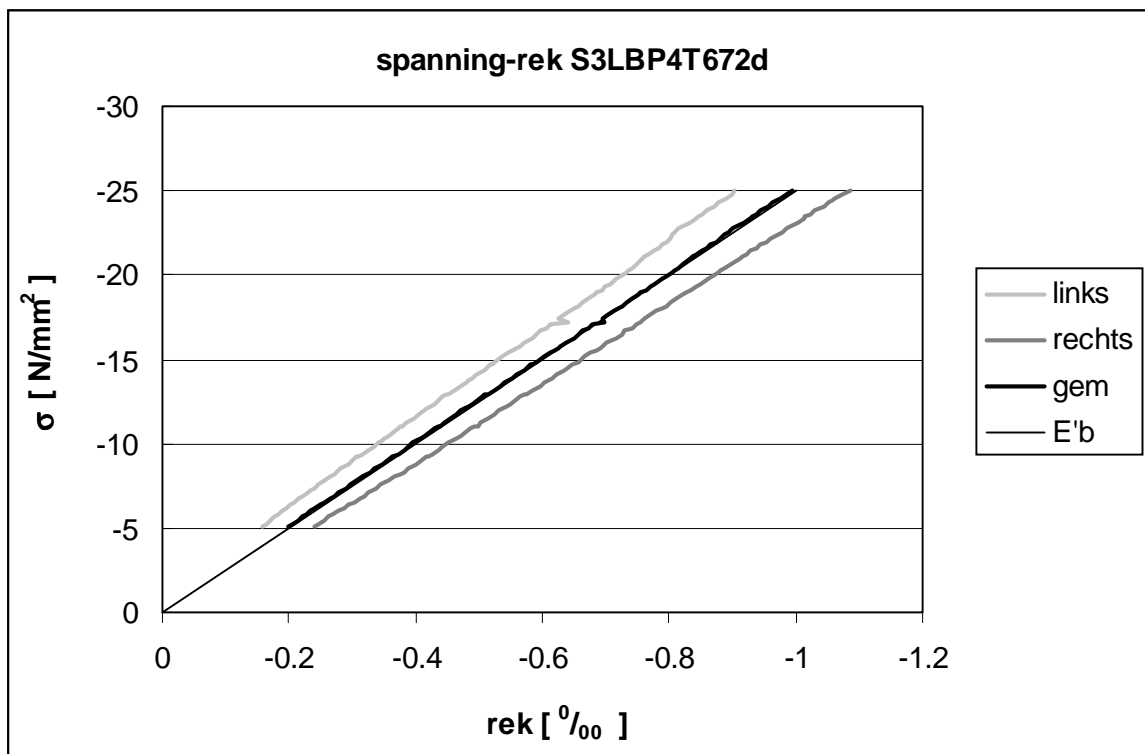
grafiek B22.3



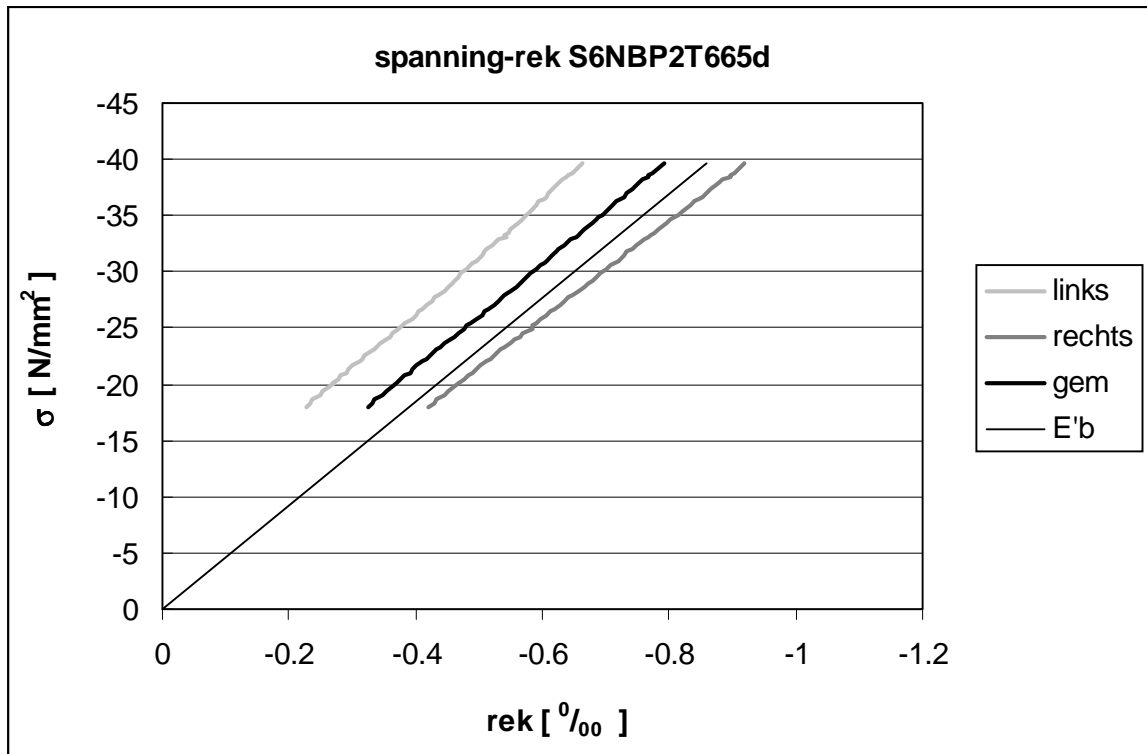
grafiek B22.4



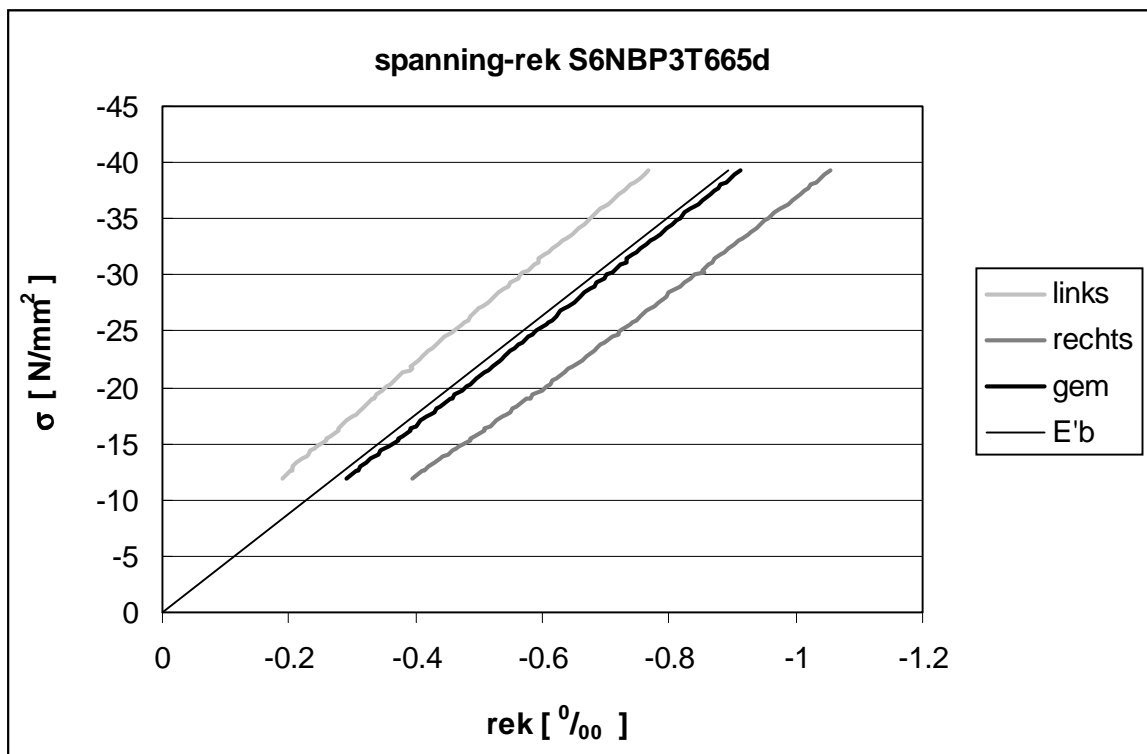
grafiek B22.5



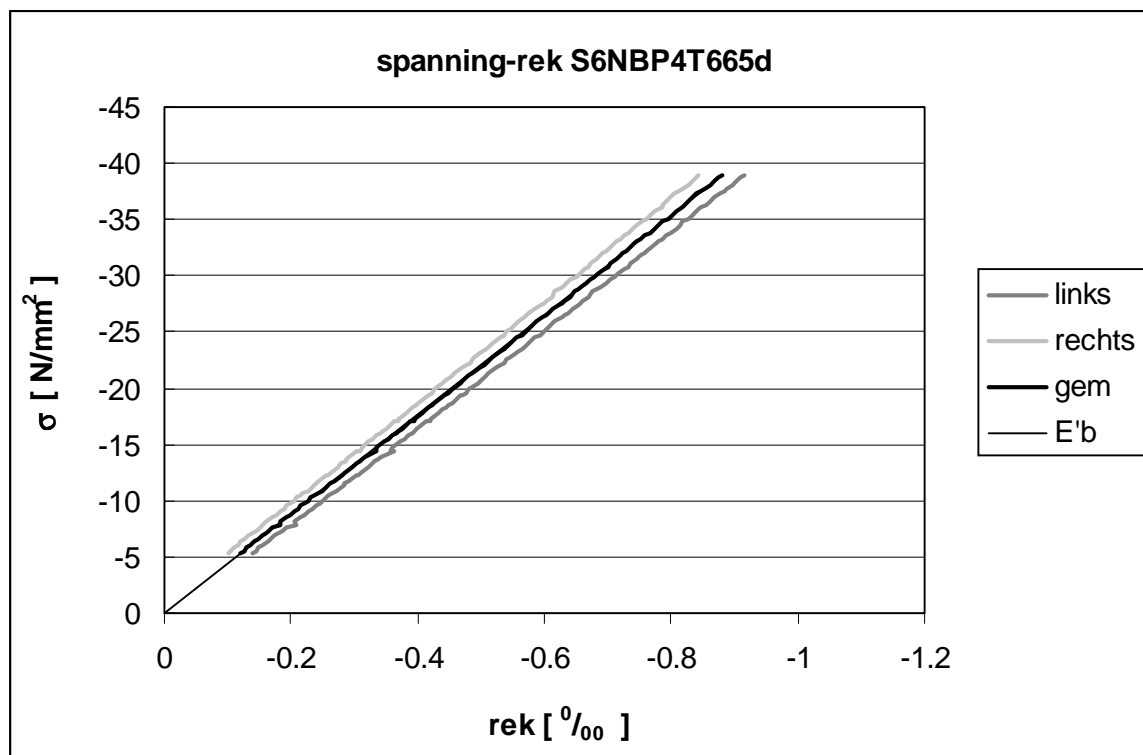
grafiek B22.6



grafiek B22.7



grafiek B22.8



grafiek B22.9

B22.3 E-modulus tijdens de wringproeven

Tabel B22.1 toont per E-modulusmeting tijdens een wringproef de bepaalde E-modulus, E'_b . Ook toont de tabel de gemiddelde E-modulus tijdens een bepaalde wringproef, E'_{bm} .

E-modulusmeting	E'_b	E'_{bm}
	[N/mm ²]	[N/mm ²]
S2LBP2T665d	23665	23978
S2LBP3T665d	24347	
S2LBP4T665d	23923	
S3LBP2T672d	25400	25211
S3LBP3T672d	25171	
S3LBP4T672d	25062	
S6NBP2T665d	46197	44822
S6NBP3T665d	43947	
S6NBP4T665d	44323	

tabel B22.1 E-moduli tijdens de wringproeven

Bijlage 23: Berekening werkelijke werkvoorspanning tijdens de wringproeven

B23.1 Spanningsverschil in de voorspanwapening t.g.v. krimp en kruip in het beton

Zie paragraaf B14.1

B23.2 Spanningsverschil in de voorspanwapening t.g.v. relaxatie van het voorspanstaal

Zie paragraaf B14.2

B23.3 Werkvoorspanning in de voorspanwapening

Tabel B23.1 toont de waarden van ϕ , ε'_r en n_t .

grootheid	verm.fct.	S2LBB2TT660d	S2LBB1TT667d	S3LBB2TT672d	S6NBB1TT665d
ϕ		2.2	2.2	2.2	1.9
ε'_r	$\cdot 10^{-3}$	0.27	0.27	0.27	0.19
n_t		3	3	3	3

tabel B23.1 Waarden van verschillende grootheden

De waarden van de verschillende relevante grootheden op verschillende hoogten in de doorsnede zijn te vinden in tabel B23.2 tot en met tabel B23.4. Ook de waarde van de werkvoorspanning in de voorspanwapening, σ_{pw} , op verschillende hoogten staat in deze tabellen.

S2LBB2TT660 en S2LBB1TT667d									
Z	Z	σ_{pi}	σ_{bi}	$\Delta\sigma_{pkr}$	σ_{pi}/f_{purep}	$\Delta\sigma_{prel}/\sigma_{pi}$	$\Delta\sigma_{prel}$	$\Delta\sigma_p$	σ_{pw}
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
z_b	-249.7		0.93						
z_1	-208.7	191.56	-0.77	-62.75	10.3	0	0	0	128.81
z_2	-185.7	181.08	-1.72	-78.11	9.7	0	0	0	102.97
z_3	-144.7	162.40	-3.41	-105.46	8.7	0	0	0	56.94
z_4	186.3	911.58	-17.09	-326.21	49.0	0.95	8.66	-2.46	582.90
z_5	209.3	901.10	-18.04	-341.55	48.4	0.92	8.31	-2.01	557.54
z_0	250.3		-19.73						

tabel B23.2 Waarden van verschillende grootheden op verschillende hoogten in de doorsnede voor wringproef S2LBB2TT660d en S2LBB1TT667d

S3LBB2TT672d									
Z	Z	σ_{pi}	σ_{bi}	$\Delta\sigma_{pkr}$	σ_{pi}/f_{purep}	$\Delta\sigma_{prel}/\sigma_{pi}$	$\Delta\sigma_{prel}$	$\Delta\sigma_p$	σ_{pw}
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
z_b	-249.7		0.92						
z_1	-208.7	191.41	-0.77	-62.80	10.3	0	0	0	128.61
z_2	-185.7	180.80	-1.72	-78.19	9.7	0	0	0	102.61
z_3	-144.7	161.90	-3.40	-105.60	8.7	0	0	0	56.30
z_4	186.3	909.25	-17.04	-326.89	48.9	0.94	8.59	-2.41	579.95
z_5	209.3	898.64	-17.99	-342.25	48.3	0.92	8.23	-1.96	554.43
z_0	250.3		-19.68						

tabel B23.3 Waarden van verschillende grootheden op verschillende hoogten in de doorsnede voor wringproef S3LBB2TT672d

S6NBB1TT665d									
Z	Z	σ_{pi}	σ_{bi}	$\Delta\sigma_{pkr}$	σ_{pi}/f_{purep}	$\Delta\sigma_{prel}/\sigma_{pi}$	$\Delta\sigma_{prel}$	$\Delta\sigma_p$	σ_{pw}
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
z_b	-249.7		1.14						
z_1	-208.7	195.50	-0.70	-42.77	10.5	0	0	0	152.73
z_2	-185.7	188.83	-1.73	-52.73	10.2	0	0	0	136.09
z_3	-144.7	176.94	-3.57	-70.51	9.5	0	0	0	106.43
z_4	186.3	980.97	-18.45	-213.97	52.7	1.14	11.15	-6.29	760.71
z_5	209.3	974.31	-19.48	-223.95	52.4	1.12	10.90	-5.89	744.47
z_0	250.3		-21.32						

tabel B23.4 Waarden van verschillende grootheden op verschillende hoogten in de doorsnede voor wringproef S6NBB1TT665d

B23.4 Werkvoorspanning in het beton

Voor $\sigma_{bw}(z)$, zie paragraaf B14.4

De waarden van de verschillende krachten en spanningen op verschillende hoogten in de doorsnede zijn te vinden in tabel B23.5 tot en met tabel B23.7. Ook tonen deze tabellen de waarde van $Z_{pw.tot}$.

S2LBB2TT660 en S2LBB1TT667d					
z	z	n_p	σ_{pw}	F_{pw}	σ_{bw}
[-]	[mm]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]
z_b	-249.7				0.74
z_1	-208.7	4	128.81	12.9	-0.33
z_2	-185.7	4	102.97	10.3	-0.94
z_3	-144.7	2	56.94	5.7	-2.02
z_4	186.3	5	582.90	58.3	-10.72
z_5	209.3	6	557.54	55.8	-11.32
z_0	250.3				-12.40
totaal				730.1	
$Z_{pw.tot}$	142.8				

tabel B23.5 Werkelijke werkvoorspanningen en werkvoorspankrachten op verschillende hoogten in de doorsnede tijdens wringproef S2LBB2TT660d en S2LBB1TT667d

S3LBB2TT672d					
z	z	n_p	σ_{pw}	F_{pw}	σ_{bw}
[-]	[mm]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]
z_b	-249.7				0.74
z_1	-208.7	4	128.61	12.9	-0.34
z_2	-185.7	4	102.61	10.3	-0.94
z_3	-144.7	2	56.30	5.6	-2.01
z_4	186.3	5	579.95	58.0	-10.66
z_5	209.3	6	554.43	55.4	-11.26
z_0	250.3				-12.33
totaal				726.4	
$Z_{pw.tot}$	142.7				

tabel B23.6 Werkelijke werkvoorspanningen en werkvoorspankrachten op verschillende hoogten in de doorsnede tijdens wringproef S3LBB2TT672d

Bijlagen

S6NBB1TT665d					
z	z	n_p	σ_{pw}	F_{pw}	σ_{bw}
[-]	[m m]	[-]	[N /m m ²]	[kN]	[N /m m ²]
z_b	-249.7				1.03
z_1	-208.7	4	152.73	15.3	-0.40
z_2	-185.7	4	136.09	13.6	-1.20
z_3	-144.7	2	106.43	10.6	-2.63
z_4	186.3	5	760.71	76.1	-14.18
z_5	209.3	6	744.47	74.4	-14.99
z_0	250.3				-16.42
totaal				963.8	
$z_{pw.tot}$	143.6				

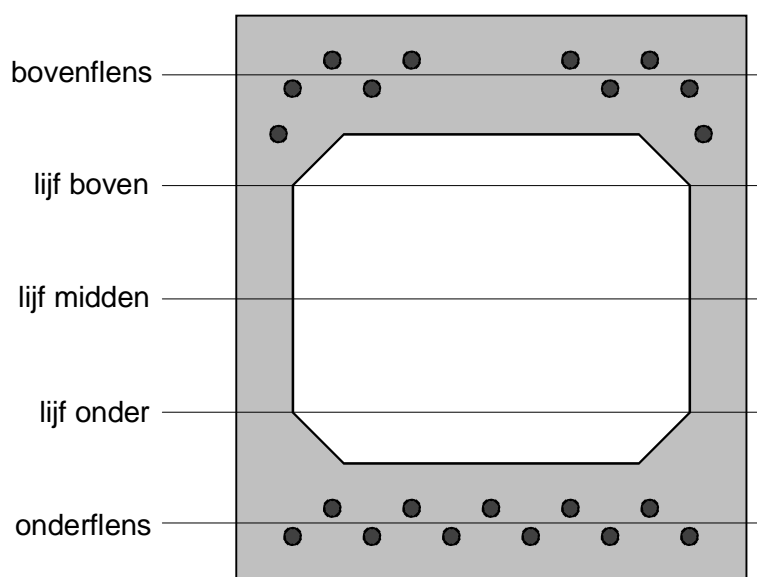
tabel B23.7 Werkelijke werkvoorspanningen en werkvoorspankrachten op verschillende hoogten in de doorsnede tijdens S6NBB1TT665d

Bijlage 24: Theoretische hoofdtrekspanningen in een aantal punten tijdens de wringproeven

B24.1 Punten waarin de theoretische hoofdtrekspanningen berekend worden

Voor de berekening van de theoretische hoofdtrekspanningen tijdens de wringproeven zijn de volgende punten van de balk van belang:

Figuur B24.1 toont welke punten in de doorsnede van belang zijn:



figuur B24.1

In zowel de boven- als de onderflens is τ_z constant aangenomen. Voor σ_x wordt de waarde in het midden van de flens aangehouden.

In zowel het linker- als het rechterlijf is τ_y constant aangenomen. Aangezien σ_x verloopt over de hoogte wordt de hoofdtrekspanning op verschillende hoogten berekend.

Het spanningsverloop in de hoeken wordt buiten beschouwing gelaten.

Er wordt aangenomen dat het wringend moment in het hele gebied tussen de aangrijppunten van de actie en de reactie constant is; dus direct vanaf deze aangrijppunten. In werkelijkheid is dit niet het geval. Bovendien treden in werkelijkheid plaatselijke drukspanningen op bij de aangrijppunten. Deze worden hier buiten beschouwing gelaten.

B24.2 Grafieken

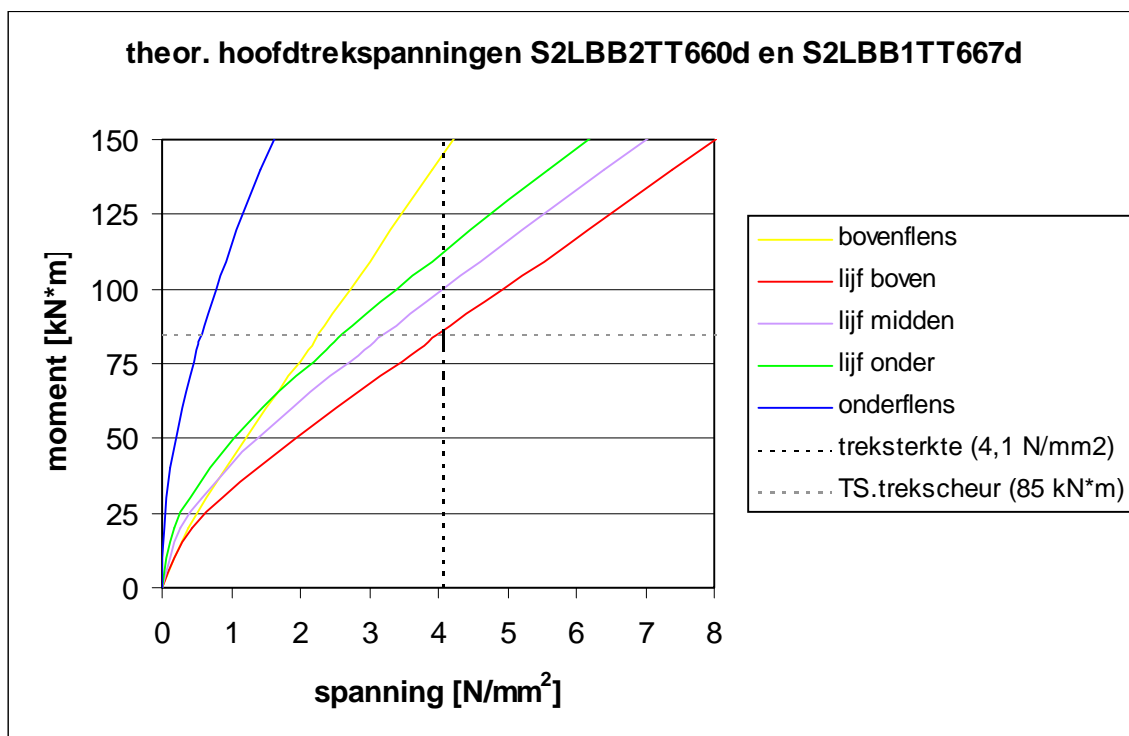
In deze paragraaf zijn per wringproef te zien:

- De theoretische hoofdtrekspanningen in de in paragraaf B24.1 genoemde punten van de balk.

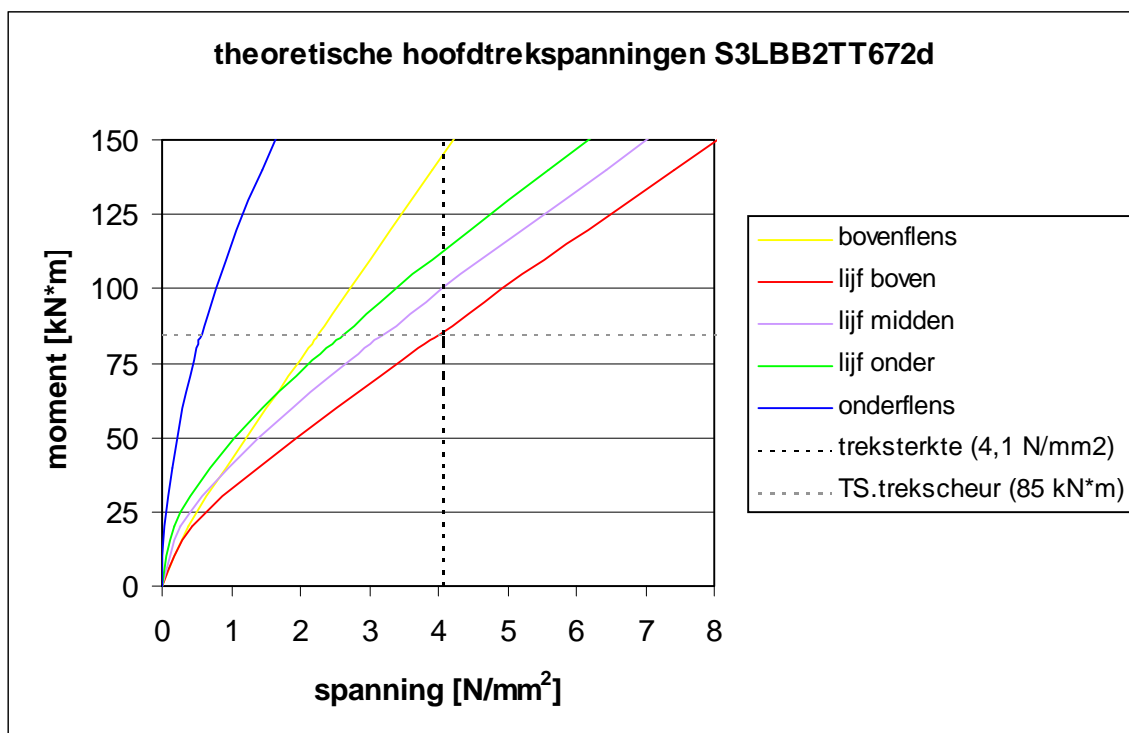
Bovendien is in de grafieken weergegeven:

- De gemiddelde treksterkte korte duur van het beton, $f_{cm}(*k_1)$ (zie tabel 5.2)

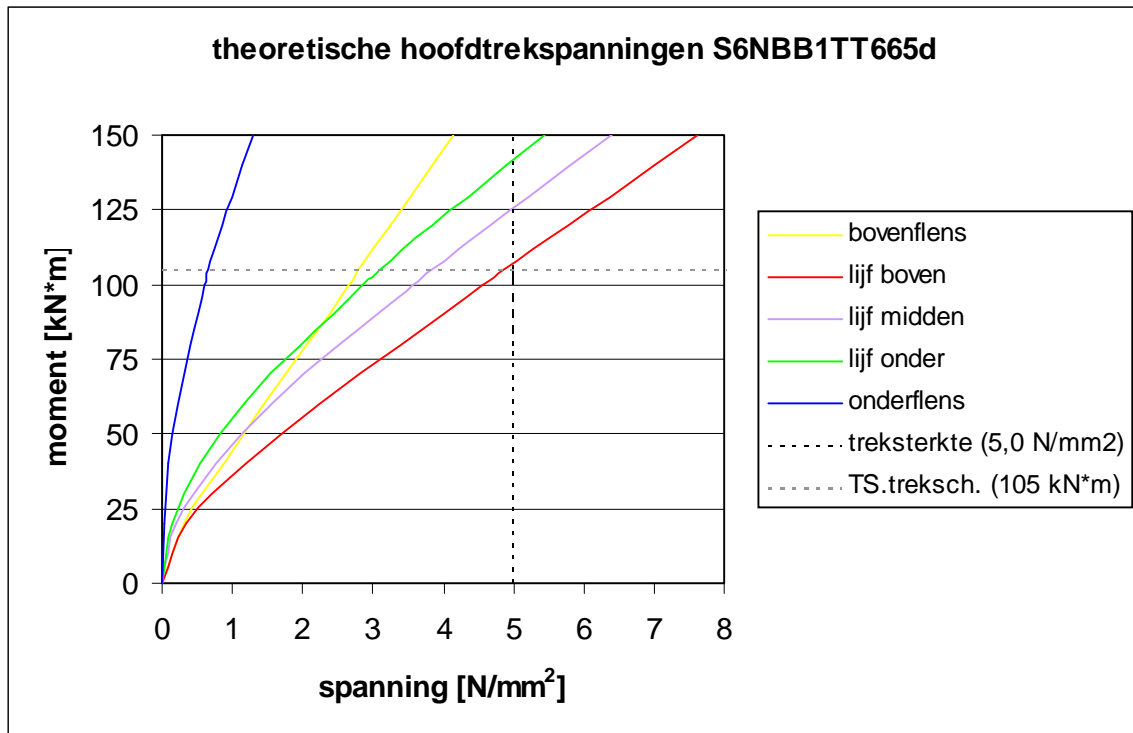
- Het wringend moment waarbij theoretisch de eerste trekscheuren ontstaan, $T_{S.trekscheur}$



grafiek B24.1



grafiek B24.2

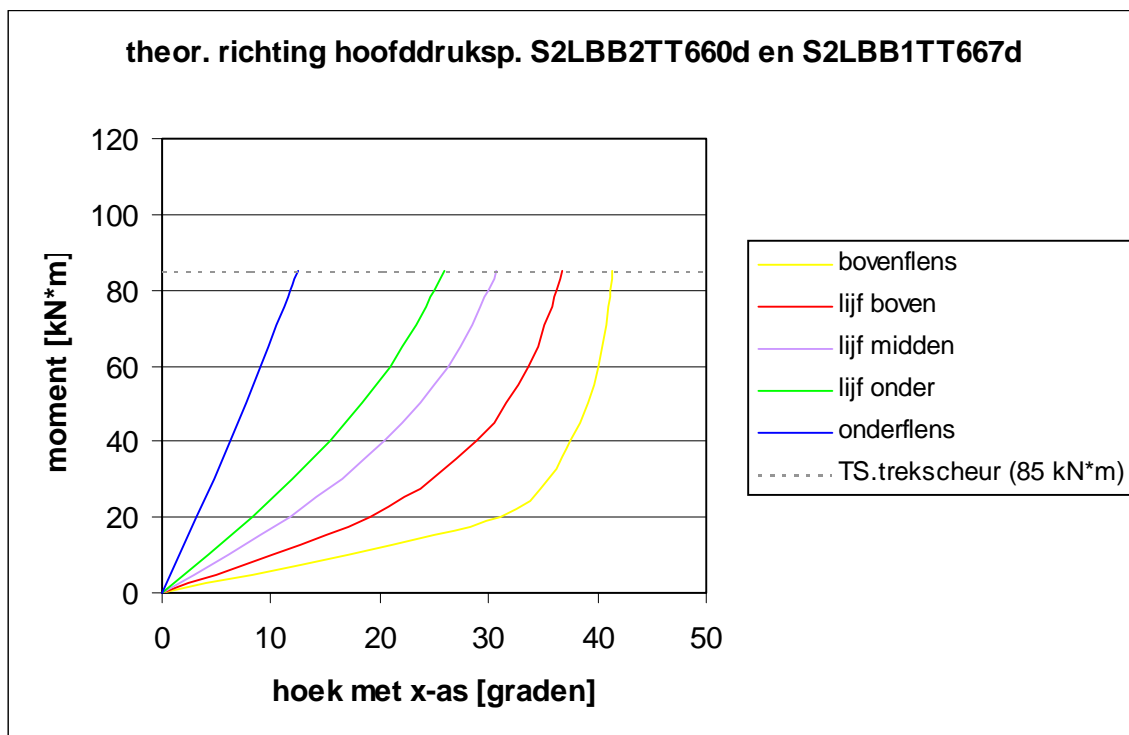


grafiek B24.3

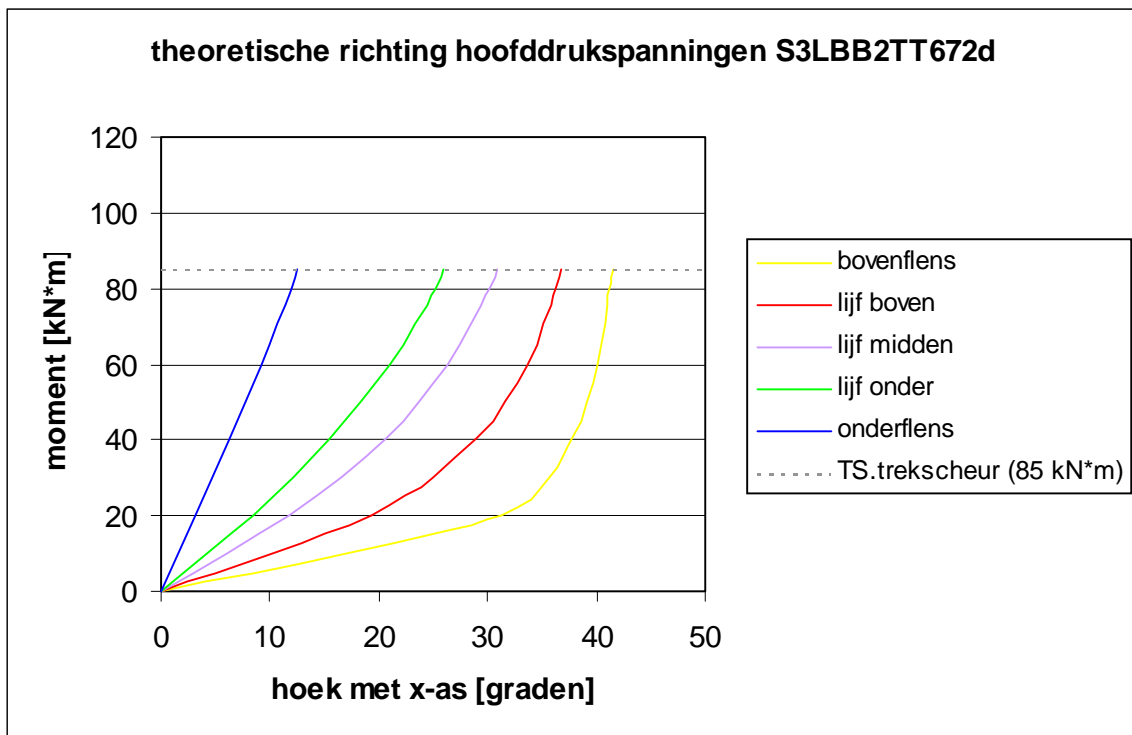
Bijlage 25: Theoretische richting hoofddrukspanningen

In deze bijlage zijn per wringproef tot aan het ontstaan van de eerste trekscheuren te zien:

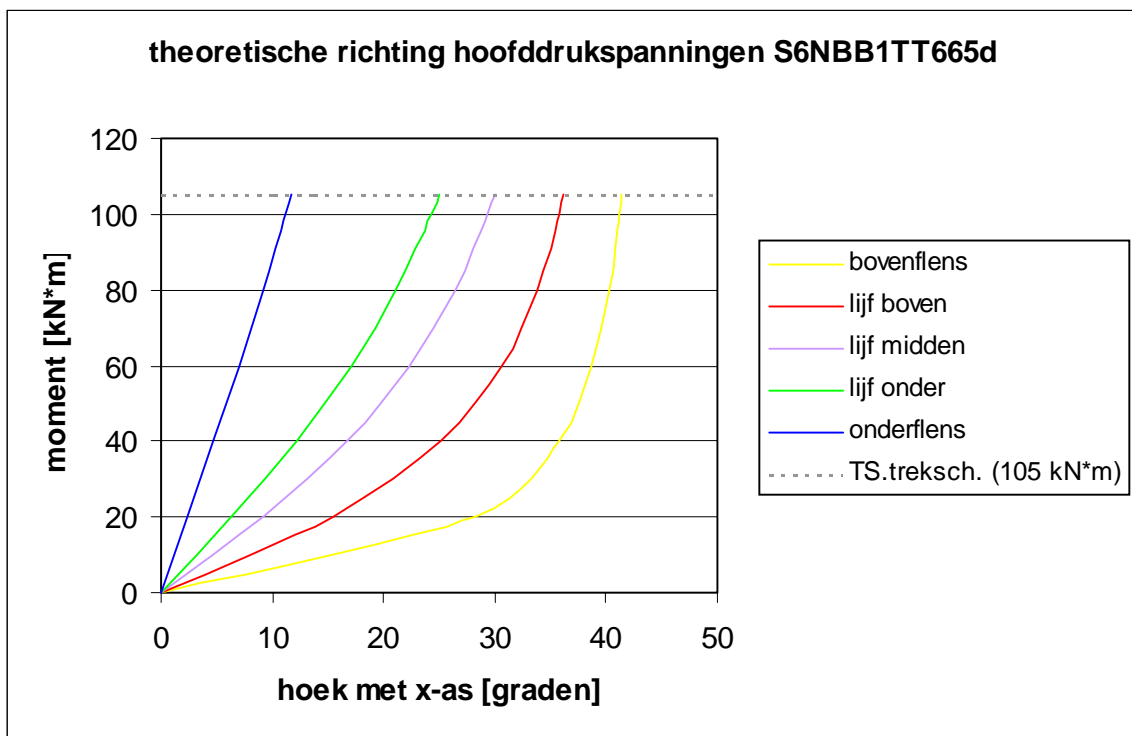
- De theoretische richtingen van de hoofddrukspanningen in de in bijlage 24, paragraaf B24.1 genoemde punten van de balk. (Zie ook figuur 5.14)



grafiek B25.1



grafiek B25.2



grafiek B25.3

Bijlage 26: Rotatie

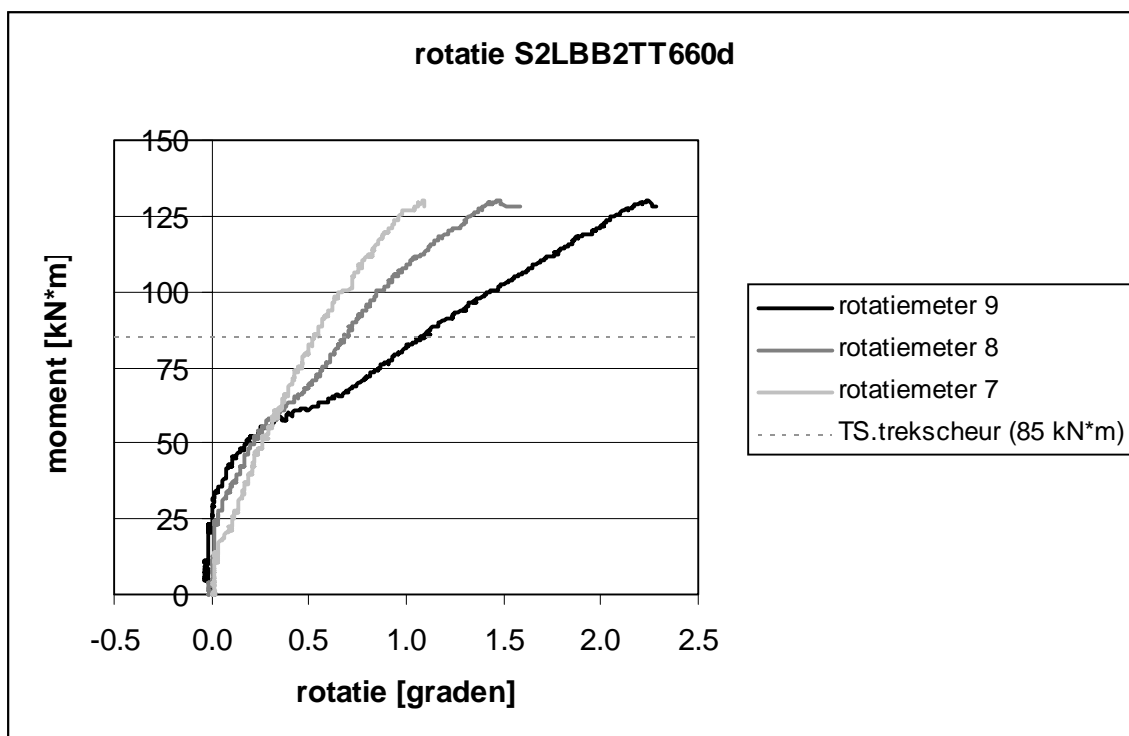
In deze bijlage zijn per wringproef te zien:

- De rotatie van de balk aan de onderzijde van de doorsnede bij de meetpunten 7, 8 en 9. De grafieken bij de wringproeven S2LBB2TT660d en S2LBB1TT667d stoppen wanneer de gelijmde meetbeugel loslaat.

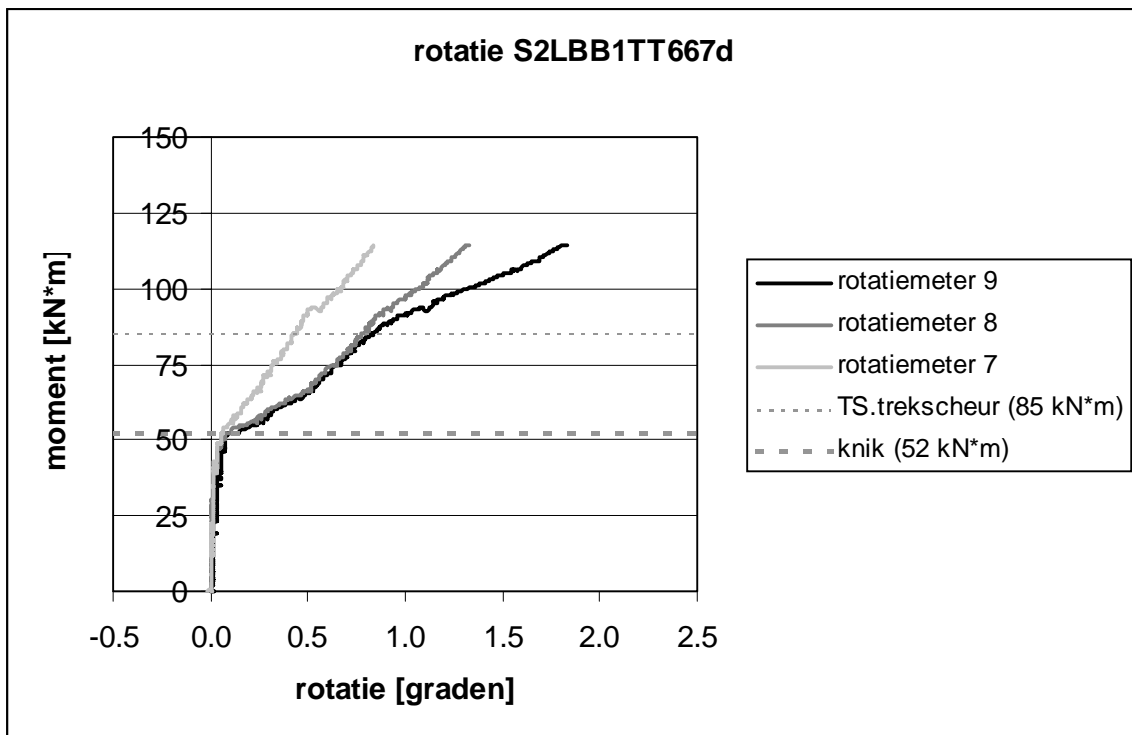
Bovendien is in de grafieken met de volgende termen weergegeven:

$T_{S.trekscheur}$: Het wringend moment waarbij theoretisch de eerste trekscheuren ontstaan (zie tabel 5.9)

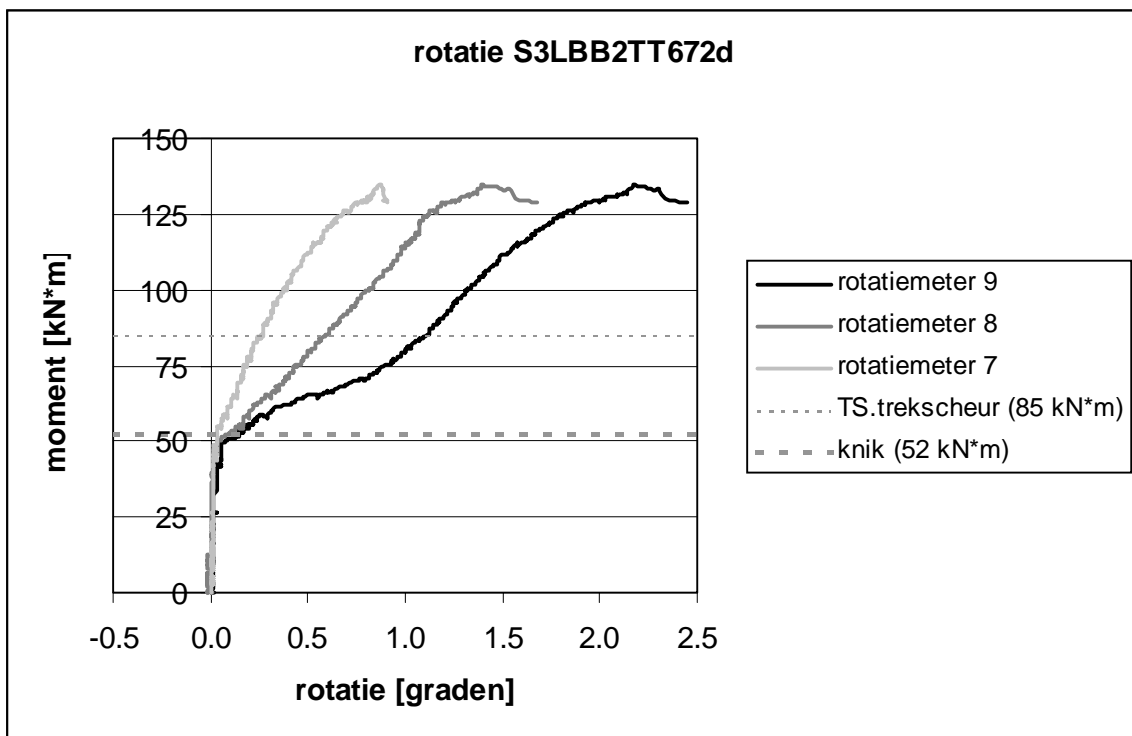
knik: Het wringend moment waarbij de grafieken een knik vertonen



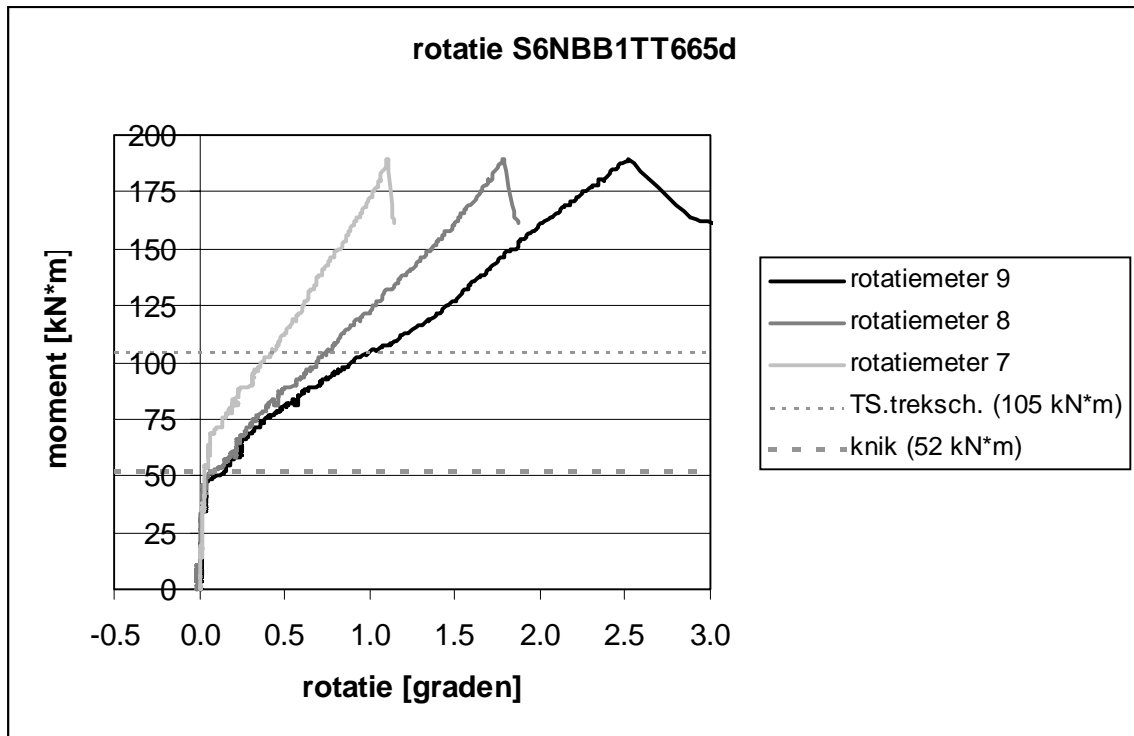
grafiek B26.1



grafiek B26.2



grafiek B26.3

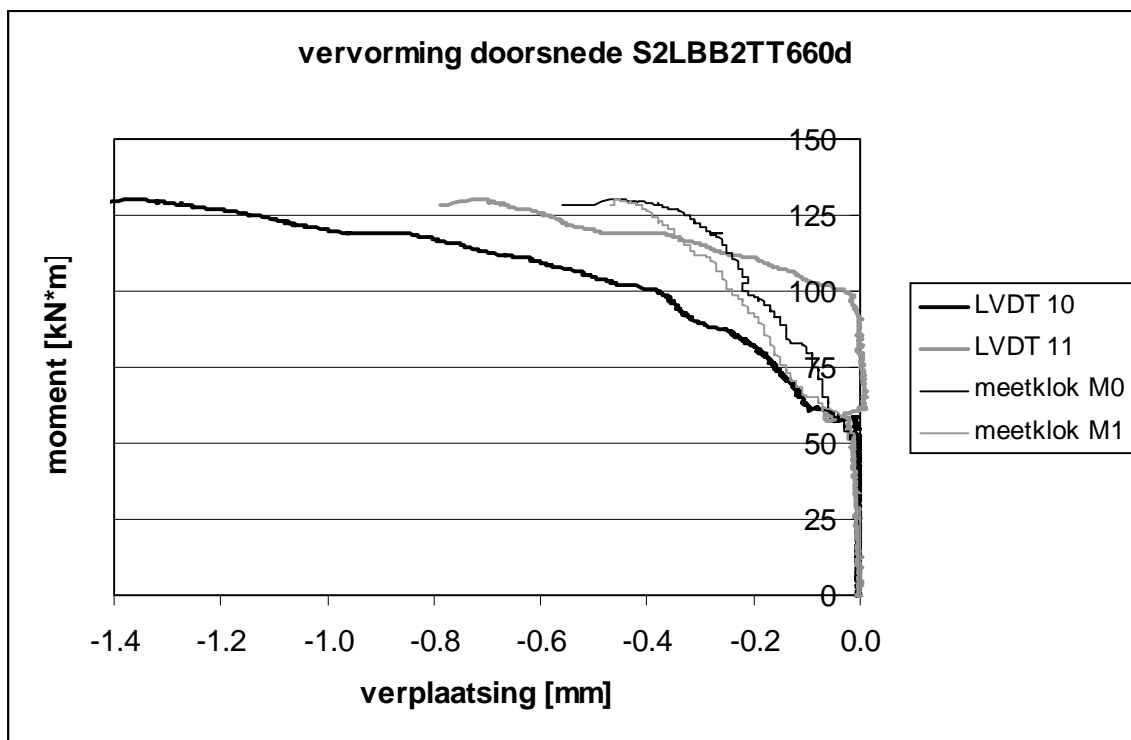


grafiek B26.4

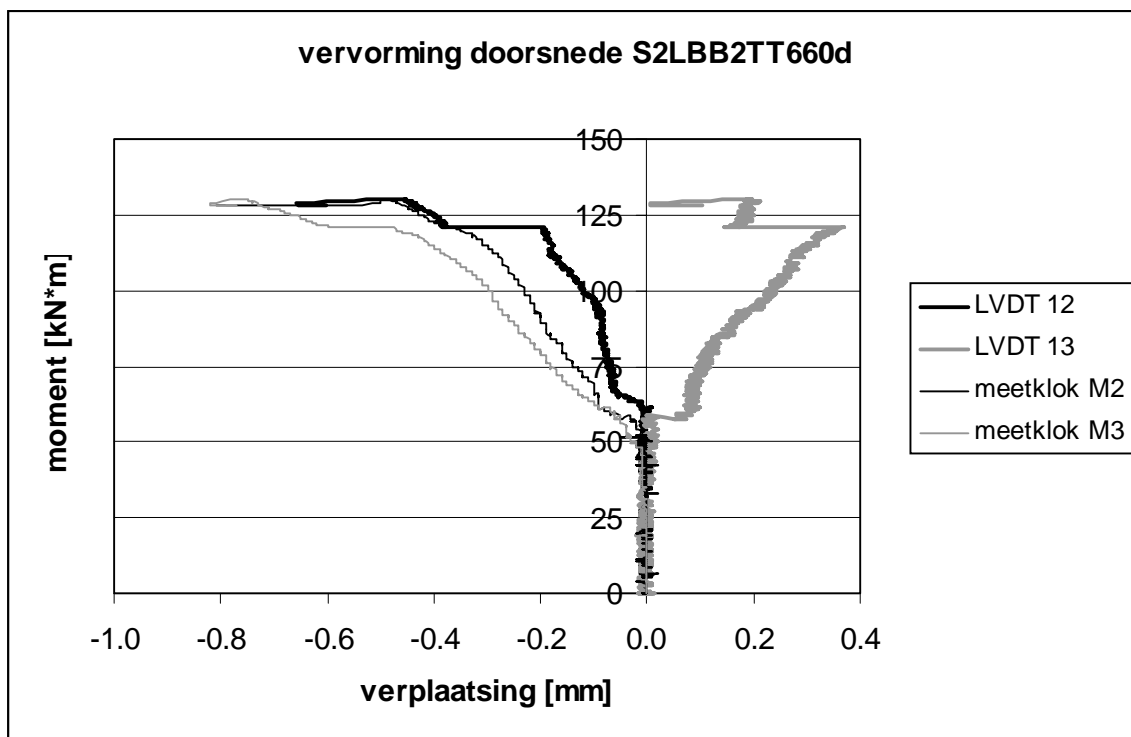
Bijlage 27: Vervorming van de doorsnede

In deze bijlage zijn per wringproef te zien:

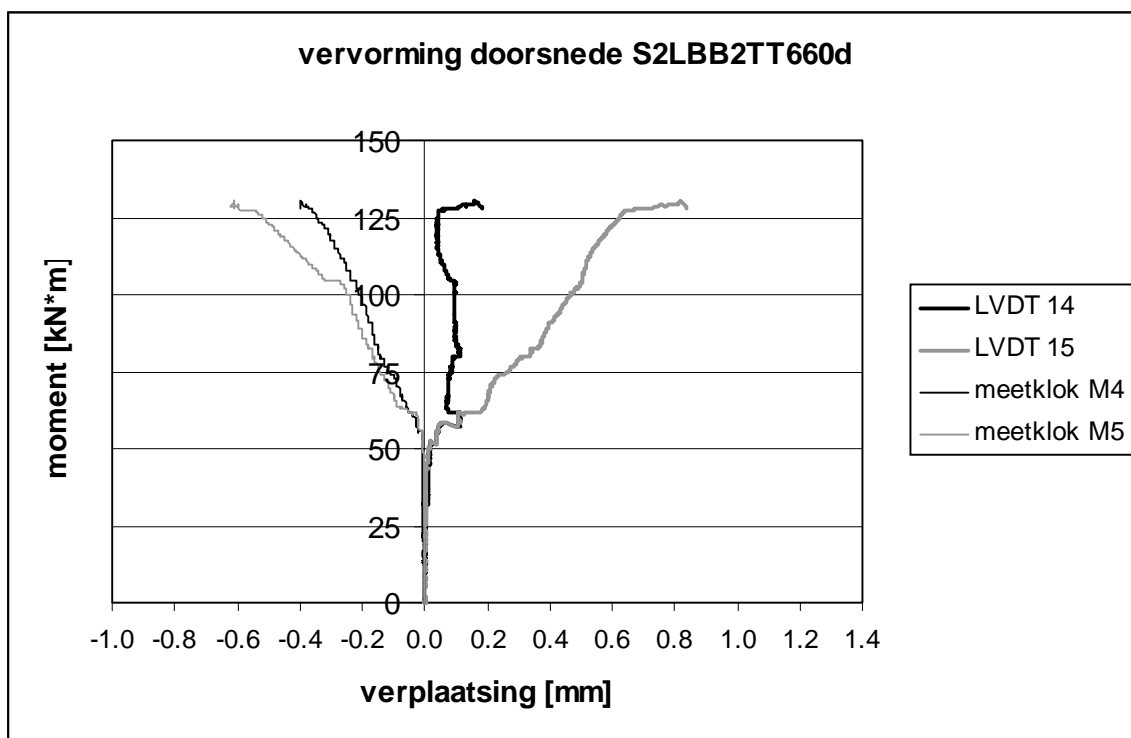
- De horizontale en de verticale verplaatsing van de twee bovenste hoeken van de doorsnede ten opzichte van de meetbeugel en dus ten opzichte van de onderzijde van de doorsnede bij de meetpunten M0 tot en met M5 en bij de meetpunten 10 tot en met 15. De grafieken bij de wringproeven S2LBB2TT660d en S2LBB1TT667d stoppen wanneer de gelijmde meetbeugel loslaat.



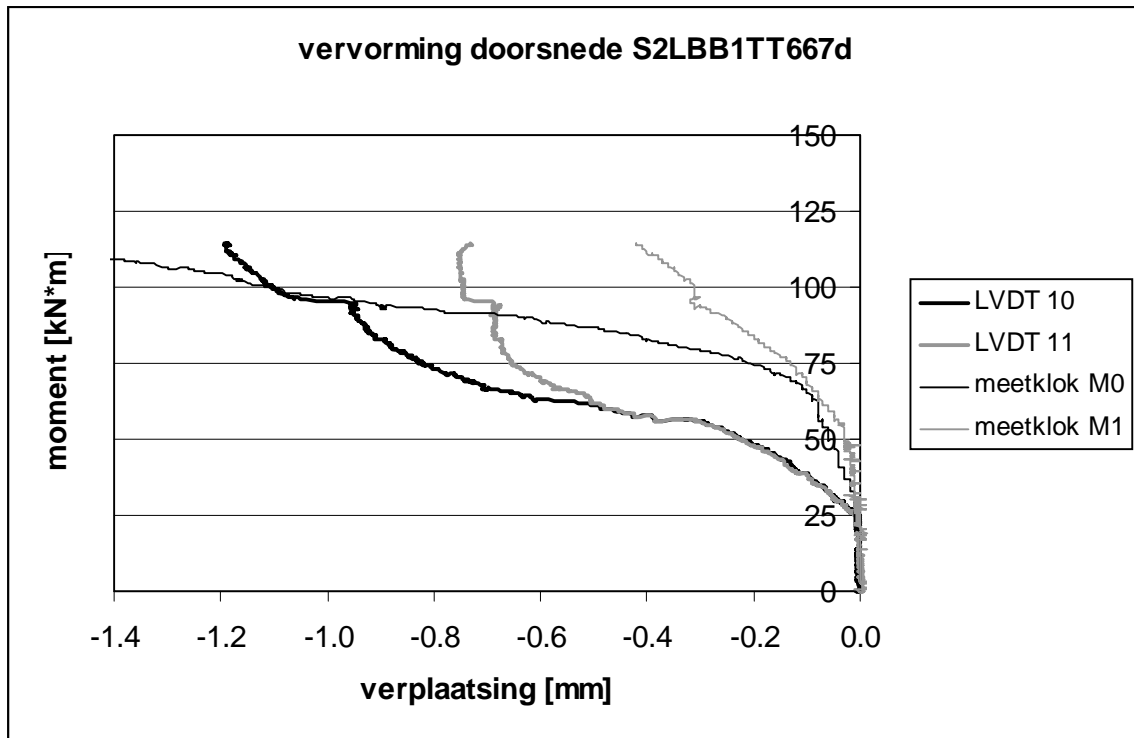
grafiek B27.1



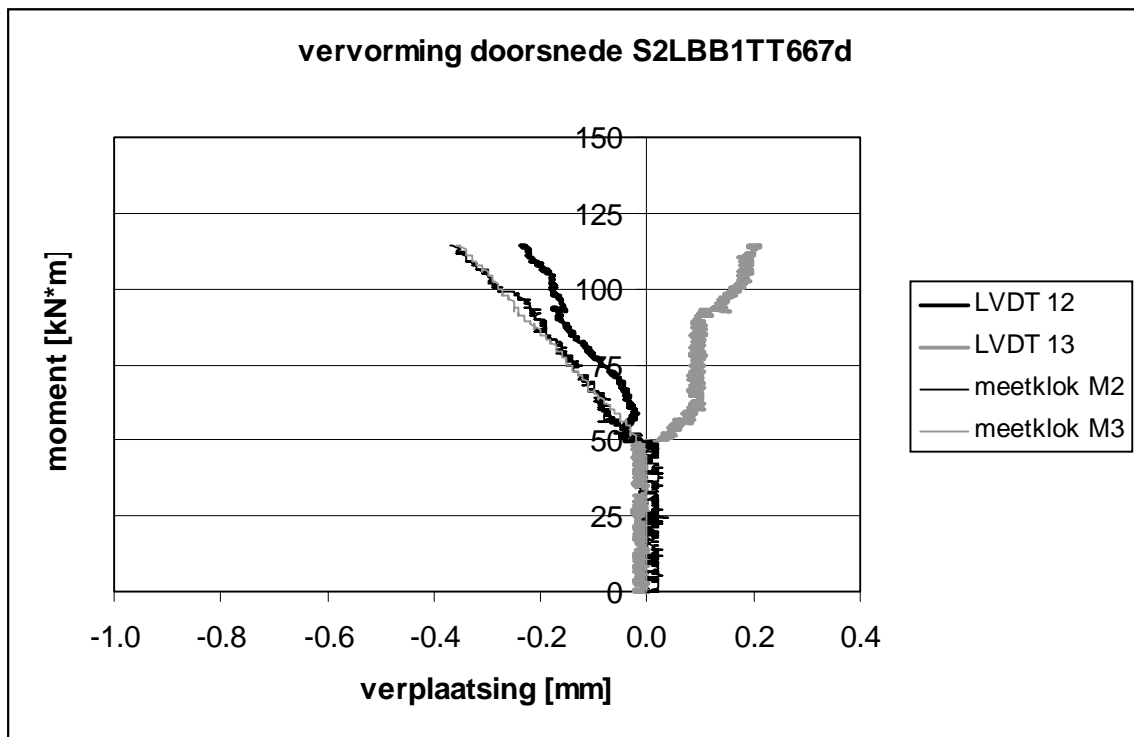
grafiek B27.2



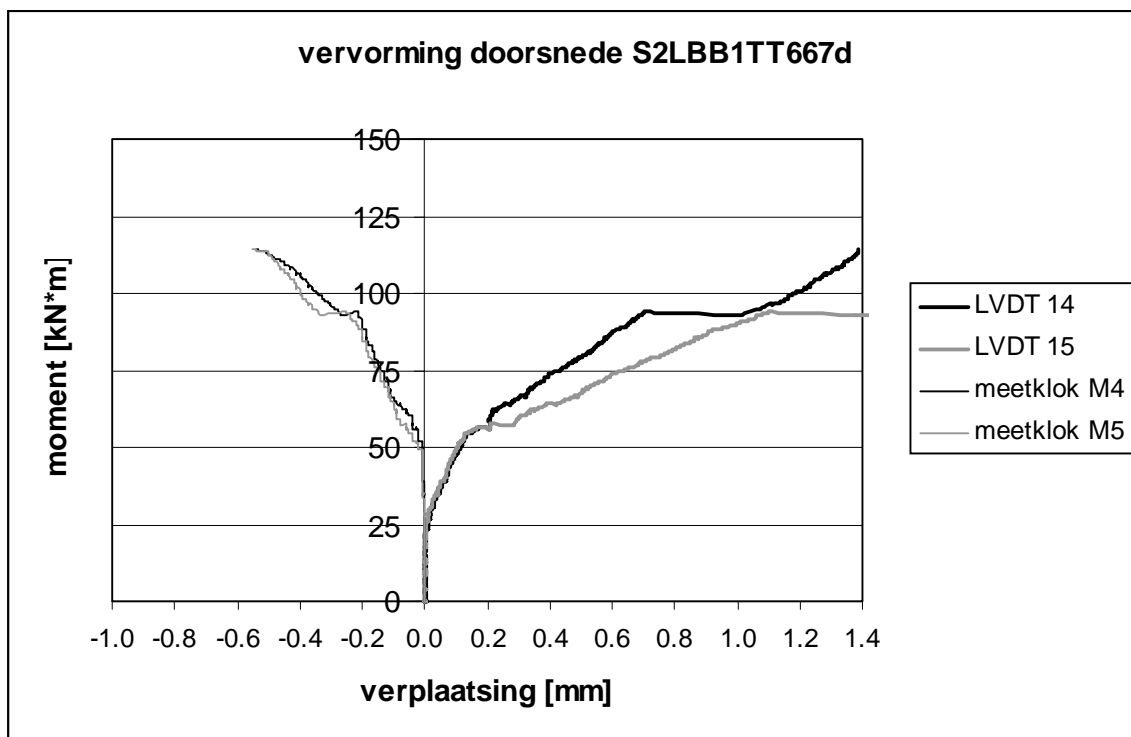
grafiek B27.3



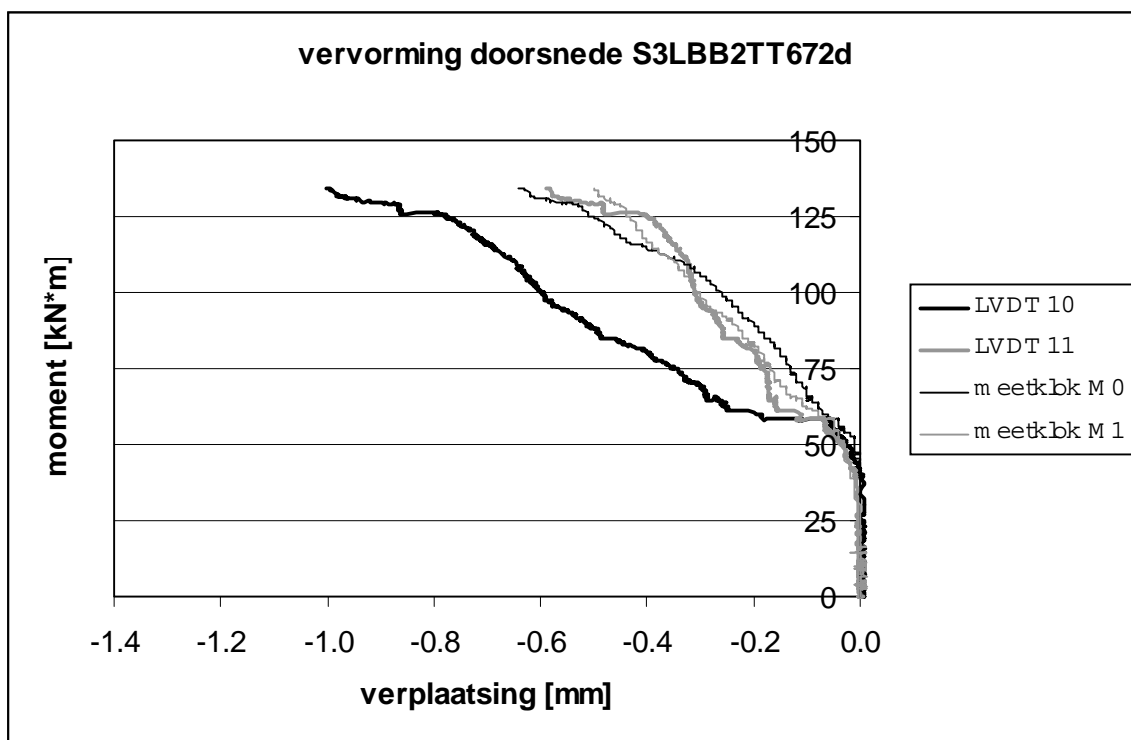
grafiek B27.4



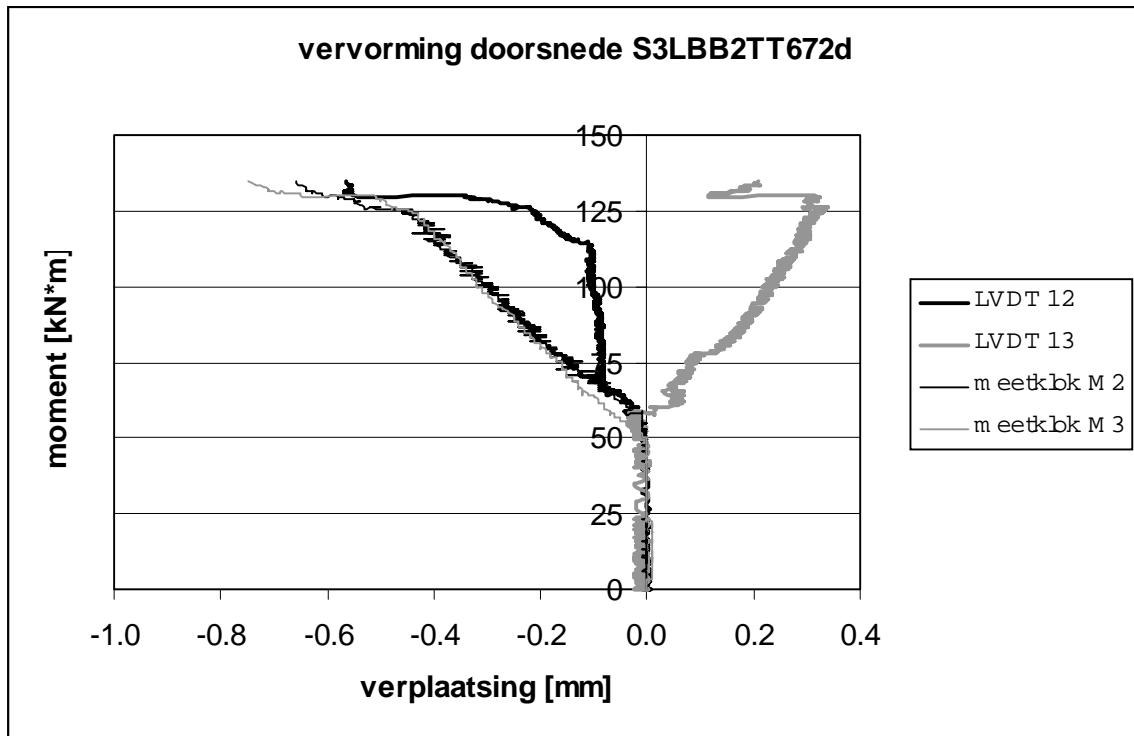
grafiek B27.5



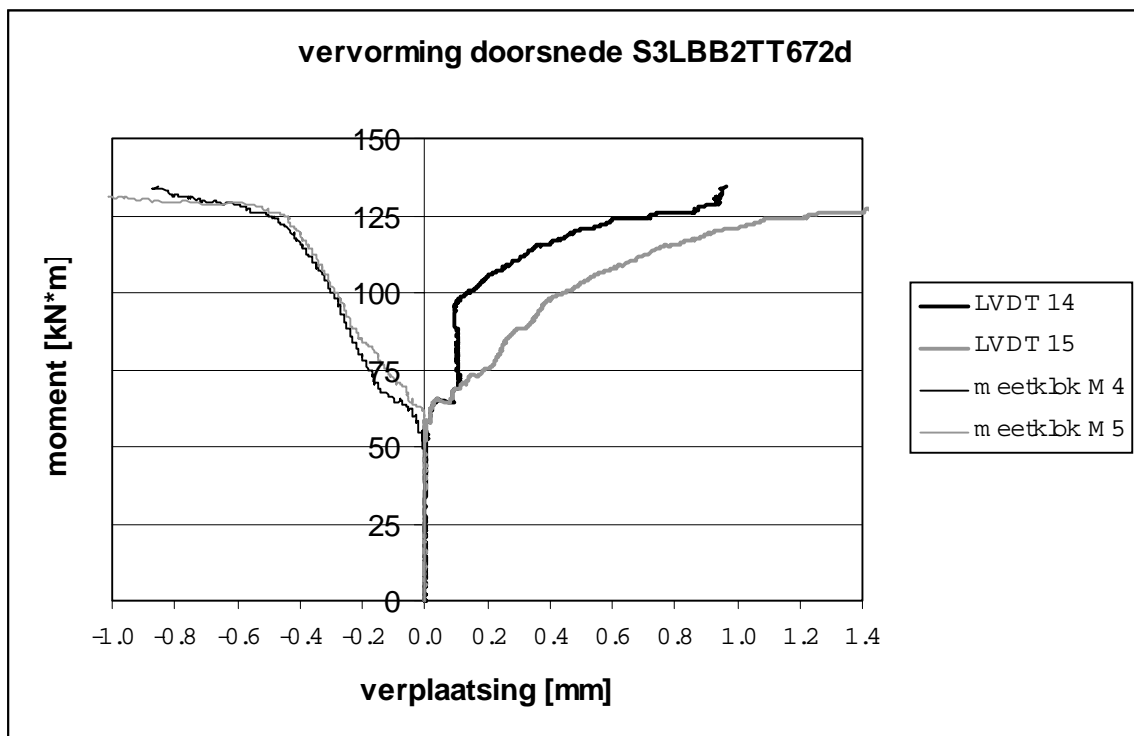
grafiek B27.6



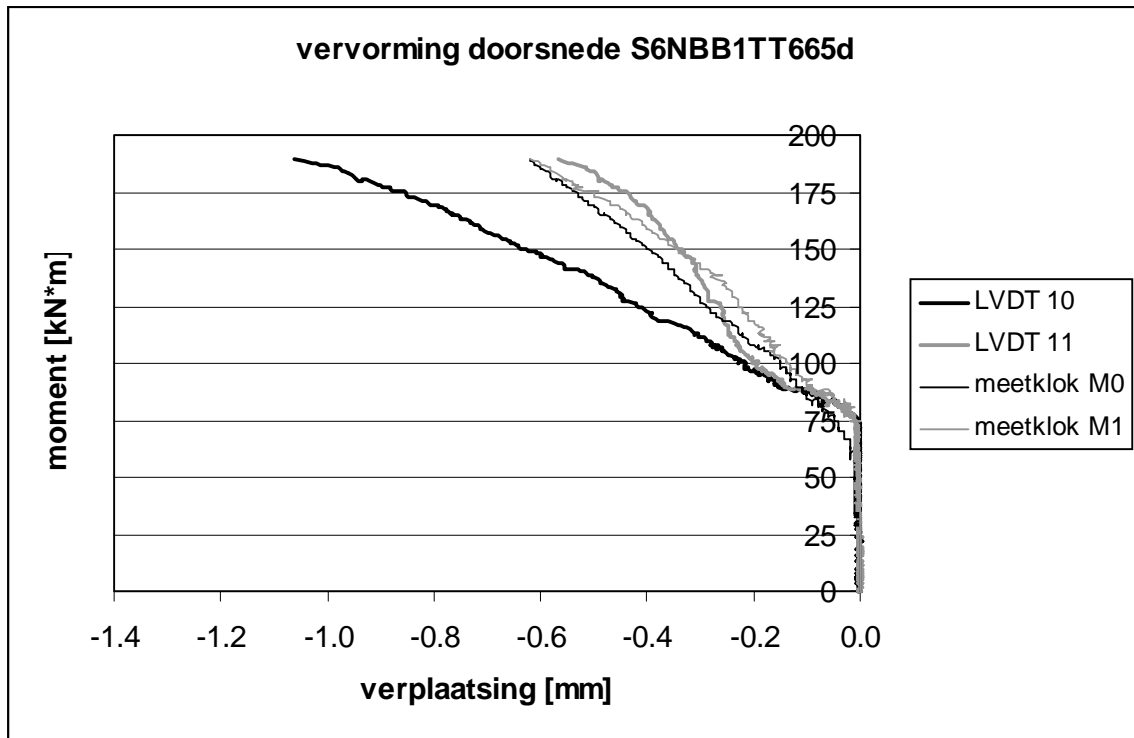
grafiek B27.7



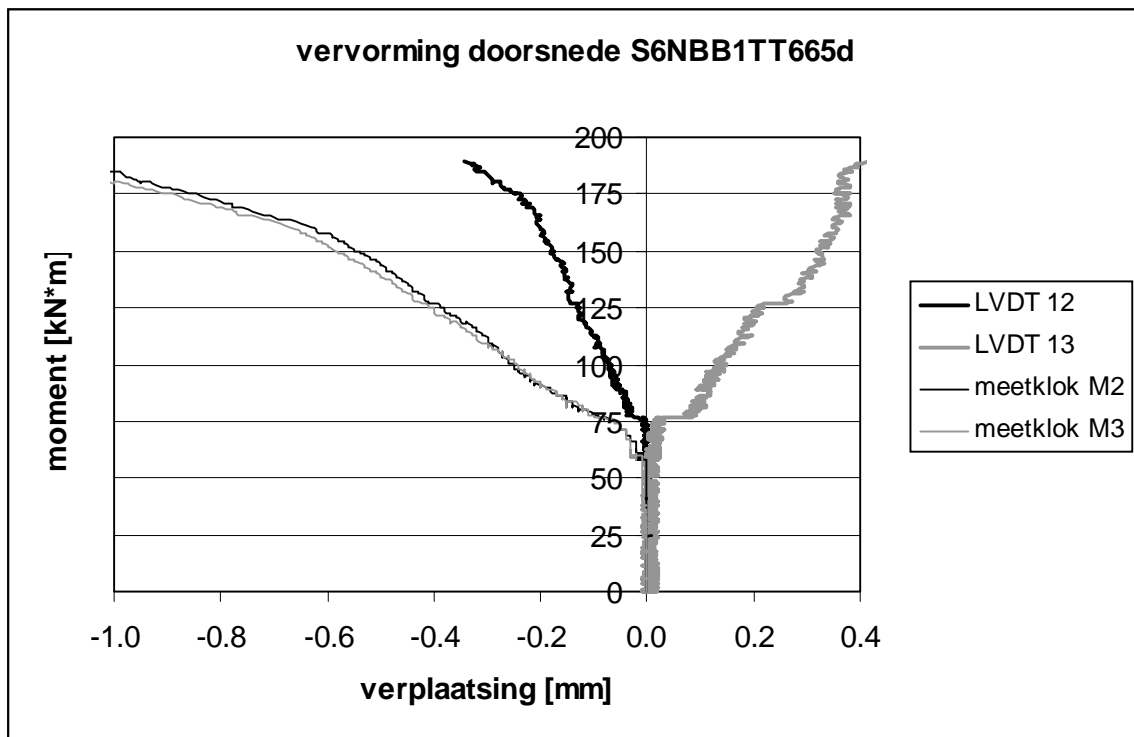
grafiek B27.8



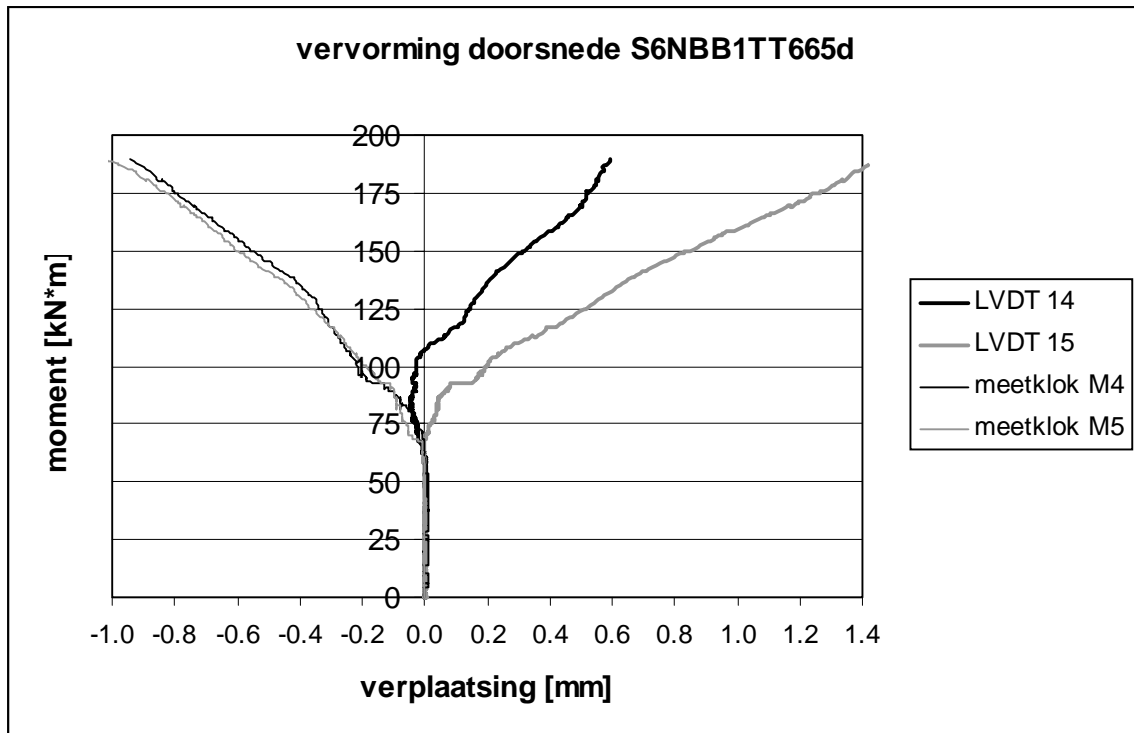
grafiek B27.9



grafiek B27.10



grafiek B27.11

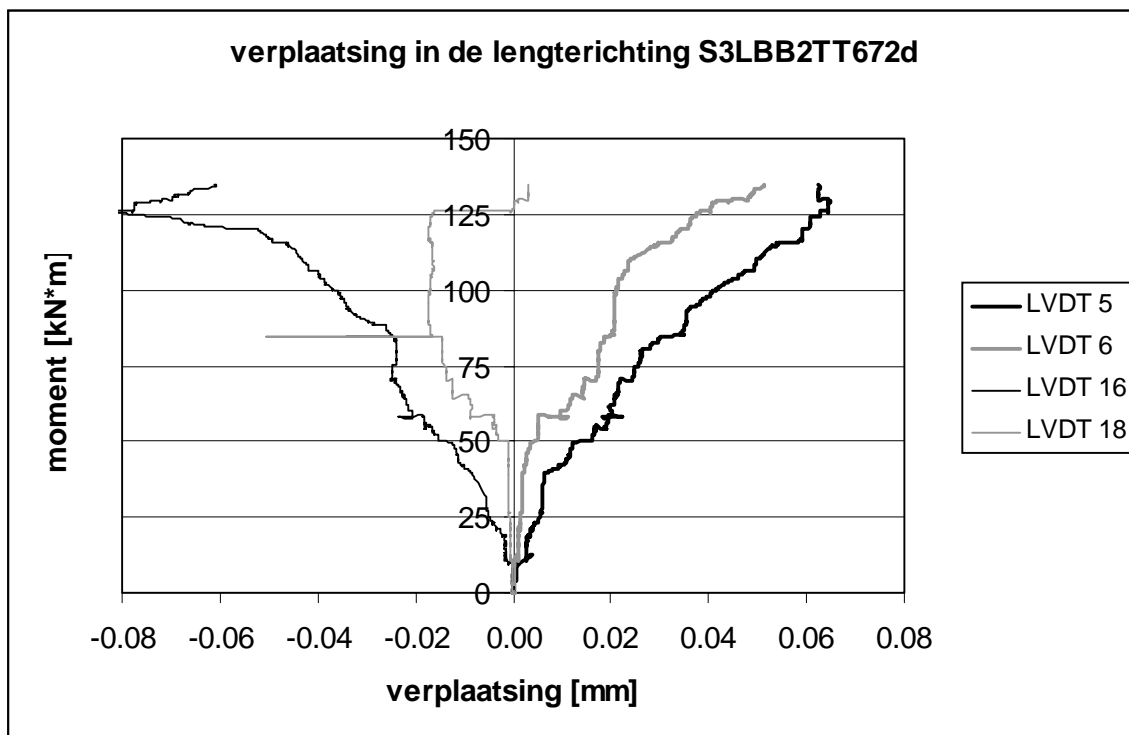


grafiek B27.12

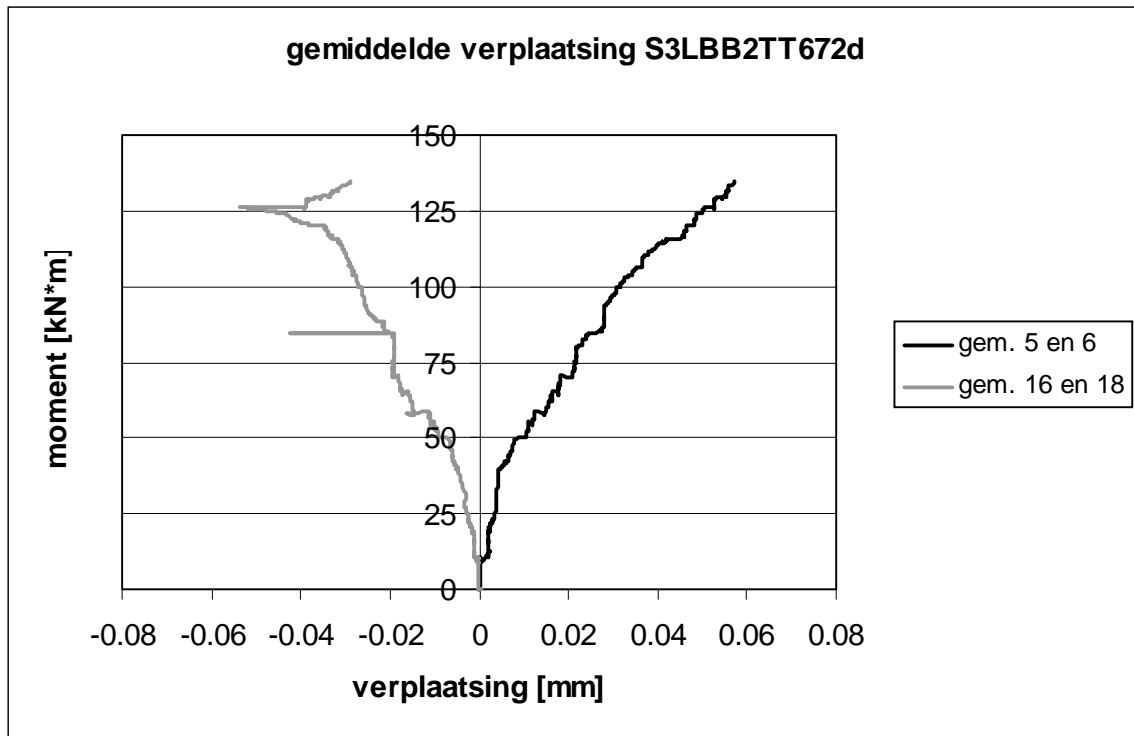
Bijlage 28: Welving

In deze bijlage zijn voor de wringproeven S3LBB2TT672d en S6NBB1TT665d te zien:

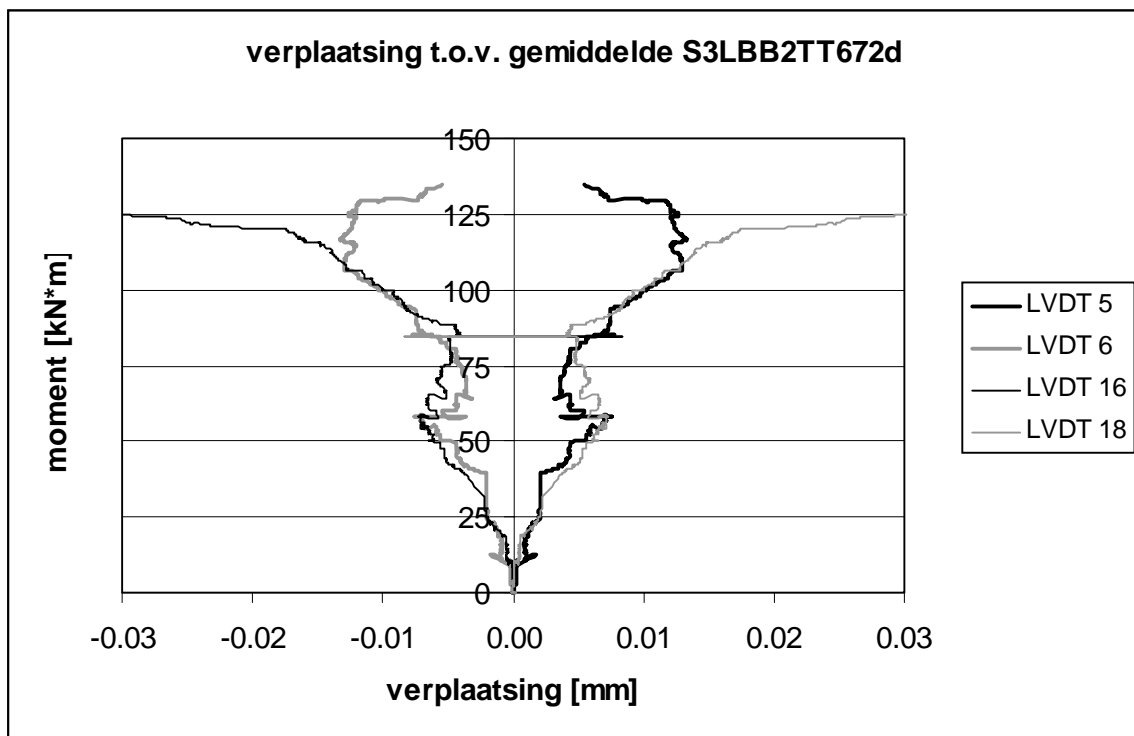
- De verplaatsing in de lengterichting van de balk (x-richting) van de onderste hoeken ten opzichte van de bovenste hoeken. Dit wordt aan de koppen van de balk gemeten bij de meetpunten 5 en 6 en bij de meetpunten 16 en 18.
- De gemiddelde verplaatsing bij de meetpunten 5 en 6 en bij de meetpunten 16 en 18.
- De verplaatsing bij de meetpunten 5 en 6 en bij de meetpunten 16 en 18 ten opzichte van de gemiddelde verplaatsing bij resp. de meetpunten 5 en 6 en de meetpunten 16 en 18.



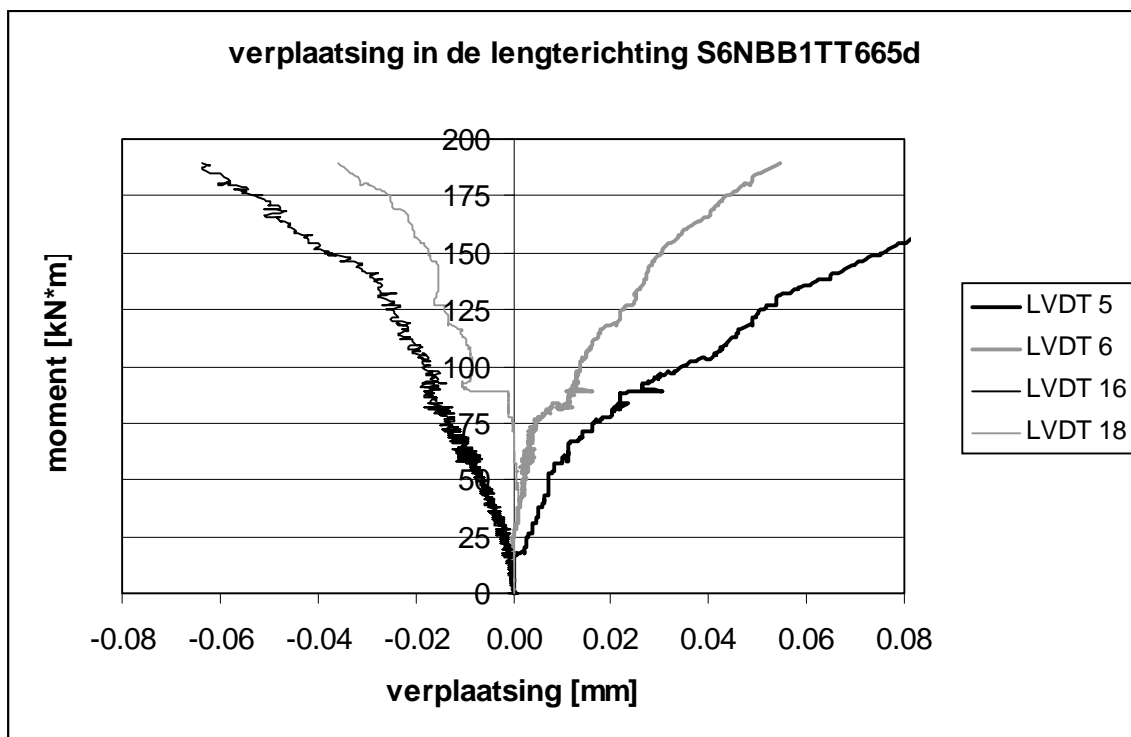
grafiek B28.1



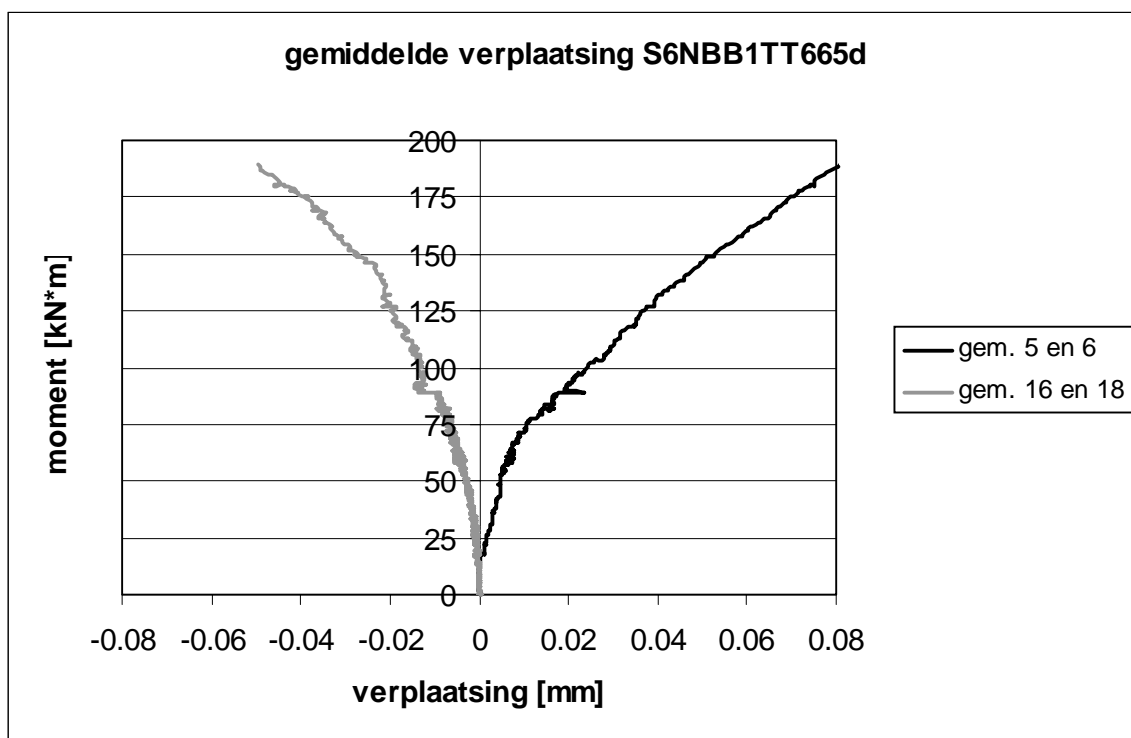
grafiek B28.2



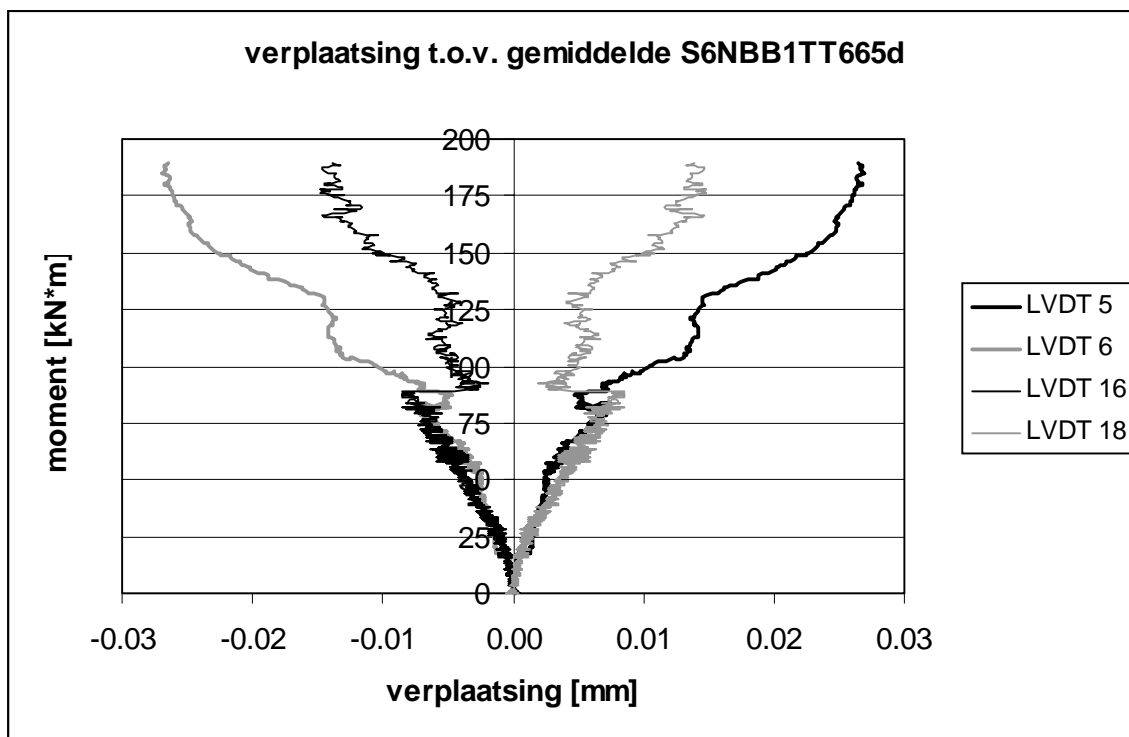
grafiek B28.3



grafiek B28.4



grafiek B28.5



grafiek B28.6