



Simulatie van onthechtingsmechanismen bij betonconstructies versterkt met uitwendig gelijmde koolstofvezelwapening

DOV mei 2004

Ernst Klamer





Afstudeercommissie

- Prof. dr. ir. D.A. Hordijk (TU/e)
- Dr. ir. H. Hofmeyer (TU/e)
- Ir. H.J.M. Janssen (TU/e)
- Ir. A. de Boer (Bouwdienst Rijkswaterstaat)



Inhoud presentatie

- Inleiding
- Probleemstelling
- Doelstelling
- Onthechting bij dwarskrachtscheuren
 - Inleiding
 - Berekeningen
 - Conclusies en aanbevelingen
- Onthechting bij buigscheuren
 - Inleiding
 - Berekeningen
 - Conclusies en aanbevelingen
- Samenvatting
- Vragen

Toepassing koolstofvezelwapening

Inwendig wapenen

- Als inwendige wapening (naast staalwapening)
- Vezelversterkt beton

Uitwendig versterken

- Vergroten van de momentcapaciteit
 - Vergroten van de dwarskrachtcapaciteit
 - Vergroten van de axiale capaciteit
-
- | | |
|-------------|-------------------------------------|
| • Jaren '60 | Versterken met staalstrippen/platen |
| • Jaren '90 | Versterken met vezelwapening (FRP) |

Systemen

Prefab systemen

- Strippen

Wet lay-up systemen

- Weefsels

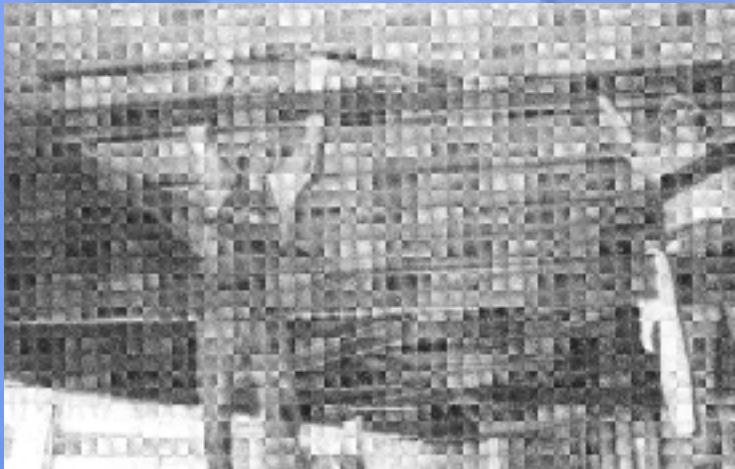
Speciale systemen

- Omwikkelen van kolommen
- Voorspannen
- Verankeren



Prefab systemen

Vorm:	Strippen / lamellen
Dikte:	1,0 tot 1,5 mm
Fabricage:	Pulltrusie, verharding in de fabriek
Montage:	Lijmen



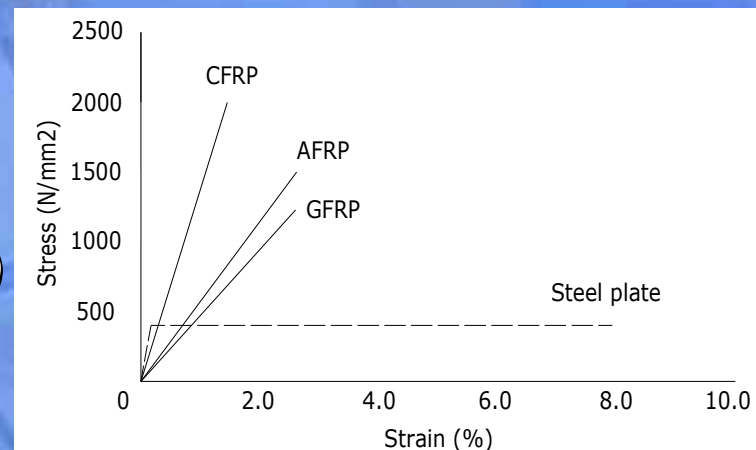
Voor- en nadelen t.o.v. staal

Voordelen

- Hoge axiale treksterkte (2000 - 2800 N/mm²)
- Laag eigen gewicht
- Eenvoudige uitvoering
- Goede corrosieweerstand
- Vele vormen mogelijk (wet lay-up)

Nadelen

- Hoge materiaalkosten
- De eigenschappen loodrecht op de vezel
- Brosse breuk
- Lijm verliest zijn sterkte bij brand





Berekeningmethoden / regelgeving

Internationaal

- *fib* Bulletin 14 (juli 2001)

Nationaal

- CUR aanbeveling 91 (Nederland, juni 2002)
- Concrete Society Technical Report No. 55 (Engeland, 2000)



Probleemstelling (1)

- Het toepassingsgebied van de CUR aanbeveling 91 is nog vrij beperkt, i.v.m. beperkte kennis en ervaring
 - Gewapende betonconstructies
 - Koolstofvezelwapening
 - Versterken op buiging en dwarskracht
- Vooralsnog alleen toepasbaar voor minder kritische toepassingen
 - Constructie moet na uitvallen koolstofvezelwapening de belasting met veiligheidsfactoren gelijk aan 1,0 kunnen dragen

Probleemstelling (2)

Onthechtingsmechanismen

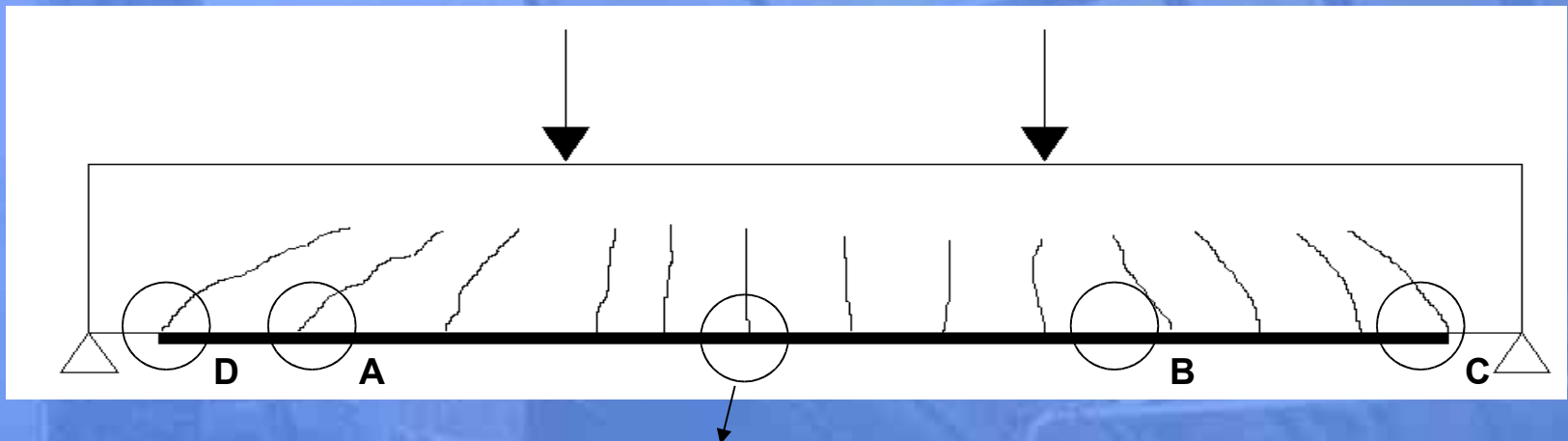
- Veelal het maatgevende mechanisme bij een versterkte constructie
- Geen internationale overeenstemming over de aan te houden modellen
- Oorzaak van het ontstaan van de onthechting is lastig waar te nemen bij experimenten

Er is onvoldoende inzicht in de onthechtingsmechanismen die op kunnen treden bij betonconstructies versterkt met uitwendig gelijkde koolstofvezelwapening

Onthechtingsmechanismen

Onthechtingsmechanismen volgens CUR aanbeveling 91

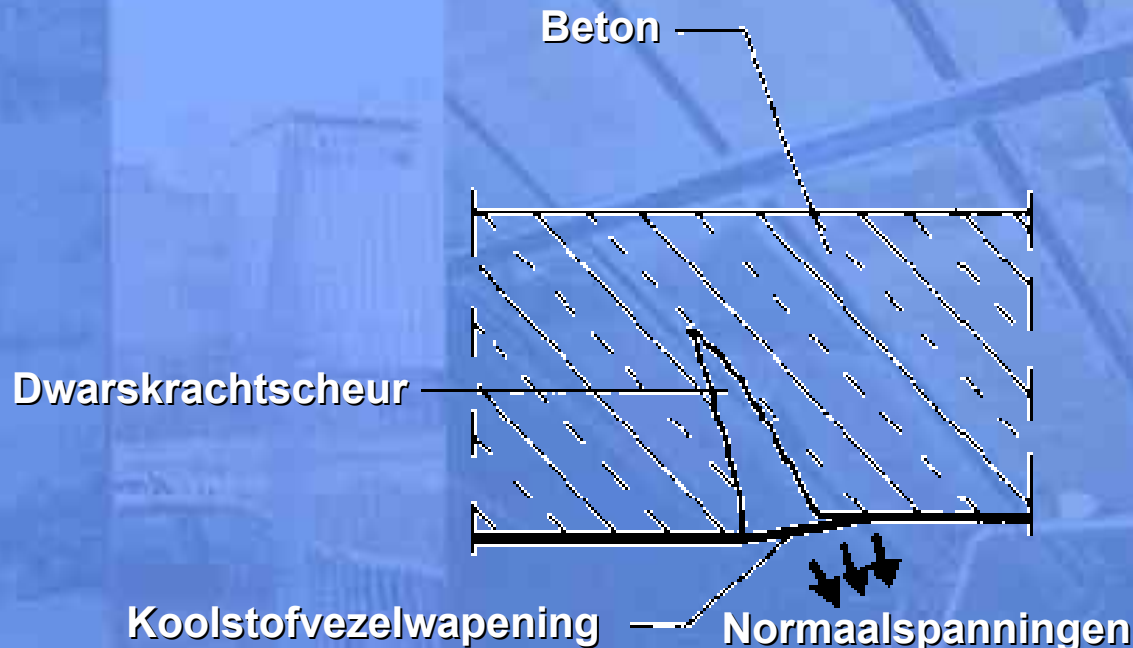
- B. Onthechting bij dwarskrachtscheuren
- C. Onthechting door hoge schuifspanningen
- D. Onthechting door onvoldoende verankeringslengte
- E. Eindverankering-dwarskrachtbreuk



Onthechting bij buigscheuren

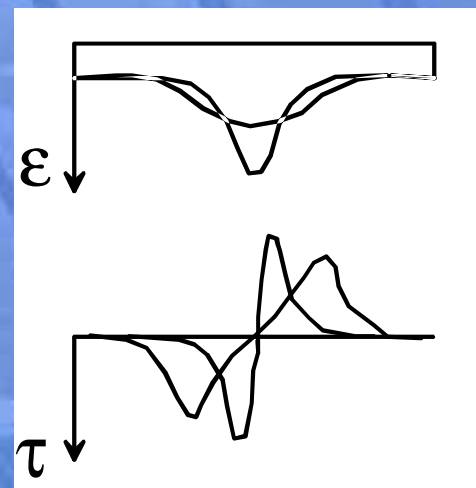
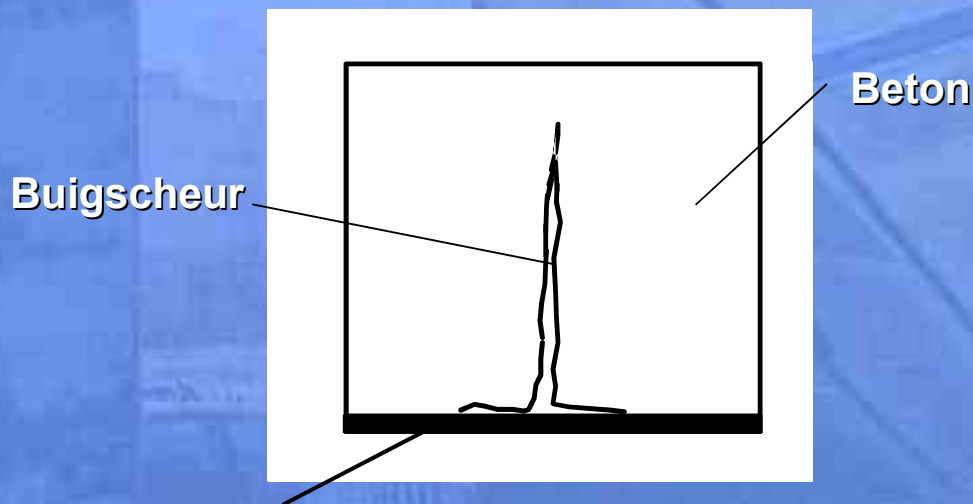
Onthechting bij dwarskrachtscheuren

- Verschil in horizontale en verticale verplaatsing aan weerszijden van een dwarskrachtscheur
- Trek loodrecht op de koolstofvezelwapening
- Onthechting



Onthechting bij buigscheuren

- Piek in rek koolstofvezelwapening ter plaatse van buigscheur
- Hoge schuifspanningen ter plaatse van buigscheur
- Vervolgens ontstaat er een horizontale scheur
- Verwacht wordt dat de onthechting niet doorzet
- Niet opgenomen in de CUR aanbeveling 91



Koolstofvezelwapening

Doelstelling

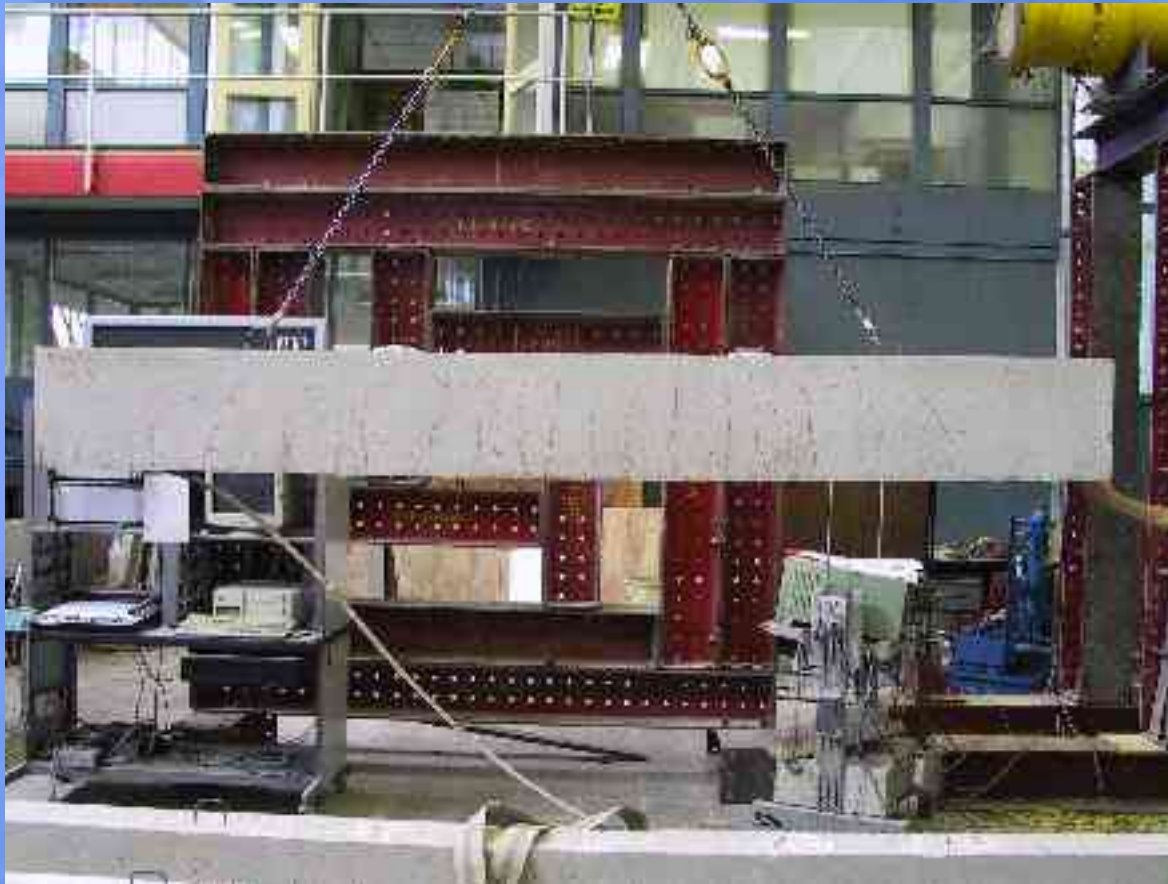
“het vergroten van het inzicht in de onthechtingsmechanismen die op kunnen treden bij betonconstructies versterkt met uitwendig gelijmde koolstofvezelwapening, om zo de regelgeving die er op dit moment bestaat eventueel verder uit te werken, te verbeteren en/of te optimaliseren”

Hoe kan men dit inzicht vergroten

- Experimenteel onderzoek
- Numeriek onderzoek



Experimenteel onderzoek TU/e



Bron: T9 project (TU/e) en
afstudeerproject L. Bukman (TU/e)



Experimenteel onderzoek TU/e



Bron: T9 project (TU/e) en
afstudeerproject L. Bukman (TU/e)

Opzet numeriek onderzoek

Onthechting bij dwarskrachtscheuren

Belasten $\rightarrow$ scheuren $\rightarrow$ onthechten

Lineair elastische berekening

- Ter verificatie van het model

Niet-lineaire berekening zonder onthechting

- Last-zakkingsdiagram tot bezwijken (zonder onthechting)
- Scheurvorming

Niet-lineaire berekening met onthechting

- Daadwerkelijke simulatie van de onthechting bij dwarskrachtscheuren

Controle numerieke modellen

Berekening

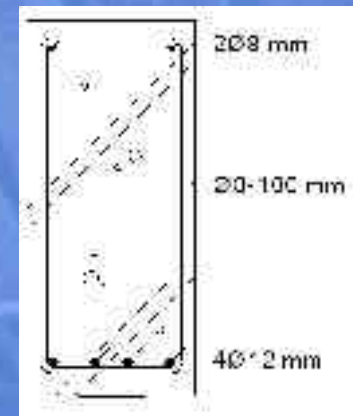
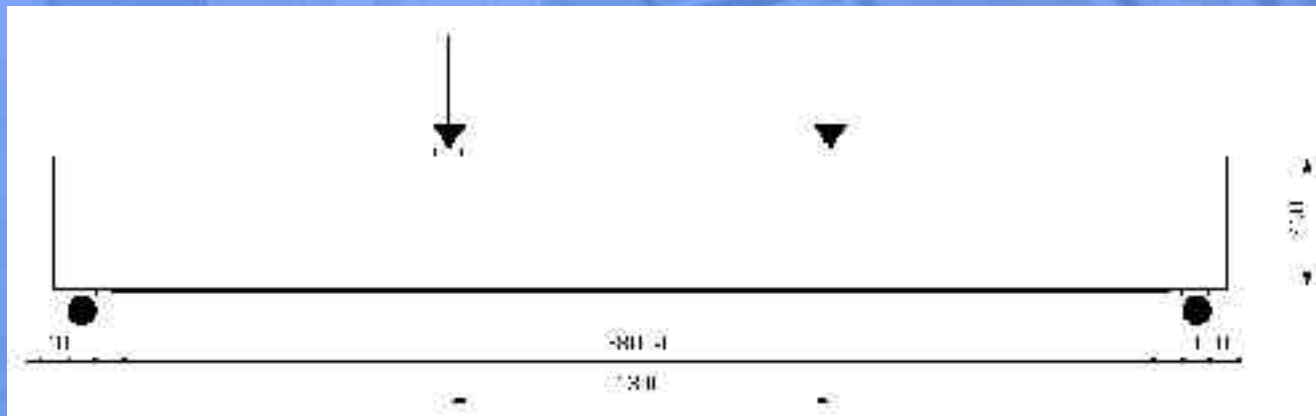
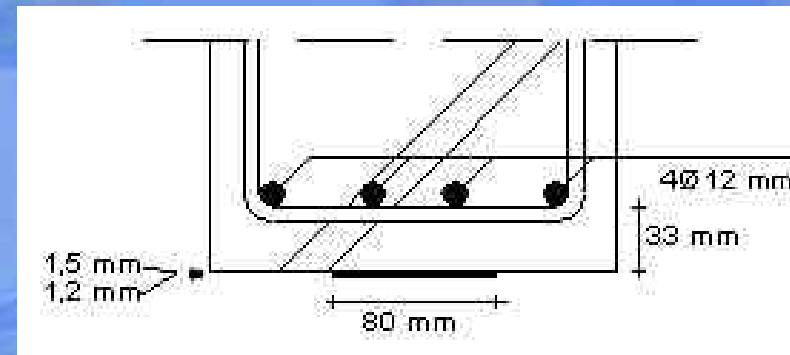
- Eindige elementen modellen
 - Met behulp van DIANA 8.1

Bron- / vergelijkingsmateriaal

- Analytisch model
 - Scheur-, vloe- en bezwijkbelasting
 - Onthechtingsmechanismen volgens CUR aanbeveling 91
- Experimentele resultaten (TU/e)
 - Proeven T9 van T. Hendriks, W. van Adrichem en W. Savelkouls
 - Afstudeeronderzoek L. Bukman

Lineair elastische berekening

- Balk 1 uit het experimentele onderzoek (TU/e)
 - Analytische berekening
 - EEM berekening balkmodel
 - EEM berekening schijfmodel



Conclusies lineair elastisch

- Vergelijkbare resultaten analytische berekening en EEM berekeningen
- Verschil in vervorming
 - dwarskrachtvervorming

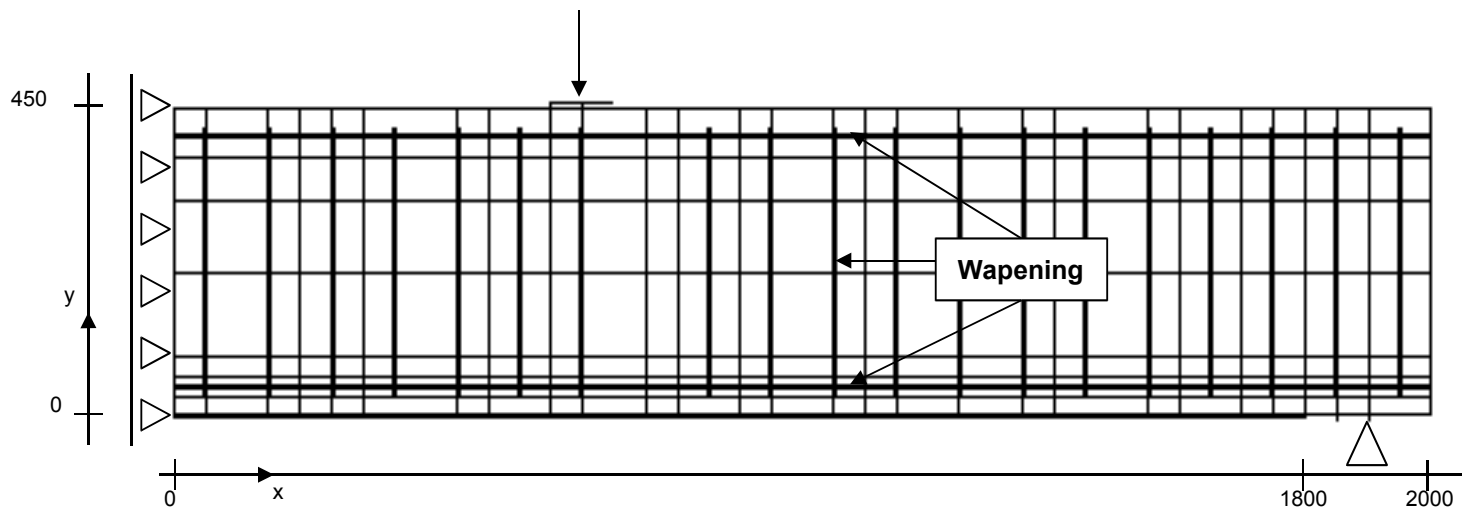
Vervolg van het onderzoek → schijfmodel

- Inclusief dwarskrachtvervorming
- Resultaten beter zichtbaar te maken
(bijvoorbeeld de rekken en spanningen in de lengtedoorsnede)

Niet lineaire berekening zonder onthechting

Schijfmodel

- Last-zakkingsdiagram tot bezwijken (zonder onthechting)
- Scheurvorming

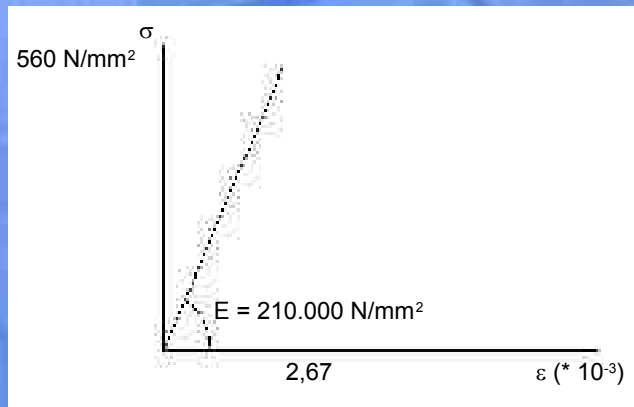
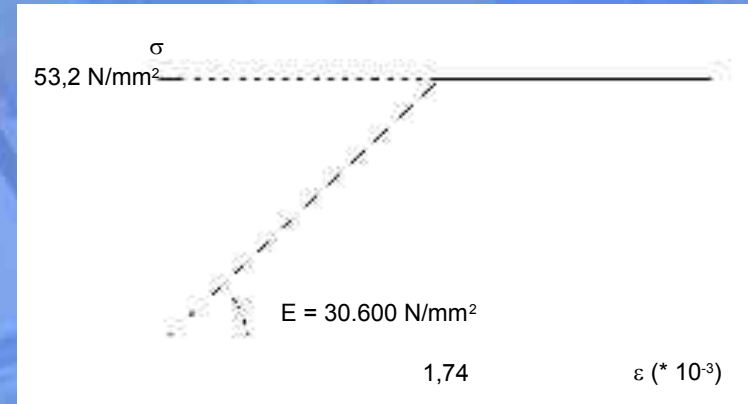
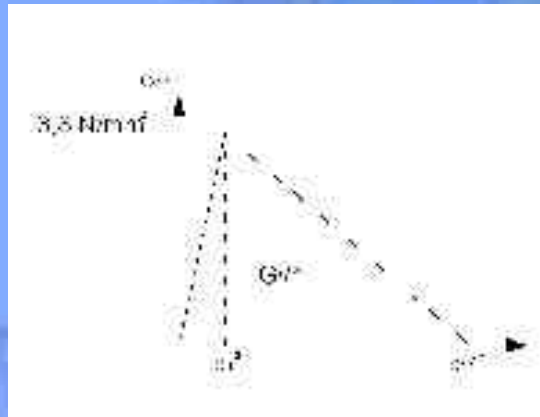


Niet lineaire berekening zonder onthechting

Materiaaleigenschappen

- Beton
 - Scheuren
 - Stuiken

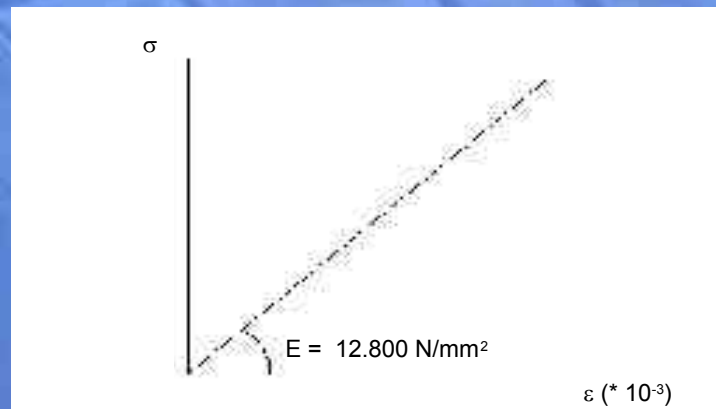
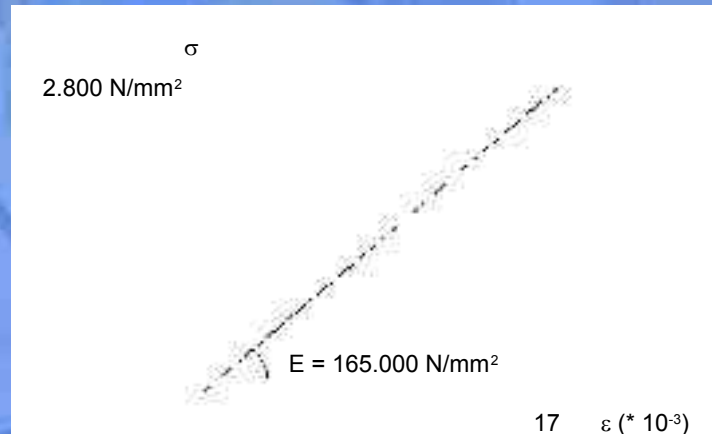
- Wapening
 - Vloeien



Niet lineaire berekening zonder onthechting

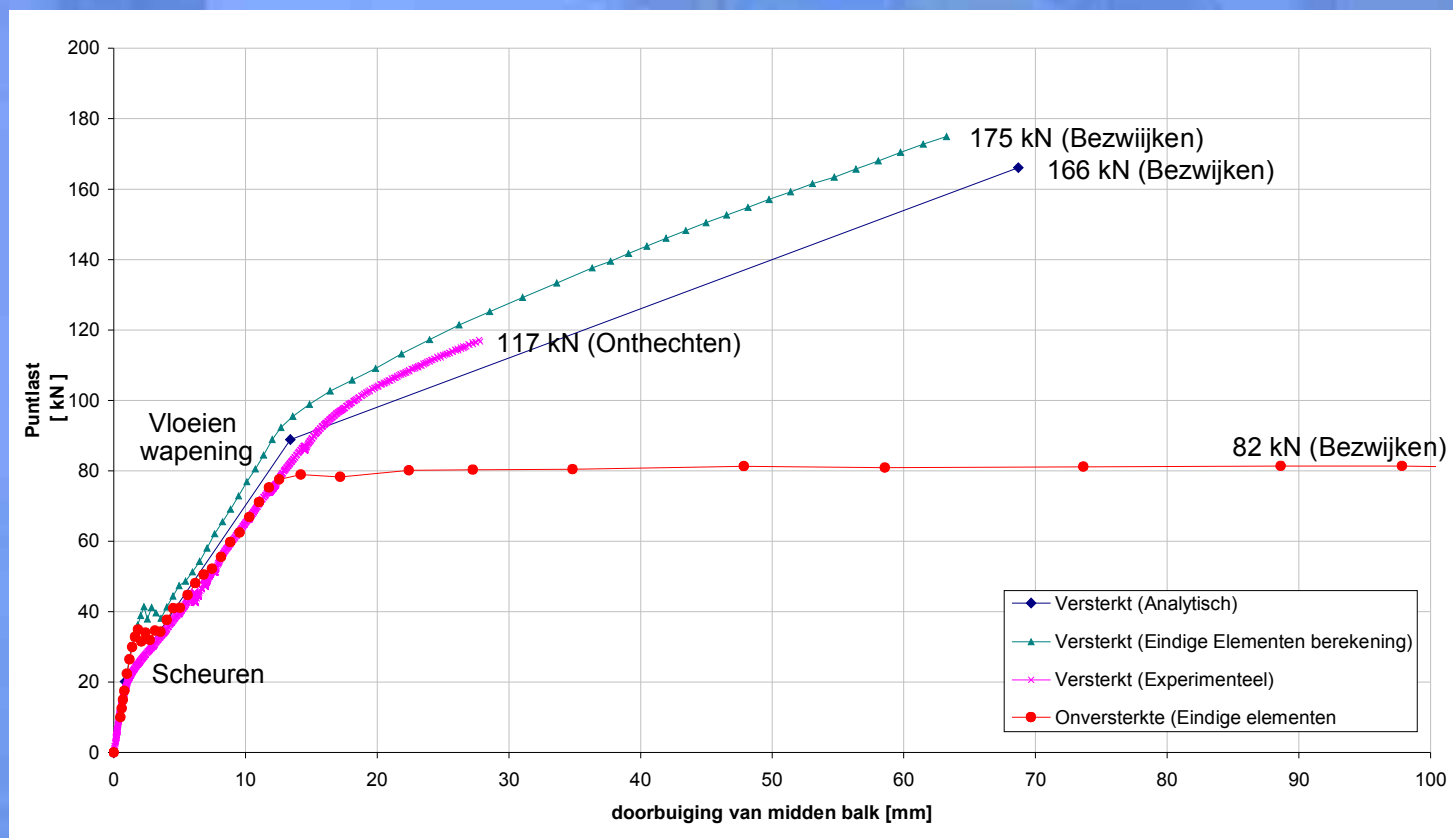
Materiaaleigenschappen

- Koolstofvezelwapening
 - Bros breken
- Lijm
 - Lineair elastisch



Niet lineaire berekening zonder onthechting

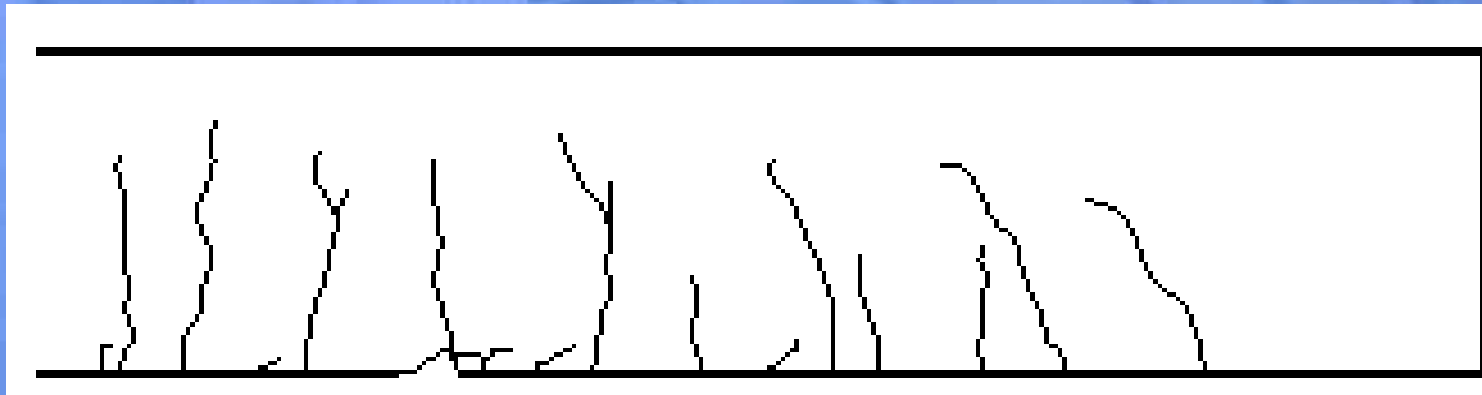
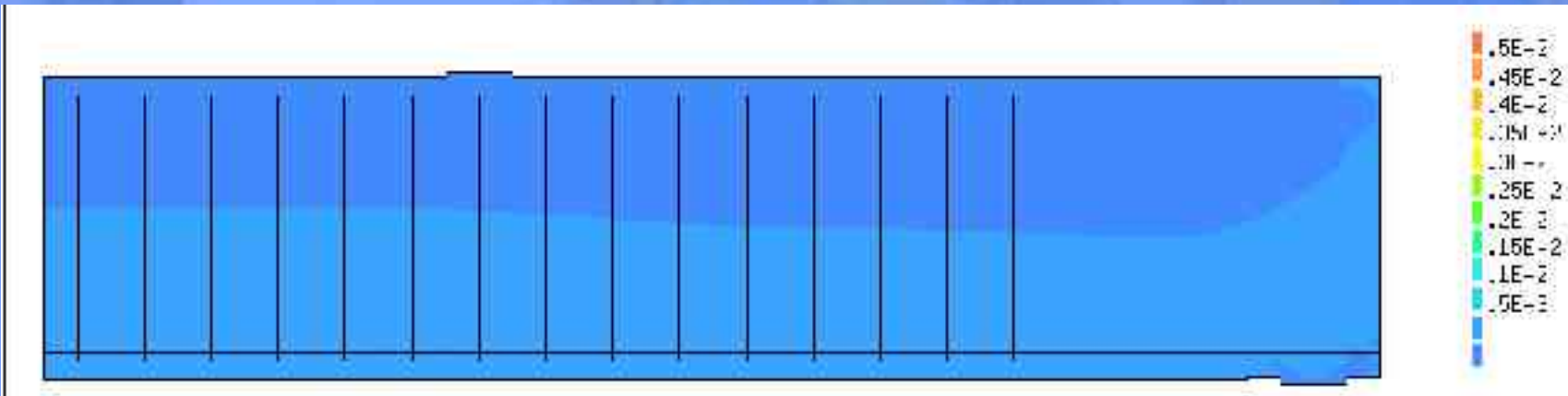
Vergelijking last-zakkingsdiagram





Niet lineaire berekening zonder onthechting

Vergelijking scheurvorming



Conclusies berekening zonder onthechting

- Last-zakkingsdiagram komt goed overeen
- Scheurvorming komt goed overeen
- Geen onthechting gevonden
- Oorzaak: Geen verschil in verticale verplaatsing aan weerszijden (uitgesmeerde) dwarskrachtscheuren

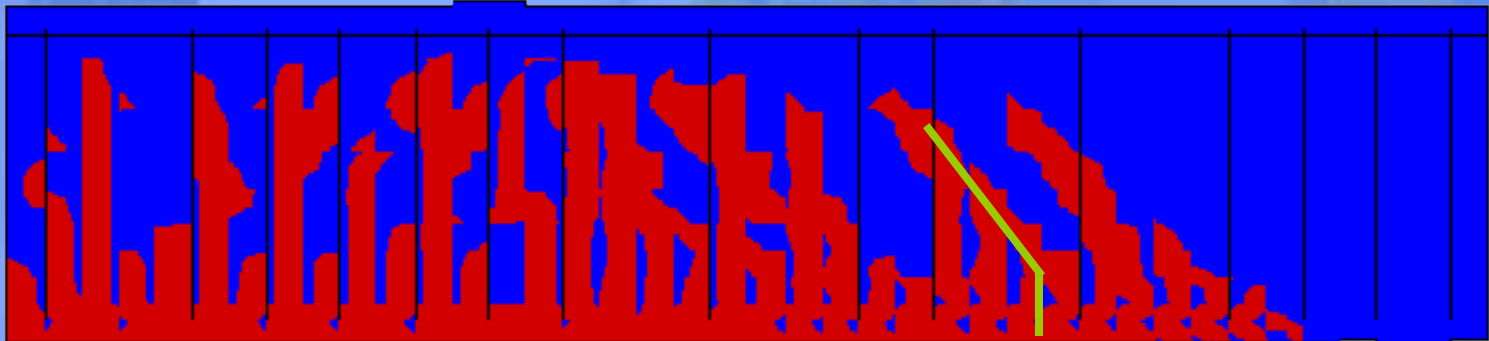
Uitbreiding niet lineaire berekening om onthechting te vinden

- Toevoegen discrete dwarskrachtscheur
- Toevoegen netverfijning
- Toevoegen hechtlaag tussen beton en lijmlaag

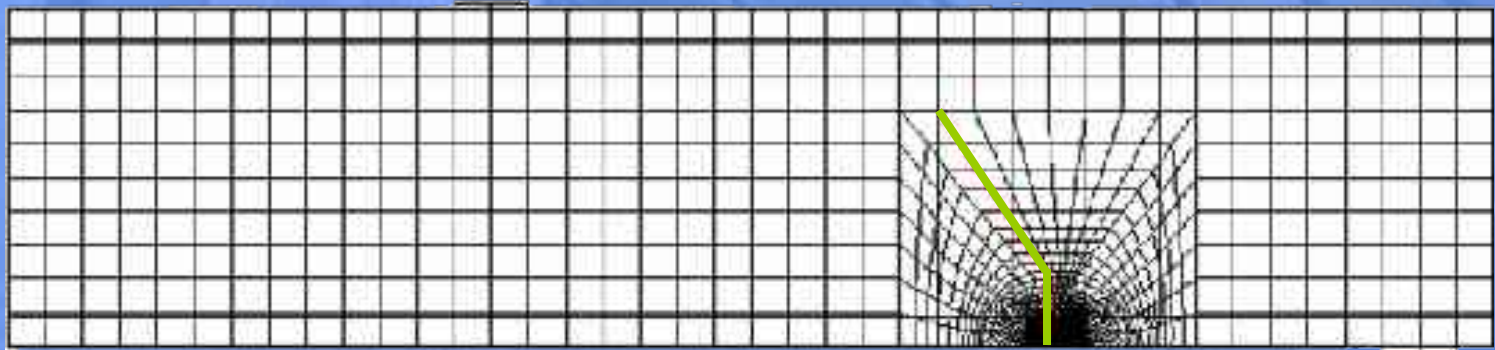
Niet lineaire berekening met onthechting

Toevoegen discrete dwarskrachtscheur en netverfijning

- Niet lineaire berekening zonder onthechting



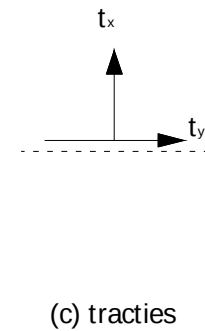
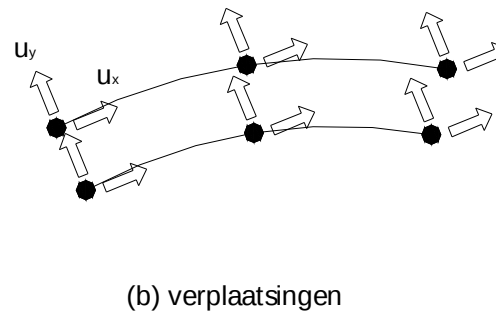
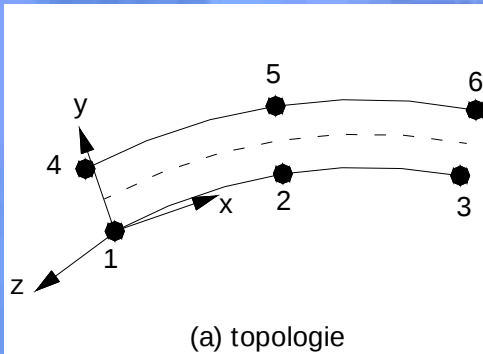
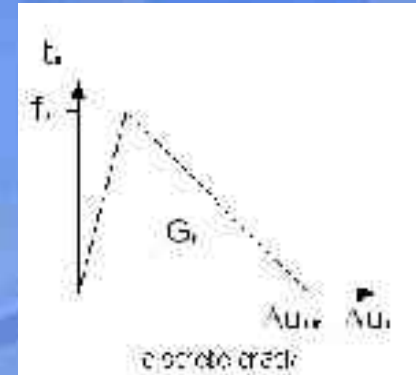
- Niet lineaire berekening met onthechting



Niet lineaire berekening met onthechting

Discrete dwarskrachtscheur

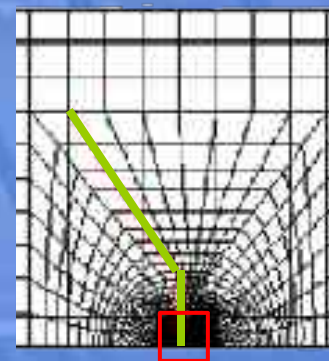
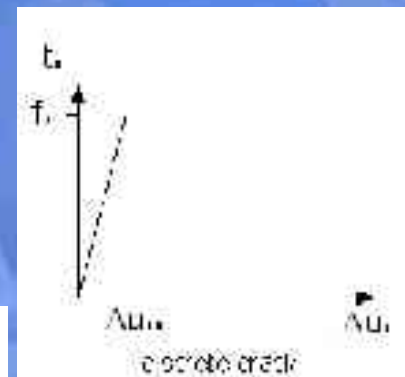
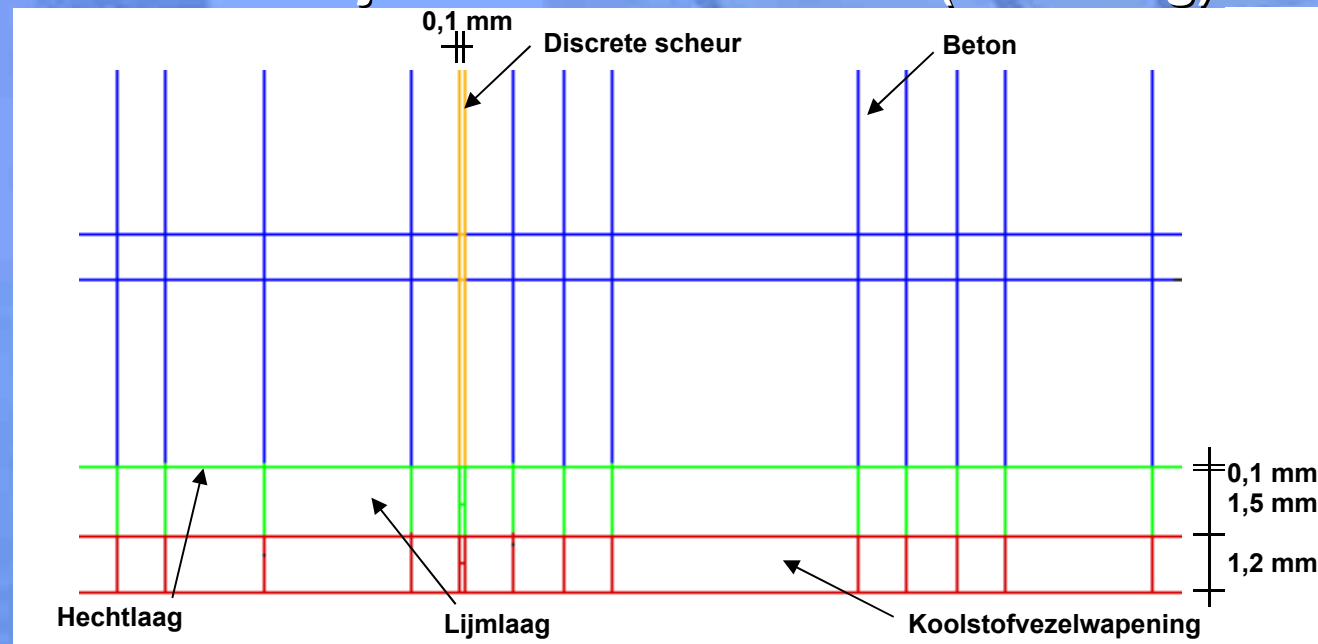
- Interface-elementen
- Lineaire tension softening (y-richting)
- Afschuifstijfheid na scheuren = 0 (x-richting)



Niet lineaire berekening met onthechting

Hechtlaag

- Interface-elementen (tussen beton en lijm)
- Brosse breuk (y-richting)
- Afschuifstijfheid na scheuren ≈ 0 (x-richting)

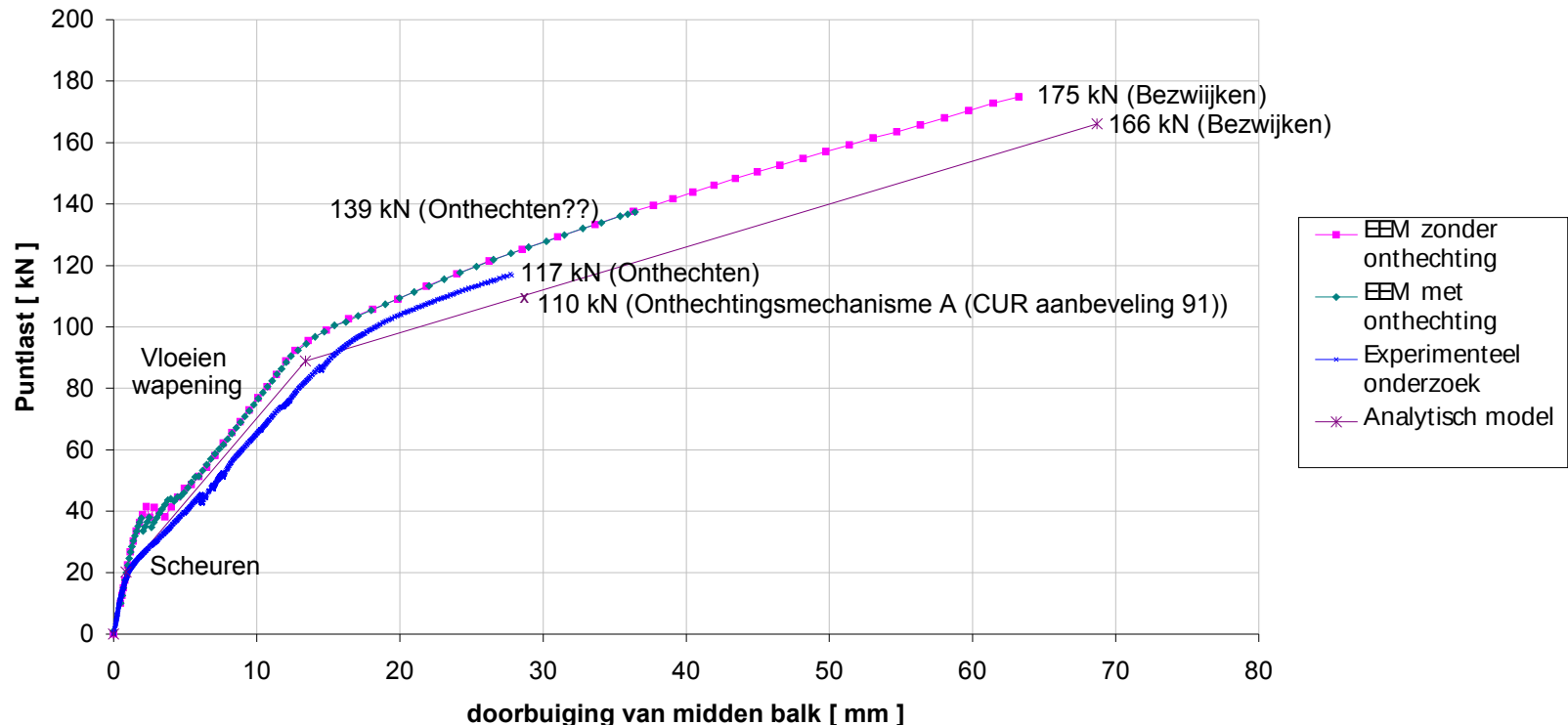




Niet lineaire berekening met onthechting

Eindige elementen berekening

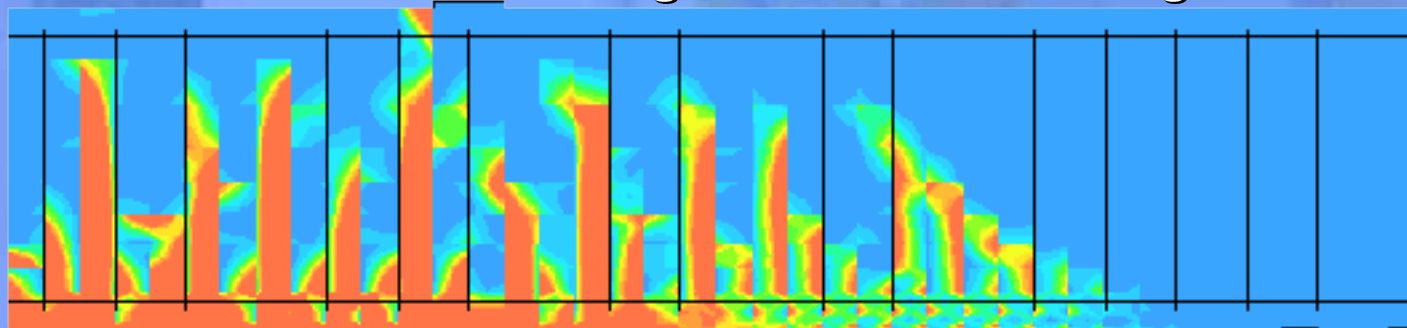
Vergelijking last-zakkingsdiagrammen



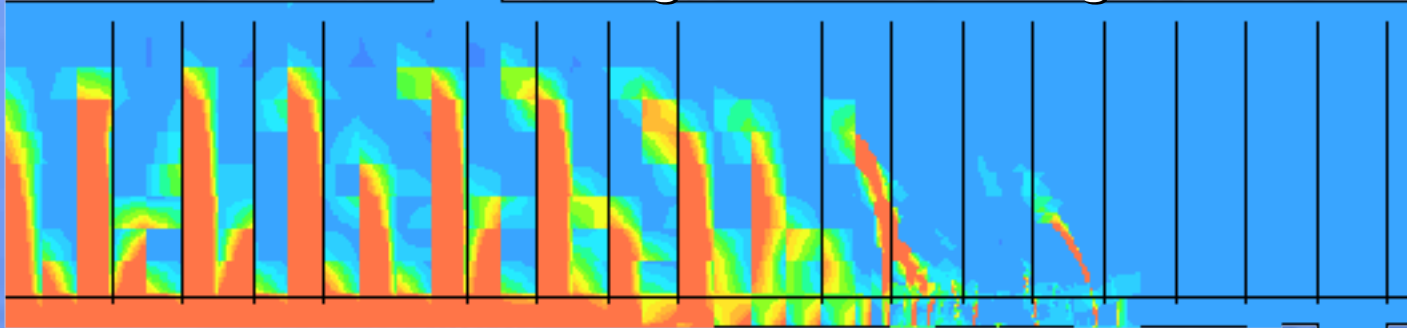
Niet lineaire berekening met onthechting

Vergelijking scheurvorming

- Niet lineaire berekening zonder onthechting



- Niet lineaire berekening met onthechting



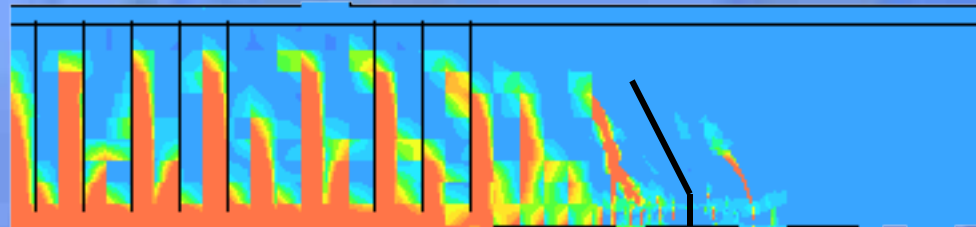
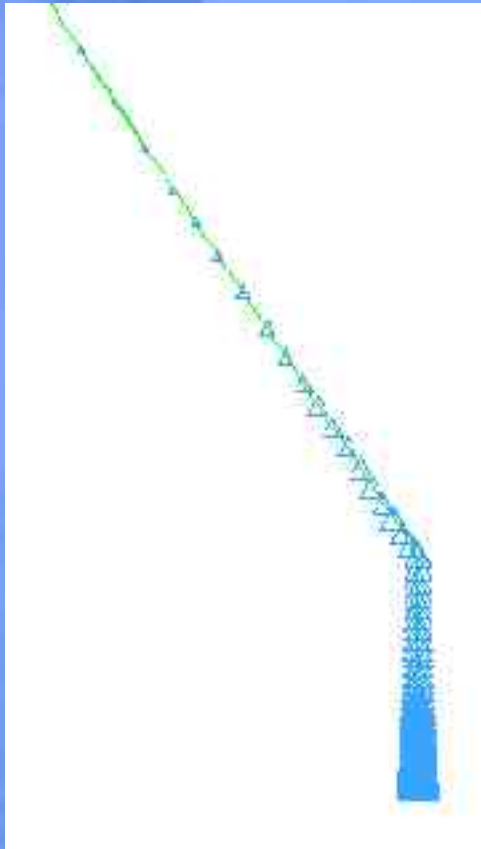
0.5E-2
0.4E-2
0.4E-2
0.3E-2
0.2E-2
0.2E-2
0.1E-2
0.1E-2
0.5E-2
0

0.5E-2
0.4E-2
0.4E-2
0.3E-2
0.3E-2
0.2E-2
0.2E-2
0.1E-2
0.1E-2
0.5E-2
0



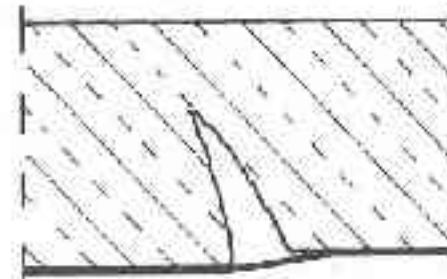
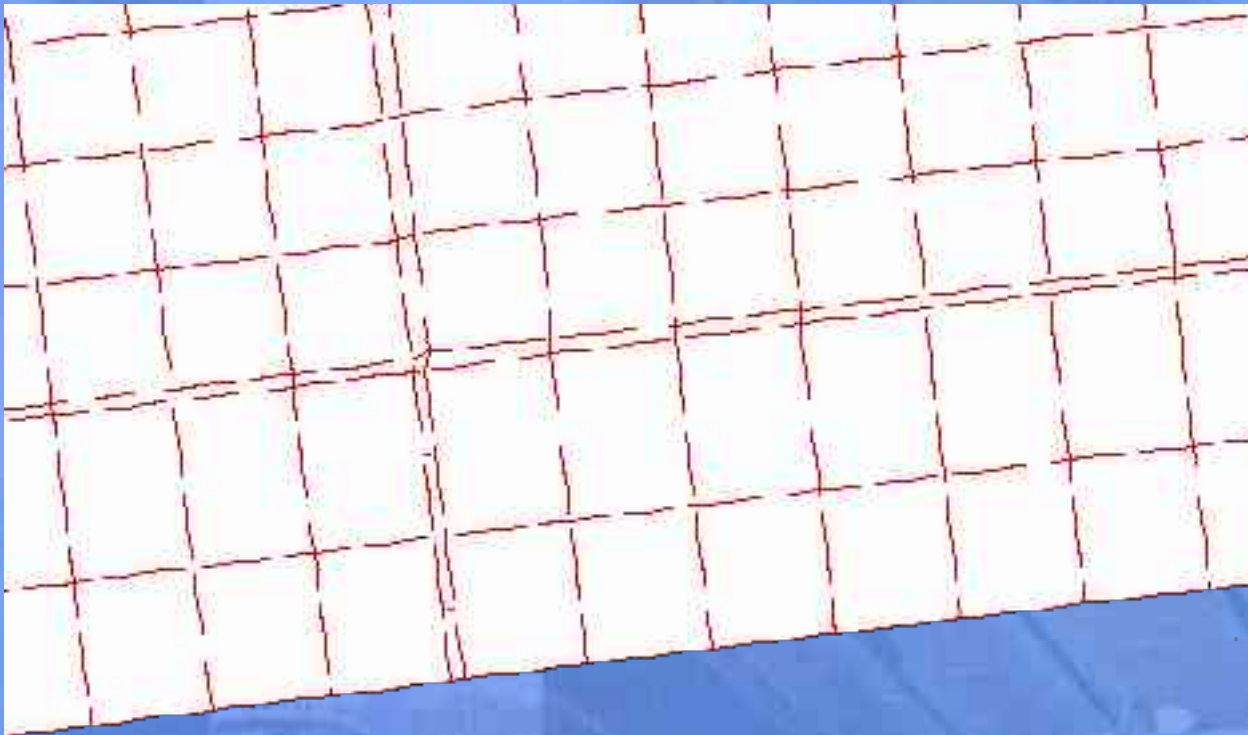
Niet lineaire berekening met onthechting

Discrete dwarskrachtscheur



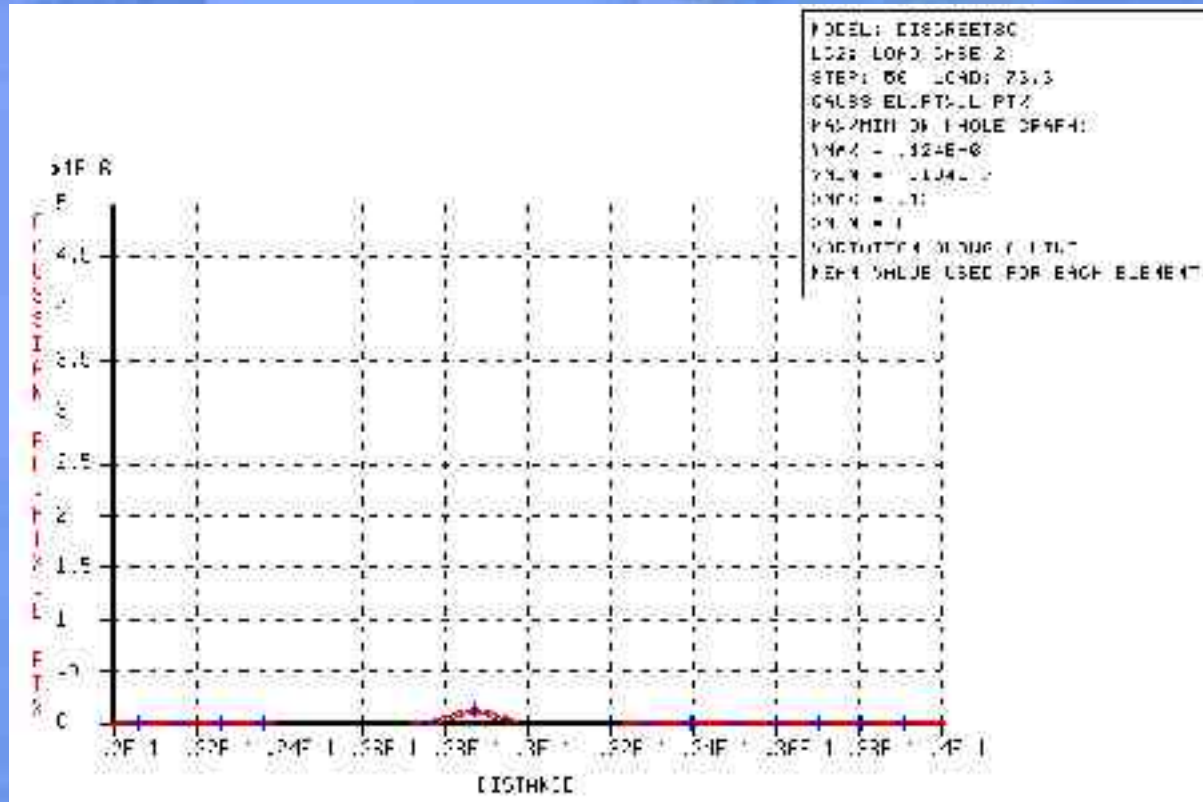
Niet lineaire berekening met onthechting

Onthechting bij dwarskrachtscheur



Niet lineaire berekening met onthechting

Relatieve verplaatsing hechtlaag (loodrecht op koolstofvezelwap.)



Conclusies onthechting bij dwarskrachtscheuren

Vergroten inzicht in onthechtingsmechanisme A

- Eerste stappen van onthechten bij dwarskrachtscheur zijn goed te simuleren met eindige elementen model
- Onthechtingsbelasting ligt in de zelfde orde van grootte als onthechtingsbelasting volgens de CUR aanbeveling 91 en als bij de experimenten
- Schuifspanningen naast de discrete scheur aan de hoge kant

Regelgeving

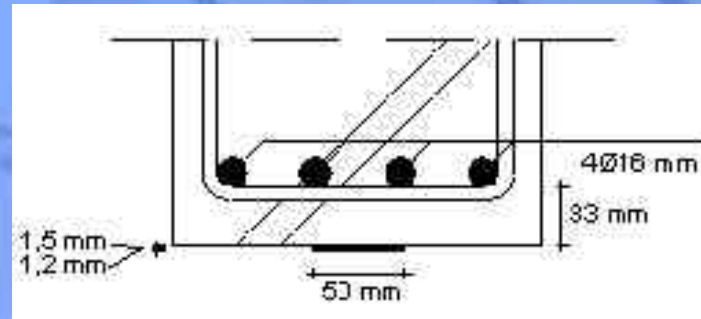
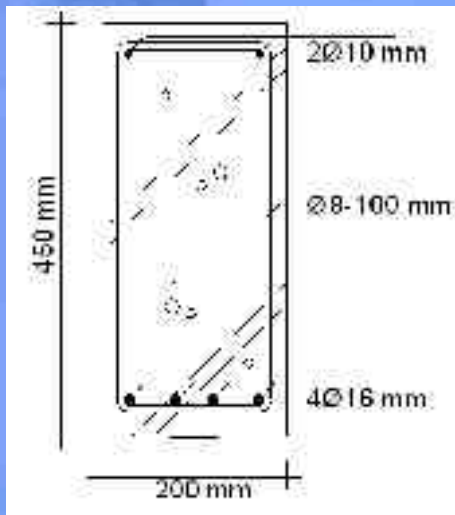
- Voor deze specifieke balk lijkt het niet nodig om aanpassingen te doen aan de regelgeving
- Nog niet mogelijk om verdere uitspraak te doen over regelgeving

Aanbevelingen mechanisme A

- Nader onderzoek naar hoge schuifspanningen in de hechtlaag ter plaatse van de dwarskrachtscheur (eerder onthechting?)
- Ontwikkelen van een element waarbij een relatie kan worden gelegd tussen onthechting in de afschuifrichting en onthechting in de normaalrichting
- Nader onderzoek naar verdere onthechting koolstofvezelwapening
- Onderzoek uitbreiden met een parameterstudie naar de verschillende relevante eigenschappen bij het onthechten

Onthechting bij buigscheuren

Balk 3 uit het experimentele onderzoek (TU/e)



Opzet numeriek onderzoek

Onthechting bij buigscheuren

Belasten $\rightarrow$ (buig)scheuren $\rightarrow$ hoge schuifspanning $\rightarrow$ onthechten?

Niet-lineaire berekening zonder onthechting

- Last-zakkingsdiagram tot bezwijken (zonder onthechting)
- Scheurvorming

Niet-lineaire berekening met onthechting

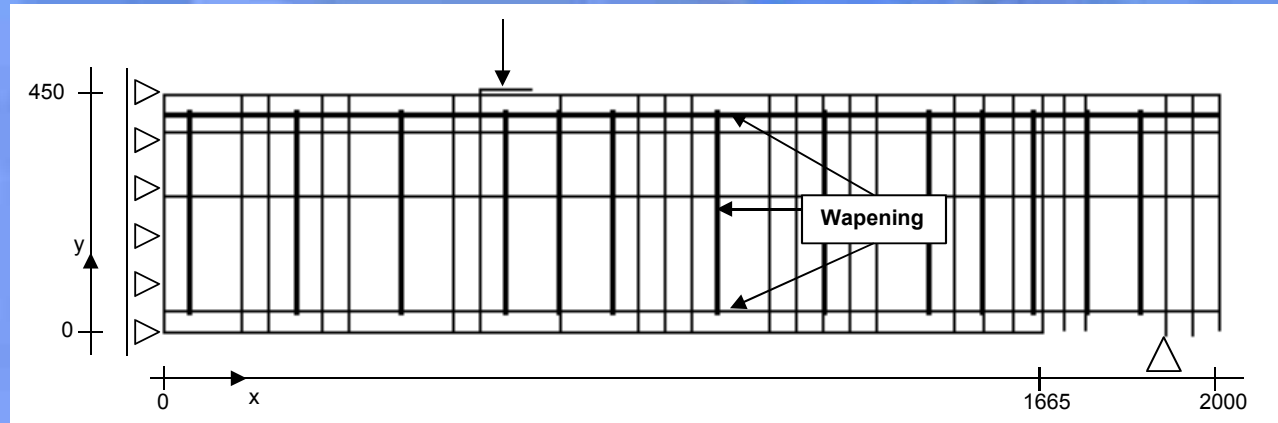
- Daadwerkelijke simulatie van onthechting bij buigscheuren

Bron- / vergelijkingsmateriaal

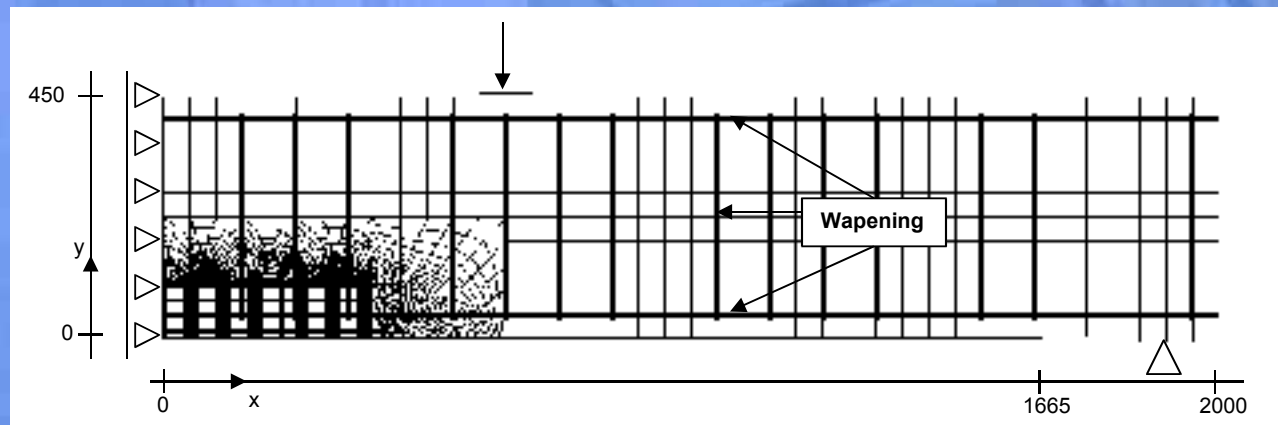
- Analytisch model
- Experimentele resultaten (TU/e)



Modellen niet-lineaire berekening



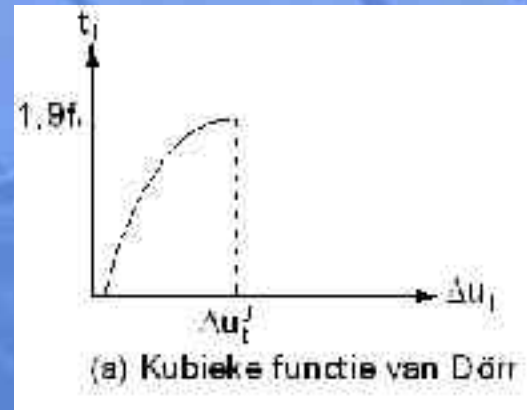
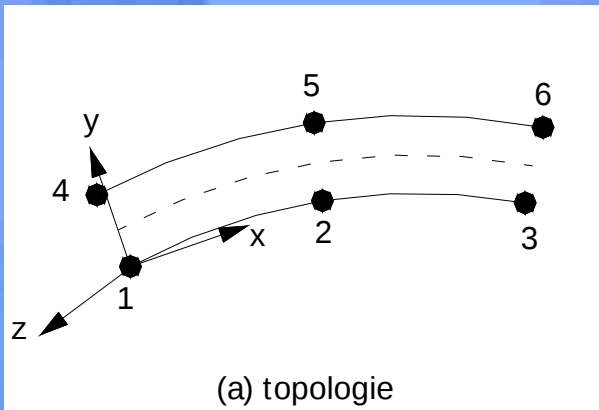
Zonder onthechting



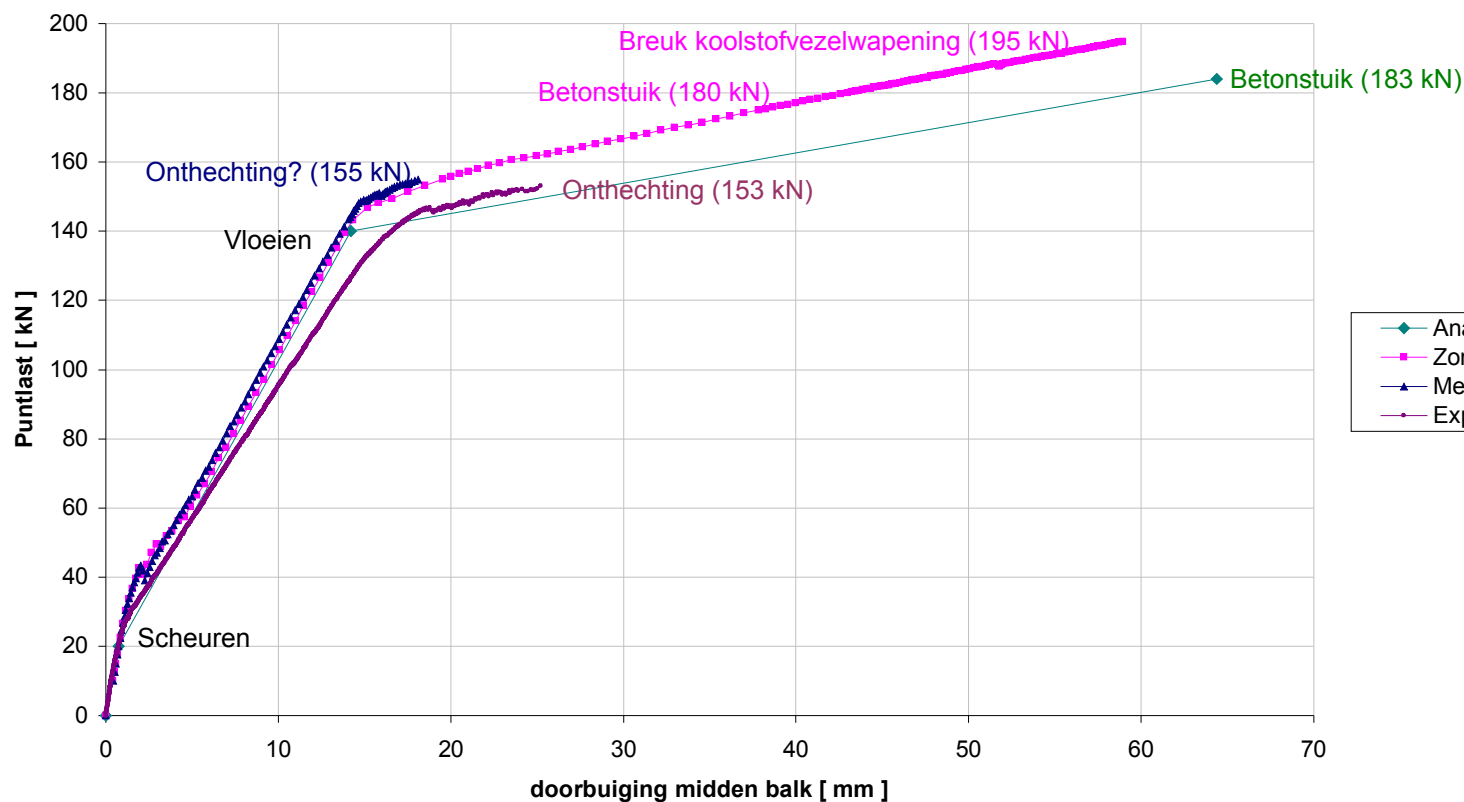
Met onthechting

Hechtlaag

- Interface-elementen
- Hecht-slipeigenschappen (x-richting)
- Lineair elastisch (y-richting)



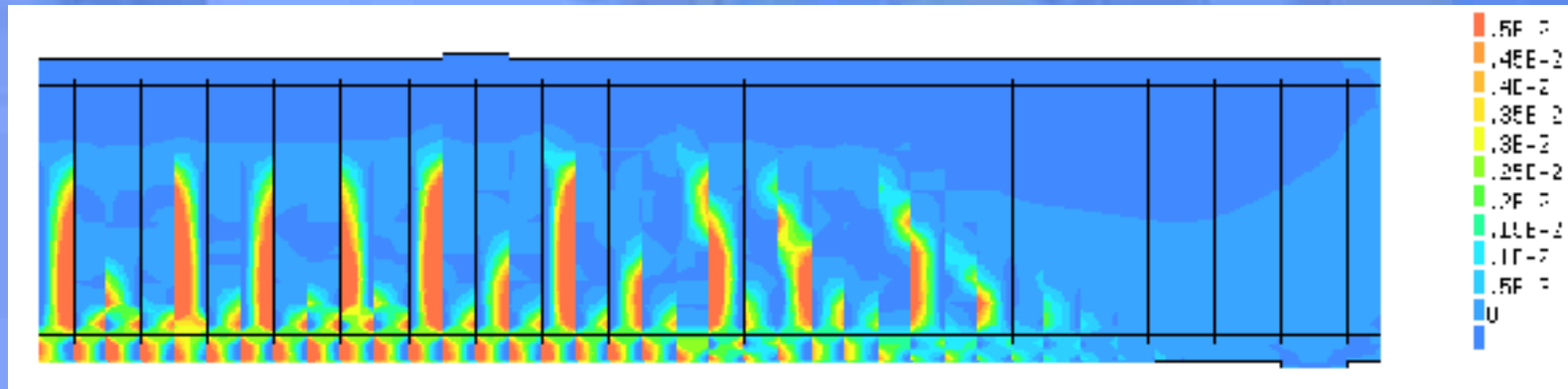
Last-zakingsdiagram



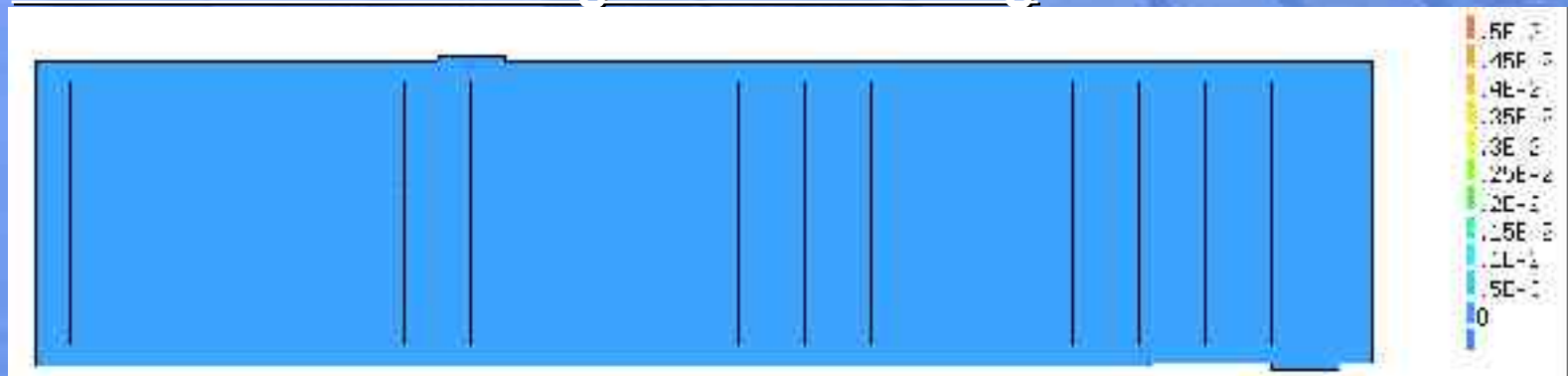


Scheurvorming

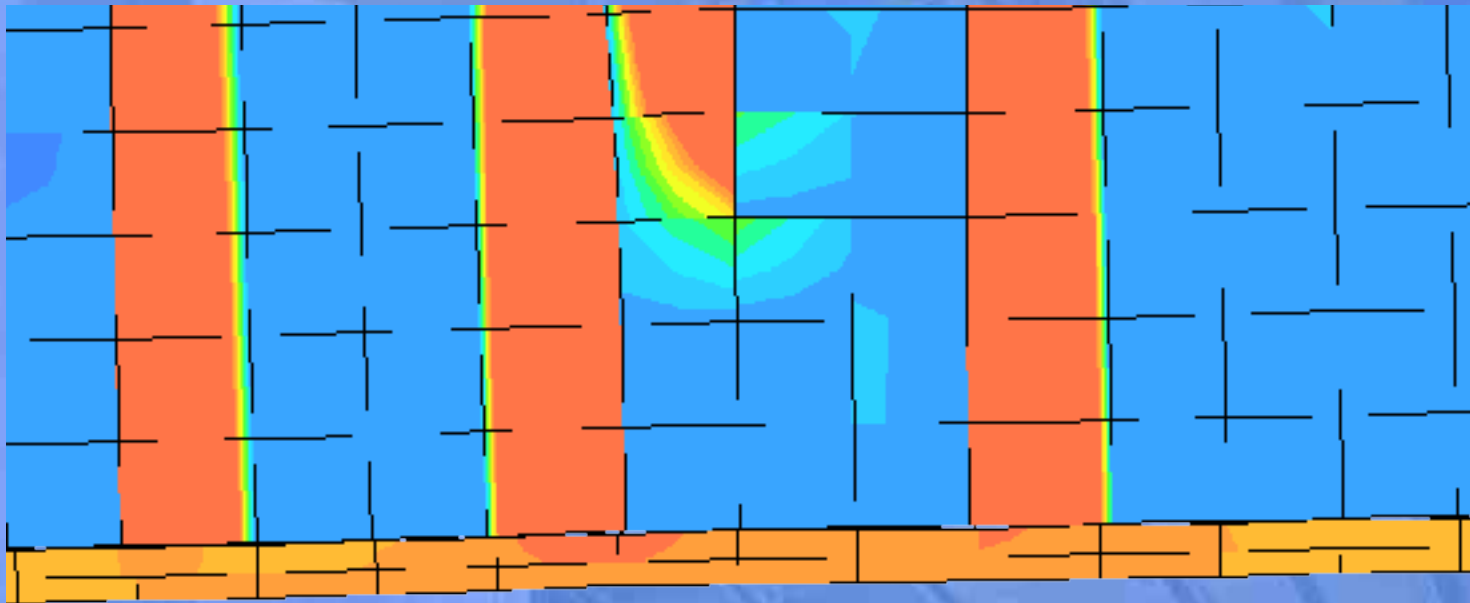
Niet lineaire berekening zonder onthechting



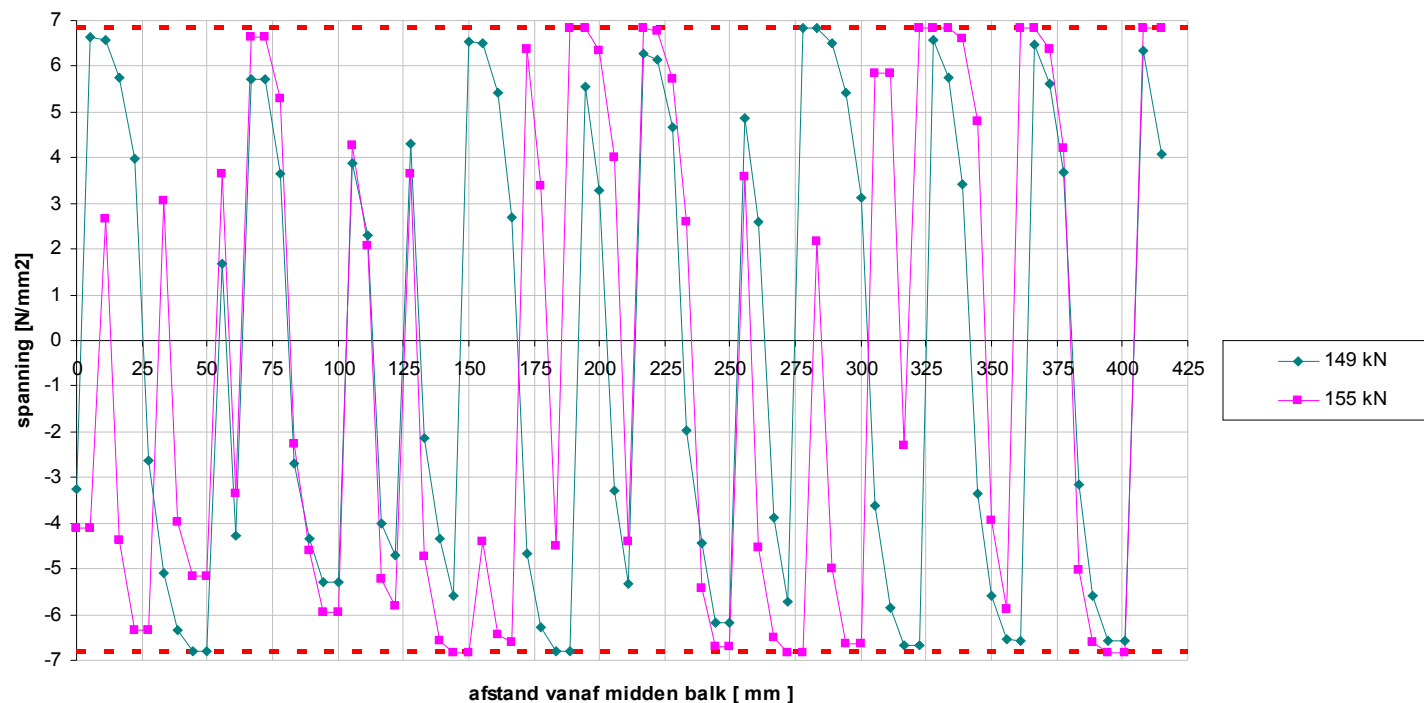
Niet lineaire berekening met onthechting



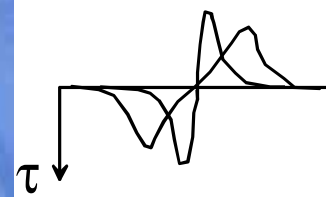
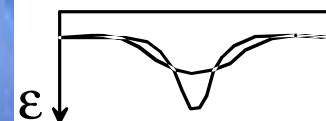
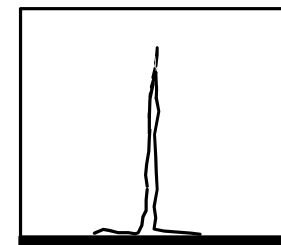
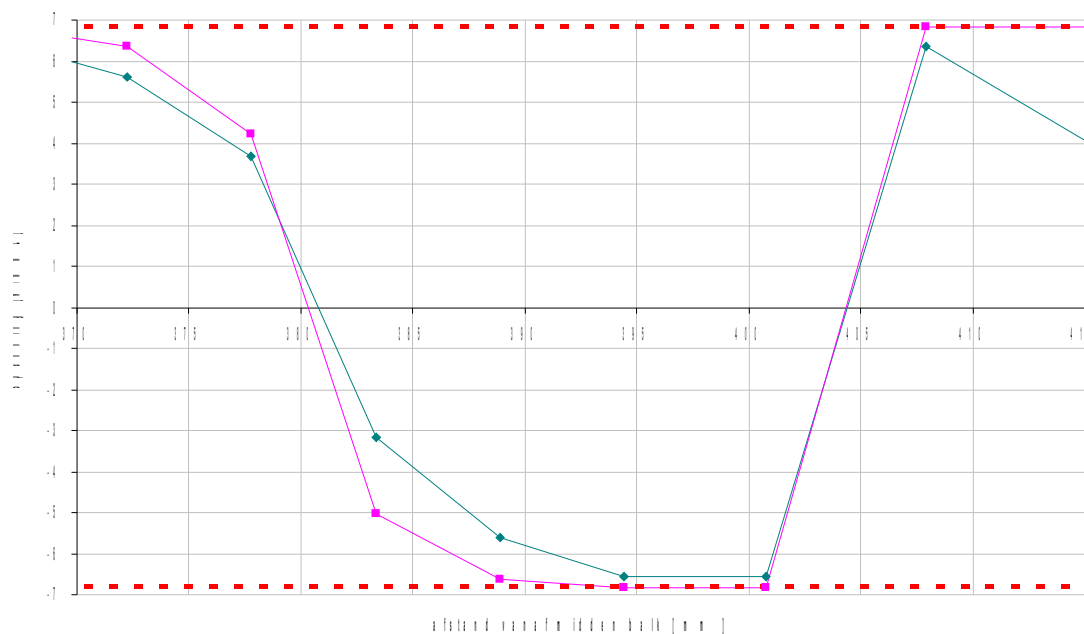
Onthechting (slip)



Schuifspanning in de hechtlaag

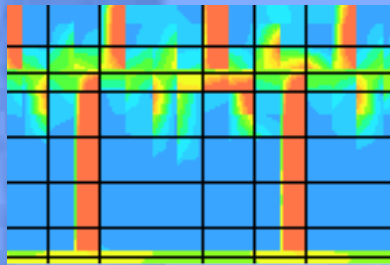


Schuifspanning in de hechtlaag

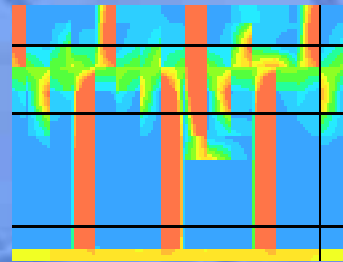




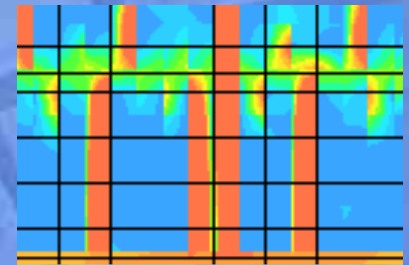
Scheurvorming



149 kN



150 kN



155 kN



Conclusies onthechting bij buigscheuren

Vergroten inzicht in onthechting bij buigscheuren

- Simulatie onthechtingsmechanisme gedeeltelijk mogelijk
 - Er ontstaan hoge schuifspanningen ter plaatse van buigscheuren
 - Terugval in schuifspanning niet te zien omdat er geen afbreekcriterium / softening is toegepast
 - Niet duidelijk waar te nemen of onthechting doorzet
 - Beton onder de onderwapening vrijwel volledig gescheurd

Regelgeving

- Nog niet mogelijk om uitspraken te doen over de regelgeving

Aanbevelingen ont hechting bij buigscheuren

- Onderzoek naar een model met discrete buigscheuren in plaats van uitgesmeerde buigscheuren (hogere schuifspanningen?)
- Onderzoek uitbreiden met
 - Ontwikkelen van een element waarbij een relatie kan worden gelegd tussen ont hechting afschuifrichting – eigenschappen normaalrichting (User supplied subroutines)
 - Nader onderzoek naar hecht-eigenschappen op het grensvlak lijmlaag – beton
- Onderzoek uitbreiden met een parameterstudie naar de verschillende relevante eigenschappen bij het ont hechten

Samenvatting

Conclusies

- Onthechting bij dwarskrachtscheuren inzichtelijk te maken met een eindige elementen berekening
- Onthechting bij dwarskrachtscheuren in zelfde orde van grootte als CUR aanbeveling 91 en experiment
- Onthechting bij buigscheuren behoeft verder onderzoek
- Uitspraken over regelgeving nog niet mogelijk

Aanbevelingen

- Modellen bruikbaar als uitgangspunt voor vervolgonderzoek, eventueel na aanpassing materiaaleigenschappen hechtlaag
- Onderzoek uitbreiden met parameteronderzoek
- Overige onthechtingsmechanismen verder onderzoeken



Vragen

