

**MASTER**

**Het constructieve gedrag van spouwankers in brede spouwmuren**

Kobesen, M.G.

*Award date:*  
2014

[Link to publication](#)

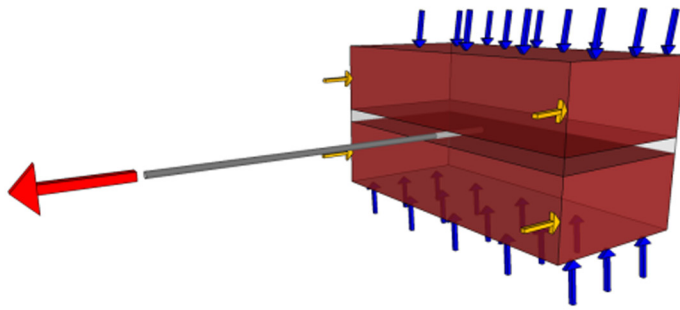
**Disclaimer**

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.

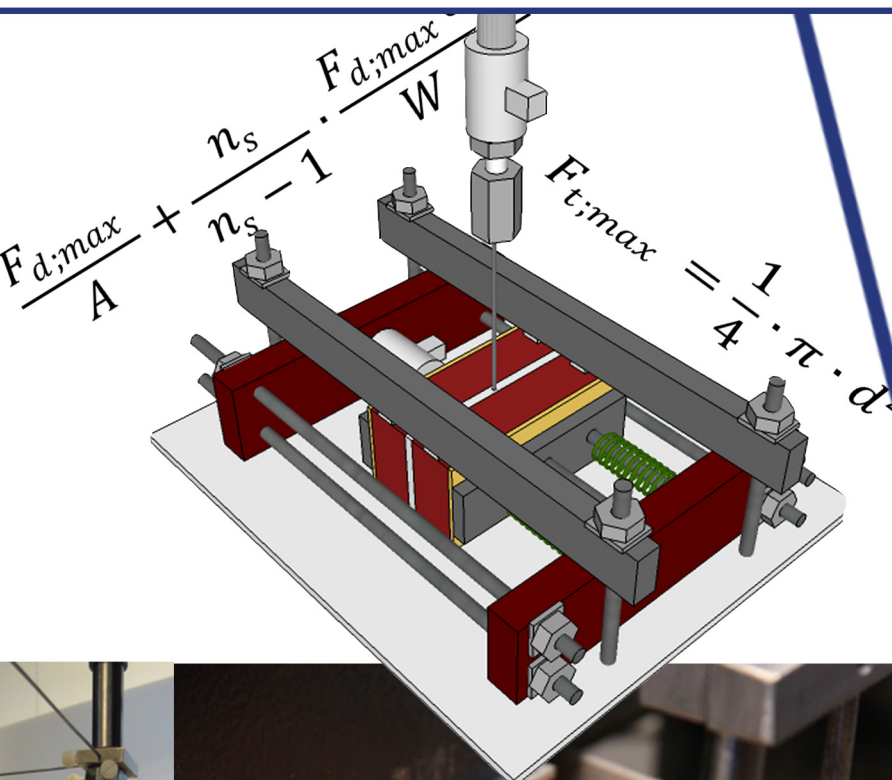
- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain



$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \epsilon$$

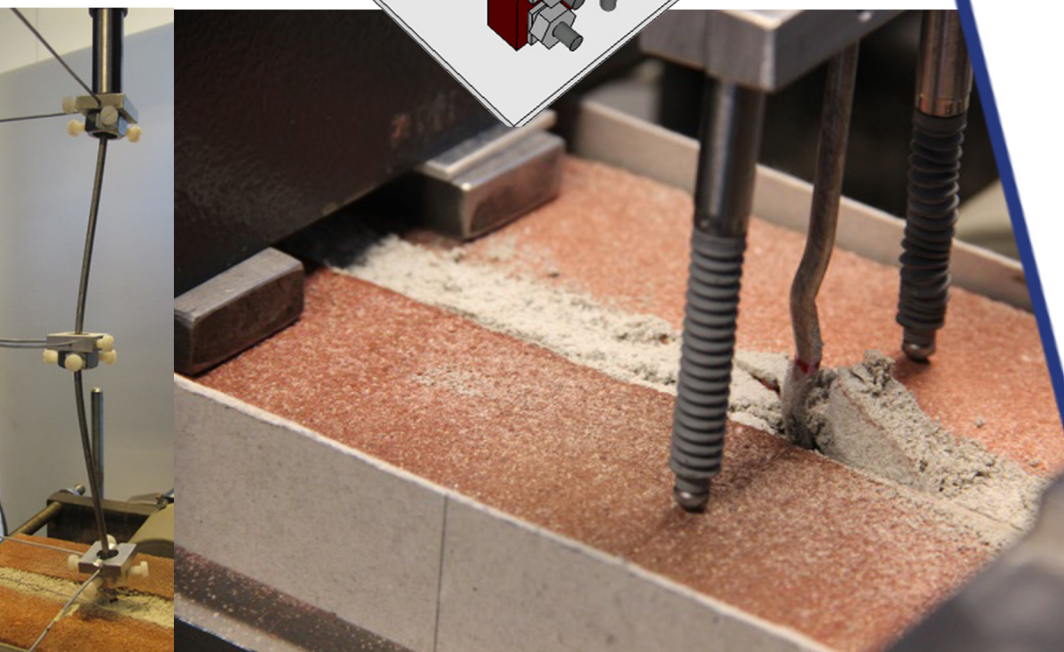
# Het constructieve gedrag van spouwankers in brede spouwmuren

Afstudeerverslag van M.G. Kobesen



$$\frac{F_{d;max}}{A} + \frac{n_s}{n_s - 1} \cdot \frac{F_{d;max}}{W}$$

$$F_{t;max} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$$



# AFSTUDEERRAPPORT

## Het constructieve gedrag van spouwankers in brede spouwmuren

### *Colofon*

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Document              | Afstudeerverslag                              |
| Documentnummer        | A-2014.67                                     |
| Cursus/project:       | 7PP37   |
| Instelling:           | Technische Universiteit Eindhoven             |
| Specialisatie         | Structural Design                             |
| Voorzitter:           | Prof. Ir-arch. D.R.W. Martens                 |
| Hoofdbegeleider TU/e: | Prof. Ir-arch. D.R.W. Martens                 |
| Tweede Begeleider:    | Dr. Ir. A.T. Vermeltoort                      |
| Gastbedrijf:          | Bartels Ingenieursbureau BV                   |
| Externe begeleider:   | ir. S.G.C. Mulders (Bartels Ingenieursbureau) |
| Datum:                | 19-08-2014                                    |
| Auteur + stud. nr.:   | Ing. M.G.Kobesen - 0793053                    |





## Voorwoord

Voor u ligt een afstudeerrapport dat het resultaat is van een onderzoek naar “*het constructieve gedrag van spouwankers in brede spouwmuren*”. Met dit afstudeerrapport zal ik mijn masteropleiding Structural Design aan de Technische Universiteit in Eindhoven afronden.

Gedurende mijn afstuderen heb ik vele aspecten van ‘academisch’ onderzoeken kunnen meemaken, waardoor mijn kennis voor het uitvoeren van proeven, het analyseren van deze gegevens, maar ook het verwerken van de gegevens tot data is toegenomen. Naast de kennis die ik heb opgedaan over het uitvoeren van ‘academisch’ onderzoek, is de kennis van metselwerk en dan vooral spouwankers in metselwerk vergroot. Bijvoorbeeld dat een verkeerde combinatie van stenen, mortels en spouwankers kan leiden tot bezwijken.

Mijn gebruik van de Nederlandse taal was aan het begin van mijn afstuderen niet optimaal, gedurende het proces begon ik de geconstateerde fouten door de docenten te begrijpen. Het gebruik van de Nederlandse taal verbeterde.

Om dit afstudeerwerk te kunnen voltooien, is vanaf de eerste dag tot de afronding de kring betrokken personen steeds groter geworden. Ik wil alle personen die betrokken zijn geweest bij mijn afstuderen daarom ook bedanken voor hun bijdragen aan mijn afstuderen.

Allereerst wil ik mijn begeleiders aan de universiteit bedanken voor de betrokkenheid bij mijn afstuderen, de heren D.R.W. Martens en A.T. Vermeltfoort, die vanaf het begin tot het eind betrokken zijn bij mijn afstuderen en mijn afstuderen op een hoger niveau hebben weten te brengen. De persoonlijke begeleiding heb ik als prettig ervaren.

Daarnaast wil ik graag de medewerkers van het Pieter van Musschenbroek laboratorium bedanken. Zij zijn een grote steun geweest tijdens het experimentele onderzoek en wil de medewerkers graag bedanken voor de goede werksfeer en integraal meedenken naar oplossingen van het uitvoeren van de proeven. Ook wil ik twee docenten bedanken die mij onbekende programma’s hebben leren eigen maken, waardoor ik het statistisch en numeriek onderzoek heb kunnen uitvoeren, namelijk de heren J. Van Schijndel en A. Di Bucchianico.

Vervolgens wil ik het bedrijf Bartels Ingenieursbureau bedanken voor de afstudeerplek die zij hebben geboden. Mijn begeleidster S.G.C. Mulders die betrokken is bij mijn afstudeerproject als begeleider en in de praktijk de problematiek van de spouwankers constateerde. Daarnaast wil ik de heren C. van Dijk, G. Hol en J. Willems van de afdeling materiaalkunde bedanken voor hun medewerking, wat heeft geresulteerd in het verkrijgen van informatie over door hun uitgevoerde praktijkonderzoeken, verschillende denkwijzen en een prettige werksfeer.

Als leveranciers van de spouwankers zou ik graag de heren A. Termeij van Gebroeders Bodegraven BV en J. Heiner van Borgh BV willen bedanken voor de medewerking in het experimentele onderzoek en levering van de spouwankers.

In het bijzonder wil ik H. Kobesen en O. Sauer bedanken voor de nachtelijke uurtjes hulp en controles van het rapport die zij hebben uitgevoerd om tot dit afstudeerwerk te komen.

Als laatste wil ik ook mijn medestudenten F. Vink en F. Rake bedanken voor hun hulp en luisterend oor tijdens mijn afstuderen.

Allen hartelijk bedankt!

Veel leesplezier toegewenst!

Maaïke Kobesen

Rotterdam, 17 augustus 2014



## Samenvatting

In het recente verleden (2002) zijn metselwerk gevels van flatgebouwen uit de jaren 1955 tot 1985 ingestort. De oorzaak van deze instortingen bleek te liggen in een sterke achteruitgang van de kwaliteit van het metselwerk (bijvoorbeeld hechtsterkte, stijfheid), meestal gecombineerd met ernstige corrosie of volledig functieverlies van de spouwankers [VROM07, VROM11, SBR11 en SBR12].

Uit het praktijk- en literatuuronderzoek blijkt dat de gevonden vormen van bezwijken van de spouwankers of combinatie van de spouwankers met het spouwblad niet worden getoetst in de normen, voorschriften of publicaties (NEN845-1 vermeldt alleen dat het beproefd moet worden en de interactie tussen spouwanker en metselwerk meegenomen moet worden, maar hoe is niet bekend). Hierdoor schrijven de normen, voorschriften en publicaties slechts een deel van de mogelijke vormen van bezwijken voor en in een beperkter aantal situaties dan die optreden in de praktijk [VROM07]. De normen gaan uit van de volgende criteria/toetsingsvormen die de capaciteit van het spouwanker berekenen:

1. de gemiddelde waarden (trek- of drukcapaciteit van het spouwanker) van de leverancier gedeeld door een veiligheidsfactor, of
2. de treksterkte van het spouwanker en/of,
3. de buig- en normaalspanningen in het spouwanker moeten kleiner zijn dan de vloeispanning.

Uit de praktijkanalyse wordt echter geconcludeerd dat de verbinding tussen spouwanker en mortel belangrijk is voor de opname van de windbelasting. Met toenemende spouwbreedtes is ook duidelijk geworden dat het knikgedrag van de spouwankers een grotere rol gaat spelen in de stabiliteit van de muren en capaciteit van het spouwanker.

Tevens werd uit het vooronderzoek duidelijk dat het instorten van gevels gedeeltelijk te maken heeft met een te kort aan spouwankers in de spouwmuur ten opzichte van het Nederlandse advies (uit normen en voorschriften) en door het verkeerd of niet plaatsen van de spouwankers [BAR14].

Uit het vooronderzoek is de volgende doelstelling geformuleerd:

*“Inzicht krijgen in de druk- en trekcapaciteit van spouwankers bij spouwbreedtes tussen 150-280 mm zodat een reken- en testmethode ontwikkeld kan worden die het gedrag van spouwankers in een spouwmuur voorspelt.”*

Om de doelstelling te behalen is onderzoek verricht naar het constructieve gedrag (trek- en druk capaciteit) van het spouwanker in een gemetseld en gelijkmatig spouwblad. Voor de analyse hiervan zijn een viertal onderzoeken verricht, opeenvolgend: experimenteel, statistisch, analytisch en numeriek. Elk onderzoek heeft geleid tot een beter inzicht in het constructieve gedrag van spouwankers in brede spouwmuuren.

Het experimentele onderzoek is aan de hand van de gevonden parameters (zoals staalkwaliteit, diameter, vorm spouwanker, lengte spouwanker) in het vooronderzoek opgebouwd. Voor de bepaling van de parameters die invloed uitoefenen op de trekcapaciteit ( $F_{t,max}$ ) van het spouwankers zijn 84 proeven uitgevoerd op vier verschillende typen spouwankers. Voor, tijdens en na de proeven zijn een aantal gebreken geconstateerd waardoor de begincondities of randvoorwaarden van de proefstukken niet gelijk zijn gebleven tijdens het uitvoeren van de proef. Daarnaast heeft het geleid tot verschillende vormen van bezwijken van de verschillende typen spouwankers. De volgende drie vormen van bezwijken zijn geconstateerd:

- Spouwanker wordt uit de voeg getrokken, mortel wordt verbrijzeld
- Steen onthecht van de mortel
- Stenen splijten

Het type spouwanker heeft invloed op de vorm van bezwijken en op  $F_{t,max}$ . Afhankelijk van het type spouwanker, type mortel en staalkwaliteit zijn de waarden voor  $F_{t,max}$  bepaald, de gemiddelde belasting per type spouwanker is gelegen tussen 1875N en 4035 N.

Voor de analyse van de drukcapaciteit zijn 72 proeven uitgevoerd op twee typen spouwankers (één voor het gelijkmatige metselwerk en één voor het gemetselde metselwerk) met verschillende lengtes, die allen resulteerden in het knikken van het spouwanker. Afhankelijk van de spouwbreedte (150-280 mm) knikt het spouwanker bij belastingen tussen 750 N en 1550 N.

Op basis van een regressieanalyse is een statistisch model opgesteld, met de gemiddelde waarden van de proefresultaten. Met de hieronder weergegeven regressievergelijkingen kunnen voorspellingen worden gedaan voor  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$ .

Trek:  $F_{t,max} = -12769,3 + 3142,0x_1 + 46,3x_2 - 19,5x_3 + 969,0x_4 + 1730,4x_5 + 3024,4x_6$

Druk:  $F_{d,max} = -7926,1 - 81,7x_2 - 10,7x_3 + 9,9 \cdot 10^8 x_{33}^4 + 2830,6x_4 + 4,4x_6$

Waarin  $x_n$  de variabelen weergeven die invloed uitoefenen op de capaciteit van het spouwanker. De  $x_n$  in de vergelijkingen duiden de volgende parameters aan:

| Trek ( $F_{t,max}$ ):                    | Druk ( $F_{d,max}$ ):   |
|--|---|
| $x_1 = \text{Diameter}$                  | $x_2 = \text{Beginexcentriciteit}$                              |
| $x_2 = \text{Inlegdiepte}$               | $x_3 = \text{Spouwbreedte}$<br>$x_{33} = \text{Spouwbreedte}^4$ |
| $x_3 = \text{Mortelkwaliteit}$           | $x_4 = \text{Diameter}$   |
| $x_4, x_5, x_6 = \text{Type spouwanker}$ | $x_6 = \text{Inlegdiepte}$                                      |

Het analytische onderzoek heeft geleid tot het opstellen van de basis voor een nieuwe reken- en testmethode waarbij een aantal constatering zijn gedaan:

#### Trek

- Hoe groter de inlegdiepte, hoe hogere  $F_{t,max}$ .
- Voor de bepaling van de bovengrens van de trekcapaciteit van het spouwanker moet de laagste waarde worden aangenomen van de:

$$\text{Treksterkte van het spouwanker: } F_{t,max} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \phi \cdot f_s \quad \text{of}$$

$$\text{Buigtreksterkte van de steen: } f_{ct} = \frac{3}{2} \frac{F_1}{d_1 \cdot d_2^2}$$

- De ondergrens van de trekcapaciteit van het spouwanker is afhankelijk van de:

$$\text{Hechtsterkte van spouwanker en mortel: } F_{aanhechtkracht} = \pi \cdot l_b \cdot \phi \cdot f_b \quad \text{of}$$

$$\text{Hechtsterkte van steen en mortel: } F_{hechtsterkte} = A_s \cdot f_t$$

#### Druk

- Voor de drukcapaciteit van het spouwanker is de formule uit de NPR 9096 een veilige benadering. Tussen de toetsing uit NPR 9096 en de resultaten uit het experimentele onderzoek zit een klein verschil. Voor dit verschil is een  $\alpha$ -factor gevonden die wordt toegepast in de formule uit NPR 9096:

$$\alpha_1 \cdot \frac{F_{d,max}}{A} + \alpha_2 \frac{n_s}{n_s - 1} \cdot \frac{F_{d,max} \cdot e}{W} \leq \sigma_s$$

Waarin  $\alpha_1 = 1,76$  en  $\alpha_2 = 1,31$ .

De materiaaleigenschappen in het numerieke model zijn lineair ingevoerd. Doordat de connectie tussen spouwanker en mortel als oneindig stijf wordt gezien in het lineaire model, wordt een verplaatsing van 0,15 mm bij 4410 N gevonden. Om het numerieke model te kunnen vergelijken met de experimenten, statistische en analytische modellen moet niet-lineair materiaalgedrag worden ingevoerd in het model met bijvoorbeeld een interface. Deze interface geeft de sterkte van de connectie tussen spouwanker en mortel weer.

Na uitvoering van de vier onderzoeken zijn deze met elkaar vergeleken. Aan de hand van de vier onderzoeken is een basis gelegd voor de rekenmethode, met de volgende resultaten: De berekeningen met de toetsingsmethode uit EC6 zijn conservatief, de analytische modellen zijn een (te) veilige benadering voor de capaciteit van het spouwanker, het numerieke model is nog niet compleet en het statistische model kan voor elke gewenste type spouwanker, mortelkwaliteit, inlegdiepte, etc. de capaciteit van het spouwanker bepalen en is een methode die alleen voor de onderzochte spouwankers gebruikt kan worden.

Uit het onderzoek kan geconcludeerd worden dat voor de gebruikte spouwankers in dit onderzoek de volgende vormen van bezwijken zijn opgetreden:

- Onthechting tussen spouwanker en mortel
- Onthechting tussen steen en mortel
- Splijten van de steen
- Capaciteit van het spouwanker (treksterkte of druksterkte rekening houdend met knikinstabiliteit).

Op deze vormen van bezwijken dient getoetst te worden voor de bepaling van de capaciteit van het spouwanker.

De parameters die invloed uitoefenen op  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$  van het spouwanker zijn; inlegdiepte, staalkwaliteit, spouwbreedte, mortelkwaliteit en type spouwanker.

De invloed van de diverse parameters (zoals invloed van inlegdiepte, gebruik van een plug) moeten verder onderzocht worden om de capaciteit van de spouwankers te kunnen bepalen en de juiste spouwankers en minimale inlegdiepte te kiezen. Tevens moet meer onderzoek gedaan worden om het numerieke model te vervolmaken (zoals de interface tussen mortel en spouwanker).

## Summary

In the recent past (2002), masonry facades collapsed from buildings dated from 1955 to 1985. The collapse was caused by a sharp decline in the quality of the masonry, usually combined with major corrosion or complete loss of function of the wall ties [VROM07, VROM11, SBR11 and SBR12].

Practical and literature studies show forms of failure of the connection between the wall ties and the leaf which are not reviewed in the codes, guidelines or publications (NEN845-1 only mentioned that it needs to be tested and the interaction between wall tie and masonry should be covered but how is not known). So the codes, guidelines and publications prescribed only a part of the possible forms of failure than that occur in practice [VROM07]. The standards are based on the following three criteria/assessments which are calculation the capacity of a wall tie:

- the average values (tensile or compressive capacity of the wall tie) provided by the supplier divided by a safety factor, or
- the tensile strength of the wall tie and / or,
- the bending and normal stresses in the wall tie, must be smaller than the yield strength of the wall tie.

In the practical analysis is concluded that the connection between the wall tie and mortar is important for the transfer the wind load to the inner leaf. It also becomes clear that with the increase of the cavity width the buckling behaviour of the wall ties will play a greater role in the stability of the walls.

Further, the preliminary research makes it clear that the collapse of the walls is partly caused by a shortage of wall ties in the cavity, relative to the Dutch advice from standards and regulations and because of wrong or not placed wall ties [BAR14].

From the preliminary research the following objective is formed:

*"To get insights of the compressive and tensile capacity of wall ties for cavity widths between 150-280 mm, so that a calculation and test method can be developed to predict the behaviour of wall ties in a cavity wall."*

To fulfil the objective research is performed concerning the constructive behaviour of the wall tie in a masonry leaf (cement or lime). For analysis four studies have been conducted, as following: experimental, statistical, analytical and numerical. Every research has led to a better understanding of the structural behaviour of wall ties in cavities from 150 to 280 mm width.

The experimental study is based on parameters (such as steel quality, diameter, wall tie shape, wall tie length) found in the preliminary research. To determine the parameters which have influence on the tensile capacity ( $F_{t,max}$ ) of the wall tie, 84 tests have been carried out on four different types of wall ties. Before, during and after the tests a number of weaknesses have been identified, whereby the initial conditions or constraints of the specimen changed during the test. In addition, it has led to different types of failure of the different types of wall ties. The following three types of failure have occurred during tests:

- The wall tie pulled out of the mortar and the mortar crushed
- Brick de-bonded from the mortar
- Splitting of the bricks

The type of the wall tie has influence on the form of failure and  $F_{t,max}$ . Depending on the type of wall tie, type of mortar and steel quality, the values for  $F_{t,max}$  are calculated, with an average force between 1875N and 4035 N.

For the analysis of the compressive capacity 72 tests have been carried out on two types of wall ties with different lengths, which only resulted in buckling of the wall tie. Depending on the cavity width (150-280 mm) the wall tie buckled by a force between 750 N and 1550 N.

Based on a regression analysis a statistical model has been drafted, with the mean values of the test results. With the regression equations below a prediction can be done for  $F_{t,max}$  or  $F_{d,max}$ :

Tensile: 
$$F_{t,max} = -12769,3 + 3142,0x_1 + 46,3x_2 - 19,5x_3 + 969,0x_4 + 1730,4x_5 + 3024,4x_6$$

Pressure: 
$$F_{d,max} = -7926,1 - 81,7x_2 - 10,7x_3 + 9,9 \cdot 10^8 x_{33}^4 + 2830,6x_4 + 4,4x_6$$

Where  $x_n$  is the parameter that influences the capacity of the wall tie, and the different parameters are:

| Tensile force ( $F_{t,max}$ ):         | Compressive force ( $F_{d,max}$ ):   |
|--|--------------------------------------|
| $x_1$ = Diameter                       | $x_2$ = Initial eccentricity         |
| $x_2$ = Embedment depth                | $x_3$ = Cavity width                 |
| $x_3$ = Mortar quality                 | $x_{33}$ = Cavity width <sup>4</sup> |
| $x_4, x_5, x_6$ = Type of the wall tie | $x_4$ = Diameter                     |
|  | $x_6$ = Embedment depth              |

The analytical research leads to the drafted base for a new calculation and test method at which a number of findings, as follows:

#### Tension:

- The greater the embedment depth, the higher  $F_{t,max}$ .
- For the determination of the upper limit of the tensile capacity of the wall tie, the lowest value must be assumed for the:

Tensile strength of the wall tie:  $F_{t,max} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \varnothing \cdot f_s$  or

Bending tensile strength of the stone:  $f_{ct} = \frac{3}{2} \frac{Fl}{d_1 \cdot d_2^2}$

- The lower limit of the tensile capacity of the wall tie depends on the:

Bond strength between wall tie and mortar:  $F_{aanhechtkracht} = \pi \cdot l_b \cdot \varnothing \cdot f_b$  or

Bond strength between brick and mortar:  $F_{hechtsterkte} = A_s \cdot f_t$

#### Compression:

- For the pressure capacity of the wall tie the formula from the NEN 6790 is a safe approximation. The results between the testing standard NEN6790 and the results of the experimental research is a small difference. For this difference an  $\alpha$ -factor has been found, which corrects the difference to use the formula from NEN 6790:

$$\alpha_1 \cdot \frac{F_{d,max}}{A} + \alpha_2 \frac{n_s}{n_s-1} \cdot \frac{F_{d,max} \cdot e}{W} \leq \sigma_s$$

Where  $\alpha_1 = 1,76$  and  $\alpha_2 = 1,31$ .

The numerical model is based on a linear model. Because the connection between wall tie and mortar is assumptive as infinitely rigid in the linear model, a displacement of 0.15 mm at 4410 N is found. To compare with the experiments, statistical end analytical models the numerical model must have an interface. This interface provides the strength of the connection between the cavity and anchor mortar.

After the execution of the four studies, the studies have been compared with each other, to determine the calculation method. The calculation from the testing method in EC6 are conservative, the analytical models are a safe approach for the capacity of the wall tie, the numerical model is incomplete and the statistical model can be used for the tested type of wall tie in the experimental research, mortar quality, embedment depth, etc., to determine the capacity of the wall tie.

From the research it is concluded that for the used wall ties in this research the following failure have occurred:

- De-bonding of the wall tie from the mortar;
- De-bonding of the brick from the mortar;
- Splitting of the bricks;
- Buckling of the wall tie.

Above four failures have to be calculated for finding the capacity of a wall tie. The parameters that influence  $F_{t,max}$  or  $F_{d,max}$  of the wall tie are; the embedment depth, steel quality, cavity width, mortar quality and the type of the wall tie.

The influence of the several parameters (like influence of the embedment depth, using a plug) need to be further investigated to determine the capacity of the wall ties and to choose the right type of wall tie and minimum embedment depth. Also, to complete the numerical model, more research is needed to be done (like the use of the interface between mortar and wall tie).

## Inhoudsopgave

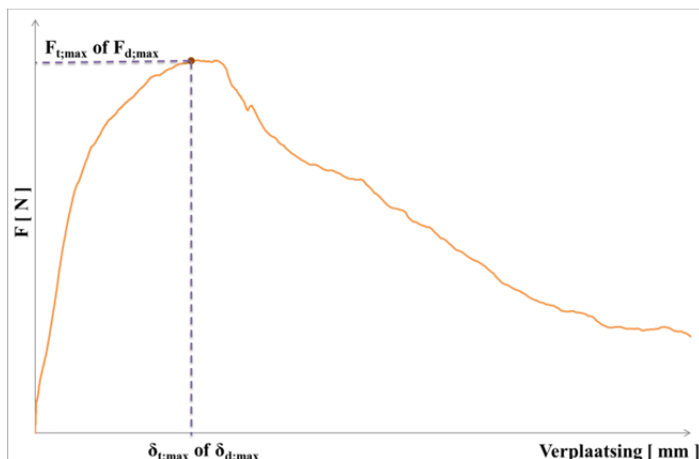
---

|   |            |
|---|------------|
| <b>Voorwoord</b>                                  | 3          |
| <b>Samenvatting</b>                               | 5          |
| <b>Summary</b>                                    | 7          |
| <b>Symbolenlijst</b>                              | <b>11</b>  |
| <b>Termen en Definitities</b>                     | <b>14</b>  |
| <b>1 Inleiding</b>                                | <b>15</b>  |
| 1.1 Aanleiding                                    | 15         |
| 1.2 Afbakening probleem                           | 17         |
| 1.3 Opbouw rapport                                | 19         |
| <b>2 Vooronderzoek</b>                            | <b>21</b>  |
| 2.1 Gebruik van spouwankers in de praktijk        | 21         |
| 2.2 Literatuuronderzoek                           | 22         |
| 2.3 Norm analyse                                  | 31         |
| 2.4 Conclusie                                     | 42         |
| <b>3 Experimenteel onderzoek</b>                  | <b>43</b>  |
| 3.1 Vooronderzoek                                 | 43         |
| 3.2 Proefresultaten                               | 51         |
| 3.3 Materiaaleigenschappen                        | 73         |
| <b>4 Statistische beoordeling proefresultaten</b> | <b>75</b>  |
| 4.1 Te beoordelen proefresultaten                 | 76         |
| 4.2 Beschrijving van de werkmethode               | 78         |
| 4.3 Trekcapaciteit Spouwanker                     | 82         |
| 4.4 Drukcapaciteit Spouwanker                     | 87         |
| 4.5 Resultaten                                    | 93         |
| 4.6 Conclusie                                     | 96         |
| <b>5 Analytisch onderzoek</b>                     | <b>97</b>  |
| 5.1 Trekcapaciteit Spouwanker                     | 97         |
| 5.2 Drukcapaciteit Spouwanker                     | 104        |
| <b>6 Numeriek onderzoek</b>                       | <b>107</b> |
| 6.1 Model   | 107        |
| 6.2 Methodologie                                  | 109        |
| 6.3 Resultaat                                     | 112        |
| 6.4 Conclusie                                     | 115        |
| <b>7 Vergelijking en interpretatie resultaten</b> | <b>117</b> |
| 7.1 Vergelijking resultaten                       | 117        |
| 7.2 Interpretatie resultaten                      | 120        |
| <b>8 Conclusies en Aanbevelingen</b>              | <b>123</b> |
| 8.1 Conclusie                                     | 123        |
| 8.2 Evaluatie en aanbevelingen                    | 124        |
| <b>Bronnen</b>                                    | <b>127</b> |
| Bijlagen  | 131        |

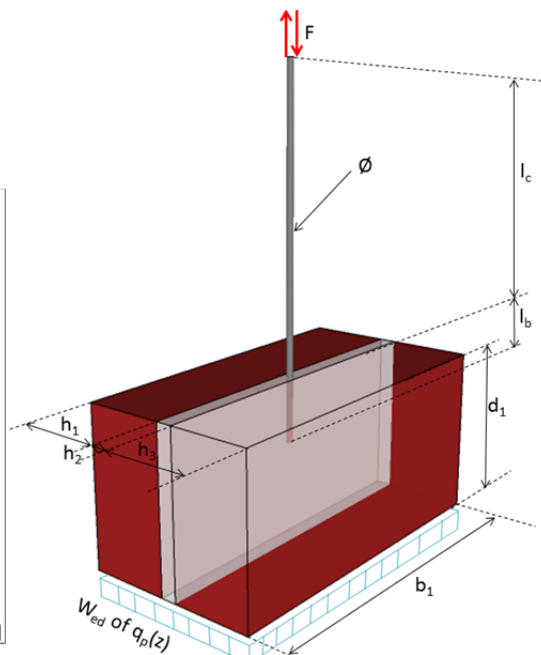




## Symbolenlijst



Figuur 1: Schematische voorstelling van een kracht-verplaatsingsdiagram met aanduiding van de maximaal opneembare kracht en de daar bijbehorende verplaatsing



Figuur 2: Schematische voorstelling van een spouwanker tussen twee stenen met aanduiding van de voornaamste dimensies

| Symbol                | Eenheid              | Beschrijving   |
|-----------------------|----------------------|--|
| $A_s$                 | [mm <sup>2</sup> ]   | Oppervlakte van de spouwankerdoorsnede   |
| $A_{sp}$              | [mm <sup>2</sup> ]   | Geveoppervlakte per spouwanker (bekeken in een oppervlak van drie meter breed en twee meter hoog); $A_{sp} = 1/(\text{aantal ankers per m}^2)$ |
| $c$                   | [-]                  | Cohesie  |
| $C_a$                 | [-]                  | Factor afhankelijk van de samenwerking tussen het binnen- en buitenblad.<br>$C_a = 1,5; 2 \text{ of } 3$                                       |
| $C_{index}$           | [-]                  | Windfactor   |
| $C_{pe}$              | [-]                  | Drukcoëfficiënt voor winddruk of windzuiging op een gevel  |
| $C_{pe,10}$           | [-]                  | Drukcoëfficiënt voor winddruk of windzuiging op een gevel met een oppervlakte van 10 m <sup>2</sup>  |
| $e$                   | [mm]                 | Beginexcentriciteit in het midden van het spouwanker   |
| $d$                   | [mm]                 | Gemeten diameters van de spouwankers   |
| $E_{sp}$              | [N/mm <sup>2</sup> ] | Elasticiteitsmodulus van het spouwankermateriaal   |
| $f_b$                 | [N/mm <sup>2</sup> ] | Aanhechtspanningen in het contactvlak van spouwanker en mortel   |
| $f_{bd}$              | [N/mm <sup>2</sup> ] | Rekenwaarde van de uiterst opneembare aanhechtspanning staal-mortel  |
| $f_{bt}$              | [N/mm <sup>2</sup> ] | Buigtreksterkte van het metselwerk   |
| $f_{bt,rep}$          | [N/mm <sup>2</sup> ] | Representatieve waarde van de buigtreksterkte van het metselwerk   |
| $f_{ck}$              | [N/mm <sup>2</sup> ] | Karakteristieke druksterkte  |
| $f_{ctk}$             | [N/mm <sup>2</sup> ] | Karakteristieke buigtreksterkte  |
| $f_{kx\ par}$         | [N/mm <sup>2</sup> ] | Buigtreksterkte als bezwijken optreedt in het vlak evenwijdig aan de lintvoegen. Gelijk aan $f_{xk1}$ .  |
| $f_{kx\ perp}$        | [N/mm <sup>2</sup> ] | Buigtreksterkte als bezwijken optreedt in het vlak loodrecht op de lintvoegen. Gelijk aan $f_{xk2}$ .  |
| $f_{m;\perp;d}$       | [N/mm <sup>2</sup> ] | Rekenwaarde van de buigtreksterkte loodrecht op de lintvoegen  |
| $f_{m;\perp;rep}$     | [N/mm <sup>2</sup> ] | Representatieve waarde van de buigtreksterkte loodrecht op de lintvoegen   |
| $f_{m;\parallel;d}$   | [N/mm <sup>2</sup> ] | Rekenwaarde van de buigtreksterkte evenwijdig aan de lintvoegen  |
| $f_{m;\parallel;rep}$ | [N/mm <sup>2</sup> ] | Representatieve waarde van de buigtreksterkte evenwijdig aan de lintvoegen   |

|               |                      |  |
|---------------|----------------------|--|
| $f_s$         | [N/mm <sup>2</sup> ] | Rekenwaarde voor de vloeigrens van het spouwankermateriaal.  |
| $f_t$         | [N/mm <sup>2</sup> ] | Treksterkte van het metselwerk   |
| $f_{t,rep}$   | [N/mm <sup>2</sup> ] | Representatieve waarde van de treksterkte  |
| $f_{xk1}$     | [N/mm <sup>2</sup> ] | Karakteristieke buigtreksterkte als bezwijken optreedt in het vlak evenwijdig aan de lintvoegen                |
| $f_{xk2}$     | [N/mm <sup>2</sup> ] | Karakteristieke buigtreksterkte als bezwijken optreedt in het vlak loodrecht op de lintvoegen                  |
| $F_d$         | [N]                  | Rekenwaarde van de druk- of trekweerstand van het spouwanker   |
| $F_{d,max}$   | [N]                  | Maximaal opneembare drukkracht spouwanker, de drukcapaciteit van het spouwanker                                |
| $F_{d,max;d}$ | [N]                  | Drukcapaciteit van het spouwanker volgens de leverancier   |
| $F_E$         | [N]                  | Eulerse knikkracht   |
| $F_n$         | [N]                  | Normaalkracht loodrecht op het spouwanker  |
| $F_f$         | [N]                  | Trekkracht evenwijdig aan het spouwanker   |
| $F_{sp;d}$    | [N]                  | Rekenwaarde van de grootste optredende normaalkracht in het spouwanker in de uiterste grenstoestand            |
| $F_{sp;rep}$  | [N]                  | Representatieve waarde van de grootste optredende normaalkracht in het spouwanker in de uiterste grenstoestand |
| $F_{t,max}$   | [N]                  | Maximaal opneembare trekkracht spouwanker/ trekcapaciteit van het spouwanker                                   |
| $F_{t,1000N}$ | [N]                  | Opneembare trekkracht bij 1000N/trekcapaciteit van het spouwanker bij 1000N                                    |
| $H$           | [N]                  | Opneembare trekkracht volgens berekeningen voor wapeningsstaven onder trek [CB2]                               |
| $I_{sp}$      | [mm <sup>4</sup> ]   | Oppervlakte traagheidsmoment van de spouwankerdoorsnede  |
| $I_1$         | [mm <sup>4</sup> ]   | Oppervlakte traagheidsmoment van het buitenspouwblad   |
| $I_2$         | [mm <sup>4</sup> ]   | Oppervlakte traagheidsmoment van het binnenblad  |
| $I_{totaal}$  | [mm <sup>4</sup> ]   | Totale oppervlakte traagheidsmoment van de spouwmuur   |
| $l_k$         | [mm]                 | Kniklengte van het spouwanker  |
| $l_a$         | [mm]                 | Beschouwde lengte van het spouwanker   |
| $l_b$         | [mm]                 | Inlegdiepte  |
| $l_c$         | [mm]                 | Spouwbreedte   |
| $L$           | [mm/m]               | Beschouwde lengte  |
| $M_k$         | [N/mm <sup>2</sup> ] | Momentweerstand van het spouwblad  |
| $n$           | [-]                  | Factor afhankelijk van de samenwerking tussen het binnen- en buitenblad.<br>n=2 of 3 zie ook $C_a$ .           |
| $n_r$         | [stuks]              | Aantal spouwankers per vierkante meter geveleppervlak  |
| $n_s$         | [-]                  | Vergrotingsfactor in verband met het tweede orde effecten; $n_s = \frac{F_E}{F_{d,max}}$                       |
| $n_t$         | [stuks]              | Aantal spouwanker per vierkante meter muuroppervlak, met een minimum van 2.                                    |
| $n_{t,min}$   | [stuks]              | Minimum aantal spouwankers van 2 [EC6]   |
| $N_{Rd}$      | [N]                  | Capaciteit van het spouwanker  |
| $N_s$         | [N]                  | Trekkracht uitgeoefend op het spouwanker   |
| $R_0$         | [-]                  | Kleinste waarde van $\frac{1}{9}(4\frac{f_{fl;b;k}}{f_{xk1}}+5)$ en $\frac{\alpha \cdot 2.75}{\sqrt{f_{xk1}}}$ |
| $t$           | [mm]                 | Muurdikte  |
| $t_n$         | [mm]                 | Dikte spouwblad, waarin $n$ het binnen- of buitenblad aanduidt   |
| $V_{Ed}$      | [N]                  | Ponskracht   |
| $w$           | [mm <sup>3</sup> ]   | Weerstandsmoment   |
| $W_{ed}$      | [kN/m <sup>2</sup> ] | Windbelasting op het muuroppervlak   |
| $W_k$         | [kN/m <sup>2</sup> ] | Karakteristieke windbelasting oppervlak  |
| $W_s$         | [mm <sup>3</sup> ]   | Weerstandsmoment van de spouwankerdoorsnede  |
| $q$           | [N/mm <sup>2</sup> ] | Windsnelheid   |
| $q_p(z)$      | [N/mm <sup>2</sup> ] | Stuwdruk   |
| $Z$           | [N/mm <sup>2</sup> ] | Weerstandsmoment   |

### Griekse symbolen

|                  |                      |   |
|------------------|----------------------|---|
| $\alpha$         | [-]                  | Factor voor het steenverband  |
| $\alpha$         | [-]                  | Thermische uitzettingscoëfficiënt   |
| $\alpha$         | [-]                  | Buigmomentcoëfficiënt   |
| $\gamma_{f;q;u}$ | [-]                  | Partiële factor voor windbelasting  |
| $\gamma_m$       | [-]                  | Materiaalfactor   |
| $\varepsilon_s$  | [%o]                 | Representatieve rek bij maximale belasting ( $F_{t,max}$ of $F_{d,max}$ )   |
| $\lambda$        | [-]                  | Slankheid van het constructieonderdeel  |
| $\mu$            | [-]                  | Orthogonale ratio   |
| $\mu$            | [-]                  | Vormfactor en is gelijk aan $C_a$   |
| $\mu_s$          | [-]                  | Wrijvingscoëfficiënt  |
| $\nu$            | [N/mm <sup>2</sup> ] | Gemiddelde schuifspanning bij ponsen  |
| $\varphi$        | [-]                  | Hoek van inwendige wrijving   |
| $p_{rep}$        | [N/mm <sup>2</sup> ] | Representatieve windbelasting   |
| $p_{wd}$         | [N/mm <sup>2</sup> ] | Dat deel van de rekenwaarde van de windbelasting dat van het ene spouwblad wordt overgedragen naar het andere spouwblad |
| $\tau_{cs,x}$    | [N/mm <sup>2</sup> ] | Schuifspanningen in de mortel over een lengte x van de staaf  |
| $\sigma$         | [N/mm <sup>2</sup> ] | Buigspanning  |
| $\sigma_k$       | [N/mm <sup>2</sup> ] | Knikspanning  |
| $\sigma_p$       | [N/mm <sup>2</sup> ] | Proportionaliteitsgrens   |
| $\sigma_s$       | [N/mm <sup>2</sup> ] | Vloei grens van het spouwankermateriaal   |
| $\sigma_{cx}$    | [N/mm <sup>2</sup> ] | Spanningen in de mortel over een lengte x   |
| $\Delta$         | [mm]                 | Verplaatsing van het spouwanker/spouwbladen in verticale richting (evenwijdig aan het metselwerk)                       |
| $\Delta L$       | [mm]                 | Verlenging of verkorting van het spouwanker   |
| $\Delta T$       | [°]                  | Verskil tussen de momentane temperatuur en de extreme temperatuur.  |
| $\varnothing$    | [mm]                 | Diameter van het spouwanker   |

## Termen en Definitities

|  |  |
|--|--|
| <b>Aanhechsterkte van een verankering:</b> | De aanhechsterkte, per eenheid van oppervlakte, tussen spouwanker en mortel in geval het spouwanker aan trek- of drukkrachten onderhevig is.   |
| <b>B300:</b>                               | Borgh Combi-fix spouwankersysteem met lengte 300 mm van leverancier B; Duplex staal nr. 1.4362   |
| <b>Bezwijkcriteria:</b>                    | Faalcriteria dat door bezwijken wordt gerealiseerd.  |
| <b>Bezwijken:</b>                          | Het moment waarbij niet het gewenste resultaat meer gevonden wordt en de krachtsopname afneemt bij toenemende verplaatsing.  |
| <b>Bezwijkgedrag:</b>                      | De manier van krachtsopname vermindering op het moment dat het gewenste resultaat niet meer gevonden wordt.  |
| <b>Buigtreksterkte:</b>                    | Breukmoment in een doorsnede ten gevolge van buiging, gedeeld door het elastische weerstandsmoment.  |
| <b>Hechting:</b>                           | De eigenschap van mortel om een trek- en afschuifweerstand te ontwikkelen in het contactvlak met metselstenen.   |
| <b>Ideaal proefstuk:</b>                   | Proefstuk dat geen gebrek heeft gekend voor, tijdens en na het beproeven.  |
| <b>Inlegdiepte:</b>                        | De lengte van het spouwanker dat in de mortel is ingelegd.   |
| <b>Leverancier A:</b>                      | Gebroeders Bodegraven BV te Nieuwkoop ( <a href="http://www.gb.nl">www.gb.nl</a> ).  |
| <b>Leverancier B:</b>                      | Borgh BV; Bevestigingsspecialist voor bouw en industrie ( <a href="http://www.borgh.net">www.borgh.net</a> ).  |
| <b>Maatafwijking:</b>                      | De afwijking die het spouwanker heeft gekregen tijdens de uitvoering zoals beginexcentriciteit en scheefstand.   |
| <b>Niet-dragende gevel:</b>                | Een gevel die behalve zijn eigen gewicht en de windbelasting geen belasting draagt.  |
| <b>Omplooilengte:</b>                      | De lengte van het omgebogen stukje spouwanker voor het maken van een haak  |
| <b>Ondersteuningsfactor:</b>               | Factor afhankelijk van de samenwerking tussen het binnen- en buitenblad.   |
| <b>Spouwanker:</b>                         | Een anker voor het verbinden van een binnen- en buitenspouwblad van een spouwmuur, waarbij één van de spouwbladen geen bijdrage levert aan de sterkte of de stijfheid van het andere blad.                                   |
| <b>Spouwbreedte:</b>                       | De afstand tussen het binnenblad en het buitenblad van een spouwmuur.  |
| <b>Spouwmuur:</b>                          | Een muur bestaande uit een binnen- en een buitenspouwblad, met elkaar verbonden door spouwankers en gescheiden door een spouw die gedeeltelijk met isolatiemateriaal gevuld is.  |
| <b>UNI250:</b>                             | UNI-Slag spouwanker met lengte 250 mm van leverancier A; RVS A4-Kwaliteit.   |
| <b>UNI275:</b>                             | UNI-Slag spouwanker met lengte 275 mm van leverancier A; RVS A4-Kwaliteit.   |
| <b>UNI300:</b>                             | UNI-Slag spouwanker met lengte 300 mm van leverancier A; RVS A4-Kwaliteit.   |
| <b>UNI350:</b>                             | UNI-Slag spouwanker met lengte 350 mm van leverancier A; RVS A4-Kwaliteit.   |
| <b>UNI-L:</b>                              | UNI-L spouwanker met lengte 275 mm van leverancier A; RVS A4-Kwaliteit.  |
| <b>UNI-Lijm:</b>                           | UNI-Lijm spouwanker met lengte 300 mm van leverancier A; RVS A4-Kwaliteit.   |
| <b>Uitbijters:</b>                         | Ook wel uitschieter genoemd. In de statistiek en de data-analyse wordt dit gebruikt voor waarnemingen die niet bij de overige lijkt te passen. Meestal betreft het een datapunt die ver van de overige data verwijderd ligt. |
| <b>Uittrekgedrag:</b>                      | Het gedrag dat een spouwanker vertoont bij het uittrekken uit de voeg zoals verbrijzelen van mortel en plastisch vervormen.  |
| <b>Uittrekwaarde:</b>                      | $F_{tmax}$ van het spouwanker  |
| <b>Vormen van bezwijken:</b>               | De manier van krachtsopname vermindering in de spouwmuur of van het spouwanker.  |

# 1 Inleiding

Een spouwmuur bestaat uit twee spouwbladen, gescheiden door de isolatie en de luchtspouw en verbonden door spouwankers. Het binnenblad kan uit verschillende materialen worden opgebouwd, zoals beton, baksteen, kalkzandsteen, cellenbeton of hout. Het buitenblad wordt vaak opgebouwd uit kalkzandsteen, betonsteen of baksteen [KIN13]. De spouwbladen, luchtspouw, spouwankers en isolatie vormen de thermische schil van het gebouw. In deze schil zijn de spouwankers van belang voor de stabiliteit van het metselwerk en met name voor het buitenblad oftewel de buitengevel. Voor de spouwmuur gelden normen en voorschriften die de capaciteit van de spouwankers en spouwbladen toetsen voor de waarborging van de stabiliteit.

## 1.1 Aanleiding

### 1.1.1 Reeds uitgevoerde onderzoeken

De aanleiding vindt zijn oorsprong in 2002 bij het instorten van gevels op verschillende plaatsen in Nederland. Veelal vond dit plaats bij kopgevels van flatgebouwen die bestaan uit gevelpanelen of metselwerk uit de jaren 1955 tot 1985 blijkt uit onderzoeken en rapportages van VROM-inspecties [VROM07 en VROM11] en SBR [SBR11 en SBR12]. Het instorten van gevels in 2002 heeft geleid tot inspecties en het analyses van gevels gebouwd tussen 1955 tot 1985 door het VROM vastgelegd in een rapport in 2007 [VROM07]. In het onderzoek door VROM zijn analyses uitgevoerd van praktijkonderzoeken over de uitvoering van gevels. Hierbij is gekeken naar parameters zoals locatie, het aantal spouwankers en windbelasting. Het onderzoek [VROM07] heeft geleid tot een advies aan huiseigenaren om onderzoek te doen naar de veiligheid en kwaliteit van hun gevels. Uit een vervolgonderzoek [VROM11] blijkt dat 50% van de gemeenten de wettelijke taak als toezichthouder niet uitvoert, waardoor volgens VROM de gevels uit 1955 tot 1985 in deze gemeenten in mogelijk slechte en onveilige staat verkeren. De meeste gevels van flatgebouwen uit deze periode hebben te maken met twee fenomenen, namelijk als eerste na-isolatie, wat leidt tot het corroderen van spouwankers, en ten tweede tijdens de bouw verkeerd aangebrachte spouwankers (het aantal spouwankers en de plaatsingswijze). Door dit laatste is het risico van onveilige, instabiele gevels groter dan wanneer:

1. spouwankers met een inlegdiepte van minimaal 40 mm in zowel binnen- als buitenblad worden gemetseld [ONV11],
2. de hechting tussen spouwanker-mortel en mortel-baksteen optimaal zijn en
3. genoeg spouwankers worden geplaatst in de spouwmuur (NPR 6791; §3.3.2, figuur 3 en 4).

In de Europese en Nationale normen en voorschriften worden twee toetsingen (trek- en drukcapaciteit) kwantitatief beschreven. Bij evaluatie van schadegevallen in de praktijk heeft Bartels Ingenieursbureau geconcludeerd dat spouwankers op andere aspecten bezwijken dan waarop momenteel volgens de normen en voorschriften getoetst dient te worden, zoals te korte inlegdiepte of het uittrekken van het spouwanker uit het buitenblad. De toetsingen gelden slechts voor spouwbreedte tot en met 180 mm, grotere spouwbreedtes worden niet getoetst. Echter recent is de eis met betrekking tot isolatiewaarde verhoogd van 3,5 naar 5,0 m<sup>2</sup> W/K voor nieuwbouwwoningen en deze zal verder stijgen [KIN13]. Dit leidt tot grotere spouwbreedtes waardoor grotere gevoeligheid ontstaat voor het knikken van spouwankers. Om het knikken van spouwankers en daarmee het bezwijken van de spouwmuur te voorkomen, is meer onderzoek en kennis nodig over de constructieonderdelen van de spouwmuur (thermische schil) van het gebouw.

Uit bovenstaande beschreven problemen kan geconcludeerd worden dat nog een aantal factoren onbekend zijn, die in de praktijk wel zorgen voor het bezwijken van het spouwblad of spouwanker (zoals onbekende vorm van bezwijken van het spouwanker, het aantal spouwankers en minimale inlegdiepte). Samengevat is de aanleiding van dit afstudeeronderzoek:

- Het instorten van gevels uit de jaren 1955-1985;
- De verbreding van de spouwen door verhoging van de RC-waarde;
- De toetsingen op trek- en drukbelasting in de Eurocode 6 zijn:
  - Niet compleet (vanwege ontbrekende factoren die invloed hebben op het bezwijkgedrag van het spouwanker);
  - Alleen geldig voor spouwbreedte tot 180 mm;

Daarnaast worden bovenstaande drie punten versterkt door praktijkanalyses die laten zien dat spouwankers een andere vorm van bezwijken tonen, dan waarop de Eurocode 6 toetst. Bijvoorbeeld het bezwijken van de hechting tussen spouwanker en mortel. Voor een vervolmaking van de toetsingen voor spouwankers is meer onderzoek nodig.

### 1.1.2 Onderzoeksrelevantie

#### **Maatschappelijke relevantie**

Bij zware windstoten kunnen gevels instorten, wat in sommige gevallen voorkomen kan worden door een betere uitvoering van de spouwmuur. De verschillende krantenartikelen noemen het 'baksteenregen'. In de media krijgen deze voorvallen vaak uitgebreide aandacht waardoor meer mensen gevelinspecties laten uitvoeren ter voorkoming van het instorten van de gevel. Het ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M, voorheen VROM) adviseert om de gevels te laten controleren door adviesbureaus. *Figuur 3* geeft een voorbeeld van een artikel waar een onveilige gevel is geconstateerd door verkeerd geplaatste spouwankers. Er zijn tal van vergelijkbare artikelen te vinden in kranten, nieuwsarchieven en op internet.

#### **Gevel schouwburg Amphion in Doetinchem onveilig (22-05-2014)**

DOETINCHEM - De gevel van schouwburg Amphion in Doetinchem is zo onveilig dat er donderdag hekken rondom het theater zijn gezet. Bij extreem weer kunnen brokstukken naar beneden vallen. Een deel van de gevel was al gestut. Uit onderzoek van onder meer TNO blijkt dat er 3 problemen zijn die elkaar versterken. Bij de overstekken is de constructie niet voldoende stijf, waardoor de gevel uit buikt. Het metselwerk is nat doordat de waterhuishouding erachter niet in orde is en de verlijmdde spouwankers aan de binnenwand bieden onvoldoende stevigheid.  
[http://www.omroepgelderland.nl](http://www.omroep gelderland.nl) of <http://www.gelderlander.nl>



Schouwburg Amphion in Doetinchem

*Figuur 3: Artikel over onveilige gevel; maatschappelijke relevantie*

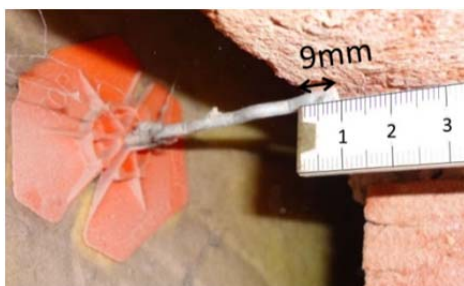
#### **Wetenschappelijke relevantie**

Dit afstudeeronderzoek wordt verricht omdat de Technische Universiteit Eindhoven en Bartels Ingenieursbureau meer inzicht willen krijgen in het constructieve gedrag van spouwankers. Uit de literatuur (zie ook hoofdstuk 2) blijkt dat weinig bekend is over dit gedrag. Het onderzoek zal dienen als basis voor het verbeteren van de veiligheid van gevels. Met behulp van een parameterstudie en verschillende onderzoeksmethoden kan een aanzet gegeven worden voor een reken- en testmethode voor het berekenen van het constructieve gedrag van spouwankers in spouwen tussen 150-280 mm. De analyse van het constructieve gedrag is een belangrijk aspect bij dit afstudeerproject omdat in de normen doormiddel van toetsing de hoeveelheid spouwankers, de maatgevendste vorm van bezwijken en de inlegdiepte van spouwankers niet bepaald worden. Uit de praktijkanalyse blijkt dit één van de vormen van bezwijken te zijn. Dit blijkt uit de literatuurstudie uitgewerkt in hoofdstuk 2 en *Tabel 1*. In de aanzet voor de reken- en testmethode worden de parameters verwerkt die volgen uit dit afstudeeronderzoek voor de toetsingen op de druk- en trekcapaciteit van het spouwanker.

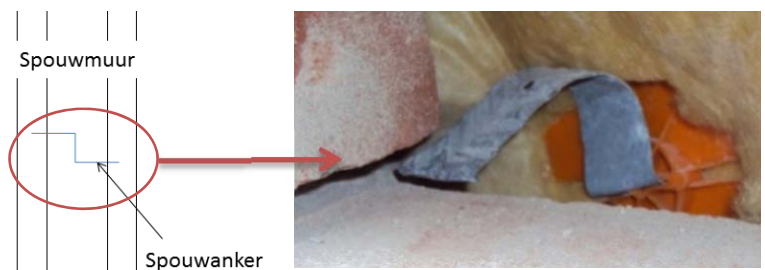
### 1.1.3 Probleem- en doelstelling

#### **Probleemstelling:**

Bij praktijkonderzoek door Bartels Ingenieursbureau [BAR13] wordt geconstateerd dat spouwankers slecht verankerd zijn in de mortel of gebogen zijn om zo in het buitenblad gemetseld te worden, zoals in *Figuur 4* en *Figuur 5* is te zien. Daarnaast is geconstateerd dat in de toetsingen aan de hand van de Eurocode 6 [1,2] en oude normen en voorschriften [3t/m11] voor de trek- en drukcapaciteit van spouwankers in spouwen tot 180 mm, parameters als inlegdiepte, type spouwanker en type mortel ontbreken. De normen toetsen op trek- en kniksterkte van het spouwanker of op waarden voor capaciteiten volgens de leverancier gedeeld door een materiaalfactor.



*Figuur 4: Slecht verankerde spouwanker in het buitenblad waar de inlegdiepte gelijk is aan 9mm.*



*Figuur 5: Link: het schema zoals het spouwanker geplaatst is in de spouwmuur. Rechts: Omgebogen spouwanker zodat deze in de voeg van het buitenblad gemetseld kan worden.*

In dit afstudeerproject wordt onderzoek verricht naar het constructief gedrag van spouwankers bij spouwbreedtes tussen de 150-280 mm. Dit moet resulteren in relevante parameters voor een test- en rekenmethode voor spouwankers in huidige en toekomstige toepassingen. Gekozen is om de spouwbreedte te limiteren tot 280 mm vanwege het toepassen van hoogwaardige isolatie in de toekomst, waardoor de spouwbreedte toename zal stagneren. Wanneer ‘normale’ isolatie (met lage ec-waarde) wordt gebruikt, worden de spouwbreedtes zo groot dat dit verlies aan ruimte in het gebouw veroorzaakt [HUI12]. Gekozen is voor een spouwbreedte van 150 mm omdat dit het minimum is voor het verkrijgen van de vereiste RC-waarde van 3,5 m<sup>2</sup>K/W [Isover; EPC-wijzer; 2013-11-26]. In het afstudeeronderzoek is uitgegaan van recht geplaatste spouwankers, om de basis van het constructieve gedrag van spouwankers te bepalen. Spouwankers geplaatst zoals in *Figuur 5* worden in dit onderzoek niet onderzocht.

De volgende onderzoeksvraag is geformuleerd:

*“Welke parameters dienen te worden vastgesteld voor het ontwikkelen van een reken- en testmethode voor een spouwanker in spouwen tussen 150-280 mm belast op trek en druk en uitgaande van reële uitvoeringsomstandigheden?”*

Om bovenstaande vraag te kunnen beantwoorden, zijn de deelvragen opgesteld die tijdens het afstuderen met behulp van verschillende onderzoeksmethoden worden beantwoord. De deelvragen zijn als volgt geformuleerd:

1. Met welke parameters moet rekening worden gehouden voor de keuze van spouwankers voor spouwbreedte tussen 150-280 mm?
2. Welke vormen van bezwijken treden op bij trekkracht op het spouwanker?
3. Welke vormen van bezwijken treden op bij drukkracht op het spouwanker?
4. Wat is de invloed van maatafwijkingen (zoals scheefstand en een excentriciteit) in de uitvoering op de capaciteit van het spouwanker?

### **Doelstelling:**

De doelstelling van dit afstudeertraject luidt:

*“Inzicht krijgen in de druk- en trekcapaciteit van spouwankers bij spouwbreedtes tussen 150-280 mm zodat een reken- en testmethode ontwikkeld kan worden die het gedrag van spouwankers in een spouwmuur voorspelt.”*

Parameters voor de reken- en testmethoden zullen met behulp van analytisch, experimenteel, numeriek en statistisch onderzoek worden opgesteld. In het numerieke en statistische model worden de te verwachte afwijkingen (zoals scheefstand van het spouwanker) in de uitvoering meegenomen in de analyse om zo de range te bepalen waarbinnen deze afwijkingen acceptabel zijn.

## **1.2 Afbakening probleem**

Uit de literatuur- en praktijkanalyse (hoofdstuk 2 en 3) blijkt dat de toetsingen van het spouwanker op capaciteit niet compleet zijn en belangrijke parameters ontbreken. In EC6 [1,2] moeten de spouwankers aan vier voorgeschreven toetsingen voldoen gebaseerd op waarden volgens de leverancier, namelijk:

- Trekcapaciteit
- Drukcapaciteit
- Vervormingscapaciteit
- Aantal spouwankers per vierkante meter

Uit het praktijkonderzoek blijkt dat deze toetsingen niet volledig zijn en er ontbreken belangrijke parameters zoals hechtsterkte tussen spouwanker-mortel en de inlegdiepte (hoofdstuk 2). Om inzicht te krijgen in de vormen van bezwijken van spouwankers en de invloed van de diverse parameters, moet daar onderzoek naar verricht worden. Om de grootte van het uit te voeren onderzoek te beperken is een afbakening gemaakt met de volgende materialen en specificaties:

- **Gelijmd of gemetseld spouwblad**  
Door het gebruik van twee typen mortels kan het verschil in hechtsterkte van het spouwanker met de mortel worden geanalyseerd. Daarnaast wordt gevarieerd in mortelkwaliteit om de invloed van de mortel op de uittrekkkracht van het spouwanker te bepalen.
- **Type spouwanker**  
Vier typen spouwankers worden gebruikt in dit afstudeeronderzoek om de invloed van het type spouwanker te bepalen (zie bijlage 1 voor de typen spouwankers en verantwoording van de keuze).
- **Staalkwaliteit**  
Om te bepalen of de staalkwaliteit invloed heeft op de druk- of trekcapaciteit van het spouwanker worden twee dezelfde typen spouwankers met twee verschillende staalkwaliteiten getest.

- **Spouwbreedte**  
Het onderzoek is gericht op grote spouwbreedtes. Vier spouwbreedtes worden in het onderzoek meegenomen om hun invloed op de drukcapaciteit van spouwanker te bepalen. De proef wordt uitgevoerd op spouwbreedtes van 150, 180, 220 en 280 mm.
- **Overige eisen**  
De spouwankers worden 40 mm in de mortel gelegd, gelijk aan de minimale inlegdiepte voor de spouwankers zoals vermeld in NEN-EN 845. Waardoor de ondergrens van bijvoorbeeld de draagcapaciteit bepaald kan worden.

In Bijlage 1 wordt de totale afbakening en een toelichting van de verschillende specificaties en materialen gegeven.

Het onderzoek wordt uitgevoerd met een buitenblad, dat gelijk of gemetseld is. Door het gebruik van twee typen mortels en twee staalkwaliteiten van de spouwankers kan de aanhechtsterkte van het spouwanker worden geanalyseerd. In de proeven worden de volgende vier typen spouwankers toegepast:

**Type 1:** UNI-Slag spouwankers (recht golvend spouwanker; voor metselwerk);

**Type 2:** UNI-lijm spouwankers (recht golvend spouwanker; voor lijmwerk);

**Type 3:** UNI-L spouwankers (spouwanker met haak; voor metselwerk);

**Type 4:** B300 spouwankers (recht golvend spouwanker; voor metselwerk).

NEN-EN 846-5 geeft aan dat een minimum van twaalf proeven uitgevoerd moeten worden voor het kunnen bepalen van de invloed van één parameter. Om deze reden worden per spouwankertype, mortelkwaliteit en/of spouwbreedte twaalf proeven uitgevoerd, zoals weergegeven is in *Diagram 1*. In *Diagram 1* zijn ook de besproken materialen weergegeven, die gebruikt worden in het experimentele onderzoek. In het diagram is een onderscheid gemaakt tussen trek- en drukproeven, omdat dit twee verschillende toetsingen zijn die uitgevoerd dienen te worden. De uit te voeren proeven worden uitgewerkt in hoofdstuk 3 en moeten de volgende onbekende invloeden beantwoorden, zodat deze kunnen dienen als invoer voor het numerieke model en reken- en testmethode van spouwankers:

- De invloed van de spouwbreedte;
- De invloed van de mortel (lijm- of metselmortel en mortelkwaliteit);
- De invloed van het typen spouwankers en leverancier.

Getest wordt dus op de uittrek- en drukwaarde van het spouwanker zonder afwijkingen in plaatsing zoals weergegeven in *Figuur 5*. De invloed van de wind op het spouwanker en de interactie tussen de spouwankers in een gevel worden in dit onderzoek niet meegenomen. De draagkracht van één spouwanker wordt onderzocht en uitgewerkt.



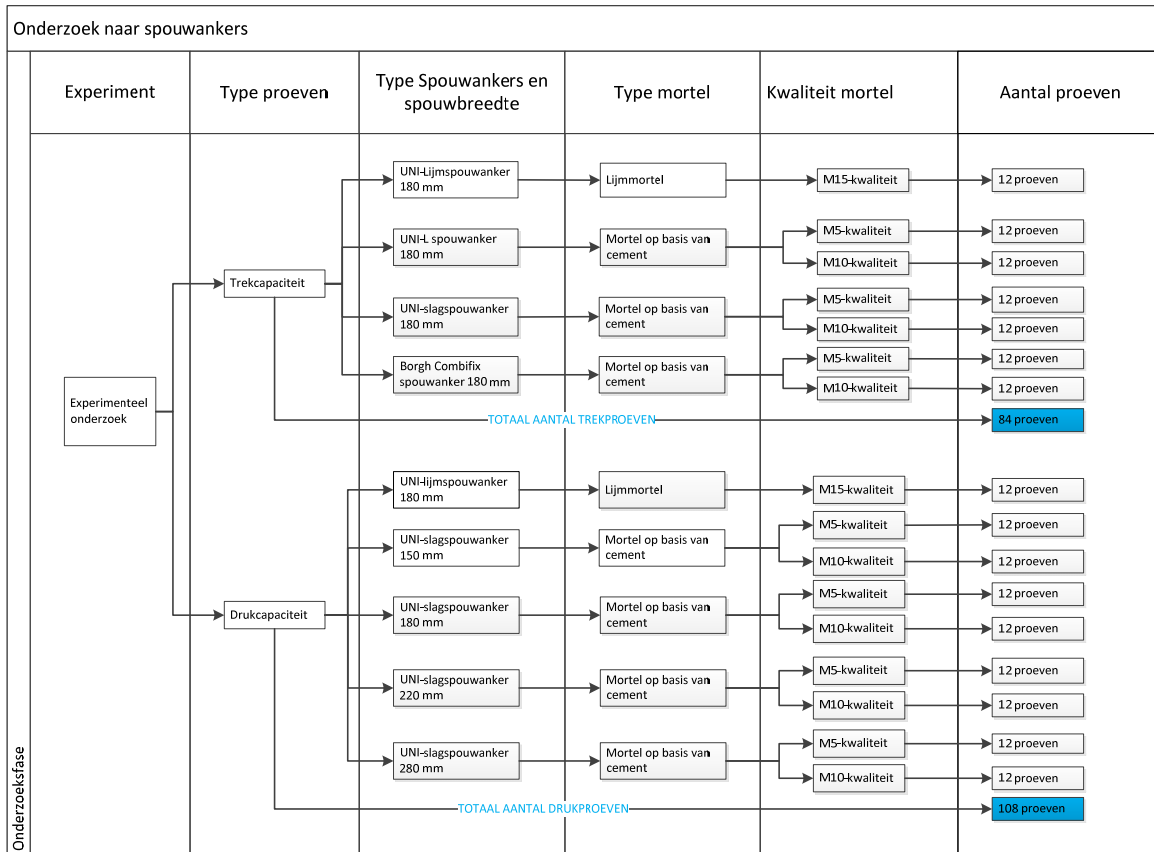


Diagram 1: Uit te voeren proeven tijdens het onderzoek opgedeeld in druk- en trekproeven

### 1.3 Opbouw rapport

Na voorgaande beschrijving van de aanleiding van het onderzoek, wordt verder gegaan met het vooronderzoek in hoofdstuk 2.

In hoofdstuk 2 worden de resultaten en conclusies van het praktijkonderzoek toegelicht. Daarna volgt een samenvatting van de onderzochte normen, voorschriften en publicaties waarin de toetsingsregels voor spouwankers beschreven zijn. Hieruit volgt welke variabelen ontbreken in de toetsingsregels en die in de praktijkanalyse wel als belangrijke bezwijkvariabelen van het spouwanker zijn aangeduid.

De ontbrekende variabelen worden onderzocht in het experimentele onderzoek. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op het experimenteel onderzoek: naast de uitvoering van de experimenten en materiaalproeven (t.b.v. bepaling materiaaleigenschappen) worden ook het ontwerp, voorbereiding en productie van de proefstukken en proef- en meetopstelling toegelicht. Als laatste paragraaf van hoofdstuk 3 worden de resultaten van de proeven gepresenteerd en geëvalueerd.

Na het experimentele onderzoek volgt de statistische beoordeling van de proefresultaten die beschreven staan in hoofdstuk 4. Hierin wordt een uitspraak gedaan over de proefresultaten. Daarnaast is een model opgesteld voor de voorspelling van  $F_{t,max}$  (uittrekwaarde van het spouwanker) en  $F_{d,max}$  (drukwaarde van het spouwanker).

Naast de statische beoordeling van de resultaten zijn analytische berekeningen gemaakt en getoond in hoofdstuk 5. De resultaten zullen in hoofdstuk 7 gebruikt worden voor een aanzet voor een reken- en testmethode.

Ter ondersteuning van het experimentele onderzoek is een numeriek model gemaakt, toegelicht in hoofdstuk 6. Hiervoor is het proefstuk zoals gebruikt in het experimenteel onderzoek gemodelleerd, waarop vervolgens numerieke simulaties zijn uitgevoerd.

Deze aanzet van de rekenmethode wordt in hoofdstuk 7 nader besproken, nadat de gevonden resultaten via het experimentele, statistische, numerieke en analytische onderzoek zijn vergeleken.

In het laatste hoofdstuk worden de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek gepresenteerd.

De hoofdstukken zijn zo opgezet dat elk hoofdstuk apart te lezen is, waardoor herhaling uit het vorige hoofdstuk aanwezig kan zijn.



## 2 Vooronderzoek

Uit praktijkvoorbeelden van Bartels Ingenieursbureau [BAR13] is gebleken dat gevels bezwijken door het verkeerd plaatsen van spouwankers en omdat spouwankers een andere vorm van bezwijken hebben dan waarop in de norm, voorschriften en publicaties wordt getoetst. Een samenvatting van de praktijkanalyse is gegeven in de eerste paragraaf. Het literatuuronderzoek is vooral gebaseerd op de analyse van oude Nederlandse normen zoals NEN 6790 [3], CUR 71 [6] of NPR 9096-1 [5] ten opzichte van de EC6 [1,2] en dit wordt toegelicht in de tweede paragraaf. De laatste paragraaf geeft een analyse over de toetsingen in de normen en overige theorieën.

### 2.1 Gebruik van spouwankers in de praktijk

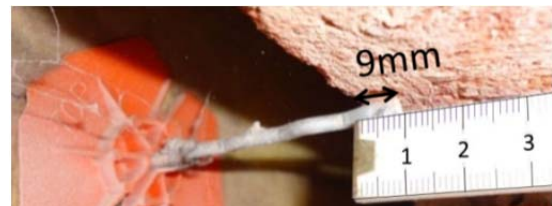
Het grootste probleem dat volgt uit het praktijkonderzoek uitgevoerd door Bartels Ingenieursbureau voor bouw en infra, is dat de spouwankers allemaal anders geplaatst worden (gebogen, scheef, te dicht bij elkaar, etc.). De gevolgen van het verkeerd plaatsen van de spouwankers zijn verschillend, bijvoorbeeld: geen plug heeft als gevolg dat water bij de isolatie kan komen. Na de analyse van de praktijkvoorbeelden van Bartels (weergegeven in bijlage 2) kan een top vier van de meest voorkomende vormen van bezwijken van het spouwanker in de praktijk worden samengesteld:

#### 1. Corrosie (Figuur 6)

Corroderende spouwankers worden in de praktijk veroorzaakt door het gebruik van verzinkte spouwankers die een te dunne laag zink bevatten om de corrosie langdurig te voorkomen [11]. EC6 [1] bakent dit probleem af door het advies te geven dat RVS spouwankers met A4-kwaliteit gebruikt dienen te worden. Daarnaast is er al veel onderzoek verricht naar de vervanging van verzinkte spouwankers wat geleid heeft tot het toepassen van RVS en koolstof spouwankers in de praktijk.



Figuur 6: Gecorrodeerd spouwanker gevonden tijdens inspectie.  
Bron: pbsvastgoed.nl



Figuur 7: Het spouwanker heeft een te kleine inlegdiepte, slecht 9 mm zoals wordt aangegeven met de liniaal [BAR13].

#### 2. Inlegdiepte (Figuur 7)

Een te kleine inlegdiepte van het spouwanker is een probleem dat zich voordoet in de uitvoering, dat bezwijken van de spouwmuur tot gevolg kan hebben. In de toetsingscriteria voor trek- en drukcapaciteit uit de EC6 wordt de inlegdiepte niet meegenomen, maar dit blijkt een essentiële parameter te zijn volgens praktijkonderzoek uitgevoerd door Bartels. Een minimale waarde wordt wel gesteld,  $l_b=40$  mm.

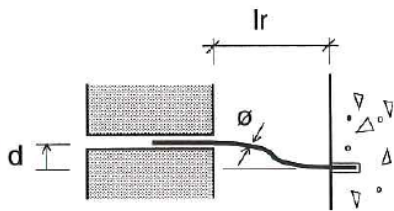
#### 3. Ombuigen van het spouwanker

Het ombuigen van het spouwanker zodat deze zowel in het binnen- als buitenblad gemetseld kan worden, kan grote gevolgen hebben, zoals (Figuur 9):

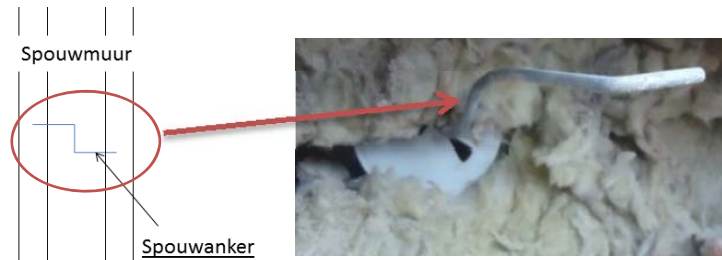
- Lagere drukcapaciteit
- Lagere trekcapaciteit

In de Noorse catalogus [15] is een tabel gegeven (bijlage 3), waarin de maximale toelaatbare verticale scheefstand van het spouwanker wordt aangegeven. Het principe is gegeven in Figuur 8, waar  $d$  (de verticale afstand verbuiging van het spouwanker) niet groter mag zijn dan de gegeven waarde in de tabel in bijlage 3. Daarnaast wordt dit probleem tegenwoordig voorkomen door het boren van het spouwanker in het binnenblad, tijdens het opmetselen van het buitenblad.

Zoals in §1.1.3 is vermeld wordt het gebogen spouwanker (majonette) niet meegenomen in het onderzoek en wordt alleen een recht geplaatst spouwanker onderzocht.



Figuur 8: Maximale toelaatbare verbuiging van het spouwanker [15] (bijlage 3)



Figuur 9: Gebogen spouwanker en verkeerd geplaatste plug [BAR13].

#### 4. Hechting

De hechting tussen de materialen bepalen de capaciteit van het constructieonderdeel. Daarom is zowel de hechting tussen steen met mortel als spouwanker met de mortel van essentieel belang bij de trek- en drukcapaciteit van het spouwanker (Figuur 10). De normen toetsen deze twee capaciteiten van de constructieonderdelen apart:

##### a. Spouwanker-Mortel

In de SBR [10] wordt alleen het spouwanker zelf op treksterkte getoetst. EC6 [1], CUR71 [6] en NEN6790 [3] gebruiken de karakteristieke waarde van de leverancier gedeeld door een veiligheidsfactor als trekcapaciteit van het spouwanker.

##### b. Steen-mortel

De normen toetsen het spouwblad afzonderlijk op sterkte evenwijdig en loodrecht op de lintvoegen.



Figuur 10: Slechte hechting tussen mortel en steen waardoor de capaciteit van de constructie afneemt [BAR13].

Om de totale capaciteit van de spouwankers te kunnen gebruiken, moet de plaatsing van het spouwanker in de uitvoering verbeterd worden en mogen bovenstaande problemen zich niet voordoen. De praktijkvoorbeelden in Figuur 6 tot en met Figuur 10 kunnen constructieve gevolgen hebben voor de spouwbladen en spouwankers en kunnen mogelijk leiden tot bezwijken van de spouwmuur. Een voorbeeld hiervan is de inlegdiepte: “Is deze te lang, dan kan het spouwblad verhinderd worden in de vervorming; is deze te kort kan het buitenblad bol komen te staan en heeft deze een verhoogd risico op bezwijken.”

#### 2.2 Literatuuronderzoek

In deze paragraaf is een samenvatting gegeven van de analyse van de normen, voorschriften en publicaties die onderzocht zijn in de literatuurstudie. Tabel 1 op pagina 23 geeft een overzicht van de toetsingen die gevonden zijn in de literatuur en is een aanvulling op de beschreven toetsingen in onderstaande sub-paragrafen.

Tabel 1 is als volgt opgesteld: in de eerste regel zijn de normen gegeven en in de eerste kolom de thema's. De tabel geeft de toetsingen of genoemde adviezen/eisen uit de normen, publicaties of voorschriften weer. De thema's waarover geen informatie in de norm, publicatie of voorschrift beschreven staat is rood gekleurd. De tabel is een samenvatting van de gevonden toetsingen, adviezen en eisen in het eerder uitgevoerde literatuuronderzoek.

Tabel 1: Overzicht van toetsingen uit normen en publicaties

| Toetsing Spouwankers                   | Eurocode 6 (NEN-EN 1996, NEN-EN 845-1)  | NPR9096/6791   | SBR-publicaties  | CUR 71/73                                     | NEN6790   | Britse norm (BS 5628: Part 1, BS 845-1)   | Building Code Requirements for Masonry Structures                                      | The Norwegian Masonry Catalogue 2005  |
|--|---|--|--|---|---|---|--|---|
| <b>Belastingen</b>                     |   |  |  |   |   |   |  |   |
| Windbelasting*                         | $W_{ed} = q_p(z)C_{pe}$   | ** $W_{Ed} = 1,35C_aC_{pe,10}q_p(z)$<br>$F_{sp,d} = 2\gamma_{f,q;u}C_{index}q_p(z)A_{sp}$      | $F_{sp,d} = C_a \cdot \gamma_{f,q;u} \cdot C_{index} \cdot q_p(z) \cdot A_{sp}$  | $F_{sp,d} = n\gamma_f C_a p_{rep} A_{sp}$     | $F_{sp,d} = C_a p_{wd} A_{sp}$  | (§5.1.2 en 6.1) van de norm wordt dit beschreven  |  | $q_p(z) = \gamma_{f,q;u} \cdot \mu \cdot q_p(z)$  |
| Thermische belasting                   | Vervormingsverschil kunnen opnemen van 6mm  |  | $\Delta L = \alpha L \Delta T$   |   |   | Tabel 9 in norm: Dwarskrachtcapaciteit spouwankers  |  | Verplaatsing van het spouwanker: $\Delta \leq 0.002 \frac{t_b^2}{\phi}$   |
| <b>Spouw</b>                           |   |  |  |   |   |   |  |   |
| Spouwbreedte                           |   | Spouw $\leq 180$ mm dan anker $\leq \emptyset 4$<br>Spouw $> 180$ mm dan anker $> \emptyset 4$ | Spouw $\leq 150$ mm dan anker $\leq \emptyset 4$<br>Spouw $> 150$ mm dan anker $> \emptyset 4$   |   |   | 1) als $t_1 \wedge t_2 \geq 90$ mm dan $50 \text{ mm} < l_c < 150 \text{ mm}^{***}$<br>2) als $t_1 \vee t_2 < 90$ mm dan $50 \text{ mm} < l_c < 75 \text{ mm}^{***}$<br>3) $t_1 \wedge t_2 \geq 75$ mm en $l_c \geq 50$ mm $^{***}$ |  |   |
| <b>Spouwblad</b>                       |   |  |  |   |   |   |  |   |
| Spouwblad breedte                      |   |  |  |   |   | Grootste maatgevend:<br>• $2/3 (t_1+t_2)$<br>• $t_1$<br>• $t_2$   | Dragend spouwblad:<br>a) Eén verdieping: 152mm<br>b) Meer dan één verdieping: 203mm    |   |
| Bezijken evenwijdig aan lintvoeg       | $f_{xk1} = f_{(bw;k)} = 3,0 \text{ N/mm}^2$   | Metselwerk met lijm of metselmortel: $\geq 0,2 - 0,3 \text{ N/mm}^2$                           | Minimaal $0,6 \text{ N/mm}^2$  |   |   | $f_{m;\parallel;rep} = R_0 \cdot f_{\perp;rep}$   | $M_{k,par} = \mu \alpha W_k \gamma L^2$<br>$M_{k,par} = \frac{f_{kx,par}}{\gamma_m} Z$ |   |
| Bezijken loodrecht op lintvoeg         | $f_{xk2} = R_0 \cdot f_{xk} = 0,7 \text{ N/mm}^2$   | Metselwerk met lijm of metselmortel: $\geq 0,79 - 0,83 \text{ N/mm}^2$                         | Minimaal $0,3 \text{ N/mm}^2$  |   |   | $f_{m;\perp;d} = f_{bwk}$ of $f_{m;\perp;d} = 1,5 f_{c,rep}$  | $M_{k,perp} = \alpha W_k \gamma L^2$<br>$M_{k,perp} = \frac{f_{kx,perp}}{\gamma_m} Z$  |   |
| <b>Spouwankers</b>                     |   |  |  |   |   |   |  |   |
| Trekcapaciteit                         | $F_{t,max;d} = \frac{F_{t,max}}{\gamma_m}$  | Tekstueel vermeld  | $F_{d,max;d} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot f_s$  |   |   | $F_{t,max;d} = \frac{F_{t,max}}{\gamma_m}$  | Waarde van type anker in tabel 6.5   | Een tabel in de catalogus is gegeven  |
| Drukcapaciteit                         | $F_{d,max;d} = \frac{F_{d,max}}{\gamma_m}$  |  | $F_{d,max;d} = \frac{f_s}{\frac{1}{A_s} + \frac{n_s}{n_s - 1} \cdot \frac{e}{W_s}}$  |   |   | $F_{d,max;d} = \frac{F_{d,max}}{\gamma_m}$  | Waarde van type anker in tabel 6.5   |   |
| Mimimale uittrekkraft                  | $F_{t,max;1000N} = 1000 \text{ N}$  | $F_d \leq F_{sp,d}$  |  | $F_d \leq F_{sp,d}$ met een minimum van 600 N |   | $F_d \leq F_{sp,d}$   |  |   |
| Slippen van het spouwanker             | Bij 1/3 van de kracht mag het spouwankers maximaal 1 mm verplaatsen   |  |  |   |   |   | 1.6 mm   |   |
| Aantal spouwankers per vierkante meter | $n_t \geq W_{Ed}/F_d \geq n_{min} = 2$  | 4 ( $h^* \leq 10$ m)<br>6 ( $h^* > 10$ m)  | - Spouwbreedte $< 150$ mm: 4 $\emptyset 4$ per $\text{m}^2$<br>- Spouwbreedte $> 150$ mm: 4 $\emptyset 5$ per $\text{m}^2$<br>- 6 per $\text{m}^2$ |   |   |   | 2.5 (spouwblad $\leq 90$ mm)<br>4.9 (spouwblad $> 90$ mm)                              | 2.5-4 ( $h^* \leq 10$ m)<br>6.25 ( $h^* > 10$ m)<br>Minimaal 2 per $\text{m}^2$ daarna afhankelijk van functies |
| Minimale inlegdiepte                   | 40 mm   |  |  |   |   |   | 40-50 mm   | Inlegdiepte $\geq 35$ mm<br>Omplooielengte $\geq 50$ mm   |
| Materiaal                              | Tabel NB-C.1  |  |  | Stainless steel (AISI 316)                    | Galvanized steel (NEN-EN-ISO 10684) or stainless steel (AISI 316/AISI 316L) | Stainless steel or non-ferrous material   | Stainless steel, hot dip galvanized steel or epoxy coating                             | - RVS $\sigma_s \geq 500 \text{ N/mm}^2$<br>- Niet corroderende staalsoorten $\sigma_s \geq 500 \text{ N/mm}^2$ |
| Renovatieankers                        | * Er is de laatste paar jaar onderzoek gedaan naar renovatieankers en hun verbinding. Daarnaast is in november 2013 een BRL en URL opgesteld voor renovatieankers. Daarom zal geen verder onderzoek worden verricht naar renovatieankers. |  |  |   |   |   |  |   |
| Type spouwankers                       | In bijlage excl. Verstelbare spouwankers  |  |  |   |   |   | In bijlage excl. Verstelbare spouwankers   | Alle typen spouwankers incl. verstelbare spouwankers  |
| Klampstenen                            |   |  |  |   |   |   | Tabel 6.5 en 9   |   |

\*  $C_a$  is een factor die aangeeft welke van de twee spouwbladen dragend, niet-dragend of onbekend zijn. Deze factor beïnvloedt het aantal spouwankers per vierkante meter of de diameter van het spouwanker. Niet alle berekeningen kunnen worden berekend met alle waarden voor  $C_a$ , zie hiervoor specificaties van de norm

\*\* In deze publicatie staat vermeld welke waarden gebruikt dienen te worden bij de verschillende eigenschappen van spouwbladen, bijv; dragend binnenblad met gelijmd binnenblad, gemetseld buitenblad, kan een max. windbelasting opnemen van  $1,19 \text{ kN/m}^2$

\*\*\*  $l_c$  is de spouwbreedte en  $t_x$  is gelijk aan de spouwbladdikte van zowel het binnen- als het buitenblad



### 2.2.1 Belastingen op de gevel

De belastingen die op de spouwmuren aangrijpen, zijn belangrijk bij de krachtsverdeling in de spouwmuur. De berekening van deze krachten is afhankelijk van de gebruikte normen, voorschriften of publicaties, zoals blijkt uit *Tabel 1*. Drie soorten van belastingen hebben invloed op de capaciteit van het spouwanker, daarbij zijn aardbevingen niet meegenomen omdat daar recent onderzoek voor is uitgevoerd [HAM11]:

#### 1. Windbelasting

Berekening van de windbelasting is zeer afhankelijk van de gekozen norm of voorschrift en daarmee slecht vergelijkbaar met elkaar. Iedere norm of voorschrift gaat uit van andere waarden voor de ondersteuningsfactor.

Ondersteuningsfactor ( $C_w$ ) = Factor die de functie van het binnenblad aangeeft bij de berekening van de windbelasting ( $F_{sp;d} = C_a \cdot \gamma_f; q_{z,u} \cdot C_{index} \cdot q_p(z) \cdot A_{sp}$ ). De volgende drie functies van het binnenblad worden onderscheiden [3 t/m7, 10]:

- $C_a = 1,5$  Gesteund binnenblad  
Een binnenblad dat in staat is om de voorgeschreven windbelasting te weerstaan, met een buigstijfheid die ten minste tweemaal zo groot is als de buigstijfheid van het buitenblad.
- $C_a = 2,0$  Overige gevallen  
Buitenbladen en binnenbladen die niet aan de beschrijving bij factor 1,5 en 3,0 voldoen.
- $C_a = 3,0$  Niet-dragend binnenblad  
Er is sprake van een niet dragend binnenblad dat aan de bovenzijde in horizontale richting uit het vlak van de wand gesteund wordt en waarbij het buitenblad ter plaatse van de vloerranden ook niet is voorzien van een horizontale koppeling met de vloerrand

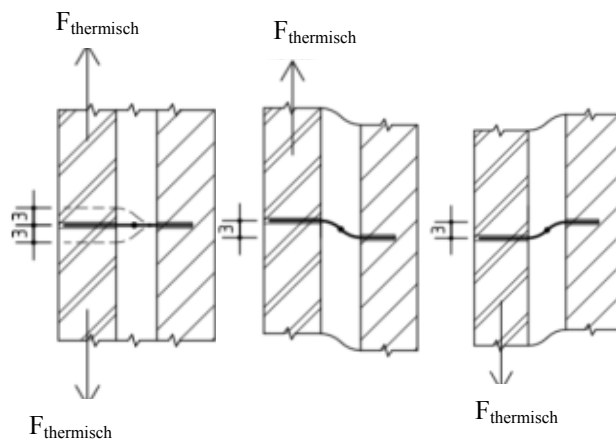
Bij beoordelen van de sterkte van de constructie en bijbehorende factoren onder windbelasting mag de weerstand van het spouwblad zijn gebaseerd op de buigtreksterkte van het metselwerk. De grote van de buigtreksterkte is beschreven in NEN-EN 1996.

Het merendeel van de tijd wordt het buitenblad belast door windbelasting (windzuiging of -druk). Zowel de winddruk als -zuiging worden krachten van het buitenblad overgedragen naar het spouwanker, waarbij verschillende krachten in het spouwanker ontstaan. Winddruk zorgt voor een normaal drukkracht en windzuiging creëert een normaal trekkracht in het spouwanker. Het spouwanker moet beide krachten afzonderlijk kunnen weerstaan.

De spouwmuur kan zo ontworpen worden dat het drukverschil ten opzichte van de luchtspouw vereffend wordt. De mate waarin drukvereffening optreedt, hangt af van de luchtdoorlatendheid van het binnen- en buitenblad en het spouwvolume. Dit effect is verwerkt in EC6 [1] door de factor  $C_p$  mee te nemen in de berekening. De andere geanalyseerde normen in *Tabel 1* nemen de drukvereffening niet mee. Daarnaast is de berekening van de windbelasting sterk afhankelijk van de gebruikte normen en voorschriften, zoals al eerder vermeld.

#### 2. Thermische belasting

Het spouwanker ondervindt naast de windbelasting ook thermische belastingen. Deze belastingen zorgen voor afschuiving op het spouwanker (haaks op lengterichting van het spouwanker) door het krimpen en uitzetten van het buitenblad ten gevolge van het opwarmen en afkoelen door weersinvloeden (*Figuur 11*). De temperatuurswisselingen en dus de beweging van het buitenblad, in horizontale en verticale richting in het vlak van de muur, geven de spouwankers een bepaalde excentriciteit. Om deze bewegingen te kunnen opnemen zonder breuk of verlies van de trek- of drukcapaciteit moeten spouwankers flexibel zijn. Dit is alleen in EC6 [1,2] opgenomen waarin vermeld wordt dat het spouwanker een vervormingsverschil van 6 mm (NEN-EN 1996-2; §2.3.3) moet kunnen opnemen.



*Figuur 11: Principe van vervorming van een spouwanker onder thermische belasting. Links: laat de kracht op het buitenspouwblad zien door thermische belasting. Het tweede en derde plaatje laten de krachten afzonderlijk zien. Bron: Harry Sweering; Afstudeerrapport NHL 2012*

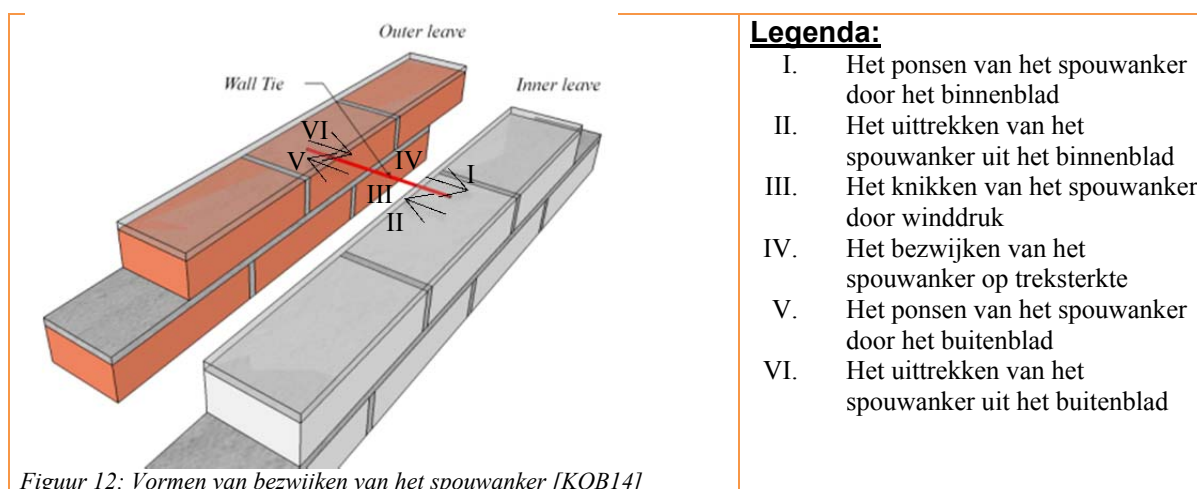


### 3. Buitengewone belastingen en met name brand.

Naast de windbelasting en thermische belasting is brand ook een belasting die op de spouwmuur werkt. In het bouwbesluit wordt gesteld, dat een hoofdconstructie van een gebouw voldoende weerstand moet bieden tegen brand. De functie van het spouwanker is het koppelen van het buitenblad aan het binnenblad. Het binnenblad kan onderdeel uitmaken van de hoofdconstructie en moet dus brandwerend worden uitgevoerd. Uit de numerieke berekening van Willems [WIL12] naar branddoorslag en -overslag bij spouwmuren en de invloed van brand op spouwankers en pluggen kan geconcludeerd worden dat brand geen maatgevende vorm van bezwijken van het spouwanker is.

#### 2.2.2 *Toetsingen van de capaciteit van het spouwanker of spouwblad*

Uit de geanalyseerde normen volgt dat de trek- en drukcapaciteit afzonderlijk moeten worden getoetst. De manier van toetsen en het getoetste bezwijkgedrag verschilt per norm zoals blijkt uit *Tabel 1* op pagina 23. Uit de praktijkanalyse volgt dat de spouwankers verschillende vormen van bezwijken hebben. In *Figuur 12* worden de mogelijke vormen van bezwijken gegeven.



*Figuur 12: Vormen van bezwijken van het spouwanker [KOB14]*

Naast de in *Figuur 12* beschreven manieren van bezwijken kan een van de spouwbladen ook bezwijken. In de normen, voorschriften en publicaties worden zowel het spouwblad als het spouwanker op capaciteit getoetst, namelijk:

#### 1. Toetsing trekcapaciteit spouwanker

Windzuiging veroorzaakt een trekbelasting op het buitenblad, waardoor een normaal trekkracht in het spouwanker ontstaat. Het spouwanker kan door deze trekkracht op drie plekken in de spouwmuur bezwijken (II, IV en VI in *Figuur 12*) [LAF&REN05]:

- Het uittrekken van het spouwanker uit het binnenblad

Een optimale hechting tussen spouwanker en mortel van het buitenblad en een slechte hechting van het spouwanker met de mortel van het binnenblad, zorgt ervoor dat door windzuiging de buitengevel naar buiten trekt en het spouwanker uit de voeg van het binnenblad trekt (*Figuur 13*).

De DIN eist een minimale uittrekwaarde van 1000 N [16]. EC6, CUR71 en NEN6790 toetsen de capaciteit van het spouwanker met vergelijking 2.1. De overige normen toetsen niet op deze vorm van bezwijken.

$$F_{t,max} = \frac{F_{t,max;d}}{\gamma_m} \quad (2.1)$$

Waarin  $F_{t,max;d}$  de gemiddelde trekcapaciteit van het spouwanker is volgens de leverancier en  $\gamma_m$  de materiaalfactor is.

- Het spouwanker bezwijkt op treksterkte

Naast de hechting met de mortel kan het spouwanker zelf ook bezwijken op treksterkte (*Figuur 14*). Dit kan voorkomen wanneer de treksterkte van het materiaal van het spouwanker bereikt is en dus bij voldoende hechting tussen steen-mortel en mortel-spouwanker in zowel het binnen- als buitenblad. SBR beschrijft als enige expliciet dit bezwijkgedrag met vergelijking 2.2 (de overige normen en voorschriften gaat uit dat dit vanzelfsprekend is).

$$F_{t,max} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sigma_s \quad (2.2)$$

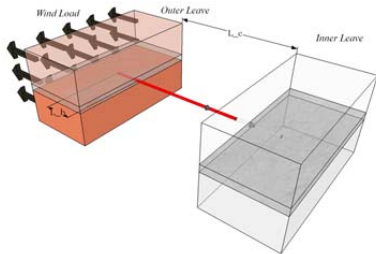
Waarin  $d$  de diameter van het spouwanker is en  $\sigma_s$  de treksterkte van het spouwanker.



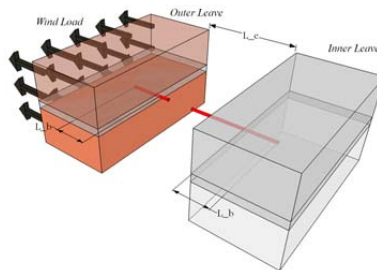
▪ Het uittrekken van het spouwanker uit het buitenblad

Door windzuiging op de gevel, een goede hechting van het spouwanker met de mortel van het binnenblad en slechte hechting van het spouwanker met de mortel van het buitenblad, wordt de buitengevel naar buiten getrokken. Als gevolg wordt het spouwanker uit de voeg van het buitenblad getrokken (Figuur 15).

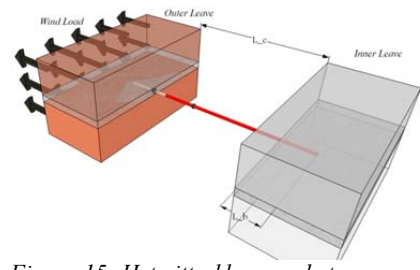
De DIN eist een minimale uittrekwaarde van 1000 N [16], gelijk aan de eerste vorm van bezwijken onder trekbelasting. EC6 gebruikt vergelijking 2.1 voor het berekenen van de trekcapaciteit van het spouwanker.



Figuur 13: Het uittrekken van het spouwanker uit het buitenblad



Figuur 14: Het spouwanker bezwijkt op treksterkte



Figuur 15: Het uittrekken van het spouwanker uit het buitenblad

EC6, CUR71, NEN6790 toetsen niet specifiek op één van de hierboven beschreven bezwijkvormen maar gebruiken de karakteristieke uittrekwaarde  $F_{t,max}$  van de leverancier. Deze waarde moet getoetst worden op:

$$F_{t,max} \leq F_{sp,d} \tag{2.3}$$

Waarin  $F_{t,max}$  de trekcapaciteit van het spouwanker is uit proefresultaten van de leverancier en  $F_{sp,d}$  de windzuiging op het geveloppervlak dat gedragen wordt door één spouwanker.

De onzekerheid in formule 2.1 ligt in het feit dat de leverancier een gemiddelde waarde geeft van  $F_{t,max}$  die hoger kan liggen dan de gemiddelde  $F_{t,max}$  uit de experimenten of in de praktijk. In hoofdstuk 5 wordt hierover meer toegelicht. In EC6 wordt verwezen naar NEN 845-1 waarin beschreven staat waarop de gedeclareerde waarde gebaseerd moet zijn (verankering in metselwerk), desondanks moet rekening worden gehouden met de onzekerheid van de gemiddelde waarde van de leverancier.

**2. Toetsing drukcapaciteit spouwanker**

Winddruk veroorzaakt een drukbelasting op het buitenblad, waardoor een normaal drukkracht in het spouwanker ontstaat. Het spouwanker kan net als bij de trekcapaciteit bezwijken op drie verschillende plaatsen in de spouwmuur (I, III, V Figuur 12):

▪ Het ponsen van het spouwanker door het binnenblad

Het spouwanker kan door het binnenblad ponsen, wanneer de druksterkte en afschuifsterkte van de voeg lager is dan de winddruk (Figuur 16). Net als bij de trekcapaciteit worden in drie normen (CUR71, EC6 (EN845-1) en NEN6790) de gemiddelde waarde van de leverancier gebruikt voor het berekenen van de drukcapaciteit (zie vergelijking 2.4). De overige normen toetsen niet op deze vorm van bezwijken.

$$F_{d,max} = \frac{F_{d,max;d}}{\gamma_m} \tag{2.4}$$

Waarin  $F_{d,max;d}$  de gemiddelde drukcapaciteit van het spouwanker is volgens de leverancier en  $\gamma_m$  de materiaalfactor is.

▪ Het knikken van het spouwanker

Het spouwanker kan ook knikken (Figuur 17) doordat het spouwanker een lagere stijfheid heeft dan de spouwbladen. Dit kan voorkomen wanneer de sterkte van het materiaal van het spouwanker maatgevend is en dus bij voldoende hechting tussen steen-mortel en mortel-spouwanker in zowel het binnen- als buitenblad. EC6 gebruikt de bezwijkvorm volgens de leverancier ingevuld in vergelijking 2.4, deze bezwijkvorm kan knikken zijn. Alleen NPR 9096-1 toetst expliciet met een formule op het knikgedrag:

$$F_{d,max} = \frac{f_s}{\frac{1+n_s}{A_s} + \frac{n_s-1}{n_s-1} \frac{e}{W_s}} \tag{2.5}$$

Waarin;

$f_s$  is de vloeigrens van het materiaal;  
 $A_s$  is het oppervlakte van het spouwanker;

$n_s$  is gelijk aan  $\frac{F_E}{F_{sp,d}}$

$F_E$  is de Eulerse knikkracht

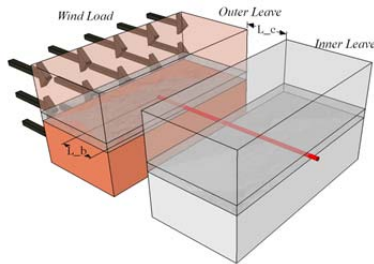
$F_{sp,d}$  is de winddruk op het geveloppervlak voor één spouwanker

$e$  is de beginexcentriciteit van het spouwanker

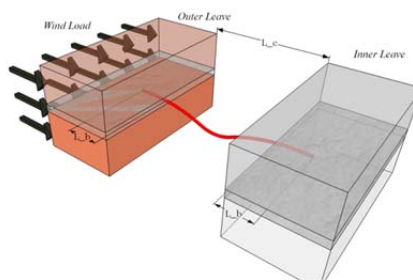
$W_s$  is het weerstandmoment van het spouwanker

- Het ponsen van het spouwanker door het buitenblad

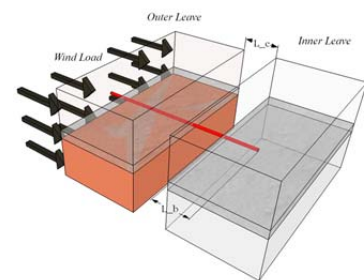
Het spouwanker kan door het buitenblad ponsen wanneer de druksterkte en afschuifsterkte van de voeg lager is dan de winddruk (Figuur 18). Deze toetsing is gelijk aan de beschreven toetsing in formule 2.4.



Figuur 16: Het ponsen van het spouwanker door het binnenblad



Figuur 17: Het knikken van het spouwanker



Figuur 18: Het ponsen van het spouwanker door het buitenblad

EC6, CUR71, NEN6790 toetsen niet specifiek op één van de hierboven beschreven bezwijkvormen maar gebruiken de karakteristieke drukwaarde  $F_{d,max}$  van de leverancier. Deze waarde wordt getoetst op:

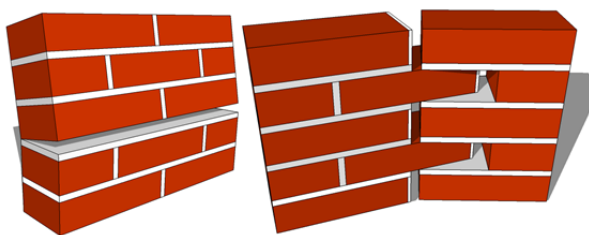
$$F_{d,max} \leq F_{sp,d} \quad (2.6)$$

Waarin  $F_{d,max}$  de drukcapaciteit van het spouwanker is uit proefresultaten van de leverancier en  $F_{sp,d}$  de windzuiging op het geveleppervlak dat gedragen wordt door één spouwanker.

Net als bij de trekcapaciteit geldt voor formule 2.6 dezelfde onzekerheid wat betreft de verkregen waarden van de leverancier.

### 3. Toetsing spouwblad

Bij het beoordelen van de sterkte van het buitenblad onder windbelasting, mag de weerstand van de constructie zijn gebaseerd op de buigtreksterkte van het metselwerk. Deze buigtreksterkte hangt af van de hechtsterkte van het metselwerk en de hechtsterkte hangt weer af van de gekozen combinatie van stenen en mortels [PLU96]. Het bezwijken van het spouwblad kan evenwijdig en loodrecht aan de lintvoeg plaats vinden, bij bijvoorbeeld slechte hechting tussen steen en mortel in de horizontale respectievelijk verticale voegen (Figuur 19). In de toetsingen uit de normen, voorschriften en publicaties wordt de stijfheid van de spouwankers niet meegenomen in de toetsing van het spouwblad. De onderzochte normen, voorschriften en publicaties, zoals NEN-EN 1996-1-1, 2011 [1], NEN 6790; 2005 [3] en BS 5628-1; 2005 [12] beschrijven allen de vormen van bezwijken van de spouwmuur afzonderlijk.



Figuur 19: Evenwijdig en loodrecht bezwijken van het spouwblad aan de lintvoeg. De twee bezwijkvormen die getoetst worden in de normen, voorschriften en publicaties.

#### 2.2.3 Overige toetsingen en/of eisen

Naast de vorm van bezwijken van het spouwblad of het spouwanker zijn in de literatuur ook andere eisen en toetsingen ten aanzien van het spouwanker gevonden, gegeven in Tabel 1. De drie belangrijkste toetsingen en eisen zijn:

##### 1. Aantal spouwankers

De capaciteit van een spouwanker en de windbelasting op de gevel hebben invloed op het aantal benodigde spouwankers per vierkante meter geveleppervlak. Het aantal spouwankers per vierkante meter geveleppervlak is belangrijk voor het bepalen van de normaalkracht (trek of druk) in een spouwanker. Een standaard formule voor de berekening van het aantal spouwankers per vierkante meter is opgenomen in EC 6 [1]:

$$n_t \geq \frac{W_{Ed}}{F_d} \quad (2.7)$$

Waarin  $W_{Ed} = F_{sp,d}$  en  $F_d = F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$ .

Geen van de overige geanalyseerde normen, voorschriften en publicaties gebruiken deze standaard formule. In elk land worden verschillende eisen aan het minimum aantal spouwankers gesteld, zoals uit *Tabel 1* volgt. Hoewel de standaardformule in EC6 een solide uitgangspunt is voor een algemene regel voor het bepalen van het minimum aantal spouwankers, hebben in de meeste landen de nationale eisen de voorkeur.

## 2. Materiaaleigenschappen

Bij het modelleren van een spouwmuur moeten de materiaaleigenschappen bekend zijn omdat deze invloed hebben op het constructieve gedrag van de spouwankers. Daarnaast is het materiaal van het spouwanker belangrijk, omdat het optreden van corrosie de capaciteit van de constructie verlaagt en volgens de Noorse onderzoeker Madsø de uittrekwaarde kan beïnvloeden [MAD80]. CUR 71 [6] heeft naast de eisen in *Tabel 1* extra eisen opgesteld, waaraan het spouwanker moet voldoen:

- $f_s \geq 300 \text{ N/mm}^2$
- $f_t \geq 360 \text{ N/mm}^2$
- $\varepsilon_s \geq 5\%$
- $E_{sp} \geq 1,8 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$

## 3. Typen spouwankers

Slechts in een aantal normen, voorschriften en publicaties zijn de verschillende typen spouwankers uitgewerkt (zie *Tabel 1*). De typen spouwankers zijn niet verwerkt in de toetsing van de capaciteit van het spouwanker, maar enkel een afbeelding of korte beschrijving is terug te vinden in de normen, voorschriften of publicaties. De Britse norm [12&13] geeft een specifieke uitleg over de toe te passen typen spouwankers in de verschillende toepassingen van binnen- en buitenbladen. Desondanks worden de typen spouwankers niet meegenomen in de toetsingen. Wel zijn afzonderlijk voor ieder spouwanker de minimale capaciteit berekend.

### 2.2.4 Referentie onderzoek

Naast de normen, publicaties en voorschriften is in de jaren '80 en recent (2013) experimenteel onderzoek uitgevoerd naar spouwankers in metselwerk. De conclusies van de onderzoeken zijn:

#### 1. Onderzoek Madsø:1980

In de jaren 1980 zijn door de Noorse onderzoeker Madsø experimenten uitgevoerd op spouwankers gemetseld in een bakstenen buitenblad en verschillende gemetselde, houten of betonnen binnenbladen, [MAD99] en [MAD80]. De minimale inlegdiepte en omplooilengte (lengte van de haak) van de spouwankers zijn geanalyseerd tijdens de experimenten. Madsø trekt de volgende opmerkelijke conclusies uit de experimenten:

- De staalkwaliteit heeft invloed de uittrekwaarde van het spouwanker.
- De voordruk op het metselwerk tijdens de proeven heeft invloed op de uittrekwaarde tot een inlegdiepte van 30 mm, daarna is deze verwaarloosbaar klein en is geen voordruk nodig.
- De inlegdiepte heeft grote invloed op de uittrekwaarde van het spouwanker.
- De minimale inlegdiepte voor een reële uittrekwaarde is 40 mm.
- Spouwankers met aan één zijde mortel hebben een slechtere hechting, dan spouwankers met aan tweezijden mortel (zie bijlage 1 voor meer uitleg).

#### 2. Onderzoek door NTNU:2013

In 2013 is op de NTNU [NTNU13] in Noorwegen onderzoek uitgevoerd naar de trekcapaciteit van twee typen spouwankers in twee typen mortels, namelijk:

1. Recht spouwanker (*Figuur 20*)
  - a. M5-mortel
  - b. M10-mortel
2. Spouwanker met haak (*Figuur 21*)
  - a. M5-mortel
  - b. M10-mortel



Figuur 20: Recht spouwanker; [NTNU13]



Figuur 21: Spouwanker met haak; [NTNU13]

De testen zijn uitgevoerd volgens NEN-EN 846, waarbij is uitgegaan van een proefstuk zonder voordruk van twee bakstenen met daartussen een spouwanker (Figuur 20). Uit het onderzoek volgt dat spouwankers met haak vervormen bij het uittrekken uit de mortel (Figuur 21), de hechting tussen mortel en steen bezwijkt, de mortel scheurt en wordt uit de voeg getrokken. Het rechte spouwanker wordt uit de mortel getrokken zonder vervorming en de aanhechting tussen mortel-spouwanker bezwijkt (Figuur 20). Verrassend is dat bij een hogere mortelkwaliteit, M10, lagere uittrekwaarden zijn gevonden. De minimale uittrekwaarde is slechts 0,604 kN en het gemiddelde 2,000 kN, terwijl bij mortelkwaliteit M5 deze waarden respectievelijk 3,636 kN en 4,000 kN zijn. De resultaten van de uitgevoerde proeven zijn gegeven in bijlage 4. Rekening moet worden gehouden dat deze proeven zijn uitgevoerd op holle bakstenen.

### 2.2.5 Samenvatting literatuur

De beschreven normen, publicaties en onderzoeken geven weinig tot geen eenduidige informatie over de vormen van bezwijken van spouwankers. Ze benadrukken de vormen van bezwijken van het metselwerk en toetsen alleen de trek- en drukcapaciteit van het spouwanker zelf. Daarnaast wordt de vorm en mortelkwaliteit niet meegenomen in de toetsing.

Opvallend is dat de samenwerking tussen spouwbladen en spouwankers niet bij één van de toetsingen wordt aangehaald. Toch is één van de constructieve hoofddoelen van spouwankers het verzorgen van de samenwerking van het binnen- en buitenblad van de constructie [10]. De samenwerking van het binnen- en buitenblad wordt alleen nader geanalyseerd bij verhinderde vervorming die kan optreden door temperatuursverschillen, krimp en kruip. Maar praktijktoetsen laten zien dat dit veelal niet berekend wordt, omdat de constructeur verwacht dat het niet maatgevend is.

Over de toetsingen voor de druk- en trekcapaciteit van spouwankers beschreven in bovenstaande paragrafen, kan het volgende worden gezegd (Tabel 1 en Figuur 12):

#### **Het ponsen van het spouwanker door het binnen- of buitenblad (druk)**

$$F_{sp;d} \leq F_{d,max} \text{ waarin } F_{d,max} = \frac{F_{d,max;d}}{\gamma_m} \quad (2.8)$$

De karakteristieke waarde van de leverancier wordt gedeeld door de materiaalfactor. De gevonden  $F_{d,max}$  moet groter zijn dan  $F_{sp;d}$  op het buitenblad. Hoe het spouwanker bezwijkt wordt door de leverancier niet beschreven en blijft onbekend.

#### **Het uittrekken van het spouwanker uit het binnen- of buitenblad (trek)**

$$F_{sp;d} \leq F_{t,max} \text{ waarin } F_{t,max} = \frac{F_{t,max;d}}{\gamma_m} \quad (2.9)$$

De minimale uittrekwaarde moet 600 N [6] of 1000 N [16] zijn en deze moet groter zijn dan  $F_{sp;d}$ . Slechts alleen de minimale uittrekwaarde is bekend uit de normen, een toetsingsformule voor de uittrekwaarde is niet opgesteld.

#### **Het knikken van het spouwanker (druk)**

$$F_{sp;d} \leq F_{d,max} \text{ waarin } F_{d,max} = \frac{f_s}{\frac{1}{A_s} + \frac{n_s \cdot e}{n_s - 1} W_s} \quad (2.10)$$

Het tweede orde effect en de beginexcentriciteit van het spouwanker is in deze formule verwerkt. De normen, voorschriften en publicaties geven andere beginexcentriciteiten van het spouwanker, waardoor grote verschillen in capaciteit van het spouwanker ontstaan. De NEN 6790 houdt 2 mm aan en de NPR 9096 1 mm. Opmerkelijk is dat een advies gegeven wordt over de toe te passen diameter van het spouwanker. De diameter is weer afhankelijk van de spouwbreedte, maar geen toetsingsformule of onderbouwing wordt gegeven. Ondanks de uitgebreide formule wordt het type spouwanker en mortelkwaliteit niet meegenomen in de formule, maar die kunnen wel de drukcapaciteit van het spouwanker beïnvloeden. Daarvoor is in de literatuur (§2.3.2) de Eulerse knikkraft verder onderzocht om de invloed van de kniklengte mee te nemen in het onderzoek.

#### **Het spouwanker bezwijkt op treksterkte (trek)**

$$F_{sp;d} \leq F_{t,max} \text{ waarin } F_{t,max} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sigma_s \quad (2.11)$$

Bij deze toetsing wordt alleen getoetst op de treksterkte van het spouwanker en niet op de verbinding staal-mortel. Daarnaast wordt geen rekening gehouden met de materiaaleigenschappen van de verbinding zoals morteltype, inlegdiepte en aanhechting van de mortel aan het spouwanker. De normen en publicaties zeggen niks over het toetsen van de treksterkte van het spouwanker, enkel worden de karakteristieke waarden van de leverancier gebruikt. Alleen door SBR-publicatie [10] en Adviesbureau Hagemann [HAG11] wordt expliciet met een formule op staalkwaliteit getoetst, de overige normen gaan er vanuit dat dit vanzelfsprekend is.

## 2.3 Norm analyse

Door Sahlin [SAH70] wordt vermeld dat de samenwerking van de spouwbladen en spouwankers klein en in de praktijk verwaarloosbaar is. Uit de praktijk blijkt dat spouwankers invloed hebben op de stabiliteit van het buitenspouwblad, maar dat tegenwoordig enkel een aantal spouwankers per vierkante meter wordt geadviseerd door de constructeur en geen berekening van de capaciteit van de spouwankers wordt gemaakt. In elk van de onderstaande drie sub-paragrafen worden eerst de theorieën en normen geanalyseerd. Daarna worden andere theorieën toegelicht die het gedrag van spouwankers kunnen beschrijven.

### 2.3.1 Trekcapaciteit

De analyse van de toetsingen voor de trekcapaciteit van het spouwanker is in deze paragraaf beschreven. Daarvoor worden eerst de gebruikte formules toegelicht, waarna de formules geplot zijn.

De berekening van de normaalkracht in een spouwanker is afhankelijk van welke norm wordt gebruikt bij de berekening. Voor de normaaltrekkracht in het spouwanker wordt de volgende algemene formule gebruikt:

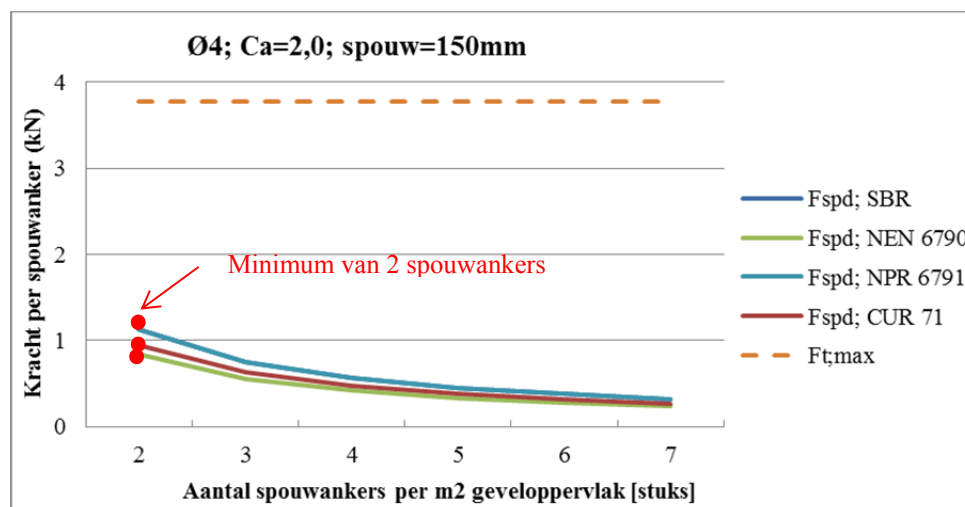
$$F_{sp;d} = c_a \cdot \gamma_{f;q;u} \cdot c_{index} \cdot q_p(z) \cdot A_{sp} \quad (2.12)$$

Formule 2.12 bestaat onder andere uit componenten die de windbelasting op de gevel reproduceren ( $q_p(z)$ ) en de ondersteuningsfactor die afhankelijk is van de functie van het binnenblad ( $c_a$ ). De factor  $c_a$  bepaalt de functie van het binnenblad en heeft invloed op de normaaltrekkracht of drukkracht in het spouwanker. Is  $c_a$  gelijk aan 2,0, dan is de functie van het binnenblad onbekend en zal de  $F_{sp;d}$  groter worden. Is  $c_a$  gelijk aan 1,5 dan wordt het binnenblad als dragend gemodelleerd en zal  $F_{sp;d}$  afnemen. De overige componenten zijn beschreven in de symbolenlijst en §2.2.1.

Uit Tabel 1 volgt dat de capaciteit van het spouwanker in de meeste gevallen gebaseerd is op een algemene toetsing geven met waarden van de leverancier (vergelijking 2.1), alleen de SBR [7] bepaalt de capaciteit van het spouwanker zelf met formule 2.2. Getoetst moet worden of het spouwanker de normaaltrekkracht in het spouwanker kan opnemen zonder te bezwijken op treksterkte, oftewel:

$$F_{sp;d} < F_{t,max} \quad (2.13)$$

Deze toetsing is geplot in Grafiek 1 met op de verticale as de trekkracht per spouwanker uitgezet tegen op de horizontale as het aantal spouwankers per m<sup>2</sup> geveleoppervlak. De stippellijn geeft de waarde aan van  $F_{t,max}$  en is constant omdat de treksterkte van het spouwanker bij toename van het aantal spouwankers in het geveleoppervlak gelijk blijft. De doorgetrokken lijnen weergeven de  $F_{sp;d}$  van één spouwanker berekent via verschillende normen, voorschriften en publicaties.  $F_{sp;d}$  neemt af bij toename van het aantal spouwanker per m<sup>2</sup> geveleoppervlak, omdat de  $F_{sp;d}$  de normaalkracht in één spouwanker is en afhankelijk is van het aantal spouwankers per m<sup>2</sup> geveleoppervlak. Twee lijnen van  $F_{sp;d}$  zijn aan elkaar gelijk, omdat  $F_{sp;d;SBR}$  en  $F_{sp;d;NPR 6791}$  gelijke formules en dezelfde parameters hebben. Wanneer de  $c_a$  (ondersteuningsfactor) wordt veranderd, vallen de lijnen niet over elkaar heen omdat de toetsingen uit de NPR 6791 niet voor alle ondersteuningsfactoren gebruikt mogen worden (zie bijlage 5, ook voor de randvoorwaarden en parameters).



Grafiek 1: Op de verticale as is de kracht per spouwanker uitgezet, tegen op de horizontale as het aantal spouwankers per m<sup>2</sup> geveleoppervlak belast met windbelasting per spouwanker. De gebruikte formules zijn 2.12 (oranje stippellijn) en 2.2 (doorgetrokken lijnen). Het minimaal aantal spouwankers per vierkante meter wordt met de cirkel aangegeven [1]. De randvoorwaarden zijn beschreven in bijlage 5.



Uit *Grafiek 1* kan geconcludeerd worden dat  $F_{t,max}$  veel hoger ligt in vergelijking met  $F_{sp;d}$ , wat suggereert dat via de toetsingsmethode een grotere capaciteit berekend voor het spouwanker (formule 2.2) dan benodigd is voor de opname van de normaal trekkracht in het spouwanker (formule 2.12). De vraag die direct oprijst is;

“Is dit dan wel de juiste toetsing voor de capaciteit die uitgevoerd wordt? En hoe bezwijkt het spouwanker in de praktijk?”

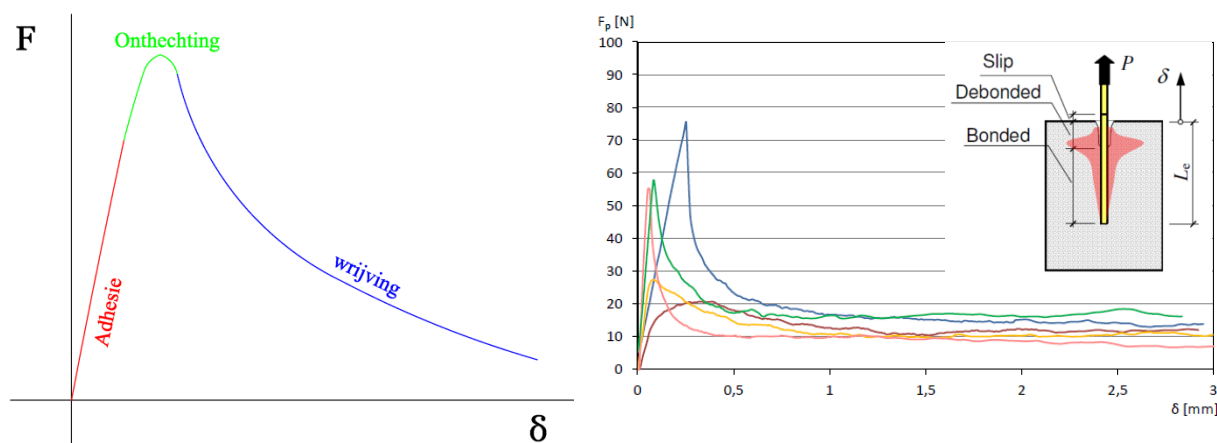
Uit paragraaf 2.1 volgt dat de hechting tussen het spouwanker en de mortel een belangrijke factor is voor de capaciteit van het spouwanker oftewel de uittrekwaarde van het spouwanker uit het spouwblad. Daarom moet deze verbinding uitgelicht worden voor de analyse.

Het uittrekgedrag van een wapeningsstaaf kan vergeleken worden met het uittrekgedrag van een spouwanker [AA14]. Daarbij kan de kracht-verplaatsingsgrafiek verdeeld worden in drie stappen:

1. Adhesie (rood)
2. Onthechting (groen)
3. Wrijving (blauw)

Deze drie stappen zijn in *Figuur 22* weergegeven. In de linker afbeelding is een schematische kracht-verplaatsingsgrafiek getekend met de drie stappen. De rechter afbeelding laat het resultaat zien van het trekken van vezels uit beton en waarvan de linker afbeelding in *Figuur 22* is afgeleid.

Aan de hand van deze drie stappen wordt het uittrekgedrag van het spouwanker uit mortel verder toegelicht, in de volgende sub-paragrafen.



*Figuur 22:* Links: Schematische weergaven van een kracht-verplaatsingsgrafiek van het uittrekken van een spouwanker uit de mortel. In de afbeelding zijn de drie stappen uitgewerkt die het spouwanker ondergaat. Rechts: Het resultaat van het uittrekken van een vezel uit beton [AA14].

### 2.3.1.1 Adhesie

Bij een ideaal recht spouwanker kan schuifweerstand ontstaan door adhesie tussen het spouwanker en mortel. Wanneer het spouwanker golven of imperfecties bevat, wordt de schuifweerstand niet alleen aan de kleef ontleend, maar ook aan de wrijvingskrachten. In de literatuur over beton wordt een onderscheid gemaakt tussen gladde en geribde staven bij het bepalen van de rekenkleef:

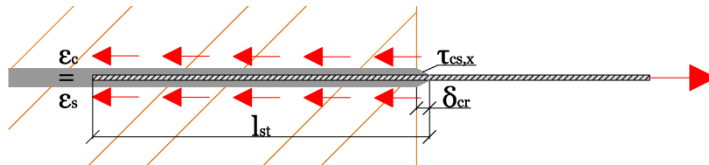
$$\text{Gladde staaf: } f_{bd} = \frac{0.36\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_m} \quad (2.14)$$

$$\text{Geribde staaf: } f_{bd} = \frac{2.25f_{ctk}}{\gamma_m} \quad (2.15)$$

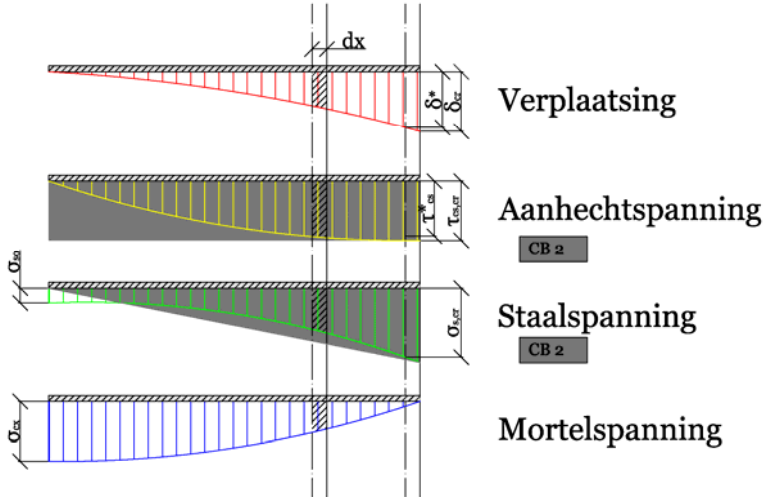
De uitleg van de symbolen is weergegeven in de symbolenlijst, welke geldt voor alle formules die hierna volgen. Wanneer slechte kleefcondities zijn geconstateerd dient gerekend te worden met:

$$f_{bd0.7} = 0.7f_{bd} \quad (2.16)$$

Voor het berekenen van de overdrachtslengte van de spanning van het spouwanker naar de mortel, kan onder andere het trekstaafmodel van Bruggeling gevolgd worden [BRU86]. Bruggeling gebruikt tussentijdse benadering voor het berekenen van de overdrachtslengte en de scheuren in beton doordat de wapeningsstaaf die onder trek wordt belast. Het principe van de berekening is gegeven in *Figuur 23* en *Figuur 24*. Het vereenvoudigt het uittrekgedrag van een wapeningsstaaf uit beton. Dit zelfde uittrekgedrag en de berekening kunnen gebruikt worden voor het modelleren van het uittrekgedrag van een spouwanker.



Figuur 23: Uittrekken wapeningsstaaf uit beton volgens het trekstaafmodel van Bruggeling [BRU86], waarbij de rek van het beton ( $\epsilon_c$ ) gelijk is aan de van de wapeningsstaaf ( $\epsilon_s$ ).



Figuur 24: Spanningen in en rondom de wapeningsstaaf volgens de berekeningen van het trekstaafmodel van Bruggeling [BRU86]. In de berekening van de minimale inlegdiepte wordt begonnen bij de segmenten  $dx$  aan het uiteinde van de staaf die ingelegd zijn, oftewel aan de linkerzijde van deze afbeelding. Berekeningen volgens [CB2] zijn weergegeven met grijs omdat deze op een andere manier de spanning berekent.

Voor de berekening is de staaf opgedeeld in oneindig kleine segmenten met de dikte  $dx$ . Voor het slijpgedrag van het spouwanker moet een  $\tau_{sc} - \delta_x$  relatie worden gevonden. Hiervoor worden de spanningen, verplaatsing en afschuiving aan de linkerzijde van het model gelijk gesteld aan nul (zie Figuur 24). De berekeningen beginnen aan de linkerzijde met het eerste segment  $dx$ . Hierbij zijn de rekken in het beton en staal gelijk aan elkaar (Figuur 23). In het contactvlak tussen spouwanker en mortel treden gelocaliseerde spanningen op die de relatieve verplaatsing tussen spouwanker en mortel weergeven. Om deze spanningen te kunnen bepalen, moet de overdrachtslengte tussen het spouwanker en de mortel bepaald worden. Deze overdrachtslengte kan in twee stappen met het model van Bruggeling bepaald worden:

1. Berekenen van de schuifspanningen langs de staaf.

$$\tau_{cs,x} = \frac{N_s}{\pi \theta l_c} \quad (2.17)$$

2. Het opstellen van de compatibiliteitsvergelijkingen voor een segment (lineair elastisch):

Evenwicht:

$$\Delta \sigma_{sx} = \frac{\pi \theta k}{A_s} \tau_{cs,x} \cdot dx = \frac{d}{\theta k} \tau_{cs,x} \cdot dx \quad (2.18)$$

$$\text{Vervorming:} \quad \delta_x = \int_0^x (\epsilon_{sx} - \epsilon_{cx}) dx \quad (2.19)$$

$$\delta_x = u_{sx} - u_{cs} \quad \text{met} \quad (2.20)$$

$u_{sx}$  = verplaatsing van het spouwanker

$u_{cs}$  = verplaatsing van het beton

De vervormingen van het beton zijn verwaarloosbaar ( $\delta_x = u_{cs}$ ), waardoor de totale verplaatsing gelijk is aan de verplaatsing van het staal. De spanningen in het staal zijn bekend en kan de verlenging en de relatieve verplaatsing van dit element bepaald worden, met:

$$(\sigma_{s0} + \sum \Delta \sigma_{sx}) \cdot A_s = N_s \quad (2.21)$$

Daarna kan de overdrachtslengte bepaald worden met:

$$l_c = n \cdot \Delta x \quad (2.22)$$

Met de vergelijking voor  $\delta_x$  en  $\tau_{cs,x}$  kan geconstateerd worden dat de aanhechtspanningen  $\tau_{cs,x}$  varieert over de lengte  $x$  en geen gelijkmatige verdeling over het spouwanker plaatsvindt.

In het trekstaafmodel van Bruggeling worden de spanningen berekend via een lineair elastisch benadering. De berekening die in de voorschriften worden gebruikt [CB2] gaan van een eenvoudigere berekening uit. Het verschil in de berekende aanhecht- en staalspanningen is gegeven in *Figuur 24* (grijze vlakken). Bij de eenvoudige benadering van de spanningen in de mortel en het spouwanker wordt formule 2.23 gebruikt.

$$F_{t,max} = l_c \cdot \pi \cdot \varnothing \cdot f_b \quad (2.23)$$

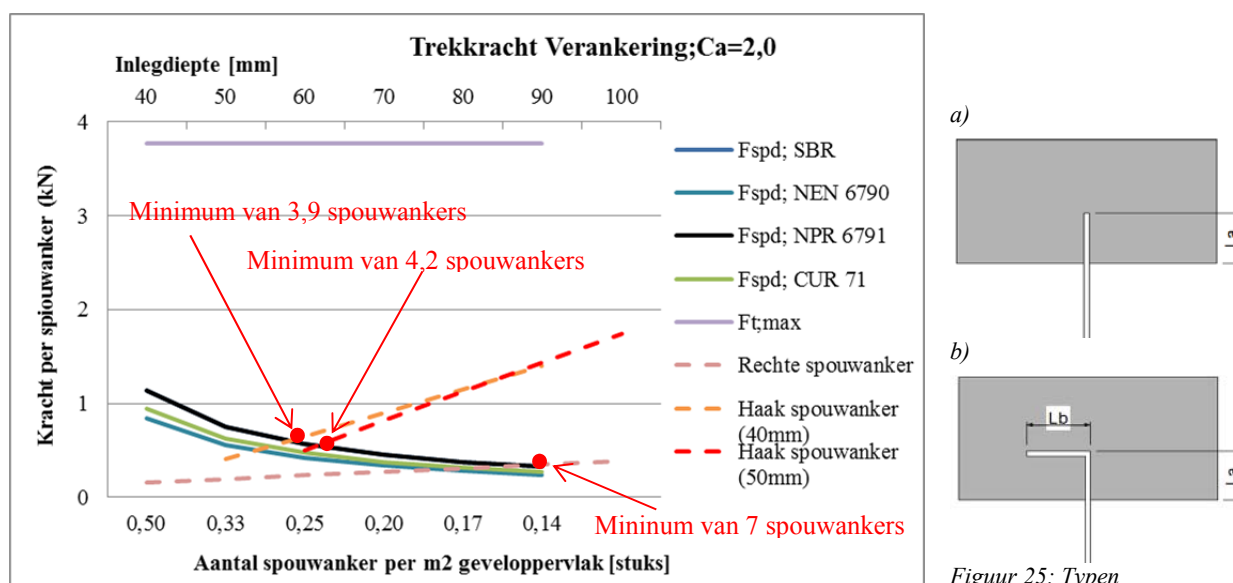
Waarin  $f_b$  de aanhechtspanningen zijn in het contactvlak tussen mortel en spouwanker.  $f_b$  kan als volgt bepaald worden:

$$f_b = \frac{1}{4} \cdot \frac{\varnothing \cdot \sigma_{s,max}}{l_c} \quad (2.24)$$

Formule 2.23 is gebruikt om de invloed van de inlegdiepte van het spouwanker op  $F_{t,max}$  te bepalen en is samen met de gegevens uit *Grafiek 1* uitgezet in *Grafiek 2*. In *Grafiek 2* is op de verticale as de kracht uitgezet tegen op de primaire horizontale as (onderste horizontale as) het geveloppervlak per spouwanker. Op de secundaire horizontale as (horizontale as aan de bovenzijde) is de inlegdiepte van het spouwanker uitgezet. In de legenda van *Grafiek 2* worden drie typen spouwankers vermeld:

1. Recht spouwanker ( $l_a = 40\text{mm}$ ) (*Figuur 25b*)
2. Haak spouwanker ( $l_a = 40\text{mm}$ ) (*Figuur 25a*)
3. Haak spouwanker ( $l_a = 50\text{mm}$ ) (*Figuur 25a*)

Twee typen spouwankers met ieder een ander uittrekgedrag en wat beide resulteert in een andere  $F_{t,max}$ , zoals blijkt uit *Grafiek 2*. Uit *Grafiek 2* kan worden geconcludeerd dat een recht spouwanker niet zal voldoen met een inlegdiepte van 40 of 50 mm, wat wel als minimale waarde in EC6 wordt geadviseerd [2]. Spouwankers met een haak, levert een hogere  $F_{t,max}$ . Daarnaast hebben spouwankers met een haak een grotere trekcapaciteit doordat de haak van het spouwanker achter de mortel blijft steken, wat wrijving veroorzaakt en een groter uittrekwaarde oplevert. De capaciteit van het spouwanker is groter dan benodigd is voor de opname van de normaal trekkracht in het spouwanker. Geconcludeerd kan worden dat alleen spouwankers met een haak met een minimale inlegdiepte van 55 mm voldoen aan formule 2.13.



*Grafiek 2: Aantal spouwankers per m<sup>2</sup> geveloppervlak ten opzichte van de kracht per spouwanker afhankelijk van het type spouwanker en inlegdiepte.*

*Figuur 25: Typen spouwankers en aanduiding inlegdiepte.*

Voor wapeningstaven met een haak is de uittrekwaarde en de vormen van bezwijken door Eligehausen, Popov en Bertero [ELI] al nader onderzocht en hiervan zijn kracht-verplaatsingsgrafieken gemaakt. Hieruit concludeerde zij dat de maximale weerstand van de haak onder monotone belasting ongeveer 60 tot 70 procent groter is dan die van een rechte staaf met gelijke inlegdiepte. De grotere capaciteit van de wapeningsstaaf met haak komt door het grotere afschuifvlak. De invloed van de grootte van de haak is in dit onderzoek niet meegenomen.

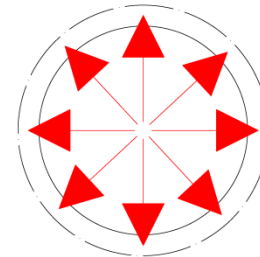
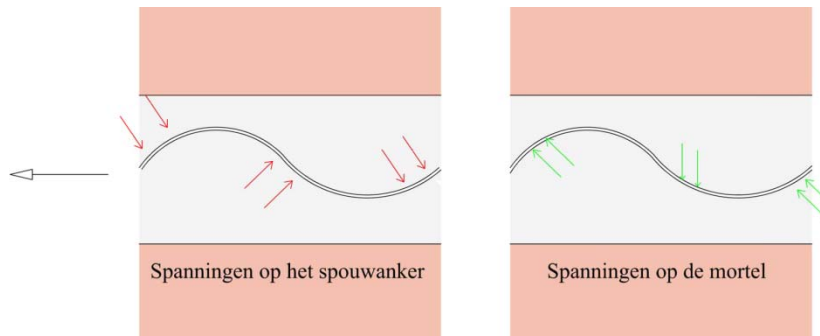
Naast onderzoek over het uittrekgedrag van wapeningsstaven uit beton, is ook onderzoek gedaan op wapeningstaven in epoxy. In bijlage 6 zijn hiervoor de hechtspanningen optredend tussen de materialen verder toegelicht. Lorenzis, Rizzo en La Tegola [LOR02] hebben voor de contactvlakken tussen epoxy-beton en epoxy-staal de hechtspanningen bepaald. Ook uit deze experimenten blijkt dat de hechting tussen de materialen een maatgevende vorm van bezwijken is.



2.3.1.2 Onthechting

Het tweede gedeelte van de kracht-verplaatsingsgrafiek (Figuur 22; pagina 32) is de onthechting van het spouwanker met de mortel. Onthechting van het spouwanker kan op twee manieren gebeuren [LUN99]:

1. Door de schuin gerichte krachten veroorzaakt door de golven van het spouwanker uitgeoefend op de mortel, ontstaan trekspanningen in de mortel (Figuur 26). Dat heeft tot gevolg dat de mortel afsplijt van het spouwanker.
2. Door de radiale spanningen die het spouwanker uitoefent op de mortel (Figuur 27).



Figuur 26: Spanningen op het spouwanker en op de mortel. Doordat trekspanningen in de mortel ontstaan onthechten spouwanker en mortel.

Figuur 27: Radiale spanningen die het spouwanker uitoefent op de mortel.

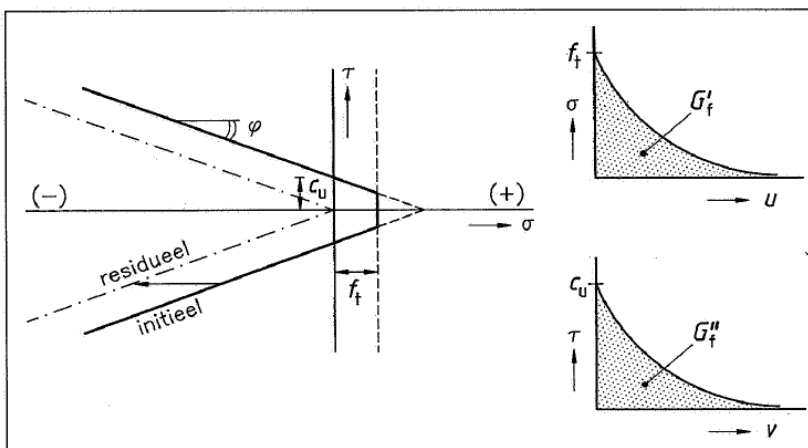
Welke van de twee oorzaken van onthechting optreedt, is niet bekend en kan mogelijk uit de experimenten beschreven in hoofdstuk 3 bepaald worden.

De verlenging van het spouwanker die kan optreden doordat de vloeigrens wordt bereikt, kan bepaald worden over een lengte  $x$  van het spouwanker:

$$\delta_s = \int_0^{x_1} \frac{\sigma_{sx}}{E_s} dx \tag{2.25}$$

Waarin de lengte  $x$  een gedeelte van het spouwanker is.

De scheurvorming en breuk in de mortel zijn voorbeelden van niet-lineair gedrag van metselwerk. Voor het modelleren van het uittrekgedrag van het spouwanker in een numeriek model dient dit meegenomen te worden. Uit experimenten die uitgevoerd zijn door Rots, Berkers en van den Heuvel [ROT96] blijkt dat cohesie ( $c_u$ ) in het algemeen anderhalf tot tweemaal de treksterkte  $f_t$  bedraagt en dat de hoek van inwendige wrijving ( $\varphi$ ) nagenoeg constant is,  $37^\circ$  ( $\tan\varphi=0.75$ ), (zie Figuur 28).



Figuur 28: Bezwijkcriterium voor steen-mortel-interfaces. Discrete scheurvorming met trek-softening en Coulombse wrijving met cohesie-softening [PLU96].

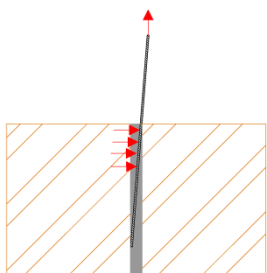
2.3.1.3 Wrijving

De laatste fase van het uittrekken van het spouwanker uit de mortel is wrijving van het spouwanker met de mortel. Wrijving kan optreden in het contactvlak tussen twee materialen of door een horizontale kracht. Wrijving kan ontstaan door:

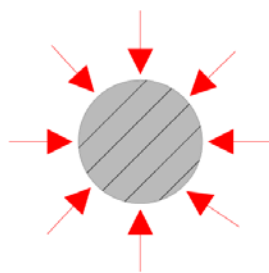
1. Imperfecties van het spouwanker waardoor drukkrachten op het spouwanker werken en deze wrijving veroorzaken (schematische weergave in *Figuur 29*). In de literatuur wordt dit type wrijving niet nader uitgelegd en uit de proeven moet blijken of dit fenomeen optreedt.
2. Krimpen van de mortel  
Dit kan horizontale krachten in de mortel veroorzaken, wat kan resulteren in wrijving tussen het spouwanker en de mortel (*Figuur 30*).
3. Droge frictie  
Wrijving in het contactvlak tussen de twee materialen (spouwanker en mortel of steen en mortel), waarbij een van de twee materialen wil verplaatsen, maar tegen wordt gehouden door de wrijving.

$$F_f = \mu_s \cdot F_n \geq F_{t,max} \tag{2.26}$$

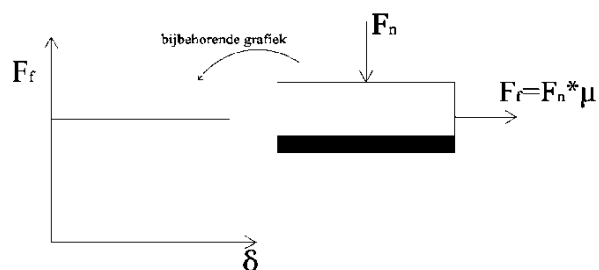
Waarin  $\mu_s$  de wrijvingscoëfficiënt en  $F_h$  de horizontale kracht is (zie *Grafiek 3*).



*Figuur 29: Imperfecties van het spouwanker waardoor drukkrachten uit de mortel op het spouwanker werken*



*Figuur 30: Krachten op het spouwanker door krimpen van de mortel [MAN84]*



*Grafiek 3: Coulomb criterium voor droge frictie en toelichting van de krachten in formule 2.26.*

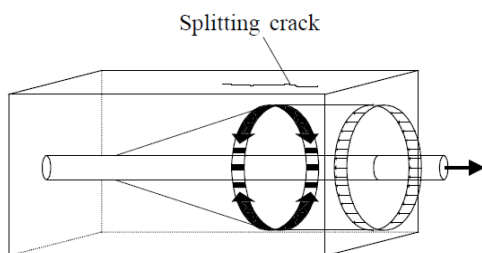
4. Mohr-Coulomb Criterium

Als de schuifspanning buiten het Mohr-Coulomb criterium valt, vindt breuk door afschuiving plaats. Uit de grondmechanica is bekend dat zolang de spanningstoestand maar zodanig is dat de omhullende van Coulomb niet wordt doorsneden, er geen afschuiving zal optreden. De frictie volgens Coulomb treedt alleen op wanneer een horizontale kracht aangrijpt in de mortel. De schuifspanning is:

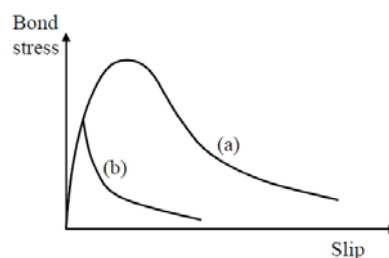
$$\tau_f = c + \sigma' \tan \varphi \quad \text{waarin } \tan \varphi = \mu_s \tag{2.27}$$

Uitgaande van een lijnspanning die plaatsvindt op het spouwanker, waarbij twee van de drie spanningen gelijk zijn aan nul. De symbolen zijn weergegeven in de symbolenlijst.

Lundgren [LUN99] gebruikt de Cirkel van Mohr bij het bepalen van de uittrekkraft van een wapeningsstaaf, waarbij een cone uit het beton getrokken wordt. Tijdens het uittrekken van een wapeningsstaaf uit beton ontstaan spanningen langs de wapeningsstaaf. De spanningen resulteren in een longitudinaal component (hechtspanning) en een radiaal component (normaalspanning of slijtspanning, *Figuur 31*). Bij het ontstaan van slijtspanningen kan bezwijken optreden, slijtbezwijken. Hetzelfde effect vindt plaats bij het vloeien van de wapeningsstaaf, waarbij door het Poisson effect de samentrekking van het beton toeneemt. Oftewel de normaalspanning tussen het staal en beton wordt gereduceerd en wel zodanig dat het alleen lage hechtspanning kan overdragen. Hierdoor zal slijten van het beton optreden. Volgens het onderzoek van Lundgren is de uittrekwaarde de bovengrens en de hechtcapaciteit tussen het beton en het staal de ondergrens van  $F_{t,max}$  (*Figuur 32*).



*Figuur 31: Ringvormige trekspanningen in de verankeringszone van wapeningsstaaf volgens Tepfers 1973 [LUN99]*



*Figuur 32: Schematische bond-slip relatie (a) Uittrekgedrag; (b) Slijtbezwijken of hechtsterkte verlies door vloeien van het staal*

### 2.3.2 Drukcapaciteit

Uit de analyse van de normen, voorschriften en publicaties in paragraaf 2.2 volgt dat het spouwanker op twee manieren kan bezwijken onder winddruk:

1. Knikken van het spouwanker [DIC740]
2. Ponsen van het spouwanker door de mortel [CB4]

In onderstaande sub-paragrafen worden deze twee manieren van bezwijken toegelicht.

#### 2.3.2.1 Knik

Het knikken van een staaf wordt veroorzaakt door aspecten eigenschappen zoals:

- Het niet kunnen vermijden van het excentrisch aanbrengen van de kracht op het spouwanker (2<sup>de</sup> orde moment).
- Het materiaal dat niet overal dezelfde gelijkmatige samenstelling heeft (sterkte van het materiaal).

Deze twee eigenschappen zorgen ervoor dat de drukbelasting een extra moment in het spouwanker veroorzaakt, waardoor het spouwanker sneller zal knikken. Het spouwanker zal knikken volgens een sinusgolf, waaruit de kniklengte bepaald wordt. Bij de berekening van de Eulerse knikkraft wordt uitgegaan van een perfect rechte staaf, belast op zuivere druk:

$$F_{sp;E} = \frac{\pi^2 EI_{sp}}{l_k^2} \quad (2.28)$$

Waarin  $EI$  de stijfheid van het spouwanker is en  $l_k$  gelijk is aan de kniklengte van de staaf, waarbij de lengte van het spouwanker de spouwbreedte is.

Bij een spouwanker in een spouwmuur treedt niet alleen een normaalkracht op in het spouwanker, maar ook buiging. Zowel de normaalkracht als de buiging moet het spouwanker kunnen weerstaan en de optredende spanningen moeten lager blijven dan de vloeispanning van het materiaal.

$$\frac{F_{d,max}}{A} + \frac{M}{W} \leq \sigma_s \quad (2.29)$$

Waarin  $F_{d,max}$  de drukcapaciteit van het spouwanker is.

Doordat het spouwanker niet centrisch, maar excentrisch wordt belast, moet het optreden van het tweede orde effect meegenomen worden, wat resulteert in formule 2.30.

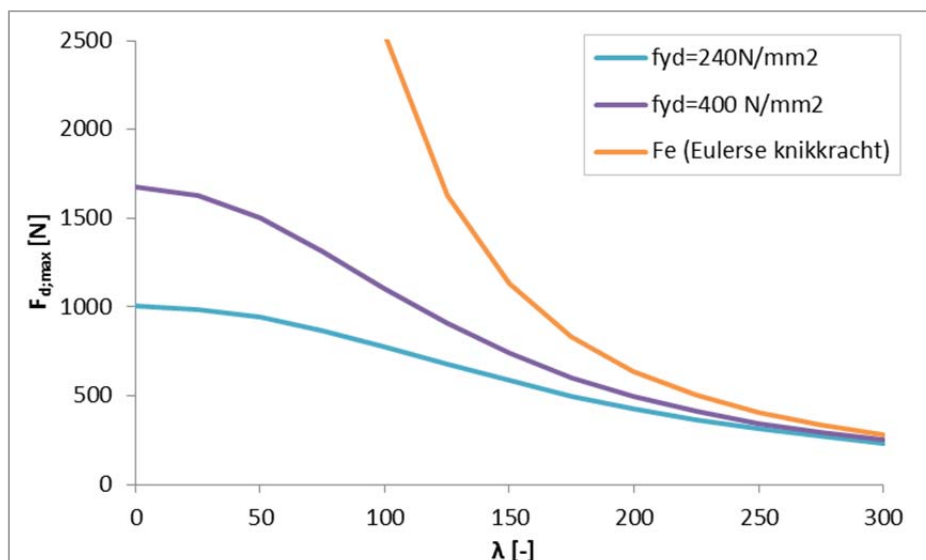
$$\frac{F_{d,max}}{A} + \frac{n_s}{n_s - 1} \cdot \frac{F_{d,max} e}{W} \leq \sigma \text{ met } n_s = \frac{FE}{F_{d,max}} \quad (2.30)$$

Formule 2.30 is bijna gelijk aan de toetsing uit de NPR 9096-1 [5] en SBR [10] (zie *Tabel 1*), alleen daar wordt de windbelasting op de gevel meegenomen in de vergrotingsfactor in plaats van  $F_{d,max}$ . In formule 2.30 zit de kniksterkte van het spouwanker verwerkt. In het spouwanker treden normaalspanningen op die de kniksterkte  $\sigma_k$  worden genoemd. Wordt deze ingevuld in de Eulerse knikkraft wordt formule 2.31 gevonden voor de knikspanning [JAN12]. Dit is een fictieve benadering van de bepaling van de sterkte van het spouwanker:

$$\sigma_k = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (2.31)$$

Waarin  $\lambda$  de slankheid van het constructieonderdeel (de spouwbreedte) is en  $E$  de elasticiteitsmodulus van het spouwanker is.

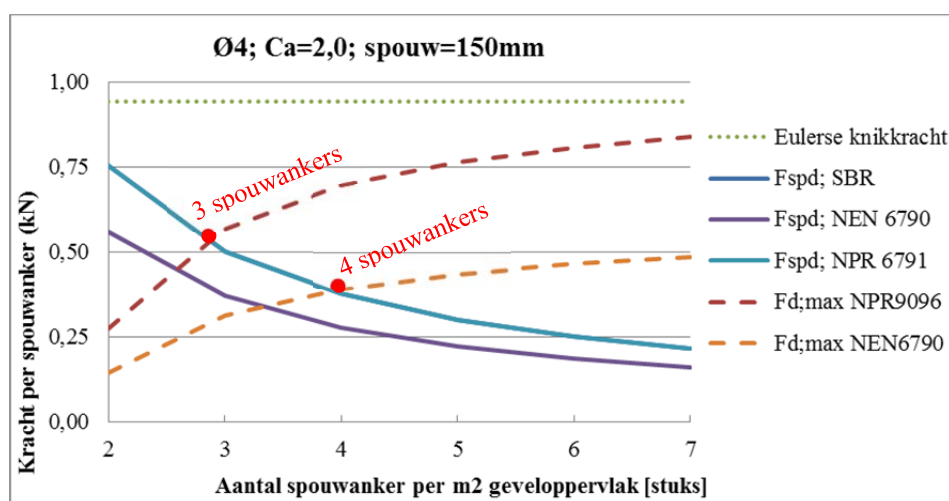
Voor de bepaling welk van de twee aspecten (2<sup>de</sup> orde moment of materiaal sterkte) bij welke kniklengte maatgevend is, zijn formule 2.30 en de Eulerse knikkraft in *Grafiek 4* uitgewerkt. Uit gegaan is van twee staalkwaliteiten van spouwankers (afhankelijk van de leverancier) weergegeven met de blauwe en paarse lijnen. De Eulerse knikkraft is weergegeven met de oranje lijn. *Grafiek 4* toont aan dat bij kleine slankheden, dus gedrongen constructies, de vloeispanning maatgevend is terwijl voor grote slankheden de Eulerse knikkraft maatgevend wordt. Dit is te zien in de grafiek door het afbuigen van de blauwe en paarse lijnen. De maximale opneembare drukkracht van het materiaal is bereikt.



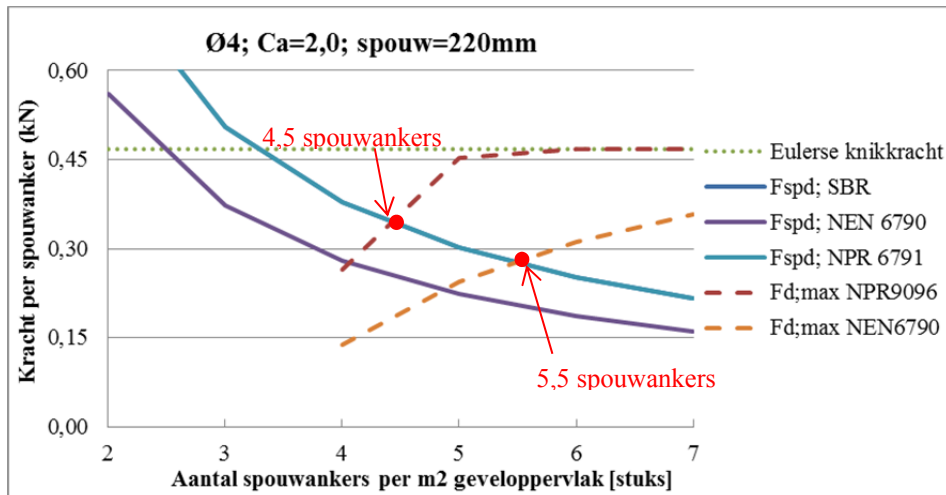
|                 |        |                   |
|-----------------|--------|-------------------|
| d               | 4,00   | mm                |
| A               | 12,57  | mm <sup>2</sup>   |
| We              | 6,28   | mm <sup>3</sup>   |
| I               | 12,57  | mm <sup>4</sup>   |
| e               | 1,00   | mm                |
| f <sub>yd</sub> | 240    | N/mm <sup>2</sup> |
| f <sub>yd</sub> | 400    | N/mm <sup>2</sup> |
| E               | 205000 | N/mm <sup>2</sup> |

Grafiek 4: Formule 2.30 uitgewerkt voor staalkwaliteit  $f_{yd}=240$  en  $400$  N/mm<sup>2</sup>. De Eulerse knikkraft weergegeven met de oranje lijn. Aangeduid wordt dat bij een kleinere slankheid de materiaalsterkte maatgevend is en het tweede orde effect geen invloed uitoefend (afbuiging van de paarse en blauwe lijn).

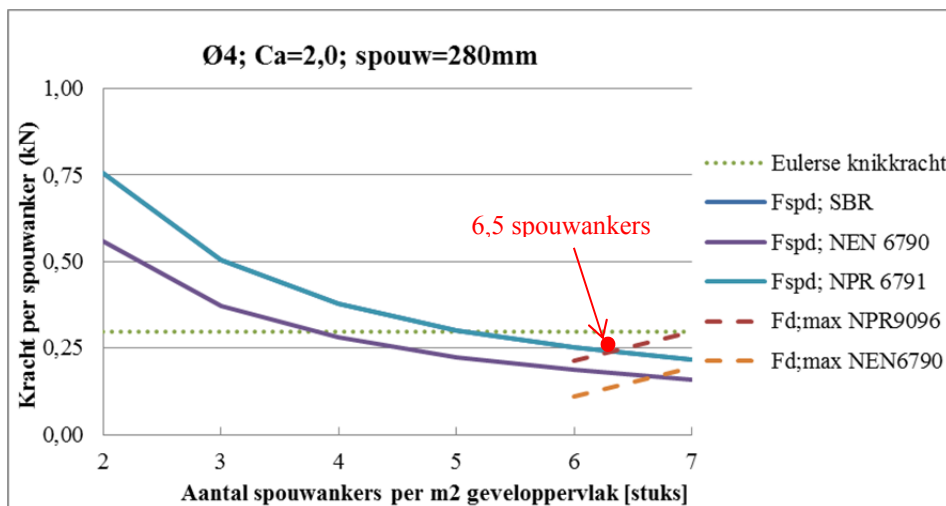
Nu de invloed van de Eulerse knikkraft en de materiaalsterkte bekend is, kan deze samen met vergelijkingen 2.5 en 2.12 geplot worden in Grafiek 5, Grafiek 6 en Grafiek 7. Ook in deze grafieken is terug te zien dat het 2<sup>de</sup> orde effect (Eulerse knikkraft) pas invloed heeft bij een spouwbreedte van 220 mm. In de drie grafieken (grafiek 5, 6 en 7) zijn op de verticale as de drukkracht per spouwanker uitgezet tegen op de horizontale as het aantal spouwanker per m<sup>2</sup> geveloppervlak. De bovenste groene stippenlijn geeft de knikkraft van het spouwanker aan. De drie doorgetrokken lijnen geven  $F_{sp,d}$  (normaaldruk kracht in één spouwanker) weer en nemen af bij toename van het aantal spouwankers per vierkante meter geveloppervlak. Dit is logisch omdat het geveloppervlak per spouwanker waarop de windbelasting aangrijpt afneemt. Slechts twee lijnen van  $F_{sp,d}$  zijn in de grafiek te zien, omdat  $F_{sp,d;SBR}$  en  $F_{sp,d;NPR 6791}$  dezelfde formules en parameters hebben. Wanneer een andere ondersteuningsfactor wordt gebruikt, zijn deze lijnen niet gelijk aan elkaar. De oorzaak hiervan is, dat de toetsingen uit NPR 6791 niet voor alle ondersteuningsfactoren gebruikt mag worden (zie bijlage 7). Bijlage 7 geeft alle randvoorwaarden die gebruikt zijn voor het opstellen van de grafieken.



Grafiek 5: Op de verticale as is de kracht per spouwanker uitgezet, tegen op de horizontale as het aantal spouwanker per m<sup>2</sup> geveloppervlak belast met windbelasting per spouwanker voor spouwbreedtes van 150 mm. De gebruikte formules zijn 2.1, 2.5 en 2.30. Het minimaal aantal spouwankers per vierkante meter voor de opname van de windbelasting wordt met de cirkel aangegeven. De randvoorwaarden zijn beschreven in bijlage 7.



Grafiek 6: Op de verticale as is de kracht per spouwanker uitgezet, tegen op de horizontale as het aantal spouwanker per m<sup>2</sup> geveloppervlak belast met windbelasting per spouwanker voor spouwbreedtes van 220 mm. De gebruikte formules zijn 2.1, 2.5 en 2.30. Het minimaal aantal spouwankers per vierkante meter wordt met de cirkel aangegeven. De randvoorwaarden zijn beschreven in bijlage 7.



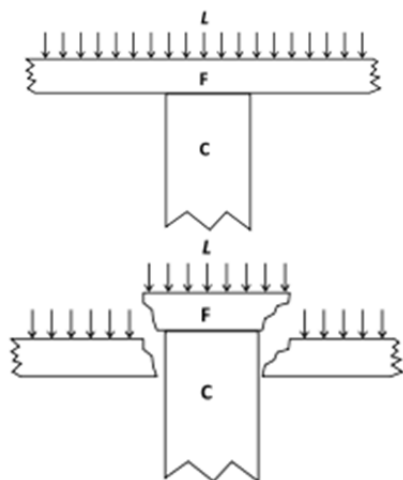
Grafiek 7: Op de verticale as is de kracht per spouwanker uitgezet, tegen op de horizontale as het aantal spouwanker per m<sup>2</sup> geveloppervlak belast met windbelasting per spouwanker voor spouwbreedtes van 280 mm. De gebruikte formules zijn 2.1, 2.5 en 2.30. Het minimaal aantal spouwankers per vierkante meter wordt met de cirkel aangegeven. De randvoorwaarden zijn beschreven in bijlage 7.

Uit de grafieken kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

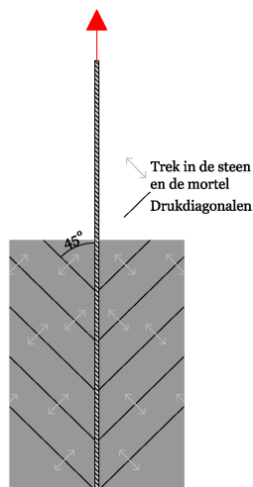
- Minimaal vier spouwankers zijn nodig bij een spouwbreedte van 150 mm maar dit verdubbelt bij een spouwbreedte van 280 mm.
- Daarnaast wordt de Eulerse knikkraft maatgevender voor het bezwijken van het spouwanker. Ook is een verschil te zien in de lijnen die  $F_{sp,d}$  weergeven (de doorgetrokken lijnen), omdat van verschillende werking van het binnenblad wordt uitgegaan (zie hiervoor §2.2.1).
- Als derde kan geconcludeerd worden dat bij de strengere eisen aan de  $R_c$ -waarden en dus de verbreding van de spouwen, het knikgedrag van het spouwanker eerder maatgevend wordt. De breedte van de spouw verlaagt de Eulerse knikkraft en vermeerderd daarmee het aantal spouwanker per vierkante meter dat nodig is voor de opname van de normaalkracht, duidelijk te zien in het verloop van de drie grafieken. In Grafiek 7 is een spouw van 280 mm weergegeven, waarbij minimaal zes en een half of meer spouwankers per vierkante meter gebruikt dienen te worden om de wind te kunnen opnemen (afhankelijk van de gebruikte norm en ondersteuningsfactor  $C_a$ ).

### 2.3.2.2 Ponsen

Naast het knikken van het spouwanker kan ook pons optreden [CB4]. Bij pons drukt het spouwanker door de mortel heen vanwege het stijfheidsverschil tussen spouwanker en mortel. Uit proeven op beton is gebleken, dat het verticaal afschuiven direct langs de omtrek van de puntlast niet voorkomt, maar juist een afgeknotte kegel als bezwijkvorm ontstaat (Figuur 33).



Figuur 33: Bezwijkvorm door pons uit proeven op beton [CB2]



Figuur 34: Druk- en trekdiagonalen waar de scheuren in de mortel ontstaan

De ponsbelasting is het verschil in belasting aan ene zijde in vergelijking met andere zijde en wordt berekend door het niet overschrijden van:

$$V_{Ed} = A_a q_d = N_1 - N_2 \tag{2.32}$$

Voor een eenvoudige benadering van het ponsvlak moet een kegelvormig bezwijkpatroon worden benaderd door een verticaal afschuifvlak. Bij een cirkelvormig lastvlak is dat een cilindermantel met een diameter  $u_1=(c+4d)$ . De gemiddelde schuifspanning ( $v_{ed}$ ) die maximaal mag optreden in de doorsnede wordt gevormd door de verticale cilindermantel op  $2d$  vanaf het lastvlak en wordt berekend door:

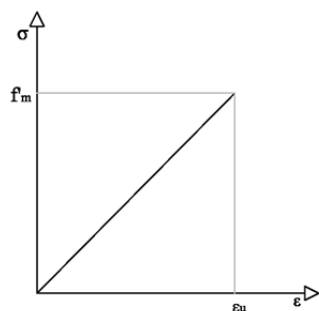
Centrisch belast: 
$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{u_1 d} \tag{2.33}$$

De hoek die de scheur maakt is in het

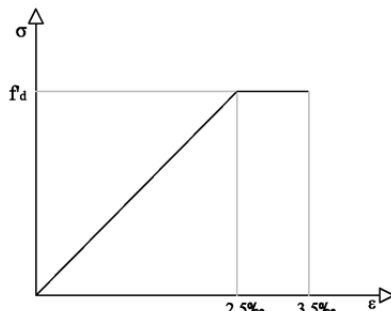
beton  $26,6^\circ$  en is afgeleid uit proeven, de hoek van de scheur in de mortel is gelijk aan  $40-45^\circ$  (Figuur 34).

### 2.3.3 Spouwblad

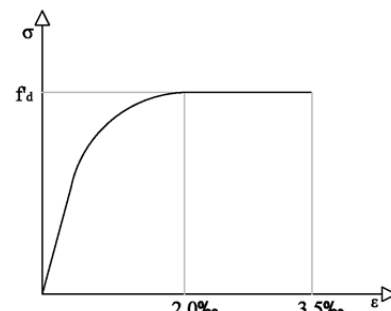
Een aantal vereenvoudigde diagrammen kunnen worden weergegeven voor het verband tussen de spanning en de rek bij een metselwerkwand belast op druk of buiging (Figuur 35, Figuur 36 en Figuur 37). Figuur 37 ligt het dichtst bij het gedrag van een metselwerkwand belast op buiging. Het werkelijke schematische verloop van de spanningen in een metselwerkwand is weergegeven in Figuur 38. Daarin is een lineair gedrag uitgezet tegen het werkelijke gedrag van de metselwerkwand. Doordat deze twee diagrammen sterk met elkaar overeen komen wordt in de praktijk gerekend met een lineair spannings-rek diagram, dit ter vereenvoudiging van de berekening (Figuur 35). Daarbij moet opgemerkt worden dat hoe smaller het spouwblad is, hoe minder de spanning lineair zal verlopen in de spouwmuur.



Figuur 35: Lineair spanning-rekdiagram

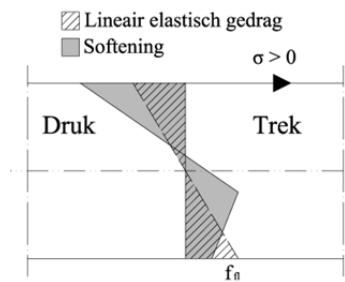


Figuur 36: Bilineair spanning-rekdiagram

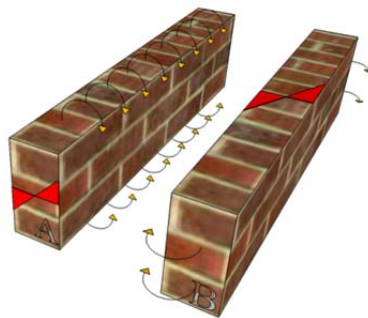


Figuur 37: Parabolisch-rechthoekig spannings-rekdiagram

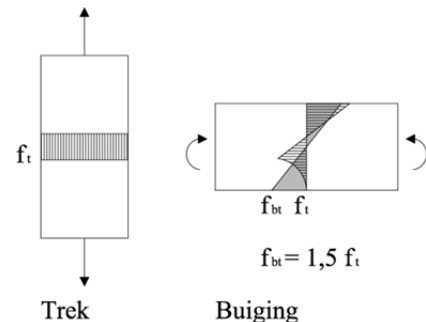
In elk spouwblad treden buigspanningen op ten gevolge van de windbelastingen (zie *Figuur 39*). Allereerst moet het (bezwijk)gedrag van spouwankers in de spouwmuur onderzocht worden, voordat gekeken kan worden naar de totale werking van de spouwmuur. Maar om een analyse van het constructieve gedrag van spouwankers te kunnen uitvoeren, moet de buigstijfheid of hecht/treksterkte van het metselwerk worden geanalyseerd. Buigstijfheid en momentcapaciteit zijn belangrijke eigenschappen van metselwerkgevels als gekeken wordt naar de opname van windbelasting, want zowel de buigstijfheid van het binnenblad als de hechting mortel-spouwanker bepaald de kracht die opgenomen kan worden door het spouwanker [DIC06]. In de normen wordt de hechting tussen spouwanker en mortel niet getoetst, maar wordt voor het metselwerk het volgende geadviseerd: “Voor de eenvoud worden de hecht- en treksterkte vervangen door de buigtreksterkte. De buigtreksterkte mag gelijk worden gesteld aan  $\sigma = \frac{M}{W}$  en is groter dan de hechtsterkte (te zien in *Figuur 40*). “



*Figuur 38: Schematische weergave van de spanningen in een op buiging belaste doorsnede bij het bereiken van het bezwijkmoment*



*Figuur 39: Buigspanningen in spouwbladen ten gevolge van windbelastingen  
a) buiging loodrecht op de lintvoeg  
b) buiging evenwijdig aan de lintvoeg*



*Figuur 40: Verband tussen hecht- of treksterkte en de buigtreksterkte*

### 2.3.4 Samenvatting normanalyse

De literatuur over het wapenen van beton en de kniklengtes is een aanvulling op de toetsingsregels voor de capaciteit van spouwankers beschreven in paragraaf 2.2. De parameters die invloed uitoefenen op  $F_{t,max}$  en  $F_{d,max}$  worden in het experimenteel onderzoek nader geanalyseerd. Mogelijk heeft dit hoofdstuk inzicht geboden in de parameters die mogelijk opgenomen kunnen worden in toetsingsmethode voor de trek- en drukcapaciteit van een spouwanker. De belangrijkste parameters uit deze paragraaf zijn:

- Trekcapaciteit
  - o Inlegdiepte;
  - o Hechting tussen spouwanker en mortel;
  - o Type spouwanker.
- Drukcapaciteit
  - o Druksterkte van de mortel;
  - o Inklemmingen van het spouwanker door de mortel voor bepaling van de kniklengte.
- Spouwblad
  - o Hechtsterkte van de mortel met de steen;
  - o Afschuifsterkte van de mortel.



---

## 2.4 Conclusie

---

Uit de praktijkanalyse volgen vormen van bezwijken die niet in de toetsingen van de capaciteit van het spouwanker volgens de normen, voorschriften en publicaties zijn opgenomen. De normen gaan uit van:

1. de gemiddelde waarden van de leverancier gedeeld door een veiligheidsfactor, of
2. stelt de treksterkte van het spouwanker gelijk aan de capaciteit van het spouwanker, of
3. de buig- en normaalspanningen in het spouwanker moeten kleiner zijn dan de vloeispanning.

Uit de praktijkanalyse wordt juist geconcludeerd dat de verbinding tussen spouwanker en mortel belangrijk is voor de opname van de windbelasting.

De normanalyse beschrijft de niet beschreven parameters uit de normen, voorschriften en publicaties wel (zoals aanhechtspanningen en berekening minimale inlegdiepte), maar zijn gebaseerd op trekproeven op wapeningsstaven. Of deze parameters dan ook gelden voor het trekken van spouwankers, moet volgen uit de experimenten.

De volgende onderdelen moet nader geanalyseerd worden om zo een complete toetsing van de vormen van bezwijken van het spouwanker te kunnen formuleren:

### Drukcapaciteit

- Beginexcentriciteit van het spouwanker
- Formule van NPR9096 en NPR6791 uitbreiden aan de hand van experimenteel onderzoek. De formule gaat nu slechts tot een spouwbreedte van 150-180 mm
- Invloed van de spouwbreedte op het gedrag van een spouwanker Ø4 mm
- Type spouwankers (vorm en materiaal)
- Type en kwaliteit mortel
- Bezwijkgedrag van de verschillende typen spouwankers

### Trekcapaciteit:

- Type en kwaliteit mortel
- Type steen
- Type spouwanker (vorm en materiaal)
- Verbinding tussen spouwanker en mortel
- Bezwijkgedrag van de verschillende typen spouwankers



### 3 Experimenteel onderzoek

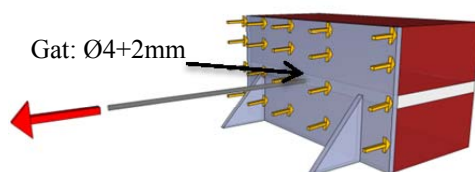
#### 3.1 Vooronderzoek

Om inzicht te krijgen in het constructieve gedrag van spouwankers in brede spouwmuren is experimenteel onderzoek nodig. De parameters die voor het experimentele onderzoek bepaald dienen te worden, zijn in deze paragraaf vastgesteld en geanalyseerd. Het experimenteel onderzoek is onderverdeeld in vier hoofddelen:

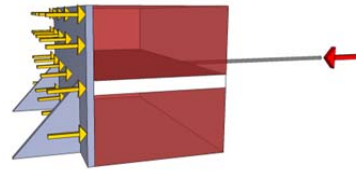
1. Proefopzet
2. Proefstukken
3. Proefopstelling
4. Meetopstelling

##### 3.1.1 Ontwikkeling proefopzet

Als basis voor de proefopzet wordt uitgegaan van de proef beschreven in NEN-EN 845-5. In deze norm worden de twee proefopzetten, weergegeven in *Figuur 41* en *Figuur 42*, gebruikt voor de toetsing van de trek- ( $F_{t,max}$ ) en drukcapaciteit ( $F_{d,max}$ ) van het spouwanker.

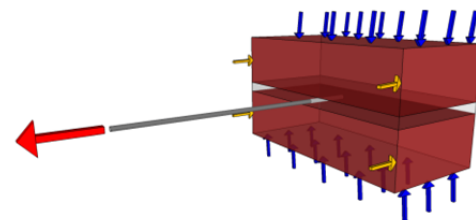


*Figuur 41: Proefopstelling voor het uitvoeren van de trekproef op een spouwanker volgens NEN-EN 845-5.*

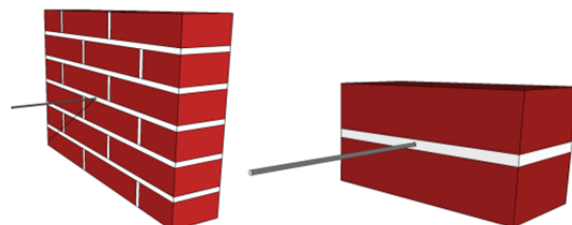


*Figuur 42: Proefopstelling voor het uitvoeren van de drukproef op een spouwanker volgens NEN-EN 845-5.*

De proefopstelling uit NEN-EN 845-5 wordt aangepast voor de proef gebruikt in dit afstudeeronderzoek. De steunen (grijs in *Figuur 41* en *Figuur 42*) worden in de proef aan de zijkant van het proefstuk geplaatst (gele pijlen *Figuur 43*). Op het proefstuk wordt voordruk aangebracht (blauwe pijlen, *Figuur 43*), die in de praktijk wordt veroorzaakt door het eigen gewicht van het metselwerk. De voordruk geeft extra wrijving tussen spouwanker en mortel en heeft een positieve werking op het uittrekvermogen van het spouwanker [MAD80].



*Figuur 43: Werkende krachten op het proefstuk tijdens de trekproef.*



*Figuur 44: Typen proefstukken. Links: Proefstuktype 1; Rechts: Proefstuktype 2.*

##### 3.1.2 Proefstukken

###### 3.1.2.1 Afmetingen en materiaal

Bij toetsingen genoemd in de normen, voorschriften en publicaties wordt uitgegaan van de capaciteit van één spouwanker, wat eveneens in de proefopzet van dit afstudeeronderzoek gedaan wordt. Eén spouwanker moet de wind op een  $x$  aantal vierkante meter geveloppervlak overdragen van het buitenblad naar het binnenblad. Voorafgaand aan de proef is de invloed van de grootte van het proefstuk bepaald. Hiervoor zijn twaalf proeven uitgevoerd met zes keer proefstuktype 1 en zes keer proefstuktype 2 (*Figuur 44*). Daarbij zijn twee dezelfde typen spouwankers gebruikt, elk met een andere staalkwaliteit. Het resultaat van de proef voor bepaling van de afmetingen is gegeven in bijlage 8.

Met behulp van een regressieanalyse en vergelijking 3.1 is de invloed van de afmetingen van het proefstuk bepaald. De  $\beta_n$ -factor is de parameter (gevonden met de kleinste kwadratenmethode) en de  $x_n$  waarden van de parameter. Als de  $\beta_n$ -factor groot is, heeft de parameter een grote invloed op de uitkomst  $y$ . Als de  $\beta_n$ -factor klein is, is de invloed ook klein op de uitkomst  $y$ . Het resultaat van de regressieanalyse is vergelijking 3.2 met daarin de gebruikte waarden uitgewerkt in *Tabel 2*.

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_0 + \epsilon \quad (3.1)$$

Tabel 2: Gegevens voor regressieanalyse met formule 3.1 voor het opstellen van regressievergelijking 3.2.

| Proefstuktype 1                            | Berekend | Proefstuktype 2                    | Berekend |
|--|----------|------------------------------------|----------|
| $F_{t,max}$ (N)                            |          | $F_{t,max}$                        |          |
| 1121,57                                    | 1472,61  | 1640,60                            | 1480,15  |
| 1332,11                                    | 1472,61  | 1466,97                            | 1480,15  |
| 1525,44                                    | 1472,61  | 1771,58                            | 1480,15  |
| 2109,60                                    | 2107,57  | 2160,62                            | 2115,12  |
| 2243,26                                    | 2107,57  | 1609,28                            | 2115,12  |
| 2408,55                                    | 2107,57  | 2136,75                            | 2115,12  |
| <b>*gearceerd = zelfde type spouwanker</b> |          |                                    |          |
| <b><math>\beta_1 = 634,96</math></b>       |          | <b><math>\beta_2 = 7,54</math></b> |          |

$$y = 634.96x_1 - 7.54x_2 + 1563.13 \quad (3.2)$$

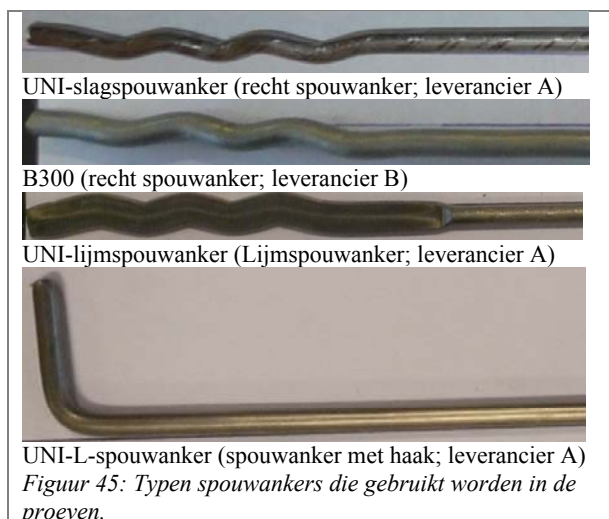
y = Uittreksterkte spouwankers

$x_1$  = Staalkwaliteit spouwanker

$x_2$  = Afmetingen proefstuk

Uit formule 3.2 volgt dat de afmetingen van de proefstukken nauwelijks invloed hebben op  $F_{t,max}$  ( $\beta_2$  ligt dicht bij nul). Daarentegen heeft de staalkwaliteit van het spouwanker wel invloed op de trekcapaciteit ( $\beta_1$  is groot ten opzichte van  $\beta_2$ ), zoals ook volgde uit het onderzoek van de Noorse onderzoeker Madsø [MAD80]. Doordat de staalkwaliteit invloed heeft op  $F_{t,max}$ , worden in de proef beide typen spouwankers (die qua vorm gelijk zijn, maar een andere staalkwaliteit hebben) meegenomen. Het vooronderzoek heeft geleid tot het toepassen van de volgende materialen (zie ook bijlage 1):

- Rijswaard bakstenen Rood-Paars
- Lijmmortel (Omnicol PVM)
  - M15-kwaliteit
- Metselmortel (BEAMIX 320/322)
  - M5-kwaliteit
  - M10-kwaliteit
- UNI-slag spouwanker  
(recht spouwanker; leverancier A)
- B300 spouwanker  
(recht spouwanker; leverancier B)
- UNI-lijm spouwanker  
(recht spouwanker; leverancier A)
- UNI-L spouwanker  
(spouwanker met haak; leverancier A)



### 3.1.2.2 Spouwanker

Voordat de spouwankers in de proefstukken gemetseld worden, is geanalyseerd of deze voldoen aan de vier voorwaarden die vermeld staan op de productiebladen van de leveranciers, namelijk:

- Diameter (belangrijk bij druk en trek)
- Lengte (belangrijk bij druk)
- Rechtheid (belangrijk bij druk)
- Materiaalkwaliteit (belangrijk bij druk en trek)

De metingen per spouwanker zijn in bijlage 9 uitgewerkt. Hieronder wordt alleen een conclusie van de resultaten gegeven.

#### Diameter:

De diameters van de spouwankers verschillen per leverancier. Bij de levering van spouwankers met een diameter van 4 mm, worden andere diameters geleverd, zoals bijvoorbeeld bij leverancier A:

- UNI 275                    Ø3,88 mm
- UNI L                      Ø3,87 mm
- UNI Lijm                  Ø3,89 mm

Deze gemiddelde diameters zijn kleiner dan de gevraagde diameter van 4 mm. Alleen de B300 spouwankers, geleverd door leverancier B, hebben een gemiddelde diameter van 4,08 mm. Deze voldoet aan de vraag van spouwanker met een diameter van 4 mm.

**Lengte:**

Spouwankers kunnen in vele verschillende lengtes geleverd worden. De lengte van het spouwanker is belangrijk voor de te overbruggen spouwbreedte en de inlegdiepte van het spouwanker, daarom mag de lengte van het spouwanker een kleine variatie op de streefwaarde hebben. Als deze variatie te groot is (+/- 10 mm) dan is de inlegdiepte van het spouwanker der mate verkleind, dat  $F_{t,max}$  kan afnemen. De gemiddelde lengtes van de spouwankers zijn in onderstaande Tabel 3 terug te vinden.

Tabel 3: Gemiddelde en gevraagde lengtes van de gebruikte spouwankers voor  $F_{t,max}$ .

| Spouwanker | Gemiddelde lengte (mm) | Gevraagde lengte (mm) |
|------------|------------------------|-----------------------|
| UNI 275    | 274                    | 275                   |
| UNI L      | 270                    | 275                   |
| UNI Lijm   | 302                    | 300                   |
| B300       | 296                    | 300                   |

**Rechtheid:**

Zes van de zeven typen spouwankers die gebruikt worden in dit afstudeeronderzoek hebben een afwijking van 0 tot 4 mm ten opzichte van een rechte staaf (zie Figuur 46).

In tegenstelling tot de andere typen spouwankers heeft het UNI-L spouwanker twee verschillende uiteinden die ingemetseld kunnen worden, één zijde heeft een haak (Figuur 45) en de andere zijde heeft golven (Figuur 46). Opvallend is dat de zijde met golven een scheefstand van gemiddeld 8 mm heeft (Figuur 46). In de praktijk geeft deze scheefstand een andere afdracht van krachten in het spouwblad en kan het een afname in capaciteit van het spouwanker betekenen. Voor dit afstudeeronderzoek heeft dit geen consequenties omdat de haak ingemetseld wordt. Het varkensstaartje in Figuur 46 wordt van het spouwanker geknipt en schroefdraad op getapt. Hierdoor is de scheefstand van het spouwanker weggewerkt.



Figuur 46: De scheefstand van 10 mm die het spouwanker heeft voordat het ingemetseld wordt.

**Materiaalkwaliteit:**

De materiaaleigenschappen van de spouwankers die beproefd worden, zijn als volgt:

- **Leverancier A**  
RVS 316 A4-kwaliteit  
Werkstofnummers: 1.4401 t/m 1.4362  
*UNI-Slag en UNI-Lijm spouwanker*  
0,2% rekgrens: 387 N/mm<sup>2</sup>  
Treksterkte: 674 N/mm<sup>2</sup>  
*UNI-L spouwanker*  
0,2% rekgrens: 432 N/mm<sup>2</sup>  
Treksterkte: 815 N/mm<sup>2</sup>
- **Leverancier B**  
Duplex staal nr. 1.4362  
Werkstofnummer: 1.4362  
*B300 spouwanker*  
0,2% rekgrens: 603 N/mm<sup>2</sup>  
Treksterkte: 751 N/mm<sup>2</sup>

**Overig:**

Om de spouwankers in de inklemming van de proefopstelling te bevestigen, is schroefdraad op het spouwanker getapt. Eén zijde van het spouwanker wordt ingemetseld (varkensstaartje, Figuur 47) en de andere zijde wordt in de inklemming gedraaid (schroefdraad, Figuur 47).



Figuur 47: Schroefdraad (links) en varkensstaartje dat ingemetseld wordt (rechts).

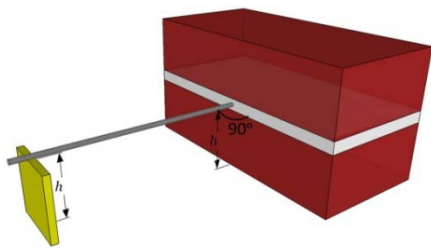
### 3.1.2.3 Productie

Voor de productie van de proefstukken zijn eisen gesteld aan het in metselen van het spouwanker (Figuur 48):

1. Het spouwanker moet horizontaal onder een hoek van 90 graden uit de voeg steken, zodat het proefstuk daarna in de inklemming gedraaid kan worden.  
Het horizontaal in metselen is met behulp van het plaatsen van een steun onder het uiteinde van het spouwanker gedaan (gele steun, Figuur 48).
2. Het spouwanker moet in het hart van de voeg geplaatst worden, zodat zowel aan de bovenzijde als aan de onderzijde van het spouwanker evenveel mortel aanwezig is. Als het spouwanker slechts aan één zijde mortel heeft, heeft het spouwanker minder draagvermogen doordat het hechtoppervlak van het spouwanker met de mortel kleiner is [MAD80].

Verschillende de manieren van inleggen van het spouwanker leidt tot uittrekwwaarden en resultaten die niet met elkaar vergeleken kunnen worden. Door eerst mortel op de onderste steen te leggen, het spouwanker in de mortel te duwen, mortel boven op het spouwanker te leggen en als laatste de bovenste steen erop te duwen, worden de condities gelijk gesteld.

De lijm mortel wordt anders aangebracht dan de metselmortel. Met twee banen wordt de lijm mortel op de stenen aangebracht, waarna het spouwanker op de lijm mortel wordt gelegd (Figuur 49).



Figuur 48: De twee eisen gesteld aan het in metselen van het spouwanker.



Figuur 49: Ingelegde lijmspouwanker in de lijm mortel.



Figuur 50: Aanduiding inlegdiepte spouwanker.



Figuur 51: Waterpas leggen van het proefstuk.

Naast de manier van in metselen van het spouwanker is de inlegdiepte van het spouwanker ook van belang voor  $F_{t,max}$  [MAD80]. Bij alle proefstukken wordt de inlegdiepte gelijk gesteld aan 40 mm (eis uit NEN-EN 845-1). Met behulp van een zwarte lijn op het spouwanker wordt dit constant gehouden tijdens in metselen (Figuur 50).

Daarnaast is het belangrijk dat de proefstukken waterpas worden gemetseld zodat deze op dezelfde manier in het frame geplaatst kunnen worden en gelijkmatig worden belast door de voordruk (Figuur 51).

Een te droog oppervlak van de stenen bij het metselen leidt tot slechte hechting tussen mortel en steen. Daarom zijn de bakstenen één dag voor het metselen 3,5 minuut ondergedompeld en minimaal 12 uur in folie/plastic bewaard, voordat ze gebruikt zijn bij het vervaardigen van de proefstukken. Om te voorkomen dat de proefstukken tijdens het verharden uitdrogen, zijn de proefstukken gedurende de eerste veertien dagen afgedekt met kunststof folie. Daarna bewaard in de omstandigheden van het Van Pieter Musschenbroeklaboratorium totdat ze beproefd zijn.

### 3.1.3 Proefopstelling

Voor dit afstudeeronderzoek zijn twee proefopstellingen ontwikkeld, één opstelling voor de bepaling van de proefstuk afmetingen (Figuur 53 en Figuur 54) en één voor de proef (Figuur 55). Een van de doelen van het onderzoek is de analyse van het constructieve gedrag van spouwankers. Daarom worden aan de twee proefopstellingen de volgende eisen qua te ondergane krachten gesteld (Figuur 52):

- (Figuur 52; blauwe pijlen) Een horizontale voordruk van 300 N ( $0,15 \text{ N/mm}^2$ ), gelijk aan drie lagen metselwerk, moet aangebracht kunnen worden. Deze belasting moet gelijkmatig verdeeld worden over het proefstuk en constant blijven tijdens de proef.
- (Figuur 52; rode pijl) Een verticale kracht moet aangebracht kunnen worden van minimaal 7,5 kN (kracht waarbij het spouwanker op treksterkte bezwijkt:  $F = \frac{1}{4} \pi d^2 \sigma_s = \frac{1}{4} \pi \cdot 4^2 \cdot 600 = 7540 \text{ N}$ ).

De trek- en drukkrachten ( $F$ ) uitgeoefend op het spouwanker zijn groter dan de wrijving die ontstaat door de voordruk ( $N$ ), zodat een extra tegendruk ( $T$ ) noodzakelijk is (zie *Figuur 52*). Deze tegendruk wordt uitgeoefend door de twee stalen platen ( $450 \times 50 \times 20$  mm) boven op het proefstuk, aan elke zijde van het spouwanker één. Deze worden ondersteund door stalen blokjes van  $30 \times 25$  mm, (zie *Figuur 58*). De krachten worden zo alleen afgedragen op de bakstenen, de mortel blijft onbelast.

De voordruk op het proefstuk moet constant blijven tijdens de proef, ook wanneer het spouwanker eruit getrokken wordt, de mortel scheurt of de steen en mortel onthechten. Daarom zijn in het frame veren gebruikt, (zie *Figuur 58*). Deze veren zorgen ervoor dat de voordruk op het proefstuk constant blijft.

### 3.1.4 Meetopstelling

De meetopstelling van de proef is bij de trek- en drukproeven verschillend. Bij de trekproef worden andere eisen gesteld aan de meetopstelling dan bij druk.

De proeven worden verplaatsingsgestuurd uitgevoerd. Omdat bij trek een hogere kracht wordt verwacht, wordt bij trek een snelheid van 0,3 mm/min aangehouden en bij druk 0,1 mm/min. Deze snelheden zijn gebaseerd op de berekende  $F_{d,max}$ ,  $F_{t,max}$  en de tijdsduur van de proef (tussen de 15-20 minuten volgens NEN-EN 845-5).

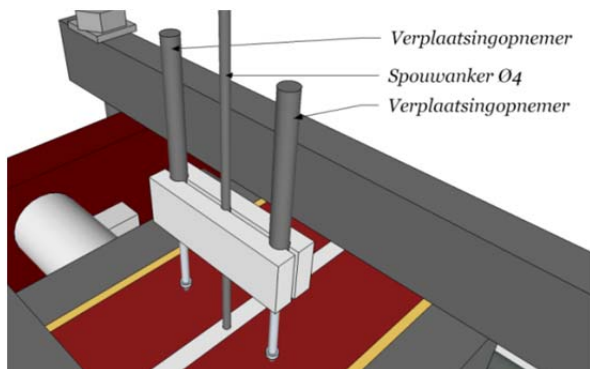
Bij de trekproeven worden de volgende waarden gemeten:

- De verplaatsingen en het rekken van het spouwanker (slipfactor);
- De uiterste uittrekkraft van het spouwanker uit de mortel ( $F_{t,max}$ );
- De verplaatsing bij 1 kN trekkracht;
- Trekkraft bij 1 mm slip.

Daarnaast wordt het bezwijkgedrag van het spouwanker geanalyseerd.

Om deze gegevens te kunnen meten zijn twee digitale indrukbare verplaatsingsopnemers nodig. Deze verplaatsingsopnemers dienen aan het spouwanker bevestigd te zitten en de verplaatsing van het spouwanker ten opzichte van de stenen te meten (*Figuur 59*). Met de meetopstelling in *Figuur 59* kan deze verplaatsing gemeten worden.

De uittrekwaarde van het spouwanker wordt door de krachtmeetdoos gemeten die bevestigd zit aan de 250kN-bank en het spouwanker (*Figuur 56*). Ook de 250kN-bank meet de verplaatsing en krachtopname van het spouwanker en kan ter controle van de krachtmeetdoos gebruikt worden. Het uittrekgedrag van het spouwanker wordt geanalyseerd aan de hand van foto's die om de 500 N belastingtoename worden gemaakt.



*Figuur 59: Verplaatsingsopnemers voor trekproef. Deze bepalen de verplaatsing van het spouwanker ten opzichte van de stenen.*

Aan de meetopstelling voor de drukproeven worden andere eisen gesteld dan aan die voor trek. Bij druk is de verplaatsing van het spouwanker ten opzichte van de steen minder van belang, maar juist de vervorming van het spouwanker. De waarden die gemeten moeten worden door de meetopstelling zijn:

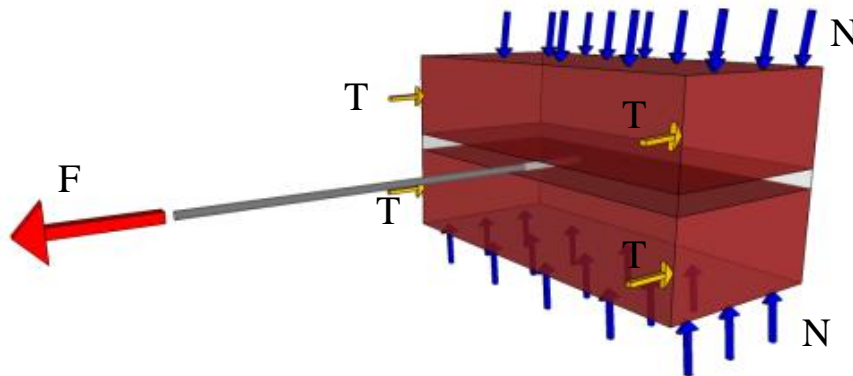
- De vervorming bij maximale belasting;
- De krachtopname bij het vervormen van het spouwanker;
- De beginexcentriciteit spouwanker;
- De maximale drukcapaciteit van het spouwanker ( $F_{d,max}$ ).

Daarnaast moet het knikgedrag van het spouwanker geanalyseerd worden.

Om deze gegevens te verkrijgen zijn voor, tijdens en na de proef de vorm en vervormingen van het spouwanker gemeten. Doordat de proef in de 250kN-bank is uitgevoerd, zijn de mogelijkheden voor de metingen van de beginexcentriciteit en vervorming van het spouwanker beperkt.



- (Figuur 52; gele pijlen) Een tegengestelde kracht ten opzichte van de druk- of trekkracht moet aanwezig zijn. Deze kracht is nodig omdat anders het proefstuk omhoog getrokken wordt door de trekkracht of omhoog gedruwd wordt door de voordruk.

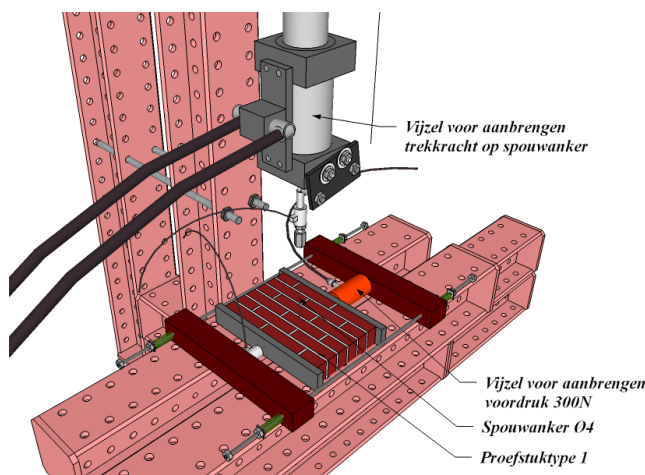


Figuur 52: Werkende krachten op het proefstuk tijdens de trekproef.

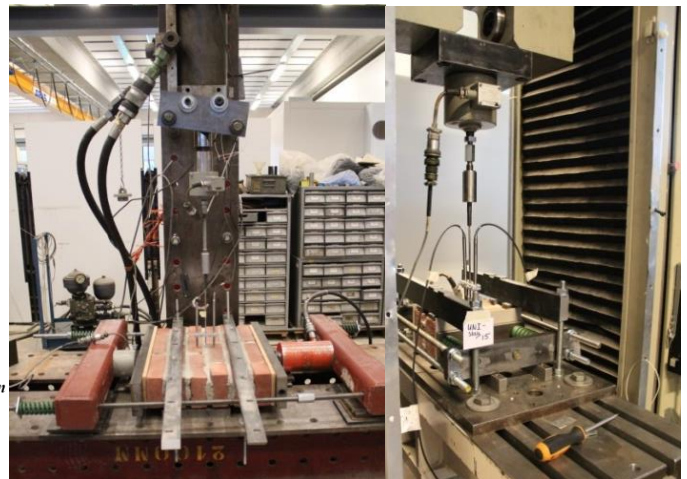
### 3.1.3.1 Proefopstelling proef

Uit de analyse van de proefstukafmetingen beschreven in §3.1.2.1 volgt dat proefstuktype 2 wordt gebruikt in de proef. Gekozen is om de proef uit te voeren in de 250kN-bank. Het belangrijkste van deze proefopstelling is het frame voor het proefstuk dat zorgt voor zowel de voor- als tegendruk bij de druk- en trekkracht op het spouwanker. Allereerst is begonnen, met het uitwerken van het frame voor het proefstuk.

Het frame gebruikt bij de eerste proef, bepalen afmeting en proefstuk (zie Figuur 53), is aangepast voor proefstuktype 2 en is bevestigd in de 250kN-bank, (voor meer details zie bijlage 10). Figuur 56 laat het gebruikte frame voor proefstuktype 2 zien. De stalen platen van 420\*50\*20 mm worden gebruikt voor het uitvoeren van de tegendruk bij de trek- en drukkracht op het spouwanker. Daarnaast kan het proefstuk doordat het frame instelbaar is, loodrecht onder de inklemming van de 250kN-bank geplaatst worden. De voordruk wordt op het proefstuk aangebracht door het aandraaien van de bouten op de Ø10 mm draadstangen. Om een nauwkeurige trek- en drukkracht te meten is een krachtmeetdoos van 10 kN tussen de bank en het spouwanker geplaatst (zie Figuur 55 en Figuur 56). Het frame met het proefstuk zit doormiddel van de draadstangen nummer 1 tot en met 4 vast gebout aan de 250kN-bank (zie Figuur 55), waardoor alleen het proefstuk in het frame gepositioneerd hoeft te worden. Het frame zelf kan ook gepositioneerd worden, doordat de stalen platen (rood in Figuur 56) los van de 250kN-bank zitten. Het proefstuk kan loodrecht onder de inklemming geplaatst worden, waarna de voordruk op het proefstuk aangebracht kan worden. Vervolgens kan begonnen worden met de proef.

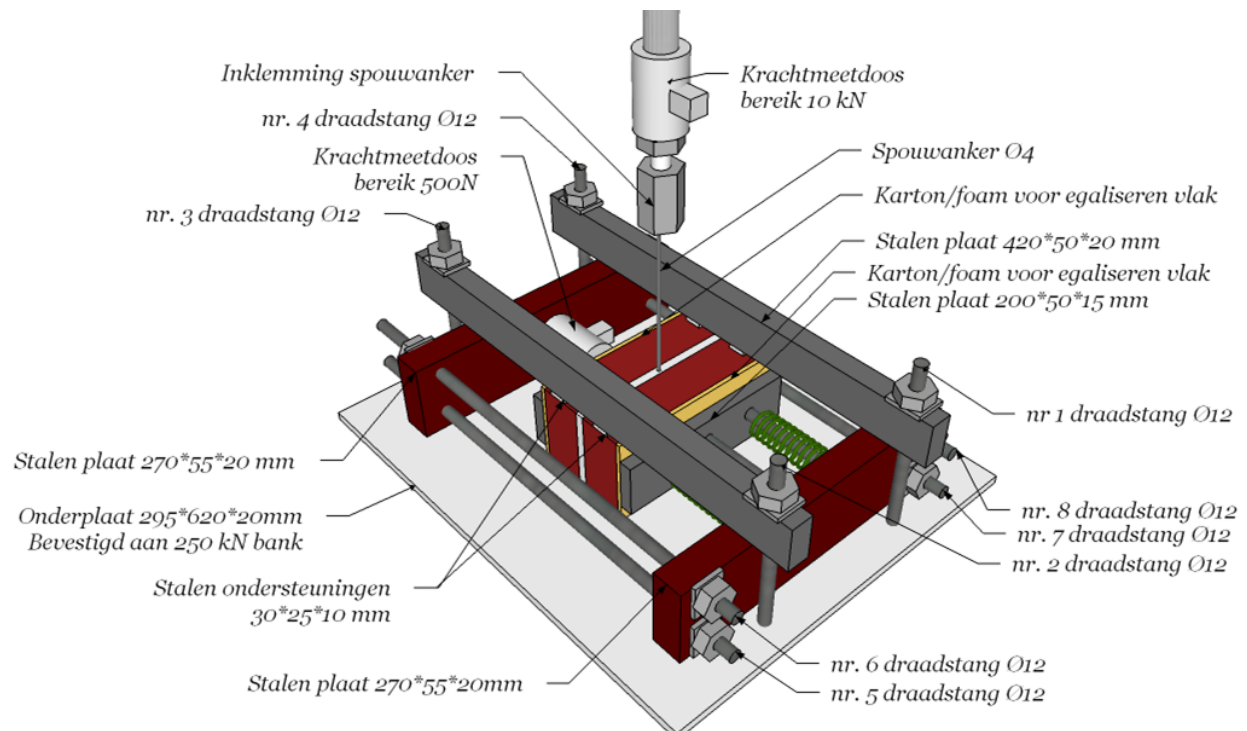


Figuur 53: Proefopstelling voor de eerste proef: Bepalen van de afmetingen van het proefstuk voor de proef.



Figuur 54: Foto van de proefopstelling voor de eerste proef.

Figuur 55: Foto van de proefopstelling van de proef in de 250kN-bank.



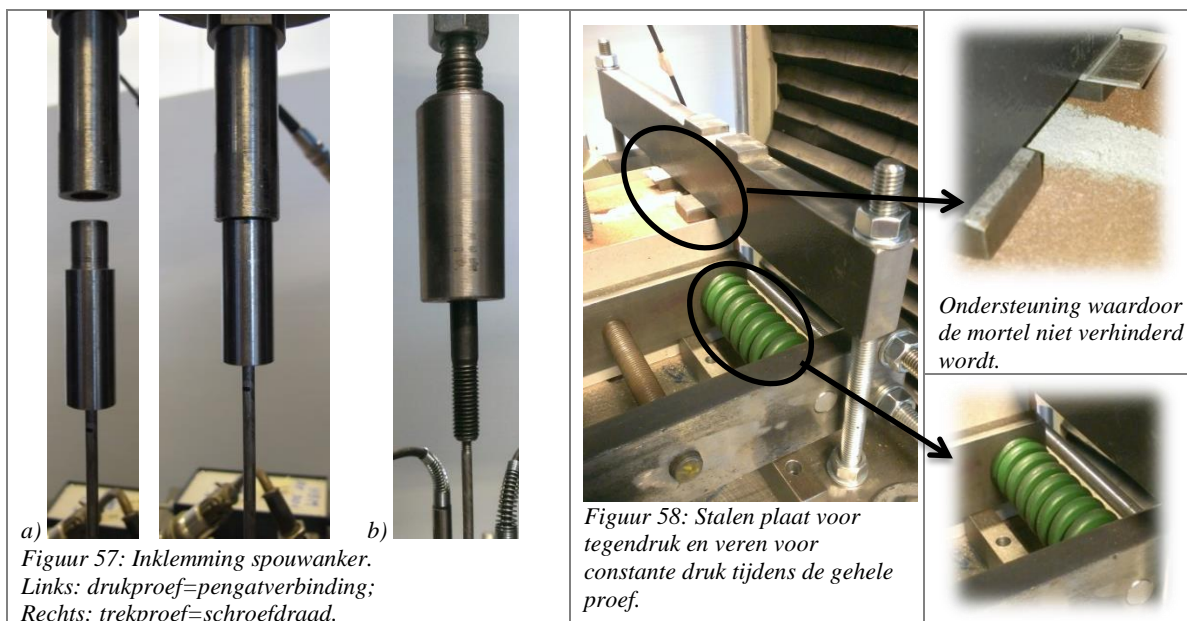
Figuur 56: Frame voor de proefstukken gebruikt in de proef.

### 3.1.3.2 Details en randvoorwaarden

Om te voorkomen dat de spouwankers of het proefstuk bewegen door de trek- of drukkracht die uitgeoefend wordt, zijn een aantal voorzieningen getroffen, die hierna beschreven worden.

Schroefdraad op het spouwanker is gebruikt voor de inklemming van het spouwanker (Figuur 57b). De speling die aanwezig is in het schroefdraad veroorzaakt een minimale slip van het spouwanker en wordt verwaarloosd. De andere zijde van het spouwanker wordt in de mortel gemetseld.

Bij de drukproeven is gebruikt gemaakt van een pengatverbinding (Figuur 57a). De pengatverbinding moet het spouwanker geheel inklemmen, want anders kan het spouwanker in de richting van de speling in de pengatverbinding knikken. Als, net als bij de trekproeven, schroefdraad gebruikt wordt, bestaat de mogelijkheid dat er speling in de verbinding van beide schroefdraden zit. De pengatverbinding is gemaakt zodat deze minimale speling kent.



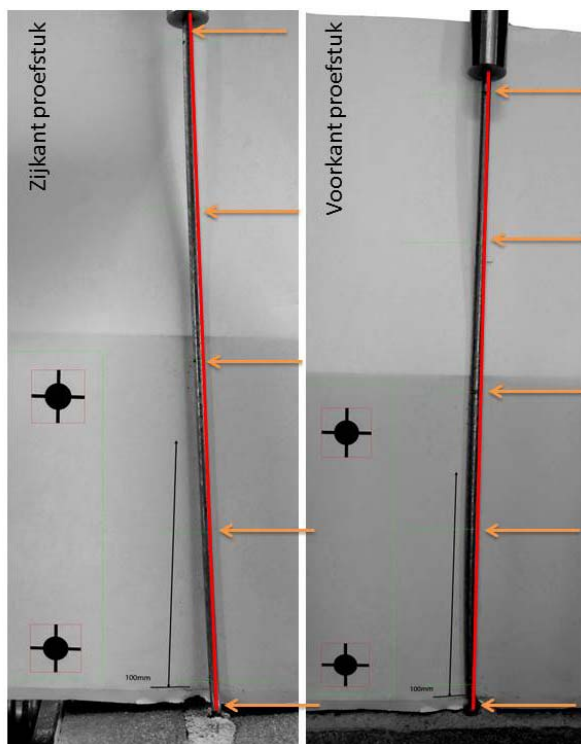
Figuur 57: Inklemming spouwanker.  
Links: drukproef=pengatverbinding;  
Rechts: trekproef=schroefdraad.

Figuur 58: Stalen plaat voor tegendruk en veren voor constante druk tijdens de gehele proef.

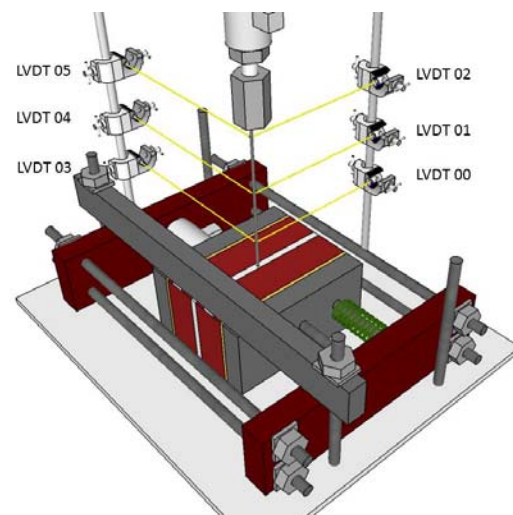


De keuze van de meetopstelling is bepaald door de meting van de beginexcentriciteit van het spouwanker. Gekozen is om de beginexcentriciteit van het spouwanker te bepalen aan de hand van pixels van de gemaakte foto's. Deze foto's kunnen de scheefstand van het spouwanker bepalen en daarnaast de beginexcentriciteit die het spouwanker heeft voordat het beproefd wordt. *Figuur 61* laat twee foto's zien, één foto gemaakt van de zijkant en één foto vanaf de voorkant van het spouwanker. De rode lijn laat per foto de scheefstand van het spouwanker zien, bepaald aan de hand van het bovenste en onderste meetpunten (oranje pijlen). Ten opzichte van deze scheefstand kan de beginexcentriciteit van het spouwanker bepaald worden.

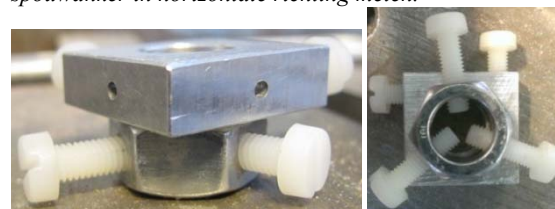
Omdat het niet mogelijk is om na de proef of tijdens  $F_{d,max}$  een foto te maken waaruit de stand van het spouwanker af te lezen is, is gekozen om de vervormingen van het spouwanker te meten tijdens de proef door middel van zes verplaatsingsopnemers (zie *Figuur 60*). De verplaatsingsopnemers (LVDT's) worden bevestigd met een bout op het spouwanker (zie *Figuur 62*). Na de proef kan de vervorming op het moment van de  $F_{d,max}$  worden uitgelezen. De resultaten en gedetailleerde uitleg van de meting zijn gegeven in §3.2.4.



*Figuur 61: Metingen voor de drukproef. Nulstand van het spouwanker (rode lijn) en meetpunten voor de bepaling van de beginexcentriciteit van het spouwanker ten opzichte van de nulstand (oranje pijlen).*



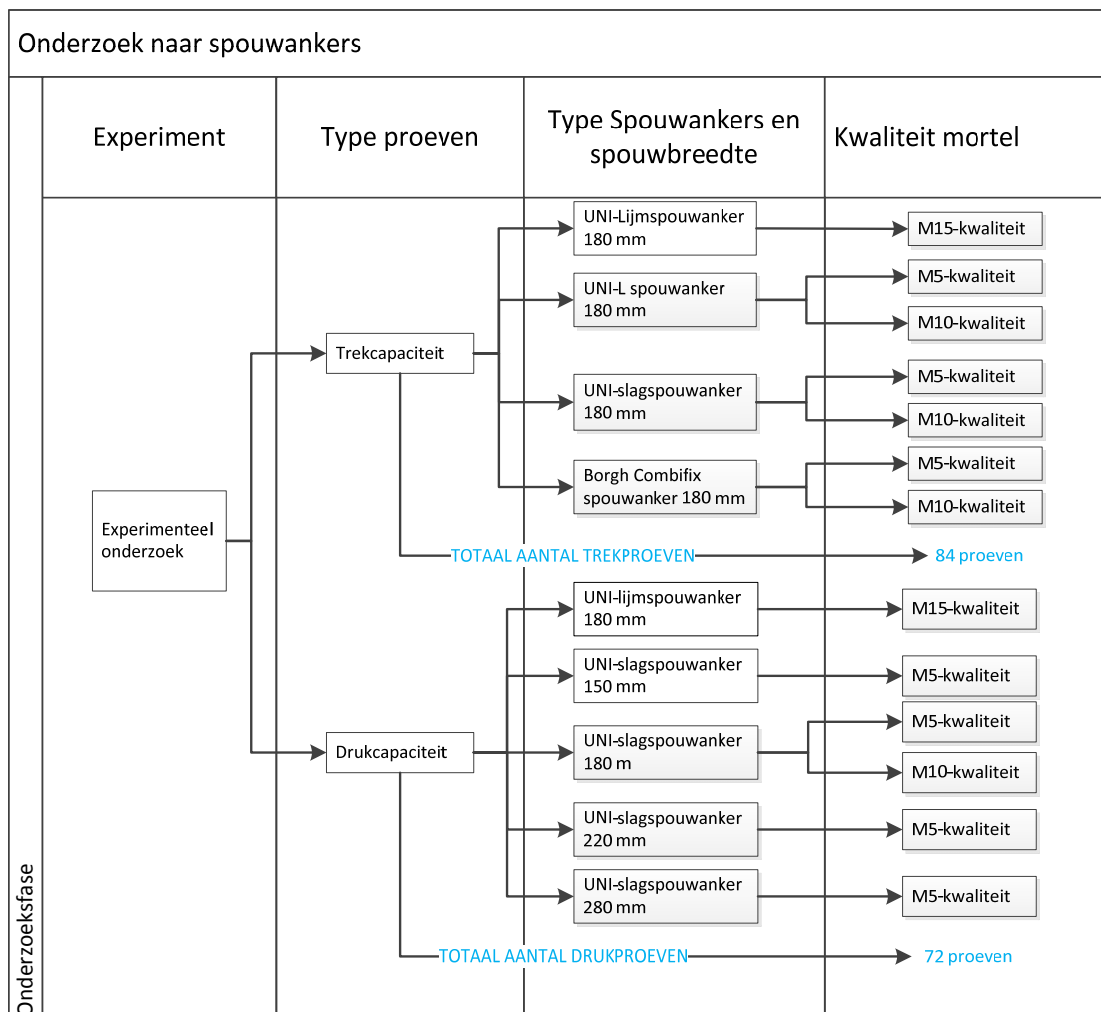
*Figuur 60: Meetopstelling voor de drukproeven. Gebruik wordt gemaakt van 6 LVDT's die de verplaatsing van het spouwanker in horizontale richting meten.*



*Figuur 62: Bevestiging van LVDT's aan het spouwanker (drukproef).*

### 3.2 Proefresultaten

Het experimenteel onderzoek bestaat uit trek- en drukproeven, waarvan de resultaten het gedrag onder trek- of drukbelasting van het spouwanker tonen. De proefresultaten zijn in deze paragraaf uitgewerkt, beginnend met trek, daarna druk en als laatste de materiaaleigenschappen. *Diagram 2* geeft de details weer van de uitgevoerde proeven.



*Diagram 2: Uitgevoerde proeven op verschillende typen spouwankers in verschillende typen mortelkwaliteiten. Het aantal proeven bij de drukcapaciteit is verminderd doordat uit de proeven is gebleken dat de mortelkwaliteit minimale invloed heeft.*

#### 3.2.1 Algemene beschouwing trekcapaciteit spouwanker

Voor de analyse van de trekcapaciteit van spouwankers zijn 84 proeven uitgevoerd op verschillende series van spouwankers met mortelkwaliteit. Elke serie bestaat uit twaalf proefstukken, met het spouwanker en de mortelkwaliteit zoals weergegeven in *Diagram 2*. Bij de trekproeven zijn de volgende drie typen spouwankers gebruikt:

- **Rechte spouwankers**  
UNI275 spouwankers; leverancier A  
B300 spouwankers; leverancier B
- **Spouwankers met een haak**  
UNI-L spouwankers; leverancier A
- **Platte spouwankers**  
UNI-Lijmspouwankers; leverancier A

Een eerste blik op de resultaten van de trekproeven hebben naar verwachting een grote spreiding want voor, tijdens en na het proeven zijn gebreken geconstateerd. Deze worden na de toelichting van het ideale proefstuk besproken. Het ideale proefstuk waar geen gebreken geconstateerd zijn, kan als volgt beschreven worden:

Ideaal proefstuk

Het ideale proefstuk is een proefstuk zonder de volgende gebreken:

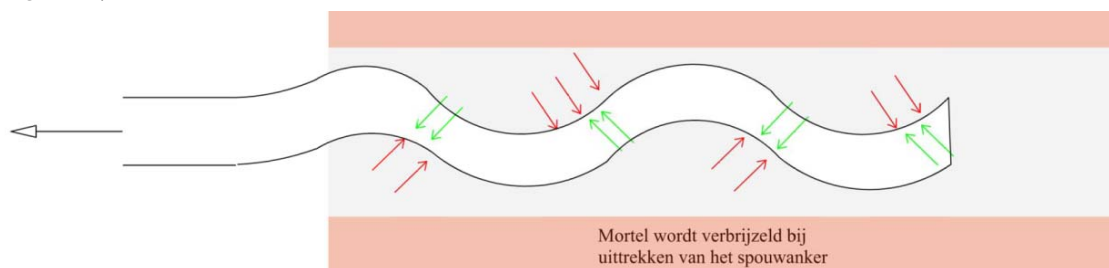
- Onthechting tussen mortel en steen vóór en tijdens het proeven;
- Beweging van het spouwanker bij de bevestiging in de mortel vóór en tijdens het proeven;
- Stenen breken.

Algemeen kunnen drie stappen worden beschreven die het uittrekken van het spouwanker beschrijven:

Stap 1: Het lineaire gedrag bij het uittrekken van het spouwanker. Door adhesie treden spanningen op in het vlak tussen het spouwanker en de mortel (punt 0-B in *Grafiek 8*).

Stap 2: Als de schuifspanningen in het vlak tussen het spouwanker en de mortel maximaal zijn, onthecht het spouwanker zich van de mortel (punt B-D in *Grafiek 8*). Verdere toename van de verplaatsing, veroorzaakt dat het spouwanker zich in het geheel onthecht (punt C).

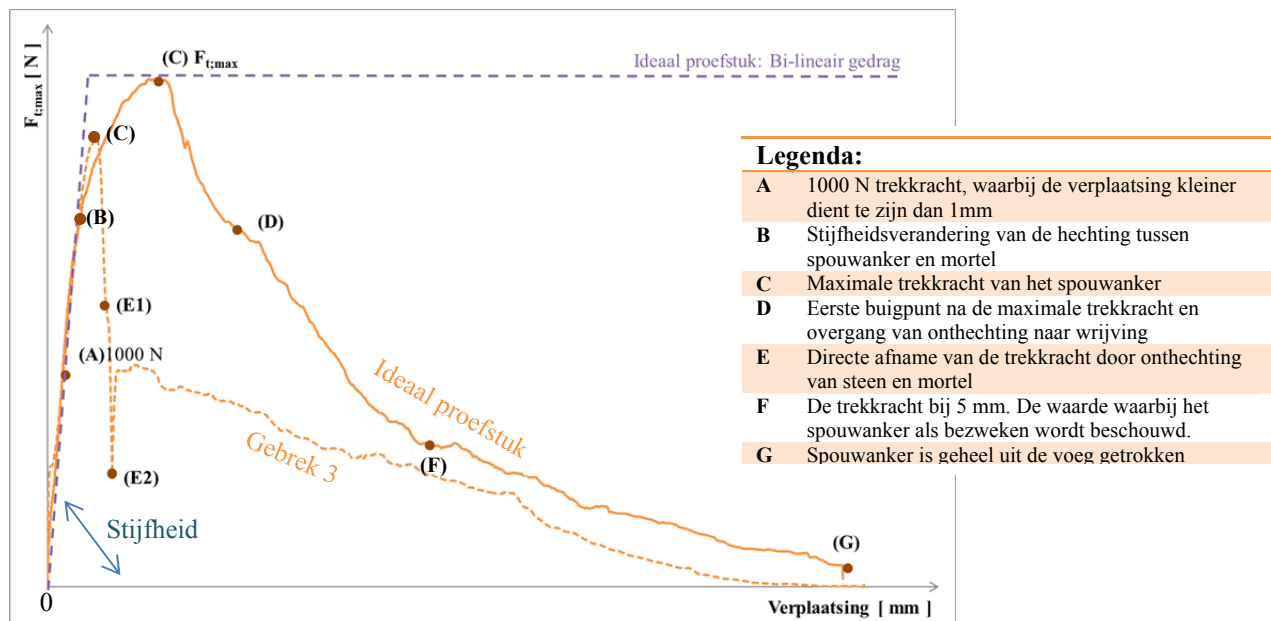
Stap 3: Bij de onthechting van het spouwanker met de mortel zullen de spanningen vanwege wrijving toenemen en zal het spouwanker uiteindelijk uit de voeg getrokken worden en zal de mortel verbrijzelen (punt B-G in *Figuur 63*).



*Figuur 63: Schematische weergaven van de spanningen die op het spouwanker werken (rode pijlen) en de spanningen die op de mortel werken (groene pijlen) [LUN99].*

Het ideale proefstuk heeft een kracht-verplaatsingsgrafiek gelijk aan de doorgetrokken lijn in *Grafiek 8*. De oranje stippellijn in de grafiek hoort bij een van de hierna toegelichte gebreken ("Gebrek 3"). In de legenda worden de punten die in de grafiek zijn aangegeven toegelicht en duiden de drie stappen aan die het spouwanker ondergaat bij het uittrekken uit de mortel.

Het getekende bilineair uittrekgedrag in *Grafiek 8* is belangrijk voor de constructeur om het gedrag van het spouwanker mee te kunnen nemen in het construeren van een spouwmuur. Daarbij is vooral de stijfheid van de verbinding tussen mortel-steen en mortel-spouwanker belangrijk. In dit afstudeeronderzoek is niet het bilineaire gedrag van het spouwanker bepaald, maar alleen  $F_{t,max}$ . In hoofdstuk 4 is met  $F_{t,max}$  de statische beoordeling van de resultaten uitgevoerd en dus niet met het bilineaire gedrag van het spouwanker gerekend.



*Grafiek 8: Kracht-verplaatsingsgrafiek voor een ideaal proefstuk (doorgetrokken oranje lijn) en een proefstuk met "Gebrek 3" (oranje stippellijn). De punten op de grafieken worden in de legenda beschreven. De stijfheid is de hoek tussen de verplaatsing en de kracht die op het proefstuk wordt uitgeoefend of ondergaat.*

Naast het ideale proefstuk, zijn de proefstukken met gebreken onder te verdelen in vijf groepen (Diagram 3).

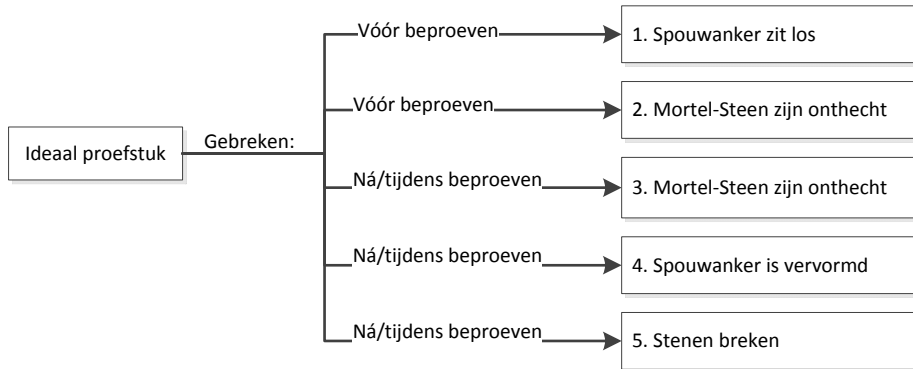


Diagram 3: Gebreken aan het proefstuk die voor, tijdens of na het beproeven zijn geconstateerd ten opzichte van het ideale proefstuk. Elk nummer staat voor een type gebrek.

“Gebrek 1”: Spouwanker zit los voor het beproeven

Voordat de proef begonnen is, zit het spouwanker los. De verbinding tussen spouwanker en mortel is zwak, waardoor de verplaatsing die het spouwanker ondergaat voordat  $F_{t,max}$  bereikt wordt groter is dan bij het ideale proefstuk. Het uittrekgedrag dat doorlopen wordt is gelijk aan het ideale proefstuk, alleen is de verplaatsing bij  $F_{t,max}$  groter en dus de stijfheid van de verbinding tussen mortel en spouwanker zwakker.

“Gebrek 2”: Mortel en steen zijn onthecht voor het beproeven

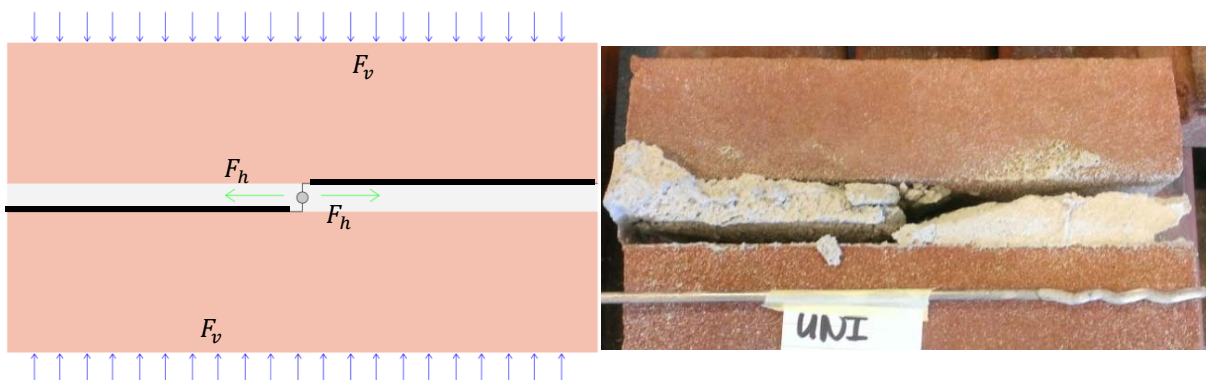
De steen en mortel zijn onthecht voordat het proefstuk in de proefopstelling geplaatst is. Hierdoor is net als bij het loszittende spouwanker, de verplaatsing bij  $F_{t,max}$  groter. Ook “Gebrek 2” resulteert in hetzelfde uittrekgedrag als het ideale proefstuk, alleen met een lagere  $F_{t,max}$  en grotere verplaatsing bij  $F_{t,max}$ .

“Gebrek 3”: Mortel en steen zijn onthecht tijdens het beproeven

Tijdens de proef zijn de mortel en steen onthecht, dit kan op twee momenten tijdens de proef optreden:

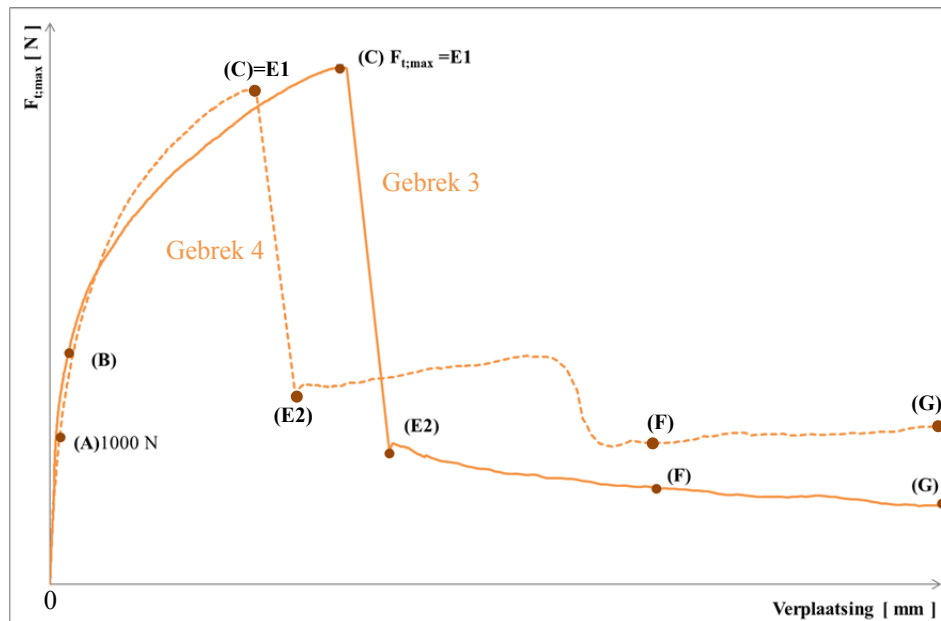
1. Allereerst bezwijkt de verbinding tussen spouwanker-mortel en door de spanningen die in de mortel aanwezig zijn, veroorzaakt door de golven van het spouwanker, onthechten de mortel en steen. In Grafiek 8 (de stippellijn) is de terugval van de kracht te zien, punt E1-E2. Mortel en steen zijn dus onthecht nadat  $F_{t,max}$  bereikt is (oranje stippellijn in Grafiek 8).
2.  $F_{t,max}$  wordt bereikt doordat steen en mortel onthechten (Grafiek 9). De spanningen die op de mortel werken, veroorzaakt door de golven van het spouwanker, veroorzaken een  $F_h$  die te groot is om door te nemen, waardoor de mortel van de steen onthecht (Figuur 64). De grote van  $F_h$  kan berekend worden met formule 3.3.

$$F_h = A(F_v \cdot \mu + \tau_i) \tag{3.3}$$



Figuur 64: Het onthechten van de steen met de mortel, waarbij  $F_h$  te groot is om door de mortel te worden opgenomen, steen en mortel onthechten. Links; De krachtswerking op het proefstuk. De zwarte lijnen geven de onthechte vlakken weer. Rechts: Een proefstuk waarbij “Gebrek 3” is opgetreden.

Het uittrekgedrag van het spouwanker is in het begintraject tot  $F_{t,max}$  gelijk aan het uittrekgedrag van het ideale proefstuk. Het proefstuk bereikt  $F_{t,max}$  doordat onthechting van de steen met de mortel optreedt, wat een directe terugval van de kracht veroorzaakt in de kracht-verplaatsingsgrafiek (doorgetrokken oranje lijn in *Grafiek 9*). Uit *Grafiek 9* volgt dat een ander bezwijkgedrag geconstateerd is, waarbij de verbinding mortel-steen bezwijkt.



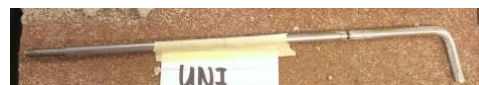
*Grafiek 9*: Het uittrekgedrag van een spouwanker waarbij “Gebrek 3” of “Gebrek 4” geconstateerd is. Doorgetrokken lijn: Uittrekgedrag van een proefstuk met “Gebrek 3”  
Stippellijn: Uittrekgedrag van een proefstuk met “Gebrek 4”

#### “Gebrek 4”: Spouwanker is vervormd tijdens het beproeven

Als de verbinding tussen het spouwanker met de mortel optimaal is en de spanningen die op het spouwanker werken groter zijn dan de spanningen van het spouwanker op de mortel, kan het spouwanker vervormen. Doordat de mortel stijver reageert dan het spouwanker, vervormt het spouwanker (oftewel, het spouwanker is aan het vloeien). In het uittrekgedrag is het vervormen van het spouwanker terug te zien (de restcapaciteit punt G is hoger), zoals volgt uit de stippellijn in *Grafiek 9*.  $F_{t,max}$  wordt bereikt door onthechting tussen steen en mortel, een terugval in de kracht is het gevolg. Daarna neemt de kracht weer lichtelijk toe, waarbij het spouwanker vervormt. Het spouwanker heeft daarna nog één terugval in de kracht, wat komt door het doorbreken van het spouwanker door de mortel. Uiteindelijk resulteert “Gebrek 4” in een hoger gelegen punt G.



*Figuur 65*: Vervormt spouwanker na uittrekken



*Figuur 66*: Niet vervormt spouwanker na uittrekken

#### “Gebrek 5”: Stenen breken tijdens het beproeven

“Gebrek 5” kan als bovengrens van de uittrekkraft gezien worden, omdat de stenen breken (de maximale opneembare kracht van het materiaal is bereikt). In *Figuur 67* zijn de werkende krachten op het proefstuk gegeven. Om de  $F_{t,max}$  te bepalen kunnen de volgende berekeningen gemaakt worden:

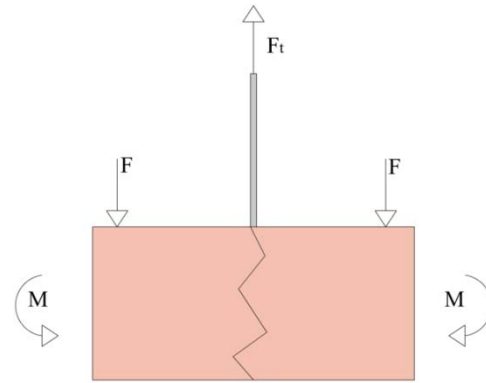
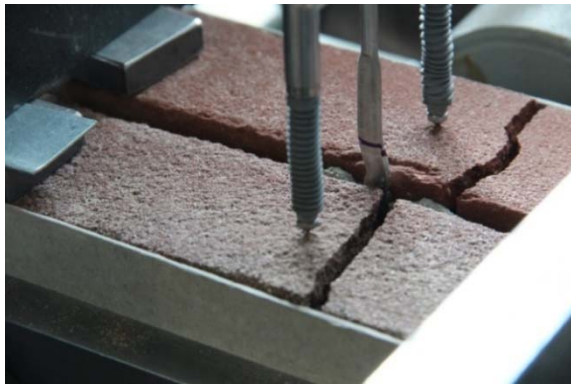
$$w = 1/192 \cdot \frac{F_t \cdot l^3}{EI} \quad (3.4)$$

$$M = 1/8 \cdot F_t \cdot l \quad (3.5)$$

$$F = 1/2 F_t \quad (3.6)$$

Het uittrekgedrag van het spouwanker is gelijk aan “Gebrek 3”, alleen wordt  $F_{t,max}$  nu bereikt door het breken van de stenen (zie *Grafiek 9*).





Figuur 67: Het breken van de stenen door het overschrijven van de breuksterkte van de bakstenen.

Links: De foto van de gebroken stenen waarbij  $F_{t,max}$  bereikt is.

Rechts: Mechanicaschema met de werkende krachten op het proefstuk bij uittrekken van het spouwanker uit de voeg.

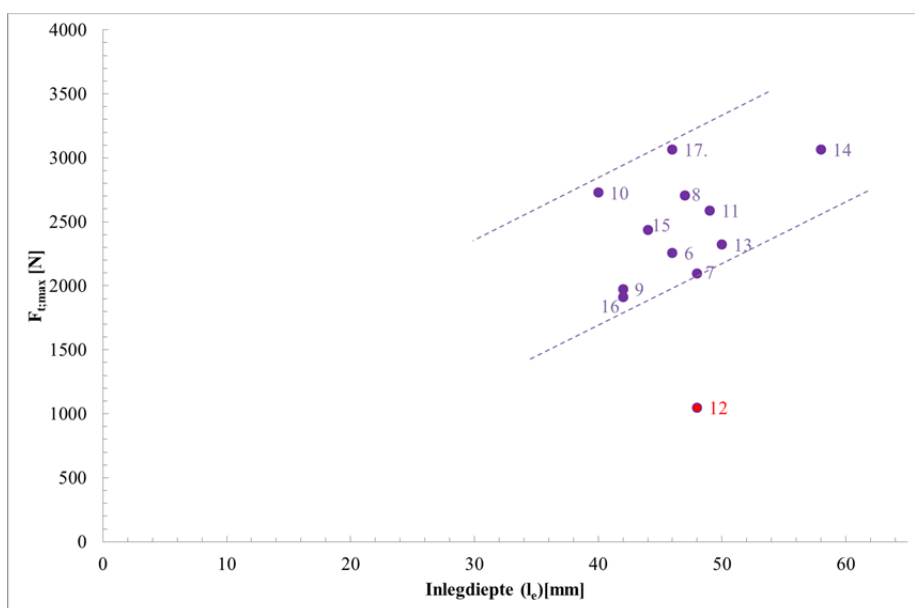
De proefstukken waarbij één van deze vijf gebreken geconstateerd zijn, vallen in een van de groepen zoals gegeven in *Diagram 3*. Per type spouwanker is een verdeling en analyse hiervan gemaakt, verwerkt in bijlage 12. De resultaten van de proefstukken met “Gebrek 3, 4 of 5” worden samen met het ideale proefstuk geanalyseerd en weergegeven in één grafiek, omdat de begincondities aan elkaar gelijk zijn en er een relatie in uittrekgedrag is. In de volgende paragraaf worden alleen de resultaten van de UNI275 spouwankers gemetseld in M5-mortel besproken, de overige resultaten zijn terug te vinden in de bijlages 11, 12 en 13. In de laatste sub-paragraaf worden relaties gelegd tussen de resultaten van de proeven van alle typen spouwankers in de verschillende mortelkwaliteiten.

### 3.2.2 Resultaten trekproef

#### 3.2.2.1 Algemene analyse UNI275 spouwanker

Naast de verdeling van de proefstukken in groepen met geconstateerde gebreken hebben ook andere factoren invloed op het uittrekgedrag van het spouwanker zoals de inlegdiepte en de verplaatsing van het spouwanker ten opzichte van de steen. Als voorbeeld zijn de effecten van de UNI275 spouwankers gemetseld in M5-mortel uitgewerkt in *Grafiek 10* en *Grafiek 11*, waarbij de inlegdiepte en verplaatsingen van het spouwanker worden geanalyseerd. De uitwerkingen voor de andere typen spouwankers zijn hieraan gelijk en weergegeven in bijlage 11.

Allereerst wordt de invloed van de inlegdiepte op  $F_{t,max}$  geanalyseerd. De inlegdiepte van de spouwankers is vastgesteld op 40 mm (minimum eis NEN-EN845). Tijdens het metselen zijn afwijkingen geconstateerd die van invloed kunnen zijn op het uittrekgedrag. In *Grafiek 10* is de inlegdiepte uitgezet tegen  $F_{t,max}$  voor de UNI275 spouwankers gemetseld in M5-mortel. Uit deze grafiek kan geconcludeerd worden dat een grotere inlegdiepte resulteert in een hogere  $F_{t,max}$ , wat tevens geldt voor alle rechte spouwankers (zie bijlage 11).

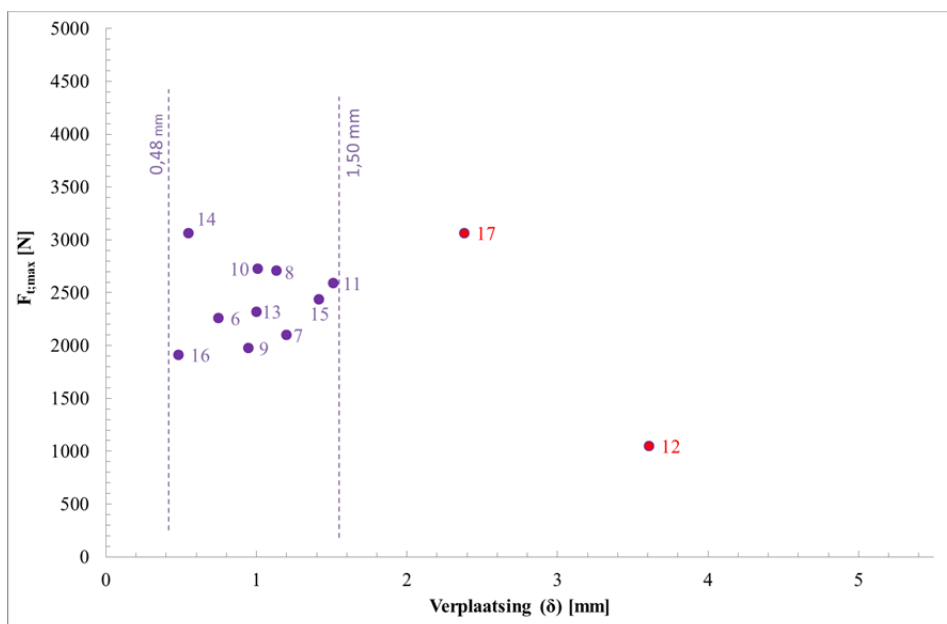


Grafiek 10:  $F_{t,max}$ -Inlegdiepte grafiek voor UNI275 spouwankers gemetseld in M5-mortel. De grafiek geeft de inlegdiepte ten opzichte van  $F_{t,max}$  weer, waaruit blijkt dat de inlegdiepte een positieve werking heeft op  $F_{t,max}$  deze neemt namelijk toe.

Ten tweede is de verplaatsing van het spouwanker uitgezet tegen de  $F_{t,max}$  in *Grafiek 11*. Bij  $F_{t,max}$  hebben negen van de elf spouwankers een verplaatsing tussen de 0,48 mm en 1,5 mm. De diversiteit van de verplaatsing van de spouwankers, is nadelig voor de constructie. Doordat spouwankers allemaal een andere verplaatsing hebben bij  $F_{t,max}$ , worden de krachten op het buitenblad ongelijk verdeeld over de spouwankers. De invloed hiervan is afhankelijk van de interactie tussen de spouwankers in een groot geveleppervlak en wordt in dit afstudeeronderzoek niet verder geanalyseerd.

De spouwankers 12 en 17 wijken af van de groep die een verplaatsing tussen 0,48 en 1,50 mm hebben bij  $F_{t,max}$ . Als deze spouwankers in de gevel gemetseld zouden zijn, zouden spouwankers 12 en 17 minder kracht opnemen, door de grotere verplaatsing bij  $F_{t,max}$  dan de overige negen spouwankers. Daarnaast hebben spouwankers 12 en 17 een ander uittrekgedrag, zoals blijkt uit de hierop volgende analyse. Spouwanker 17 heeft een inlegdiepte van 46 mm, gelijk aan de gemiddelde inlegdiepte en  $F_{t,max}$  is boven gemiddeld (2350 N). Uit optische analyse kan geen conclusie worden getrokken over de oorzaak van de grote verplaatsing. Spouwanker 12 heeft een inlegdiepte van 48 mm en een lage  $F_{t,max}$  ten opzichte van het gemiddelde van 2350 N (*Grafiek 10*). De reden voor het afwijkende gedrag van het spouwanker is onbekend. In *Figuur 68* is geen verschil in het uitgetrokken spouwanker, mortel en proefstuk te zien. Omdat spouwanker 12 niet in de populatie thuis hoort, zoals aangetoond is in *Grafiek 10* en *Grafiek 11*, is het spouwanker niet meegenomen in de hierna volgende analyse.

De resultaten van de andere typen spouwankers zijn aan bovenstaande analyse gelijk, behalve de B300 spouwankers gemetseld in M5-mortel. In de kracht-verplaatsingsgrafiek zijn twee groepen geconstateerd, die in hoofdstuk 4 nader toegelicht worden.



*Grafiek 11: Kracht-verplaatsingsgrafiek voor UNI275 spouwankers in M5-mortel. De verplaatsing van het spouwanker bij  $F_{t,max}$  ligt bij tien van de twaalf spouwankers binnen een range van 0,48 mm en 1,50 mm.*



Bezweken mortel bij UNI 8 spouwanker



Bezweken mortel bij UNI 12 spouwanker

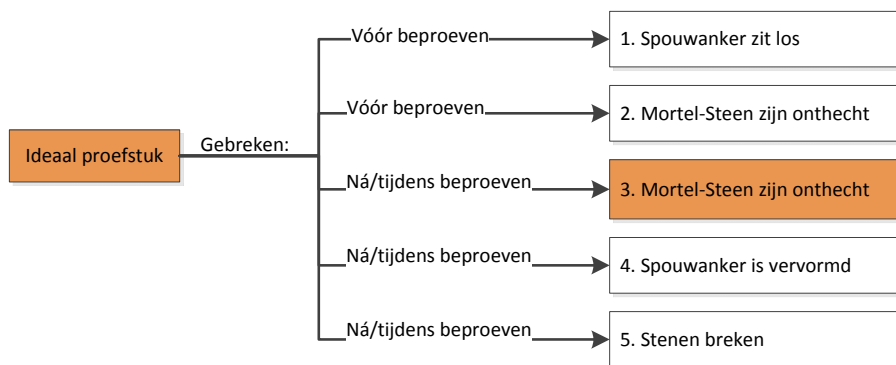
*Figuur 68: Bezweken mortel bij het uittrekken van twee UNI275 spouwankers in M5-mortel. Nr. 12 hoort niet in de populatie uit.*



### 3.2.2.2 Resultaat UNI275 spouwanker

De rechte spouwankers die in dit afstudeeronderzoek gebruikt zijn, zijn het UNI275 en B300 spouwankers. In deze paragraaf wordt het UNI275 spouwanker in M5-mortel toegelicht, de resultaten van de overige spouwankers in de verschillende mortelkwaliteiten (zoals UNI275 in M10-mortel en UNI-L spouwanker in M5-mortel) worden toegelicht in bijlage 12 (belangrijkste constatering) en 13 (alle gebreken in individuele grafieken).

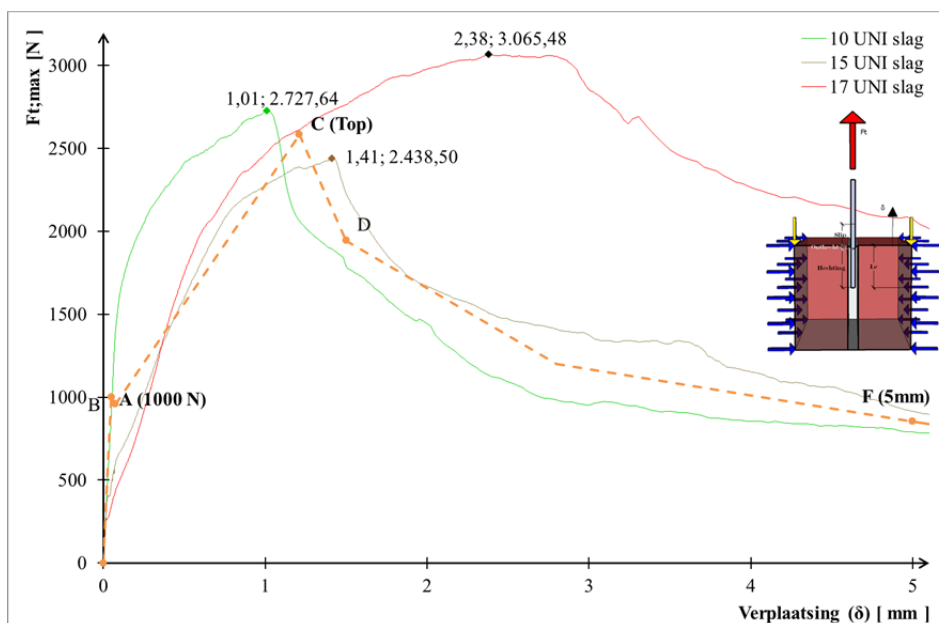
Bij de proefstukken met het UNI275 spouwanker gemetseld in M5-mortel, is naast het ideale proefstuk slechts één gebrek geconstateerd, gemarkeerd in *Diagram 4*. Zowel het ideale proefstuk als de proefstukken met een gebrek worden hieronder toegelicht.



*Diagram 4: Geconstateerde gebreken (oranje gearceerd) van proefstukken met UNI275 spouwanker gemetseld in M5-mortel.*

#### Ideaal Proefstuk

Bij het UNI275 spouwanker gemetseld in M5-mortel zijn bij drie van de elf proefstukken geen gebreken geconstateerd (zie *Grafiek 12*). Met de kracht-verplaatsingsgrafiek van twee van de drie spouwankers (spouwanker 17 niet, vanwege ander uittrekgedrag) zijn vijf punten vastgelegd die het verloop van dit type proefstuk aanduiden (oranje lijn in *Grafiek 12*). Hierbij moet vermeld worden dat de oranje stippellijn in *Grafiek 12* slechts een indicatie is van het uittrekgedrag omdat het slechts gebaseerd is op resultaten van twee proefstukken.



*Grafiek 12:  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek van het ideaal proefstuk met UNI275 spouwankers gemetseld in M5-mortel. De oranje stippellijn geeft de gemiddelde  $F_{t,max}$ -verplaatsingsgrafiek (uittrekgedrag) weer van dit type proefstuk.*

In *Grafiek 12* is een verschil te zien tussen de kracht-verplaatsingsgrafieken van spouwanker 10, 15 en 17. Tot een trekkracht van 350 N of een verplaatsing 0,2 mm is de stijfheid van de spouwankers nagenoeg gelijk: 14000 N/mm, (zie *Grafiek 12*). Door het positioneren van het proefstuk in de proefopstelling neemt de stijfheid van spouwankers 15 en 17 af, naar 3000 N/mm, respectievelijk 2800 N/mm. Naast het verschil in stijfheid trekken de spouwankers 10 en 15 ook de voeg tussen de stenen weg (*Figuur 69*). Hieruit kan geconstateerd worden dat de

verbinding tussen spouwanker en mortel belangrijk is. Maar een grotere stijfheid leidt niet altijd tot een grotere  $F_{t,max}$ . Dit is mede afhankelijk van de inlegdiepte van het spouwanker en hechting tussen steen en mortel. Hoe groter de inlegdiepte is, hoe hoger  $F_{t,max}$  wordt. Daarnaast zijn de randcondities ook belangrijk, zoals blijkt uit de gemiddelde  $F_{t,max}$  per gebrek (§3.2.2.3).

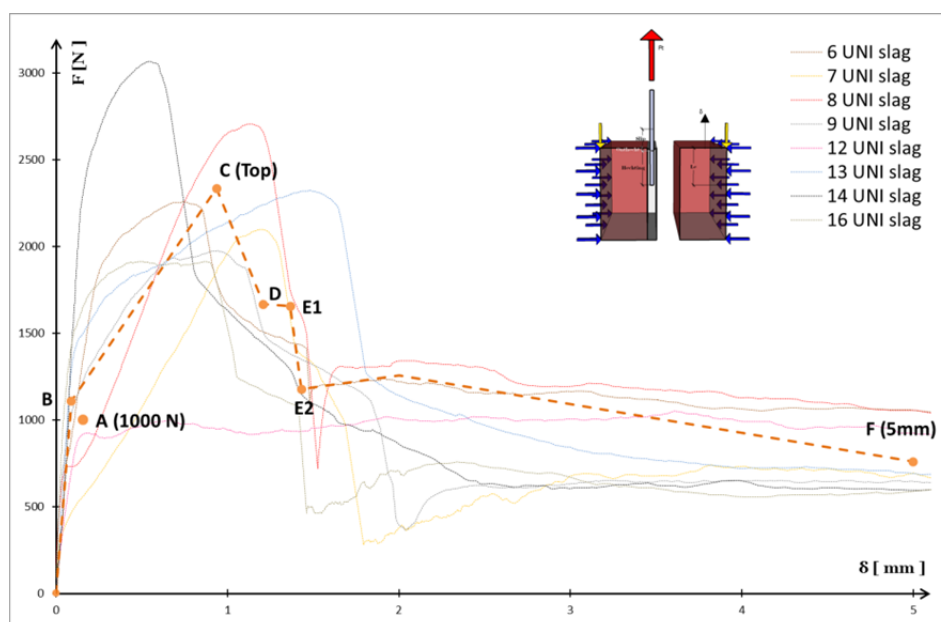
De verplaatsing bij  $F_{t,1000N}$  van de drie proefstukken heeft een spreiding van 0,24 mm. De bepaling van de gemiddelde lijn, is ter indicatie in *Grafiek 12* uitgezet. Hierin is de spreiding van de grafiek duidelijk te zien. De gemiddelde  $F_{t,max}$  is 2744 N met een gemiddelde verplaatsing van 1,6 mm.



Figuur 69: Bezwijken van de voegen en het uittrekken van de UNI275 spouwankers gemetseld in M5-mortel nr. 10, 15 en 17.

### “Gebrek 3” (steen-mortel verbinding onthecht)

Bij proefstuk met het UNI275 spouwanker gemetseld in M5-mortel zijn bij acht van de elf proefstukken “Gebrek 3” geconstateerd (zie *Grafiek 13*). Aan de hand van de kracht-verplaatsingsgrafiek van zeven van de acht spouwankers zijn zeven punten gebruikt om het verloop van dit type proefstuk aan te geven (oranje lijn in *Grafiek 13*).



Grafiek 13:  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek van proefstuk met “Gebrek 3” waarin het UNI275 spouwanker gemetseld is in M5-mortel. De oranje stippellijn geeft de gemiddelde  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek (uittrekgedrag) weer van dit type proefstuk.

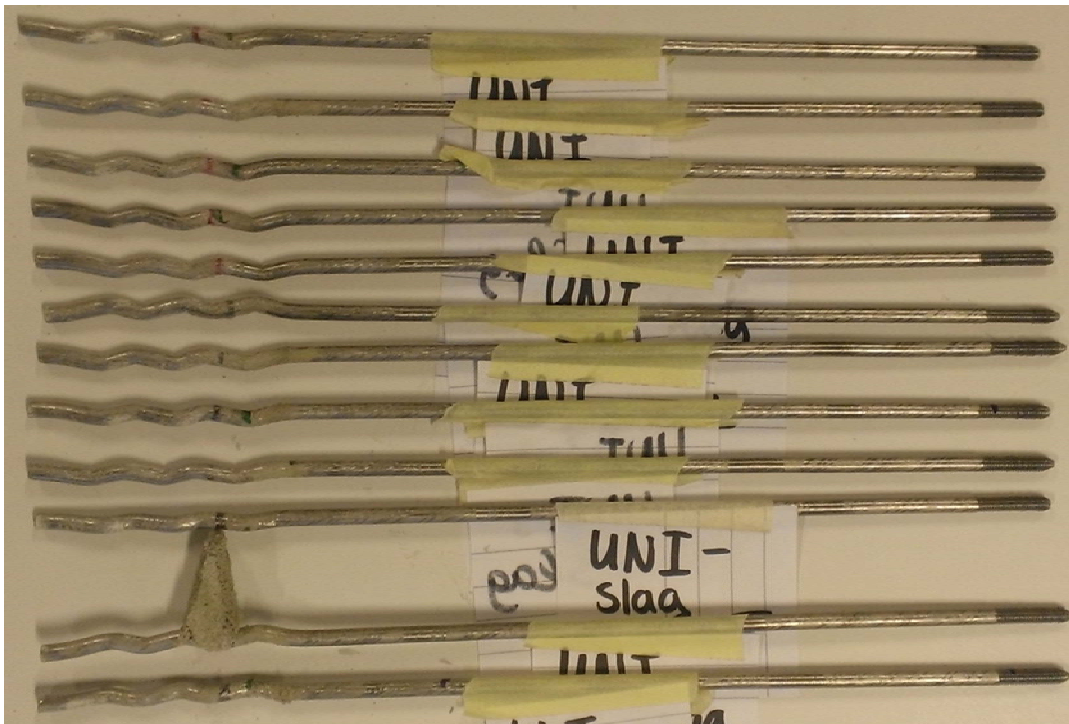
Omdat “Gebrek 3” dezelfde begincondities heeft als het ideale proefstuk, zijn relaties te vinden tussen het uittrekgedrag van de spouwankers. In bijlage 12 zijn de twee groepen in één grafiek weergegeven. De punten A (1000N) en B zijn gelijk aan elkaar en de verbinding met punt C heeft dezelfde hellingshoek. Enkel de gemiddelde  $F_{t,max}$  is lager bij “Gebrek 3”. Hierbij moet vermeld worden dat de gemiddelde  $F_{t,max}$  van het ideale proefstuk gebaseerd is op twee proefstukken. Na punt C wijken de grafieken van elkaar af. Bij “Gebrek 3” vindt een directe daling in de kracht plaats door onthechting tussen steen en de mortel (punt E1 en E2 in *Grafiek 13*). Bij het ideale proefstuk vindt deze directe terugval niet plaats.

Zoals uitgewerkt in *Grafiek 8* bevindt  $F_{t,max}$  zich nog tussen de elastische grenswaarden tot punt B. Vanaf punt B begint de onthechting van het spouwanker met de mortel totdat de verbinding bezwijkt. Het spouwanker zal zich

verder onthechten totdat deze alleen nog kracht kan opnemen door wrijving (punt C-D in *Grafiek 8*). Deze constatering is terug te zien in *Grafiek 13*. Tot punt B zijn de stijfheden van de spouwankers gelijk (tussen de 15000-16000 N/mm), daarna beginnen de stijfheden van de spouwankers te veranderen. De stijfheid van de verbinding tussen mortel en spouwanker bepaalt  $F_{t,max}$ , maar bij toename van de stijfheid is toename van  $F_{t,max}$  niet vanzelfsprekend. Dit is mede afhankelijk van de inlegdiepte van het spouwanker in de mortel (*Grafiek 10*).

De onthechting tussen steen en mortel vindt na de  $F_{t,max}$  plaats, maar is per spouwanker verschillend (zie bijlage 12). In vier van de zeven proefstukken met “Gebrek 3” onthecht de steen direct na bereiken van  $F_{t,max}$ , terwijl bij drie van de zeven proefstukken  $F_{t,max}$  af- en de verplaatsing toeneemt, totdat de steen en mortel onthechten (*Grafiek 13*, punt E2-F).

De gemiddelde  $F_{t,max}$  voor proefstukken met “Gebrek 3” is 2334 N bij een gemiddelde verplaatsing van 0,94 mm. Deze gemiddelde  $F_{t,max}$  is lager dan bij het ideale proefstuk (2744 N), net als de restcapaciteit (punt F) die het spouwanker heeft na bezwijken. Dit komt doordat het proefstuk geen wrijving meer kan opbouwen uit de voordruk door onthechting van steen en mortel. De beproefde spouwankers zijn in *Figuur 70* weergegeven, waarin geen verschil kan worden gevonden tussen de gebreken die zijn opgetreden.



*Figuur 70: De beproefde UNI275 spouwankers in M5-mortel. Van boven naar beneden genummerd van 7 t/m 17. Geen gebreken aan de proefstukken kunnen worden afgeleid van de spouwankers.*

### 3.2.2.3 Discussie proefresultaten

Deze paragraaf beschrijft alle gevonden resultaten van de typen spouwankers in *Tabel 4* en trekt conclusies over de gevonden proefresultaten beschreven onder *Tabel 4*.

In *Tabel 4* worden de gemiddelde  $F_{t,max}$  en verplaatsingen van de typen spouwankers in M5-, M10- en M15-mortel, alsmede dezelfde gemiddelde waarden van de geconstateerde gebreken gegeven. Tussen de resultaten van de typen spouwankers en mortelkwaliteiten zijn relaties te leggen; deze worden na *Tabel 4* toegelicht. De arcering in de tabel geeft de gemiddelde waarde van het type spouwanker weer, zonder onderscheid te maken tussen geconstateerde gebreken. Onder de gearceerde regel worden de gemiddelde waarden van de geconstateerde gebreken vermeld. Een overzicht van het aantal geconstateerde gebreken per spouwanker type, mortelkwaliteit en type proef is uitgewerkt in bijlage 14. Belangrijk is dat de volgorde van de uitgevoerde proeven geen invloed uitoefent op het resultaat. Uit de analyse in bijlage 15 blijkt dat dit bij deze proevenserie niet het geval is geweest.

Tabel 4: Gemiddelde waarden verdeeld per groep van de beproefde spouwankers.

| Spouwanker   | Mortelkwaliteit | Aantal proefstukken (stuks) | Groep              | Gemiddelde $F_{t,max}$ (N) | Gemiddelde verplaatsing (mm) |
|--|-----------------|-----------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------------|
| UNI275   | M5              | 11                          | Alle proefstukken  | 2457                       | 1,13                         |
|  |                 | 3                           | Ideaal proefstuk   | 2744                       | 1,60                         |
|  |                 | 8                           | Gebrek 3           | 2334                       | 0,94                         |
|  | M10             | 12                          | Alle proefstukken  | 2174                       | 0,78                         |
|  |                 | 7                           | Ideaal en gebrek 3 | 2697                       | 0,55                         |
|  |                 | 2                           | Ideaal proefstuk   | 2377                       | 0,48                         |
|  |                 | 5                           | Gebrek 2           | 1443                       | 1,09                         |
|  |                 | 5                           | Gebrek 3           | 2824                       | 0,58                         |
| B300*<br>3/12<br>proefstukken<br>voldoet niet<br>aan de eis<br>gesteld in EC 6 | M5              | 11                          | Alle proefstukken  | 1921                       | 1,59                         |
|  |                 | 1                           | Ideaal proefstuk   | -                          | -                            |
|  |                 | 2                           | Gebrek 1           | 1955                       | 1,64                         |
|  |                 | 2                           |                    | 1427                       | 3,09                         |
|  |                 | 2                           | Gebrek 2           | 1860                       | 1,22                         |
|  | M10             | 11                          | Alle proefstukken  | 1875                       | 1,12                         |
|  |                 | 10                          | Ideaal en gebrek 3 | 2055                       | 0,89                         |
|  |                 | 1                           | Ideaal proefstuk   | 1654                       | 1,20                         |
|  |                 | 1                           | Gebrek 2           | 1873                       | 1,29                         |
|  |                 | 9                           | Gebrek 3           | 2099                       | 0,80                         |
|  |                 |                             |                    |                            |                              |
| UNI-L  | M5              | 12                          | Alle proefstukken  | 3216                       | 1,26                         |
|  |                 | 1                           | Ideaal proefstuk   | 3524                       | 1,22                         |
|  |                 | 11                          | Gebrek 3 en/of 4   | 3188                       | 1,27                         |
|  | M10             | 12                          | Alle proefstukken  | 2439                       | 1,21                         |
|  |                 | 6                           | Ideaal en gebrek 3 | 2378                       | 1,02                         |
|  |                 | 1                           | Ideaal proefstuk   | 2603                       | 0,43                         |
|  |                 | 2                           | Gebrek 1           | 2541                       | 1,22                         |
|  |                 | 4                           | Gebrek 2           | 2461                       | 1,57                         |
| 5  | Gebrek 3        | 2152                        | 1,60               |                            |                              |
| UNI-Lijm   | M15             | 12                          | Alle proefstukken  | 4035                       | 1,73                         |
|  |                 | 4                           | Ideaal proefstuk   | 3755                       | 0,09                         |
|  |                 | 6                           | Gebrek 3           | 3893                       | 1,42                         |
|  |                 | 2                           | Gebrek 5           | 4438                       | 1,41                         |

### Mortelkwaliteit

Binnen de proeven van de typen spouwankers is onderscheid gemaakt in mortelkwaliteit. De hechting tussen de M10-mortel en steen was slecht. Veel proefstukken zijn voor het beproeven al onthecht, waardoor  $F_{t,max}$  lager ligt dan proefstukken met M5-mortel. De hechting van steen en mortel wordt in §3.2.5 verder onderzocht. Algemeen kan worden gesteld dat wanneer de stenen voor het beproeven onthecht zijn van de mortel,  $F_{t,max}$  lager is dan bij een proefstuk die voor het beproeven geen gebreken kent (het ideale proefstuk).

De UNI275 spouwankers gemetseld in M5-mortel hebben een hogere gemiddelde  $F_{t,max}$  en het aantal geconstateerde gebreken is minder dan bij M10-mortel. De verschillen zijn echter gering en worden veroorzaakt door de verschillen in het ideale proefstuk en proefstukken met "Gebrek 3" (zie Tabel 4). Gesteld kan worden dat zowel M5 als M10-mortel dezelfde gemiddelde  $F_{t,max}$  hebben.

Ook bij B300 spouwankers is de gemiddelde  $F_{t,max}$  bij proefstukken met M5-mortel hoger dan bij proefstukken met M10-mortel. Het aantal geconstateerde gebreken is gelijk en ook hier zijn de verschillen in  $F_{t,max}$  per groep gering. De verplaatsing die het spouwanker ondergaat bij  $F_{t,max}$  is bij proefstukken met M10-mortel lager dan bij proefstukken met M5-mortel.

De proefstukken met het UNI-L spouwanker kent twee vormen van bezwijken afhankelijk van het morteltype. Bij UNI-L spouwankers in M5-mortel wordt  $F_{t,max}$  bereikt door de onthechting tussen steen en mortel. Bij M10-mortel vinden twee pieken in de kracht-verplaatsingsgrafieken plaats, waarbij de eerste piek het bezwijken van de mortel met steen is (zie bijlage 19). Onthechting van de mortel met het spouwanker vindt bij de tweede piek plaats. Het UNI-L spouwanker kent de grootste gemiddelde  $F_{t,max}$  van de gemetselde proefstukken, zowel in M5- als M10-mortel.

Het UNI-Lijm spouwanker kent de grootste gemiddelde  $F_{t,max}$  van de partij proefstukken en zijn bijna allemaal op hechting tussen steen en mortel bezweken. Uit de analyse blijkt dat de hechting tussen steen en lijm-mortel



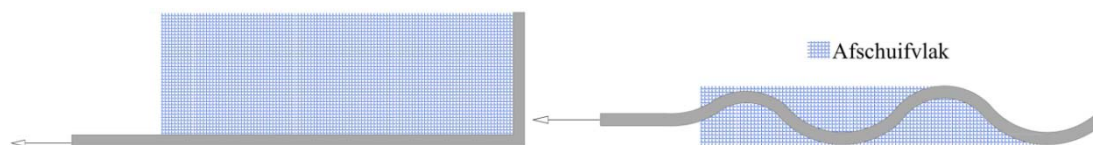
beter en sterker is geweest dan die tussen steen en metselmortel. Daarnaast is lijm mortel van een andere samenstelling dan metselmortel. Het vergelijken van deze twee typen mortels is daarom niet mogelijk en er kan alleen gezegd worden dat lijm mortel hogere uittrekwaarden kent dan metselmortel.

### Staalkwaliteit

De UNI275 spouwankers met  $\sigma_s = 387N/mm^2$  gemetseld in zowel M5- als M10-mortel hebben een hogere  $F_{t,max}$  dan B300 spouwankers met  $\sigma_s = 600N/mm^2$ . Hieruit kan geconcludeerd worden dat spouwankers met een hogere vloeigrens een lager  $F_{t,max}$  hebben. Dit is in strijd met wat Madsø [MAD80] constateerde. Naast het verschil in staalkwaliteit hebben de B300 spouwankers een grotere diameter en voldeden drie B300 spouwankers niet aan de eis gesteld in EC6 wat betreft de verplaatsing die kleiner moet zijn dan  $1\text{ mm bij }1/3 \cdot F_{t,max}$ .

### Type spouwanker

De invloed van het type spouwanker kan bepaald worden door UNI275, B300 en UNI-L spouwankers te vergelijken. Het UNI-L spouwanker is het spouwanker met de hoogste  $F_{t,max}$  omdat het afschuifvlak van het spouwanker groter is. De UNI275 en B300 spouwankers hebben alleen het afschuifvlak ten breedte van de golven. De UNI-L spouwankers hebben een afschuifvlak ten breedte van de haak van 25 mm (Figuur 71). Doordat de UNI-L spouwankers een groter afschuifvlak hebben, bezwijkt het proefstuk op hechting tussen steen en mortel zoals ook volgt uit Tabel 4. Tevens beschreven aan het begin van deze paragraaf (vanwege spanningen).



Figuur 71: Afschuifvlak van het spouwanker in de mortel voor UNI-L, UNI275 en B300 spouwankers

### Uittrekgedrag

Zoals uit de analyse van de proefresultaten per spouwanker volgt dat het uittrekgedrag per type spouwanker verschillend is. In grote lijnen kan het volgende geconcludeerd worden:

Rechte spouwankers (B300 en UNI275): Rechte spouwankers onthechten bij de verbinding tussen spouwanker en mortel, waarna bij het bereiken van  $F_{t,max}$ , de steen en mortel kan onthechten, afhankelijk van de ontstane kracht in de mortel.

*Door adhesie treden spanningen op in het vlak tussen spouwanker en mortel. Als de afschuifspanningen in het vlak tussen het spouwanker en de mortel maximaal zijn, onthecht het spouwanker zich van de mortel. Bij verdere toename van de verplaatsing, onthecht het spouwanker zich geheel;  $F_{t,max}$  is bereikt. Tijdens de onthechting nemen de spanningen van het spouwanker met de mortel toe, vanwege wrijving. Het spouwanker wordt uit de voeg getrokken.*

Spouwankers met haak (UNI-L): Bezwijkt door de onthechting van steen- en mortel doordat het afschuifvlak een grotere sterkte heeft dan de verbinding steen-mortel. Als de verbinding steen-mortel sterk genoeg is, vervormt het spouwanker plastisch, waarna onthechting tussen steen en mortel plaatsvindt.

*Door adhesie treden spanningen op in het vlak tussen spouwanker en mortel. Als de afschuifspanningen in het vlak tussen het spouwanker en de mortel maximaal zijn, onthecht het spouwanker zich van de mortel. Doordat het spouwanker een haak heeft, lopen de spanningen tussen spouwanker en mortel verder op vanwege wrijving. Als de horizontale kracht te groot wordt (formule 3.6) onthecht de steen met de mortel en is  $F_{t,max}$  bereikt. Daarna wordt het spouwanker samen met de voeg eruit getrokken.*

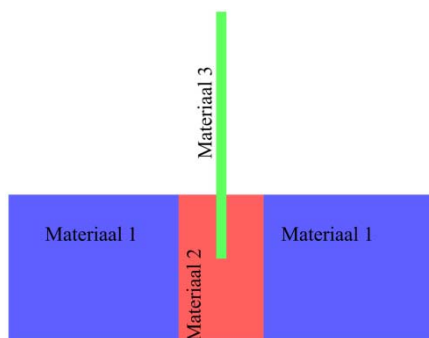
Lijmspouwankers (UNI-Lijm): De lijmspouwankers hebben een betere hechtsterkte tussen spouwanker-mortel en mortel-steen dan de andere twee typen spouwankers. Bij een hogere  $F_{d,max}$  dan de ander typen spouwankers bezwijkt de verbinding tussen spouwanker en steen als eerst.

*De lijmspouwankers kennen een betere hechtsterkte tussen spouwanker-mortel en spouwanker en steen. Desondanks bezwijkt het gedrag bij de verbinding tussen spouwanker en mortel, zoals beschreven bij spouwankers met haak.*

Algemeen: De spouwankers bezwijken op de hechting tussen steen-mortel of mortel-spouwanker.

Het gedrag dat geconstateerd is bij de proefstukken en de kracht-verplaatsingsgrafieken van de spouwankers komen overeen met de constatering uit het artikel van Lorenzo et al [LOR02]. Ook Lorenzo et al. constateerde dat twee maatgevende bezwijkmechanismen optreden:

1. Bezwijken van de verbinding tussen materiaal 1 en 2
  2. Bezwijken van de verbinding tussen materiaal 2 en 3
- Zie voor een samenvatting van het artikel van Lorenzo et al, bijlage 6.



*Figuur 72: Aanduiding van de materialen die met elkaar in verbinding staan tijdens de proef, afhankelijk van het artikel van Lorenzo et al [LOR02] of het afstudeeronderzoek.*

*Materiaal 1 kan beton of bakstenen; materiaal 2 kan epoxy of mortel; materiaal 3 wapeningsstaaf of spouwanker.*

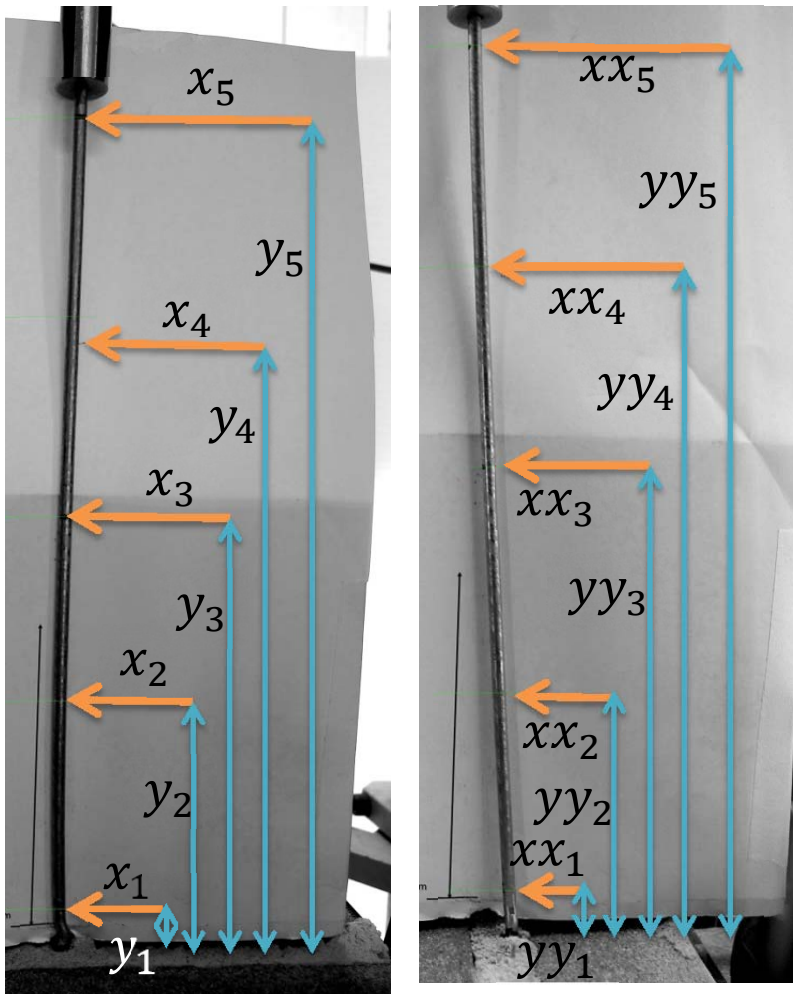
### 3.2.3 Algemene beschouwing drukcapaciteit spouwanker

De analyse van de drukcapaciteit van spouwankers bestaat uit een reeks van 72 proeven uitgevoerd op twee typen spouwankers, drie mortelkwaliteiten en vier spouwbreedtes (*Diagram 2* op pagina 51). Elke variant bestaat uit twaalf proefstukken, met hetzelfde type spouwanker, andere mortelkwaliteit en spouwbreedte, zoals weergegeven in *Diagram 2* op pagina 51. Bij de drukproeven uitgewerkt in *Diagram 2* zijn alleen de UNI275 spouwankers in M10-mortel beproefd, omdat tijdens de proeven geen verschillen in drukcapaciteit konden worden aangetoond tussen M5- en M10-mortel. Bij de drukproeven zijn twee typen spouwankers gebruikt:

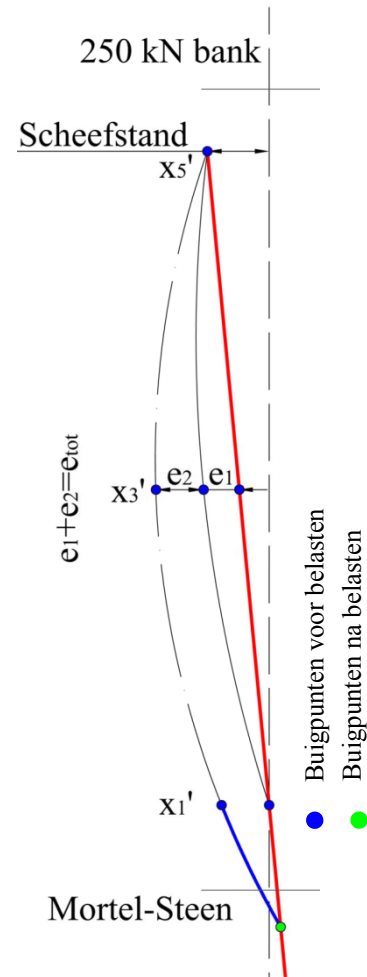
- **Rechte spouwankers:** UNI250 spouwankers  
UNI275 spouwankers  
UNI300 spouwankers  
UNI350 spouwankers
- **Platte spouwankers:** UNI-Lijm spouwankers

Uit de analyse van de drukproeven blijkt dat  $F_{d,max}$  van spouwankers UNI-Lijm en UNI300 een gering verschil vertonen, net als bij de UNI275 spouwankers gemetseld in M5- of M10-mortel. Op grond hiervan wordt gekozen om de spouwankers in dezelfde grafiek te bespreken.

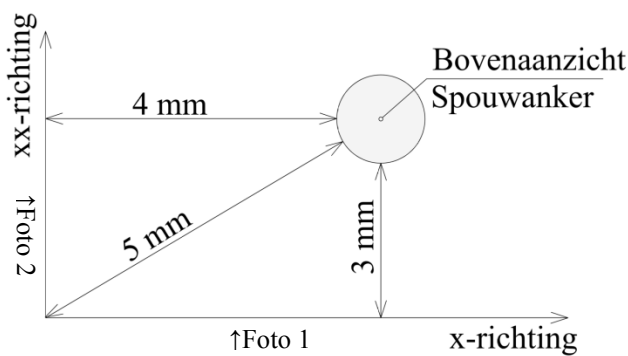
Na het plaatsen van het proefstuk in de proefopstelling zijn foto's van twee zijdes van het spouwanker gemaakt om de scheefstand en beginexcentriciteit van het spouwanker te bepalen, zoals toegelicht is in §3.1.4 (*Figuur 73*). Met vijf punten kan de vorm van het spouwanker worden vastgelegd in beide foto's. Daaruit volgen twee coördinaten, die de positie van het spouwanker aangeven zoals aangegeven in *Figuur 75*. De x-coördinaten van beide foto's liggen niet op dezelfde y-coördinaten. Door interpolatie van de y-coördinaten wordt de juiste  $x_n$  gevonden. Met Pythagoras kan dan de vorm van het spouwanker bepaald worden met coördinaat  $x_n'$ . De  $x_n'$  geeft de scheefstand in het 3D-vlak weer (rode lijnen in *Figuur 74*). Waarin n het nummer van het meetpunt aangeeft, uitgewerkt in *Figuur 73*.



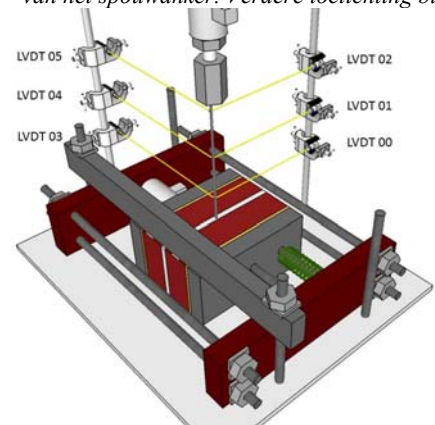
Figuur 73: Bepaling van de vorm van het spouwanker met behulp van twee foto's in twee richtingen die de 3D-coördinaten van de vorm moeten bepalen.



Figuur 74: Bepaling van de scheefstand,  $e_1$  en  $e_2$  van het spouwanker. Verdere toelichting blz 67.



Figuur 75: Bepaling van de vorm van het spouwanker met behulp van Pythagoras.



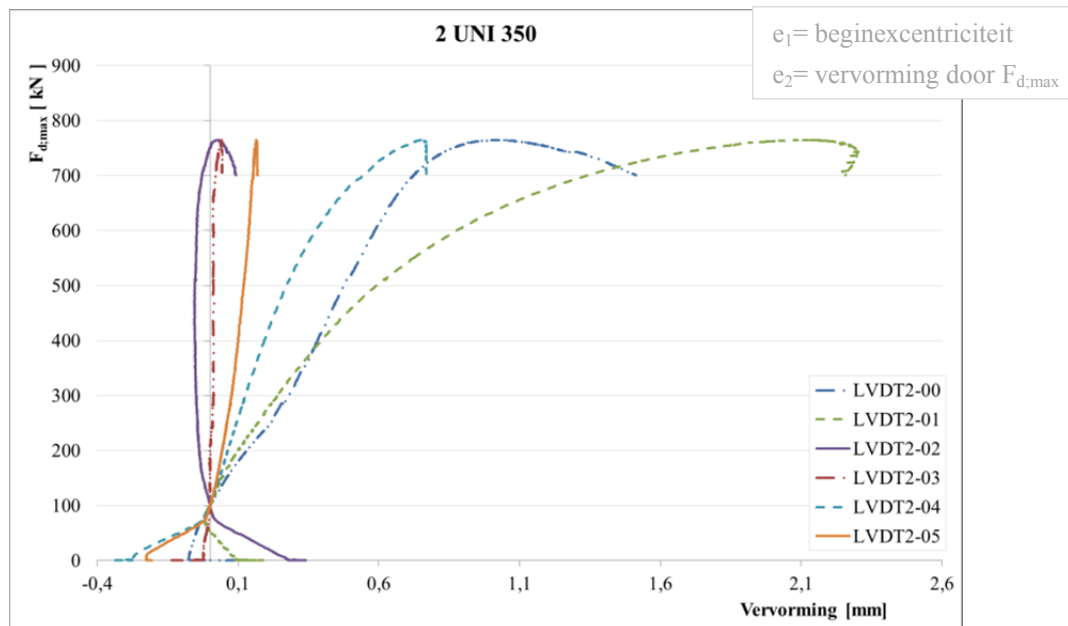
Figuur 76: Plaatsing van de zes LVDT's die de vervorming van het spouwanker tijdens de proef meten

De scheefstand van het spouwanker wordt bepaald door de punten  $x_1'$  en  $x_5'$  een lijn te trekken. De afstand van punt  $x_5'$  tot de rechte lijn, wordt de scheefstand van het spouwanker genoemd (Figuur 74). De scheefstand is de nulstand van het proefstuk voordat belast wordt.

Naast de scheefstand kan met de foto's ook de beginexcentriciteit bepaald worden. De vijf  $x_n'$ -coördinaten die uit de foto's bepaald zijn (zie Figuur 73), geven de afstand van dat punt ten opzicht van de scheefstand aan (Figuur 74). De beginexcentriciteit van het spouwanker is de afstand van de  $x_3'$ -coördinaat (midden van het spouwanker) tot de lijn van de scheefstand (rode lijn in Figuur 74) en wordt  $e_1$  genoemd.

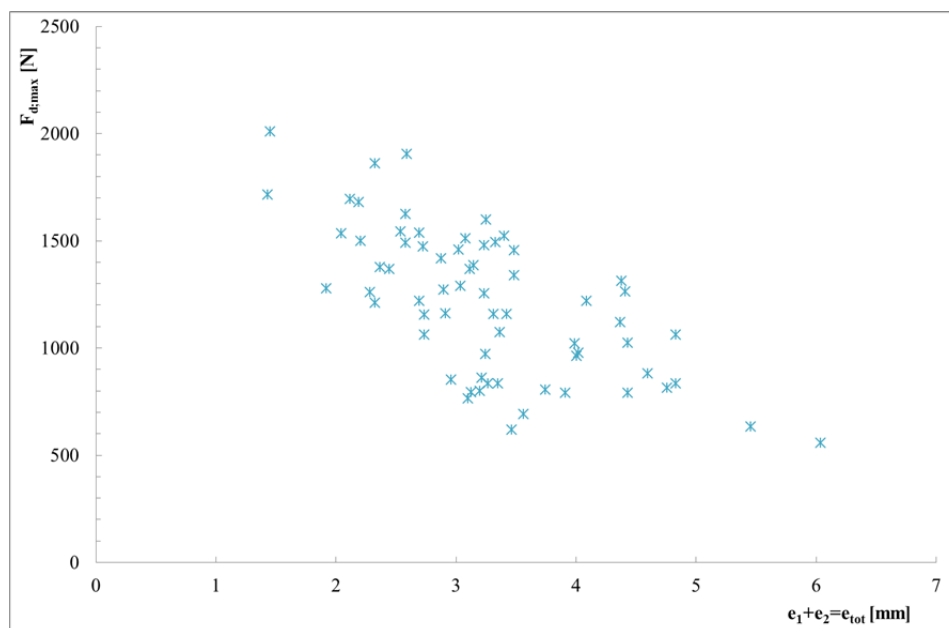


De vervorming van de spouwankers is tijdens de proeven gemeten door zes LVDT's die bevestigd zitten op het spouwanker (Figuur 76). Als voorbeeld is het resultaat van de meting van het UNI350 spouwanker nummer 2 in Grafiek 14 weergegeven. Uit Grafiek 14 volgt dat het spouwanker de richting van LVDT 00, 01 en 04 is uitgebogen. De vervorming die het spouwanker tot  $F_{d,max}$  ondergaat wordt  $e_2$  genoemd en is bepaald op coördinaat  $x_3'$  (Figuur 74). Voor alle spouwankers zijn grafieken met de zes LVDT's opgesteld en de vervormingen van het spouwanker vastgelegd.



Grafiek 14: Kracht-vervormingsgrafiek van het UNI350 spouwanker nummer 2, waarin alle metingen van de LVDT's weergegeven zijn. Voor de plaats van de LVDT's op het spouwanker (zie figuur 76).

Nu de berekening van  $e_1$  en  $e_2$  bekend zijn, kan de totale vervorming van het spouwanker bepaald worden door deze twee bij elkaar op te tellen. De totale vervorming ( $e_{tot}$ ) van het spouwanker is dus gelijk aan  $e_1$  plus  $e_2$ . In Grafiek 15 is de beginexcentriciteit ( $e_1$ ) plus de vervorming ( $e_2$ ) samen weergegeven ten opzichte van  $F_{d,max}$ . In de grafiek is de totale vervorming van elk spouwanker bij  $F_{d,max}$  weergegeven. Individuele grafieken van de parameters (vervorming en beginexcentriciteit) zijn gegeven in bijlage 16.



Grafiek 15: Kracht-Vervormingsgrafiek voor spouwankers belasting op druk. De grafiek geeft de vergelijking tussen de totale vervorming ( $e_{tot}$ =vervorming bij  $F_{t,max}$  + beginexcentriciteit) uitgezet tegen de  $F_{d,max}$ .

Uit *Grafiek 15* volgt dat de bundeling van proefresultaten een afname van  $F_{d,max}$  bij toename van  $e_{tot}$  heeft. Oftewel hoe meer het spouwanker vervormt, hoe sneller  $F_{d,max}$  bereikt wordt. De relatie tussen de vervorming en  $F_{d,max}$  kan ook gerelateerd worden aan de spouwbreedte, weergegeven in *Tabel 5*. De eerste kolom geeft de gemiddelde spouwbreedte per type spouwanker weer. De tweede kolom duidt het percentage aan van de vervorming ten opzichte van de spouwbreedte. Uit de tabel kan geconcludeerd worden dat het UNI-Lijm spouwanker ten opzichte van het UNI300 spouwanker meer vervormd bij  $F_{d,max}$ , ondanks dat ze dezelfde spouwbreedte hebben. Mogelijk ligt dit aan de mate van inklemming door de mortel.

Tabel 5: Gemiddelde percentage vervorming van het spouwanker ten opzichte van de spouwbreedte

| Type spouwanker | Spouwbreedte [mm] | Percentage vervorming ten opzichte van de spouwbreedte | Voorbeeld:<br>Spouwbreedte: 180 mm<br>$e_1 + e_0 = e_{tot} = 2,8$ mm        |
|-----------------|-------------------|--|---|
| UNI 250 M5      | 170               | 1,76 %   | Percentage vervorming ten opzichte van de spouwbreedte:<br>$2,8/180=1,56\%$ |
| UNI 275 M5      | 195               | 1,68 %   |   |
| UNI 275 M10     | 195               | 1,62 %   |   |
| UNI 300 M5      | 220               | 1,62%  |   |
| UNI 350 M5      | 270               | 1,50 %   |   |
| UNI Lijm M15    | 220               | 1,73 %   |   |

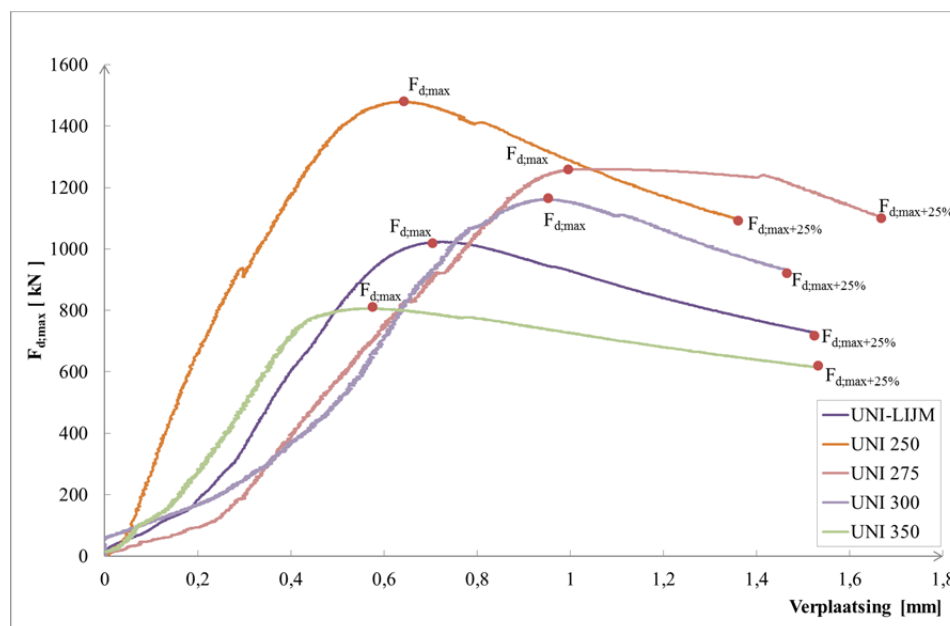
In *Grafiek 16* worden gemiddelde kracht-verplaatsingsgrafieken van de vijf typen spouwankers weergegeven. De weergegeven verplaatsing in de grafiek is de verplaatsing die het spouwanker evenwijdig aan het spouwanker maakt. De spouwankers hebben gemiddeld een verplaatsing bij  $F_{d,max}$  tussen de 0,6 en 1,0 mm. Uit *Grafiek 16* volgt ook dat de kracht na  $F_{d,max}$  afneemt bij toename van de verplaatsing, doordat het spouwanker de knikkraft overschrijdt. Na  $F_{d,max}$  is het spouwanker doorbelast totdat deze 25% onder  $F_{d,max}$  zit. Uit dit verloop van de grafieken is af te lezen dat de krachtsopname afneemt na  $F_{d,max}$ , net als bij het belasten van het spouwanker op trek, alleen nu minder snel. *Grafiek 16* laat alleen het gedrag van het spouwanker zien bij belasting op druk, verdere analyse met deze gegevens zijn niet uitgevoerd.

In de literatuur [EC6] in hoofdstuk 2 wordt de volgende eis gesteld aan de verplaatsing van het spouwanker:

*'het spouwanker mag maximaal 1 mm slippen bij 1/3 van de kracht'.*

Voor druk is deze eis moeilijk onder te brengen over welke slip van het spouwanker dit gaat. Twee constateringingen kunnen worden geformuleerd:

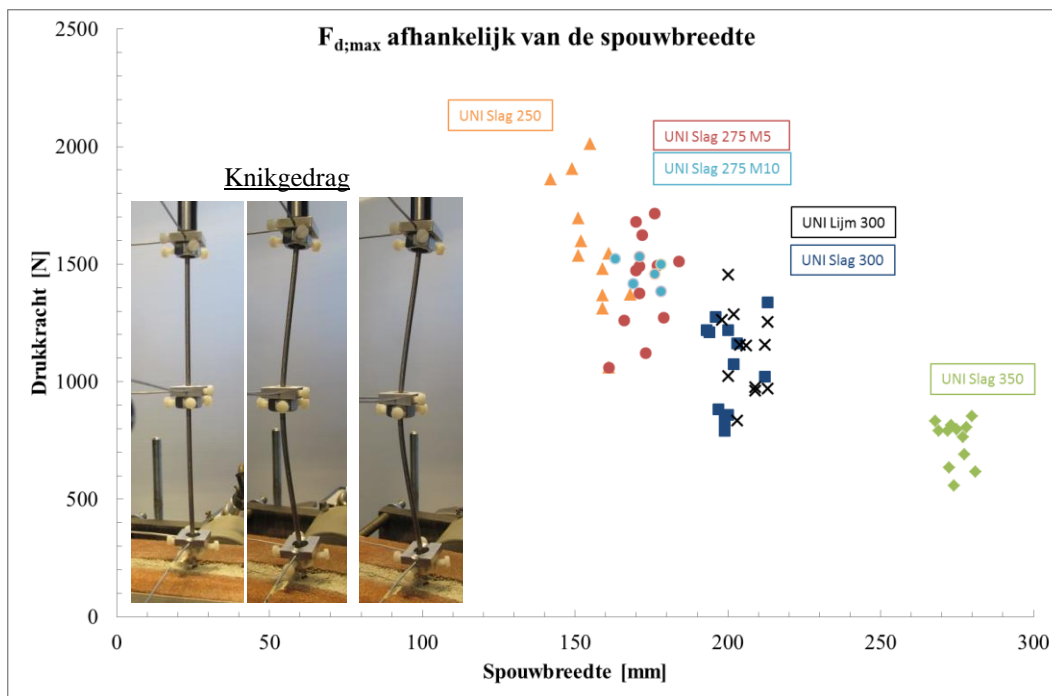
1. Uitgaande dat het gaat om de evenwijdige verplaatsing van het spouwanker aan de drukkracht. Dan voldoen drie UNI300 spouwankers (spouwanker 5, 7 en 9) niet aan deze eis.
2. Uitgaande dat het gaat om de loodrechte verplaatsing van het spouwanker aan de drukkracht. Dan voldoen alle spouwankers aan de eis, de spouwankers buigen namelijk bij  $1/3 * F_{d,max}$  met minder dan 1 mm uit.



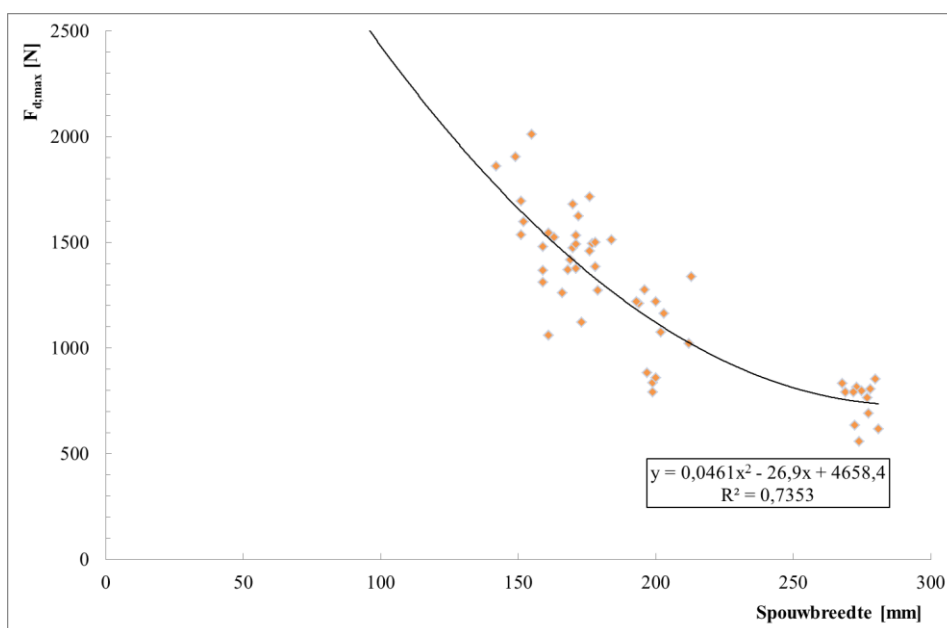
Grafiek 16: Gemiddelde  $F_{d,max}$ -verplaatsingsgrafiek voor 5 typen spouwankers die beproefd zijn onder drukbelasting. Zowel  $F_{d,max}$  als  $F_{d,max+25\%}$  is weergegeven om zo het traject na het bereiken van de knikkraft te volgen. De vervormingen nemen na  $F_{d,max}$  extra toe.

In *Grafiek 17* zijn de relaties te zien tussen de spouwbreedte en  $F_{d,max}$ . Alle beproefde spouwankers zijn in de grafiek weergegeven, zowel spouwankers gemetseld in M5- als M10-mortel en de beproefde UNI-Lijm spouwankers. Bij de 72 uitgevoerde proeven zijn alle spouwankers bezweken op knik (zie figuren in *Grafiek 17*). Op het punt van  $F_{d,max}$  is de knik in het spouwankers nauwelijks te zien, pas bij het doorbelasten na  $F_{d,max}$  van  $25\% \cdot F_{d,max}$  is de knik in het spouwanker zichtbaar (figuren in *Grafiek 17* en de verplaatsing bij  $F_{d,max;25\%}$  in *Grafiek 16*). Als daarna ontlast wordt, veert het spouwanker niet geheel terug naar de oorspronkelijke toestand. Dit komt doordat het spouwanker tot de 0,2% rekgrens belast is. Het spouwanker is plastische vervormd.

Door de proefresultaten van *Grafiek 17* is een trendlijn te trekken, wat resulteert in *Grafiek 18*.



*Grafiek 17:  $F_{d,max}$ -Spouwbreedte grafiek voor op drukbelaste spouwankers. Elke gekleurde marker geeft hetzelfde type spouwanker weer maar met een andere lengte. Behalve het UNI-Lijm spouwanker dat is een ander type spouwanker met andere type mortel weergegeven met een x.*

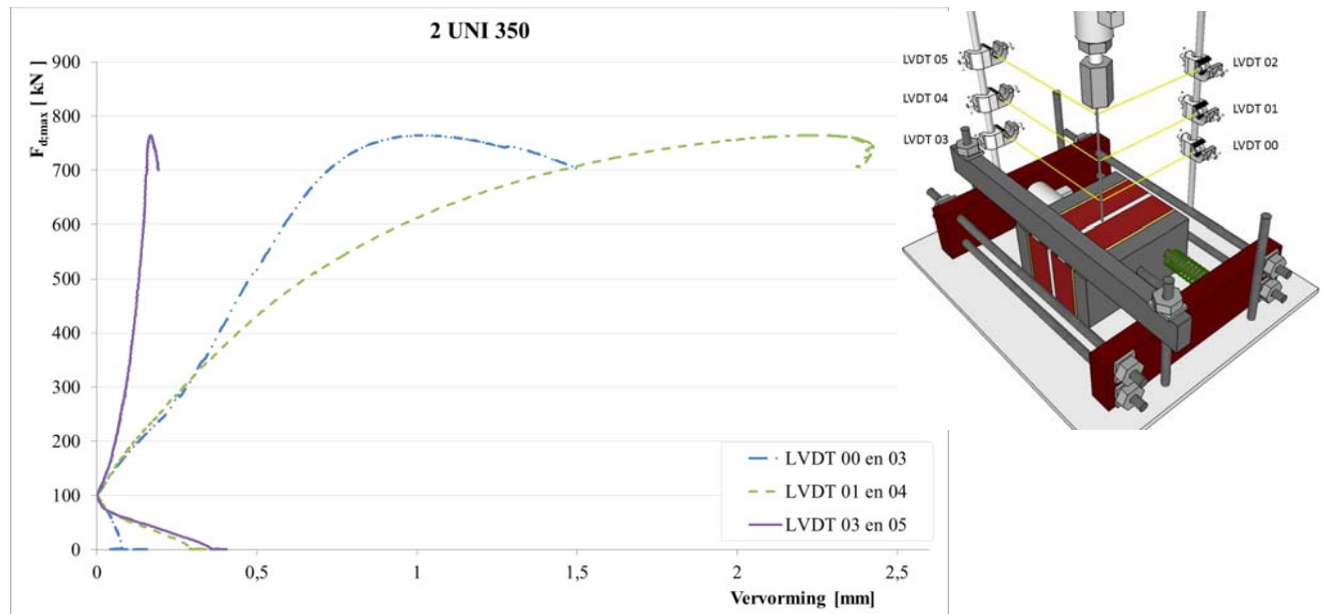


*Grafiek 18:  $F_{d,max}$ -Spouwbreedte grafiek voor spouwankers belast op druk weergegeven met trendlijn gebaseerd op vergelijking 1, bijlage 17.*

Met de gegevens uit bovenstaande grafieken kan een indicatie gegeven worden van de kniklengte van het spouwanker. Zoals toegelicht is, worden de vervormingen van het spouwanker gemeten met zes LVDT's, op drie plekken op het spouwanker. Met de metingen van de verplaatsing van het spouwanker bij  $F_{d,max}$  en  $F_{d,max;25\%}$  kan een indicatie van de kniklengte van het spouwanker gegeven worden. In bijlage 18 zijn de resultaten van de verplaatsingen per spouwanker uitgewerkt. Hieruit kan geconcludeerd worden dat:

1. De vervormingen van de spouwankers bij LVDT 00 en 05 vanaf  $F_{d,max}$  tot  $F_{d,max;25\%}$  verdrievoudigd.
2. De vervormingen in het midden van de spouwankers (LVDT 01 en 04) verdubbelen bij  $F_{d,max;25\%}$  ten opzichte  $F_{d,max}$ .
3. Bij de inklemming met de 250kN-bank blijft de verplaatsing vanaf  $F_{d,max}$  tot  $F_{d,max;25\%}$  ongeveer gelijk (LVDT 02 en 03).

Deze drie constatering zijn uitgewerkt voor het UNI350 spouwanker nummer 2 in *Grafiek 19*.



*Grafiek 19: Kracht-vervormingsgrafiek van het UNI350 spouwanker nummer 2, waarin de vervorming ( $e_2$ ) van  $x_1'$ ,  $x_3'$  en  $x_5'$  zijn weergegeven.*

Uit *Grafiek 19* is te concluderen dat er weinig vervorming van het spouwanker optreedt bij de inklemming met de 250kN-bank. Bij de bevestiging met de mortel, vervormt het spouwanker meer dan bij de inklemming met de 250kN-bank en duidt dit erop dat er een verende inklemming of scharnier aanwezig is. Als nogmaals naar *Figuur 74* gekeken wordt, is hierin de vervorming van het spouwanker weergegeven met de strepenlijn. Daarin is het blauwe punt (buigpunt van het spouwanker) aan de mortel-steen zijde omlaag bewogen. Dat suggereert dat het spouwanker niet ingeklemd heeft gezeten. De invloed van de mortelkwaliteit en -type op de inklemming van het spouwanker is gering, zoals blijkt uit de berekening in bijlage 18. Omdat met de uitgevoerde metingen geen conclusie kan worden gegeven welke mate van inklemming de mortel op het spouwanker heeft, kan de kniklengte van het spouwanker niet exact bepaald worden. Te concluderen is dat het spouwanker een kniklengte tussen  $0,5 \cdot l \leq l_k \leq 0,71 \cdot l$  heeft. Om uit te gaan van de meest ongunstigste situatie, wordt aangenomen voor de analytische berekeningen, dat het spouwanker de volgende kinklengte heeft:

$$l_k = \frac{l}{\sqrt{2}} = 0,71l \quad (3.7)$$

*Figuur 77: Kniklengte spouwankers na analyse van de vervorming van het spouwanker bij  $F_{d,max}$  en  $F_{d,max;25\%}$ .*

Naast de analyse van de vervorming voor de bepaling van de kniklengte, kan ook een indicatie van de kniklengte gegeven worden met de opgemeten spouwbreedte uit de proeven. Met de Eulerse knikkraft kunnen de kniklengtes voor alle spouwankers bepaald worden. Het resultaat van deze analyse is gegeven in *Tabel 6*. Ook is een optische analyse van de kniklengte mogelijk op basis van de foto's die gemaakt zijn tijdens de proeven. Uit deze foto's kan de kniklengte opgemeten worden en daaruit een gemiddelde kniklengte van de typen spouwankers worden bepaald. Ook hiervan zijn de resultaten gegeven in *Tabel 6*.

Over de resultaten kan gezegd worden dat:

‘Hoe groter de spouwbreedte wordt, hoe lager  $F_{d,max}$  zal zijn’ omdat het spouwanker sneller zijn  $F_c$  bereikt.

‘De mortelkwaliteit heeft geen invloed op het knikgedrag van het spouwanker’, omdat zowel het UNI-Lijm spouwankers als het UNI300 in M10 mortel dezelfde  $F_{d,max}$  hebben als de spouwankers met dezelfde lengte gemetseld in M5-mortel.

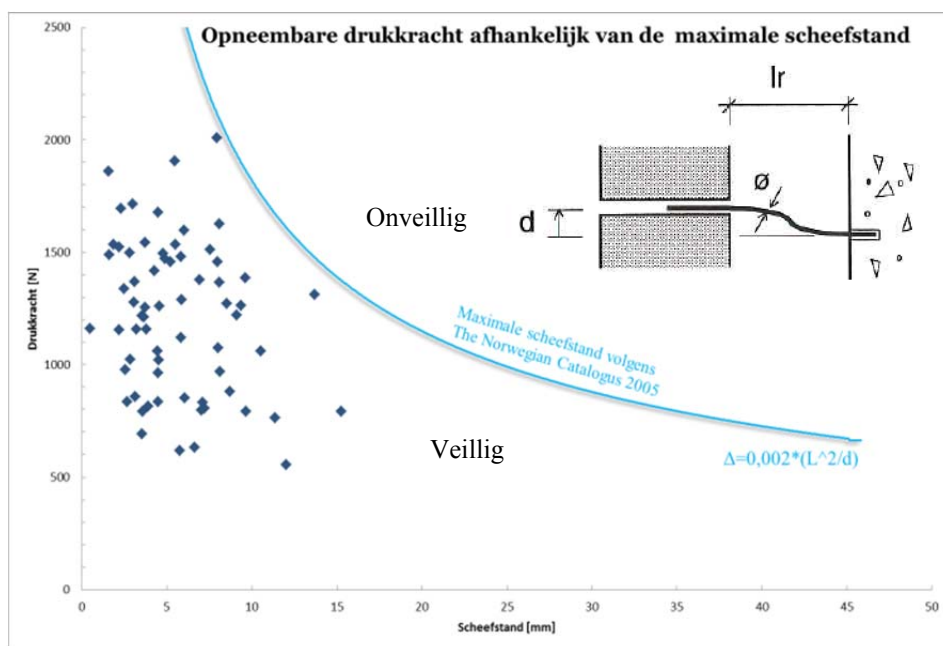
‘Hoe breder de spouw, hoe meer vervorming het spouwanker ondergaat totdat  $F_{d,max}$  bereikt is.’

Deze laatste constatering wordt bevestigd door de formule die gebruikt is in Noorwegen [15], namelijk:

$$\Delta = 0,002 \frac{l^2}{\phi} \tag{3.8}$$

Waarin  $\Delta$  de maximaal verticale verplaatsing van het spouwanker is,  $l$  de spouwbreedte en  $\phi$  de diameter van het spouwanker aanduiden (zie tevens figuur in Grafiek 20).

In Grafiek 20 is het resultaat van formule 3.8 getoond. De grafiek geeft aan wanneer het spouwanker een te grote scheefstand heeft, om nog de berekende drukkracht (via EC6) te kunnen opnemen. De scheefstand is te groot bij overschrijden van de doorgetrokken donkerblauwe streep. Alle spouwankers die beproefd zijn voor dit afstudeerproject, zitten onder de maximale scheefstand die volgens de Noorse Catalogus [15] mag optreden.



Grafiek 20: Opneembare drukkracht afhankelijk van de maximale scheefstand volgens Norway Catalogus 2005 [15].

### 3.2.4 Resultaten drukproef

De resultaten van de proeven worden in deze paragraaf eerst besproken. Aan de hand van de gegevens uit Tabel 6 zijn een aantal uitspraken gedaan over de spouwankers belast op druk.

Tabel 6: Gemiddelde resultaten proeven drukcapaciteit spouwankers

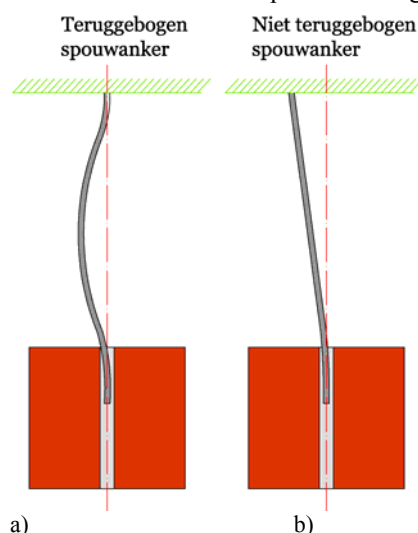
| Spouwanker                             |                     | UNI-spouwanker 250   | UNI-spouwanker 275   |                      | UNI-spouwanker 300   | UNI-spouwanker 350   | UNI-Lijm 300         |
|--|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Mortelkwaliteit                        |                     | M5                   | M5                   | M10                  | M5                   | M5                   | M15                  |
| Aantal proefstukken (stuks)            |                     | 12                   | 12                   | 6                    | 12                   | 12                   | 12                   |
| Diameter [mm]                          |                     | 3,87                 | 3,86                 | 3,86                 | 3,87                 | 3,87                 | 3,89                 |
| Spouwbreedte [mm]                      |                     | 156                  | 173                  | 173                  | 201                  | 275                  | 206                  |
| F <sub>d,max</sub> [N]                 | Gemiddelde          | 1561                 | 1423                 | 1469                 | 1074                 | 746                  | 1125                 |
|  | Standaard afwijking | 262                  | 201                  | 55                   | 183                  | 92                   | 169                  |
| Vervorming bij F <sub>d,max</sub> [mm] | Gemiddelde          | 1,75                 | 1,82                 | 1,80                 | 2,04                 | 2,61                 | 2,41                 |
|  | Standaard afwijking | 0,59                 | 0,66                 | 0,79                 | 0,76                 | 0,57                 | 0,49                 |
| Beginexcentriciteit [mm]               |                     | 0,99                 | 1,07                 | 0,98                 | 1,21                 | 1,51                 | 1,15                 |
| Kniklengte spouwbreedte*               |                     | 0,78*1               | 0,74*1               | 0,72*1               | 0,73*1               | 0,64*1               | 0,70*1               |
| Kniklengte optisch**                   |                     | 0,54*1               | 0,56*1               | 0,55*1               | 0,55*1               | 0,57*1               | 0,59*1               |
| Kniklengte vervorming***               |                     | $\frac{l}{\sqrt{2}}$ | $\frac{l}{\sqrt{2}}$ | $\frac{l}{\sqrt{2}}$ | $\frac{l}{\sqrt{2}}$ | $\frac{l}{\sqrt{2}}$ | $\frac{l}{\sqrt{2}}$ |

\* Berekend aan de hand van de gemeten spouwbreedte. De spouwbreedte kan groter of kleiner zijn, hangt van de inlegdiepte en morteltype af. Met behulp van optische analyse van spouwankers is de kniklengte van de spouwankers bepaald.  
 \*\* Optische analyse betekent het analyseren van foto's en aan de hand van deze foto's de kniklengte van de spouwankers bepalen

De spouwankers zijn op twee manieren in het frame en inklemming van de 250kN-bank geplaatst, om te kijken of dit enige invloed heeft op het knikgedrag van het spouwanker.

1. Het uiteinde en begin van het spouwanker staan loodrecht boven elkaar, waardoor het spouwanker gebogen wordt (Figuur 78a)
2. Het uiteinde en begin van het spouwanker staan niet loodrecht boven elkaar en het spouwanker wordt onder de inklemming geplaatst onder de hoek waarin het spouwanker is ingemetseld (Figuur 78b).

Uit de resultaten van de proeven kon geen effect worden gevonden van het anders plaatsen van de spouwankers.



Figuur 78: De plaatsing van het proefstukken in de proefopstelling. Twee opties zijn mogelijk a) spouwanker wordt teruggebogen b) spouwanker wordt niet teruggebogen en wordt scheef in de proefopstelling geplaatst

### **Eurocode 6**

De eis uit EC6 (maximaal 1 mm slippen bij 1/3 van maximale kracht) is niet toepasbaar bij spouwankers belast op druk omdat slippen niet wordt geconstateerd tijdens de proef. Wordt de eis beschreven die luidt: *de verplaatsing evenwijdig aan de drukkracht mag niet groter dan 1mm zijn*, voldoen drie UNI300 spouwankers niet aan deze eis. De beschrijving van de eis uit EC6 is niet duidelijk genoeg om hierover een uitspraak te doen voor op druk belaste spouwankers.

### **Mortelkwaliteit**

Uit de analyse van resultaten van de drukproeven blijkt dat  $F_{d,max}$  geen relatie heeft met de mortelkwaliteit waarin het spouwanker is gemetseld. *Grafiek 17* (pagina 66) laat dit zien voor de UNI275 spouwankers gemetseld in M5- en M10-mortel en voor de UNI300 spouwankers waarbij  $F_{d,max}$  gelijk is aan die van de UNI-Lijm spouwankers. Ook kan de constatering " *$F_{d,max}$  heeft geen relatie met de mortelkwaliteit*" bewezen worden met de bepaling van de kniklengtes van de spouwankers in de verschillende mortels en bij de verschillende spouwbreedtes. Beargumenteerd wordt dit door de berekening van de inklemmingen van het spouwanker in de mortel gegeven in bijlage 18. Uit deze berekening volgt dat het verschil tussen de veerstijfheid van de metsel- en lijm mortel gering is.

### **Vervorming**

Het spouwanker knikt bij alle beproefde spouwankers. De vervorming die het spouwanker ondergaat is afhankelijk van de spouwbreedte, beginexcentriciteit en scheefstand van het spouwanker. De grootte van de vervorming van het spouwanker kan afgeleid worden van de spouwbreedte (gegeven in *Tabel 6*). Daaruit volgt dat de spouwankers in een kleine spouw (kleine lengte) een kleinere vervorming hebben dan spouwankers in een grote spouw (grote lengte, gevoeliger voor knik) bij het bereiken van  $F_{d,max}$ . Na het doorbelasten hebben alle spouwankers dezelfde vervorming ondergaan van gemiddeld 4 mm. Daarnaast kan geconcludeerd worden dat: *'hoe kleiner de lengte van het spouwanker is, hoe meer invloed een 'afwijking' kan hebben op  $F_{d,max}$ '*. Met de 'afwijking' wordt bedoeld, de absolute scheefstand of beginexcentriciteit die het spouwanker voor belasting heeft.

### **Kniklengte**

Zoals al geconcludeerd is heeft de mortelkwaliteit weinig invloed op de kniklengte van het spouwanker. De kniklengtes zijn op drie verschillende manieren bepaald en in *Tabel 6* zijn deze weergegeven. Een antwoord op de vraag, wat is de kniklengte van het spouwanker? Is geen antwoord te geven. Reden hiervoor is dat de plaats van het buigpunt van het spouwanker aan de zijde van de steen en de mortel niet bepaald kan worden omdat deze tijdens de proef verschuift (zie *Figuur 74*).

Voor de analytische berekening is het volgende model aangehouden: Het spouwanker heeft aan de 250kN-bank ingeklemd gezeten en de mate van inklemming door de mortel verschilt per type analyse. Het kan als verende inklemming aangenomen worden maar ook als scharnier en beide resulteren in een andere kniklengte van het spouwanker. Uitgegaan wordt van de meest ongunstige situatie en de mate van inklemming bij de mortel zorgt voor een scharnierende verbinding. Dit resulteert in een kniklengte van de beproefde spouwankers in:

$$l_k = \frac{l}{\sqrt{2}} = 0,71l$$

Deze kniklengte is alleen geldig voor de in dit onderzoek beproefde spouwankers. Wanneer een spouwmuur gesimuleerd dient te worden, moet de kniklengte gebaseerd worden op het materiaal waarin het spouwanker is ingelegd. Is bij beide zijde het spouwanker ingelegd in mortel, dient een kniklengte van  $l_k=l$  (spouwbreedte) aangehouden te worden. Dit omdat de inklemming ter plaatse van de mortel tijdens de proeven gelijk is aan een scharnier.

Uit *Tabel 6* volgt: "*Hoe kleiner de spouwbreedte is, hoe groter de spreiding van  $F_{d,max}$  is*". Dit heeft mede te maken met de kniklengte en de invloed van de vervorming die het spouwanker ondergaat zoals bij de vervorming reeds is toegelicht.

### **Knikgedrag**

Zoals de analyses van de proeven laten zien, knikt het spouwanker. Afhankelijk van de spouwbreedte wordt een  $F_{d,max}$  bereikt, waarbij de vervormingen van het spouwanker gering zijn. Pas bij doorbelasten nemen de vervormingen van het spouwanker bij  $x_1$  en  $x_2$  toe en is de knikvorm van het spouwanker zichtbaar. Na ontlasten is de knikvorm van het spouwanker nog zichtbaar omdat het spouwanker plastisch vervormd is. Bij het bereiken van  $F_{d,max}$ , worden de knikspanningen of vloeispanning overschreden en knikt het spouwanker uit, zoals beschreven in de literatuur in hoofdstuk 2.



### 3.2.5 Constateringen proefstukken

Voor, tijdens en na de proeven zijn een aantal constateringingen gedaan die invloed kunnen hebben gehad op de proefresultaten. In deze paragraaf worden de constateringingen nader toegelicht.

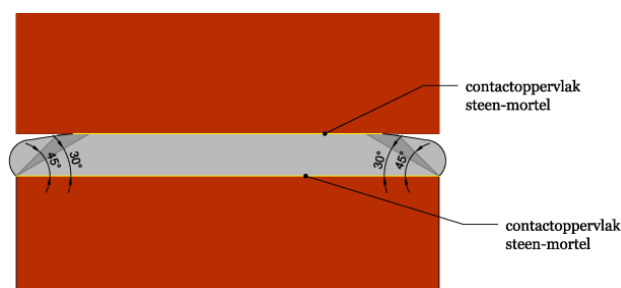
#### **Hechting tussen steen en mortel**

Mortel is het bindmiddel tussen stenen, maar vangt ook de onregelmatigheden op van de stenen. Belangrijk is dat de mortel zijn samenhang in de loop der tijd behoudt, anders kan de constructie instabiel worden. De samenstelling van de steen en mortel is van belang, omdat de droge mortel leidt tot niet verwerkbaarheid en te droge stenen tot geen hechting tussen steen en mortel. Daarnaast kan het volgens Müller en Meyer [VER05] ook de druksterkte beïnvloeden, omdat het vocht uit de mortel onttrokken wordt. Om deze reden is het Hallergetal bepaald voor de bakstenen die gebruikt zijn voor de proefstukken. Het Hallergetal van de Rijswaard bakstenen ligt tussen 18-20, een normaal zuigende steen (bijlage 19).

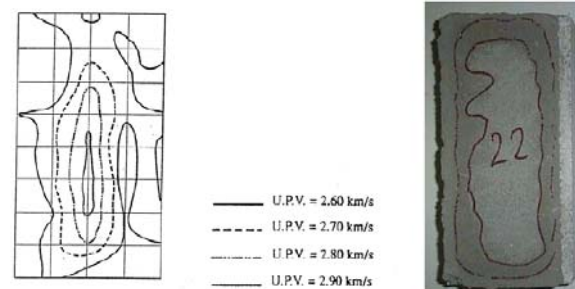
Na het verwijderen van afdekfolie zijn de proefstukken geanalyseerd. Bij de proefstukken gemetseld met M5-mortel zijn twee van de 83 proefstukken onthecht, bij proefstukken gemetseld met M10-Mortel zijn zestien van de 47 proefstukken onthecht en bij de gelijmde proefstukken zijn geen van de 24 proefstukken onthecht (bijlage 14). De hechting tussen steen en mortel is afhankelijk van vele factoren [CUR171]. De onthechting kan bijvoorbeeld komen door het gebruik van te droge stenen, verwerken van te droge mortel of onjuiste nabehandeling van het proefstuk.

Het hechtoppervlak van de steen met de mortel is niet het totale oppervlak dat vol ligt met mortel. Vermelthoort en Van der Pluijm [VER05] constateerden dat drie verschillende gebieden aanwezig zijn, bij de hechting tussen steen en mortel (Figuur 80 en Figuur 79):

1. Een goede hechting in het centrale gebied van de baksteen;
2. Een middengebied
3. Een buitengebied waar geen hechting heeft plaats gevonden.



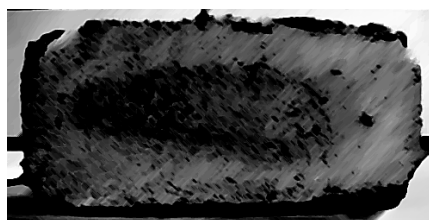
Figuur 79: Doorsnede met de drie gebieden van hechting tussen steen en mortel[VER05]



Figuur 80: Ultra puls snelheid (UPV) contouren en breukvlak na een hefboomproef. De lijnen geven de grenzen van de drie gebieden met verschillende soorten binding weer[VER05]

De hechting tussen steen en mortel wordt verslechterd door bezande oppervlakken van het baksteen. Hierdoor wordt het oppervlak dat de hechtcapaciteit van het metselwerk waarborgt, verlaagd. Omdat de hechting tussen de stenen en mortel bij M10-mortel slecht was, zijn de proefstukken onderzocht om te kijken wat het hechtoppervlak is geweest tussen steen en mortel. In Figuur 81 is het hechtoppervlak van het proefstuk gemetseld met M10-mortel weergegeven. In dit figuur zijn twee stadia van hechting te constateren, waarbij het hart (zwart) hechting tussen steen en mortel heeft gehad en het grijze gebied niet.

Figuur 82 laat het hechtoppervlak zien van een gelijmd proefstuk. Hierop is te zien dat delen van de bakstenen aan de lijm zijn blijven hechten. De hechting tussen lijm-mortel en steen is sterker dan tussen steen en metselmortel. Dit komt door de samenstelling van lijm of mortel en de reactie met de baksteen.



Figuur 81: Hechtoppervlak bij M10-mortel



Figuur 82: Hechtoppervlak bij lijm-mortel



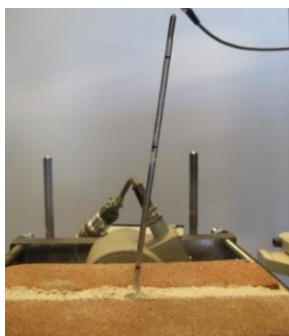
Figuur 83: Overtollig mortel op spouwanker

### Hechting spouwanker mortel

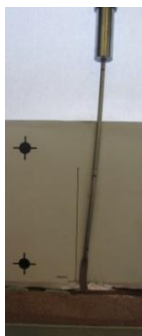
Hechting tussen het spouwanker en de mortel is een belangrijke parameter die de trekcapaciteit van het spouwanker bepaalt. In *Figuur 83* is een proefstuk te zien waarbij overtollig mortel om het spouwanker is gehecht. Deze mortel kan extra capaciteit aan het spouwanker geven. De analyse van de gevolgen van extra mortel valt buiten dit onderzoek.

### Plaatsing spouwanker

De plaatsing van het spouwankers is belangrijk voor de analyse van de resultaten, zodat van de resultaten met dezelfde randvoorwaarden dezelfde conclusies getrokken kunnen worden. Na de plaatsing van de spouwankers zijn een aantal constatering gedaan, die mogelijk de proefresultaten hebben beïnvloed.



*Figuur 84: Scheefstand spouwanker wanneer het proefstuk in het frame geplaatst is.*



*Figuur 85: Afdruk spouwanker in mortel voor bepaling inlegdiepte bij het UNI275 spouwanker nr. 21.*

Allereerst is een aantal spouwankers scheef geplaatst oftewel de spouwankers zijn onder een hoek groter of kleiner dan 90 graden in de voeg gelegd (zie *Figuur 78*). Dit heeft geresulteerd in een scheefstand van het betreffende spouwanker bij het plaatsen van het proefstuk in het frame. In *Figuur 84* is deze scheefstand te zien bij het UNI 250 spouwanker nummer 4. Uit de resultaten is gebleken dat de scheefstand geen significante invloed heeft gehad (hoofdstuk 4). In een vervolgonderzoek dient nader onderzocht te worden wat de invloed is van de scheefstand van het spouwanker.

Als tweede moest het spouwanker in het hart van de voeg geplaatst worden. Door de manier van lijmen, zijn de lijmspouwankers boven of onder het hart van de voeg geplaatst. Eerst is de lijm op de stenen aangebracht, waarna het spouwanker op de lijm gelegd is en de tweede steen erop gelegd is. Hierdoor bevindt zich meer lijmmortel aan een zijde van het spouwanker. Bij de mortel zijn de spouwankers beter in het hart van de voeg gemetseld. Dit komt doordat eerst een kleine laag mortel op de eerste steen gelegd is, het spouwanker op de mortel wordt gelegd, een de tweede laag mortel wordt aangebracht en als laatste wordt de tweede steen erop gelegd. Hierdoor wordt het spouwanker beter in het hart van de mortel geplaatst. De plaatsing van het spouwanker heeft geen zichtbare gevolgen gehad voor de verkregen resultaten.

Als derde werd de inlegdiepte van het spouwanker belangrijk. Voor en na het uitvoeren van de proeven werd de inlegdiepte van de spouwankers bepaald (*Figuur 85*). De spouwankers hadden een gemiddelde inlegdiepte van 46 mm bij de trekproeven en 48 mm bij de drukproeven. De invloed van de inlegdiepte op de uittrekwaaarde of drukwaarde is in dit onderzoek niet onderzocht.

### Treksterkte spouwankers

Geen van de spouwankers zijn bezweken tijdens de proef. Wel is geconstateerd dat een aantal spouwankers plastisch vervormd zijn na de trekproeven. De eigenschappen van de spouwankers voor het beproeven zijn gegeven in *Tabel 7*. Na het beproeven zijn een aantal spouwankers gaan vloeien en de resultaten zijn eveneens in *Tabel 7* gegeven. Omdat de spouwankers van verschillende legeringen gemaakt zijn, hebben ze allemaal een andere vloeigrens. Uit *Tabel 7* kan opgemaakt worden dat de spouwankers eerder zijn gaan vloeien dan de bepaalde vloeigrens in de schaduwproeven uitgewerkt in §3.3.

*Tabel 7: Spouwankers die plastisch vervormt zijn na het beproeven op trek.*

| Spouwanker          | Gemiddelde spanning bij $F_{t,max}$ | Spreiding                    | Aantal dat plastisch vervormd is |
|---------------------|-------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| UNI275 M5-mortel    | 255 N/mm <sup>2</sup>               | ±0 N/mm <sup>2</sup>         | 1                                |
| UNI275 M10-mortel   | 273 N/mm <sup>2</sup>               | +34 en -51 N/mm <sup>2</sup> | 4                                |
| B300 M5-mortel      | n.v.t.                              | n.v.t.                       | 0                                |
| B300 M10-mortel     | n.v.t.                              | n.v.t.                       | 0                                |
| UNI-L M5-mortel     | 276 N/mm <sup>2</sup>               | +68 en -74 N/mm <sup>2</sup> | 7                                |
| UNI-L M10-mortel    | 215 N/mm <sup>2</sup>               | +69 en -67 N/mm <sup>2</sup> | 10                               |
| UNI-Lijm M15-Mortel | n.v.t.                              | n.v.t.                       | 0                                |

### 3.3 Materiaaleigenschappen

Met de materiaalproeven zijn de eigenschappen van de mortel, spouwanker en stenen vast gesteld. *Tabel 8* geeft een overzicht van de resultaten van de materiaalproeven die zijn uitgevoerd. De drie gebruikte materialen worden allereerst besproken.

#### Mortel

De eigenschappen van de mortel zijn bepaald op twee manieren, omdat de verhardingscondities van mortel in stalen malen verschillend is ten opzichte van mortel die uithard tussen twee stenen [VER98]:

1. *Mortelprisma's 160\*40 (Figuur 86)*

Mortelprisma's gemaakt van de batch die gebruikt is bij het metselen van de proefstukken. De proeven op de mortelprisma's worden uitgevoerd om de kwaliteit (de 'potentie') van mortel te bewaken.

2. *Mortelprisma's 40\*40 (Figuur 87)*

De eigenschappen van de voeg worden bepaald met proeven op de mortel van de voegen uit het metselwerk. De voegen worden in plakken van 40\*40 gezaagd (*Figuur 87*) en daarna beproefd [VER].



*Figuur 86: Mortelprisma's (160\*40) gemaakt in stalen malen*



*Figuur 87: Mortelprisma's (40\*40) uit het metselwerk*

#### Spouwankers

De eigenschappen van de spouwankers zijn bepaald door de spouwankers te trekken in de 250kN-bank. Met de resultaten is de Elasticiteitsmodulus bepaald, benodigd voor de bepaling van de Eulerse Knikkracht en  $F_{d,max}$ . Daarnaast is de 0,2%-rekgrens en de treksterkte van het staal bepaald. Deze zijn benodigd voor het berekenen van de trekcapaciteit en drukcapaciteit van het spouwanker.

#### Metselwerk

De elasticiteitsmodulus van het metselwerk is bepaald uit drukproeven op van tevoren geprepareerde proefstukken van vijf lagen hoog en één steen brede proefstukken.

Daarnaast is de hechting tussen steen en mortel bepaald, door het uitvoeren van hechtsterkte proeven. Deze zijn van belang omdat uit de proeven is gebleken (§3.2), dat de hechtsterkte een negatief effect heeft tijdens trekproeven op spouwankers.

Tabel 8: Materiaaleigenschappen

| Proef voor:                             | Grootheid:                  | Serie:                           | Aantal proefstukken: | Gemiddelde waarde: | Standaard afwijking: |         |
|---|-----------------------------|----------------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|---------|
| <b>Baksteen</b>                         |                             |                                  |                      |                    |                      |         |
| Druksterkte                             | $f_b$ [N/mm <sup>2</sup> ]  | -                                | 7                    | 14,4               | 4,7                  |         |
| Volumieke massa                         | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | 19-12 +<br>23-01                 | 13                   | 1607,7             | 12,1                 |         |
| <b>Mortel</b>                           |                             |                                  |                      |                    |                      |         |
| Buigtreksterkte                         | M5                          | $f_{mt}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | -                    | 9                  | 3,8                  | 0,4     |
|   | M10                         |                                  | -                    | 9                  | 7,8                  | 0,8     |
|   | M15                         |                                  | -                    | 3                  | 10,6                 | 1,7     |
| Druksterkte<br>Mortelprisma<br>160*40mm | M5                          | $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]       | -                    | 18                 | 7,2                  | 0,6     |
|   | M10                         |                                  | -                    | 18                 | 18,4                 | 1,4     |
|   | M15                         |                                  | -                    | 6                  | 30,7                 | 1,9     |
| Druksterkte<br>mortelprisma 40*40       | M5                          | $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]       | -                    | 7                  | 17,5                 | 3,2     |
|   | M10                         |                                  | -                    | 6                  | 31,2                 | 2,2     |
| <b>Metselwerk</b>                       |                             |                                  |                      |                    |                      |         |
| Bond wrench proef                       | M5                          | $f_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]       | [MAS14]              | 10                 | 0,10                 | 0,04    |
| Driepuntsbuigproef                      | M5                          | $f_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]       | [MAS14]              | 2                  | 0,29                 | 0,05    |
| Afschuifproef<br>Voor- en na scheuren   | M5                          | $f_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]       | [MAS14]              | 9                  | 0,55                 | 0,13    |
|   |                             |                                  |                      | 9                  | 0,29                 | 0,10    |
| Druksterkte                             | M5                          | $f$ [N/mm <sup>2</sup> ]         | -                    | 9                  | 12,2                 | 1,2     |
|   | M10                         |                                  | -                    | 5                  | 16,0                 | 0,7     |
|   | M15                         |                                  | -                    | 5                  | 11,3                 | 2,1     |
| Elasticiteitsmodulus                    | M5                          | $E$ [N/mm <sup>2</sup> ]         | -                    | 9                  | 4713                 | 1415    |
|   | M10                         |                                  | -                    | 5                  | 5150                 | 737     |
|   | M15                         |                                  | -                    | 5                  | 10876,5              | 10584,0 |
| <b>Spouwanker</b>                       |                             |                                  |                      |                    |                      |         |
| Duplex staal nr.<br>1,4362              | 0,2%-rek                    | $f_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]       | B300                 | 6                  | 602,9                | 16,2    |
|   | Treksterkte                 | $f_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]       |                      |                    | 751,3                | 3,7     |
| RVS A4-316<br>Nr. 1.4401-<br>1.4362     | 0,2%-rek                    | $f_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]       | UNI<br>spouwankers   | 6                  | 387,1                | 11,0    |
|   | Treksterkte                 | $f_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]       |                      |                    | 673,5                | 4,3     |
|   | 0,2%-rek                    | $f_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]       | UNI-L<br>spouwankers | 1                  | 432                  | Nvt     |
|   | Treksterkte                 | $f_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]       |                      |                    | 815                  | Nvt     |

## 4 Statistische beoordeling proefresultaten

Om voorspellingen te kunnen doen over de trek- en drukcapaciteit ( $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$ ) van de geteste spouwankers zijn de proefresultaten statistisch beoordeeld. Het doel van de statistische beoordeling van de resultaten is om de onbekende zekerheid van de capaciteit van een spouwanker te bepalen en een betrouwbaar model op te stellen die  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$  kan voorspellen.

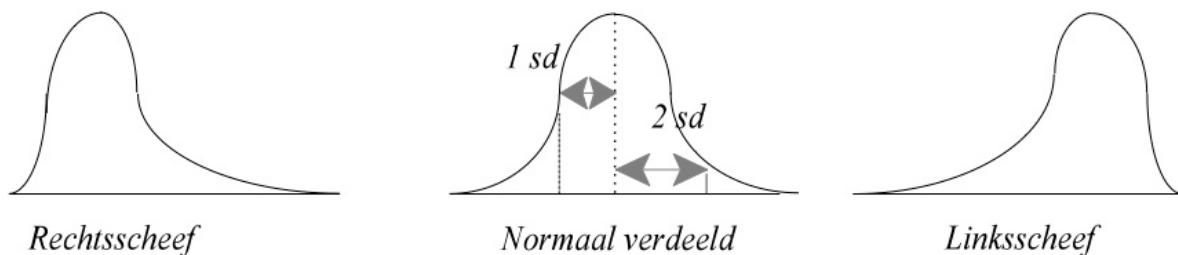
De minimum eis gesteld in EC6 [1] is:  $F_{t,max} \geq 1000N$ . De proefresultaten uit hoofdstuk 3 hebben een hogere  $F_{t,max}$ , maar de zekerheid waarmee deze  $F_{t,max}$  in de praktijk gehaald worden in plaats van de minimum waarde van 1000 N uit EC6, moet bepaald worden.

Voor de beoordeling van de resultaten is eerst de normaliteit van  $F_{t,max}$  berekend. De normaliteit kan eenvoudig bepaald worden met het berekenen van de scheefstand en spitsheid van de verdeling. Als de verdeling normaal verdeeld is, dan hebben zij de waarde 0 die volgt uit vergelijking 4.1 en 4.2. Zolang de waarden tussen -0,5 en +0,5 liggen, dan is de verdeling bij benadering normaal (evenwichtig verdeeld). Groter dan +0,5 en kleiner dan -0,5 is de verdeling niet normaal verdeeld.

### Scheefstand:

Met de scheefheid van een verdeling kan bepaald worden of de verdeling afwijkt van de normaalverdeling. De afwijking kan verholpen worden door het weghalen van uitbijters uit de dataset of door te normaliseren (dit wordt in paragraaf 4.2 beschreven).

Zijn de waarden van de scheefstand onder nul is de verdeling linksscheef georiënteerd en boven nul rechtsscheef georiënteerd (Figuur 88).



Figuur 88: Bepaling normaliteit van de proefresultaten. Normaal verdeeld: normaalverdeling is symmetrisch. Rechtsscheef en Linksscheef: normaalverdeling is niet normaal verdeeld als de waarden groter dan +0,5 of kleiner is dan -0,5 zijn.

Bron: <http://www.real-statistics.com/>

Voor de bepaling van de scheefstand kan formule 4.1 gebruikt worden:

$$\text{Scheefstand} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^3}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^{3/2}} \right] \quad (4.1)$$

Waarin  $x$  gelijk is aan  $F_{t,max}$  van de proefresultaten,  $\bar{x}$  gelijk is aan de gemiddelde waarde van  $F_{t,max}$  en  $n$  het aantal proefresultaten is.

Als de scheefstand voor het ideale proefstuk met UNI275 spouwankers in M5-mortel wordt berekend, volgt het volgende resultaat:

$$\text{Scheefstand} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(2728-2744)^3 + (2439-2744)^3 + (3065-2744)^3}{3} \right)}{\left( \frac{\sum(2728-2744)^2 + (2439-2744)^2 + (3065-2744)^2}{3} \right)^{3/2}} \right] = -0,09$$

Uit de formule volgt dat de proefresultaten normaal verdeeld zijn. Voor de bepaling van de scheefstand van de overige proefresultaten zie bijlage 20.

### Spitsheid:

Ook de spitsheid van de verdeling bepaalt of de verdeling afwijkt van de normaalverdeling. Samen met de scheefstand kan dan bepaald worden of de verdeling niet-normaal of normaal verdeeld is.

Voor het berekenen van de spitsheid van de verdeling moet vergelijking 4.2 gebruikt worden. De uitkomst met de waarde onder nul duidt op een vlakkere verdeling en de waarde boven nul geeft een scherpere verdeling weer

dan de normaalverdeling. De minimum waarde is gelijk aan -3 (een volledig platte verdeling), de maximale waarde is oneindig.

$$\text{Spitsheid} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^4}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^2} \right] - 3 \quad (4.2)$$

Waarin  $x$  gelijk is aan  $F_{t,\max}$  van de proefresultaten,  $\bar{x}$  gelijk is aan de gemiddelde waarde van  $F_{t,\max}$  en  $n$  het aantal proefresultaten is.

Als de spitsheid voor het ideale proefstuk met UNI275 spouwankers in M5-mortel wordt berekend, volgt het volgende resultaat:

$$\text{Spitsheid} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(2728-2744)^4 + (2439-2744)^4 + (3065-2744)^4}{3} \right)}{\left( \frac{\sum(2728-2744)^2 + (2439-2744)^2 + (3065-2744)^2}{3} \right)^2} \right] - 3 = -1,50$$

De proefresultaten vertonen een afwijking en de resultaten hebben een vlakkere grafiek ten opzichte van de normaalverdeling. Voor de bepaling van de scheefstand van de overige proefresultaten zie bijlage 20.

Uit formules 4.1 en 4.2 blijkt, na invullen van de resultaten uit hoofdstuk 3, dat de resultaten van  $F_{t,\max}$  niet normaal verdeeld zijn, omdat of de scheefstand en/of de spitsheid afwijken van de normaalverdeling (bijlage 20).

Voor de beoordeling van de resultaten is dus een uitgebreidere analyse nodig, zodat de juiste parameters worden gevonden die een relatie hebben met de capaciteit van het spouwanker ( $F_{t,\max}$  of  $F_{d,\max}$ ). Hiervoor is één hoofdvraag opgesteld:

“Welke  $F_{t,\max}$  of  $F_{d,\max}$  kunnen de verschillende typen spouwankers met 95% zekerheid opnemen, oftewel, wat is de karakteristieke waarde van  $F_{t,\max}$  en  $F_{d,\max}$ ?”

Voordat bovenstaande vraag wordt beantwoord, is een parameterstudie uitgevoerd voor zowel de parameters van  $F_{t,\max}$  als  $F_{d,\max}$ . Allereerst zijn de gebruikte resultaten en parameters beschreven die een relatie kunnen hebben met  $F_{t,\max}$  of  $F_{d,\max}$ . Als tweede is de gebruikte werkwijze beschreven, waarin de stappen die gemaakt worden tijdens het opstellen van het model worden toegelicht. In de derde en vierde paragraaf wordt deze werkwijze toegepast op de proefresultaten en worden de statistische parameterstudies en het ontworpen model voor  $F_{t,\max}$  en  $F_{d,\max}$  toegelicht. Met het ontworpen model kunnen voorspellingen voor de karakteristieke waarde van  $F_{t,\max}$  of  $F_{d,\max}$  worden gedaan. De laatste paragraaf geeft een conclusie over de statistische beoordeling van de resultaten.

Voor de analyses is het statistisch programma “R” gebruikt en is gebruik gemaakt van een script waarin alle gemaakte analyses zijn beschreven (zie bijlage 21).

#### 4.1 Te beoordelen proefresultaten

Voordat een parameterstudie uitgevoerd kan worden, moeten eerst de ingevoerde waarden voor de statistische beoordeling bekend zijn. In hoofdstuk 3 zijn de proefresultaten behandeld die in dit hoofdstuk gebruikt worden voor de voorspelling van de capaciteit van de spouwankers.

Voor de resultaten van de trekproef zijn in *Tabel 9* alleen de gemiddelde waarden gegeven, verdeeld per parameter die gevarieerd werd tijdens het experiment en mogelijk een relatie heeft met  $F_{t,\max}$ . Resultaten en gemeten parameters per spouwanker zijn in bijlage 9 gegeven.

De inlegdiepte was voor de experimenten geen parameter, maar een constante waarde van 40 mm. Na het uitvoeren van de experimenten is gebleken dat de inlegdiepte varieerde. Daarom is de inlegdiepte in het statistische model alsnog meegenomen als parameter.

Net als voor de resultaten van de trekproef zijn ook voor de resultaten van de drukproef de gemiddelde waarden gegeven (zie *Tabel 10*). In de tabel zijn de parameters en resultaten die gemeten zijn voor, tijdens en na het experiment weergegeven. In bijlage 9 zijn de resultaten en gemeten parameters per beproefd spouwanker gegeven.



Tabel 9: De gemiddelde waarden van de proefresultaten en parameters van de trekproeven uit hoofdstuk 3. Gegevens per spouwanker zijn in bijlage 9 uitgewerkt. De groene arcering betekent een spouwanker van een andere staalkwaliteit.

| Spouwanker | Mortelkwaliteit | Aantal proefstukken [stuk] | Inlegdiepte [mm] | Diameter [mm] | Spouwbreedte [mm] | $1/3 * F_{t,max}$ [N] | Gemiddelde verplaatsing bij $1/3 * F_{t,max}$ [mm] | $F_{t,max}$ [N] | Verplaatsing (mm) |
|------------|-----------------|----------------------------|------------------|---------------|-------------------|-----------------------|--|-----------------|-------------------|
| UNI275     | M5              | 11                         | 43               | 3,88          | 180               | 784                   | 0,13   | 2457            | 1,13              |
|            | M10             | 12                         | 42               |               | 178               | 740                   | 0,12   | 2174            | 0,78              |
| B300       | M5              | 11                         | 46               | 4,08          | 173               | 679                   | 0,07   | 1921            | 1,59              |
|            | M10             | 11                         | 47               |               | 172               | 643                   | 0,55   | 1875            | 1,12              |
| UNI-L      | M5              | 12                         | 47               | 3,87          | 126               | 1072                  | 0,07   | 3216            | 1,26              |
|            | M10             | 12                         | 49               |               | 127               | 856                   | 0,17   | 2439            | 1,21              |
| UNI-Lijm   | M15             | 12                         | 47               | 3,89          | 210               | 1315                  | 0,07   | 4035            | 1,73              |

Tabel 10: De gemiddelde waarden van de proefresultaten en parameters van drukproeven uit hoofdstuk 3. Gegevens per spouwanker zijn in bijlage 9 uitgewerkt. De arcering geeft het verschil in mortelkwaliteit weer.

| Spouwanker | Mortelkwaliteit | Aantal proefstukken [stuk] | Inlegdiepte [mm] | Diameter [mm] | Spouwbreedte [mm] | Beginexcentriciteit [mm] | Scheefstand [mm] | Verplaatsing ten opzichte van de scheefstand [mm] | $F_{d,max}$ [N] | Verplaatsing (mm) |
|------------|-----------------|----------------------------|------------------|---------------|-------------------|--------------------------|------------------|---|-----------------|-------------------|
| UNI250     | M5              | 12                         | 47               | 3,88          | 156               | 0,99                     | 6,15             | 2,75  | 1561            | 1,75              |
| UNI275     | M5              | 12                         | 50               | 3,87          | 173               | 1,07                     | 5,39             | 2,89  | 1423            | 1,82              |
|            | M10             | 6                          | 53               | 3,87          | 173               | 0,99                     | 4,32             | 2,78  | 1469            | 1,80              |
| UNI300     | M5              | 12                         | 49               | 3,87          | 201               | 1,21                     | 4,56             | 3,25  | 1074            | 2,04              |
| UNI350     | M5              | 12                         | 48               | 3,87          | 275               | 1,51                     | 7,96             | 4,12  | 746             | 2,61              |
| UNI-Lijm   | M15             | 12                         | 44               | 3,89          | 206               | 1,15                     | 4,73             | 3,56  | 1125            | 2,41              |

De parameters die uitgewerkt zijn in Tabel 9 en Tabel 10 hebben mogelijk een relatie met  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$  en zijn voor, tijdens en na de proeven gemeten. Sommige van de beschreven parameters in Tabel 9 en Tabel 10 hebben geen relatie met  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$  omdat deze parameter dan een output (uitkomst) is van het experiment (bijvoorbeeld de verplaatsing bij  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$ ). Daarom zijn de parameters opgedeeld in input en output voor invoer in het statistisch model. Omdat in de Tabel 9 en Tabel 10 parameters met een mogelijke invloed en resultaten zijn weergegeven zijn in Tabel 11 de eerder genoemde parameters en resultaten onderverdeeld in in- en/of output.

Tabel 11: De input en/of output parameters voor het opstellen van het model voor het voorspellen van  $F_{t,max}$  en  $F_{d,max}$ .

| $F_{t,max}$  | $F_{d,max}$  |
|--|--|
| <b>INPUT</b>   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Diameter</li> <li>Inlegdiepte</li> <li>Spouwbreedte</li> <li>Morteltype/kwaliteit</li> <li>Type spouwanker</li> <li>Leverancier/staalkwaliteit</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Diameter</li> <li>Inlegdiepte</li> <li>Spouwbreedte</li> <li>Morteltype/kwaliteit</li> <li>Beginexcentriciteit</li> <li>Scheefstand</li> <li>Type Spouwanker</li> </ul> |
| <b>OUTPUT en/of INPUT</b>  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li><math>1/3 * F_{t,max}</math></li> <li>Verplaatsing bij <math>1/3 * F_{t,max}</math></li> </ul>  |  |
| <b>OUTPUT</b>  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li><math>F_{t,max}</math></li> <li>Verplaatsing bij <math>F_{t,max}</math></li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li><math>F_{d,max}</math></li> <li>Vervorming bij <math>F_{d,max}</math></li> <li>Vervorming t.o.v. de scheefstand</li> </ul>  |

Zoals blijkt uit *Tabel 11* zijn twee parameters zowel output als input voor  $F_{t,max}$ . Deze parameters gelden als input bij ‘ $F_{t,max}$ ’ en ‘verplaatsing van het spouwanker bij  $F_{t,max}$ ’. Worden deze twee parameters niet in het model meegenomen (als output), dan worden ‘ $1/3 * F_{t,max}$ ’ en ‘verplaatsing van het spouwanker bij  $1/3 * F_{t,max}$ ’ als output aangenomen. Deze onderverdeling is gemaakt omdat anders een relatie wordt gelegd die niet tijdens de experimenten is opgetreden. Daarnaast kan het eindresultaat  $F_{t,max}$  geen input zijn voor een tussenresultaat  $1/3 * F_{t,max}$ . Dat ‘ $1/3 * F_{t,max}$ ’ een relatie heeft met  $F_{t,max}$  is bekend, omdat deze van elkaar zijn afgeleid maar de grootte van de invloed is niet bekend. Daarom worden in paragraaf 4.3 verschillende analyses uitgevoerd.

Nu de resultaten en de parameters, die mogelijk een relatie hebben met de capaciteit van het spouwanker, bekend zijn, wordt in de volgende paragraaf de werkmethode toegelicht die gebruikt is voor de analyses van deze resultaten en beantwoorden van de hoofdvraag.

## 4.2 Beschrijving van de werkmethode

De gekozen werkmethode moet ervoor zorgen dat een model kan worden opgesteld dat een betrouwbare voorspelling geeft over de uittrek- en drukwaarde van een spouwanker met verschillende parameters. Deze parameters variëren per berekening en dienen in het model eenvoudig aangepast te kunnen worden.

### *Eerste berekening: Student t-test*

Begonnen is met de uitwerking van de *student t-test* op de proefresultaten. In deze test zijn alle resultaten in dezelfde populatie geplaatst en is geen onderscheid gemaakt tussen type spouwanker, spouwbreedte, inlegdiepte en diameter. Komt het resultaat uit student t-test overeen met de gemiddelde waarden uit de experimenten dan kunnen de resultaten van de student t-test als betrouwbaar worden aangehouden. Komen de resultaten niet overeen, dan moet een uitgebreidere analyse worden uitgevoerd.

Voor zowel de resultaten van de trek- als de drukproeven wordt de student t-test uitgevoerd. Het oplossen van vergelijking 4.3 geeft aan of de  $H_0$ -hypothese akkoord is en de voorspelling voor  $F_{t,max}$  en  $F_{d,max}$  gelijk is aan verwachting ( $\mu_0$ ).

$H_0 =$  populatie gemiddelde is  $\mu_0$

$$\text{Toetsen nulhypothese: } t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}} \leq t_{\alpha, v} \quad (4.3)$$

Waarin  $\bar{x}$  het gemiddelde is,  $\mu_0$  verwachting van het resultaat,  $s$  de standaard deviatie,  $n$  het aantal proefresultaten en  $t_{\alpha, v}$  is de kritieke waarde die bij een gegeven significantieniveau hoort van 5%, te vinden in de tabel voor de t-verdelingen (zie statistisch compendium).

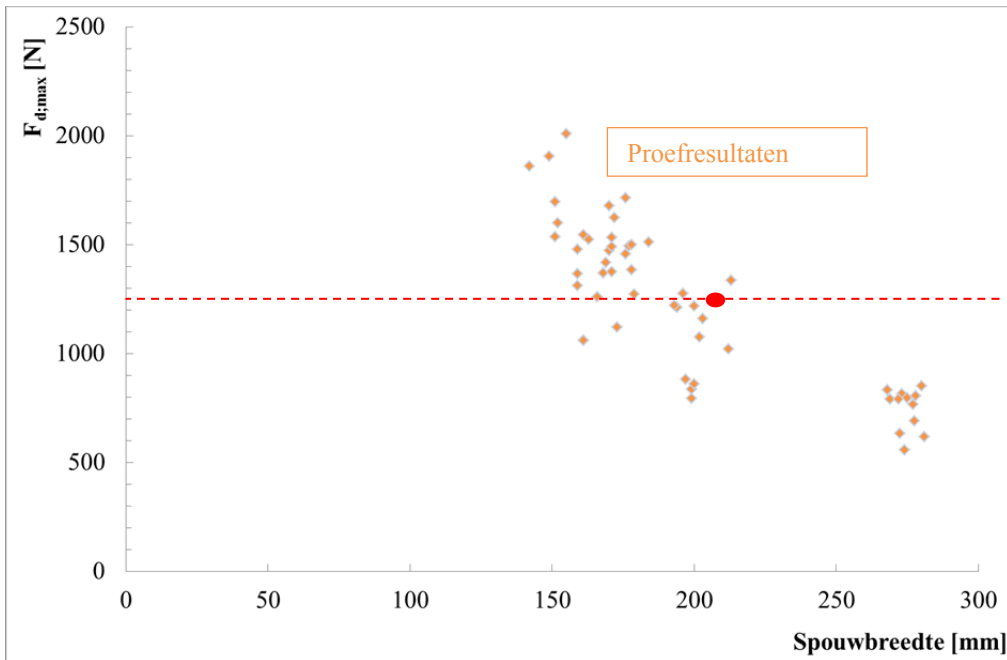
Als de dataset zoals besproken in de vorige paragraaf in vergelijking 4.3 wordt ingevoerd volgen daaruit de volgende populatie gemiddelden voor de twee groepen proefresultaten:

$\mu_0 =$  voorspelde  $F_{t,max} = 2630$  N voor alle spouwankers

$\mu_0 =$  voorspelde  $F_{d,max} = 1219$  N voor alle spouwankers

In bijlage 21 zijn de scripts voor het uitvoeren van deze berekening in het programma ‘R’ weergegeven.

De voorspelling van  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$  met de student-t test is niet correct, omdat bij verdere analyse blijkt dat minimaal één parameter een relatie heeft met  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$ . De interactie van deze parameters beïnvloedt de gemiddelde waarde van  $F_{t,max}$  en  $F_{d,max}$ . *Figuur 89* laat zien dat de spouwbreedte invloed heeft op  $F_{d,max}$  en afhankelijk van de spouwbreedte de capaciteit van het spouwanker bepaald dient te worden. Wordt de voorspelde  $F_{d,max}$  van de student-t test aangehouden, dan wordt de capaciteit van de spouwankers overgedimensioneerd. In *Figuur 89* is bij een spouwbreedte van 200 mm een rode stip gegeven die de voorspelling met de student t-test weergeeft, deze voorspelling is hoger dan  $F_{d,max}$  gevonden via de experimenten uitgevoerd zoals beschreven in hoofdstuk 3. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het gebruik van de student t-test voor deze dataset niet correct is en een verkeerde voorspelling geeft van de uittrek- en drukwaarden van de spouwankers.



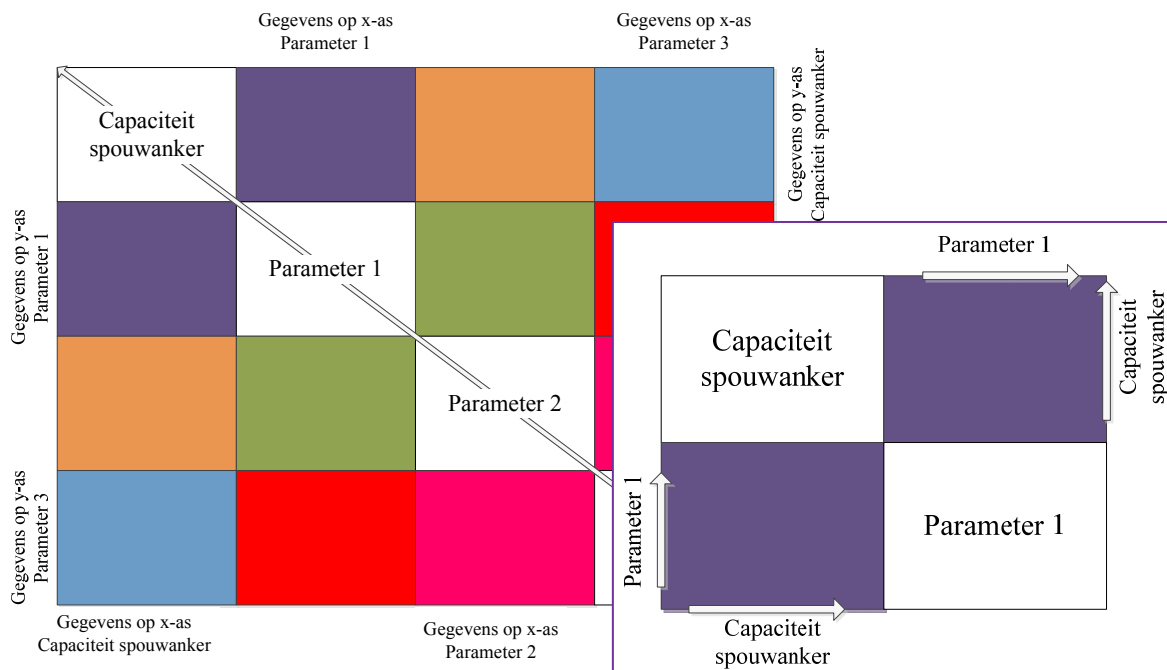
Figuur 89: De voorspelling voor  $F_{d,max}$  mag niet worden uitgevoerd met een student t-test omdat deze afhankelijk is van de spouwbreedte. De figuur laat de uitkomst zien van de student t-test met de rode stippellijn. De oranje punten geven de proefresultaten uit hoofdstuk 3 weer die wel afhankelijk zijn van de spouwbreedte.

De schatting van de capaciteit van het spouwanker is te hoog bij gebruik van de student t-test. Voor de voorspelling van  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$  moet een analyse worden uitgevoerd waarbij de parameters die een relatie hebben met  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$  worden meegenomen.

Begonnen wordt met de optische analyse van de resultaten met behulp van een scatterplot om zo de parameters die geen relatie hebben met  $F_{t,max}$  en  $F_{d,max}$  eruit te filteren.

Scatterplot

De op- en ingemeten parameters kunnen elkaar beïnvloeden en een verkeerd beeld geven bij regressieanalyses. Daarom wordt eerst de relatie van de parameters met  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$  geanalyseerd met behulp van een scatterplot. De gevonden parameters worden meegenomen in de hierop volgende regressieanalyse. In Figuur 90 is een schematische weergave van een scatterplot weergegeven. Met behulp van deze scatterplot wordt de relatie tussen de parameters bepaald.



Figuur 90: Schematische weergave van een scatterplot waarin de relatie tussen de parameters en de capaciteit van het spouwanker wordt geanalyseerd. De paarse vlakken zijn uitgelicht voor de aanduiding van de as weergave.

De scatterplot moet als volgt gelezen worden: In de diagonaal van de scatterplot worden de parameters gegeven die uitgezet zijn tegen  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$ . In de scatterplot worden de relaties tussen de parameters twee keer weergegeven, zoals is aangegeven met de dubbele kleuren. Als naar het ingezoomde blok met de paarse vlakken wordt gekeken, is op de verticale as parameter 1 uitgezet en op de horizontale as de capaciteit van het spouwanker. Elk gekleurd vlak is een dus een aparte grafiek en kunnen de relaties tussen de parameter en de capaciteit van het spouwanker bepaald worden.

De parameters die mogelijk een relatie met de capaciteit van het spouwanker hebben, kunnen bepaald worden middels een trendlijn die door de grafiek getrokken kan worden in de scatterplot. Daarnaast worden de parameters die in de literatuurstudie in hoofdstuk 2 zijn bepaald, meegenomen in de regressieanalyse ter controle van de gevonden literatuur. Met de gevonden parameters die een relatie hebben met  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$  kan een regressieanalyse uitgevoerd worden voor het opstellen van een regressievergelijking die  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$  kan voorspellen.

### Regressieanalyses

Voor het ontwikkelen van een betrouwbaar model worden een aantal regressieanalyses uitgevoerd. Eerst wordt alle data uit de dataset meegenomen (regressieanalyse 1), daarna wordt door verwijderen van uitbijters en individuele analyses op de parameters, of verwijderen van parameters die niet significant zijn de dataset verkleind en met deze dataset kunnen nieuwe regressieanalyses worden uitgevoerd. Het doel hiervan is om tot een model te komen die een goede en betrouwbare voorspelling kan geven voor  $F_{t,max}$  en  $F_{d,max}$ . In totaal worden vier regressieanalyses uitgevoerd, waarbij de dataset elke keer een stapje verkleind wordt door het verwijderen van datapunten.

### Regressieanalyse 1

De eerste regressieanalyse die uitgevoerd wordt is een analyse met alleen die parameters die een relatie hebben met de capaciteit van het spouwanker gevonden via de scatterplot. Deze parameters worden ingevoerd in een lineaire vergelijking van de volgende vorm:

$$F_{t,max} \text{ of } F_{d,max} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \epsilon \quad (4.4)$$

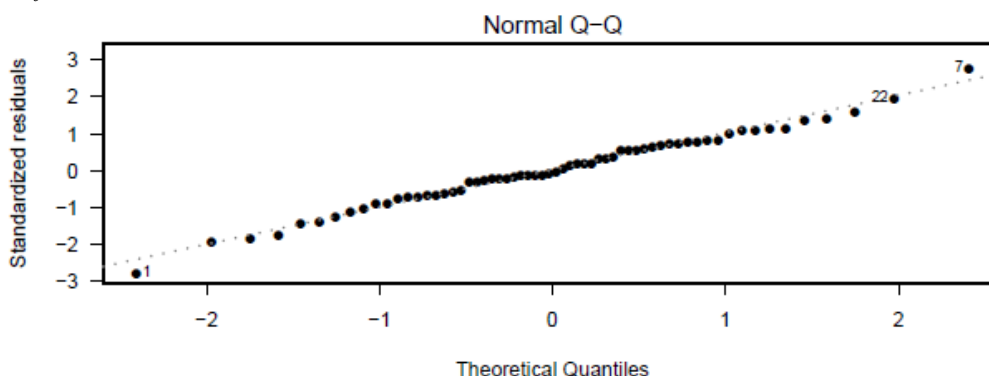
Waarin  $\beta_0$  de coëfficiënt van de variabelen en  $x_1$  de variabelen (parameter die invloed uit oefend op de capaciteit van het spouwanker) is.

Uit deze regressieanalyse kan bepaald worden wat de determinatiecoëfficiënt ( $R^2$ ) van het model, wat de significantie van het model zelf en wat de invloed van de parameters zijn. Is de significante waarde van de parameters kleiner dan 0,05 (5%) dan mag worden aangenomen dat de resultaten (de output) niet op toeval berusten.

### Analyse uitbijters

Om voor de analyse te bepalen of uitbijters (outliers) aanwezig zijn in de proefresultaten, wordt een Normal Q-Q-plot gemaakt (zie *Grafiek 21*).

“Uitbijters zijn proefresultaten die ver afwijken van de gemiddelde voorspelling en die geen relatie met de overige proefresultaten hebben.”



*Grafiek 21: Voorbeeld van een QQ-plot van een dataset waarin de proefresultaten met een cijfer mogelijke uitbijters zijn.*

In *Grafiek 21* zijn op de horizontale as de theoretische waarden uitgezet, tegen op de verticale as de gestandaardiseerde residuen.

*Residu: Verschillen tussen de waargenomen en de door regressieanalyse verkregen voorspelde waarden van een kans variabele.*

Van de linker onder hoek naar de rechtsboven hoek wordt een lijn getrokken, de stippellijn in *Grafiek 21*. Als de resultaten niet rondom deze lijn liggen, dan bestaat de mogelijkheid dat deze uitbijters zijn. Uit de observaties tijdens de experimenten (hoofdstuk 3) moet blijken of deze uitbijters een andere vorm van bezwijken vertonen, andere begincondities hebben gekend of dat opmerkelijke situaties zich hebben voorgedaan, dan worden deze proefresultaten uit de dataset gehaald. Na het verwijderen van de uitbijters wordt een nieuwe regressieanalyse uitgevoerd, omdat de dataset veranderd is.

### Regressieanalyse 2

Net als bij regressieanalyse 1 is het resultaat van de analyse een vergelijking als 4.4, alleen nu met waarden van de herziende dataset. Met deze regressievergelijking kunnen aparte analyses op de parameters worden uitgevoerd, beginnend met de optische analyse doormiddel van box- en densityplotten.

### Boxplot en densityplot

Omdat uit de scatterplot en de Normal QQ-plot niet alle uitbijters gehaald kunnen worden, worden aparte analyses uitgevoerd op de parameters. Deze aparte analyses worden uitgevoerd door het maken van een boxplot en densityplot. Met deze twee plots kunnen een aantal vragen worden beantwoord, namelijk:

- Is de normaalverdeling symmetrisch? (box- en densityplot)
- Wat is de mediaan? (boxplot)
- Wat zijn de minimale en maximale waarde van de proefresultaten? (box- en densityplot)
- Is een tweedeling in de resultaten aanwezig? (densityplot)

Na de individuele analyse van de parameters en beantwoording van de vragen, wordt een nieuwe regressieanalyse uitgevoerd.

### Regressieanalyse 3:

Net als bij de twee voorgaande regressieanalyses volgt als resultaat uit de analyse een vergelijking als 4.4. Met deze nieuwe regressievergelijking zijn vier verschillende analyses uitgevoerd voor de bepaling van de verdeling, de normaliteit van de dataset en de bepaling van de uitbijters in de dataset.

### Standardized residuals versus model predictions /fitted values (1)

In deze analyse wordt geanalyseerd of de variantie van de residuen onafhankelijk is van de afhankelijke variabelen met:  $\hat{Y}_i = x_i^T \hat{\beta} = Y_i - \hat{\epsilon}_i$

Waarin  $\hat{\epsilon}_i = \text{residu}$  en  $Y_i = \text{afhankelijke variabele}$  ( $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$ )

### Standardized residuals versus independent variable (2)

De parameters worden ook apart geanalyseerd om te zien of er geen uitbijters aanwezig zijn. Deze analyse is gelijk aan de vorige analyse alleen ditmaal voor de parameters apart.

### Studentized residuals versus hatvalues (leverage) (3)

Om de individuele proefresultaten te analyseren en de toegevoegde waarde van elk resultaat te analyseren, wordt het hefboomeffect bepaald. Als één resultaat uit de dataset wordt gehaald, kan de regressieanalyse een andere uitkomst hebben. Daarom moeten alle uitbijters uit de analyse worden gehaald.

### Shapiro-Wilk test (4)

Om te bepalen of de verdeling normaal verdeeld is, is de Shapiro-Wilk test uitgevoerd:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.5)$$

Waarin  $x_i$  de proefresultaten vertegenwoordigt,  $n$  is het aantal waarnemingen,  $\bar{x}$  het gemiddelde van de proefresultaten en  $W$  het resultaat van de Shapiro-Wilk test.

De p-waarde van de gevonden  $W$  kan gevonden worden in de tabel die behoort bij de Shapiro-Wilk test (zie statistisch compendium, vakcode 2S410 TU/e) met behulp van de  $W$  en het aantal waarnemingen  $n$ . De gevonden p-waarde bepaald of de verdeling normaalverdeeld is, wat gelijk wordt gesteld met de nulhypothese. De nulhypothese van deze test is dat de populatie normaal verdeeld is. Wanneer de gevonden p-waarde lager is dan de gekozen  $\alpha$ -waarde dan wordt de nulhypothese verworpen. De  $\alpha$ -waarde is de kans dat de proefresultaten niet binnen de verwachting liggen. De verwachting is op 95% aangehouden, wat de waarde van  $\alpha$  gelijk stelt aan 0,05 (5%).

Na deze vier analyses worden de uitbijters die in de analyses zijn geconstateerd uit de dataset gehaald en wordt een nieuwe regressievergelijking opgesteld voor de voorspelling van  $F_{t,max}$  en  $F_{d,max}$ .

#### Regressieanalyse 4:

Ook voor deze analyse wordt een regressievergelijking opgesteld, gelijk aan een vergelijking als 4.4. De interactie tussen de parameters wordt geanalyseerd met vergelijking 4.6. Als er een interactie tussen de parameters aanwezig is, moet voor de voorspelling van  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$  niet vergelijking 4.4 maar vergelijking 4.6 gebruikt worden.

$$F_{t,max} \text{ of } F_{d,max} = \beta_0 * \beta_1 x_1 * \beta_2 x_2 * \dots * \epsilon \quad (4.6)$$

De interactie kan gevonden worden door een lage significante waarde van de parameters. Als deze toenemen bij verandering van de regressievergelijking, is er geen interactie tussen de parameters. Neemt de significante waarden af en zit de  $\alpha \leq 0,05$  (5%) dan is er wel een interactie tussen de parameters. De significante waarde bepaald of de uitkomst berust op toeval. Bij  $\alpha \leq 0,05$  berust de uitkomst niet op toeval.

#### Stap-voor-stap iteratieve analyse

Met vergelijking 4.1 of 4.3 wordt een stap-voor-stap iteratie analyse uitgevoerd. De stap-voor-stap iteratieve analyse van een regressiemodel omvat een automatische selectie van onafhankelijke variabelen. Stapsgewijs wordt door proberen een onafhankelijke variabele toegevoegd, om zo de belangrijkste variabele van het model vrij te maken en mee te kunnen nemen in de regressieanalyse. Zijn de parameters die hieruit volgen gelijk aan de parameters bepaald voor regressievergelijking 4.4 of 4.6, dan kan met die regressievergelijking een voorspelling worden gedaan voor  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$ .

### 4.3 Trekcapaciteit Spouwanker

In deze paragraaf zijn alleen de belangrijkste constatering, formules en analyses gegeven. In bijlage 21 is het script van de analyse voor de proefresultaten van de trekproeven gegeven voor alle analyses.

#### Scatterplot

In *Figuur 91* (volgende pagina) is de scatterplot weergegeven die gemaakt is voor de proefresultaten van de trekproeven. De scatterplot bevat alleen de parameters die een relatie hebben met de capaciteit van het spouwanker, de gehele scatterplot is in bijlage 21 gegeven. Uit de scatterplot (*Figuur 91*) is voor vier parameters een relatie gevonden met  $F_{t,max}$ . Dit zijn:

- De diameter  $x_1$
- De inlegdiepte  $x_2$
- De mortelkwaliteit/type  $x_3$
- Het type spouwanker  $x_4, x_5, x_6$

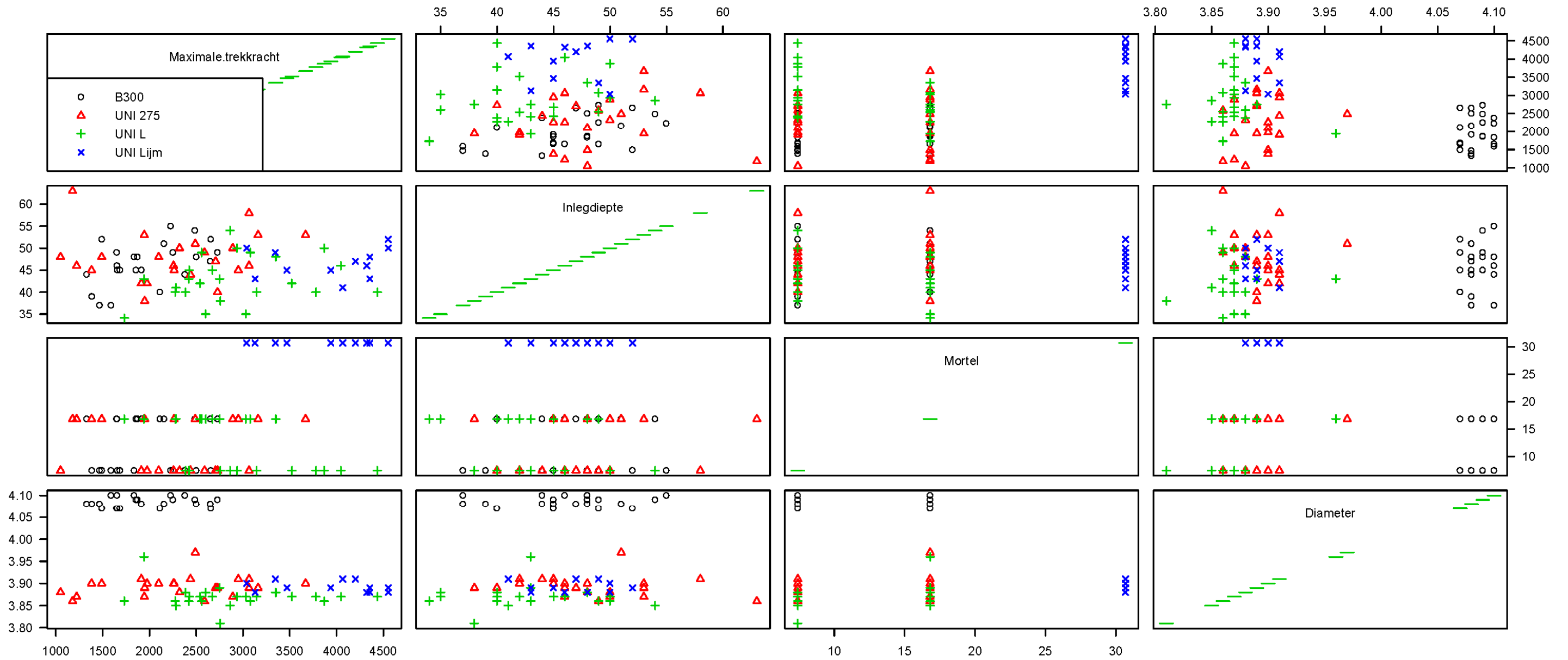
De eerste drie parameters zijn ook in de analytische berekeningen gebruikt voor de bepaling van  $F_{t,max}$  (zie hoofdstuk 5). De vierde parameter is in de analytische berekeningen geen parameter omdat de invloed van het type spouwanker niet bekend is en niet meegenomen is in de formules.

De tweede parameter wat in eerste instantie geen parameter in de experimenten was, is vastgesteld op 40 mm. Door de uitvoerende omstandigheden, is de inlegdiepte gaan variëren, wat geresulteerd heeft in een variabele inlegdiepte tussen 35-65 mm.

Uit de scatterplot is ook te concluderen dat de UNI-Lijm spouwankers (blauwe kruizen) een hogere  $F_{t,max}$  hebben bij een inlegdiepte gelijk aan de overige spouwankers. Daarnaast hebben de UNI-L spouwankers (groene kruizen) gemetseld in metselmortel (M5- of M10-mortel) een hogere  $F_{t,max}$  dan de andere twee typen spouwankers gemetseld in metselmortel (UNI275 en B300). Bij alle gegeven parameters in het scatterplot wordt een relatie tussen de parameter en  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$  gevonden.



Parameter analyse maximale trekkracht



Figuur 91: Scatterplot van de spouwankers belast op trek, met de parameters die een relatie hebben met  $F_{t,max}$



Regressieanalyse

In de regressieanalyse zijn zes coëfficiënten (parameters) ingevoerd (zie Tabel 12). Uit de regressieanalyse volgen variabelen en significante waarden van de coëfficiënten. Is deze significante waarde kleiner dan 0,05, dan is die coëfficiënt niet berust op toeval. In Tabel 12 zijn de coëfficiënten met de variabelen ( $\beta_i$ ) en significantie waarden gegeven.

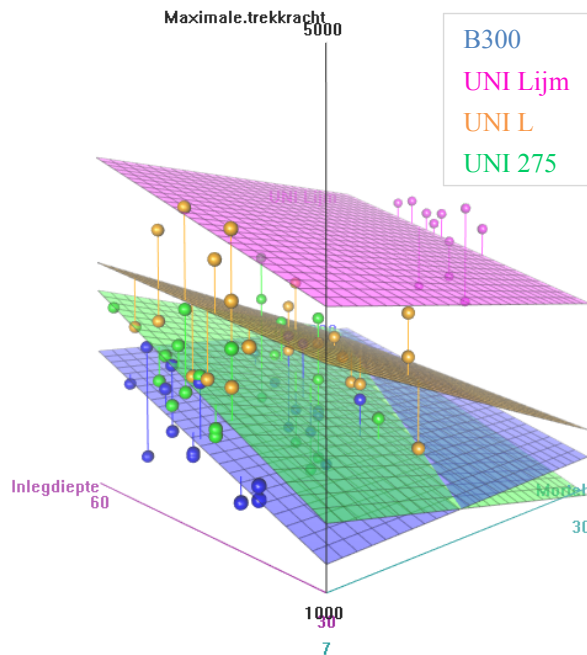
Tabel 12: Uitkomst regressieanalyse met vergelijking 4.7 als resultaat voor  $F_{t,max}$ ; Niet significante waarden zijn gemarkeerd.

| R <sup>2</sup>                   | p-waarde ( $\alpha < 0.05$ betekent uitkomst is geen toeval): |  |
|----------------------------------|---|--|
| 0,55                             | 6.817e-13   |  |
| Coëfficiënten (parameters)       | $\beta_i$   | Pr(> t ) (significantie; $\alpha=0.05$ ) |
| $x_0$ =Intercept (model)         | -7096,8   | 0.61660                                  |
| $x_1$ =Diameter                  | 1976,1  | 0.56817                                  |
| $x_2$ =Inlegdiepte               | 28,6  | 0.03431                                  |
| $x_3$ =Mortelkwaliteit           | -27,0   | 0.07561                                  |
| $x_4$ =Type spouwanker[UNI 275]  | 642,9   | 0.34532                                  |
| $x_5$ =Type spouwanker[UNI L]    | 1440,3  | 0.06353                                  |
| $x_6$ =Type spouwanker[UNI Lijm] | 2846,0  | 0.00045                                  |

De regressievergelijking die volgt uit de waarden in Tabel 12 met de vier parameters uit de scatterplot heeft de volgende vorm:

$$F_{t,max} = -7096.8 + 1976,1x_1 + 28,6x_2 - 27,0x_3 + 642,9x_4 + 1440,3x_5 + 2846,0x_6 \tag{4.7}$$

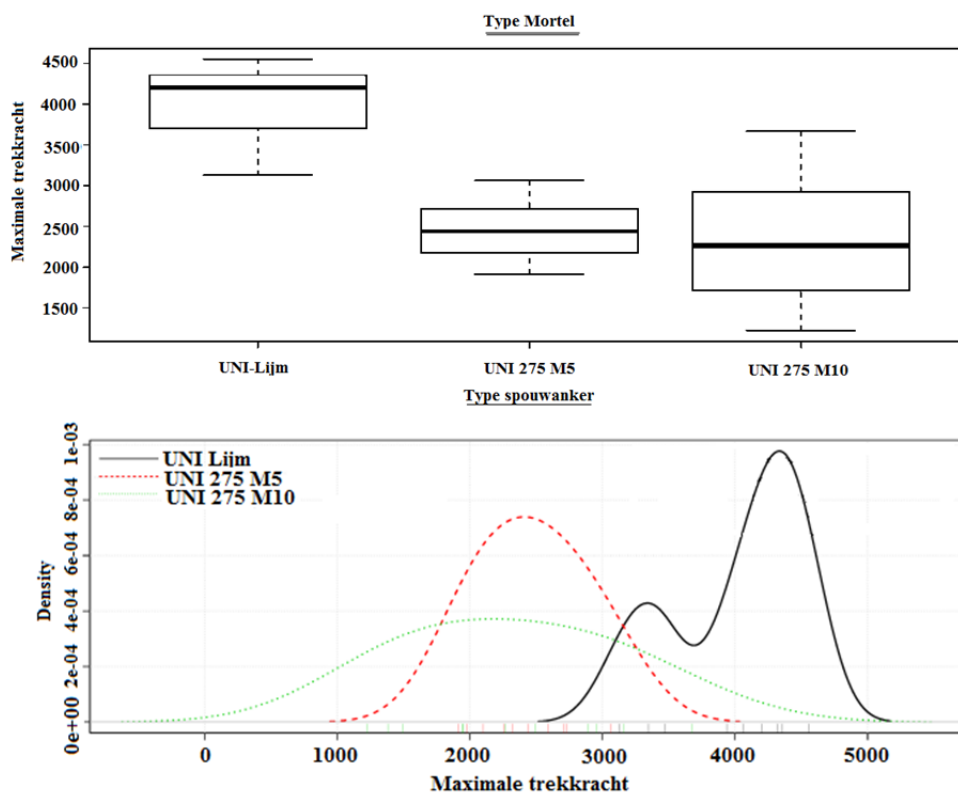
Figuur 92 geeft een grafische weergave van drie van de vier parameters die voorkomen in regressievergelijking 4.7. Als naar de inlegdiepte (paarse x-as lijn) wordt gekeken, wordt bij alle spouwankers bij een afname van  $F_{t,max}$  een afname van de inlegdiepte gevonden. De gekleurde vlakken die een type spouwanker weergeven, zijn gebaseerd op 24 proefresultaten. De spreiding van de inlegdiepte binnen deze resultaten ligt tussen de 35-60 mm. Door interpolatie van de proefresultaten kunnen de inlegdieptes gevonden worden die niet beproefd zijn. Voor meer zekerheid moet meer data in het model worden ingevoerd, waarbij meer variatie in de parameters wordt aangebracht, zodat de voorspelling van  $F_{t,max}$  nauwkeuriger is. Dit is vooral bij de mortel (blauwe x-as lijn) terug te zien, omdat daar de B300 spouwankers bij een betere mortelkwaliteit een toename in capaciteit hebben. De overige drie spouwankers tonen het omgekeerde.



Figuur 92: 3D scatterplot van de drie significante parameters volgens tabel 12

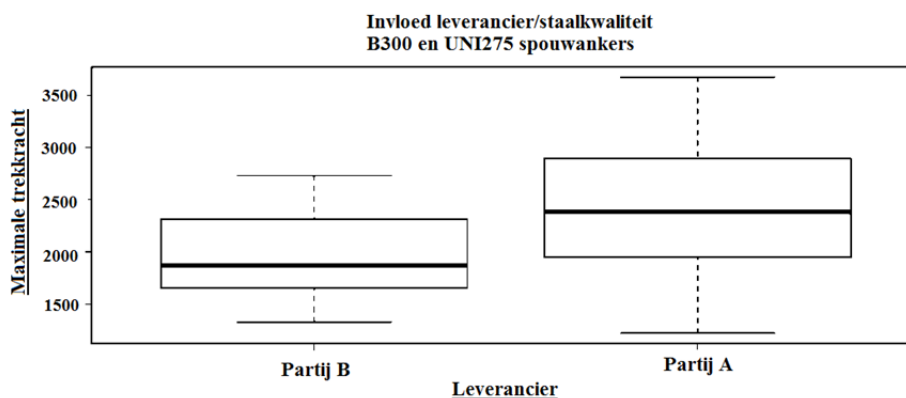
Boxplot en densityplot

Met regressievergelijking 4.7 zijn aparte analyses op de parameters uitgevoerd. Bij de analyse naar de invloed van de type mortel op  $F_{t,max}$ , zijn bij het UNI-Lijm spouwanker twee groepen proefresultaten geconstateerd. In de boxplot in *Grafiek 22* is de asymmetrie van de groep spouwankers te zien. Het densityplot (onder de boxplot in *Grafiek 22*) laat deze tweedeling beter zien, waarbij de twee toppen zich bevinden op 3300 N en 4300 N. Vier spouwankers waarvan twee in een ideaal proefstuk gemetseld zaten en twee in een proefstuk met “Gebrek 3” vormen de top op 3300 N. Hieruit kan dus niet bepaald worden waarom een tweedeling in de proefresultaten is geconstateerd. Naast de tweedeling is uit het boxplot op te maken wat de invloed van de mortel op  $F_{t,max}$  is. Hieruit is te concluderen dat lijm mortel een hogere  $F_{t,max}$  oplevert dan de M5-M10-metselmortels. Het verschil tussen M5- en M10-Mortel is gering.



Grafiek 22: Boxplot (boven) en densityplot (onder) van het UNI-spouwanker gemetseld in drie verschillende morteltypen.

Ook zijn in het experimenteel onderzoek twee partijen spouwankers met dezelfde geometrie gebruikt, ieder met een andere staalkwaliteit en diameter. De diameter is meegenomen als parameter in het model, omdat de staalkwaliteit niet voor het beproeven van elk spouwanker te meten is, maar de diameter wel. Het verschil in diameter, maar ook in staalkwaliteit is terug te zien in de proefresultaten van  $F_{t,max}$  en daarom zijn de resultaten geplot in *Grafiek 23*. Hieruit komt naar voren dat de spouwankers van partij B een gemiddeld lagere  $F_{t,max}$  hebben dan de spouwankers van partij A. In de praktijk betekent dit dat ieder type spouwanker op staalkwaliteit beproefd moet worden.



Grafiek 23: Boxplot van de twee partijen spouwankers (B300 en UNI-spouwanker) met andere staalkwaliteit maar dezelfde geometrie.

Shapiro-Wilk test

Na de individuele analyses van de parameters wordt de Shapiro-Wilk test uitgevoerd en daaruit volgt dat de dataset normaal verdeeld is met een p-waarde van 0,45. Als de p-waarde groter is dan 0,05, dan is de verdeling normaal verdeeld.

Analyse uitbijters

Uit de vier individuele analyses van de parameters (zie werkmethode) blijkt dat een aantal uitbijters aanwezig zijn. Deze uitbijters horen niet thuis in de populaties, vanwege geconstateerde gebreken zoals besproken in hoofdstuk 3. Vijf proefresultaten zijn verwijderd uit de dataset en dat zijn: spouwankers 29, 54, 63, 44 en 72.

Regressieanalyse

Na het verwijderen van de uitbijters is een nieuwe regressieanalyse uitgevoerd. In de regressieanalyse zijn zes coëfficiënten ingevoerd (zie Tabel 13). Uit de regressieanalyse volgen variabelen en significante waarden van de coëfficiënten. Is deze significante waarde kleiner dan 0,05, dan is die coëfficiënt niet berust op toeval. In Tabel 13 zijn de coëfficiënten met de variabelen ( $\beta_i$ ) en significantie waarden gegeven.

Tabel 13: Uitkomst regressieanalyse met vergelijking 4.8 als resultaat voor  $F_{t,max}$ . Niet significante waarden zijn gemarkeerd.

| R <sup>2</sup>                    | p-waarde ( $\alpha < 0.05$ betekent uitkomst is geen toeval): |  |
|-----------------------------------|---|--|
| 0,59                              | 4.457e-16   |  |
| Coëfficiënten                     | $\beta_i$   | Pr(> t ) (significantie; $\alpha=0.05$ ) |
| $x_0$ = Intercept (model)         | -12769,3  | 0.56817                                  |
| $x_1$ = Diameter                  | 3142,0  | 0.378713                                 |
| $x_2$ = Inlegdiepte               | 46,3  | 0.000228                                 |
| $x_3$ = Mortelkwaliteit           | -19,5   | 0.136049                                 |
| $x_4$ = Type spouwanker[UNI 275]  | 969,0   | 0.160525                                 |
| $x_5$ = Type spouwanker[UNI L]    | 1730,4  | 0.032085                                 |
| $x_6$ = Type spouwanker[UNI Lijm] | 3024,4  | 0.000175                                 |

De regressievergelijking die volgt uit de waarden in Tabel 13 luidt als volgt:

$$F_{t,max} = -12769,3 + 3142,0x_1 + 46,3x_2 - 19,5x_3 + 969,0x_4 + 1730,4x_5 + 3024,4x_6 \quad (4.8)$$

Met vergelijking 4.8 kan nu een voorspelling van  $F_{t,max}$  gegeven worden door de coëfficiënten ( $x_n$ ) in te voeren.

4.4 Drukcapaciteit Spouwanker

De belangrijkste resultaten van de uitgevoerde analyses, voordat een voorspelling gegeven kan worden voor  $F_{d,max}$ , worden in deze paragraaf besproken. De overige resultaten van de analyses zijn gegeven in bijlage 21.

Scatterplot

In Figuur 93 (volgende pagina) is de scatterplot weergegeven betreffende de proefresultaten van de drukproeven. De scatterplot bevat alleen de parameters die een relatie hebben met de capaciteit van het spouwanker, de gehele scatterplot is in bijlage 21 gegeven. Na optische analyse van scatterplot, hebben vijf parameters een relatie met  $F_{d,max}$ :

- Scheefstand  $x_1$
- Beginexcentriciteit  $x_2$
- Spouwbreedte  $x_3$
- Diameter  $x_4$
- Vervorming ten opzichte van de scheefstand  $x_5$

Het type spouwanker is niet meegenomen omdat voor alle spouwbreedtes hetzelfde type spouwanker gebruikt is.

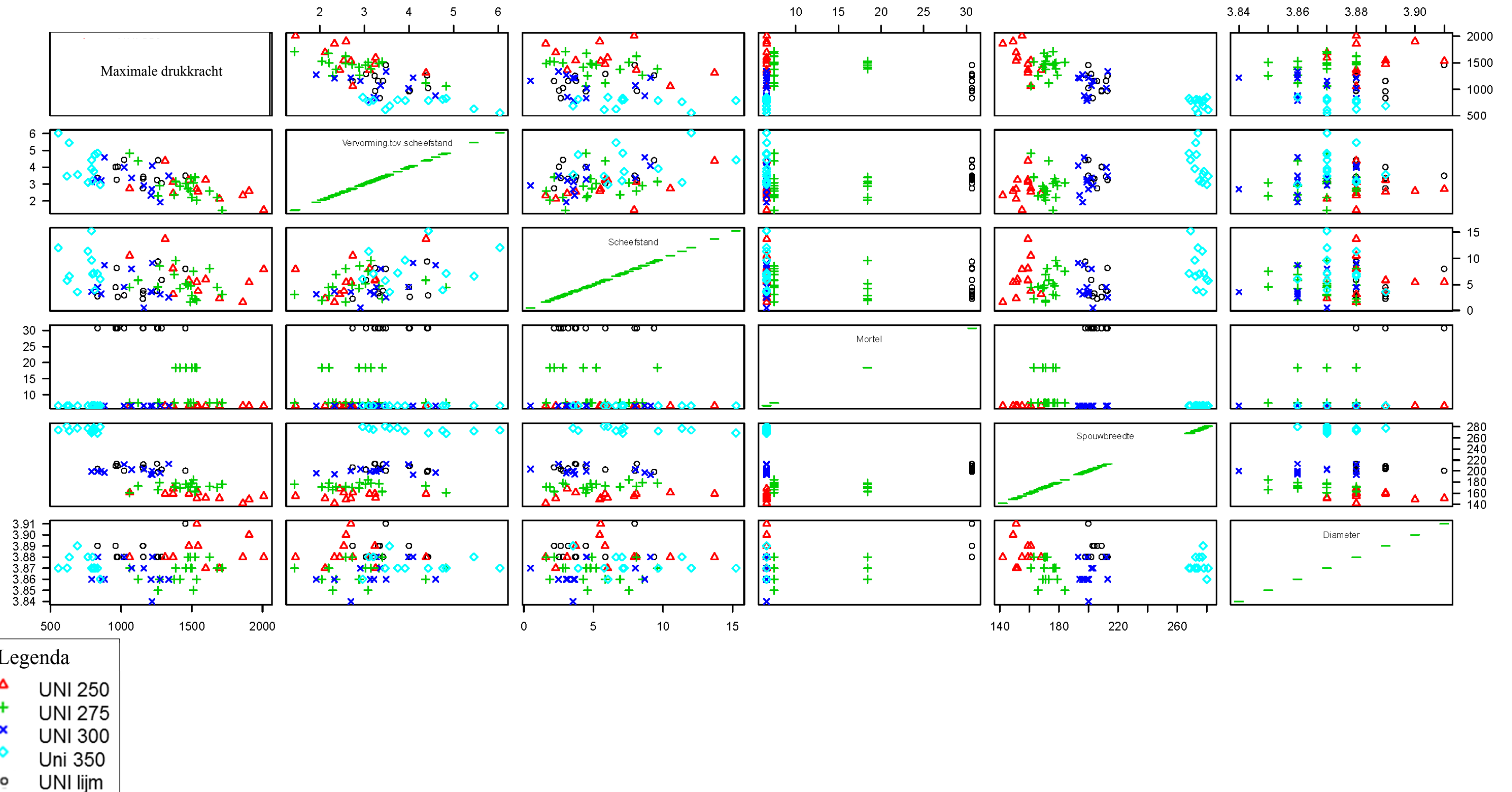
Uit de scatterplot is te concluderen dat de spouwbreedte een relatie heeft met  $F_{d,max}$ . In het scatterplot is dit te zien doordat *hoe groter de spouwbreedte wordt, hoe kleiner de drukkroftopname van het spouwanker is*. Ook de vervorming ten opzichte van de scheefstand laat hetzelfde beeld zien.

Daarnaast kan uit de scatterplot geconcludeerd worden dat de invloed van de lijm mortel op de knikkracht geen andere invloed heeft dan metselmortel, omdat de spouwankers gelijke drukkraft opnemen. Of de mortel invloed heeft op de kniklengte van het spouwanker kan niet met de scatterplot bepaald worden.





### Parameter analyse maximale drukkracht



Figuur 93: Scatterplot van de spouwankers belast op druk, met de parameters die een relatie hebben met  $F_{d,max}$



Regressieanalyse

Nu de maatgevende parameters bepaald zijn wordt een regressieanalyse uitgevoerd. Net als bij trek geldt hier dat als de significante waarde kleiner dan 0,05 is, dan berust de relatie tussen parameter en  $F_{d,max}$  niet op toeval. In *Tabel 14* zijn de coëfficiënten met de variabelen ( $\beta_i$ ) en significantie waarde gegeven.

*Tabel 14: Uitkomst regressieanalyse met vergelijking 4.9 en 4.10 als resultaat voor  $F_{d,max}$ ; Niet significante waarden zijn gemarkeerd.*

|                                       | Regressievergelijking 4.9                   |           | Regressievergelijking 4.10                  |           |
|---------------------------------------|---|-----------|---|-----------|
| R <sup>2</sup>                        | 2.2e-16                                     |           | 8.001e-16                                   |           |
| p-waarde:                             | 0,81  |           | 0.74  |           |
| Coëfficiënten                         | Pr(> t )<br>(significantie; $\alpha=0.05$ ) | $\beta_i$ | Pr(> t )<br>(significantie; $\alpha=0.05$ ) | $\beta_i$ |
| $\beta_0$ =Intercept                  | 0,0497                                      | -11987,5  | 0.2484                                      | -8117,0   |
| $\beta_1$ =Scheefstand                | 0.3309                                      | 7,0       | 0.6605                                      | -3,5      |
| $\beta_2$ =Beginexcentriciteit        | 0.3810                                      | 36,0      | 0.0534                                      | -77,0     |
| $\beta_3$ =Spouwbreedte               | 6.73e-13                                    | -5,3      | 1.85e-15                                    | 6,5       |
| $\beta_4$ =Diameter                   | 0.0171                                      | 3788,4    | 0.1282                                      | 2770,5    |
| $\beta_5$ =Vervorming tov scheefstand | 1.36e-05                                    | -156,5    | n.v.t.                                      | n.v.t.    |

De regressievergelijking die volgt uit de waarden in *Tabel 14* met de vijf parameters uit de scatterplot luidt als volgt:

$$F_{d,max} = -11987,5 + 7,0x_1 + 36,0x_2 - 5,3x_3 + 3788,4x_4 - 156,5x_5 \tag{4.9}$$

Uit *Tabel 14* bij vergelijking 4.9 volgt dat vier parameters significant zijn, waarvan één een output is (namelijk vervorming t.o.v. scheefstand). Als deze parameter niet meegenomen wordt in de regressieanalyse, veranderen de significante waarden van de parameters (*Tabel 14*) en de vergelijking in:

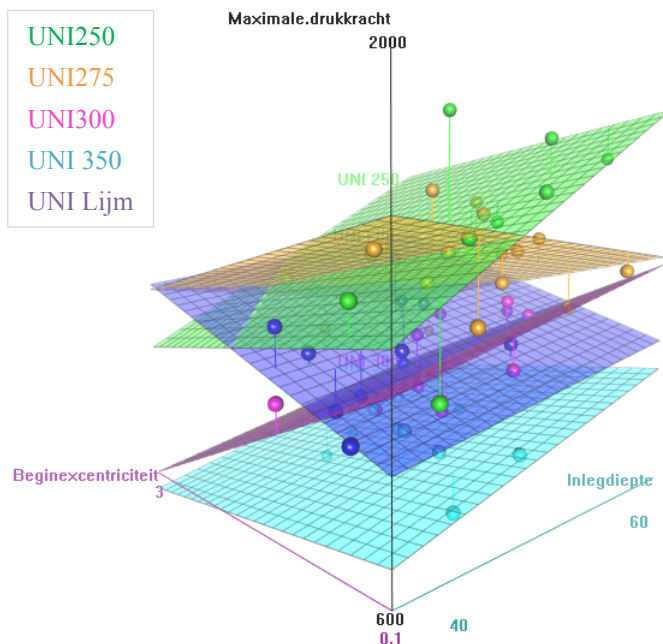
$$F_{d,max} = -8117,0 - 3,5x_1 - 77,0x_2 + 6,5x_3 + 2770,5x_4 \tag{4.10}$$

Na verwijderen van de parameter ‘vervorming t.o.v. scheefstand’ worden de overige vier parameters nog signifikanter, waaruit geconcludeerd wordt dat de vervorming t.o.v. scheefstand een relatie heeft met de parameters of deze beïnvloed. Daarom wordt een nieuwe regressieanalyse uitgevoerd om de relatie van de vier parameters met de vervorming t.o.v. scheefstand te bepalen. De output  $y$  is de vervorming ten opzichte van de scheefstand en heeft als vergelijking:

$$F_{d,max} = -24,7 - 0,7x_2 - 0,0077x_3 + 6,5x_4 + 0,067x_5 \tag{4.11}$$

Bij deze regressieanalyse heeft alleen de diameter ( $x_4$ ) geen significante waarde kleiner dan 5%. Invloed van de diameter kan voor deze ‘ $y$ ’ berusten op toeval. Om de vervorming ten opzichte van de scheefstand mee te nemen in de analyse worden alle vier de parameters (scheefstand, beginexcentriciteit, spouwbreedte en diameter) in de regressieanalyse meegenomen. De vervorming ten opzichte van de scheefstand wordt niet apart meegenomen omdat deze de overige parameters beïnvloed en indirect meegenomen wordt in de overige vier parameters.

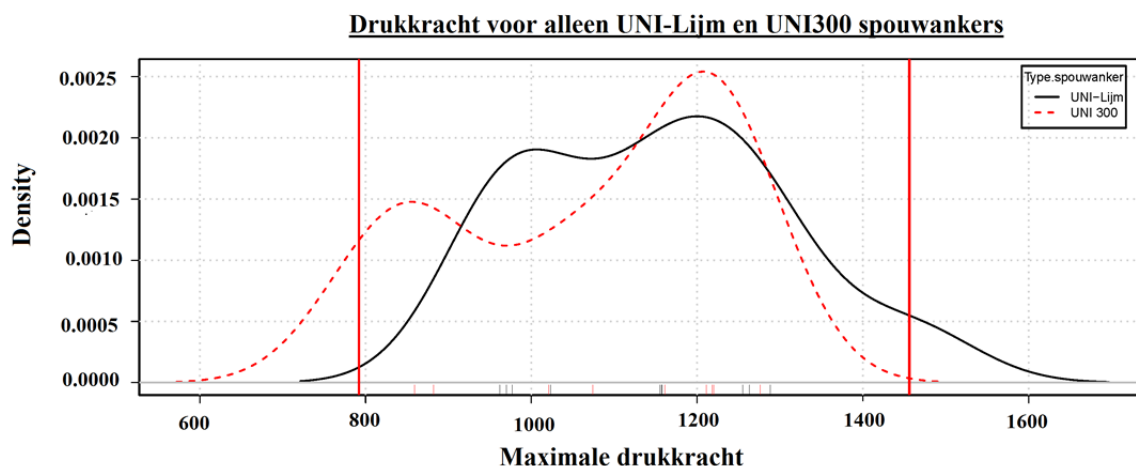
In *Figuur 94* zijn drie variabelen uit vergelijking 4.10 uitgezet in een 3D scatterplot, zodat de invloed van de parameters op het type spouwanker beoordeeld kan worden. Uit dit figuur is de beginexcentriciteit per type spouwanker uitgezet tegen  $F_{d,max}$ . De beginexcentriciteit heeft niet bij elk type spouwanker dezelfde invloed, wat wel verwacht wordt als naar het mechanicamodel van een staaf belast op buiging en normaalkracht gekeken wordt. *Figuur 94* laat dan ook zien dat er nog veel onduidelijkheid is over de invloed van bepaalde parameters. Bij toevoeging van meer datapunten wordt de voorspelling nauwkeuriger.



Figuur 94: 3D scatterplot van de drie significante parameters volgens tabel 14.

#### Boxplot en densityplot

Doordat de vervorming ten opzichte van de scheefstand niet in de regressieanalyse als variabele meegenomen wordt, heeft de spouwbreedte een grotere invloed op  $F_{d,max}$ . Bij nadere analyse van de parameters blijkt dat een tweedeling in de resultaten van de UNI300 spouwankers aanwezig is (Figuur 95). Deze tweedeling is ontstaan door de mate van inklemming van het spouwanker in de mortel. Als het spouwanker los heeft gezeten, is de verplaatsing bij  $F_{d,max}$  groter. Dit was bij vier spouwankers het geval en die hebben dus een grotere verplaatsing bij  $F_{d,max}$  dan de andere spouwankers. Daardoor zijn twee groepen ontstaan in het densityplot. Om deze reden is de inlegdiepte in de regressieanalyse meegenomen. Daarnaast is de invloed van het type spouwanker gering op  $F_{d,max}$  zoals blijkt uit Figuur 95, waarbij de toppen van de grafieken vrijwel op dezelfde maximale drukkracht liggen.



Figuur 95: Densityplot voor de invloed van het type spouwanker op  $F_{d,max}$ .

#### Shapiro-Wilk test

Uit de Shapiro-Wilk test volgt dat de verdeling normaal verdeeld is met een p-waarde van 0,80. Als de p-waarde groter is dan 0,05, dan is de verdeling normaal verdeeld.

#### Regressieanalyse

Als naar de trendlijn van de proefresultaten in hoofdstuk 3 wordt gekeken heeft de kniklengte een 4<sup>de</sup> machtsfunctie. Dus in dit model wordt dit eveneens meegenomen en wordt de spouwbreedte tot de vierde macht

in de regressievergelijking geplaatst. In *Tabel 15* worden de resultaten van de regressieanalyse weergegeven, waarmee regressievergelijking 4.12 kan worden opgesteld.

*Tabel 15: Uitkomst regressieanalyse met vergelijking 4.12 als resultaat voor  $F_{d,max}$ ; Niet significante waarden zijn gemarkeerd.*

| $R^2$                                    | p-waarde ( $\alpha < 0.05$ betekent uitkomst is geen toeval): |                  |
|--|---|------------------|
| 0,76                                     | 4.179e-16   |                  |
| Coëfficiënten                            | Pr(> t )<br>(significantie; $\alpha = 0.05$ )                 | $\beta_i$        |
| $\beta_0$ = Intercept                    | 0.274092  | -7926,1          |
| $\beta_1$ = Scheefstand                  | n.v.t.  | n.v.t.           |
| $\beta_2$ = Beginexcentriciteit          | 0.034360  | -81,7            |
| $\beta_3$ = Spouwbreedte                 | 0.000161  | -10,7            |
| $\beta_{33}$ = Spouwbreedte <sup>4</sup> | 0.092727  | $9,9 \cdot 10^8$ |
| $\beta_4$ = Diameter                     | 0.123658  | 2830,6           |
| $\beta_5$ = Vervorming tov scheefstand   | n.v.t.  | n.v.t.           |
| $\beta_6$ = Inlegdiepte                  | 0.299842  | 4,4              |

De regressievergelijking die volgt uit de waarden in *Tabel 15* luidt als volgt:

$$F_{d,max} = -7926,1 - 81,7x_2 - 10,7x_3 + 9,9 \cdot 10^8 x_{33}^4 + 2830,6x_4 + 4,4x_6 \quad (4.12)$$

Met vergelijking 4.12 kan nu een voorspelling van  $F_{d,max}$  gegeven worden door de coëfficiënten ( $x_n$ ) in te voeren.

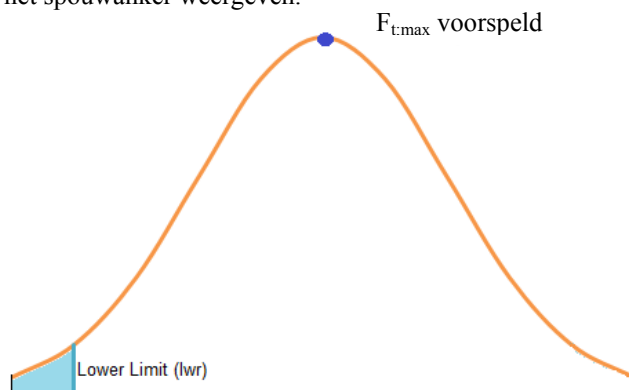
Ondanks dat uit *Tabel 15* volgt dat drie parameters geen significante waarden hebben, worden deze wel meegenomen in regressievergelijking 4.12. Uit hoofdstuk 2 blijkt namelijk dat deze parameters mogelijk een invloed hebben op de capaciteit van het spouwanker en uit praktijkonderzoek volgt dat deze variëren.

#### 4.5 Resultaten

Voor het statistisch beoordelen van de proefresultaten is één hoofdvraag opgesteld aan het begin van dit hoofdstuk, die in deze paragraaf beantwoord wordt voor zowel  $F_{t,max}$  als  $F_{d,max}$ :

*Welke  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$  kunnen de verschillende typen spouwankers met 95% zekerheid opnemen, oftewel wat is de karakteristieke  $F_{t,max}$  en  $F_{d,max}$ ?*

Bij deze vraag is uitgegaan van een 5% ondergrens omdat dan de karakteristieke waarde van  $F_{t,max}$  en  $F_{d,max}$  berekend kan worden. In *Figuur 96* is de normaalverdeling met deze ondergrens en de voorspelde capaciteit van het spouwanker weergegeven.



*Figuur 96: Normalverdeling met ondergrens van 5% aangegeven met Lower Limit en de voorspelde  $F_{t,max}$  of  $F_{d,max}$ .*

### 4.5.1 Trek

Met de regressievergelijking 4.8 worden voorspellingen van  $F_{t,max}$  gemaakt, met als lower limit de karakteristieke waarde van  $F_{t,max}$ .

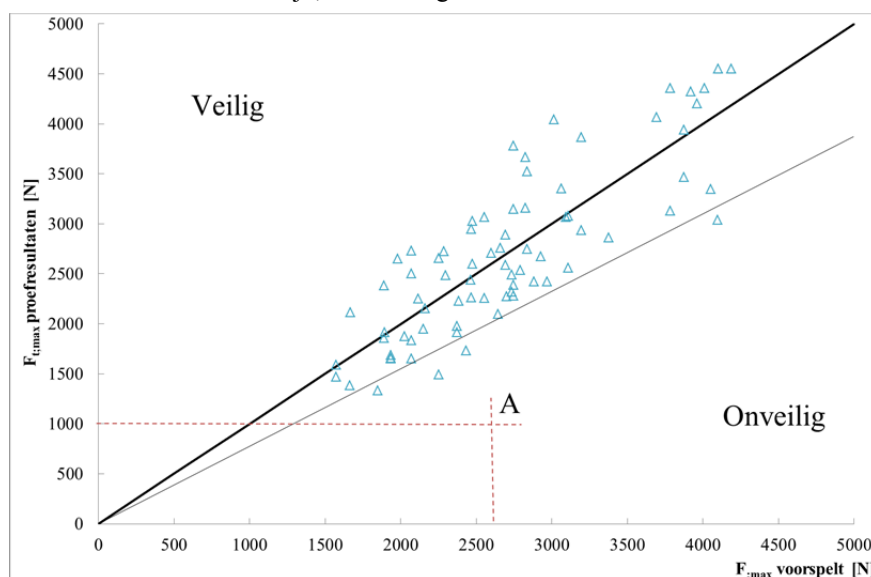
$$F_{t,max} = -12769,3 + 3142,0x_1 + 46,3x_2 - 19,5x_3 + 969,0x_4 + 1730,4x_5 + 3024,4x_6$$

De voorspelling wordt gebaseerd op eigenschappen als: type spouwanker, inlegdiepte, diameter en mortelkwaliteit. Vanwege de kleine dataset en de kleine variatie binnen de parameters, kan deze analyse niet voor alle gekozen parameters worden gebruikt. De voorspellingen per type spouwanker en eigenschappen zijn gegeven in Tabel 16. De voorspelde waarde met regressievergelijking 4.8 wordt in de tweede kolom gegeven. Uit deze tabel is te concluderen dat alle spouwankers een voorspelde gemiddelde waarde boven de 1000N hebben, maar dat de karakteristieke waarde van het B300 spouwanker met 517N in M5-mortel en 366 N in M10-mortel onder de 1000N eis uit de EC6 ligt.

Tabel 16: Voorspellingen voor  $F_{t,max}$  met regressievergelijking 4.8 en normaalverdeling van de proefresultaten

| Spouwanker                         | Lower limit (lwr) (N) | Voorspelde $F_{t,max}$ (N) |
|------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| M5-mortel, Ø4 en inlegdiepte 40mm  |                       |                            |
| B300                               | 517                   | 1503                       |
| UNI 275                            | 1409                  | 2472                       |
| UNI L                              | 2061                  | 3234                       |
| M10-mortel, Ø4 en inlegdiepte 40mm |                       |                            |
| B300                               | 366                   | 1357                       |
| UNI 275                            | 1273                  | 2326                       |
| UNI L                              | 1927                  | 3088                       |
| M15-Mortel, Ø4 en inlegdiepte 40mm |                       |                            |
| UNI-Lijm                           | 3008                  | 4090                       |

In Grafiek 24 zijn de voorspelde waarden met regressievergelijking 4.8 uitgezet tegen de proefresultaten (hoofdstuk 3). De onderste grijze lijn geeft de 5% ondergrens van het model aan. De gevonden waarden liggen rondom de ideale zwarte lijn, waardoor geconcludeerd kan worden dat het statistische model klopt.



Grafiek 24: Vergelijking tussen de voorspelde  $F_{t,max}$  afkomstig uit regressievergelijking 4.8 en de  $F_{t,max}$  afkomstig uit de proefresultaten. De grijze lijn geeft de 5% ondergrens weer van het statistische model. Punt A is de voorspelde trekcapaciteit van de spouwankers met de student t-test.

Doordat de spouwankers per type, mortelkwaliteit, staalkwaliteit en inlegdiepte zijn opgedeeld kan een betere voorspelling worden gegeven van  $F_{t,max}$  en is de gemiddelde waarde, berekend via de student t-test aan het begin van dit hoofdstuk, niet juist voor deze dataset. In Grafiek 24 is namelijk in punt A aangegeven, dat de voorspelde waarde volgens de student t-test van 2630N is (horizontale as) en op de verticale as 1000N aangeeft waarop het proefstuk bezwaken is. Dat betekent dat het spouwanker bezwaken is bij 1000N en voorspeld was 2630N, oftewel de capaciteit van het spouwanker zou overgedimensioneerd worden op basis van de student t-test. Daarom is het model (student t-test) voor de bepaling van een gemiddelde waarde voor de gehele dataset niet juist. Er wordt namelijk geen rekening gehouden met de overige parameters die invloed uitoefenen op  $F_{t,max}$ .

Voor een juiste voorspelling van  $F_{t,max}$  moet regressievergelijking 4.8 gebruikt worden.



### 4.5.2 Druk

Met regressievergelijking 4.12 worden voorspellingen van  $F_{d,max}$  gedaan. De voorspelling is:

$$F_{d,max} = -7926,1 - 81,7x_2 - 10,7x_3 + 9,9 \cdot 10^8 x_{33}^4 + 2830,6x_4 + 4,4x_6$$

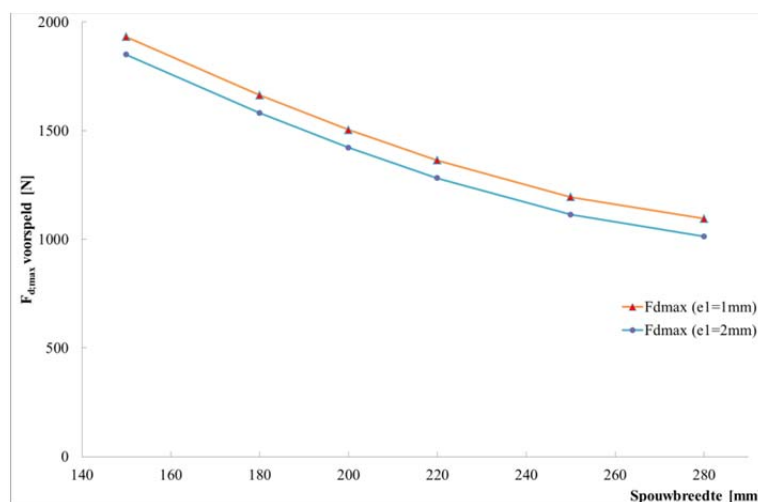
Deze voorspelling is gebaseerd op de eigenschappen: diameter, beginexcentriciteit, spouwbreedte en inlegdiepte.

De voorspelling per type spouwanker en eigenschappen die volgen uit het invullen van de regressievergelijking 4.12 zijn gegeven in *Tabel 17* en *Grafiek 25*. Wordt de beginexcentriciteit veranderd naar 5 mm bij een spouwbreedte van 180 mm dan verlaagd de lower limit met meer dan 400 N naar 837 N. Dat betekent dat de invloed van de beginexcentriciteit op de capaciteit van het spouwanker groot is. Naast de beginexcentriciteit heeft de spouwbreedte ook invloed op de capaciteit van het spouwanker. In *Grafiek 25* is op de horizontale as de spouwbreedte uitgezet tegen op de verticale as de voorspelde capaciteit van het spouwanker. Uit de grafiek is op te maken dat de capaciteit tot een spouwbreedte van 240 mm lineair afneemt. Daarna stagneert dit en krijgt de lijn een andere richtingscoëfficiënt waardoor de invloed van de spouwbreedte afneemt.

Omdat de dataset te klein is om de invloed van de mortel en scheefstand te beoordelen moet meer data verzameld worden. Deze analyse is alleen geldig voor UNI275 spouwanker Ø4 voor een spouwbreedte tussen 150-280 mm.

*Tabel 17: Voorspellingen voor  $F_{d,max}$  met behulp van statistische waarde bepaling en normaalverdeling*

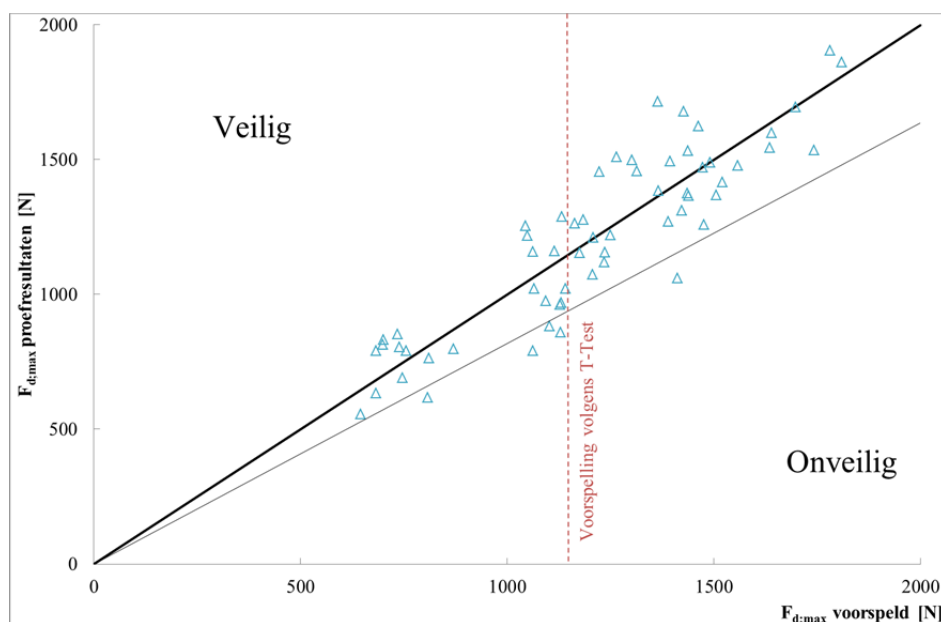
| Spouwbreedte                                  | Lower limit (lwr) (N) | Voorspelling $F_{t,max}$ (N) |
|---|-----------------------|------------------------------|
| Ø4, beginexcentriciteit=1mm, inlegdiepte=40mm |                       |                              |
| 150 mm  | 1463                  | 1932                         |
| 180 mm  | 1191                  | 1664                         |
| 200 mm  | 1024                  | 1504                         |
| 220 mm  | 877                   | 1363                         |
| 250 mm  | 711                   | 1195                         |
| 280 mm  | 614                   | 1095                         |
| Ø4, beginexcentriciteit=2mm; inlegdiepte=40mm |                       |                              |
| 150 mm  | 1378                  | 1850                         |
| 180 mm  | 1107                  | 1582                         |
| 200 mm  | 941                   | 1422                         |
| 220 mm  | 796                   | 1281                         |
| 250 mm  | 630                   | 1114                         |
| 280 mm  | 533                   | 1013                         |



*Grafiek 25: Invloed van de spouwbreedte op voorspelde  $F_{d,max}$  met regressievergelijking 4.12.*

In *Grafiek 26* zijn de voorspelde waarden van regressievergelijking 4.12 uitgezet tegen de proefresultaten. De gevonden waarden komen overeen en liggen rondom de zwarte lijn, waardoor geconcludeerd kan worden dat het statistische model klopt.

Ook is in *Grafiek 26* de voorspelde waarde van de student t-test gegeven. Deze waarde zou dus gelden voor alle typen spouwankers en spouwbreedtes. Dat betekent dat de helft van de spouwankers onder deze waarde presteert. Voor een voorspelling van  $F_{d,max}$  is de student t-test dus geen goede benadering en is de voorspelling met regressievergelijking 4.12 nauwkeuriger.



Grafiek 26: Vergelijking tussen de voorspelde  $F_{d,max}$  met regressievergelijking 4.10 en de  $F_{d,max}$  afkomstig uit de proefresultaten. De grijze lijn geeft de 5% ondergrens weer van het statistische model. De rode stippellijn weergeeft de voorspelde drukcapaciteit van de spouwankers met verschillende spouwbreedtes berekend met de student t-test.

#### 4.5.3 Overige resultaten

Naast de voorspelling voor  $F_{t,max}$  en  $F_{d,max}$  kan ook de nauwkeurigheid van de proefstukken bepaald worden. De inlegdiepte was vastgelegd op 40 mm. Uit de analyse hiervan blijkt dat de gemiddelde inlegdiepte bij de spouwankers belast op trek 45 mm is en bij spouwankers belast op druk 47 mm. Deze inlegdiepte zou een vaste parameter zijn in de analyse, maar door de onnauwkeurigheid tijdens het metselen, is het een variabele geworden.

De verplaatsing van de spouwankers bij  $1/3 \cdot F_{t,max}$  moet kleiner zijn dan 1 mm, volgens EC6. Alle spouwankers belast op trek voldoen hieraan en hebben een gemiddelde verplaatsing van 0,17 mm bij  $1/3 \cdot F_{t,max}$ .

## 4.6 Conclusie

Over de werkmethode kunnen een aantal conclusies getrokken worden:

- Geconcludeerd kan worden dat de resultaten van zowel de trek- als de drukproeven normaal verdeeld zijn.
- Aan de hand van de scatterplot kan een verdeling van de parameters gemaakt worden die wel of geen relatie hebben met de output. De scatterplot is een eerste check voordat een regressieanalyse uitgevoerd kan worden.
- De student t-test mag niet gebruikt worden voor een dataset waarbij meerdere parameters invloed hebben op de output. Zoals uit §4.2 blijkt, worden dan verkeerde capaciteiten van het spouwanker gevonden.
- Uitbijters kunnen worden gefilterd met een QQ-plot en de individuele analyses van de parameters.
- De opgestelde regressievergelijkingen voor zowel de druk als de trekcapaciteiten zijn na invullen van de parameters een juiste voorspelling van de capaciteit van het spouwanker met een zekerheid van 95% omdat deze overeenkomt met de proefresultaten.
- Door de grote spreiding van de proefresultaten is het bepalen van de gemiddelde capaciteit van het spouwanker niet mogelijk. Met behulp van de opgestelde regressievergelijkingen in dit hoofdstuk kan nu een voorspelling van de capaciteit van het spouwanker worden gedaan met de verschillende parameters en een zekerheid van 95%. De parameters meegenomen in de regressieanalyse zijn niet opgenomen in de formules van de normen, publicaties of voorschriften waardoor de berekening van de capaciteit van het spouwanker te hoog uitkomt.

Over de gevonden resultaten uit het model kan het volgende vermeld worden:

- Als naar de resultaten van trek- en drukcapaciteit van het UNI275 spouwanker Ø4mm gekeken wordt, is daaruit te concluderen dat de drukcapaciteit in de meeste gevallen maatgevend is, maar dit is afhankelijk van de spouwbreedte. Is de spouwbreedte 150 mm, dan is de trekcapaciteit van het spouwanker maatgevend (zie Tabel 16 en Tabel 17).
- Voor het toetsen van spouwankers moeten beide capaciteiten (trek en druk) gecontroleerd worden, omdat beide maatgevend kunnen zijn.

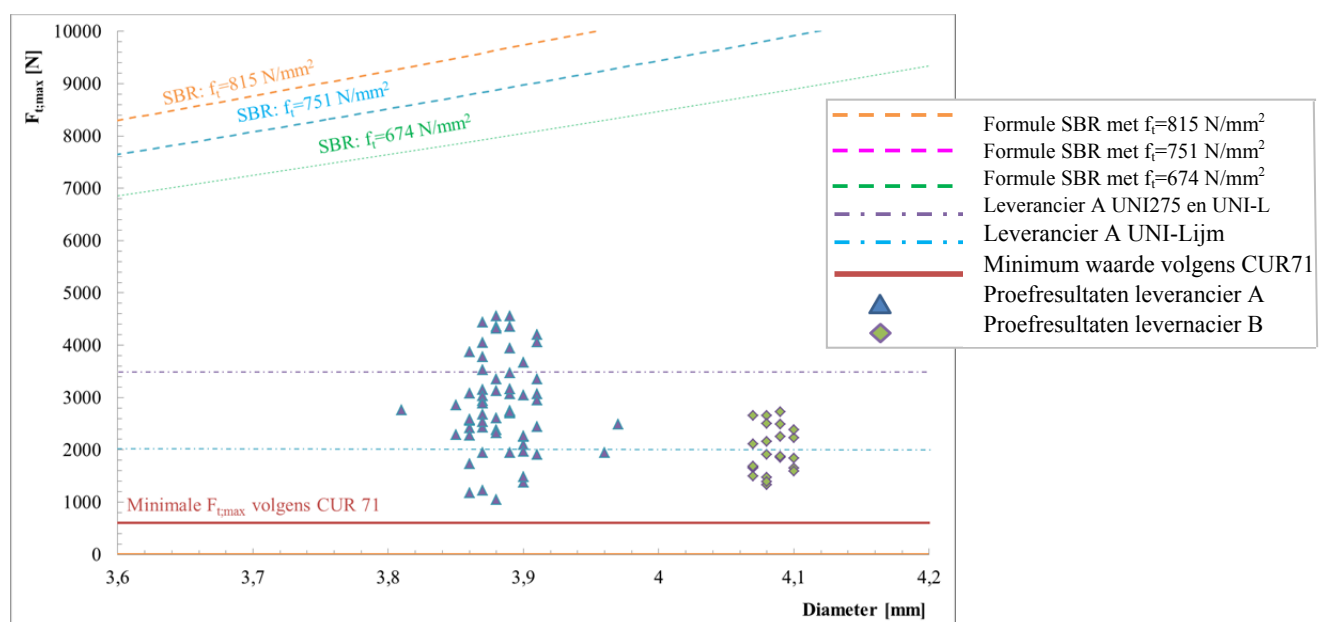
## 5 Analytisch onderzoek

Ter ondersteuning van het experimentele onderzoek en het bepalen van de boven- en ondergrenzen van de rekenmethoden voor de trek- ( $F_{t,max}$ ) en drukcapaciteit ( $F_{d,max}$ ), zijn analytische berekeningen gemaakt. In dit hoofdstuk zijn de proefresultaten uit hoofdstuk 3 vergeleken met toetsingen uit normen, voorschriften en publicaties en de minimale capaciteiten volgens opgave leverancier. Het hoofdstuk is opgedeeld in een paragraaf over trekcapaciteit en een paragraaf over drukcapaciteit. Per paragraaf zijn allereerst de toetsingen uit de normen toegelicht en vergeleken met de proefresultaten uit hoofdstuk 3. Vervolgens zijn analytische berekeningen gemaakt betreffende de geconstateerde gebreken uit hoofdstuk 3 met de gevonden literatuur uit hoofdstuk 2.

### 5.1 Trekcapaciteit Spouwanker

#### 5.1.1 Normen

In het literatuuronderzoek (hoofdstuk 2) zijn berekeningen weergegeven voor de bepaling van  $F_{t,max}$  verkregen uit normen, publicaties en voorschriften. In deze paragraaf wordt dit kort herhaald en *Grafiek 27* toont het resultaat van deze berekeningen waarmee  $F_{t,max}$  is weergegeven:



*Grafiek 27:*  $F_{t,max}$ -diameter grafiek weergegeven op basis van de toetsingen uit de SBR [10], CUR 71 [6], waarden van de leverancier en de proefresultaten. De stippellijnen geven per type spouwanker de treksterkte weer, berekend met vergelijking 5.1. De streep-stippellijnen geven de waarden volgens de leverancier weer. De doorgetrokken lijn is de minimale uittrekwaarde volgens CUR 71. De proefresultaten zijn met driehoeken en ruiten weergegeven, afhankelijk van de staalkwaliteit van het spouwanker.

$$\text{SBR [10]: } F_{t,sp} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sigma_t \quad (5.1)$$

SBR gaat uit van het bezwijken van het spouwanker op treksterkte. Daarvoor moet de aanhechtsterkte groter zijn dan de treksterkte van het spouwanker. In *Grafiek 27* is deze grens van het bezwijken van het spouwanker aangegeven, waar het resultaat afhankelijk is van de diameter (roze, oranje en groene lijnen, *Grafiek 27*).

$$\text{CUR 71 [6]: } \sigma_s \geq 300 \text{ N/mm}^2 \\ F_{t,sp} \geq 600 \text{ N}$$

CUR 71 adviseert een minimale  $F_{t,max}$  van 600 N, waar alle spouwankers onafhankelijk van de omstandigheden aan moeten voldoen. CUR 71 toetst  $F_{t,max}$  ook en deze toetsing is gelijk aan formule 5.1.

Eurocode 6 (EC6) [1] stelt alleen een eis aan de inlegdiepte:

$$l_b = 40 \text{ mm} \quad [\text{NEN 845-1-1}]$$

Daarnaast heeft EC6 de volgende toetsing voor de trekcapaciteit van het spouwanker:

$$F_{t,max} = \frac{F_{t,max;d}}{\gamma_m} \quad (5.2)$$

Waarin  $F_{t,max;d}$  de capaciteit van het spouwanker is volgens opgave van de leverancier, gebaseerd op de gemiddelde waarde van de proefresultaten uit proeven uitgevoerd door de leverancier.

NEN 6790 [3] toetst de trekcapaciteit van het spouwanker met dezelfde formule als EC6, gelijk aan formule 5.2. De onzekerheid in formule 5.2 is dat de leverancier een gemiddelde waarde geeft van  $F_{t,max}$  die hoger kan liggen dan de gemiddelde  $F_{t,max}$  uit de experimenten en in de praktijk bereikt worden, zoals in *Tabel 18* wordt aangeduid. Voor de toetsing van de spouwankers door de leverancier worden de proefstukken onder ideale situatie verwerkt, wat resulteert in verschillende benaderingen van deze gemiddelde waarde ten opzichte van de uitkomsten uit de praktijk. Ondanks dat de verwerking en bepaling van de gemiddelde waarde is vastgelegd in EN 845-1, -5 en -6. Als met de formules uit EC6 en NEN 6790 gerekend wordt, moet rekening worden gehouden met mogelijk een onjuiste gemiddelde waarde verkregen van de leverancier (zoals blijkt uit *Tabel 18*).

Tabel 18: Vergelijking waarden volgens leverancier en proefresultaten uit hoofdstuk 3

| Spouwanker   | Gemiddelde $F_{t,max}$<br>Leverancier [N] | $F_{t,max}$ Experimenteel [N] |                     |                        |      |
|--|---|-------------------------------|---------------------|------------------------|------|
|  |   | Laagste $F_{t,max}$           | Hoogste $F_{t,max}$ | Gemiddelde $F_{t,max}$ |      |
| <b>B300</b><br>$\sigma_t = 751 \text{ N/mm}^2$     | Niet vrijgegeven*                         | M5                            | 1386                | 2657                   | 1921 |
|  |   | M10                           | 1330                | 2729                   | 1875 |
| <b>UNI 275</b><br>$\sigma_t = 674 \text{ N/mm}^2$  | 2000**                                    | M5                            | 1050                | 3065                   | 2457 |
|  |   | M10                           | 1178                | 3669                   | 2174 |
| <b>UNI L</b><br>$\sigma_t = 815 \text{ N/mm}^2$    | 2000**                                    | M5                            | 2386                | 4436                   | 3216 |
|  |   | M10                           | 1731                | 3351                   | 2439 |
| <b>UNI Lijm</b><br>$\sigma_t = 674 \text{ N/mm}^2$ | 3500**                                    | M15                           | 3039                | 4552                   | 4035 |

\*Meer verplaatsing dan 1 mm bij uittrekken volgens gegevens van leverancier  
 \*\* [Leverancier A; Techniek overzicht; versie 2010]

In *Grafiek 27* zijn twee “wolken” van proefresultaten te zien. De linker, blauwe wolk zijn de UNI spouwankers van leverancier A, de rechter groene wolk zijn de B300 spouwankers van leverancier B. Zoals in §3.1.2.2 is vermeldt, levert elke leverancier een andere diameter, terug te zien in *Grafiek 27* door de clustering van proefresultaten. De conclusie hieruit is dat bij elk type spouwanker de gemiddelde waarde van de diameter gebruikt moet worden voor de berekening van de capaciteit van het spouwanker. In de normen, voorschriften en publicaties wordt nu een  $\varnothing 4$  mm aangehouden, waardoor in werkelijkheid de UNI275 en UNI-L spouwankers mogelijk een lagere capaciteit kennen door een kleinere diameter.

Daarnaast is uit *Grafiek 27* ook te geconcludeerd dat:

- Formule uit CUR 71 [6]: Is een ondergrens voor  $F_{t,max}$
- Formule uit de SBR [7]: Is een bovengrens voor  $F_{t,max}$

Deze twee grenzen kunnen bepaald worden omdat de proefresultaten tussen de grenzen zijn gelegen. De waarden van de leveranciers van de UNI spouwankers geven een gemiddelde waarde die overeenkomt of lager is dan de gevonden gemiddelde waarde uit de proefresultaten. Daardoor kunnen de waardes van de leverancier van de UNI spouwankers als betrouwbaar worden gezien.

### 5.1.2 Analytische berekeningen

Voor een betere benadering van de onder- en bovengrens van  $F_{t,max}$  worden analytische berekeningen gemaakt van de geconstateerde gebreken uit hoofdstuk 3 en die zijn:

- 1) Buigtreksterkte baksteen
- 2) Hechtsterkte steen-mortel
- 3) Hechtsterkte spouwanker-mortel
- 4) Inlegdiepte

#### Buigtreksterkte baksteen

Tijdens de proef zijn stenen gebroken wat resulteerde in de  $F_{t,max}$  van het proefstuk. Doordat een proefstuk van twee bakstenen ingeklemd zit in de proefopstelling treedt een groter buigend moment op (door de tegenwerkende kracht opgenomen moet worden door twee bakstenen in plaats van de gehele metselwand) dan wanneer het spouwanker in een groter oppervlak gemetseld zit. Hierdoor zal dit fenomeen minder snel optreden in de praktijk, maar dit resultaat is een veilige bovengrens benadering voor  $F_{t,max}$ . De buigtreksterkte kan berekend worden met formule 5.3 uit NEN6790 [3]:

$$f_{ct} = \frac{3}{2} \frac{Fl}{d_1 \cdot d_2^2} \quad (5.3)$$

Waar  $F = F_{t,max}$  (trekkracht),  $l$  hart-op-hart afstand van de ondersteunigen is,  $d_1$  de dikte van het proefstuk en  $d_2$  de breedte van het proefstuk is.

Na invullen van de gegevens van de gebruikte bakstenen (Rijswaardt bakstenen rood-paars) resulteert dit in:

$$2,0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot 190}{50 \cdot 100^2} \rightarrow F = 3571 \text{ N}$$

Na het berekenen van 10 buigtreksterkten, is de gemiddelde buigtreksterkte van de gebruikte stenen gelijk aan 3600 N. De proefstukken waarbij de stenen zijn gebroken tijdens de proef, hebben een grotere buigtreksterkte dan berekend via formule 5.3 doordat de leverancier een gemiddelde waarde opgeeft van de buigtreksterkte. Echter, voor een statistisch onderbouwd antwoord dienen meer proeven uitgevoerd te worden.

**Hechtsterkte steen-mortel**

Uit de proefresultaten uit hoofdstuk 3 blijkt dat de hechtsterkte tussen steen en mortel een veel voorkomend geconstateerd gebrek is, waardoor een lagere  $F_{t,max}$  bereikt wordt. De hechtsterkte van steen met mortel wordt berekend met formule 5.4:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{5.4}$$

Met  $F$  de treksterkte dat de onthechting tussen steen en mortel veroorzaakt en  $A$  het hechtoppervlak.

Omdat de hechtsterkte afhankelijk is van de toegepaste norm of leverancier kan de opneembare kracht afhankelijk van de hechtsterkte tussen steen en mortel op drie manieren bepaald worden, waarvan het resultaat is gegeven in Tabel 19:

- **Hechtsterkte volgens leverancier**

In Tabel 19 is  $F_{t,max}$  berekend afhankelijk van het type mortel en contactoppervlak met gemiddelde hechtsterktes. De leverancier geeft alleen de gemiddelde hechtsterkte van de steen met mortel na 1 dag en na 28 dagen weer. In de tabel is de hechtsterkte na 28 dagen gebruikt.

- **Hechtsterkte volgens NEN-EN 1991-1-1 en EN 998-2**

De hechtsterkte van steen met mortel is bepaald aan de hand van proeven zoals beschreven in NEN-EN 1991-1-1/EN 998-2 voor buiging evenwijdig of loodrecht aan de lintvoegen. Daarnaast kan de hechtsterkte bepaald worden aan de hand van tabellen in EN 998-2 bijlage C. De hechtsterkte gegeven in Tabel 19 is de hechtsterkte uit bijlage C van EN 998-2 en geldt voor alle mortelkwaliteiten met steencombinaties.

- **Hechtsterkte volgens NEN 6790**

Is de hecht- en/of treksterkte niet bekend van de combinatie steen-mortel dan mag de waarde van de buigtreksterkte van het metselwerk als hechtsterkte gebruikt worden. De buigtreksterkte kan als volgt berekend worden:

$$\sigma = \frac{M}{W} \tag{5.5}$$

Met  $M$  als het moment dat optreedt op het metselwerk en  $W$  het weerstandsmoment van het metselwerk.

Indien de treksterkte bekend is kan vergelijking 5.6 gebruikt worden:

$$f_{bt} = 1,5 f_t \tag{5.6}$$

Met  $f_t$  gelijk aan de treksterkte van het metselwerk.

In §3.3 zijn de materiaaleigenschappen beschreven en dus ook het resultaat van de hefboomproef. Het resultaat van de hefboomproef is de treksterkte van de steen met de mortel. Met behulp van formule 5.6 kan dan de buigtreksterkte worden berekend en die is gelijk aan:

$$f_{bt} = 1,5 \cdot 0,1 = 0,15 \text{ N/mm}^2$$

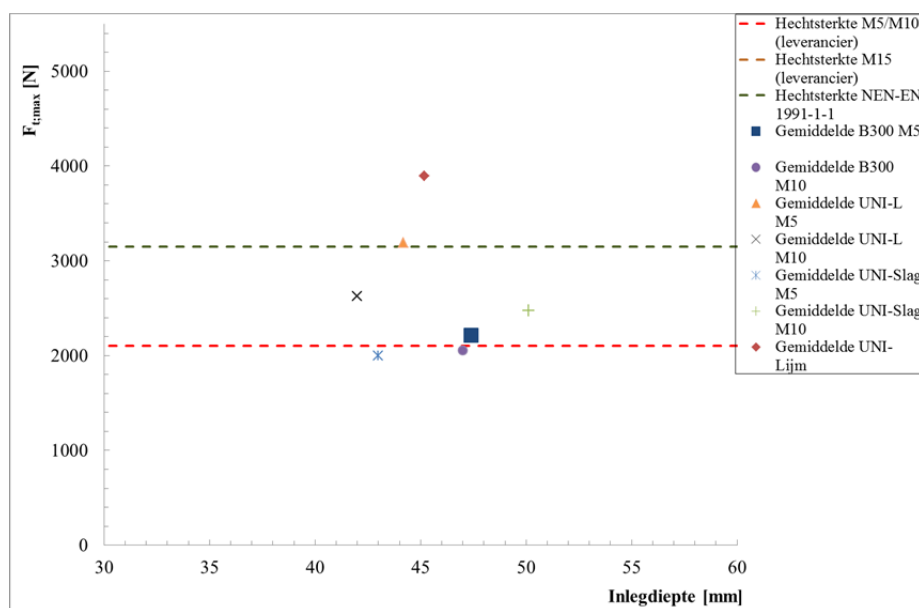
Tabel 19: Berekening voor  $F_{t,max}$  als de hechting tussen steen en mortel

|   |                | M5-mortel   | M10-mortel | M15-Mortel | Alle Mortelkwaliteiten      |          |
|---|----------------|-------------|------------|------------|-----------------------------|----------|
|   |                | Leverancier |            |            | NEN-EN 1991-1-1 en EN 998-2 | NEN 6790 |
| <b>Hechtsterkte volgens fabrikant</b>         | $f_t [N/mm^2]$ | 0,10        | 0,10       | 0,60       | 0,15                        | 0,15     |
| <b>Hechtoppervlak (210 * 100)</b>             | $A [mm^2]$     | 21000       | 21000      | 21000      | 21000                       | 21000    |
| <b>Opneembare kracht voeg-steen interface</b> | $F [N]$        | 2100        | 2100       | 12600      | 3150                        | nvt      |
| <b>Optredend moment</b>                       | $M [Nmm]$      | nvt         | nvt        | nvt        | nvt                         | 52500    |

Bij de berekening van de hechtsterkte moet rekening worden gehouden met de scheefstand van het spouwanker. Dit omdat bij het ontbinden van de trekkracht, die scheef aangrijpt op het spouwanker, een horizontale en verticale component ontstaat. De verticale component is gelijk aan  $F_{t,max}$  (component in de richting van de trekkracht). De component loodrecht op de trekkracht geeft extra drukkracht op de mortel en steen, wat kan resulteren in een snellere onthechting van de steen met de mortel.

In *Grafiek 28* zijn de gemiddelde hechtsterktes uit de proeven afgebeeld (markers) en de berekende hechtsterkte uit de drie beschreven methodes zijn gegeven met de stippellijnen (zie *Tabel 19*). Op de verticale as is  $F_{t,max}$  uitgezet tegen op de horizontale as de hechtsterkte. Uit *Grafiek 28* kan geconcludeerd worden dat de hechtsterkte volgens de leverancier voor M5- en M10 mortel gelijk is aan de gemiddelde hechtsterkte uit de proeven. De hechtsterkte berekend met de tabel in NEN-EN 1991-1-1, ligt boven de waarden gevonden in de proeven. De NEN 6790 is niet in de grafiek weergegeven omdat deze dezelfde berekende hechtsterkte heeft als uit de tabel uit NEN-EN 1991-1-1.

De hechtsterkte volgens de leverancier voor de lijm mortel ( $F_{t,max}=12,6$  kN) ligt veel hoger dan het waargenomen gemiddelde uit de proeven ( $F_{t,max}=3,9$  kN). Doordat de waarde van de leverancier ver boven de gemiddelde waarde uit de proeven ligt, is deze niet in *Grafiek 28* afgebeeld. Het resultaat van de proeven is wel in de grafiek weergegeven, namelijk met de rode ruit.

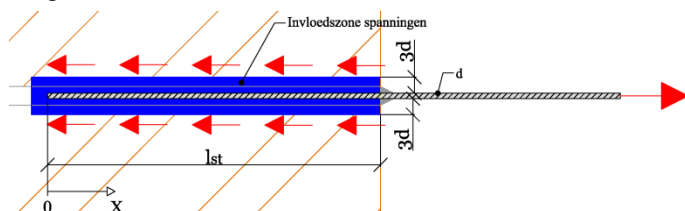


*Grafiek 28:  $F_{t,max}$  - inlegdiepte grafiek. De markers geven de gemiddelde  $F_{t,max}$  van de proefstukken weer waarbij steen en mortel onthecht zijn bij  $F_{t,max}$ . De lijnen geven de gemiddelde waarde van de hechtsterkte verkregen van de leverancier of EC 6 berekend in tabel 19 weer.*

### Hechtsterkte spouwanker-mortel

Naast de hechtsterkte tussen steen en mortel is de hechting tussen spouwanker en mortel ook belangrijk. De hechting kan bepaald worden door de aanhechtkracht te berekenen, oftewel de aanhechtspanningen in het contactvlak tussen spouwanker met mortel. De berekening van de aanhechtspanningen tussen twee materialen wordt in de theorieën verschillend benaderd en er wordt uitgegaan van rechte spouwankers.

Logischerwijs zal de schuifweerstand toenemen wanneer deze spouwankers golven en/of haken bevatten. Hierdoor kunnen de stenen of mortel afsplijten of onthechten. De kracht in het staal wordt overgedragen op de mortel via aanhechtspanningen die zich vervolgens in het element verspreiden. Het invloedsgebied van de spanningen rondom een wapeningsstaaf is volgens Bruggeling [BRU86] en formules uit de betontheorie [CB2] gelijk aan  $3d$  (waarin  $d$  de diameter is), (zie *Figuur 97*). Voor een spouwanker kan dit als gelijk worden aangenomen.



*Figuur 97: Invloedsgebied spanningen over een dikte van  $3d$  volgens Bruggeling [BRU86] en de betontheorie [CB2].*



In de literatuurstudie worden twee methoden besproken om de aanhechtspanningen te berekenen:

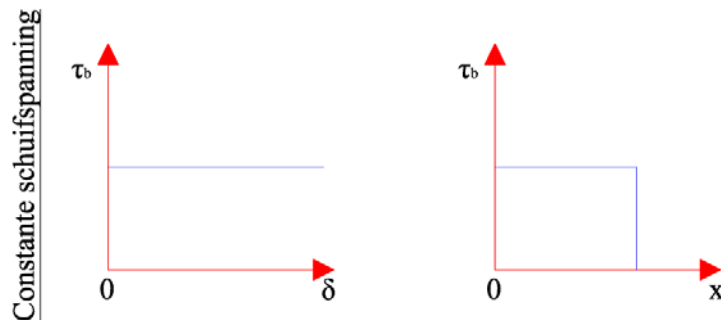
**1) Overall gelijke spanningen**  
[CB2] en [BOO&KAM]

Voor de eenvoud kunnen de aanhechtspanningen over de lengte van het spouwanker als gelijk worden aangenomen, ( zie *Figuur 98*). De aanhechtspanningen worden berekend met:

$$f_b = \frac{1}{4} \cdot \frac{\phi \cdot \sigma_{s,max}}{l_{bond}} \tag{5.7}$$

Waarin  $\phi$  de diameter van het spouwanker is,  $\sigma_{s,max}$  de vloeispanning van het staal is en  $l_{bond}$  de inlegdiepte van het spouwanker in de mortel weergeeft.

De aanhechtspanningen die zich in het contactvlak tussen spouwanker en mortel bevinden, berekend met formule 5.7, zijn overall gelijk verdeeld, zoals weergegeven in *Figuur 98*. In *Figuur 98* zijn de spanningen over een afstand  $x$  weergegeven, wat de inlegdiepte van het spouwanker aangeeft.



*Figuur 98: Over de lengte van het spouwanker zijn gelijke aanhechtspanningen aanwezig, zoals in de grafieken wordt weergegeven. De tweede grafiek laat de spanning zien over een lengte  $x$  van het spouwanker zien (zie *Figuur 97*).*

**2) Lineair Elastisch**  
[BRU86] en [VEE90]

Een tweede manier is het lineair berekenen van de aanhechtspanningen. Voor het berekenen van deze aanhechtspanningen is het staafmodel van Bruggeling gebruikt, toegelicht in hoofdstuk 2. Voor de schuifspanningen die optreden in het contactvlak spouwanker-mortel kan formule 5.8 gebruikt worden.

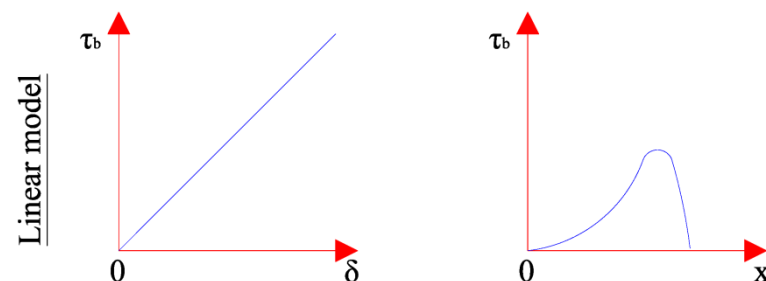
$$\tau_{cs} = \frac{N_s}{\pi \cdot \phi_k \cdot l_{cs}} \tag{5.8}$$

Waarin  $N_s$  de trekkracht op de staaf is,  $\phi_k$  de diameter van het spouwanker aangeeft en  $l_{cs}$  de inlegdiepte is van het spouwanker in de mortel.

In hoofdstuk 2 zijn de stappen van het staafmodel van Bruggeling verder toegelicht. De belangrijkste conclusies die daaruit getrokken kan worden over de spanningen in het contactvlak is:

*“Met de vergelijking voor  $\delta_x$  en  $\tau_{cs,x}$  kan geconstateerd worden dat de aanhechtspanningen  $\tau_{cs,x}$  varieert over de lengte  $x$  en geen gelijkmatige verdeling over het spouwanker plaatsvindt.”*

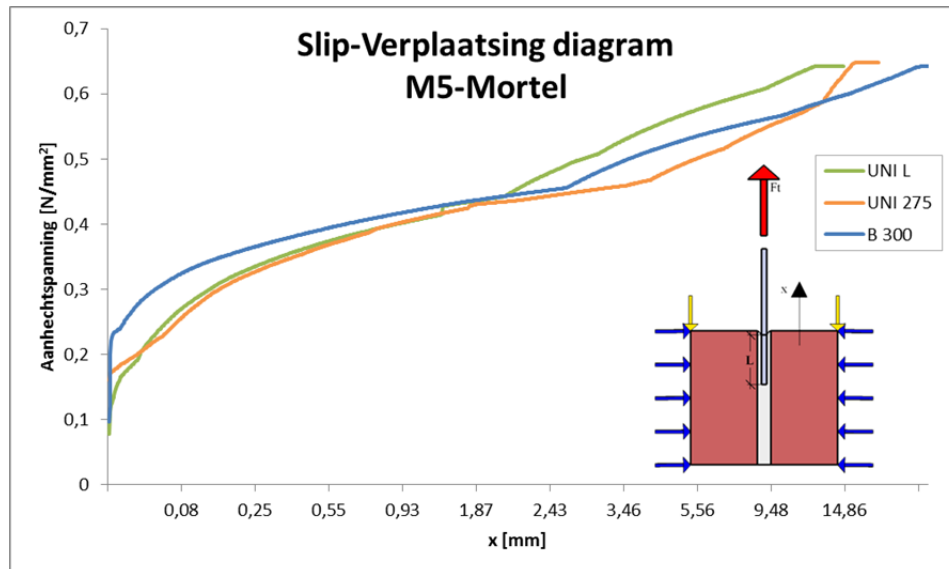
De spanningen die berekend worden met staafmodel zijn weergegeven in *Figuur 99*. De berekende spanningen zijn niet over de lengte van het spouwanker dat in de mortel ligt gelijk, maar neemt toe naarmate het spouwanker het uiteinde van de mortel bereikt (zie *Figuur 97* en *Figuur 99*).



*Figuur 99: Aanname voor de optredende spanningen bij inleiden van de kracht in de mortel [BRE06]. Zie *figuur 94* voor een beschrijving van  $0$  en  $x$ .*

Voor alle spouwankers zijn de aanhechtspanningen berekend en uitgewerkt in bijlage 22. In *Grafiek 29* zijn aanhechtspanningen uitgezet tegen  $x$  (die de verplaatsing over de lengte van het spouwanker aangeeft, zie *Figuur 97*). De aanhechtspanningen in het contactvlak van de drie spouwankers met mortel, weergegeven in *Grafiek 29*,

lopen vrijwel gelijk aan elkaar en komen het meeste overeen met de lineaire benadering van Bruggeling [BRU86] en Van der Veen [VEE90]. Als de aanhechtspanningen lineair worden aangenomen, zoals in [CB2] wordt voorgesteld, zou dit een grove benadering zijn van de spanningen en aanhechtsterkten. In *Figuur 24* op pagina 33 is het verschil getoond tussen de twee benaderingen van de aanhechtspanningen in het contactvlak tussen spouwanker en mortel.



Grafiek 29: Aanhechtspanningen in het contactvlak van spouwanker met M5-mortel. Afhankelijk van de plek ( $x$ ) waar de spanningen bepaald kunnen worden, af te lezen op de verticale as.  $x$  geeft de inlegdiepte van het spouwanker weer (zie *figuur 97*).

### Inlegdiepte

Bij de berekening voor de capaciteit van een spouwanker wordt ervan uitgegaan dat het spouwanker optimaal verankerd zit in de mortel. De op te nemen aanhechtkracht door de mortel (formule 2.23) is afhankelijk van de inlegdiepte en de sterkte van de mortel. De aanhechtspanningen in het contactvlak tussen mortel en spouwanker moeten kleiner zijn dan de buigtreksterkte van de toegepaste mortel. Voor het bepalen van de hechtspanning tussen spouwanker en mortel wordt formule 5.7 gebruikt. Deze hechtspanning moet kleiner zijn dan de buigtreksterkte:

$$f_b = \frac{1}{4} \cdot \frac{\phi \cdot \sigma_{s,max}}{l_{bond}} \leq f_{bt} \quad (5.9)$$

Als de waarde verkregen uit de schaduwproeven of die van de leverancier (zie §3.3) ingevuld worden, resulteert dit in:

|  |              |                  |
|--|--------------|------------------|
| $\frac{1}{4} \cdot \frac{4 \cdot 387}{40} = 9,7 \text{ N/mm}^2 \geq 2,5 \text{ N/mm}^2$  | VOLDOET NIET | (schaduwproeven) |
| $\frac{1}{4} \cdot \frac{4 \cdot 387}{40} = 9,7 \text{ N/mm}^2 \geq 3,77 \text{ N/mm}^2$ | VOLDOET NIET | (leverancier)    |

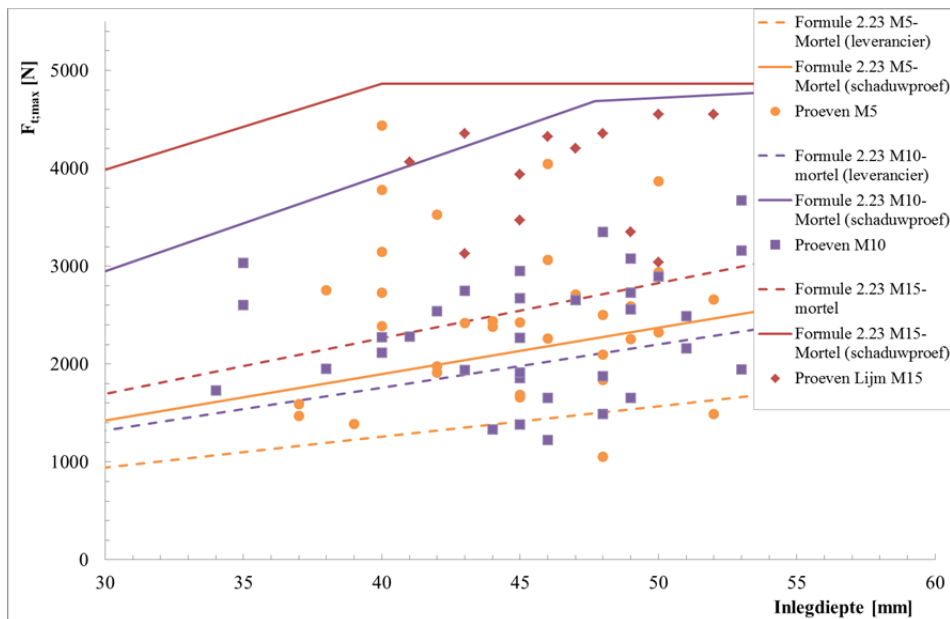
De aanhechtspanningen zijn groter dan de buigtreksterkte van beide berekeningen, waardoor de buigtreksterkte van de mortel maatgevend is. De  $F_{t,max}$  die het spouwanker kan opnemen gelijk aan formule 2.23, alleen gebaseerd op de uitkomst van formule 5.9, is gelijk aan:

$$H = l_{bond} \cdot \pi \cdot \phi \cdot f_b = 40 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 2,50 = 1257 \text{ N} \quad (\text{schaduwproeven})$$

$$H = l_{bond} \cdot \pi \cdot \phi \cdot f_b = 40 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 3,77 = 1895 \text{ N} \quad (\text{leverancier})$$

Hierbij is uitgegaan van een vloeigrens van het spouwanker van  $387 \text{ N/mm}^2$ , een inlegdiepte van 40 mm en een diameter van  $\phi 4$ . Voor alle typen spouwankers gebruikt in het experimentele onderzoek zijn deze berekeningen uitgevoerd en de resultaten zijn gegeven in *Grafiek 30*. Op de verticale as is  $F_{t,max}$  uitgezet tegen op de horizontale as de inlegdiepte van het spouwanker. De stippelijnen geven de uitkomsten van formule 2.23 met  $f_b$  volgens de leverancier en de doorgetrokken lijn met de uitkomsten van formule 2.23 met  $f_b$  volgens de schaduwproeven (§3.3) weer. De markers geven de proefresultaten zoals uitgewerkt in hoofdstuk 3 weer.

Omdat uit de resultaten van de proeven blijkt dat de inlegdiepte varieert, worden in *Grafiek 30* de resultaten van de berekeningen voor de verschillende inlegdiepten gegeven.



Grafiek 30: Kracht-inlegdiepte grafiek. De stippellijnen zijn berekend met formule 2.23 uit [CB2] en de markers weergeven de resultaten van de trekproeven uitgewerkt in hoofdstuk 3.

Uit Grafiek 30 kan voor ieder mortelkwaliteit een conclusie getrokken worden:

**M15-Mortel (rood):** De berekende  $F_{t,max}$  met formule 2.23 (leverancier) ligt lager dan de proefresultaten. Formule 2.23 met de resultaten van de schaduwproeven ligt boven de proefresultaten en is een onnauwkeurige benadering van  $F_{t,max}$ . Uit Grafiek 30 kan geconcludeerd worden dat formule 2.23 met waarden van de leverancier een ondergrens is.

**M10-mortel (paars/blauw):** De proefresultaten liggen niet boven de berekende waarde met formule 2.23 (leverancier) en dit kan komen doordat de hechting van de mortel met de steen slecht waren zoals is geconstateerd bij het experimentele onderzoek. Formule 2.23 met de resultaten van de schaduwproeven ligt ver boven de proefresultaten en kan niet gebruikt worden voor de voorspelling van  $F_{t,max}$ .

**M5-mortel (oranje):** De proefresultaten liggen voor ongeveer 95% boven de berekende  $F_{t,max}$  met formule 2.23 (leverancier). Ook hier ligt het resultaat van formule 2.23 (schaduwproeven) niet onder de resultaten waardoor deze formule niet als voorspelling gebruikt kan worden. Net als bij de lijmmortel kan hieruit geconcludeerd worden dat formule 2.23 een ondergrens vormt voor de berekening/voorspelling van  $F_{t,max}$ .

Totaal kan geconcludeerd worden dat formule 2.23 met ingevulde waarde volgens de leverancier voor M15- en M5-mortel een veilige ondergrens is.

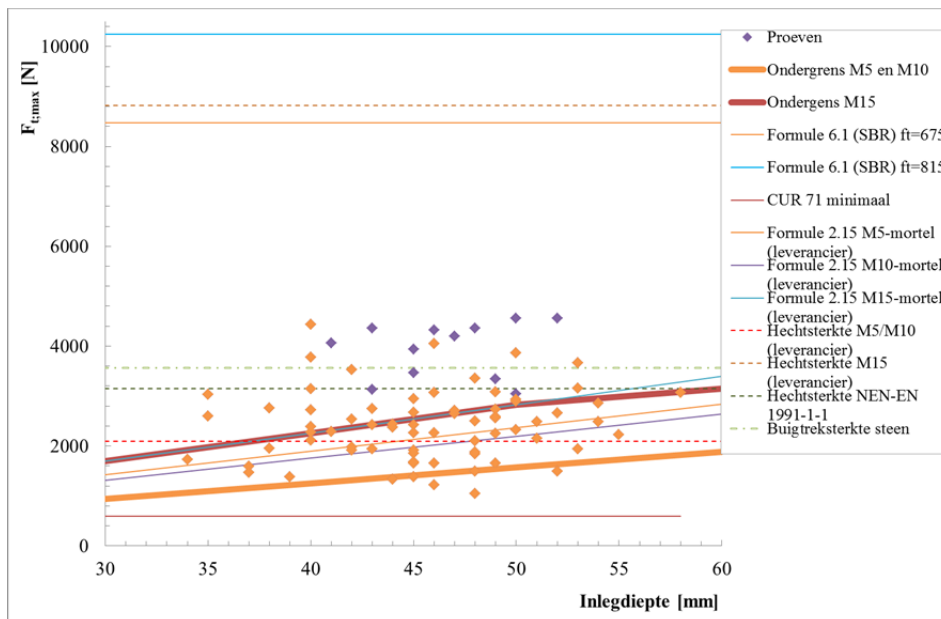
### 5.1.3 Conclusie

In Grafiek 31 zijn alle berekende waarden uit de vorige sub-paragrafen en de proefresultaten tot een inlegdiepte van 60 mm gegeven. Hieruit kan geconcludeerd worden:

*‘Hoe grotere inlegdiepte, hoe hogere  $F_{t,max}$ ’.*

Deze conclusie is terug te zien in de afleiding van de inlegdiepte (Grafiek 30 en formule 2.23). De trekproeven zijn uitgevoerd met verschillende soorten mortelkwaliteiten, wat in formule 2.23 is meegenomen. Dit resulteert in een stijgende lijn bij toenemende inlegdiepte en resulteert in een ondergrens voor  $F_{t,max}$  bij M5- en M10-mortel (dikke oranje lijn). Tot een inlegdiepte van 70 mm is de connectie spouwanker-mortel maatgevend, daarna de hechting tussen steen-mortel. Voor M15-mortel is de inlegdiepte en aanhechtkracht tot een inlegdiepte van 60 mm maatgevend, daarna is  $F_{t,max}$  op basis van de hechting tussen steen en mortel maatgevend (dikke rode lijn). De hechtsterkte is afhankelijk van de omstandigheden waarmee de proefstukken vervaardigd worden.

Formule 5.1 uit de SBR [6] is de bovengrens van  $F_{t,max}$ , dan is het spouwanker zelf op treksterkte bezwaken. Bij dit onderzoek zijn geen van de spouwankers bezwaken op treksterkte omdat de overige gebreken een grotere invloed uitoefenen op  $F_{t,max}$ . Oftewel  $F_{t,max}$  is niet alleen afhankelijk van de treksterkte van het spouwanker zoals in SBR wordt geconstateerd, maar ook van gestelde randvoorwaarden aan de proefstukken.



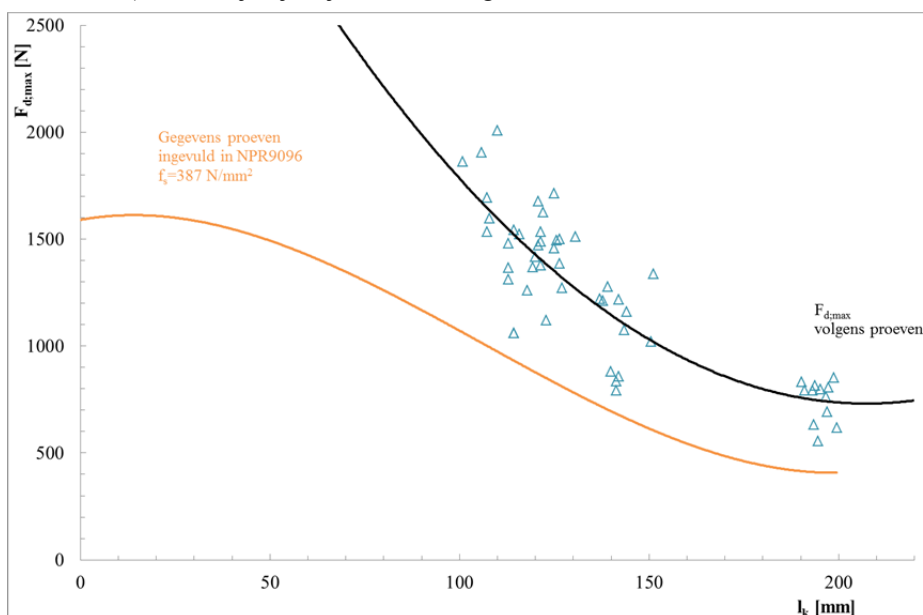
Grafiek 31: Kracht-inlegdiepte grafiek voor bepaling ondergrenzen voor  $F_{t,max}$ . De rode dikke lijn is de ondergrens voor M15-Mortel en de dikke oranjelij is de ondergrens voor M5- en M10-mortel.

## 5.2 Drukcapaciteit Spouwanker

Zoals beschreven in hoofdstuk 2 ondervindt het spouwanker buig- en normaalspanningen. Deze twee spanningen samen moeten kleiner zijn dan de vloeispanning van het spouwankermateriaal. Omdat de kracht niet centrisch aan grijpt op het spouwanker, ontstaat een tweede orde moment. Het spouwanker moet dus getoetst worden aan formule 2.29 plus een tweede orde moment wat resulteert in vergelijking 5.10:

$$\frac{F_{d,max}}{A} + \frac{n_s}{n_s - 1} \cdot \frac{F_{d,max} \cdot e}{W} \leq \sigma_s \text{ met } n_s = \frac{F_E}{F_{d,max}} \tag{5.10}$$

In formule 5.10 wordt uitgegaan van een kniklengte van  $0,71 \cdot l$  zoals vastgesteld in hoofdstuk 3. Als uit formule 5.10  $F_{d,max}$  vrijgemaakt wordt, kan deze samen met de proefresultaten geplot worden in Grafiek 32. In bijlage 17 is de formule uitgeschreven zodat  $F_{d,max}$  vrijgemaakt is. In de formule in bijlage 17 zijn de resultaten van de proeven en uit de schaduwproeven (beschreven in hoofdstuk 3) ingevoerd, waarmee  $F_{d,max}$  berekend wordt. In Grafiek 32 is op de verticale as  $F_{d,max}$  weergegeven en op de horizontale as de kniklengte bepaald met  $0,71 \cdot l$ . De markers weergeven de proefresultaten, waardoor een de trendlijn getrokken kan worden (uitgewerkt in hoofdstuk 3). De oranje lijn zijn de waarden gevonden via formule 5.10.



Grafiek 32:  $F_{d,max}$ -kniklengte grafiek. De oranje trendlijn geeft de waarden uit formule 5.10 weer. De blauwe driehoek markers weergeven de proefresultaten met als zwarte lijn de trendlijn van deze resultaten. Zie voor de bepaling van de trendlijn bijlage 17 of §3.2.4.

Uit *Grafiek 32* kan geconcludeerd worden dat de twee gevonden trendlijnen dezelfde vorm hebben. Tussen de trendlijn van de proefresultaten en formule 5.10 zit een verschil (een  $\alpha$ -factor verschil), die veroorzaakt wordt door:

- **0,2% rekgrens van het materiaal**

De 0,2% rekgrens van het spouwanker verschilt bij elke type spouwanker. De CUR71 eist hiervoor een minimale waarde van  $300 \text{ N/mm}^2$ . De spouwankers gebruikt in het experimentele onderzoek voldoen hieraan met:

- UNI-spouwanker                      0,2%-rekgrens:  $387 \text{ N/mm}^2$ ;
- UNI-L spouwankers                0,2% rekgrens:  $432 \text{ N/mm}^2$ ;
- B300 spouwankers                0,2% rekgrens:  $603 \text{ N/mm}^2$ .

- **De Eulerse knikkracht**

In de Eulerse knikkrachtberekening wordt de kniklengte van het spouwanker meegenomen. Zoals uitgelegd in hoofdstuk 3 is deze moeilijk te bepalen voor het spouwanker omdat het scharnierpunt aan de zijde van de mortel verschuift tijdens de proef en de mate van inklemming door de mortel niet bepaald kan worden. Aangenomen is dat de kniklengte gelijk is aan  $0,71 \cdot l$  voor verdere berekeningen (zie uitwerking in §3.2).

- **De mate van inklemmen van het spouwanker**

De mate van inklemmen van spouwanker heeft invloed op  $F_{d,max}$  en dus op de kniklengte van het spouwanker. Aangenomen wordt dat de 250kN-bank als inklemming fungeert en de mortel een verende inklemming is. Dit resulteert in een kniklengte gelijk aan  $0,71 \cdot l$ .

Om de gevonden trendlijnen van formule 5.10 en van de proefresultaten op elkaar te kunnen leggen is een  $\alpha$ -factor nodig die het verschil van de trendlijnen bepaald. Deze  $\alpha$ -factor is bepaald door de waarden van de proeven te delen door de gevonden waarden uit formule 5.10. Het verschil tussen de twee trendlijnen is dus gelijk aan de volgende  $\alpha$ -factoren:

$$\text{spouwbreedte} \leq 150 \text{ mm} \quad \alpha=1,50$$

$$\text{spouwbreedte} > 150 \text{ mm} \quad \alpha=1,76$$

Wordt naar de componenten van formule 5.10 apart gekeken, dan worden twee andere  $\alpha$ -factoren gevonden voor iedere component van formule 5.10, wat resulteert in formule 5.11:

$$\alpha_1 \cdot \frac{F_{d,max}}{A} + \alpha_2 \frac{n_s}{n_s-1} \cdot \frac{F_{d,max} \cdot e}{W} \leq \sigma_s \quad (5.11)$$

Waarin  $\alpha_1 = 1,76$  en  $\alpha_2 = 1,31$ .

Uit *Grafiek 32* kan geconcludeerd dat het model dat aangenomen is voor de berekening van  $F_{d,max}$  in de NPR9096-1, overeen komt met de trendlijn van de proefresultaten en een kleine  $\alpha$ -factor verschil hebben.





## 6 Numeriek onderzoek

Met behulp van de materiaaleigenschappen uit het experimentele onderzoek (§3.3) is een numeriek model opgesteld, waarmee het gedrag van het spouwanker in een gemetselde constructie wordt gesimuleerd. Het doel hiervan is het verhogen van het inzicht in het gedrag van het spouwanker in metselwerk. Het einddoel van de numerieke analyse is het ontwikkelen, onderbouwen en aanscherpen van de rekenregels. Het model is met het programma COMSOL 4.2a gemodelleerd en is opgezet voor het simuleren van het uittrekgedrag van het spouwanker.

### 6.1 Model

Voor de analyse van het gedrag van een spouwanker dat onder trek staat zijn in het numerieke model dezelfde geometrie en materiaaleigenschappen gebruikt als bij het experimentele onderzoek (zie *Tabel 8*, pagina 74). De randcondities zijn afgeleid van een spouwmuur waarin meerdere spouwankers ingemetseld zijn. Desondanks is de geometrie van het model gelijk aan die van het gebruikte proefstuk in het experimentele onderzoek. Gestart wordt met de toelichting van de gebruikte geometrie, daarna de ingevoerde materiaaleigenschappen en als laatste de krachten die op het proefstuk aangrijpen.

#### 6.1.1 Geometrie

De geometrie van het model is opgebouwd vanuit de oorsprong van het globale assenstelsel met de coördinaten  $0,0,0$  ( $x,y,z$ ). Het globale assenstelsel is het assenstelsel van het hele model. Het lokale assenstelsel is per geometrie verschillend. De afmetingen van het proefstuk volgen uit de  $x,y$  en  $z$  coördinaten gelegen in het lokale assenstelsel. De geometrie van het proefstuk in het model kan op verschillende manieren worden ingevoerd. De laatste kolom in de onderstaande tabel beschrijft de invoermethode van de geometrie van het betreffende object in Comsol. Vanuit het nulpunt zijn de twee bakstenen en de mortel laag gemodelleerd.

|            | Globale assenstel ( $x,y,z$ ) | Afmetingen ( $x,y,z$ ) | Invoer in Comsol |
|------------|-------------------------------|------------------------|------------------|
| Bakstenen: | (0,0,0)                       | (210,100,50)           | Block            |
| Mortel:    | (0,0,50)                      | (210,100,10)           | Block            |

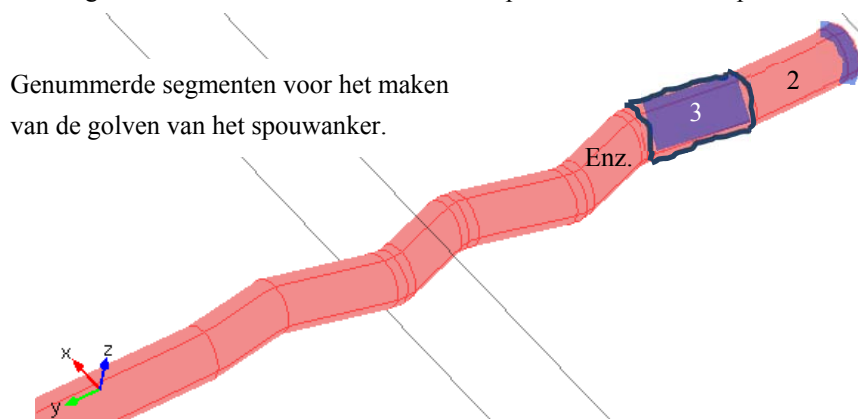
Het spouwanker wordt op twee manieren gemodelleerd:

1. Een recht spouwanker;
2. Een spouwanker met golven.

De resultaten van de twee typen spouwanker kunnen na de simulatie met elkaar vergeleken worden. Ook de spouwankers worden vanuit de oorsprong van het lokale assenstelsel gemodelleerd:

|                      | Globale assenstel ( $x,y,z$ ) | Afmetingen (radius en lengte) | Invoer in Comsol  |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Recht spouwanker:    | (105,60,55)                   | (4 en 220)                    | Cilinder          |
| Spouwanker met golf: | (105,60,55)                   | (4 en 220)                    | Cilinder en sweep |

Het rechte spouwanker is gemodelleerd als één lange cilinder. Het spouwanker met golven is opgebouwd uit kleine segmenten van een cilinder die met behulp van de functie sweep aan elkaar zijn gekoppeld (*Figuur 100*).



*Figuur 100: Segmenten voor het modelleren van het spouwanker met golven. De cijfers geven de nummering van de segmenten weer. Begonnen is met het modelleren van segment 1, daarna is segment 2 daaraan gekoppeld met de functie sweep etc.*

### 6.1.2 Materiaaleigenschappen

De materiaaleigenschappen die in het model zijn ingevoerd, zijn gelijk aan de eigenschappen gevonden in de schaduwproeven (hoofdstuk 3). De ingevoerde materiaaleigenschappen zijn (Figuur 101):

#### Metselstenen (202\*95\*50 mm)

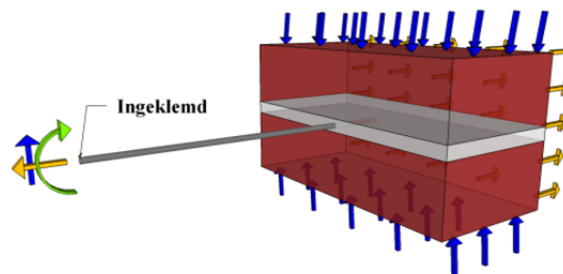
- $f_c = 14,4 \text{ N/mm}^2$
- $E_{\text{baksteen}} = 4340 \text{ N/mm}^2$
- $\rho = 1608 \text{ kg/m}^3$
- $\nu = 0,15$

#### Mortel (Voeg = 10 mm)

- $f_c = 7,15 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ct,fl} = 3,77 \text{ N/mm}^2$
- $E_{\text{mortel}} = 917 \text{ N/mm}^2$  [BOS]
- $\rho = 1719 \text{ kg/m}^3$
- $\nu = 0,2$

#### Spouwanker (UNI-Slag spouwanker Ø4 met een inlegdiepte van 40 mm)

- $f_t = 674 \text{ N/mm}^2$
- $f_s = 387 \text{ N/mm}^2$
- $E_{\text{staal}} = 195.000 \text{ N/mm}^2$
- $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
- $\nu = 0,3$



Figuur 101: Geometrie en randcondities zoals ingevoerd in Comsol. Blauwe pijlen is de voordruk en de gele pijlen is de windbelasting. Het spouwanker is ingeklemd en zit dus op een vaste positie, de stenen met mortel worden weggetrokken. Zie paragraaf 6.1.3 voor verdere uitwerking.

Voor alle ingevoerde materialen is een lineair elastisch materiaalgedrag aangenomen, waarbij de elasticiteitsmodulus en Poisson ratio gedefinieerd dienen te worden. De Poisson ratio (dwarscontractiecoëfficiënt  $\nu$ ) is een materiaalconstante die beschrijft hoe een materiaal reageert op een trek- of drukbelasting. Voor de elasticiteitsmodulus wordt het materiaal als isotopisch aangenomen, waarbij de elasticiteitsmodulus de veerstijfheid is in de wet van Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (6.1)$$

De Poisson ratio definieert de rek in loodrechte richting op het materiaal, die gebaseerd is op de rek parallel aan het materiaal en volgt uit de formule:

$$\varepsilon_{\perp} = -\nu\varepsilon_{\parallel} \quad (6.2)$$

Waarin  $\varepsilon_{\perp}$  de rek loodrecht aan het materiaal,  $\varepsilon_{\parallel}$  de rek evenwijdig aan het materiaal en  $\nu$  de Poisson ratio is.

Na invoeren van de Poisson ratio en de elasticiteitsmodulus rekt Comsol met de volgende vergelijkingen de rekken, verplaatsingen en spanningen uit in het model.

Voor het hele model is de totale rek uitgedrukt in de verplaatsing van het proefstuk in y-richting van het model

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\nabla v + \nabla v^T) \quad (6.3)$$

Waarin  $\varepsilon$  de rek is,  $v$  de gradient van de verplaatsing in y-richting en  $T$  de rek in het model.

Bij kleine verplaatsingen zijn de rekken en schuifspanningen gerelateerd aan de verplaatsingen. De rek in het model is in elke richting afzonderlijk gedefinieerd als  $u$ ,  $v$  en  $w$  en de afgeleide daarvan:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (6.4)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (6.5)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (6.6)$$

Voor de spanningen in het materiaal wordt vergelijking 6.7 gebruikt, waarin drie normaalspanningen en uiteindelijk door symmetrie drie schuifspanningen gedefinieerd kunnen worden:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yz} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad \tau_{xy} = \tau_{yz} \quad (6.8)$$

### 6.1.3 Krachten

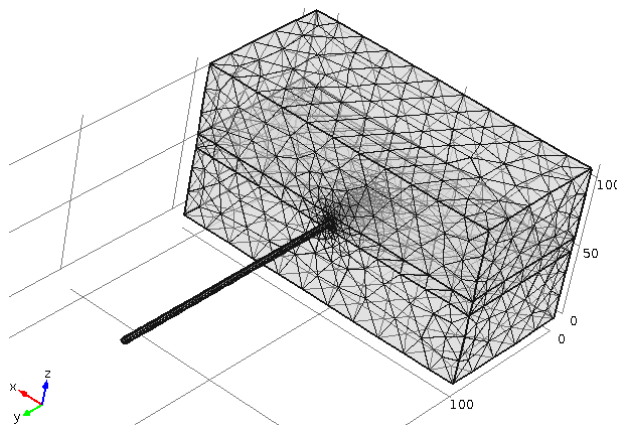
In het numerieke model is het bovenste spouwanker in de spouwmuur gemodelleerd, omdat dit de meest kritische locatie is in verband met de kleinste normaalkracht in de spouwmuur. Daarvoor wordt een voordruk aangebracht gelijk aan 300 N (blauwe pijlen; *Figuur 101*). De spouwmuur wordt belast door wind, waarvoor een q-last op het metselwerk is gemodelleerd die trek in het spouwanker veroorzaakt (gele pijlen; *Figuur 101*). Gekozen is om het spouwanker aan éénzijde in te klemmen en de andere zijde in te metselen, gelijk aan de geometrie gebruikt bij de experimenten (zie hoofdstuk 3). De werkende krachten zijn als volgt ingevoerd in het Comsol model:

|               |        |            |                 |
|---------------|--------|------------|-----------------|
| Voordruk      | 300 N  | z-richting | Boundary Load   |
| Windbelasting | 4800 N | y-richting | Boundary Load   |
| Inklemming    | -      | -          | Fixed Constrain |

### 6.1.4 Mesh

De gebruikte mesh voor de simulatie is weergegeven in *Figuur 102*. Gebruik is gemaakt van een physics-controlled mesh, dus bepaald door Comsol zelf. Gekozen is voor een fijnere mesh op en rondom het spouwanker, omdat het uittrekgedrag zich rondom deze plek plaatsvindt. De mesh bepaalt de berekening die gemaakt worden rondom het spouwanker en hoe fijner deze mesh hoe meer berekeningen worden gemaakt op de plek van de fijnere mesh.

Na het definiëren van de geometrie, materiaaleigenschappen, krachten en de mesh is het model gereed om het te laten berekenen door Comsol. De berekeningsmethode (methodologie) wordt in de volgende paragraaf toegelicht.



*Figuur 102: De gebruikte mesh voor de simulaties voor beide typen spouwankers.*

## 6.2 Methodologie

Met het hiervoor beschreven model is allereerst een stationaire berekening (het in één keer aanbrengen van de kracht) gemaakt om het lineaire materiaalgedrag van het model te controleren. Daarna is een tijdafhankelijke (stapsgewijs opvoeren van de belasting) simulatie uitgevoerd om de kracht-verplaatsingsgrafiek te modelleren en in de tijd het gedrag van het materiaal te kunnen analyseren. Als de modellen de gewenste resultaten geven worden met het tijdafhankelijke model niet-lineaire berekeningen uitgevoerd. Dit houdt in dat voor de materialen niet-lineair gedrag wordt aangenomen en een interface tussen spouwanker en mortel wordt gebruikt voor het modelleren van het uittrekgedrag van het spouwanker.

### 6.2.1 Stationaire Studie

Voor de stationaire studie van het lineaire materiaalgedrag wordt de afgeleide van de verplaatsingen gebruikt (formule 6.4 t/m 6.6). De volgende vergelijking geldt voor de tijd-onafhankelijke studie:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (6.9)$$

Waarin  $\partial^2 u$  de tweede afgeleide van de verplaatsing  $u$  is ten opzichte van de tijd. Dezelfde vergelijking kan gemaakt worden voor de twee overige richting  $v$  en  $w$ .

De kracht die aangrijpt op het metselwerk is gelijk genomen aan 4800 N, wat ongeveer gelijk is aan de kracht die het spouwanker kan opnemen voordat de 0,2%-rekgrens bereikt wordt:

$$F_{t,max} = \frac{1}{4} \pi \phi^2 \sigma_s = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 4^2 \cdot 387 = 4863 \text{ N} \quad (6.10)$$

### 6.2.2 Tijdafhankelijke studie

Voor de tijdafhankelijke studie wordt hetzelfde model gebruikt als bij de stationaire studie, alleen wordt nu de variabele tijd ( $\nu t$ ) toegevoegd. De variabele  $\nu t$  is de afgeleide van afhankelijke variabele  $\nu$  (of van de twee overige richtingen  $u$  of  $w$ ). Wanneer de materialen vervormen door een externe of interne kracht, blijven de coördinaten van de materialen gelijk aan  $X$  (de  $x$ -richting in het lokale assenstelsel), maar veranderen de ruimtelijke coördinaten met de tijd en aangebrachte krachten naar:

$$x = x(X, t) = X + u(X, t) \quad (6.11)$$

Waarin  $x$  gelijk is aan  $x$ -coördinaat.,  $X$  gelijk is aan  $x$ -coördinaat in het materiaalstelsel (lokaal stelsel) en  $t$  de tijd weergeeft.

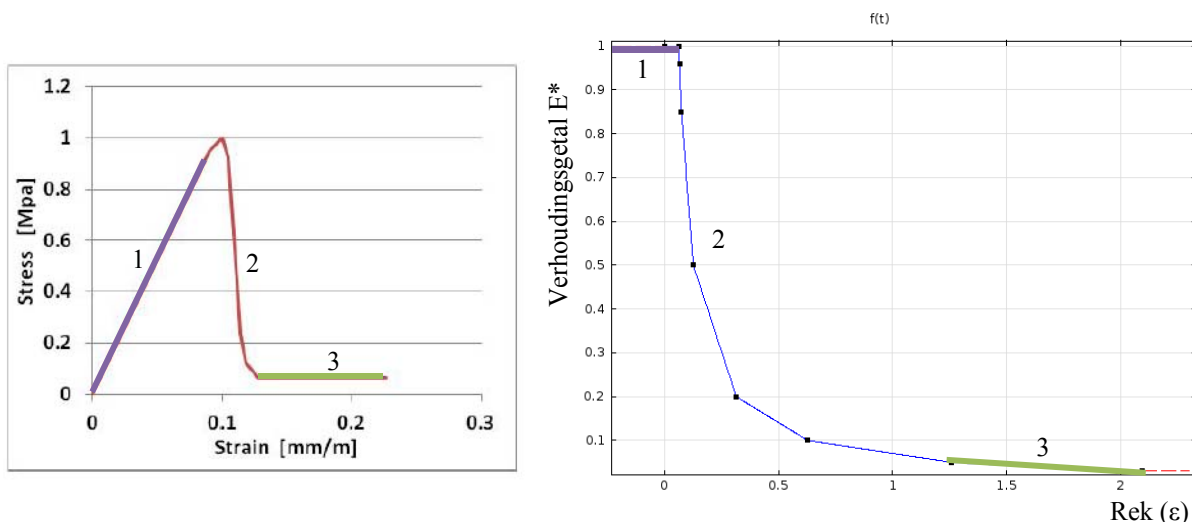
Omdat de coördinaten in het lokale assenstelsel tijdens deze studie gelijk blijven, wordt de positie van het proefstuk geheel bepaald door verplaatsing van het metselwerk in  $y$ -richting.

### 6.2.3 Niet-Lineair materiaalgedrag

De verbinding tussen het spouwanker en de mortel is belangrijk voor het uittrekgedrag van het spouwanker. Deze verbinding moet de krachten van het spouwanker overdragen naar de mortel. Voor het modelleren moeten twee handelingen worden uitgevoerd, die in de volgende paragrafen beschreven worden.

#### 6.2.3.1 Spanning-Rekdiagram

Bij het uittrekken van het spouwanker uit de mortel blijkt uit het experimentele onderzoek dat de hechting tussen mortel-spouwanker of mortel-steen als eerste bezwijkt. Deze hechting bezwijkt door het overschrijden van de laagst opneembare spanning door de mortel of spouwanker en is dus afhankelijk van de stijfheid van het materiaal. Tussen deze optredende spanningen, rek en de elasticiteitsmodulus van het materiaal zit een relatie, zoals blijkt uit de wet van Hooke (formule 6.1). Vermeltoort en Schijndel [VER&SCH] constateren uit de wet van Hooke dat het eenvoudiger is om de stijfheid van het materiaal aan te passen, dan de invoer van een spanning-rekdiagram (wat in het numerieke model 'normaal' wordt gedaan). In *Grafiek 33* zijn twee grafieken weergegeven om het bovenstaande verder toe te lichten. Links zijn de spanningen tegen de rekken uitgezet. Bij een bepaalde rek bezwijkt het materiaal en nemen de spanningen direct af. Als dit wordt uitgezet in een E-modulus-rek diagram (rechts in *Grafiek 33*) betekent dit dat bij het lineaire gedeelte van de spanning-rek verhouding de E-modulus gelijk blijft. Bij het bereiken van de maximale rek, neemt de E-modulus af en bezwijkt het materiaal. Zoals wordt aangeduid in *Grafiek 33*. Oftewel, de aanpassing van de elasticiteitsmodulus van het materiaal heeft hetzelfde effect als het invoeren van het spanning-rekdiagram in het numerieke model [VER&SCH].



*Grafiek 33: Weergave van (links) de wet van Hooke en (rechts)[VER&SCH] de E-modulus-rekdiagram. Links: De interpolatie functie  $f$  is getekend door het uitzetten van  $E^*$  en  $\epsilon$  gebruikt voor het simuleren van het bezwijken van het proefstuk.*

In Comsol kunnen geen spanningen worden ingevoerd omdat dit de uitvoer is van het model. Daarom is de invoer van de aangepaste E-modulus zoals weergegeven in *Grafiek 33* een ideale manier om in Comsol een niet-lineair materiaalgedrag in te voeren.

Tabel 20: Rek en E\* gebruikt in de simulatie.

| Rek    | E*    |
|--------|-------|
| 0,0000 | 1,00  |
| 0,0628 | 1,00  |
| 0,0655 | 0,96  |
| 0,0739 | 0,85  |
| 0,1257 | 0,50  |
| 0,3142 | 0,20  |
| 0,6283 | 0,10  |
| 1,2577 | 0,050 |
| 2,0940 | 0,030 |

$E^* = \text{Initiële elasticiteit modulus} / E_{\text{mortel}}$

De gegevens van *Tabel 20* zijn in de interpolatiefunctie ingeladen, wat resulteert in de afname van de elasticiteitsmodulus, zoals gegeven in *Grafiek 33*. In de tabel is in de eerste kolom de optredende rek in de mortel weergegeven. De tweede kolom geeft de verhouding E\* weer die berekend is door de initiële elasticiteitsmodulus te delen door de elasticiteitsmodulus van de mortel. Als deze twee kolommen tegen elkaar uit worden gezet in een grafiek volgt *Grafiek 33*. De getekende functie f weergeeft de elasticiteitsmodulus van de mortel weer, die bij maximale spanningen afneemt (daling van de blauwe lijn), zoals hiervoor besproken. De gevonden functie f wordt nu aan een van de materialen toegewezen. Omdat de mortel in het lineaire model het zwakste materiaal is en als eerste in het niet-lineaire gebied zal komen (bezwijkt als eerst), wordt de interpolatie functie f aan dit materiaal toegewezen. Dit gebeurt door voor de volgende materiaaleigenschap bij de elasticiteitsmodulus in te voeren:

$$E = E_0 * f(v) \tag{6.12}$$

Waarin E<sub>0</sub> de E-modulus is van de mortel en f(v) de interpolatie functie van v is.

Na de invoer van de interpolatie functie bij de Elasticiteitsmodulus van de mortel wordt met de tijdafhankelijke studie een berekening gemaakt voor het niet-lineaire materiaalgedrag.

### 6.2.3.2 Interface Spouwanker-mortel

Voor de verbinding tussen spouwanker en mortel moet een interface worden gemaakt in het model. Deze interface moet eigenschappen hebben die de aanhechting tussen spouwanker en mortel simuleert. Het uittrekgedrag van een spouwanker uit de mortel is opgedeeld in 3 stappen [HUT90]:

- Adhesie
- Onthechting
- Wrijving

Deze drie stappen moeten verwerkt worden in de interface voor de verbinding tussen spouwanker en mortel. Uit de literatuurstudie in hoofdstuk 2 blijkt dat de volgende drie modellen hierbij gebruikt kunnen worden (samen weergegeven in *Figuur 103*):

#### 1. Adhesie

Hierbij wordt het lineaire elastische gedrag van de mortel ingevoerd, met behulp van een Bond-Slip diagram en vergelijking 5.13 (*Figuur 101*):

$$\tau = k\delta \tag{6.13}$$

#### 2. Onthechting

Hierbij wordt de maximale nominale spanning van de mortel in het model ingevoerd. Deze stap is gelijk aan de verandering van de E-modulus (§6.2.3.1).

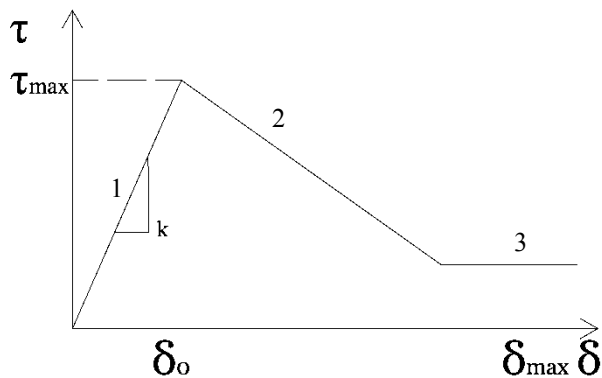
Tractie Separatiewet:

- Bezwijkcriteria ( $\tau_{\text{max}}$ )
- Schadeverloop ( $\delta_0 - \delta_{\text{max}}$ )

#### 3. Wrijving

Voor wrijving tussen de twee materialen kan de formule van Coulomb gebruikt worden:

$$\tau = \sigma_n \cdot \mu \tag{6.14}$$



Figuur 103: Combinatie van de bond-slip diagram, Tractie-Separatiewet en Coulomb effect. De nummers geven de grafieken van de hierboven opgesomde modellen weer.

In het model worden niet de grafieken ingevoerd, maar worden bij de drie punten de beschreven formules ingevoerd. Doormiddel van een contact pair (in Comsol te vinden onder model; definitiefs; contact pair) die gekoppeld wordt aan een van gemaakte geometrieën (in Comsol te vinden onder model; solid mechanics; contact) wordt een laagje tussen het spouwanker en mortel visueel gemaakt. In werkelijkheid zit dit laagje er natuurlijk niet.

### 6.3 Resultaat

De hiervoor beschreven studies zijn uitgevoerd op de beschreven geometrie in §6.1, voor beide typen spouwankers. Intotaal zijn drie simulaties uitgevoerd voor allebei de typen spouwankers uitgewerkt in deze paragraaf. Begonnen is met een stationaire berekening, waarbij de kracht in één keer wordt aangebracht. Voor alle materialen is in deze berekening lineair materiaalgedrag aangehouden. De tweede berekening is een tijdsafhankelijke berekening, waarbij stapsgewijs de belasting wordt opgevoerd. Ook in dit model zijn voor alle materialen lineair materiaalgedrag aangehouden. De derde en laatste berekening is ook een tijdsafhankelijke berekening, alleen is hier voor de mortel een niet-lineair materiaalgedrag aangehouden.

#### 6.3.1 Stationair

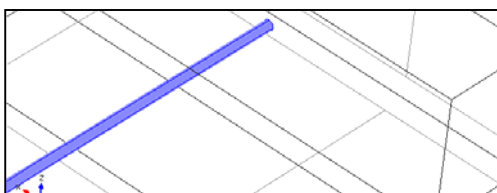
In deze paragraaf is het resultaat weergegeven van de stationaire studies van beide typen spouwankers. In de linker kolom wordt het resultaat van het rechte spouwanker uitgewerkt. De rechter kolom geeft het resultaat van het spouwanker met golven weer.

##### Invoer:

$$F_{t,max} = 4800 \text{ N}$$

$$F_{voordruk} = 300 \text{ N}$$

Materiaalgegevens uit §6.1.



Figuur 104: Een recht spouwanker gemodelleerd in COMSOL, zoals beschreven in §6.1.

##### Uitkomst:

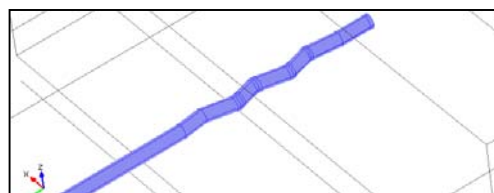
De spanningen in het contactvlak tussen mortel-spouwanker lopen op tot  $50 \text{ N/mm}^2$  (Figuur 106). De grootste spanningsconcentraties zitten rondom het spouwanker, wat bij overschrijden van de buigtreksterkte van de mortel de mortel doet bezwijken. De mortel wordt dan ook deels uit de voeg getrokken, maar de spouwanker-mortel verbinding onthecht niet (rood in Figuur 108). Comsol gaat er bij

##### Invoer:

$$F_{t,max} = 4800 \text{ N}$$

$$F_{voordruk} = 300 \text{ N}$$

Materiaalgegevens uit §6.1.



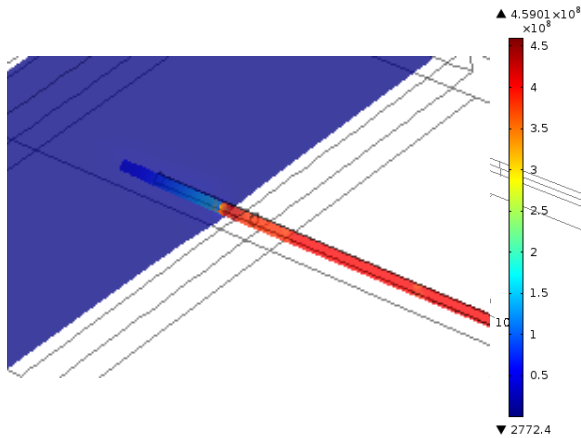
Figuur 105: Een spouwanker met golven gemodelleerd in COMSOL, zoals beschreven in §6.1.

##### Uitkomst:

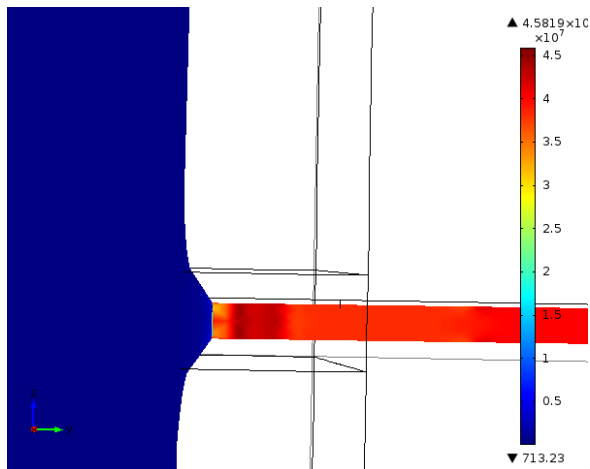
De spanningen in de mortel, maar ook in het spouwanker lopen op. Vooral in de binnenhoeken van het golvend spouwanker zijn de spanningen tot aan vloeigrens ongeveer  $400 \text{ N/mm}^2$  geconstateerd (zie rode pijlen in Figuur 107). De spanningen in de binnenhoeken van het golvend spouwanker hebben dan een spanning van ongeveer  $300 \text{ N/mm}^2$ . Net als bij het rechte spouwanker zijn de spanningen in het



een lineair elastisch model vanuit dat de verbinding tussen mortel en spouwanker optimaal is en dus niet bezwijkt.



Figuur 106: Von Mises spanningen in de mortel en recht spouwanker bij een stationaire studie, gegeven in  $N/m^2$ .

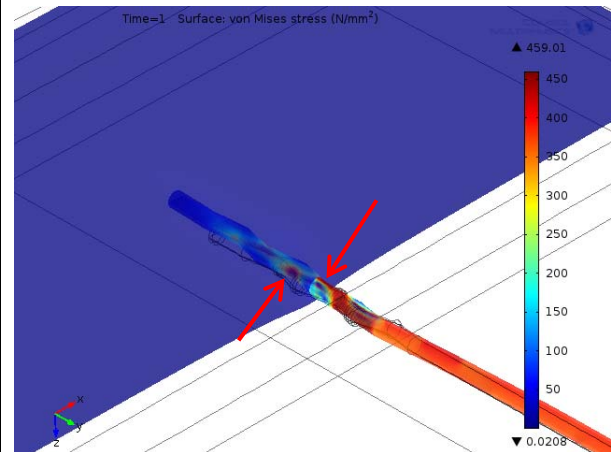


Figuur 108: Von Mises spanningen in het proefstuk met recht spouwanker gegeven in  $N/m^2$ . Het naar buiten trekken van de mortel door de optimale hechting tussen spouwanker en mortel.

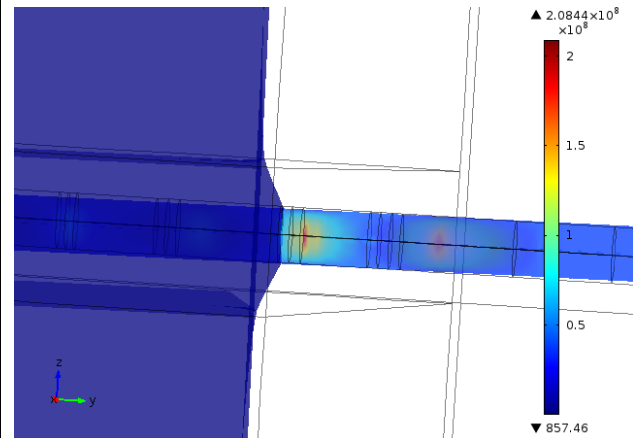
De grootste verplaatsingen van of in het proefstuk vinden plaats bij het metselwerk omdat daarop de trekkracht aangrijpt. Het spouwanker kan niet verplaatsen omdat dit ingeklemd wordt, zoals blijkt uit *Figuur 110* (spouwanker verplaatst niet). De verplaatsing die het metselwerk ondergaat is slechts 0,053 mm (*Figuur 110*). Omdat de berekening niet tijdafhankelijk is uitgevoerd, worden in de kracht-verplaatsingsgrafiek alleen punten weergegeven. Bij de tijdafhankelijke studie kan wel een kracht-verplaatsingsgrafiek gesimuleerd worden.

contactvlak tussen mortel-spouwanker ongeveer  $50 N/mm^2$  (blauw in *Figuur 107*). De grootste spanningsconcentraties zitten in het spouwanker zelf, omdat het model in deze berekening het spouwanker recht wil trekken.

Net als bij het rechte spouwanker, wordt ook hier de mortel uit de voeg getrokken. Net als bij het rechte spouwanker zit deze vast aan het spouwanker (*Figuur 109*).

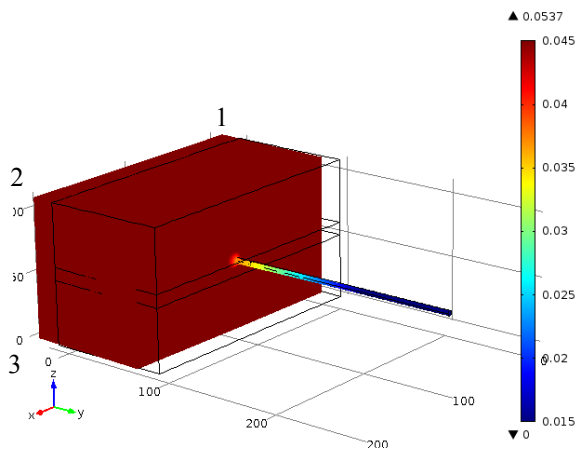


Figuur 107: Von Mises spanningen in de mortel en spouwanker met golven bij een stationaire studie, gegeven in  $N/mm^2$ .

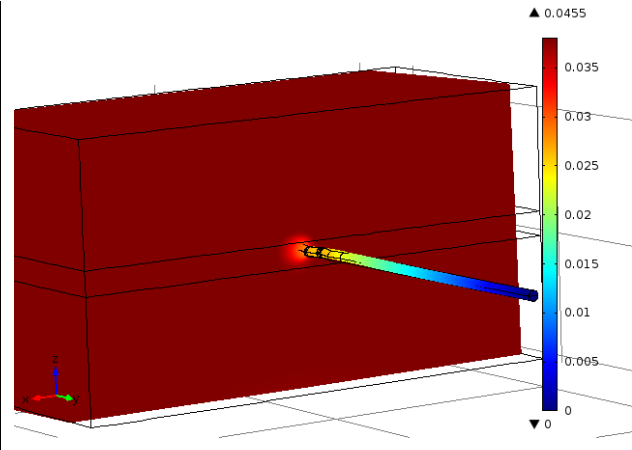


Figuur 109: Von Mises spanningen in het proefstuk met golvend spouwanker gegeven in  $N/m^2$ . Het naar buiten trekken van de mortel door de optimale hechting tussen spouwanker en mortel. Haaks op de golven is de afbeelding gemaakt.

De verplaatsing die het metselwerk ondergaat is slechts 1,2 mm (*Figuur 111*). Het metselwerk beweegt zich niet evenwijdig naar achter omdat dit wordt komt door het bezwijken van de mortel met spouwanker verbinding. Heeft de mortel niet-lineair gedrag dan zal de mortel verbrijzeld worden en beweegt het proefstuk evenwijdig naar achter. De kracht-verplaatsingsdiagram van het niet-lineair materiaalgedrag van mortel is gegeven in *Grafiek 35* in de volgende paragraaf.



Figuur 110: Verplaatsingen (in mm) in het proefstuk bij een stationaire studie, waarin een spouwanker zonder golven is gemodelleerd. De nummering geeft de punten weer van de meting van de verplaatsing voor grafiek 34.



Figuur 111: Verplaatsingen (in mm) in het proefstuk bij een stationaire studie, waarin een spouwanker met golven is gemodelleerd. De verplaatsing is groter dan bij het linker plaatje.

### Discussie:

Geconcludeerd kan worden dat het uittrekgedrag beïnvloed wordt door de vorm van het spouwanker, met name voor de optredende spanningen. Deze spanningen worden bij het spouwanker met golven vooral geconcentreerd rondom de binnenhoeken van het spouwanker, waar deze hoog oplopen (rode pijlen Figuur 107). Bij het rechte spouwanker zitten de grootste spanningen vooral rondom het spouwanker (Figuur 106). Bij beide typen spouwankers wordt de mortel uit de voeg getrokken, door een optimale verbinding tussen spouwanker en mortel (Figuur 108 en Figuur 109).

### 6.3.2 Tijdafhankelijk

Voor beide typen spouwankers is ook een tijdafhankelijke studie uitgevoerd, om in de tijd de verplaatsing en spanningen te kunnen analyseren. In de linkerkolom wordt het resultaat van het rechte spouwanker uitgewerkt. De rechter kolom geeft het resultaat van het spouwanker met golven weer.

#### Invoer:

$$F_{t,max} = 4863 * t$$

$$F_{voordruk} = 300 \text{ N}$$

Bereik van tijd: (0,0.1,1)

(begintijd;stappen van de tijd;eindtijd)

#### Uitkomst:

De resultaten van de tijdafhankelijke studie zijn gelijk aan die van de stationaire studie (zie de afbeeldingen in §6.3.1), alleen kan nu een kracht-verplaatsingsgrafiek gegenereerd worden. De kracht-verplaatsingsgrafiek in Grafiek 34 geldt alleen voor het lineaire materiaalgedrag van alle gebruikte materialen. Hierin is te zien dat het proefstuk in y-richting maximaal 0,5 mm verplaatst bij een  $F_{t,max}$  van ongeveer 4410 N (gelijk aan 0,1 N/mm<sup>2</sup>). De verplaatsingsgrafiek is gemaakt van de vier hoekpunten van het model waarop de windbelasting aangrijpt (nummering in Figuur 110).

Daarnaast kunnen in stappen van 0,1 seconde de verplaatsing en spanningen van/in het proefstuk worden geanalyseerd.

Het niet-lineaire materiaalgedrag van de mortel is in de analyse meegenomen door een stepfunctie voor de E-

#### Invoer:

$$F_{t,max} = 4863 * t$$

$$F_{voordruk} = 300 \text{ N}$$

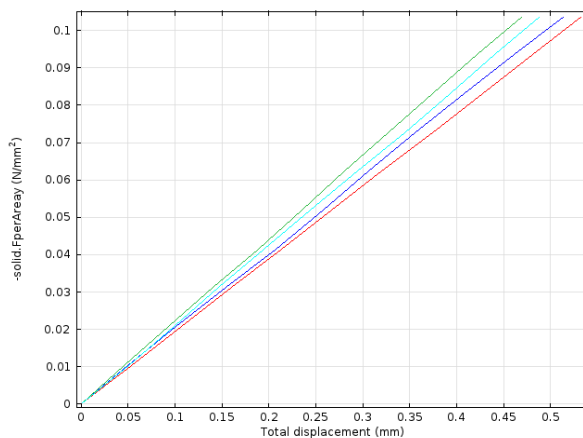
Bereik van tijd: (0,0.1,1)

#### Uitkomst:

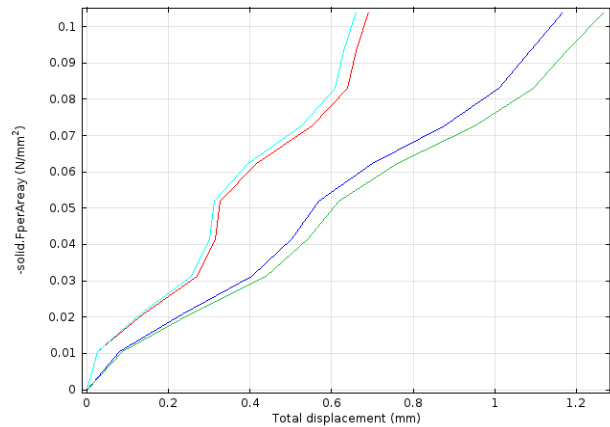
De resultaten van de tijdafhankelijke studie zijn gelijk aan die van de stationaire studie, alleen kan nu een kracht-verplaatsingsgrafiek gegenereerd worden.

De kracht-verplaatsingsgrafiek in Grafiek 35 geldt alleen voor het lineaire materiaalgedrag van alle gebruikte materialen. In de grafiek is goed te zien dat het proefstuk niet evenwijdig is verplaatst. De lijnen geven de verplaatsing van het metselwerk weer (zie nummering in Figuur 110, voor meting van de verplaatsing). De totale verplaatsing die het proefstuk heeft ondergaan is 1,2 mm aan de ene zijde van het proefstuk en 0,7 mm aan de andere zijde. Zoals in de vorige paragraaf vermeld is, komt de niet-evenwijdige verplaatsing door de golven van het spouwanker. De belasting die nodig is voor de verplaatsing is ongeveer 4410 N (gelijk aan 0,1 N/mm<sup>2</sup>), gelijk aan het resultaat van het rechte spouwanker.

modulus van de mortel in te voeren in het model (beschreven in §6.2.3). De verplaatsingen en spanningen bleven onveranderd ten opzichte van het lineaire materiaalgedrag van de mortel (zie §6.3.1).



Grafiek 34: Kracht verplaatsing-grafiek van de tijd afhankelijke studie met lineair materiaalgedrag van een recht spouwanker in een proefstuk.



Grafiek 35: Kracht verplaatsing-grafiek van de tijd afhankelijke studie met niet-lineair materiaalgedrag van de mortel en een golvend spouwanker in een proefstuk.

#### Discussie:

De twee simulaties hebben een ander verplaatsinggedrag wat komt door de invoer van het spouwanker. De totale optredende kracht die nodig is om het spouwanker een zekere afstand te kunnen verplaatsen is in beide situaties gelijk en bedraagt ongeveer 4800 N (dit geeft 0,1 N/mm<sup>2</sup>). De invoer van het niet-lineaire materiaalgedrag van de mortel doormiddel van de stepfunctie, heeft geen invloed gehad op het uittrekgedrag van het spouwanker.

#### 6.4 Conclusie

Uit de numerieke simulaties kan geconcludeerd worden dat het type spouwanker invloed uitoefent op het uittrekgedrag, optredende spanningen en verplaatsing die het proefstuk ondergaat. Dit is gelijk aan de constatering die gedaan zijn bij het experimentele onderzoek. De spanningen die optreden bij een golvend spouwanker zijn hoger dan bij een recht spouwanker. Bij het rechte spouwanker is vooral de connectie tussen spouwanker-mortel belangrijk (gelijke constatering als met het experimentele onderzoek). De benodigde kracht voor een zekere verplaatsing is in beide situaties (golvend en recht spouwanker) nagenoeg gelijk aan elkaar.

In het model zijn alleen lineaire berekeningen gemaakt, waardoor een concreet antwoord over het uittrekgedrag van het spouwanker onbeantwoord blijft. In een vervolgonderzoek moet de interface tussen mortel en spouwanker gemodelleerd worden voor een uitspraak over het uittrekgedrag. Daarna kunnen de analytische modellen worden vergeleken met het numerieke model en een reken- en testmethode worden opgesteld.



## 7 Vergelijking en interpretatie resultaten

In de eerste paragraaf van dit hoofdstuk zijn de proefresultaten uit hoofdstuk 3 vergeleken met de resultaten uit:

- de analytische modellen;
- de statistische modellen;
- de toetsingen uit de normen, voorschriften en publicaties.

Na de vergelijking van de resultaten volgt in de tweede paragraaf een discussie over de verwerking van de onderzoeksresultaten in (een aanzet tot) een nieuwe reken- en testmethode voor de toetsing van de trek- ( $F_{t,max}$ ) en drukcapaciteit ( $F_{d,max}$ ) van spouwankers.

### 7.1 Vergelijking resultaten

In hoofdstukken 4 en 5 zijn modellen opgesteld voor het voorspellen van  $F_{t,max}$  en  $F_{d,max}$ . In deze paragraaf zijn de modellen en de toetsingen uit de normen vergeleken met de experimentele resultaten. In de volgende subparagraaf wordt met  $F_{t,max}$  (trekcapaciteit) van het spouwanker gestart en vervolgens wordt de  $F_{d,max}$  (drukcapaciteit) van het spouwanker behandeld.

#### 7.1.1 Trekcapaciteit

In het huidige onderzoek zijn vier typen spouwankers getest in drie mortelkwaliteiten. Voor elke type spouwanker, ingelegd in de verschillende mortelkwaliteiten, zijn de gemiddelde waarden  $F_{t,max}$  uit het experimentele onderzoek en de voorspellingen met behulp van het statistische en analytische modellen van  $F_{t,max}$  gegeven in Tabel 21. De gebruikte formules voor het berekenen van  $F_{t,max}$  zijn in de onderste drie regels van de tabel verwerkt. Daarnaast is de volledige uitwerking van de resultaten in de hoofdstukken 3, 4 en 5 terug te vinden. Bij het experimentele onderzoek zijn vijf gebreken opgetreden. In Tabel 21 is de gemiddelde  $F_{t,max}$  gegeven waarbij alle gebreken zijn meegenomen. Voor  $F_{t,max}$  per geconstateerd gebrek, wordt verwezen naar Tabel 4 op pagina 60.

Tabel 21: Gemiddelde uittrekwaarden van het experimentele, literatuur, statistische en analytische onderzoeken, waarbij geen rekening is gehouden met geconstateerde gebreken. De gegeven resultaten zijn gebaseerd op een inlegdiepte van 40 mm en een diameter van 4 mm.

| Spouwanker Type   | Mortelkwaliteit  | Voorspelde $F_{t,max}$ (N)    |         |                  |               |      |
|---|------------------|-------------------------------|---------|------------------|---------------|------|
|   |                  | $F_{t,max}$ (N) Experimenteel | Normen* | Statistiek**     | Analytisch*** |      |
| UNI 275<br>$\sigma_t = 674 \text{ N/mm}^2$  | M5               | 2457                          | 4601    | 1429             | 2472          | 1256 |
|   | M10              | 2174                          |         |                  | 2326          | 1759 |
| B300*<br>$\sigma_t = 751 \text{ N/mm}^2$  | M5               | 1921                          | 7882    | Niet vrijgegeven | 1503          | 1256 |
|   | M10              | 1875                          |         |                  | 1357          | 1759 |
| UNI-L<br>$\sigma_t = 815 \text{ N/mm}^2$  | M5               | 3216                          | 4553    | 1429             | 3234          | 1256 |
|   | M10              | 2439                          |         |                  | 3088          | 1759 |
| UNI-Lijm<br>$\sigma_t = 674 \text{ N/mm}^2$   | M15 (Lijmmortel) | 4035                          | 4601    | 2500             | 4090          | 2261 |
| * $F_{t,max} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot f_s$ en $F_{t,max} = \frac{F_{t,max;d}}{\gamma_m}$ |                  |                               |         |                  |               |      |
| **Gebruikte parameters in het model (formule 4.8): Inlegdiepte = 40 mm en spouwanker Ø4                 |                  |                               |         |                  |               |      |
| *** $F_{t,max} = l_b \cdot \pi \cdot \phi \cdot f_b$  |                  |                               |         |                  |               |      |

#### Voorspelling $F_{t,max}$

De resultaten die volgen uit formule 2.2 (hoofdstuk 2) komen niet overeen met de resultaten uit het experimentele onderzoek, zoals in Tabel 21 terug te zien is (kolom 3 en 4).  $F_{t,max}$  wordt in formule 2.2 bepaald aan de hand van de treksterkte van het spouwanker, uit het experimentele onderzoek volgen andere vormen van bezwijken van het spouwanker (hoofdstuk 3). De tweede toetsing die in de normen wordt gebruikt (kolom 5 in Tabel 21), geeft een veilige benadering van de uittrekwaarde van het spouwanker. Deze waarden liggen onder de gevonden experimentele waarden. Aan de hand van de tabel kan geconcludeerd worden dat de toetsing op basis van de treksterkte een bovengrens is van de bezwijkvormen van het spouwanker en de toetsing op basis van leverancier A (waardes leverancier B zijn onbekend) een veilige benadering is van de capaciteit van het spouwanker.

Het statistische model geeft een voorspelling voor  $F_{t,max}$  die met een klein percentage boven de gemiddelde  $F_{t,max}$  uit de experimenten zit. In het statistische model wordt geen rekening gehouden met de gebreken die op kunnen treden, waardoor deze met de gemiddelde  $F_{t,max}$  uit de experimenten in Tabel 21 vergeleken kunnen worden. Uit

het statistisch model blijkt dat de B300 spouwankers met Ø4 mm en een inlegdiepte van 40 mm niet voldoen aan  $F_{t,max} \geq 1000\text{N}$  (eis in EC6). De B300 spouwankers hebben een karakteristieke waarde van 517 N met M5-mortel en 366 N met M10-mortel. Het experimentele onderzoek toont geen resultaten waarbij niet voldaan wordt aan de eis uit EC6. Dit komt doordat het statistische model een voorspelling doet met de gekozen parameters. Daarnaast valt op dat de B300 spouwankers net als in het experimentele onderzoek een lagere  $F_{t,max}$  hebben, dan de UNI275 spouwankers, ondanks de hogere 0,2% rekgrens. Over dit probleem is literatuur te vinden die strijdig is met de resultaten van de experimenten.

- Volgens Gordon [GOR78] draait de spanningssituatie om bij een grotere stijfheid van het spouwanker dan van de mortel, waardoor de grotere spanningsconcentraties zich aan het einde van de inlegdiepte bevinden.
- Madsø [MAD80] toont met de experimenten aan dat een hogere 0,2%-rekgrens van het spouwanker zorgt voor een hogere  $F_{t,max}$ .

Het analytische model maakt geen onderscheid in type spouwanker waardoor alle typen spouwankers bij dezelfde mortelkwaliteit, dezelfde  $F_{t,max}$  hebben. In het analytische model worden vier bezwijkvormen getoetst. De laagst gevonden waarde voor  $F_{t,max}$  geeft de voorspelling voor de uittrekwaarde van het spouwanker. Uit hoofdstuk 5 volgt dat voor een inlegdiepte van 40 mm en een spouwanker Ø4 mm de hechting tussen spouwanker maatgevend is voor alle typen mortelkwaliteiten. Deze zijn dan ook weergegeven in *Tabel 21*. Doordat geen rekening is gehouden met het type spouwanker is een groter verschil zichtbaar tussen de resultaten van het experimentele onderzoek en de analytische berekeningen.

Het verschil in de drie hierboven beschreven modellen is als volgt verklaard:

- Bij de normen wordt gerekend met de treksterkte van het spouwanker. Dit gebrek is tijdens de experimenten niet opgetreden.
- De statistische voorspelling is gebaseerd op de resultaten uit het experimentele onderzoek.
- De analytische berekeningen zijn gebaseerd op het zwakste gebrek van het proefstuk (hoofdstuk 3).

#### Voorspelling verplaatsing van het spouwanker

De verplaatsing van het spouwanker bij uittrekken is belangrijk voor het construeren van een spouwanker in een spouwmuur. Als bij de spouwmuur spouwanker 1 een ander uittrekgedrag optreedt dan bij spouwanker 2, doordat de verplaatsing van spouwanker 2 drie keer zo groot is, is de krachtsafdracht per spouwanker verschillend.

Zoals blijkt uit het experimenteel onderzoek is de verplaatsing die het spouwanker ondergaat bij het uittrekken verschillend per geconstateerd gebrek (zie *Tabel 4* op pagina 60). Daardoor is de bepaling van de gemiddelde verplaatsing van een type spouwanker niet mogelijk, omdat het afhangt van de vorm van bezwijken. In de normen, voorschriften en publicaties wordt  $F_{t,max}$  van één spouwanker getoetst en wordt de verplaatsing die het spouwanker ondergaat niet meegenomen.

In de analyse van het statistisch model wordt het gemiddelde gebaseerd op alle proefresultaten en wordt er dus geen onderscheid gemaakt per gebrek aan het proefstuk. Hierdoor kunnen spouwankers stijver of slapper reageren dan wordt aangenomen via het statistische model. Echter kan de verplaatsing van het spouwanker wel nauwkeurig bepaald worden.

De analytische berekeningen kunnen net als het statistische model niet gebruikt worden voor de interactie tussen spouwankers in een spouwmuur. Hiervoor dient een numerieke berekening gemaakt te worden, waarin de parameters worden verwerkt die en relatie hebben met de verplaatsing van het spouwanker bij  $F_{t,max}$ .

#### Uittrekgedrag:

Een algemeen bezwijkgedrag kan beschreven worden voor het spouwanker (de individuele beschrijving per type spouwanker is gegeven in hoofdstuk 3):

*Het uittrekgedrag kan verdeeld worden in drie stappen; 1. Adhesie; 2. Onthechting; 3. Wrijving. Deze drie stappen verschillen per type spouwanker omdat onthechting op verschillende momenten kan optreden. Doorgaans kan worden aangenomen dat de aanhechtspanningen in het contactvlak tussen spouwanker en mortel toenemen, bij toename van  $F_{t,max}$  tot een maximum. Dit geldt tevens voor de hechtspanningen tussen mortel en steen. Wanneer het maximum van de op te nemen spanningen wordt bereikt, bezwijkt het proefstuk;  $F_{t,max}$  is bereikt. Het verschil in onthechting van steen en mortel is bij deze vorm van bezwijken dat een directe terugval van de kracht plaatsvindt. Bij onthechting tussen mortel en spouwanker vindt dit geleidelijk plaats.*

### 7.1.2 Drukcapaciteit

De proefresultaten bij het belasten op druk zijn in *Tabel 22* uitgewerkt voor drie verschillende modellen die  $F_{d,max}$  voorspellen.

*Tabel 22: Gemiddelde uittrekwaarden van het experimentele, literatuur, statistische en analytische onderzoeken, waarbij geen rekening is gehouden met geconstateerde gebreken. De gegeven resultaten zijn gebaseerd op een inlegdiepte van 40 mm, beginexcentriciteit van 1 mm en een diameter van 4 mm.*

| Spouwanker Type                             | Mortel-kwaliteit | Spouwbreedte | $F_{d,max}$ (N) | Voorspelde $F_{d,max}$ (N) |      |              |               |
|---|------------------|--------------|-----------------|----------------------------|------|--------------|---------------|
|   |                  |              | Experimenteel   | Normen*                    |      | Statistiek** | Analytisch*** |
| UNI250<br>$\sigma_t = 674 \text{ N/mm}^2$   | M5               | 150          | 1561            | 450                        | 1146 | 1932         | 1041          |
| UNI275<br>$\sigma_t = 674 \text{ N/mm}^2$   | M5               | 180          | 1423            | 380                        | 975  | 1664         | 822           |
|   | M10              |              | 1469            |                            | 941  |              |               |
| UNI300<br>$\sigma_t = 674 \text{ N/mm}^2$   | M5               | 200          | 1074            | 340                        | 771  | 1363         | 610           |
| UNI350<br>$\sigma_t = 674 \text{ N/mm}^2$   | M5               | 275          | 746             | 210                        | 485  | 1095         | 424           |
| UNI-Lijm<br>$\sigma_t = 674 \text{ N/mm}^2$ | M15              | 200          | 1125            | 340                        | 740  | 1504         | 639           |

\*  $F_{d,max} = \frac{F_{d,max;d}}{\gamma_m}$  en  $F_{sp,R} = \frac{f_s}{\frac{1}{A_s} + \frac{n_s-1}{W_s} \cdot \frac{e}{W_s}}$

\*\* Gebruikte parameters in het model (formule 4.12): Ø4, beginexcentriciteit=1mm, inlegdiepte=40mm

\*\*\*  $\frac{F_{d,max}}{A} + \frac{n_s}{n_s-1} \cdot \frac{F_{d,max} \cdot e}{W} \leq \sigma_s$  (zie §5.2)

#### Voorspelling $F_{d,max}$

Volgens de normen wordt  $F_{d,max}$  bepaald met formule 2.4 of 2.5 (3<sup>de</sup> en 4<sup>de</sup> kolom in

*Tabel 22*). In beide gevallen zijn de gevonden waarden met de formules lager dan de gemiddelde waarden uit het experimentele onderzoek. De verkregen waarden van de leverancier zijn flink lager, mogelijk is hier een ander bezwijkgedrag opgetreden, maar dit is niet gegeven bij de verkregen waarden van de leverancier.

De resultaten die volgen uit de analytische berekeningen hebben een  $\alpha$ -factor verschil van 1,76 bij spouwbreedte groter dan 150 mm en bij spouwbreedte kleiner dan 150 mm is het  $\alpha$ -factor verschil gelijk aan 1,50. Daarnaast wordt geen onderscheid gemaakt tussen morteltype en spouwanker type. De resultaten zijn gebaseerd op buiging en normaalkracht in het spouwanker.

Als het statistische model vergeleken wordt met de resultaten van de experimenten, zijn deze waarden ongeveer 300 N hoger ( $\pm 20\%$ ). In het statisch model zijn alle typen spouwankers (zowel UNI-Lijm spouwankers als UNI275 spouwankers in M10-mortel) meegenomen. De karakteristieke waarden worden berekend per spouwbreedte, inlegdiepte, diameter en beginexcentriciteit en kunnen gebruikt worden voor de voorspelling van  $F_{d,max}$ .

#### Invloed ‘maatafwijking’

Met de invloed van de ‘maatafwijking’ wordt de beginexcentriciteit en scheefstand bedoeld. Deze twee zijn voordat het proefstuk belast is ingemeten ten opzichte van een rechte staaf (zie uitleg hoofdstuk 3).

In de toetsing van de normen wordt de scheefstand niet meegenomen, maar daarentegen de beginexcentriciteit wel. Deze heeft een dermate grote invloed in de formule dat bij een twee keer zo grote beginexcentriciteit  $F_{d,max}$  twee keer zo klein wordt. Uit de experimenten volgt deze constatering niet. De beginexcentriciteit heeft een relatie met  $F_{d,max}$  maar die is gering waardoor  $F_{d,max}$  uit de toetsingen verschilt met de resultaten van het experimentele onderzoek.

#### Kniklengte

De kniklengte is bij het experimentele onderzoek aangenomen als  $l_k = 0,71 \cdot l$ . In de toetsingen uit de norm wordt de kniklengte gelijk aan de spouwbreedte gesteld. Dit is correct wanneer beide spouwbladen uit metselwerk bestaat, zoals blijkt uit de mate van inklemming van het spouwanker in de mortel uit het experimentele onderzoek. Dit wordt door de informatie uit de Catalogus uit Noorwegen [15] tegen gesproken. Daar wordt vermeld dat een spouwanker in twee gemetselde spouwbladen de kniklengte gelijk is aan  $l_k = 0,5 \cdot l$  (bijlage 3).



In het analytisch model, moet net als bij de toetsingen uit de normen (formule 2.5), een kniklengte bepaald worden. Omdat de gebruikte proefopstelling in het experimentele onderzoek niet optimaal is, waardoor niet met 100% zekerheid aangenomen kan worden dat er een inklemming is gesitueerd, kan geen definitief antwoord gegeven worden op de kniklengte per inlegdiepte en morteltype. Aan de hand van de proefresultaten is berekend en vastgesteld dat de kniklengte 0,71\*1 bedraagt en daarmee is het analytische model opgesteld.

### Het knikgedrag

Het spouwanker zal knikken bij drukbelasting, maar de knikkromme is afhankelijk van de kniklengte van het spouwanker. Daarbij is niet alleen de kniklengte (afhankelijk van de mate van inklemming door de mortel en inlegdiepte) bepalend, ook de scheefstand en beginexcentriciteit heeft invloed op de knikkromme van het spouwanker.

Alleen in het statistisch model kan de invloed van de verschillende parameters op de knikkromme van het spouwanker bepaald worden, zoals spouwbreedte, beginexcentriciteit, scheefstand, inlegdiepte en diameter. Uit die analyse (hoofdstuk 4) is gebleken dat dezelfde parameters invloed hebben op  $F_{d,max}$  als op de vervorming van het spouwanker (knikkromme) en die zijn:

- Inlegdiepte
- Diameter
- Beginexcentriciteit

Het knikgedrag kan als volgt beschreven worden:

*Een spouwanker belast op druk gaat knikken bij de overschrijving van de Eulerse knikkracht. Aan de mortel zijn op dat moment geen gebreken geconstateerd waaraan opgemerkt kan worden dat het spouwanker knikt. Bij  $F_{d,max}$  is het spouwanker geknikt, maar is de vervorming van het spouwankers nauwelijks te zien. Tijdens het doorbelasten van het spouwanker is de knikkromme van het spouwanker zichtbaar en is de spanning in het spouwanker opgelopen zodat deze plastisch vervormt. Na ontlasten keert het spouwanker bijna in oorspronkelijk toestand terug omdat deze belast is tot de 0,2%-rekgrens.*

## 7.2 Interpretatie resultaten

In deze paragraaf is de interpretatie van de resultaten gegeven voor de basis van een aanzet van een nieuw reken- en testmethode.

### 7.2.1 Trekcapaciteit

Twee van de drie modellen (analytisch en statistisch) die een voorspelling geven van  $F_{t,max}$  kunnen worden gebruikt voor de aanzet van een nieuwe reken- en testmethode. Daarbij is het statistische model geschikt voor de voorspelling van  $F_{d,max}$  en  $F_{t,max}$  wanneer genoeg data beschikbaar is in het statistisch model, zodat de voorspelling nauwkeurig is. Omdat een constructeur vaak niet over deze data beschikt, worden uit de statistische analyse de belangrijkste parameters gehaald, die verwerkt moeten zijn in de rekenmethode. Uit de statistische analyse volgt dat de volgende parameters een relatie hebben met  $F_{t,max}$ :

- Diameter spouwanker
- Inlegdiepte
- Mortelkwaliteit
- Staalkwaliteit spouwanker

Uit de analytische berekening in hoofdstuk 5 volgen deze parameters eveneens. Omdat uit het experimenteel onderzoek volgt dat niet één maar meerdere vormen van bezwijken optreden, moeten deze allen getoetst worden. De laagste  $F_{t,max}$  van de bezwijkvormen wordt dan als trekcapaciteit van het spouwanker gezien. In de analytische berekeningen worden vier bezwijkvormen getoetst, waarbij  $F_{t,max}$  wordt bepaald (zie voor uitleg van de formules hoofdstuk 5):

- Spanningen in het contactvlak tussen mortel en spouwanker
 
$$F_{aanhechtkracht} = \pi \cdot l_b \cdot \phi \cdot f_b \quad (7.1)$$
 waarin  $f_b$  gelijk is aan de buigtreksterkte van de mortel

- Hechtsterkte tussen steen en mortel
 
$$F_{hechsterkte} = A \cdot f_t \quad (7.2)$$
 waarin  $f_t$  gelijk is aan de hechtsterkte tussen steen en mortel

$f_t = 0,10 \text{ N/mm}^2$  voor baksteen met metselmortel (volgens leverancier)

$f_t = 0,15 \text{ N/mm}^2$  voor baksteen met lijm mortel (volgens NEN-EN 1991-1-1 en EN 998-2)

- Buigtreksterkte van de steen
 
$$f_{ct} = \frac{3 \cdot Fl}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad (7.3)$$

- Treksterkte van het spouwanker

$$F_{t,max} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \phi \cdot f_s \quad (7.4)$$

De laagste waarde berekend voor  $F_{t,max}$  kan als ondergrens worden aangenomen. De laagste waarde waarbij één van de materialen bezwijkt, wordt dan als bovengrens aangenomen en zal de buigtreksterkte van de steen zijn.

De hechtsterkte van de mortel met steen moet in de praktijk bij elke steen- en mortelcombinatie getest worden omdat deze sterk kan variëren en afhankelijk is van vele factoren, zoals vochtigheid van de steen en de mortel.

De bovenstaande beschreven ondergrens geldt alleen voor het berekenen van  $F_{t,max}$  van één spouwanker. De interactie tussen de spouwankers is niet meegenomen en moet met behulp van een andere rekenmethode bepaald worden in een vervolgonderzoek. Wanneer enkele materiaalgegevens niet bekend zijn is het statistische model een goede voorspelling voor  $F_{t,max}$ .

### 7.2.2 Drukcapaciteit

Net als bij de bepaling van de trekcapaciteit kunnen ook hier twee van de onderzochten modellen gebruikt worden, namelijk het statistische en analytische model. Daarbij geldt eveneens dat de constructeur vaak niet de dataset met proefresultaten van spouwankers bezit en daarom een analytisch model de voorkeur heeft. Uit het statistische model en experimentele onderzoek is gebleken dat vier parameters een relatie hebben met  $F_{d,max}$ :

- Diameter van het spouwanker
- Kniklengte van het spouwanker  
*De kniklengte is afhankelijk van de inlegdiepte, morteltype en de spouwbreedte*
- Beginexcentriciteit van het spouwanker
- Staalkwaliteit van het spouwanker

De kniklengte is een parameter die afhangt van drie andere factoren, namelijk inklemming van het spouwanker, spouwbreedte en stijfheid van de het materiaal. Deze factoren samen bepalen de knikkraft van het spouwanker, wat gelijk is aan  $F_{d,max}$  van het spouwanker. De vier beschreven parameters zijn verwerkt in de optredende normaal- en buigspanning in het spouwanker die kleiner moet zijn dan de staalspanning van het spouwanker. Dat resulteert in de volgende voorspelling voor  $F_{d,max}$ :

$$\frac{F_{d,max}}{A} + \frac{F_{d,max} \cdot e}{W} \cdot \frac{n}{n-1} \leq \sigma_s \quad (7.5)$$

Hierbij wordt slechts één spouwanker berekend en net als bij de trekcapaciteit is de interactie tussen de spouwankers niet meegenomen. Wanneer enkele materiaalgegevens niet bekend zijn is het statistische model een goede voorspelling voor  $F_{d,max}$ .



## 8 Conclusies en Aanbevelingen

In dit hoofdstuk zijn de conclusies en aanbevelingen gegeven van het afstudeeronderzoek. Allereerst zijn de onderzoeksvragen beantwoord die opgesteld zijn voorafgaand aan dit onderzoek. Daarna volgen de aanbevelingen naar aanleiding van het uitgevoerde onderzoek.

### 8.1 Conclusie

De doelstelling van dit onderzoek was het bereiken van een basis voor een model (reken- en testmethode) voor de toetsing van de trek- ( $F_{t,max}$ ) en drukcapaciteit ( $F_{d,max}$ ) van het spouwanker. De deelvragen die hierbij zijn gesteld worden in deze paragraaf beantwoord. Als laatste wordt beschreven of de doelstelling behaald is.

#### ***Met welke parameters moet rekening worden gehouden voor de keuze van spouwankers voor spouwbreedte tussen 150-280 mm?***

Bij de keuze van het type spouwankers moet met de volgende parameters rekening worden gehouden:

- Inlegdiepte
- Type mortel
- Type spouwanker
- Staalkwaliteit

#### ***Welke vormen van bezwijkgedrag treden op bij trek?***

Spouwankers belast op trek kennen meerdere vormen van bezwijken, namelijk:

1. Onthechting tussen spouwanker en mortel
2. Onthechting tussen steen en mortel
3. Buigtreksterkte van de steen

#### ***Welke vormen van bezwijkgedrag treden op bij druk?***

Het bezwijkgedrag van een spouwanker belast op druk is knik, pons dus niet. Over het knikgedrag is moeilijk een conclusie te geven omdat veel onregelmatigheden zijn opgetreden tijdens de proef zoals:

- Grote spreiding van metingen wat betreft de vervorming van het spouwanker waardoor de knikvorm niet bepaald kon worden.
- De mate van inklemming van het spouwanker aan de mortel-steen zijde kon niet worden geanalyseerd.
- De kniklengte van het spouwanker kon niet bepaald worden, door het verschuiven van het scharnierpunt tijdens de proef in de mortel.

#### ***Wat is de invloed van maatafwijkingen in de uitvoering op de capaciteit van het spouwanker?***

In het algemeen kan vermeld worden dat de opgave van materiaaleigenschappen van de leverancier niet overeenkomen met de proefresultaten van de spouwankers.

Bij de trekproeven heeft de maatafwijking weinig invloed op  $F_{t,max}$ , zoals blijkt uit de experimentele analyse en het statistische model. Daarentegen heeft de plaatsingswijze van het spouwanker in de voeg wel invloed op het spouwanker. Bij spouwankers waar niet aan beide zijden mortel zit valt  $F_{t,max}$  lager uit. Dit correspondeert met de gevonden constatering van Madsø [MAD86].

De maatafwijkingen bij de drukproeven hebben wel invloed op  $F_{d,max}$ . Voor en tijdens de proeven zijn de scheefstand, beginexcentriciteit en vervorming bij  $F_{d,max}$  gemeten. Daaruit is gebleken dat de scheefstand en beginexcentriciteit invloed hebben op de  $F_{d,max}$  en de vervorming van het spouwanker bij  $F_{d,max}$ . Uit de formule 5.10 volgt dat de invloed van de beginexcentriciteit groot is. De opneembare kracht is twee keer zo laag bij een twee keer zo grote excentriciteit.

#### ***Probleem- en doelstelling***

De probleemstelling van dit onderzoek omvat veel aandachtspunten, zoals het uittrek- en knikgedrag van de spouwankers, de beginexcentriciteit en scheefstand van de spouwankers en het meenemen van de vele parameters die  $F_{t,max}$  en  $F_{d,max}$  beïnvloeden. In de aanleiding van het onderzoek wordt gesteld dat de EC6 niet volledig is en uit het vooronderzoek volgt dat er veel onzekerheden zijn over de parameters van het knik- en uittrekgedrag van het spouwanker. Daaruit volgde de probleemstelling, waarin is gesteld dat parameters moeten worden vastgesteld voor een reken- en testmethode. Deze zijn op basis van het volgende behaald:

- Het gedrag van het spouwanker onder trek- en drukbelasting is geanalyseerd. Bij de vormen van bezwijken onder trekbelasting kan geen eenduidig antwoord worden gegeven omdat veel gebreken zijn geconstateerd. Wel zijn de mogelijke bezwijkvormen geformuleerd en toetsingen voor de trekcapaciteit opgesteld aan de hand van het onderzoek:

- Onthechting tussen spouwanker en mortel  $F_{aanhechtkracht} = \pi \cdot l_b \cdot \phi \cdot f_b$
  - Onthechting tussen steen en mortel  $F_{hechtsterkte} = A \cdot f_t$
  - Buigtreksterkte van de steen  $f_{ct} = \frac{3 \cdot F_l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$
- Bij drukbelasting is het knikken van het spouwanker opgetreden en daarin is een trend gevonden bij de spouwbreedtes tussen 150-280mm. Dit maakt het mogelijk de opneembare drukkracht binnen dit bereik te kunnen bepalen. Voor bepaling van de drukcapaciteit dient de volgende toetsing uitgevoerd te worden:
    - Normaalspanning en buigspanning samen moeten kleiner zijn dan de vloeispanning van het spouwanker.
$$\frac{F_{d,max}}{A} + \frac{n_s}{n_s - 1} \cdot \frac{F_{d,max} \cdot e}{W} \leq \sigma_s$$

Met de reken- en testmethode is een basis gelegd voor het ontwikkelen van een reken- en testmethode. Deze is nog niet compleet omdat blijkt uit de statistische en de experimentele analyses dat er nog teveel onbekende variabelen zijn die niet zijn getoetst. De aanzet is wel gegeven met de hiervoor besproken vier toetsingen. Met behulp van de vier onderzoeken (experimenteel, statistisch, analytisch en (deels) numeriek) is het constructieve gedrag van spouwankers in brede spouwmuren benaderd.

## 8.2 Evaluatie en aanbevelingen

### 8.2.1 Evaluatie

Een evaluatie van de onderzoeken die verricht zijn en verbeteringen die uitgevoerd kunnen worden in vervolgonderzoek zijn:

- Proefstuk
  - De voegdikte van de vervaardigde proefstukken zijn niet overal gelijk. Dit kan invloed gehad hebben op  $F_{t,max}$  en  $F_{d,max}$ , maar is verder niet behandeld in dit onderzoek.
  - De inlegdiepte van het spouwanker is niet constant gebleken, waardoor deze een variabele in de proef werd. De gemiddelde inlegdiepte bedroeg niet 40 mm maar 46 mm. Voor een vervolgonderzoek is het belangrijk dat de inlegdiepte een constante waarden is, waardoor bij een variatie in inlegdiepte een uitspraak gegeven kan worden over de invloed van de inlegdiepte op  $F_{t,max}$  en  $F_{d,max}$ .
  - Slechte hechtsterkte tussen steen en mortel. De combinatie van stenen en de gebruikte mortel is belangrijk omdat dit de hechtsterkte kan beïnvloeden en resulteren in andere begincondities van de proefstukken.
- Proefopzet
  - De proefopzet is nu uitgevoerd met een inklemmende verbinding met de 250kN-bank. Deze inklemming kan niet 100% gegarandeerd worden als een volledige inklemming. Gevolg hiervan is dat de kniklengte van het spouwanker niet bepaald kan worden.
  - De proefopzet in het onderzoek is gebaseerd op het uittrekken en knikken van één spouwanker zoals ook in de normen de capaciteit van het spouwanker getoetst wordt. In de praktijk wordt nooit één spouwanker in een muur gebruikt, maar is er een interactie tussen de spouwankers aanwezig.

### 8.2.2 Aanbevelingen

Aanbevelingen die gegeven kunnen worden voor vervolgonderzoek zijn:

- De *interactie tussen de spouwankers* in een groter geveleppervlak te analyseren. Dit onderzoek heeft geleid tot inzicht in het constructieve gedrag van één spouwanker, maar van een geveleppervlak met meerdere spouwankers kan dit anders zijn. Dit geldt eveneens voor de krachtsverdeling in een geveleppervlak. Een voorbeeld hoofdvraag kan als volgt luiden: *Moeten we in de toekomst spouwmuren met een kleine spouw en weinig spouwankers gelijk modelleren als veel spouwankers in een grote spouw?*
- Hoe *omgegaan* moet worden met *proefresultaten* om te komen. Het statistische model is opgesteld aan de hand van  $F_{t,max}$  en  $F_{d,max}$  van de proefresultaten. Dit hoeft niet het punt van bezwijken te zijn (zoals bij UNI-L in M10-mortel). Een beter beeld van de proefresultaten was verkregen wanneer het bilineaire gedrag was bepaald. Een vervolgonderzoek kan bijvoorbeeld de volgende hoofdvraag hebben: *Hoe moet omgegaan worden met de bepaling van de karakteristieke waarde voor de capaciteit van het spouwanker? (elk spouwanker heeft een andere verplaatsing in de spouwmuur)*
- Bepalen van de uittrek- en drukwaarde van *spouwankers met plug* in het binnenblad. Tegenwoordig worden vaak pluggen gebruikt voor kleinere koudebruggen en omdat de spouwankers in het binnenspouwblad geboord worden. Uit recente onderzoeken blijkt dat deze plug invloed heeft op de bezwijkvormen van de plug onder drukbelasting en het verlaagd de uittrekwaarde van het spouwanker.
- *Dynamische belasting* toepassen op de proefstukken, omdat dit de wind die op de gevel aangrijpt beter simuleert. Dit onderzoek was gespecificeerd voor de capaciteit van één spouwanker.

- *Numerieke simulatie* van het uittrekken van een spouwanker uit mortel, waarbij de interface tussen mortel en spouwanker is gemodelleerd.

Aanbevelingen die gegeven kunnen worden voor toepassingen in de praktijk zijn:

- *Inlegdiepte* aangegeven op spouwanker zodat spouwankers gecontroleerd kunnen worden op juiste inlegdiepte, maar ook voor de bouwvakkers zodat de inlegdiepte bekend is.
- De juiste *combinatie stenen met mortels* bepalen. Door veel onderzoekers is geconstateerd dat de hechtsterkte tussen mortel en steen niet constant is en een grote variatie in zit [VER05]. In de praktijk worden grotere muuropervlakten gemetseld dan die nu in het experimentele onderzoek is beproefd. Bij een verkeerde combinatie steen-mortel, is de hechtsterkte dermate laag dat het metselwerk sneller kan bezwijken. Verder onderzoek naar de hechting tussen verschillende materialen en kwaliteiten om te bepalen welke effecten een (samenstelling) van een materiaal kan hebben is noodzakelijk. Een hefboomproef of kruisproef op het metselwerk zou zinvol zijn.





## Bronnen

### Literatuur

- [AA14] Aa, P.J. van der, *Biaxial Stresses in Steel Fibre Reinforced Concrete*, Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, January 2014
- [BAR13] /.../, Praktijkonderzoek naar gevelmetselwerk, Bartels Ingenieursbureau voor Bouw en Infra, Apeldoorn; 2013
- [BIA88] The Brick Industry Association; *Technival Notes on brick constructions 44B- Wall ties for Brick Masonry*; Reston; pp. 1-11; 1988
- [BRU86] Bruggeling, A.S.J.; De Bruijn, W.A., *Theorie en praktijk van het gewapend beton deel 1*, Den Bosch, 1986
- [BRE06] Breugel, K.van; Braam, C.R.; Veen, C. van der; Walraven, J.C.; *Betonconstructies onder temperatuur- en Krimpvervormingen*; Theorie en Praktijk; TU Delft; ENCI Media; Betonpraktijkreeks 2; 's- Hertogenbosch 2006
- [CB2] Braam, C.R.; Lagendijk, ir. P.; *Constructieer Gewapend beton*; Cement en beton; 2011
- [CEM07] Betram, G.; Martens, D.R.W.; *Ontwerpen en dimensioneren van steenconstructies*, Gedrag van spouwankers bij brede spouwmuren; Cement; 06/2007
- [DIC02] /.../; Faculteit Bouwkunde; Vakgroep Constructief ontwerpen; afdeling beton, steen, aluminium en glas; Dictaat 7P118: *Constructief ontwerpen met materialen B*; Technische Universiteit Eindhoven; oktober 2002
- [DIC06] Martens, D.R.W.; Vermeltfoort, A. Th.; Bertram, G.; Dictaat 7P725: *Ontwerpen en dimensioneren steenconstructie*; Technische Universiteit Eindhoven; juli 2006
- [DRY94] Drysdale, Robert G.; Hamid, Ahmad A.; Baker, Lawrie R.; *Masonry Structures, Behavior and design*; Englewood Cliffs; New Jersey: Prentice Hall; 1994
- [ELI83] Eligehausen, R.; Popov, E. P.; Bertero, V. V.; *Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars under Generalized Excitations*; Report No. UCB/EERC-83/23, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley; Oct. 1983
- [ELI] Eligehausen, R.; Bertero, V.V.; Popov, E.P.; *Hysteretic behavior of reinforcing deformed hooked bars in R/C joints*; /.../; USA; /.../
- [ELJ12] Huijregtse, Elja; *Welke gebouwen met metselwerk buitenspouwbladen hebben prioriteit?*; TNO innovation for live; /.../ 11 december 2012
- [GOD79] Godell, Dagfinn; *Forankring av skallmur*; Murbransjens Forsknings- og Informasjonskontor Saertrykk nr. 36; /.../; 1979
- [GOR78] Gordon, J.E.; *Structures: Or Why Things Don't Fall Down*; Da capo press drukkerij; london; 1978; Blz. 138-139
- [HAG07] Hagel, Mark. D.; Lissel, Shelley L.; Sturgeon, Gary R.; *Comparison of theoretical and empirically determined service lives for wall ties in brick veneer steel stud wall systems*; NRC Canada, 15 November 2007
- [HAG11] /.../; Adviesbureau ir. J.G. Hageman B.V.; *Dossier 7581 Mactie renovatiespouwanker B+B Tec*; rapport 7581-1-2; B+BTec BV; Zevenbergen; 17 juni 2011
- [HAM11] Hamed, Ahmed Mohamed Yousry; *Structural capacity of Anchorage Ties in Masonry Veneer Walls Subjected to Earthquake. The implications of EC8 and EC6 on a typical Norwegian veneer wall*; Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology; Department of structural Engineering; Trondheim; Februari 2011
- [HEN98] Hendry, Arnold W.; *Structural Masonry*; Second edition; Macmillan Educaiton; /.../; 1998
- [HON12] Hong, Sungnam; Park, Sun-kyu; Hindawi Publishing corporation; *Uniaxial bond stress-slip relationship of reinforcing bars in concrete*; 13-february-2012
- [JAN] Janssen, H.J.M.; *Spanningen in en vervormingen van constructies*, Mechanica 2; Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde; Eindhoven; Januari 2012
- [WIL12] Willems, J.; *Simulatie brand op spouwmuur met spouwankers*; Bartels Ingenieursbureau voor Bouw en Infra; Apeldoorn; 8 juni 2012
- [KEN01] Kenzie, W.M.C. mc; *Design of structural Masonry*; Palgrave MacMillian; /.../; 19 oktober; 2001
- [KOB14] Kobesen, M.G.; Vermeltfoort, A.T.; Mulders, S.G.C.; *Wall tie research for existing and new structures; Literature Study*; 9th International Masonry Conference; Guimareas 2014; 21-04-2014
- [KOO11] Kooiman, Arie; Aannemer bouwplaats; *Gebruik geen verzinkte spouwankers!*; Vereniging Koninklijke Nederlandse Bouwkeramiek; Velp; 29-08-2011

- [LAF&REN05] LaFave, James M.; Reneckis, Dziugas; *Structural behavior of tie connections for residential brick veneer constructies*; TMS Journal; /.../; December 2005
- [LOR02] Lorenzis, Laura de; Rizzo, Andrea; Tegola, Antonio la; A modified pull-out test for bond of near surface mounted FRP rods in concrete; Elsevier Science Ltd; /.../; 23 juli 2002
- [LUN99] Lundgren, Karin; *Three-Dimensional Modelling of Bond in Reinforced Concrete*; Theoretical Model, Experiments and Applications; Göteborg; November 1999
- [MAD80] Madsø, Finn E.; *Skallmurforankring met tradbindere*; Murbransjens Forsknings- og Informasjonskontor, Saertrykk nr. 49; /.../; 1980
- [MAD99] Madsø, AV Finn E.; Edvardsen, Knut Ivar; *Etterforankring av skallmurvegger og murte forblendinger*; Teknisk artikkel nr. 216 fra tidsskriftet, MUR nr. 2; /.../; 1999
- [MAN84] Mangat, P.S.; Azari, M.Motamedi; *A theory for the free shrinkage of steel fibre reinforced cement matrices*; Department of Engineering, University of Aberdeen, Marischal College, Aberdeen AB9 1AS, UK; Chapman and Hall Ltd; 1984
- [NTNU13] /.../; Department of Structural Engineering Norwegian University of Science and Technology; Masterproject 2013: *The Norwegian Research Council*; BI-Produkter as; Weinerberger as; Byggutengrenser.no; 2013
- [ONV11] /.../; Onveilige gevels; *Spouwmuur-spouwanker-renovatie spouwanker*; /.../; 21 maart 2011
- [ORT92] Orton, Andrew; *Structural design of masonry*; Second edition, Longman; /.../; 14 december 1992
- [PLU95] Pluijm, R. van der; *Onderzoek constructief metselwerk (IV) Metselwerkvoegen, schuift dat?*; Cement nr. 12; Boxtel; 1995
- [PLU96] Pluijm, R. van der; *Onderzoek constructief metselwerk (VI) is meten weten?*; Cement nr. 5; Boxtel; 1996
- [ROT96] Rots, J.G.; Heuvel, H.A.J.G. van den; *Onderzoek constructief metselwerk (VII) Naar ontwerpregels voor dilatatievoegen in metselwerk: Utilisatie van breukmechanica-onderzoek*; Cement nummer 7 en 8; Boxtel; 1996
- [SAH71] Sahlin, Sven; *Structural masonry*; Prentice-Hall; /.../; 1971
- [SEZ&MOE] Sezen, Halil; Moehle, Jack P.; *Bond-slip behavior of reinforced concrete members*; The Ohio State University en University of California; USA; /.../
- [STE11] Steenbergen, H.M.G.M.; Bijlaard, F.S.K.; *Stabiliteit van op druk belaste staven*; Module S9, Staven op druk; Technische Universiteit Delft; Delft; 24 juli 2011
- [SWE13] Sweering, H.; *Afstudeeronderzoek naar renovatiespouwankers rapportdeel 1, 2 en 3*; NHL Hogeschool, Leeuwarden, 17 januari 2013
- [VEE90] Veen, Cornelis van der; *Proefschrift: Cryogenic bond stress-slip relationship*; /.../; Delft; 1990
- [VER98] Vermeltoort, A.T.; *Mechanical compressive properties of small sized mortar cylinders*; Eindhoven University of Technology; Eindhoven; 1998
- [VER&SCH] Vermeltoort, A.T.; Schijndel, A.W.M. Van; *Comsol Simulations of Cracking in Point Loaded Masonry with Randomly Distributed Material Properties*; Eindhoven University of Technology, dept. of the Built Environment; Eindhoven; /.../
- [VER05] Vermeltoort, A.T.; *Brick-mortar interaction in masonry under compression*, Proefschrift; Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde; Eindhoven; 2005
- [VROM07] /.../; *Constructieve veiligheid gevels en glazen overkapping*. Analyse van achttien incidenten; VROM-inspectie; Den Haag; oktober 2007
- [VROM11] /.../; *Constructieve veiligheid metselwerk gevels en brandveiligheid woningscheidende constructies*, versie 1.3; VROM-Inspectie; Den Haag; 19 december 2011
- [WAL80] Walraven, J.C.; *Aggregate interlock*, Proefschrift; Technische Universiteit Eindhoven; Delft; 1980
- [WOL96] Wold-Hansen, Geir; Mur-Sentret; *Forankring av skallmur til bindingsverk av tre eller tynnplateprofiler i stal*; teknisk artikkel nr. 196 fra tidsskriftet MUR 1-1996; 1996

#### Internetbronnen

- [A] <http://www.maconline.org/tech/rvalues/historyofinsulation/historyofinsulation.html>
- [B] <http://www.actionwallties.co.uk/domestic-clients/cavity-wall-constructed-housing/cavity-wall-construction-history-2.html>
- [C] <http://www.knb-keramiek.nl/>
- [D] <http://www.wienerberger.be/gevel/verwerkingsadviezen/metselmortels/metselmortel-voordunne-voegen#top>
- [E] <http://www.vinckier-nv.be/ruwbouw/toebehoren/mortels-nl.htm#top>

## Normen en publicaties

### Eurocode

- [1] NEN-EN1996-1-1; Technische Commissie CEN/TC250 “Structural Eurocodes”; *Design of masonry structures- Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*; November 2011
- [2] NEN-EN845-1+A1; *Specification for ancillary components for masonry- Part 1: Wall ties, tension straps, hangers and brackets*; Maart 2008

### Nederlandse normen, publicaties en voorschriften

- [3] NEN 6790; *Technische grondslagen voor bouwconstructies- TGB 1990- Steenconstructies- Basiseisen en bepalingmethoden*; Nederlands Normalisatie-instituut; Delft; April 2005
- [4] NPR 6791; *Steenconstructies, Eenvoudige ontwerpregels, gebaseerd op NEN6790:2005*; Nederlands Normalisatie-instituut; Delft; Mei 2009
- [5] NPR 9096-1-1; *Eenvoudige ontwerpregels, gebaseerd op NEN-EN 1996-1-1+CI*; BRIS bv; /.../; 1 juni 2012
- [6] CUR 71; CUR commissie C 105 “Utilisatie metselwerkonderzoek”.; *Constructieve aspecten bij ontwerp, berekening en detaillering van gevels in metselwerk*; Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving Bouw & Infra; /.../
- [7] CUR 73; CUR commissie C 105 “Utilisatie metselwerkonderzoek”.; *Stabiliteit van steenconstructies*; Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving Bouw & Infra; /.../
- [8] CUR 171; *Basis voor de ontwikkeling van praktische regelregels voor constructief metselwerk*; Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving Bouw & Infra; Gouda; /.../
- [9] CUR-rapport 193; *Materiaalparameters voor constructief metselwerk*; Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving Bouw & Infra; Gouda; 1999
- [10] SBR-publicaties  
(A): /.../; *Op buiging belast metselwerk*; SBR; Rotterdam; 1986; hoofdstuk 2 en 4  
(B): Pluym, R. van der; *Realistische rekenmodellen voor metselwerk*; SBR; Rotterdam; 1992  
(C): Verburg, W.; *Constructieve veiligheid van gevels*; SBR; Rotterdam; december 2011  
(D): Verburg, W.; *Protocol voor het inspecteren, beoordelen en herstellen. Constructieve veiligheid bestaande metselwerkbuitenspouwbladen.*; SBR; Rotterdam; december 2011  
(E): K.S. te Linterl Hekkert; *Duurzaamheid Spouwankers*; SBR publicatie 353; SBR; Rotterdam; januari 1996
- [11] KNB publicaties  
(A): Infoblad 11: *Klamp metselwerk in baksteen herzien*; Vereniging Koninklijke Nederlandse Bouwkeramiek; Velp; juli 2008  
(B): Infoblad 22: *Staalspanning in spouwankers*; Vereniging Koninklijke Nederlandse Bouwkeramiek; Velp; /.../

### Normen, publicaties en voorschriften wereldwijd

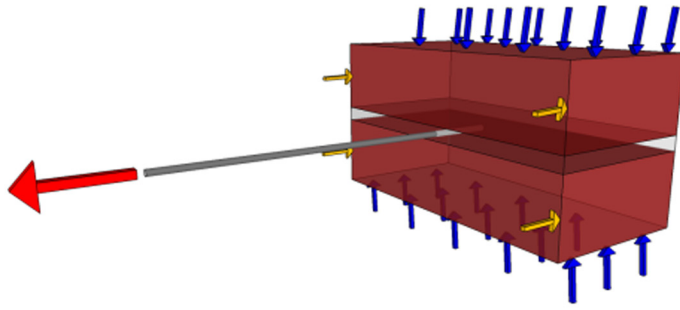
- [12] BS EN 5628-1; *Code of practice for the use of masonry. Structural use of unreinforced masonry*; BSI Knowledge Centre; 8 december 2005
- [13] BS EN 5628-3; *Code of practice for the use of masonry. Materials and components, design and workmanship*; BSI Knowledge Centre; 29 december 2005
- [14] ACI 530-05/ASCE 5-05/TMS 402-05; *Building Code Requirements for Masonry Structures*; The Masonry Standards Joint Committee (MSJC); /.../; 1988
- [15] *Masonry catalogue; Murkatalogen 2005 Murte forblending*; Anvisning P2; Mur-Sentre; Oslo; 2005
- [16] DIN 1053-1; *Mauerwerk*; Deutsche norm; Beurth Verslag GmbH; November 1996



## Bijlagen

### Symbolenlijst

|                   |   |
|-------------------|---|
| <i>Bijlage 1</i>  | Afbakening van het afstudeeronderzoek                                       |
| <i>Bijlage 2</i>  | Analyse van de praktijkvoorbeelden verkregen van Bartels Ingenieursbureau   |
| <i>Bijlage 3</i>  | Tabellen uit Noorweegse Catalogus [15]                                      |
| <i>Bijlage 4</i>  | Onderzoek Noorwegen [NTNU13]  |
| <i>Bijlage 5</i>  | Uitwerkingen trekkracht op spouwanker                                       |
| <i>Bijlage 6</i>  | Samenvatting van Beton-Epoxy-Staal onderzoek [LOR02]                        |
| <i>Bijlage 7</i>  | Uitwerkingen drukkracht op spouwanker                                       |
| <i>Bijlage 8</i>  | Resultaten Proef-Proef  |
| <i>Bijlage 9</i>  | Analyse spouwankers voor beproeven  |
| <i>Bijlage 10</i> | Proefopstelling en frame voor het proefstuk                                 |
| <i>Bijlage 11</i> | Proefresultaten spouwankers belast op trek: algemeen                        |
| <i>Bijlage 12</i> | Proefresultaten spouwankers belast op trek: kracht-verplaatsingsgrafieken 1 |
| <i>Bijlage 13</i> | Proefresultaten spouwankers belast op trek: kracht-verplaatsingsgrafieken 2 |
| <i>Bijlage 14</i> | Geconstateerde gebreken   |
| <i>Bijlage 15</i> | Volgorde uitgevoerde proeven  |
| <i>Bijlage 16</i> | Proefresultaten drukproeven   |
| <i>Bijlage 17</i> | Vergelijking mechanicamodellen  |
| <i>Bijlage 18</i> | Inklemming spouwanker in mortel   |
| <i>Bijlage 19</i> | Hallergetal   |
| <i>Bijlage 20</i> | Bepaling normaliteit van de proefresultaten                                 |
| <i>Bijlage 21</i> | Script voor trek- en drukproeven statistiek                                 |
| <i>Bijlage 22</i> | Analytisch onderzoek (trek)   |

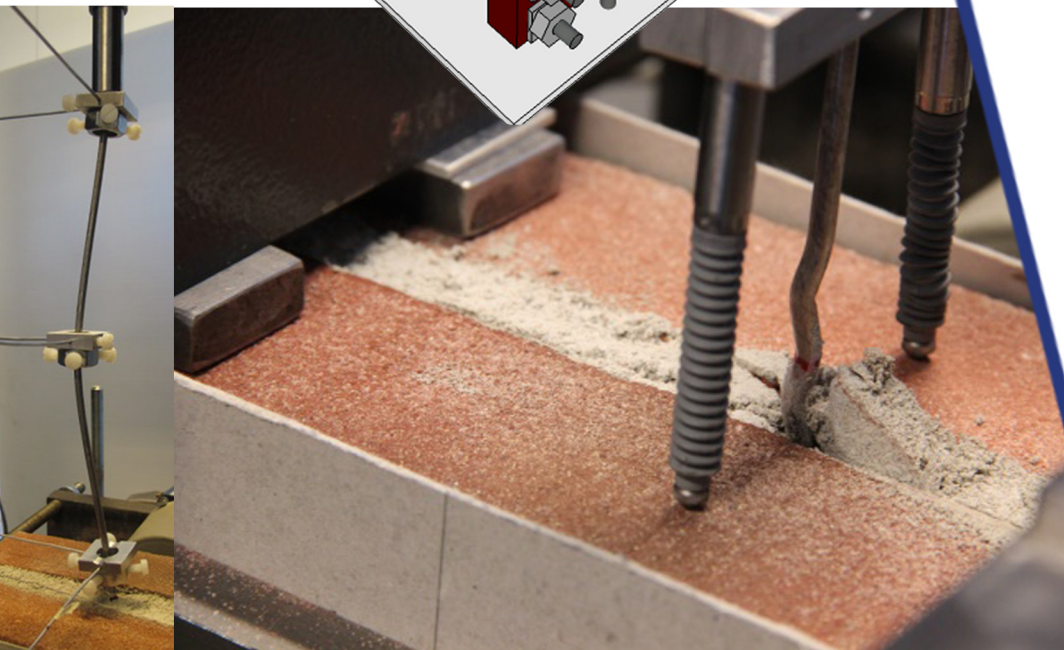
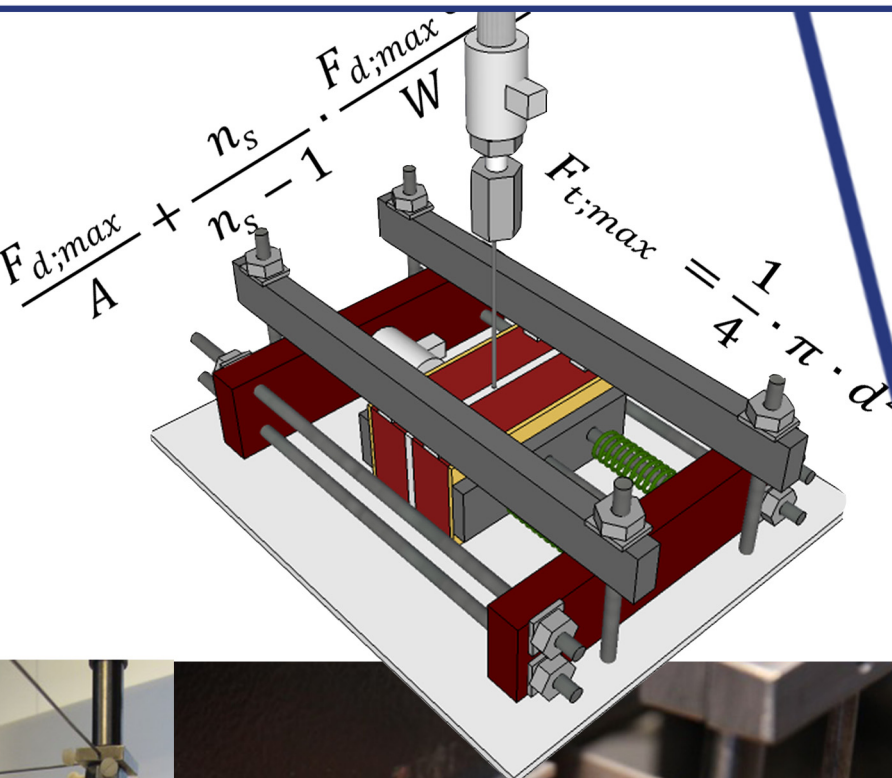


$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \epsilon$$

# Bijlagen

## Het constructieve gedrag van spouwankers in brede spouwmuren

Afstudeerverslag van M.G. Kobesen





## Bijlagen

|                   |   |     |
|-------------------|---|-----|
| Symbolenlijst     |   | 132 |
| <i>Bijlage 1</i>  | Afbakening van het afstudeeronderzoek                                       | 137 |
| <i>Bijlage 2</i>  | Analyse van de praktijkvoorbeelden verkregen van Bartels Ingenieursbureau   | 142 |
| <i>Bijlage 3</i>  | Tabellen uit Noorweegse Catalogus [15]                                      | 145 |
| <i>Bijlage 4</i>  | Onderzoek Noorwegen [NTNU13]  | 147 |
| <i>Bijlage 5</i>  | Uitwerkingen trekkracht op spouwanker                                       | 148 |
| <i>Bijlage 6</i>  | Samenvatting van Beton-Epoxy-Staal onderzoek [LOR02]                        | 153 |
| <i>Bijlage 7</i>  | Uitwerkingen drukkracht op spouwanker                                       | 155 |
| <i>Bijlage 8</i>  | Resultaten Proef-Proef  | 162 |
| <i>Bijlage 9</i>  | Analyse spouwankers voor beproeven  | 168 |
| <i>Bijlage 10</i> | Proefopstelling en frame voor het proefstuk                                 | 174 |
| <i>Bijlage 11</i> | Proefresultaten spouwankers belast op trek: algemeen                        | 175 |
| <i>Bijlage 12</i> | Proefresultaten spouwankers belast op trek: kracht-verplaatsingsgrafieken 1 | 182 |
| <i>Bijlage 13</i> | Proefresultaten spouwankers belast op trek: kracht-verplaatsingsgrafieken 2 | 198 |
| <i>Bijlage 14</i> | Geconstateerde gebreken   | 205 |
| <i>Bijlage 15</i> | Volgorde uitgevoerde proeven  | 206 |
| <i>Bijlage 16</i> | Proefresultaten drukproeven   | 208 |
| <i>Bijlage 17</i> | Vergelijking mechanicamodellen  | 210 |
| <i>Bijlage 18</i> | Inklemming spouwanker in mortel   | 211 |
| <i>Bijlage 19</i> | Hallergetal   | 215 |
| <i>Bijlage 20</i> | Bepaling normaliteit van de proefresultaten                                 | 216 |
| <i>Bijlage 21</i> | Script voor trek- en drukproeven statistiek                                 | 219 |
| <i>Bijlage 22</i> | Analytisch onderzoek (trek)   | 232 |



**Symbolenlijst**

| Symbool                                     | Beschrijving   |
|---|--|
| Eurcode 6<br>NEN-EN 1996-1 en NEN-EN 1996-2 |  |
| $W_{ed}$                                    | Windbelasting op het muuroppervlak<br>$W_{ed} = q_p(z_e)C_{pe}$  |
| $q_p$                                       | Windbelasting op de gevel  |
| $C_{pe}$                                    | De drukcoëfficiënt voor winddruk of windzuiging op een gevel met een oppervlakte van 10 m <sup>2</sup>   |
| $f_{xk1}$                                   | Karakteristieke buigtreksterkte evenwijdig aan de lintvoegen   |
| $f_{bw;k}$                                  | Karakteristieke waarde van de hechtsterkte   |
| $f_{xk2}$                                   | Karakteristieke buigtreksterkte loodrecht op de lintvoegen:<br>$f_{xk2} = R_0 \cdot f_{xk1}$   |
| $R_0$                                       | Kleinste waarde van $\frac{1}{9}(4\frac{f_{fl;b;k}}{f_{xk1}}+5)$ en $\frac{\alpha \cdot 2.75}{\sqrt{f_{xk1}}}$   |
| $f_{fl;b;k}$                                | Karakteristieke waarde van de buigtreksterkte van de stenen  |
| $\alpha$                                    | Een factor voor het steenverband gelijk aan:<br>$(\frac{a}{h})^2$  |
| a   | Overlappingslengte   |
| h   | Muurdikte  |
| $n_t$                                       | Aantal spouwanker per vierkante meter muuroppervlak, met een minimum van 2.  |
| $F_d$                                       | Rekenwaarde van de druk- of trekweerstand van het spouwanker   |
| NEN 6790:2005                               |  |
| $F_{sp;d}$                                  | De rekenwaarde van de grootste optredende normaalkracht in de spouwankers in de uiterste grenstoestand: $F_{sp;d} = C_a p_{wd} A_{sp}$   |
| $C_a$                                       | Factor afhankelijk van de samenwerking tussen het binnen- en buitenblad.<br><i>2,0 = overige gevallen</i><br><i>3,0 = niet-dragend binnenblad</i><br>Er is sprake van een niet dragend binnenblad dat aan de bovenzijde in horizontale richting uit het vlak van de wand gesteund wordt en waarbij het buitenblad ter plaatse van de vloerranden ook niet is voorzien van een horizontale koppeling met de vloerwand.<br><br>Beoordelen van de sterkte van de constructie en bijbehorende factor onder windbelasting mag de weerstand van de constructie zijn gebaseerd op de buigtreksterkte van het metselwerk. De grote van de buigtreksterkte is beschreven in NEN-EN 1996-1-1 |
| $p_{wd}$                                    | Dat deel van de rekenwaarde van de windbelasting dat van het ene spouwblad wordt overgedragen naar het andere spouwblad volgens 6.2.1 en 8.6 van NEN 6702  |
| $A_{sp}$                                    | Muuroppervlakte per spouwanker   |
| $f_{m;  ;rep}$                              | Buigtreksterkte evenwijdig aan de lintvoegen: $f_{m;  ;rep} = R_0 \cdot f_{m;\perp;rep}$   |
| $R_0$                                       | Kleinste waarde van $\frac{1}{9}(4\frac{f_{fl;b;rep}}{f_{m;\perp;rep}}+5)$ en $\frac{\alpha \cdot 2.75}{\sqrt{f_{m;\perp;rep}}}$   |
| $f_{fl;b;rep}$                              | Representatieve waarde van de buigtreksterkte van de stenen  |
| $\alpha$                                    | Een factor voor het steenverband gelijk aan:<br>$(\frac{a}{h})^2$  |
| a   | Overlappingslengte   |
| h   | Muurdikte  |
| $f_{m;\perp;d}$                             | Buigtreksterkte loodrecht op de lintvoegen:<br>$f_{m;\perp;d} = f_{bw;k}$  |
| $f_{bw;k}$                                  | Karakteristieke waarde van de hechtsterkte   |
| $F_{sp;u;d}$                                | Rekenwaarde van de door spouwankers opneembare trekkracht in de uiterste grenstoestand:<br>$F_{sp;u;d} = \frac{F_{sp;u;rep}}{\gamma_m} = \frac{F_{sp;u;rep}}{1.4}$   |
| $F_{sp;u;rep}$                              | De representatieve waarde van de uiterste opneembare trekkracht in de uiterste grenstoestand, bepaald volgens NEN-EN846-5 of NEN-EN 846-6  |
| $\gamma_m$                                  | Materiaalfactor = 1,4  |

|                  |   |
|------------------|---|
| $F'_{sp;u;d}$    | De rekenwaarde van de door spouwankers opneembare drukkracht in de uiterste grenstoestand:<br>$F'_{sp;u;d} = \frac{F'_{sp;u;rep}}{\gamma_m} = \frac{F'_{sp;u;rep}}{1.2}$  |
| $F'_{sp;u;rep}$  | De representatieve waarde van de uiterste opneembare drukkracht in de uiterste grenstoestand, bepaald volgens NEN-EN 845-5 of NEN-EN845-6   |
| $\gamma_m$       | Materiaalfactor = 1.2   |
| NPR 6791         |   |
| $F_{sp,d}$       | De rekenwaarde van de normaalkracht in het spouwanker<br>$F_{sp,d} = 2 \cdot \gamma_{f;q;u} \cdot C_{index} \cdot p_w \cdot A_{sp}$   |
| $\gamma_{f;q;u}$ | Belastingsfactor (paragraaf 5.2.1 NEN 6702:2007)  |
| $C_{index}$      | Windfactor  |
| $q_w$            | Stuwdruk  |
| $A_{sp}$         | Geveleoppervlak per spouwanker  |
| $F_{sp;u;d}$     | Rekenwaarde van door het spouwanker uiterst opneembare trekkracht<br>$F_{sp;u;d} = \frac{F_{sp;u;rep}}{\gamma_m} = \frac{F_{sp;u;rep}}{1.4}$  |
| $F_{sp;u;rep}$   | De representatieve waarde van de uiterste opneembare trekkracht in de uiterste grenstoestand, bepaald volgens NEN-EN846-5 of NEN-EN 846-6   |
| $\gamma_m$       | Materiaalfactor = 1,4   |
| $F'_{sp;u;d}$    | Rekenwaarde van door het spouwanker uiterst opneembare drukkracht<br>$F'_{sp;u;d} = \frac{F'_{sp;u;rep}}{\gamma_m} = \frac{F'_{sp;u;rep}}{1.2}$ of volgens 11.8.2 van NEN 6790:2005   |
| $F'_{sp;u;rep}$  | De representatieve waarde van de uiterste opneembare drukkracht in de uiterste grenstoestand, bepaald volgens NEN-EN 845-5 of NEN-EN845-6   |
| $\gamma_m$       | Materiaalfactor = 1.2   |
| NPR 9096-1-1     |   |
| $W_{Ed}$         | Windbelasting op spouwanker:<br>$W_{Ed} = 1,35 C_a C_{pe,10} q_p$   |
| $C_a$            | Factor afhankelijk van de samenwerking tussen het binnen- en buitenblad.<br><i>1,5 = gesteund binnenblad</i><br>Een binnenblad dat in staat is om de voorgeschreven windbelasting te weerstaan, met een buigstijfheid die tenminste tweemaal zo groot is als de buigstijfheid van het buitenblad. De buigstijfheid mag zijn gebaseerd op het traagheidsmoment van de ongescheurde doorsnede en de elasticiteitsmodulus volgens 3.7.2. van NEN 1996-1-1<br><i>2,0 = overige gevallen</i><br><i>3,0 = niet-dragend binnenblad</i><br>Er is sprake van een niet dragend binnenblad dat aan de bovenzijde in horizontale richting uit het vlak van de wand gesteund wordt en waarbij het buitenblad ter plaatse van de vloerranden ook niet is voorzien van een horizontale koppeling met de vloerrand.<br><br>Beoordelen van de sterkte van de constructie en bijbehorende factor onder windbelasting mag de weerstand van de constructie zijn gebaseerd op de buigtreksterkte van het metselwerk. De grote van de buigtreksterkte is beschreven in NEN-EN1996 |
| $C_{pe,10}$      | De drukcoëfficiënt voor winddruk of windzuiging op een gevel met een oppervlakte van 10 m <sup>2</sup>  |
| $q_p$            | De extreme stuwdruk volgens tabel NB-5 van NEN-EN 1991-1-4  |
| $f_s$            | Rekenwaarde voor de vloeigrens van het spouwankermateriaal.   |
| $F_{sp,R}$       | Opneembare drukkracht spouwanker  |
| $A_s$            | Oppervlakte van de spouwankerdoorsnede (mm <sup>2</sup> )<br>$A_s = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$  |
| e                | Excentriciteit (mm) van het midden van het spouwanker (2mm aannemen)  |
| $W_s$            | Weerstandsmoment van de spouwankerdoorsnede (mm <sup>3</sup> )<br>$W_s = \frac{\pi}{32} \cdot d^3$  |
| $n_s$            | Vergrotingsfactor in verband met tweede orde effecten<br>$n_s = \frac{F_{sp,E}}{F_{sp,d}}$  |
| $F_{sp,E}$       | Eulerse knikkracht  |

|                  |   |
|------------------|---|
|                  | $F_{sp,E} = \frac{\pi^2 \cdot E_{sp} \cdot I_{sp}}{l_k^2}$  |
| $E_{sp}$         | Elasticiteitsmodulus van het spouwankermateriaal  |
| $I_{sp}$         | Kwadraatsch oppervlaktemoment ( $\text{mm}^4$ ) van de spouwankerdoorsnede.<br>$I_{sp} = \frac{\pi}{64} \cdot d^4$  |
| $l_k$            | Kniklengte van het spouwanker (mm), gelijk aan de spouwbreedte<br>KNB 22 → geen capaciteit aan inklemming ontleend omdat de eenmalige optredende verplaatsingsverschillen niet worden berekend bij de buigspanning in een spouwanker<br>LET OP: 2 MANIEREN MOGELIJK!  |
| CUR 71           |   |
| $F_d$            | Rekenwaarde van de grootste optredende normaalkracht in het spouwanker, gelijk aan<br>$F_d = n \cdot \gamma_f \cdot p_{rep} \cdot A_{sp}$   |
| $A_{sp}$         | Muuroppervlakte per spouwanker  |
| $F_{u;d}$        | Rekenwaarde van de uiterste opneembare trekkracht volgens<br>$F_{u;d} = \frac{F_{rep}}{\gamma_m} = \frac{F_{rep}}{1,4}$   |
| $p_{rep}$        | Representatieve windbelasting   |
| n                | = 3,0 beide spouwbladen ter hoogte van de verdiepingsvloeren ongesteund zijn<br>= 2,0 overige gevallen  |
| $\gamma_f$       | Belastingsfactor, gelijk aan 1,3  |
| $F_{u;d}$        | Rekenwaarde van de door spouwankers opneembare trekkracht in uiterste grenstoestand, berekend met $F_{u;d} = \frac{F_{rep}}{\gamma_m} = \frac{F_{rep}}{1,4}$  |
| $F_{rep}$        | Representatieve waarde van de opneembare trekkracht in de uiterste grenstoestand met een minimum van 600 N  |
| $\gamma_m$       | Materiaalfactor = 1,4   |
| $f_{y,rep}$      | Representatieve waarde van 0,2%-rekgrens  |
| $f_{t,rep}$      | Representatieve waarde van de treksterkte   |
| $\varepsilon_s$  | Representatieve rek bij maximale belasting  |
| $E_s$            | Elasticiteitsmodulus  |
| SBR              |   |
| $F_{sp;d}$       | Rekenwaarde van de normaalkracht in het spouwanker:<br>$F_{sp;d} = c_a \cdot \gamma_{f;q;u} \cdot C_{index} \cdot q_p(z) \cdot A_{sp}$  |
| $c_a$            | Factor afhankelijk van de samenwerking tussen het binnen- en buitenblad.<br><i>1,5 = gesteund binnenblad</i><br>Een binnenblad dat in staat is om de voorgeschreven windbelasting te weerstaan, met een buigstijfheid die tenminste tweemaal zo groot is als de buigstijfheid van het buitenblad. De buigstijfheid mag zijn gebaseerd op het traagheidsmoment van de ongescheurde doorsnede en de elasticiteitsmodulus volgens 3.7.2. van NEN 1996-1-1<br><i>2,0 = overige gevallen</i><br><br><i>3,0 = niet-dragend binnenblad</i><br>Er is sprake van een niet dragend binnenblad dat aan de bovenzijde in horizontale richting uit het vlak van de wand gesteund wordt en waarbij het buitenblad ter plaatse van de vloerranden ook niet is voorzien van een horizontale koppeling met de vloerrand.<br><br>Beoordelen van de sterkte van de constructie en bijbehorende factor onder windbelasting mag de weerstand van de constructie zijn gebaseerd op de buigtreksterkte van het metselwerk. De grote van de buigtreksterkte is beschreven in NEN-EN1996 |
| $\gamma_{f;q;u}$ | Partiële factor voor winbelasting   |
| $C_{index}$      | Windvormfactor voor $10 \text{ m}^2$  |
| $q_p(z)$         | Stuwdruk volgens NEN-EN 1991-4/NB   |
| $A_{sp}$         | Geveloppervlakte per spouwanker (bekeken in een oppvlakte van 3 meter breed en 2 meter hoog)<br>$1/(\text{aantal ankers per m}^2)$  |
| d                | Gemeten diameters (mm) van de ankers  |
| $f_s$            | Rekenwaarde voor de vloeigrens van het spouwankermateriaal.   |

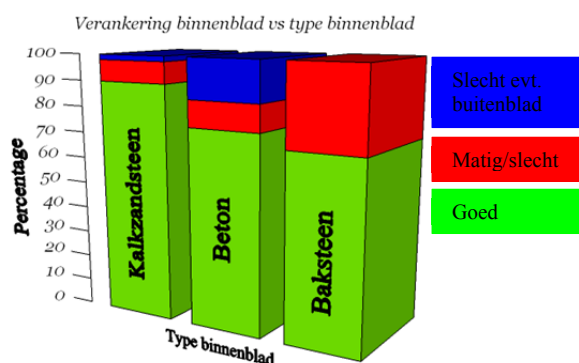
|                             |  |
|-----------------------------|--|
| $F_{sp,R}$                  | Opneembare drukkracht spouwanker   |
| $A_s$                       | Oppervlakte van de spouwankerdoorsnede (mm <sup>2</sup> )<br>$A_s = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$   |
| e                           | Excentriciteit (mm) van het midden van het spouwanker (1mm aannemen)   |
| $W_s$                       | Weerstandsmoment van de spouwankerdoorsnede (mm <sup>3</sup> )<br>$W_s = \frac{\pi}{32} \cdot d^3$   |
| $n_s$                       | Vergrotingsfactor in verband met tweede orde effecten<br>$n_s = \frac{F_{sp,E}}{F_{sp,d}}$   |
| $F_{sp,E}$                  | Eulerse knikkracht<br>$F_{sp,E} = \frac{\pi^2 \cdot E_{sp} \cdot I_{sp}}{l_k^2}$   |
| $E_{sp}$                    | Elasticiteitsmodulus van het spouwankermateriaal   |
| $I_{sp}$                    | Kwadratisch oppervlaktemoment (mm <sup>4</sup> ) van de spouwankerdoorsnede.<br>$I_{sp} = \frac{\pi}{64} \cdot d^4$  |
| $l_k$                       | Kniklengte van het spouwanker (mm), gelijk aan de spouwbreedte<br>KNB 22 → geen capaciteit aan inklemming ontleend omdat de eenmalige optredende verplaatsingsverschillen niet worden berekend bij de buigspanning in een spouwanker<br>LET OP: 2 MANIEREN MOGELIJK! |
| $F_{sp}$                    | Trekkkracht van het spouwanker: $F_{sp} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot f_s$   |
| d                           | Gemeten diameter van het spouwanker  |
| $f_s$                       | Rekenwaarde voor de vloeigrens van het spouwankermateriaal.  |
| <b>KNB informatiebladen</b> |  |
| $\Delta L$                  | Verlenging of verkorting van het spouwanker<br>$\Delta L = L \epsilon r$   |
| $\Delta L$                  | Regelmatig terugkerende verplaatsingen:<br>$\Delta L = \Delta T \cdot \alpha \cdot L$  |
| $\sigma$                    | Buigspanningen<br>$\sigma = \frac{3 \cdot E \cdot d \cdot v}{l_a^2}$   |
| E                           | Elasticiteitsmodulus van het spouwankermateriaal   |
| d                           | Diameter spouwanker  |
| v                           | Verplaatsingsverschil tussen het buitenspouwblad en de binnen constructies   |
| $L_a$                       | De beschouwde lengte van het spouwanker<br>(de spouwbreedte vermeerderd met tweemaal de inklemmingslengte van het spouwanker. De inklemmingslengte is de inbeddinglengte van het anker in het metselwerk tot daar waar de hoekverdraaiing van het anker nul is = 2d) |
| $\Delta T$                  | Het verschil tussen de momentane temperatuur en de extreme temperatuur.<br>Momentane temperatuur: T=17 graden<br>Extreme temperatuur: T=53 graden  |
| $\alpha$                    | Thermische uitzettingscoëfficiënt voor baksteenmetselwerk<br>$\alpha = 6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$   |
| L                           | Beschouwde lengte (mm/m)   |
| <b>BS EN 5628-1</b>         |  |
| W                           | Karakteristieke windbelasting oppervlak  |
| $I_1$                       | Traagheidsmoment van het buitenspouwblad   |
| $I_2$                       | Traagheidsmoment van het binnenblad  |
| $I_{totaal}$                | Totaal traagheidsmoment van de spouwmuur   |
| $t_n$                       | Dikte spouwblad  |
| $f_{kx\ par}$               | Buigtreksterkte evenwijdig aan de lintvoegen   |
| $f_{kx\ perp}$              | Buigtreksterkte loodrecht op de lintvoegen   |
| $M_k$                       | Momentweerstand van het spouwblad:<br>$M_k = \frac{f_{kx\ par}}{\gamma_m} Z$ of $M_k = \frac{f_{kx\ perp}}{\gamma_m} Z$  |
| $\gamma_m$                  | Belastingsfactor = 1.35  |

|                         |   |
|-------------------------|---|
| $Z$                     | <i>weerstandmoment</i>  |
| $M_k$                   | Moment veroorzaakt door de belasting:<br>$M_k = \mu\alpha W_k \gamma L^2$ |
| $\mu$                   | orthogonale ratio, tabel 8 van de norm                                    |
| $\alpha$                | Buigmomentcoëfficiënt uit tabel 9   |
| $W_k$                   | Karakteristieke windbelasting oppervlak                                   |
| $L$                     | Beschouwde breedte  |
| Onderzoek uit Noorwegen |   |
| $q_\gamma$              | Windbelasting   |
| $\gamma$                | Belastingscoëfficiënt (NS 3479) = 1.6                                     |
| $\mu$                   | Vormfactor (NS 3479; §4.2.5)  |
| $q$                     | Windsnelheid (NS 3479; §4.2.2.2.)   |
| $\Delta$                | Verplaatsing van het spouwanker/spouwbladen                               |
| $l$                     | Vrije lengte van het spouwanker   |
| $\emptyset$             | Diameter van het spouwanker   |
| $n_r$                   | Aantal spouwankers per vierkante meter geveloppervlak                     |
| $N_{Rd}$                | Capaciteit van het spouwanker   |

**Bijlage 1 Afbakening van het afstudeeronderzoek**

**Spouwbladen**

Een tweetal normen [3], [5] beschrijven dat de stijfheid van beiden spouwbladen een rol speelt bij de afdracht van de windbelasting op het buitenblad via de spouwankers naar het binnenblad. In Nederland worden veel gevels opgetrokken uit metselstenen en binnenbladen uitgevoerd in beton of kalkzandsteen. Het SBR [SBR12] heeft onderzoek gedaan naar aangebrachte spouwankers in bestaande woon- en kantoorgebouwen bij drie typen binnen- en buitenbladen. Uit dit onderzoek blijkt dat de meeste foutief aangebrachte spouwankers in metselwanden voorkomen, zoals in *Figuur 112* is aangeduid.



*Figuur 112: Onderzoek verankering aangetroffen spouwankers in binnenbladen combinerend met type binnenblad. Bron: SBR: ir.H. Borsje, ir. J.N. Huibregtse (2012). pag. 32*

Om spouwankers te kunnen toetsen op trek- en drukcapaciteit, moet eerst de vorm van bezwijken van een spouwanker onderzocht worden. Omdat de spouwankers matig tot slecht zijn aangebracht in metselwerk, wordt gekozen voor een metselwerk buitenblad.

Van ingemetselde/ingelijmde/ingeboorde spouwankers is de daadwerkelijke oplegging in het binnen- of buitenblad niet bekend, dit kan scharnierend of een inklemming zijn. Om bij één oplegging van het spouwanker in de proef de onzekerheid van de oplegging weg te nemen wordt gekozen om het spouwanker niet te metselen in het binnenblad, maar het binnenblad te situeren als inklemming door het spouwanker in te klemmen met een stalen klem. Hierdoor wordt voor één oplegging (binnenblad) de randvoorwaarden afgebakend en kan de oplegging bij het buitenblad nauwlettend geanalyseerd worden tijdens de proeven.

Tot op heden is weinig onderzoek uitgevoerd naar het constructieve gedrag van spouwankers in “standaard” spouwmuren met een binnen- en buitenblad van  $\geq 100$  mm. Tegenwoordig worden naast de “standaard” spouwmuren in de praktijk spouwbladen van meer of minder breedte gebruikt (draagvlak klampsteen = 65 mm). Voordat de uitzonderingen onderzocht kunnen worden moet de “standaard” onderzocht worden.

De spouwbladen worden dus als volgt uitgevoerd:

|                   |                                   |                      |
|-------------------|-----------------------------------|----------------------|
| <i>Binnenblad</i> | <i>Stalen klem</i>                |                      |
| <i>Buitenblad</i> | <i>Baksteen (lijm/metselwerk)</i> | <i>dikte: 100 mm</i> |

## Mortels

De samenstelling van de mortel zorgt onder anderen voor de hechting tussen mortel-spuwanker en mortel-steen, waaruit volgt dat de mortelkwaliteit de hechtingskwaliteit beïnvloed. Wanneer de samenstelling van de mortel niet voldoende is (zoals luchtbellens, geen volle voegen, te veel water), kan het spouwanker, de voeg of het metselwerk voortijdig bezwijken. Dat resulteert in het maatgevendste bezwijkmechanisme van het spouwblad met spouwanker. Voor de mortel kunnen aantal morteltypen en –kwaliteiten worden gebruikt voor het metselen van de proefopstelling. In Tabel 23 zijn de verschillende mortels uitgewerkt.

Tabel 23: Typen mortels die toepasbaar zijn bij metselwerk. De groene arcering geeft aan of voor welk type spouwblad en met welke toepassing deze gebruikt kan worden.

| Spouwblad  | 1. Metselmortel/metselfix (Cement basis) | 2. Bastaardmortel (kalkbasis) | 3. Trasmortel (trassbasis) | 4. Metselmortel (scheepkalk basis) | 5. Metselmortel (scheepkalk cementbasis) | 6. Doorstrijkmortel | 7. Lijmmortel | 8. Blokkenlijm | 9. Dunbed mortel |
|--|--|-------------------------------|----------------------------|------------------------------------|--|---------------------|---------------|----------------|------------------|
| Mortelklasse   | M5-M10                                   | M5                            | M5                         | M5                                 | M10                                      | M15                 | M10           | M10            |                  |
| <b>Betonsteen</b>  |  |                               |                            |                                    |  |                     |               |                |                  |
| gelijmd  |  |                               |                            |                                    |  |                     |               |                |                  |
| gemetseld  |  |                               |                            |                                    |  |                     |               |                |                  |
| Hechtsterkte na 28 dagen $\geq$ ... N/mm <sup>2</sup> Buiten | 0,15-0,2                                 | 0,15                          |                            | 0,20                               |  | 0,15                | 0,60          | 0,20           |                  |
| Hechtsterkte na 28 dagen $\geq$ ... N/mm <sup>2</sup> Binnen | 0,10                                     | 0,10                          |                            | 0,10                               |  | 0,10                | 0,60          | 0,10           |                  |
| Buigtreksterkte ... N/mm <sup>2</sup> Buiten                 | 2,50                                     |                               |                            | 2,80                               |  | 3,5-3,9             | 5,5-6,1       | 3,80           |                  |
| <b>kalkzandsteen</b>   |  |                               |                            |                                    |  |                     |               |                |                  |
| gelijmd  |  |                               |                            |                                    |  |                     |               |                |                  |
| gemetseld  |  |                               |                            |                                    |  |                     |               |                |                  |
| Hechtsterkte na 28 dagen $\geq$ ... N/mm <sup>2</sup> Buiten | 0,15-0,2                                 |                               |                            |                                    | 0,20                                     | 0,2-0,4             | 0,2-0,4       |                |                  |
| Hechtsterkte na 28 dagen $\geq$ ... N/mm <sup>2</sup> Binnen | 0,15-0,2                                 |                               |                            |                                    | 0,10                                     | 0,2-0,4             | 0,2-0,4       |                |                  |
| Buigtreksterkte ... N/mm <sup>2</sup> Buiten                 | 2,50                                     |                               |                            |                                    | 4,00                                     | 4,80                | 4,50          |                |                  |
| <b>cellenbeton</b>   |  |                               |                            |                                    |  |                     |               |                |                  |
| gelijmd  |  |                               |                            |                                    |  |                     |               |                |                  |
| Hechtsterkte na 28 dagen $\geq$ ... N/mm <sup>2</sup> Buiten |  |                               |                            |                                    |  |                     | 0,30          |                |                  |
| Hechtsterkte na 28 dagen $\geq$ ... N/mm <sup>2</sup> Binnen |  |                               |                            |                                    |  |                     | 0,30          |                |                  |
| Buigtreksterkte ... N/mm <sup>2</sup> Buiten                 |  |                               |                            |                                    |  |                     | 4,50          |                |                  |
| <b>baksteen</b>  |  |                               |                            |                                    |  |                     |               |                |                  |
| gelijmd  |  |                               |                            |                                    |  |                     |               |                |                  |
| gemetseld  |  |                               |                            |                                    |  |                     |               |                |                  |
| Hechtsterkte na 28 dagen $\geq$ ... N/mm <sup>2</sup> Buiten | 0,15-0,2                                 | 0,15                          | 0,20                       | 0,20                               |  | 0,15                | 0,2-0,6       | 0,20           |                  |
| Hechtsterkte na 28 dagen $\geq$ ... N/mm <sup>2</sup> Binnen | 0,10                                     | 0,10                          | 0,10                       | 0,10                               |  | 0,10                | 0,2-0,6       | 0,10           |                  |
| Buigtreksterkte ... N/mm <sup>2</sup> Buiten                 | 2,50                                     | 3,00                          | 2,80                       |                                    | 3,5-3,9                                  | 5,5-6,1             |               | 3,80           |                  |

Uit Tabel 23 blijkt dat slechts één type mortel (blokkenlijm) niet te gebruiken is bij metselwerk van baksteen. Daarnaast is de hechting tussen de drie verschillende materialen (staal, mortel en baksteen) van belang voor de vorm van bezwijken van het proefstuk. Om de invloed van het type mortel te analyseren en niet de kwaliteiten van één type mortel te beproeven, worden twee typen mortels en drie mortelkwaliteiten (M5-, M10-, of M15-mortel) gebruikt voor de proefstukken. Tussen de mortelkwaliteiten blijkt een verschil van de uittrekwaarde van het spouwanker te zijn [NTNU13] en is een belangrijk gegeven bij het opstellen van de rekenmethode en dient dus nader onderzocht te worden. De meest toegepast mortel is mortel op basis van cement, de overige typen mortels worden toegepast maar niet in grote mate<sup>1</sup>. Om een rekenmethode op te stellen waar zowel, lijm- als metselmortel ingevoerd kunnen worden, wordt gekozen voor:

Lijmmortel voor bakstenen buitenblad (Omnicol PVM)

M15-kwaliteit

Metselmortel voor bakstenen buitenblad (BEAMIX 320/322, cementmortel)

M5- en M10-kwaliteit

<sup>1</sup> Interview: Bartels Ingenieursbureau en Total Wall Concept



### Spouwbreedte

Eurocode 6 en de nationale normen en voorschriften behandelen spouwen tot 150-180 mm. Momenteel moeten de nieuw te bouwen huizen voldoen aan hogere RC-waarden. Hierdoor worden vaak hoogwaardigere of dikkere isolatie gebruikt. Kingspan [KIN13] heeft drie typen isolaties nader bekeken bij verschillende RC-waarden. In *Figuur 113* is af te lezen dat een dik pakket minerale wol nodig is, voor dezelfde RC-waarde als wanneer Therma of Kooltherm gebruikt worden. Vanwege de hoge kosten van hoogwaardige isolatie en lage kosten voor minerale wol, wordt tegenwoordig nog steeds veel minerale wol gebruikt. De omslag naar hoogwaardigere isolatie wordt een keer gemaakt, omdat de ruimte in de woningen zal afnemen door de toename van de spouwbreedte (benodigd voor het halen van de RC-waarde met gebruik van minerale wol). In *Figuur 113* worden de verschillende spouwbreedten aangeduid met de verschillende isolatietypen.

| R <sub>C</sub> -waarde m-K/W         | R <sub>C</sub> -waarde in gevel |     |     |     |     |     |      |
|--------------------------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|                                      | 3,5                             | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 7,0 | 8,0 | 10,0 |
| <b>Kooltherm®</b><br>(dikte in mm)   | 63                              | 74  | 94  | 117 | 147 | 169 | 199  |
| <b>Therma™</b><br>(dikte in mm)      | 70                              | 82  | 107 | 134 | 159 | 185 | 235  |
| <b>Minerale wol</b><br>(dikte in mm) | 120                             | 140 | 180 | 220 | 260 | 290 | 370  |

Alle waarden zijn berekend volgens NEN 1068. Met deze dikte behaalt u exact de genoemde R<sub>C</sub>-waarde. Het kan zijn dat u met de actuele voorraad dikte een iets andere waarde behaalt. Neem voor de actuele productdikte en -informatie contact op met onze verkoop binnendienst.

*Figuur 113: Isolatie dikte excl. luchtspouw bij gebruikt van verschillenden typen isolaties [KIN13].*

Door de grotere spouwbreedte verandert het gedrag van spouwankers. Het constructieve gedrag van spouwankers bij spouwbreedte groter dan 180 mm is niet onderzocht en beschreven in normen en publicaties. Vanwege de verbredingen van de spouwen, verhoging van de RC-waarden, worden de volgende spouwbreedtes getoetst tijdens het afstudeeronderzoek:

- 150 mm
- 180 mm (grens volgens de Eurocode 6)
- 220 mm
- 280 mm (grens spouwbreedte voor hoogwaardige isolatie)

De verbreding van de spouwen heeft constructieve (verhoogde kans op knik) en bouwfysische (koudebrug) consequenties voor de spouwankers. Voor het verminderen van de koudebrug kan een plug in het binnenblad worden geboord. Daarna wordt het spouwanker in de plug geslagen en kan het buitenblad worden opgemetseld. Wat de invloed van deze plug is en hoe deze verwerkt moet worden in de toetsing van het spouwanker is niet onderzocht. Het voordeel van dit typen spouwankers is, dat deze in het binnenblad worden geboord tijdens het opmetselen van het buitenblad. Spouwankers die mee gemetseld worden met het binnenblad, worden vanwege veiligheidsredenen omgebogen na het inmetelen (*Figuur 114*). Wat de invloed is van het inboren van het spouwanker, gebruik van een plug of het ombuigen van het spouwanker tijdens de uitvoering moet nader onderzocht worden, om hier een uitspraak over te doen.



*Figuur 114: Omgebogen spouwanker na inmetelen in het binnenblad.*

**Typen spouwankers**

Op de markt zijn verschillende spouwankers voor elk type binnen- en buitenblad te vinden. In Tabel 24 zijn de verschillende typen spouwankers uitgewerkt.

Tabel 24: Typen spouwankers die toegepast kunnen worden in een spouwmuur. De arcering geeft aan bij welke type binnen- en buitenspouwblad het spouwanker gebruikt kan worden.

| Buitenspouwblad        | Binnenspouwblad       | 1. Frikspouwanker | 2. UNI-L spouwanker | 3. UNI (lijm)boorspouwanker | 4. UNI-slagspouwanker | 5. Prefab-lijmspouwanker | 6. Combi-Fix lijmspouwanker | 7. Combi-Fix | 8. Lijmspouwanker | 9. Metselspouwanker | 10. Teplo Tie | 11. Plaka-dBreak Isospouw | 12. 433MAXX | 13. Renovatieankers |
|------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------|---------------------|---------------|---------------------------|-------------|---------------------|
| <b>bak-/betonsteen</b> | <b>Beton</b>          |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gemetseld              | prefab                |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gelijmd                | prefab                |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gemetseld              | gestort               |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gelijmd                | gestort               |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| <b>bak-/betonsteen</b> | <b>kalkzandsteen</b>  |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gemetseld              | gemetseld             |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gelijmd                | gemetseld             |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gemetseld              | gelijmd               |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gelijmd                | gelijmd               |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| <b>bak-/betonsteen</b> | <b>cellenbeton</b>    |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gemetseld              | gelijmd               |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gelijmd                | gelijmd               |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| <b>bak-/betonsteen</b> | <b>houtskeletbouw</b> |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gemetseld              | prefab                |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gelijmd                | prefab                |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| <b>bak-/betonsteen</b> | <b>baksteen</b>       |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gemetseld              | gemetseld             |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gelijmd                | gemetseld             |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| <b>bak-/betonsteen</b> | <b>betonsteen</b>     |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gemetseld              | gemetseld             |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| gelijmd                | gemetseld             |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |
| Spouwbreedte > 180 mm  |                       |                   |                     |                             |                       |                          |                             |              |                   |                     |               |                           |             |                     |

\* alleen type Two part ties kan toegepast worden en lijmspouwanker van calduran tot 210 mm

\*\* Vanaf spouwbreedte 190 mm worden het verzinkte spouwankers

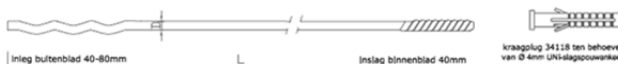
**Spouwanker in binnen en buitenblad gemetseld**

**Spouwanker alleen in buitenblad gemetseld**

Uit Tabel 24 kan geconcludeerd worden dat de meeste spouwankers niet geschikt zijn voor dit afstudeeronderzoek, omdat ze niet voor grote spouwbreedtes gebruikt kunnen worden en de spouwankers niet in RVS zijn uitgevoerd. Hierdoor vallen verschillende typen spouwankers af en wordt gekozen voor de volgende vier typen spouwankers:

- 1) UNI-slagspouwanker (recht spouwanker)

Leverancier A



- 2) UNI-L-spouwanker (spouwanker met haak)

Leverancier A



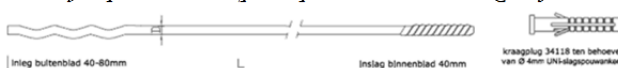
- 3) Combifix (recht spouwanker)

Leverancier B



- 4) UNI-lijmspouwanker (plat spouwanker vanwege lijm mortel)

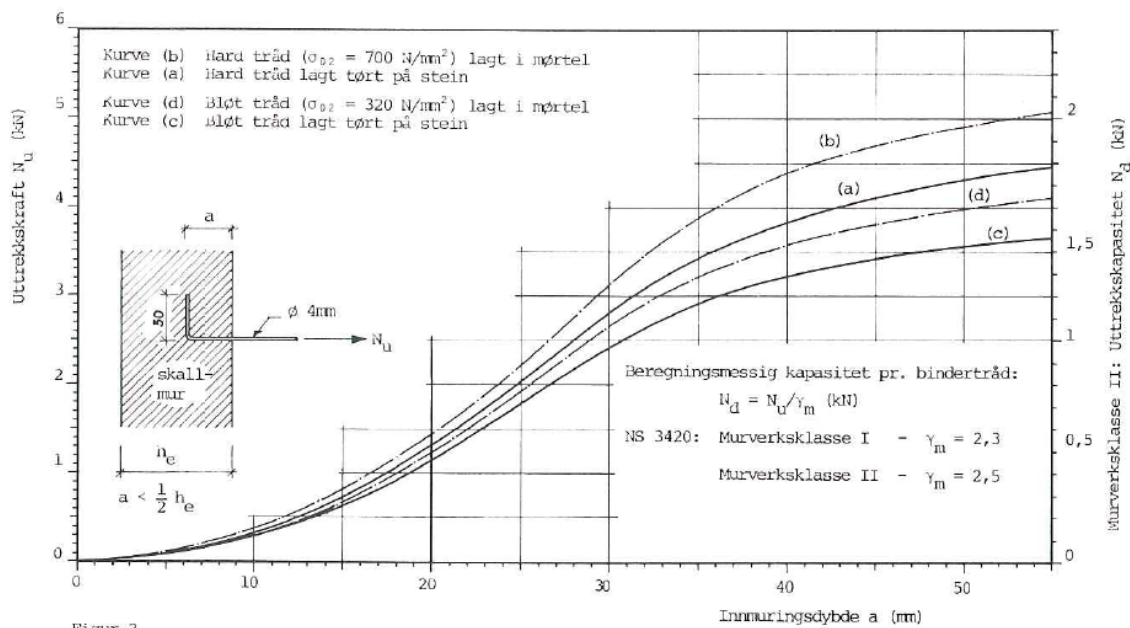
Leverancier A



Door het gebruik van deze vier typen spouwankers kunnen de resultaten vergeleken worden met de gevonden resultaten uit onderzoeken uit Noorwegen [NTNU13] en een conclusie worden getrokken over de werking van het spouwanker van twee fabrikanten en typen spouwankers. Daarnaast kan een uitspraak worden gegeven over de trek- en drukcapaciteit van de typen spouwankers.

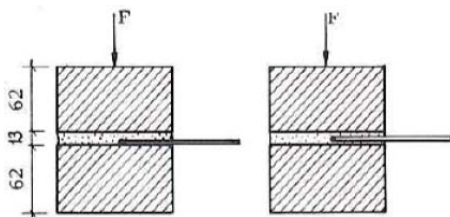
### Inlegdiepte spouwankers

De inlegdiepte van het spouwanker is een belangrijke parameter voor de trekkracht van het spouwanker, volgens onderzoeken van Madsø [MAD80]. Het onderzoek was gericht op een spouwanker met haak, belast op trek. Hieruit is de volgende grafiek het resultaat, *Figuur 115*:



*Figuur 115: Kracht-inlegdiepte grafiek voor spouwankers met een haak met omplooilengte van 50 mm; Madsø 1980.*

Uit *Figuur 115* heeft Madsø geconcludeerd dat een minimale inlegdiepte van 40 mm voor het rechte stuk van het spouwanker en 50 mm voor het omgeplooid stuk spouwanker nodig is, om voldoende hechting te creëren en de windbelasting te kunnen opnemen. Daarnaast wordt geconcludeerd dat spouwankers met mortel aan twee zijden een hogere capaciteit hebben dan spouwankers met aan één zijde mortel (*Figuur 116*). In het onderzoek worden daarom de spouwankers ingemetseld met aan twee zijden mortel.



*Figuur 116: De manier van inmetselen van het spouwanker in de mortel. a) Aan 1-zijde van het spouwanker mortel b) Aan 2-zijden van het spouwanker mortel.*

De NEN-EN 845-1 geeft een minimale inlegdiepte van 40 mm en houdt geen rekening met de keuze voor het type spouwanker. Om de ondergrens van de beschreven variabelen te testen aan de minimale inlegdiepte wordt 40 mm aangehouden. Daarbij moet vermeld worden dat de overige inlegdiepte niet onbelangrijk zijn, maar om de eerste opzet te geven voor een rekenmethode is de ondergrens voor dit onderzoek voldoende.

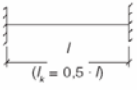

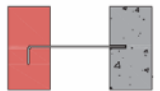

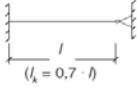
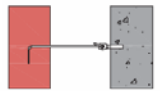
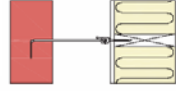
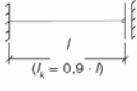
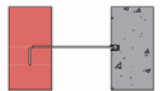
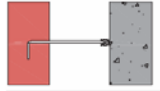
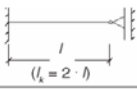
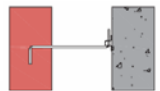
*Bijlage 2* **Analyse van de praktijkvoorbeelden verkregen van Bartels Ingenieursbureau**





Bijlage 3 **Tabellen uit Noorwegse Catalogus [15]**

Tabel 25: Aanbevolen capaciteiten per spouwanker in kN voor spouwsystemen met verschillende randcondities van de spouwankers bij een bepaalde spouwbreedte  $l$ . Aangeraden wordt voor het gebruik van roestvrij stalen spouwankers met een vloeigrens van  $\geq 500 \text{ N/mm}^2$  en M10-mortel of hoger. Spouwankers gemetseld in M5-mortel is de maximale spouwanker capaciteit 1000 kN en 1250 kN voor spouwankers  $\text{Ø}4$  en  $\text{Ø}5$  [15].

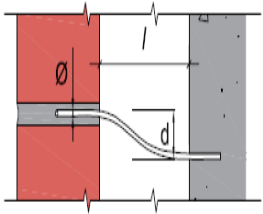
| Anchorage System  | Tying Principle   | Free tie length mm | Anchorage system capacity per tie, kN |                         | Application field   |
|---|---|--------------------|---------------------------------------|-------------------------|---|
|   |   |                    | $\text{Ø} = 4\text{mm}$               | $\text{Ø} = 5\text{mm}$ |   |
| <b>Fixed Connection</b><br>                    | <b>In-wall wired tie</b><br>   | 50                 |                                       |                         | In mortar joints  |
|   |   | 75                 | 1,5                                   | 2,0                     |   |
|   |   | 125                | 1,5                                   | 2,0                     |   |
|   |   | 175                | 1,5                                   | 2,0                     |   |
|   |   | 225                | 1,2                                   | 2,0                     |   |
|   | <b>Wired tie with stroko anchor or screw threads in the plug</b><br>                           | 50                 | 1,5                                   | 2,0                     | Tying between concrete and masonry  |
|   |   | 75                 | 1,5                                   | 2,0                     |   |
|   |   | 125                | 1,5                                   | 2,0                     |   |
|   |   | 175                | 1,5                                   | 2,0                     |   |
|   |   | 225                | 1,2                                   | 2,0                     |   |
|   | <b>Wired tie with screw threads</b><br>  | 50                 | 0,5                                   | 0,6                     | Tying between masonry and wood columns  |
|   |   | 75                 | 0,5                                   | 0,6                     |   |
| 125   |   | 0,5                | 0,6                                   |                         |   |
| 175   |   | 0,5                | 0,6                                   |                         |   |
| 225   |   | 0,5                | <b>0,6</b>                            |                         |   |
| <b>Hinged Connection</b><br>                 | <b>Wired tie with plastic plug and screw eye bolt</b><br>                                     | 50                 | 0,7                                   | 0,8                     | Tying between masonry and concrete  |
|   |   | 75                 | 0,7                                   | 0,8                     |   |
|   |   | 125                | 0,7                                   | 0,8                     |   |
|   |   | 175                | 0,7                                   | 0,8                     |   |
|   |   | 225                | 0,6                                   | 0,8                     |   |
|   | <b>Wired tie with screw eye bolt</b><br>   | 50                 | 0,5                                   | 0,6                     | Tying between masonry and wood columns  |
|   |   | 75                 | 0,5                                   | 0,6                     |   |
|   |   | 125                | 0,5                                   | 0,6                     |   |
|   |   | 175                | 0,5                                   | 0,6                     |   |
|   |   | 225                | 0,5                                   | <b>0,6</b>              |   |
| <b>Partial hinged/sliding Connection</b><br> | <b>Wired tie in (HI) vertical anchor rails</b><br>   | 50                 | 1,5                                   | 1,7 *)                  | Tying between masonry and concrete<br>*) $\text{Ø} 4,4 \text{ mm}$                |
|   |   | 75                 | 1,5                                   | 1,7 *)                  |   |
|   |   | 125                | 1,2                                   | 1,7 *)                  |   |
|   |   | 175                | 0,7                                   | 0,9 *)                  |   |
|   |   | 225                | 0,5                                   | 0,6 *)                  |   |
|   | <b>Wired tie in vertical anchor rails (max. 75 mm from the tie till the fixing bolt)</b><br> | 50                 | 0,9                                   | 0,9 *)                  | Tying in concrete, masonry, steel or wood columns<br>*) $\text{Ø} 4,4 \text{ mm}$ |
|   |   | 125                | 0,9                                   | 0,9 *)                  |   |
|   |   | 175                | 0,7                                   | 0,9 *)                  |   |
|   |   | 225                | 0,5                                   | 0,6 *)                  |   |
|   |   |                    |                                       |                         |   |
| <b>Sliding connection</b><br>                | <b>Wired tie in (NP) anchor rails (max. 75 mm from the tie till the fixing bolt)</b><br>     | 50                 |                                       | 1,3                     | Tying in concrete, masonry, steel or wood columns                                 |
|   |   | 75                 |                                       | 1,3                     |   |
|   |   | 125                |                                       | 0,7                     |   |
|   |   | 175                |                                       | 0,4                     |   |
|   |   | 225                |                                       | 0,3                     |   |

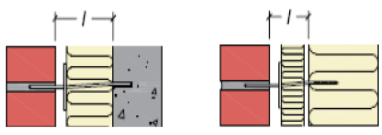


Tabel 26: Maximaal toegestane relatieve verplaatsing voor spouwankers gefixeerd in binnen- en buitenblad, de formule om dit te berekenen is gegeven in paragraaf 2.1 figuur 8. [15]

| Free tie length ( $l$ )<br>mm | Maximum vertical displacement between the two tie ends $d$ (mm) |             | Maximum veneer wall height $H$ (m) |             |                |             |
|-------------------------------|---|-------------|------------------------------------|-------------|----------------|-------------|
|                               |   |             | Red Brick                          |             | Concrete Brick |             |
|                               | $\Phi=4$ mm   | $\Phi=5$ mm | $\Phi=4$ mm                        | $\Phi=5$ mm | $\Phi=4$ mm    | $\Phi=5$ mm |
| 25                            | 0.3   | 0.2         | 1.2                                | 1           | 0.7            | 0.6         |
| 50                            | 1.2   | 1.0         | 4.8                                | 3.8         | 3.0            | 2.4         |
| 75                            | 2.8   | 2.2         | 11.2                               | 8.8         | 7.0            | 5.5         |
| 100                           | 5.0   | 4.0         | 20.0                               | 16.0        | 12.5           | 10.0        |
| 125                           | 7.8   | 6.2         | 31.0                               | 25.0        | 19.5           | 15.5        |
| 150                           | 11.2  | 9.0         | 45.0                               | 36.0        | 28.0           | 22.5        |
| 175                           | 15.3  | 12.2        | 61.0                               | 49.0        | 38.2           | 30.5        |

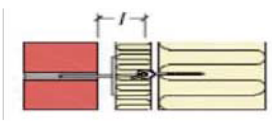
  





Fixed ties (in concrete and in wood)

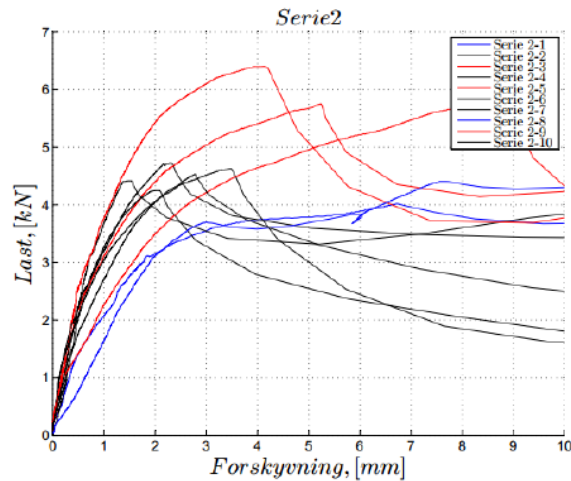
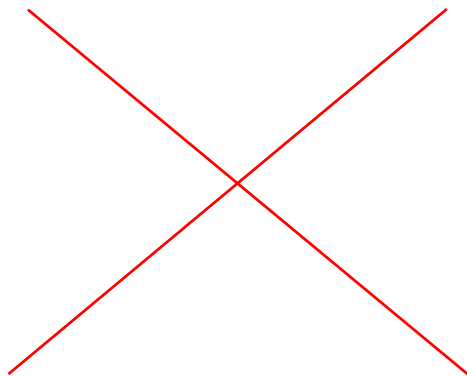


Hinged ties (in wood)

Bijlage 4 **Onderzoek Noorwegen [NTNU13]**

In Noorwegen op de NTNU zijn een aantal testen uitgevoerd met rechte golvende spouwankers en spouwankers met aan één zijde een haak, zoals in Tabel 27 is uitgewerkt. De testen zijn uitgevoerd volgens NEN-EN 846, waarbij is uitgegaan van een proefstuk zonder voordruk van twee bakstenen met daartussen een spouwanker. In het onderzoek zijn de mortelkwaliteiten (M5 en M10) en twee typen spouwankers (recht spouwanker en spouwanker met haak) onderzocht. De resultaten van de proef met M5-mortel zijn gegeven in Tabel 27.

Tabel 27: Resultaten van het onderzoek uit Noorwegen aan de NTNU [NTNU13].



| Oppsummering av serie 4                        |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Minst kapasitet                                | S4-7            | 2,788 kN  |
| Karakteristisk kapasitet                       | F <sub>Rk</sub> | 3,8516 kN |
| Dimensjonerende kapasitet, bruddgrensetilstand | F <sub>Rd</sub> | 1,8341 kN |
| Dimensjonerende kapasitet, ulykkestilstand     | F <sub>Rd</sub> | 2,4072 kN |

| Oppsummering av serie 2                        |                 |          |
|--|-----------------|----------|
| Minst kapasitet                                | S2-8            | 3,636 kN |
| Karakteristisk kapasitet                       | F <sub>Rk</sub> | 4,707 kN |
| Dimensjonerende kapasitet, bruddgrensetilstand | F <sub>Rd</sub> | 2,24 kN  |
| Dimensjonerende kapasitet, ulykkestilstand     | F <sub>Rd</sub> | 2,94 kN  |



De resultaten van het onderzoek laat zien dat spouwankers met haak vervormen bij het uittrekken van het spouwanker uit de mortel of de mortel doen bezwijken (figuur rechtsonder in Tabel 27). Het rechte spouwanker wordt uit de mortel getrokken zonder vervorming of bezwijken van de mortel. Verrassend is dat bij een hogere mortelkwaliteit, M10, lagere trekkrachten zijn gevonden tijdens de proeven. De minimale uittrekkraft is slechts 0,604 kN en het gemiddelde rond de 2,000 kN, terwijl bij mortelkwaliteit M5 deze waarden respectievelijk 3,636 kN en 4,000 kN zijn. Deze proeven zijn uitgevoerd bij holle bakstenen, om het gedrag van spouwankers bij volle bakstenen te kunnen analyseren moet hier nader onderzoek naar gedaan worden. In het literatuuronderzoek is een analyse geweid aan de verschillende type spouwankers en de mogelijkheid tot het gebruiken in spouwbreedte tot 280 mm. Veel spouwankers kunnen slechts gebruikt worden tot spouwbreedtes van maximaal 180 mm waardoor veel spouwankers niet tijdens dit onderzoek gebruikt kunnen worden.

**Bijlage 5 Uitwerkingen trekkracht op spouwanker**Aannames:

$$q_{p(z)} = 0,70 \text{ kN/m}^2 \quad C_{\text{index}} = 1,20 \text{ N/mm}^2 \quad f_{\text{yd}} = 300 \text{ N/mm}^2 \quad l_k = 166 \text{ mm}$$

$$\gamma_{f,q;u} = 1,35 \quad q_{\text{wd}} = 0,84 \text{ kN/m}^2 \quad E_{\text{sp}} = 210.000 \text{ N/mm}^2 \quad b_{\text{spouw}} = 150 \text{ mm}$$

Windgebied III – onbebouwd

Referentiehoogte gebouw = 10m

Uitgeefende winddruk op de spouwankers (normaal trekkracht in het spouwanker;  $F_{\text{sp;d}}$ ):

|                  |  |                             |
|------------------|--|-----------------------------|
| SBR-publicaties: | $F_{\text{sp;d}} = c_a \cdot \gamma_{f,q;u} \cdot C_{\text{index}} \cdot q_{p(z)} \cdot A_{\text{sp}}$ |                             |
| NEN 6790         | $F_{\text{sp;d}} = c_a \cdot \rho_{\text{wd}} \cdot A_{\text{sp}}$                                     | (alleen bij $C_a = 2$ of 3) |
| NPR 6791         | $F_{\text{sp}} = 2 \cdot \gamma_{f,q;u} \cdot C_{\text{index}} \cdot p_w \cdot A_{\text{sp}}$          | (alleen bij $C_a = 2$ )     |
| CUR 71           | $F_d = n \cdot \gamma_f \cdot p_{\text{rep}} \cdot A_{\text{sp}}$                                      | (alleen bij $n = 2$ of 3)   |

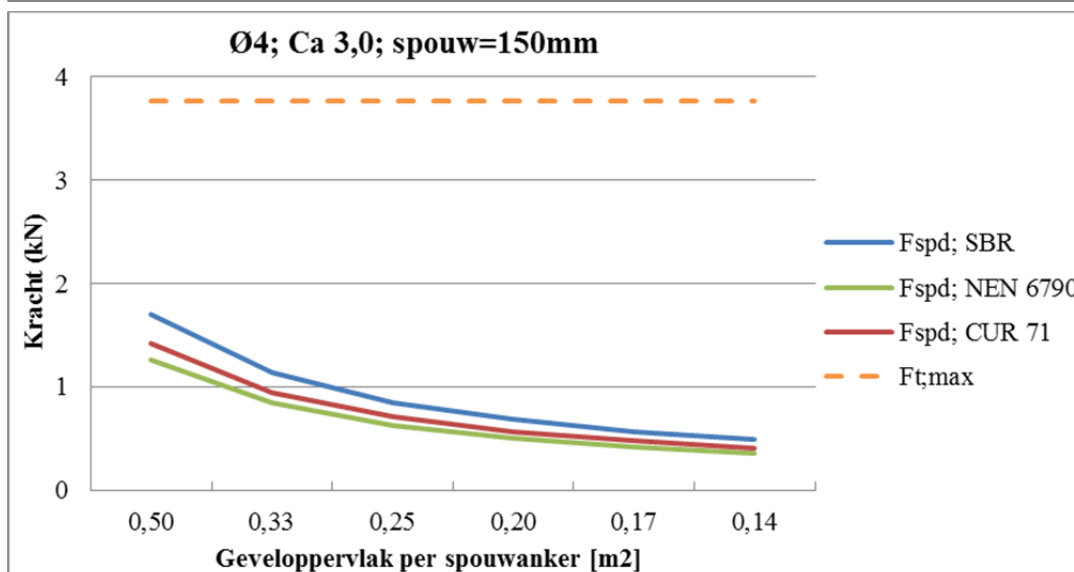
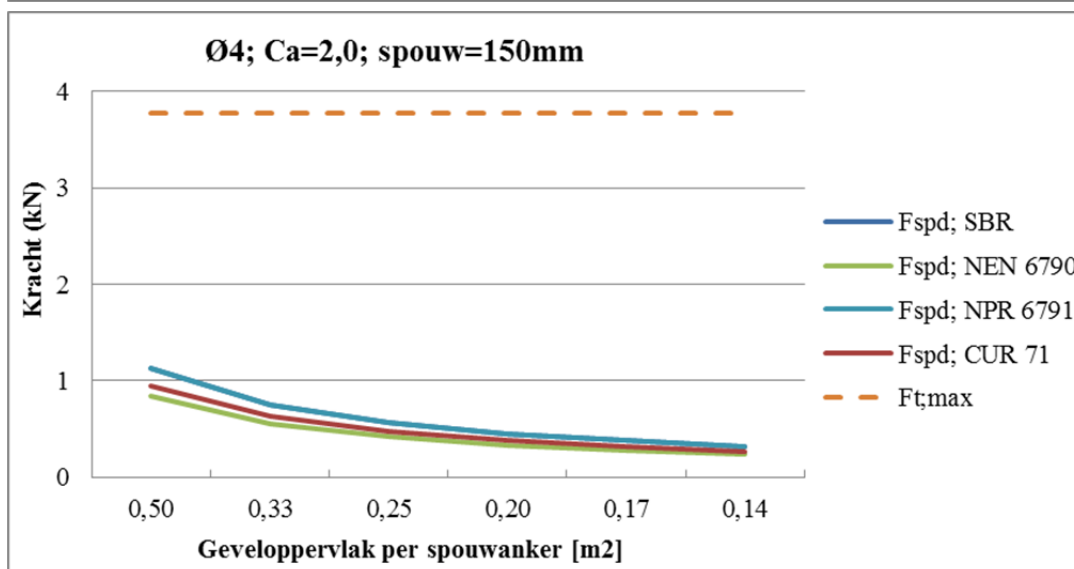
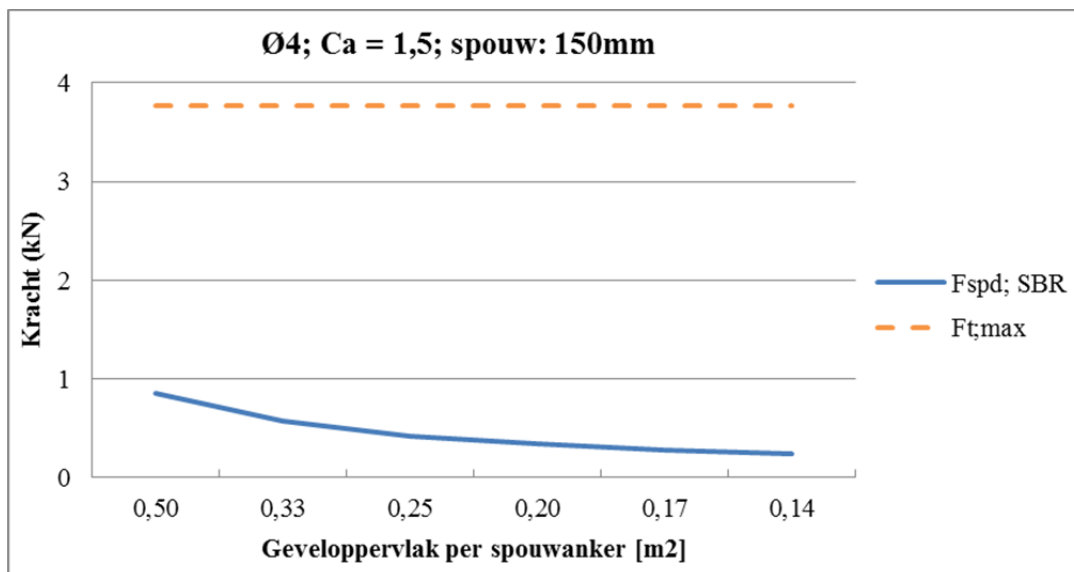
Opneembare trekkracht spouwankers (trekcapaciteit spouwankers;  $F_{t;\text{max}}$ ):

$$\text{NPR 9096/SBR/KNB/CUR 71} \quad F_{t;\text{max}} = 1/4 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot f_s$$

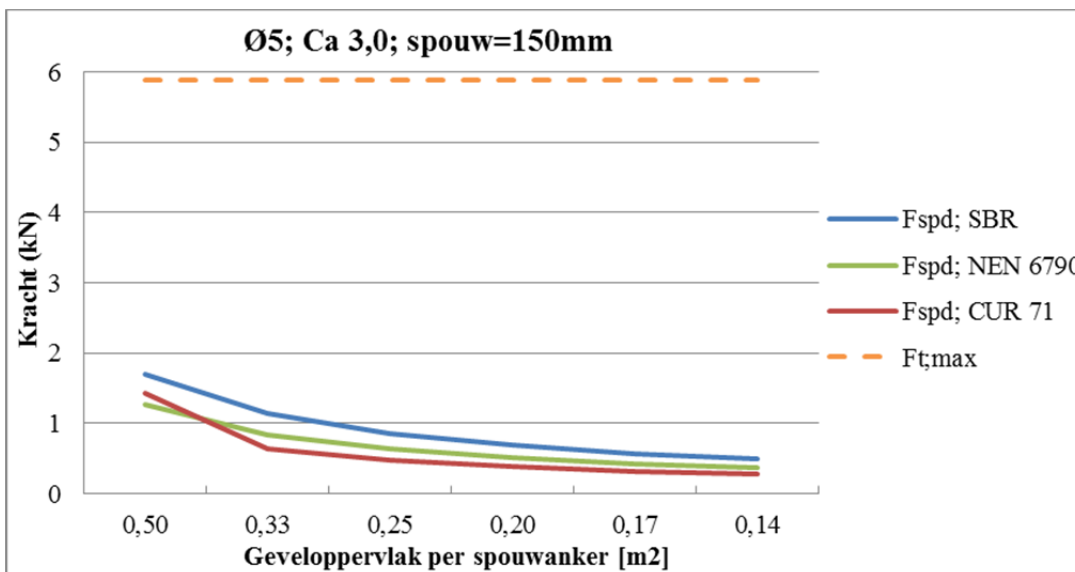
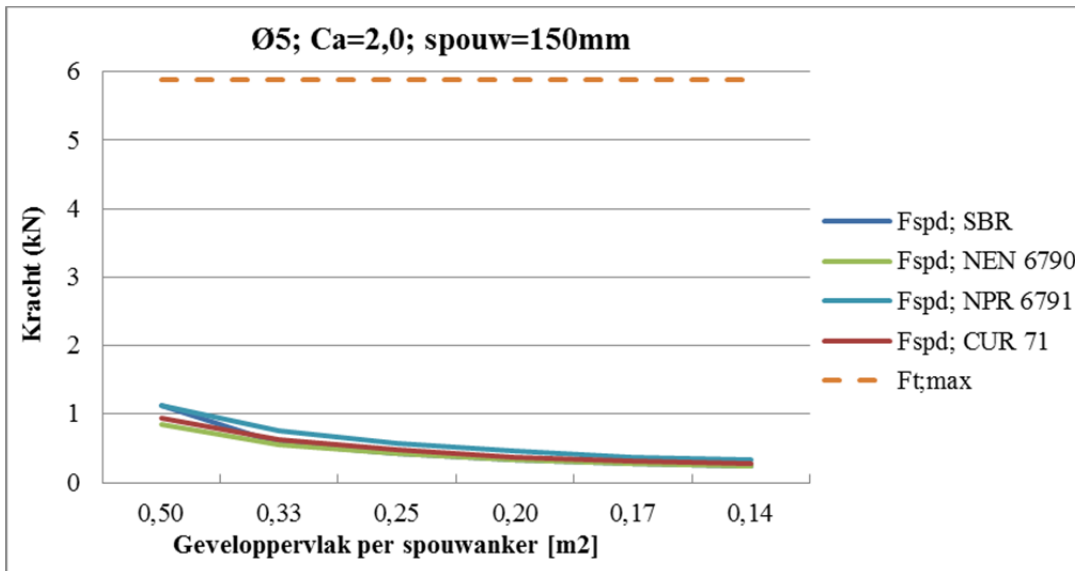
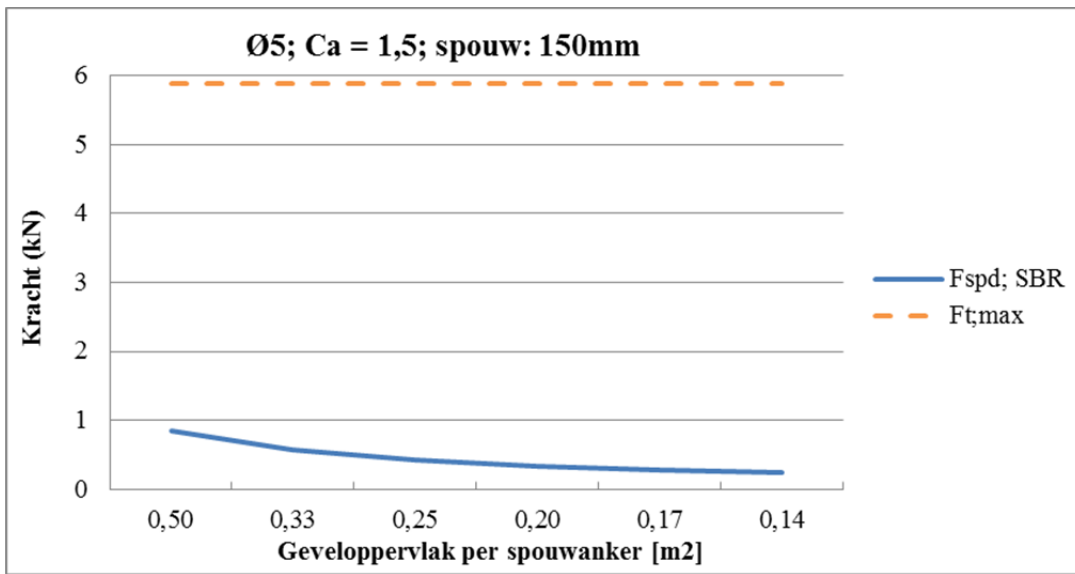
Om het maatgevendste vorm van bezwijken te kunnen analyseren worden de volgende twee analyses in een grafiek weergegeven:

- De opneembare trekcapaciteit van de spouwankers ( $F_{t;\text{max}}$ ) in relatie tot de optredende trekkracht door windzuiging ( $F_{\text{sp;d}}$ ) voor spouwankers Ø4 en Ø5.  
*In de grafieken is te zien dat de  $F_{t;\text{max}}$  van het spouwanker ver boven de optredende windbelasting ligt, waardoor het spouwanker altijd een groot genoeg capaciteit heeft volgens de formule uit NPR 9096/SBR/KNB/CUR 71.  
 Het minimum aantal spouwankers is volgens EC6 gelijk aan twee spouwankers per vierkante meter. De resultaten in de grafieken laten zien dat hieraan ruimschoots wordt voldaan.*
- De optredende trekkracht door windzuiging in relatie tot de opneembare trekkracht ( $F_{t;\text{max}}$ ) ter plaatse van de verankering van het spouwanker in het buitenblad.  
*In de grafieken is te zien dat de  $F_{t;\text{max}}$  van het spouwanker niet bij alle drie de type spouwankers boven de optredende windbelasting uitkomt. Hierbij is het aantal spouwankers per vierkante meter belangrijk voor de opname van de windbelasting. Uit de grafiek kan afgelezen worden dat een minimum van vijf spouwankers per vierkante meter nodig is.*

1. Opneembare trekcapaciteit spouwankers - Diameter Ø4



Opneembare trekcapaciteit spouwankers - Diameter Ø5

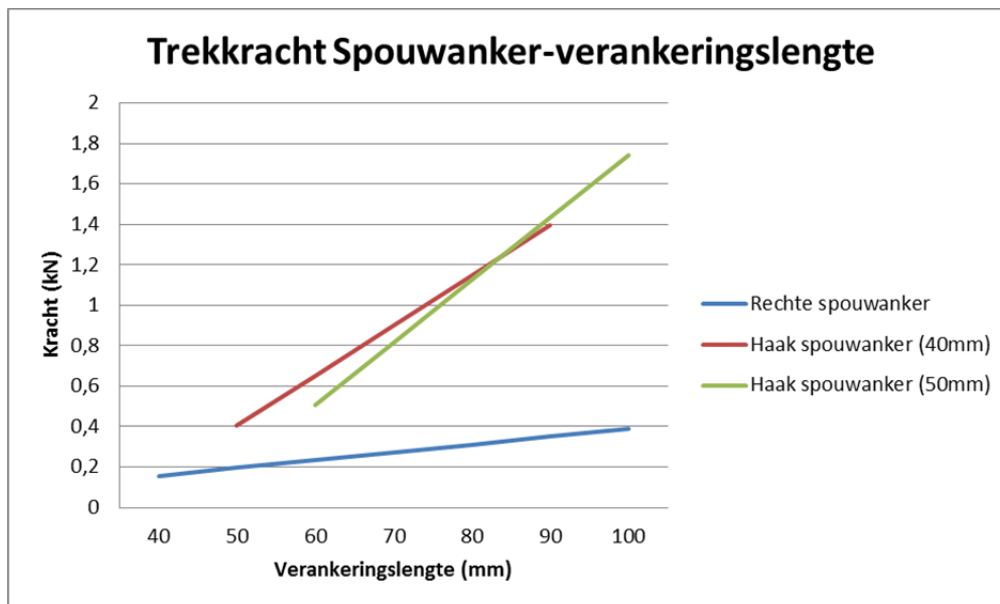


## 2. Opneembare trekcapaciteit spouwankers – Inlegdiepte

In onderstaande grafiek is op de verticale as de kracht weergegeven en op de horizontale as de inlegdiepte van het spouwanker. De doorgetrokken lijnen geven de capaciteit van het spouwanker weer bij een bepaalde inlegdiepte van het spouwanker. De blauwe lijn is de capaciteit van een recht spouwanker, de groene en rode lijn is de capaciteit van het spouwanker met haak (Figuur 117). Twee omliep lengtes van de spouwankers zijn geanalyseerd, namelijk 40 en 50 mm ( $l_b$ ; de lengte van de haak). De rechte stukken van de spouwankers hebben een inlegdiepte  $l_a$  van 40 mm, gelijk aan de minimale waarde die gegeven in NEN-EN845.



Figuur 117: Inlegdiepten twee typen spouwankers.



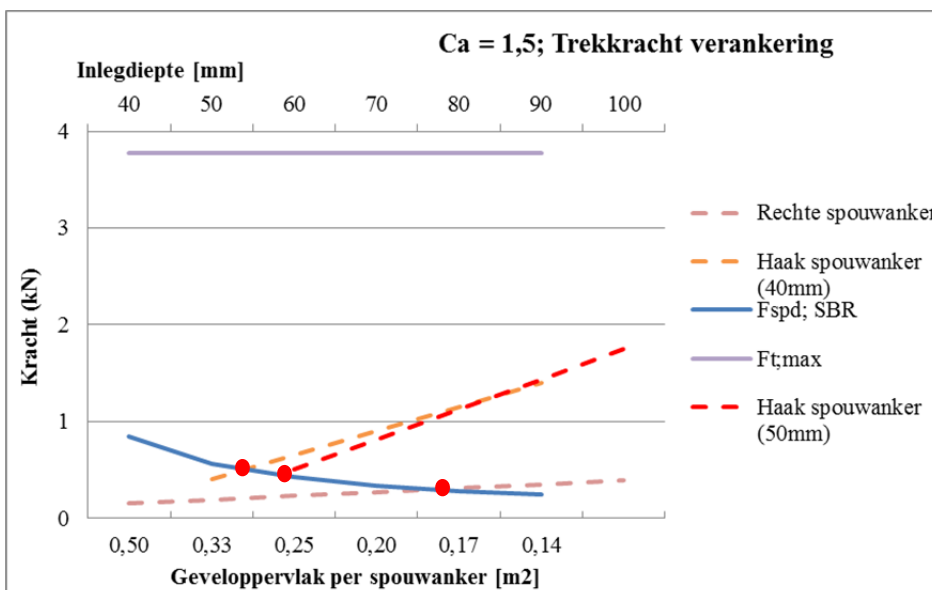
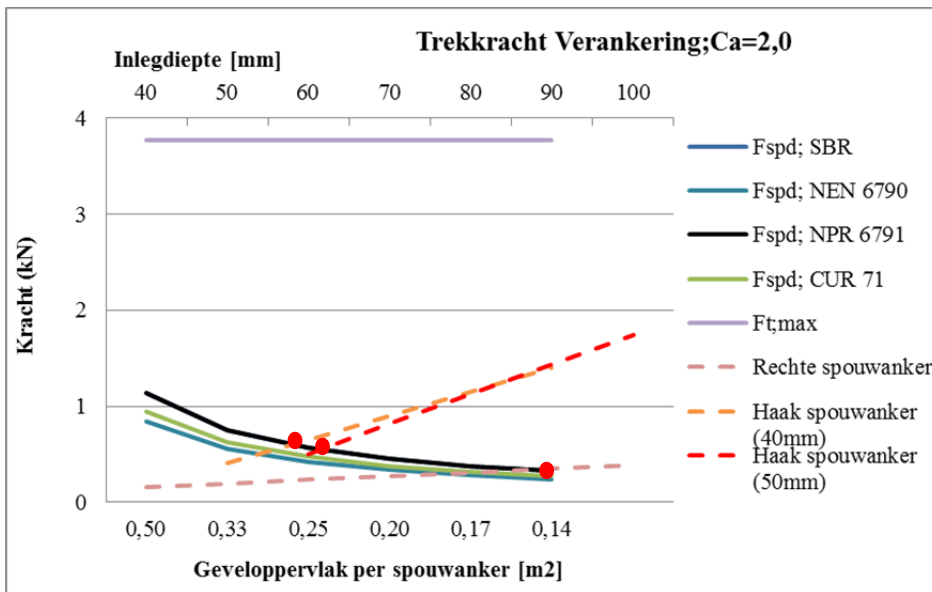
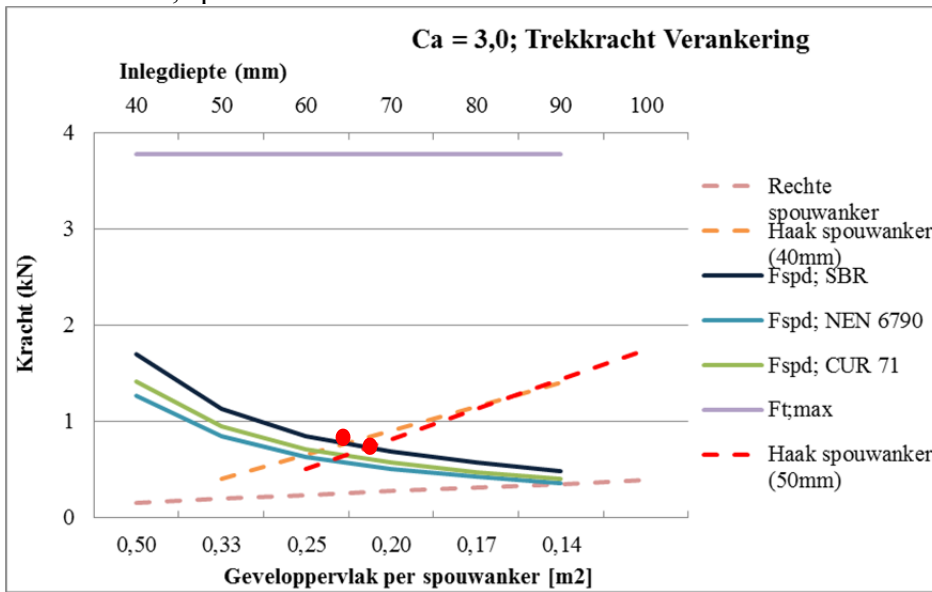
In de volgende drie grafieken worden bovenstaande grafieken gecombineerd. Op de verticale as wordt de kracht weergegeven, op de primaire horizontale as is het geveleppervlak per spouwanker weergegeven waarop de windbelasting werkt. Op de secundaire as wordt de inlegdiepte van het spouwanker gegeven, bovenste horizontale as.

De doorgetrokken lijnen geven de  $F_{spd}$  (windbelasting per spouwanker) per norm weer en de gestippelde lijnen geven  $F_{d,max}$  (maximaal opneembare belasting) weer.

Uit de drie grafieken kan geconcludeerd worden dat de spouwankers met haak de windbelasting kunnen opnemen en dus genoeg capaciteit hebben, omdat de stippellijn boven de doorgetrokken lijn ligt. De rechte spouwankers zullen bij geen van de geplote inlegdiepte voldoen, volgens deze berekening. Daarnaast is een minimum van vijf spouwankers per vierkante meter nodig, bij de spouwankers met haak.

- Minimum aantal spouwankers per vierkante meter

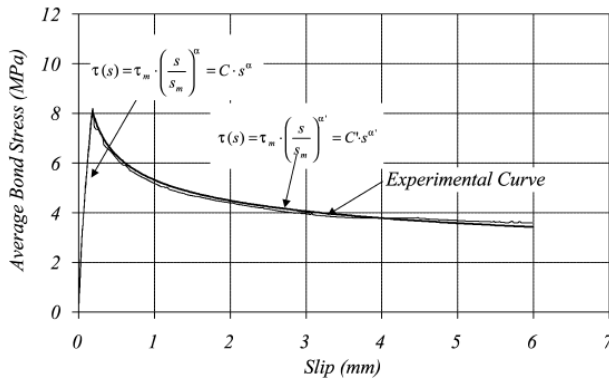
Diameter Ø4; spouwbreedte 150mm



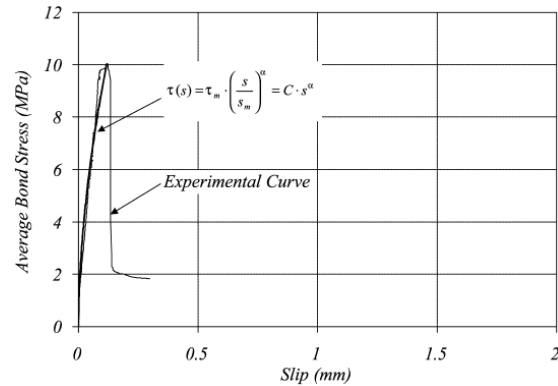


**Bijlage 6 Samenvatting van Beton-Epoxy-Staal onderzoek [LOR02]**

Door Lorenzo et al. [LOR02] zijn proeven uitgevoerd voor het bepalen van de hechtsterkte tussen staal-epoxy en epoxy-beton. In *Figuur 118a* en *120b* zijn de resultaten weergegeven van de proef die uitgevoerd is voor de hechtsterkte tussen staal en epoxy.



*Figuur 118a: Slip-stress grafiek dikke voeg.*



*Figuur 120b: Slip-stress grafiek dunne voeg.*

Uit deze grafieken kan geconcludeerd worden dat het bezwijken oppervlak significante sporen van mortel achterlaat maar geen beton aggregaten achter bleven op het blok. Daarnaast kan worden afgelezen dat dit een oppervlakte breuk is en geen cohesie/schuif bezwijken in het beton of vulmateriaal is. De piek in de grafiek komt door het verliezen van de adhesie tussen het epoxy en beton, wat veroorzaakt is door de frictie tussen de twee materialen.

Het object met de dunste voeg, bezwijkt op splitten tussen de twee materialen. Het bezwijken is waarschijnlijk gekomen door inwendige scheuren (waarschijnlijk onder een hoek van 45 graden) in de epoxy op de plaatst waar getrokken wordt.

De formules die uit de grafiek kunnen worden afgeleid zijn:

Gemiddelde hechtsterkte (epoxy-beton oppervlak):

$$\tau_{av1u} = \frac{P_{max}}{3d_g l_b}$$

Gemiddelde hechtsterkte (staal-epoxy):

$$\tau_{av1u} = \frac{P_{max}}{\pi d_b l_b}$$

Waarin  $P_{max}$  de werkende kracht is,  $d_b$  de diameter van de staaf is en  $l_b$  de inlegdiepte van de staaf.

De hechting–slip relatie tussen staal en epoxy is opgebouwd aan de hand van [ELI83]:

$$\tau(s) = \tau_m \left(\frac{s}{s_m}\right)^\alpha = C s^\alpha \quad 0 \leq s \leq s_m$$

Bezwijken tussen epoxy en beton:

$$\tau(s) = \tau_m \left(\frac{s}{s_m}\right)^{\alpha'} = C s^{\alpha'} \quad s \geq s_m$$

Voor de aanhechting spanningen en krachten heeft Lorenzo de volgende vergelijkingen opgesteld, de plaats van de optredende spanningen is te zien in *Figuur 119*:

De differentiaal vergelijking voor aanhechtsterkte is

$$\text{gelijk aan: } \frac{d^2s}{dx^2} - \chi \tau(s(x)) = 0$$

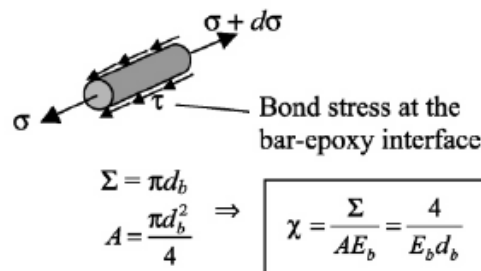
Hechting tussen staal en epoxy:

$$\chi = \frac{\Sigma}{AE} \quad \Sigma = \pi d_b$$

$$A = \frac{\pi d_b^2}{4} \quad \chi = \frac{4}{E_b d_b}$$

Hechting tussen epoxy en beton:

$$\chi = \frac{3d_g}{E_e A_{om}} = \frac{3k}{d_b E_e (k^2 + (n-1)\frac{\pi}{4})}$$



Spanningen:

$$\sum A_\tau(s) = AA_\sigma \quad \forall \sigma, s$$

Als de staaf en epoxy lineair gedragen:

$$A_\sigma(\sigma) = \frac{\sigma^2}{2E} \quad \forall \sigma$$

$$A_\tau(s) = \int_{ste}^s \tau(s) ds \quad \forall s$$

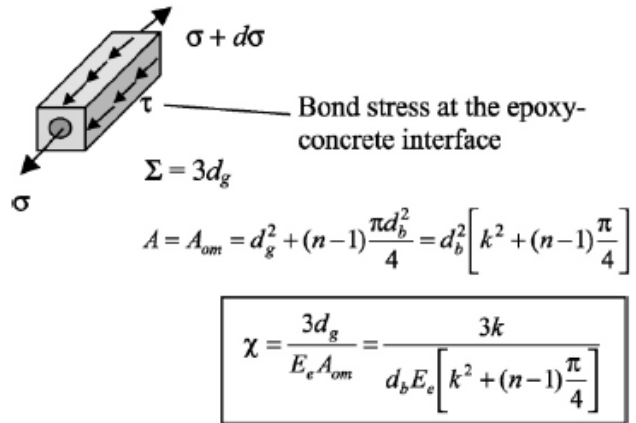
De Normaalspanning reagerend op de staaf is:

$$\sigma(s) = \sqrt{2E \frac{\sum}{A} A_\tau(s)}$$

De maximale spanning die de voeg kan opnemen:

$$\sigma_{max} = \sqrt{2E \frac{\sum}{A} A_{\tau,max}}$$

waarin:  $A_{\tau,max} = \int_0^\infty \tau(s) ds$



*Figuur 119: Plaats van de optredende spanningen en de daarbij behorende formules.*

Numeriek kunnen de maximale waarden bepaald worden aan de hand van de volgende formules:

$$\frac{d^2 s}{dx^2} - \chi \tau(s(x)) = 0 \quad \text{en boundary conditions:} \quad s(0) = 0 \quad \text{en} \quad \frac{ds}{dx} \Big|_{x=0} = \epsilon_b(0) = 0$$

Uitwerken van bovenstaande formule kan de maximale trekkracht gevonden voor:

Staal-epoxy:  $P_1 = \frac{\pi d_b^2}{4} \sqrt{\frac{8E_b \tau_m s_m}{d_b (1+\alpha)}}$

Epoxy-beton:  $P_1 = \sqrt{6E_e d_g A_{om} \frac{\tau_m s_m}{1+\alpha}}$

Inlegdiepte:  $l_m = \sqrt{\frac{2s_m (1+\alpha)}{\chi \tau_m (1-\alpha)^2}}$

**Voor het ontwerpen van de inlegdiepte van de wapening in epoxy kan de volgende formule gebruikt worden:**

Inlegdiepte:  $l_{an,s} = l_m \left( \frac{P_s}{P_1} \right)^{(1-\alpha)/(1+\alpha)} \quad P_s \leq P_1$

**Bijlage 7 Uitwerkingen drukkracht op spouwanker**

Bij een spouwanker in een spouwmuur treedt niet alleen een normaalkracht op in het spouwanker, maar ook buiging. Zowel de normaalkracht als de buiging moet het spouwanker kunnen weerstaan en de optredende spanning moeten lager blijven dan de vloeispanning van het materiaal.

$$\frac{F_{d,max}}{A} + \frac{M}{W} \leq \sigma_s \quad \text{Waarin } F_{d,max} \text{ de drukcapaciteit van het spouwanker is.}$$

Doordat het spouwanker niet centrisch, maar excentrisch wordt belast, moet het optreden van het tweede orde effect meegenomen worden, wat resulteert in:

$$\frac{F_{d,max}}{A} + \frac{n_s}{n_s-1} \cdot \frac{F_{d,max}e}{W} \leq \sigma \text{ met } n_s = \frac{F_E}{F_{d,max}}$$

Formule 2.30 is bijna gelijk aan de toetsing uit de NPR 9096-1 [5] en SBR [10] (zie Tabel 1), alleen daar wordt de windbelasting op de gevel meegenomen in de vergrotingsfactor in plaats van  $F_{d,max}$ . In formule 2.30 zit de kniksterkte van het spouwanker verwerkt. In de staaf treden normaalspanningen op die de kniksterkte  $\sigma_k$  worden genoemd. Wordt deze ingevuld in de Eulerse knikkraft wordt de volgende knikspanning gevonden [JAN12]:

$$\sigma_k = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

Waarin  $\lambda$  de slankheid van het constructieonderdeel (de spouwbreedte) is en  $E$  de elasticiteitsmodulus van het spouwanker is.

De formules voor de Eulerse knikkraft en -spanning zijn opgesteld met de formules voor elasticiteit. In deze formules is de relatie van het lineair verband van de wet van Hooke terug te vinden. De wet van Hooke is slechts geldig tot de proportionaliteitsgrens ( $\sigma_p$ ). Dus is de Eulerse knikkraft alleen geldig bij spanningen kleiner dan deze grens. Dat resulteert in een grenswaarde voor de slankheid van het spouwanker die berekend kan worden met de volgende formules:

$$\sigma_k \leq \sigma_p \quad \rightarrow \quad \lambda \geq \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_p}}$$

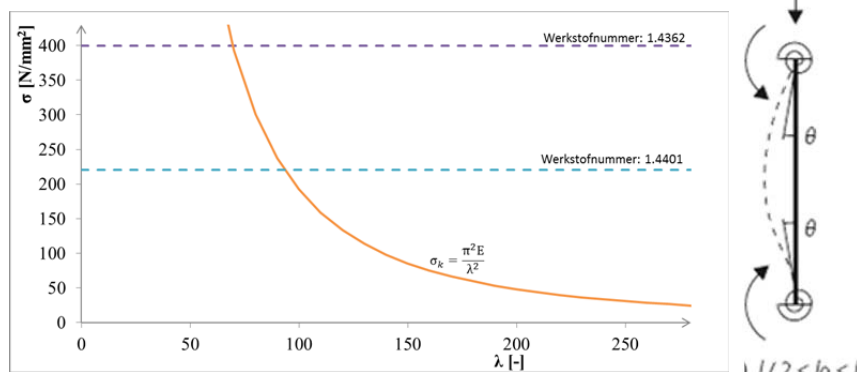
Is de slankheid kleiner dan  $\lambda$  dan moet de berekening gemaakt worden volgens Von Tetmajer, als de spanningen niet boven de vloeigrens van het materiaal uitkomen. De formules die Von Tetmajer heeft opgesteld, zijn materiaalafhankelijk en gebaseerd op door hem uitgevoerde proeven. De formules waarmee de knikberekening gemaakt kan worden, zijn:

$$F_e = A\alpha(1 - \beta\lambda + \gamma\lambda^2)$$

Waarin  $\alpha, \beta$  en  $\gamma$  materiaaleigenschappen zijn waarvoor de knikberekeningen gemaakt moeten worden.

Voor de eenvoud van de berekeningen wordt de volgende vergelijking aangehouden:  $\sigma_s > \sigma_k$

Vergelijking 2.32 is uitgewerkt in Grafiek 4 voor een RVS spouwanker Ø4 mm en weergeven met de oranje doorgetrokken lijn. De mate van inklemmen van het spouwanker door de mortel is niet bekend, daarom wordt deze verbinding als verende inklemming aangenomen. Naast de knikkraft moet de beginexcentriciteit, waarmee de kracht het spouwanker wordt ingeleid meegenomen, worden en deze wordt gelijk gesteld aan 1 mm. In Grafiek 4 is op de horizontale as de slankheid geven tegen op de verticale as de spanningen in het spouwanker. Naast formule 2.32 zijn ook de vloeispanningen weergegeven van de twee werkstoffnummers van de spouwankers die gebruikt worden in dit afstudeeronderzoek (zie voor gedetailleerdere informatie §3.1). Het werkstoffnummer is een codering voor het materiaal van het spouwanker. Grafiek 4 toont aan dat bij kleine slankheden, dus gedrongen constructies, de vloeispanning maatgevend is terwijl voor grote slankheden de Eulerse knikspanning maatgevend wordt.



Grafiek 36: Knikcurve met maatgevende spanning voor werkstoffnummers 1.4401 en 1.4362. Bij overschrijden van de spanning bezwijkt het spouwanker op knik of gaat vloeien.

**Benodigde aantal spouwankers per vierkante meter geveloppervlak**Aannames:

$$\begin{array}{llll}
 q_{p(z)} = 0,70 \text{ kN/m}^2 & C_{\text{index}} = 0,80 \text{ N/mm}^2 & f_{yd} = 240 \text{ N/mm}^2 & l_k = 166 \text{ mm} \\
 \gamma_{f,q;u} = 1,35 & q_{wd} = 0,56 \text{ kN/m}^2 & E_{sp} = 210.000 \text{ N/mm}^2 & b_{\text{spouw}} = 150 \text{ mm}
 \end{array}$$

Uitgeoefende winddruk op de spouwankers (de drukkracht in het spouwanker;  $F_{sp;d}$ ):

|                  |  |                           |
|------------------|--|---------------------------|
| SBR-publicaties: | $F_{sp;d} = c_a \cdot \gamma_{f,q;u} \cdot C_{\text{index}} \cdot q_{p(z)} \cdot A_{sp}$ |                           |
| NEN 6790         | $F_{sp;d} = c_a \cdot p_{wd} \cdot A_{sp}$   | (alleen bij $C_a$ 2 of 3) |
| NPR 6791         | $F_{sp;d} = 2 \cdot \gamma_{f,q;u} \cdot C_{\text{index}} \cdot p_w \cdot A_{sp}$        | (alleen bij $C_a$ 2)      |

Opneembare drukkracht spouwankers (de capaciteit van het spouwanker;  $F_{d,max}$ ):

|                     |   |                                      |
|---------------------|---|--------------------------------------|
| NPR 9096/SBR/ KNB   | $F_{d,max} = f_s / (1/A_s + n_s / (n_s - 1) e / W_s)$ | (excentriciteit $e = 1 \text{ mm}$ ) |
| NEN 6790            | $F_{d,max} = f_s / (1/A_s + n_s / (n_s - 1) e / W_s)$ | (excentriciteit $e = 2 \text{ mm}$ ) |
| Eurlerse knikkracht | $P_{cr} = \pi^2 EI / l^2$                             |                                      |

In onderstaande grafieken zijn de opneembare drukkracht van een spouwanker ( $F_{d,max}$ ) met twee verschillende diameters en steunfactoren ( $C_a$ ) weergegeven. Op de verticale as is de kracht uitgezet en op de horizontale as is het geveloppervlak per spouwanker weergegeven waarop de windbelasting werkt.

In de grafieken komen de invloed van de spouwbreedte (150 mm en 220 mm), de diameter ( $\emptyset 4$  en  $\emptyset 5$ ) en de steunfactoren ( $C_a=1, 2$  of  $3$ ) naar voren. Hoe groter de spouwbreedte wordt, hoe lager  $F_{d,max}$  wordt. Daarnaast hoe groter de diameter, hoe hoger  $F_{d,max}$  wordt. Twee belangrijke parameters die meegenomen moeten worden in het onderzoek naar het constructieve gedrag van spouwankers. De steunfactor heeft vooral invloed op de kracht die in het spouwanker komt, door de windbelasting die op de gevel komt. Hoe minder stijf het binnenblad is, hoe meer kracht het spouwanker moet kunnen opnemen.

Het minimaal aantal spouwankers verschilt bij het gebruik per norm, elke norm geeft andere waarden voor de optredende windbelasting en capaciteit van het spouwankers. De kruising tussen de doorgetrokken en stippellijn geeft het minimum aan van het aantal spouwankers per vierkante meter. In de grafieken is dat weergegeven met:

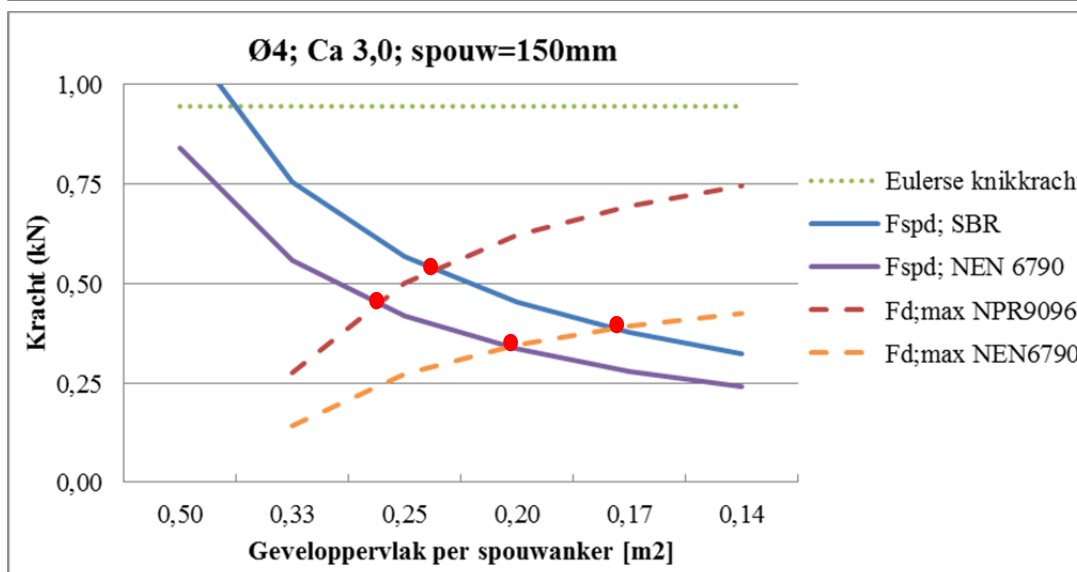
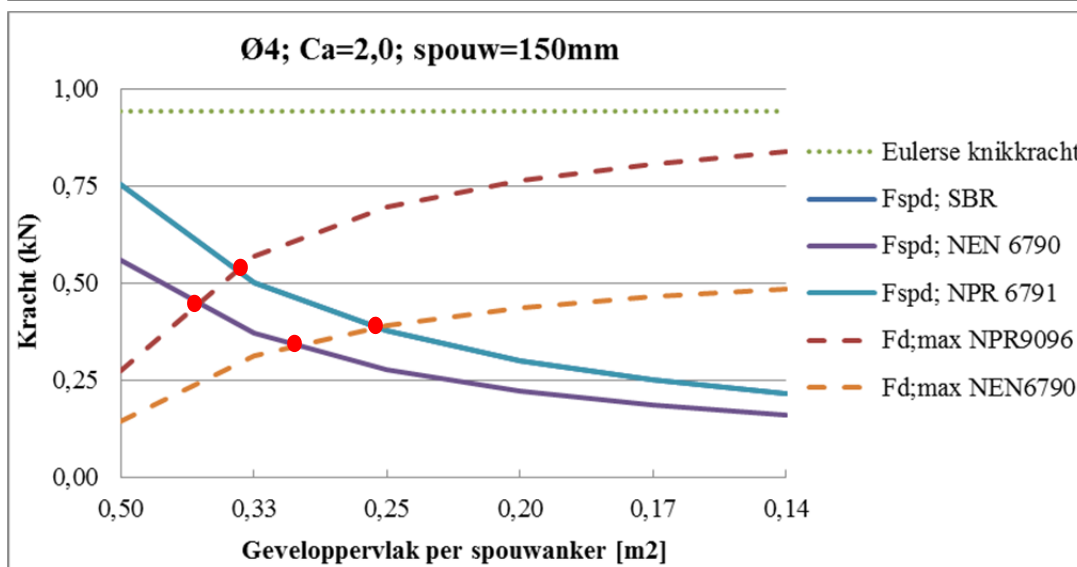
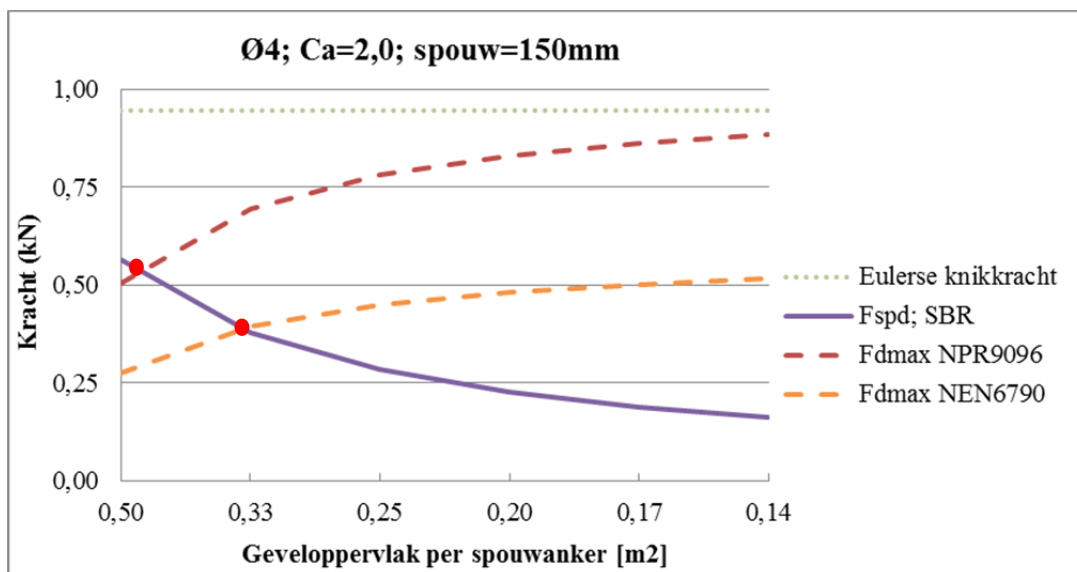
- Minimum aantal spouwankers per vierkante meter

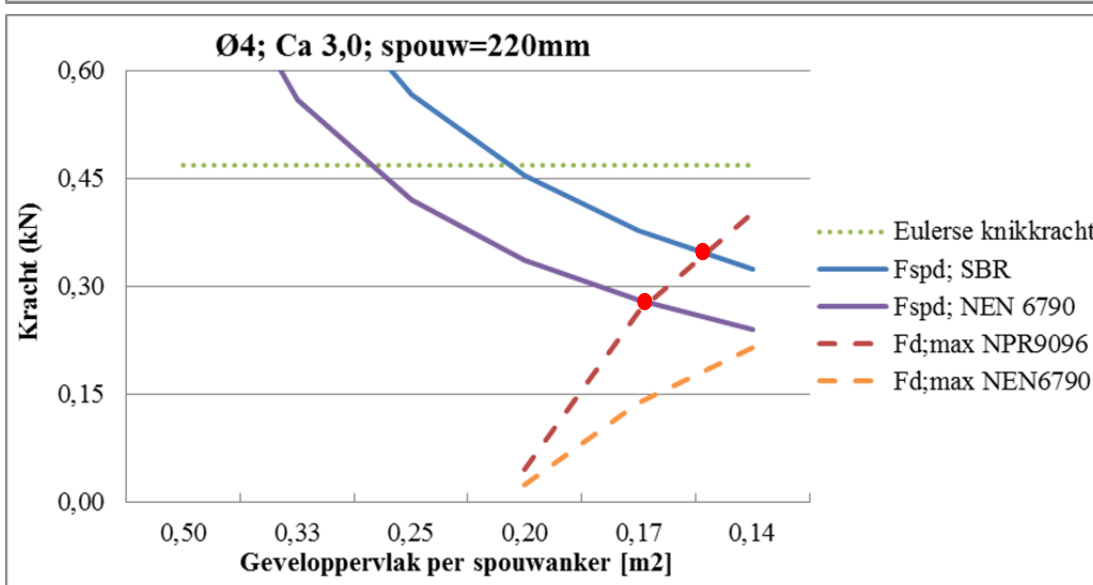
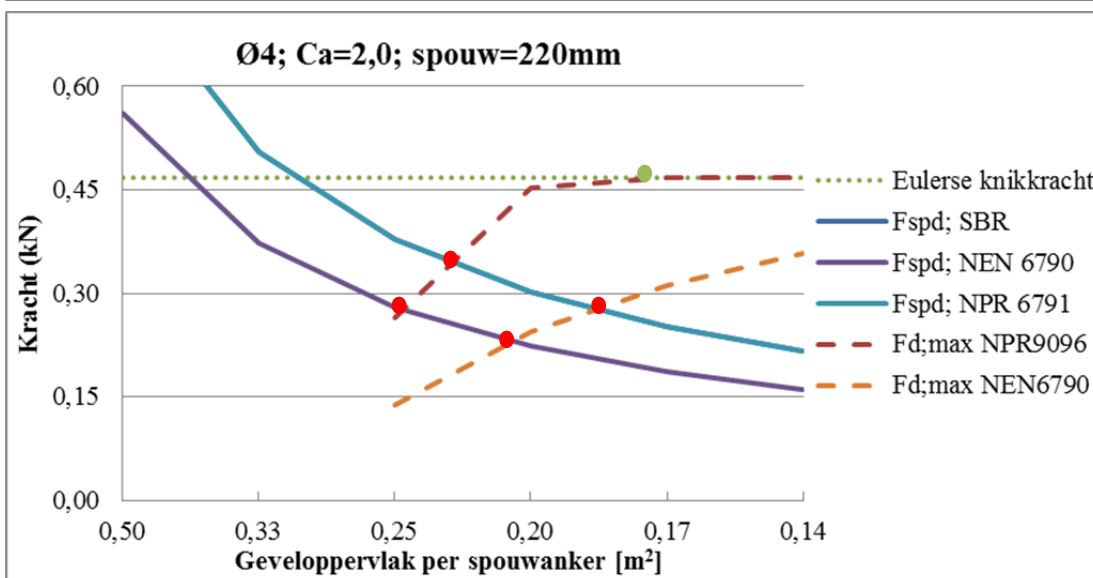
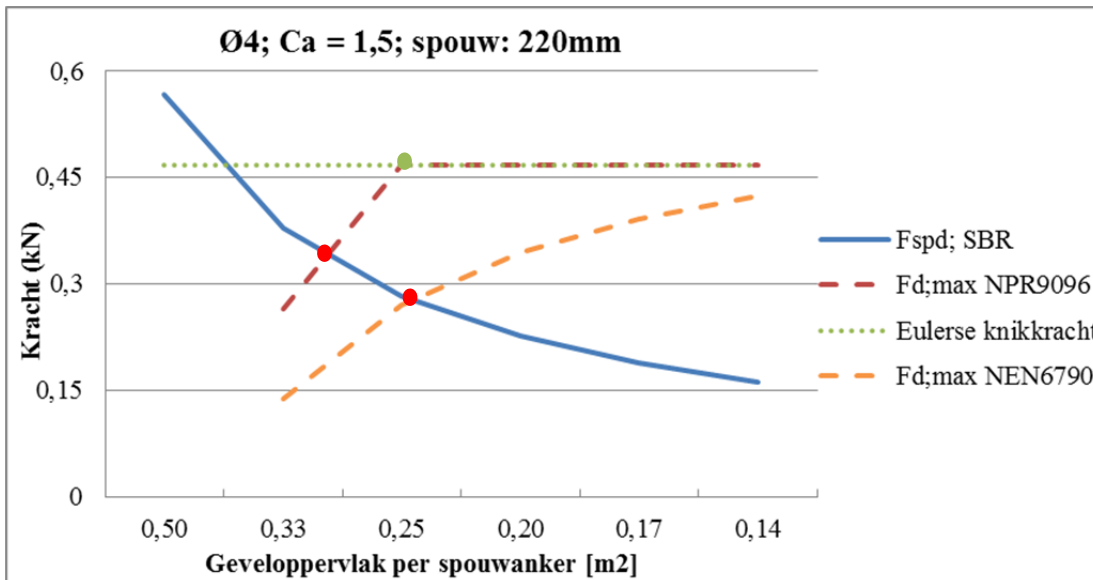
In sommige situaties afhankelijk van de spouwbreedte is de Eulerse knikkracht maatgevend voor de bepaling van de capaciteit van het spouwanker. De Eulerse knikkracht wordt met de gestippelde groene lijn weergegeven en bij een overschrijding van deze lijn zal de Eulerse knikkracht maatgevend zijn. Beginnend bij de spouwbreedte van 220 mm, zoals in onderstaande grafieken te zien is, want de opneembare drukkracht neemt niet meer toe. Dit is aangegeven met:

- De eulerse knikkracht is maatgevend, boven de capaciteit van het spouwanker

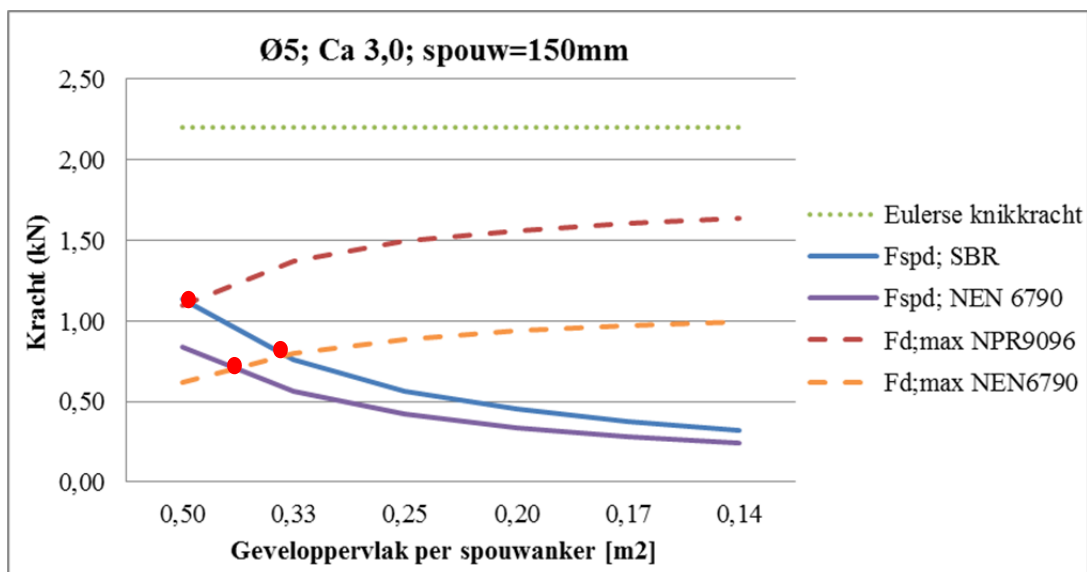
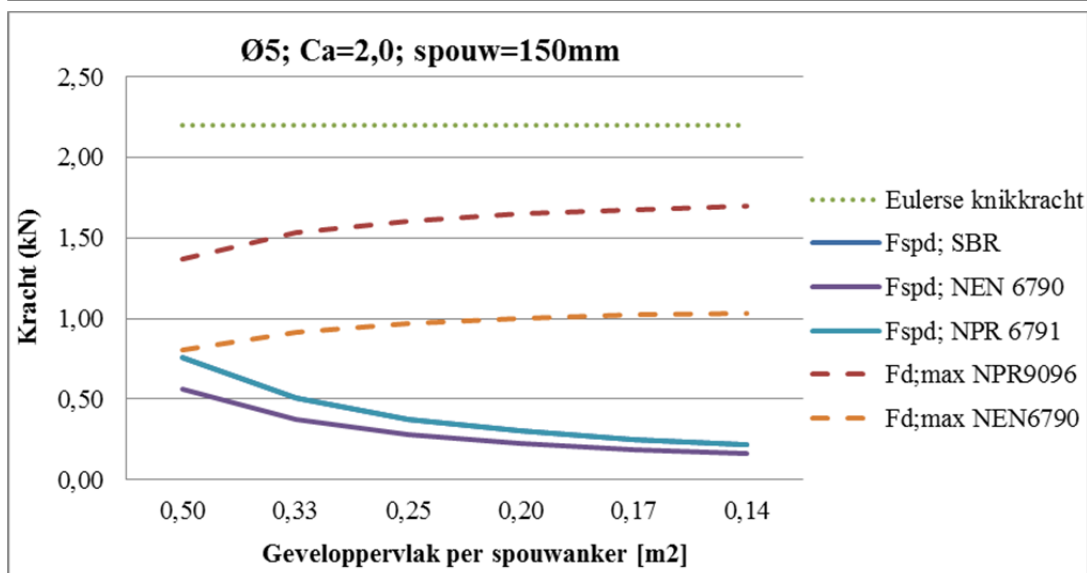
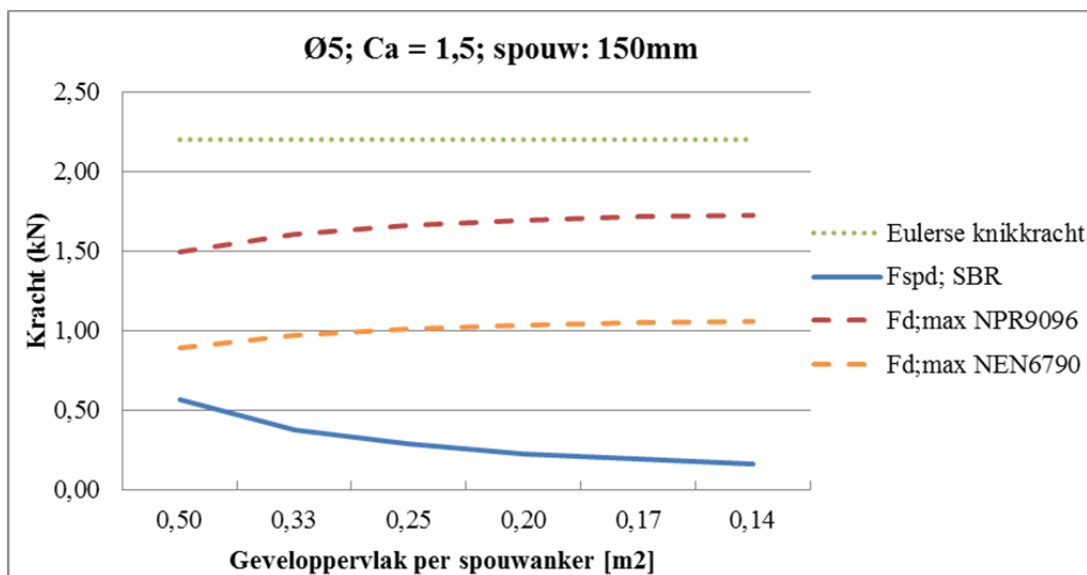
Daarnaast is uit de grafieken te concluderen dat een spouwanker  $\emptyset 5$  mm bij alle drie de verschillende steunfactoren een grotere capaciteit heeft dan de optredende normaal drukkracht in het spouwanker. Bij spouwankers  $\emptyset 4$  mm is dit verschillend.

Diameter Ø4

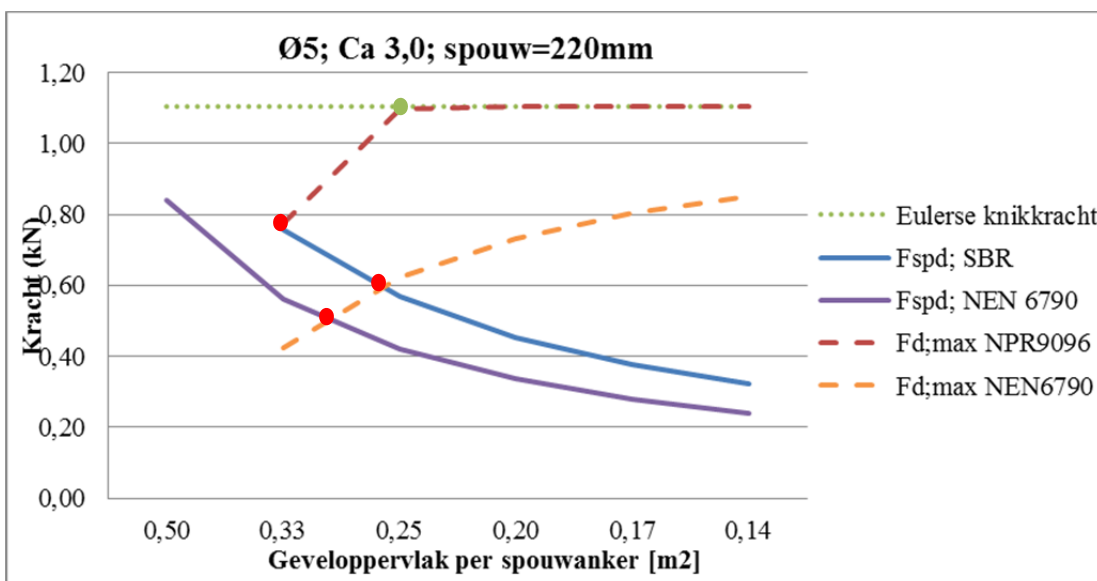
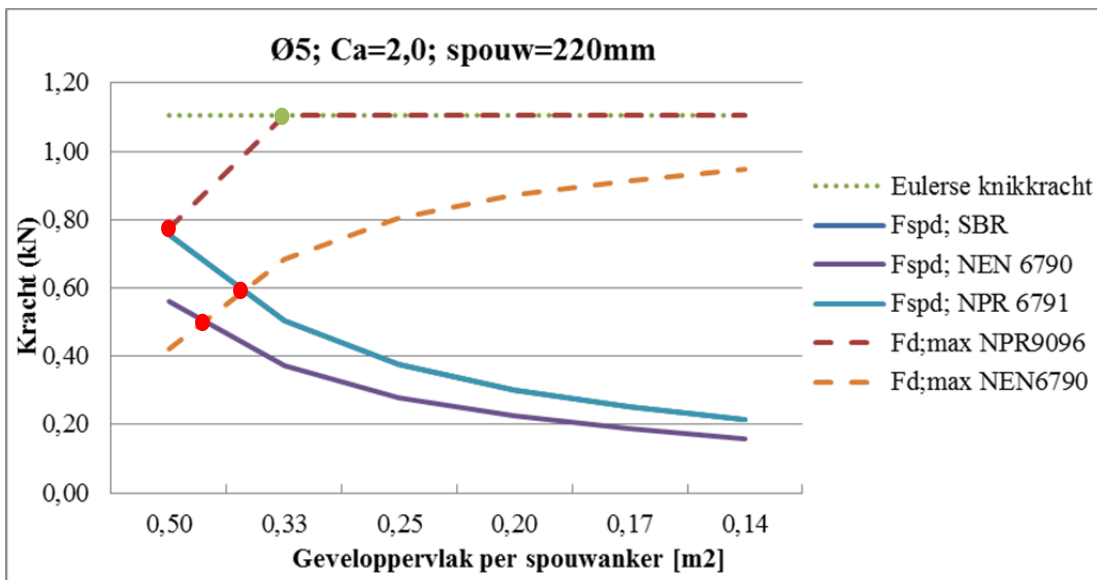
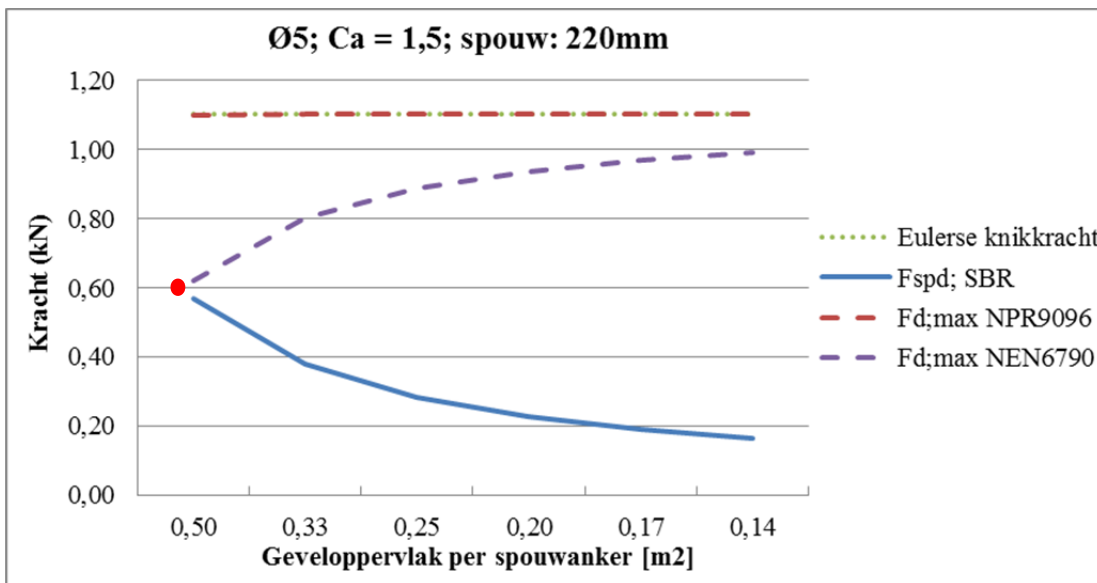




Diameter Ø5



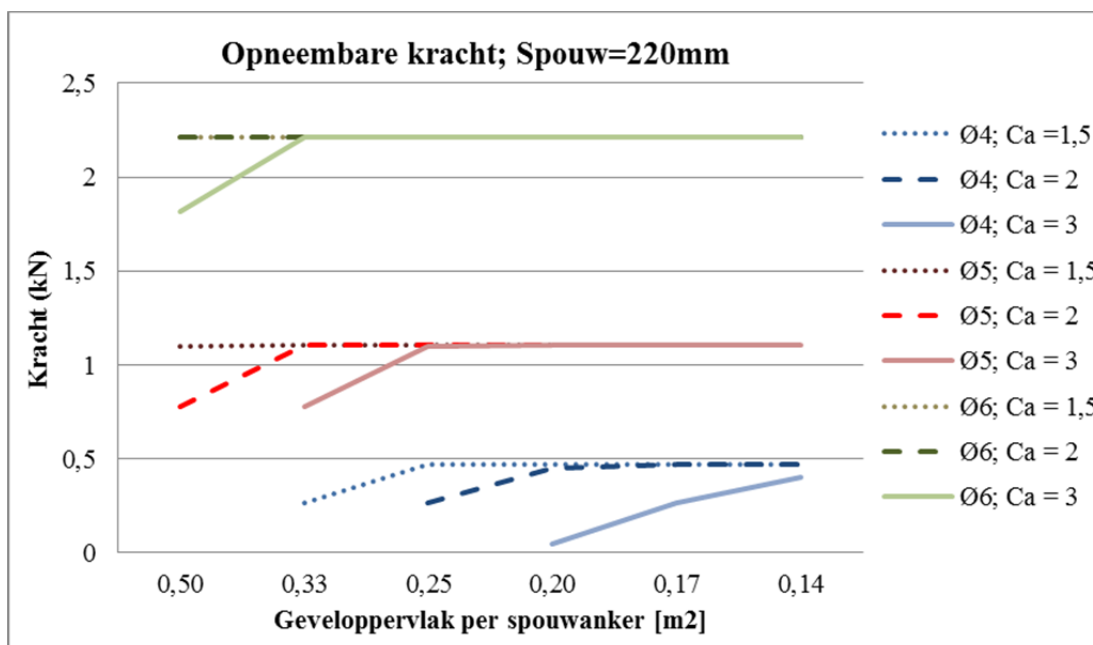
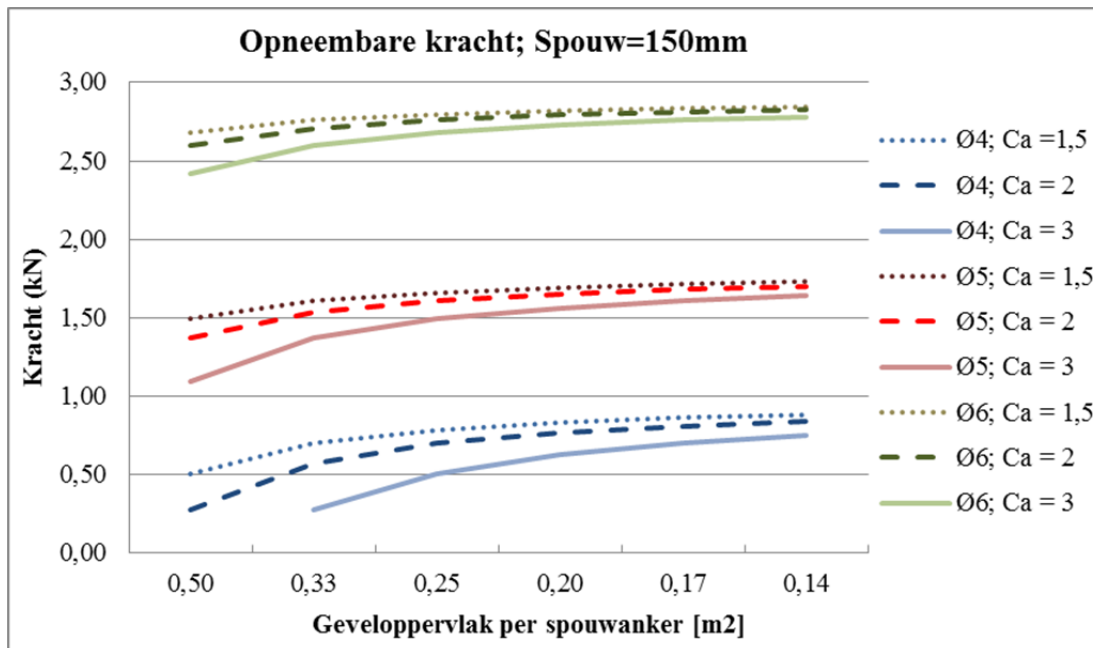




In onderstaande twee grafieken is het verschil in de ondersteuningsfactoren weergegeven. Voor de uitwerking hiervan is de volgende formule gebruikt:  $F_{sp,d} = c_a \cdot \gamma_{f,q,u} \cdot C_{index} \cdot q_{p(z)} \cdot A_{sp}$

De invloed van de achterliggende constructie heeft een grote invloed op de normaalkracht in het spouwanker. Bij een dragend binnenblad ( $C_a=1,5$ ) is deze kracht groter dan bij een niet-dragend binnenblad ( $C_a=2$ ) waardoor het spouwanker een grotere capaciteit nodig heeft.

In de tweede grafiek buigen de lijnen horizontaal af omdat daar de Eulerse knikkraft maatgevend is geworden. Dit is ook gebleken in de hiervoor uitgewerkte grafieken.



### Bijlage 8 Resultaten Proef-Proef

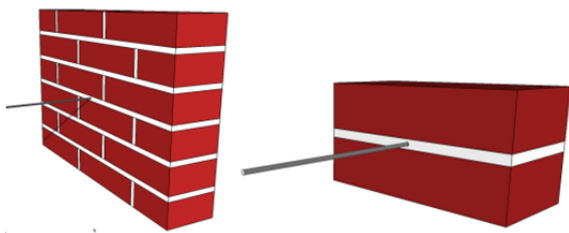
#### Gegevens:

|  |             |                              |
|--|-------------|------------------------------|
| Proefstukken type 1 zijn gemetseld op: | 19 december | 18 dagen uitgehard           |
| Proefstukken type 2 zijn gemetseld op: | 19 december | 19 dagen uitgehard           |
| Proefstuk uit plastic gehaald op:      | 2 januari   | 14 dagen in plastic gedroogd |

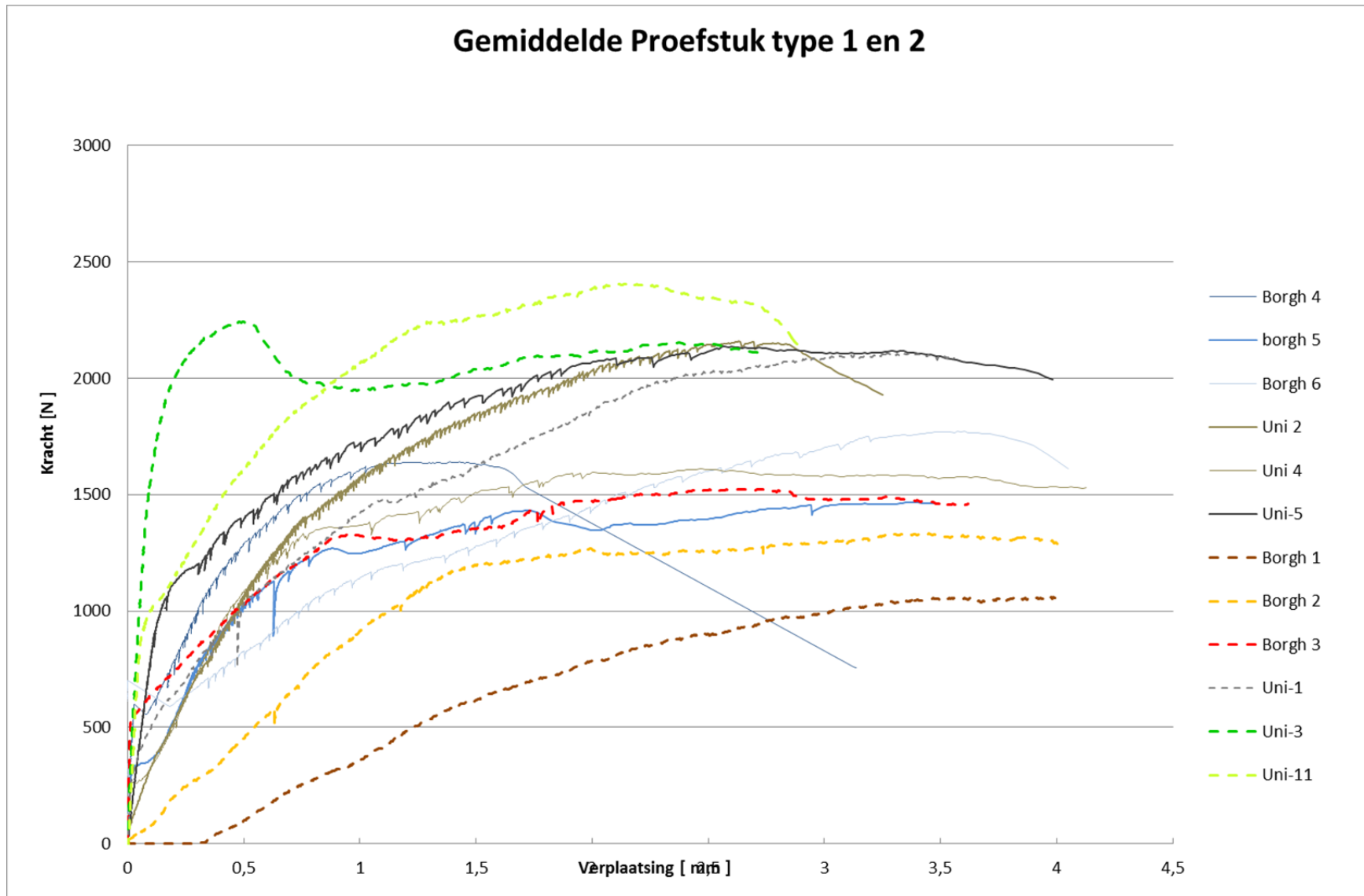
In *Grafiek 37* op de volgende pagina zijn de resultaten van proefstuktype 1 en 2 samengevoegd. Op de verticale as is de verplaatsing van het spouwanker ten opzichte van de steen uitgezet tegen op de horizontale as de trekkracht die uitgeoefend is op het spouwanker. In deze grafiek wordt een verschil gegeven van de proefstuk typen (*Figuur 120*), waarin zowel het UNI275 als het B300 spouwanker verwerkt zijn. De gestippelde lijnen weergeven proefstuk type 1 en de doorgetrokken lijnen proefstuktype 2. Uit de grafiek is af te leiden dat proefstuktype 1 een grotere spreiding heeft in bezwijkkrachten in vergelijking met proefstuktype 2. Daarnaast is te zien dat proefstuktype 2 meer vervormd bij de bezwijkkrachten.

*Grafiek 38* weergeeft de belasting bij één millimeter verplaatsing van het spouwanker ten opzichte van de steen. Deze één millimeter is de maximale verplaatsing die het spouwanker mag hebben bij 1/3 van de bezwijkkracht volgens de adviezen uit EC6. Ook is uit de grafiek af te lezen dat de B300 spouwankers eerder bezwijken dan de UNI275 spouwankers. Dit is zowel bij proefstuktype 1 als bij proefstuktype 2 het geval.

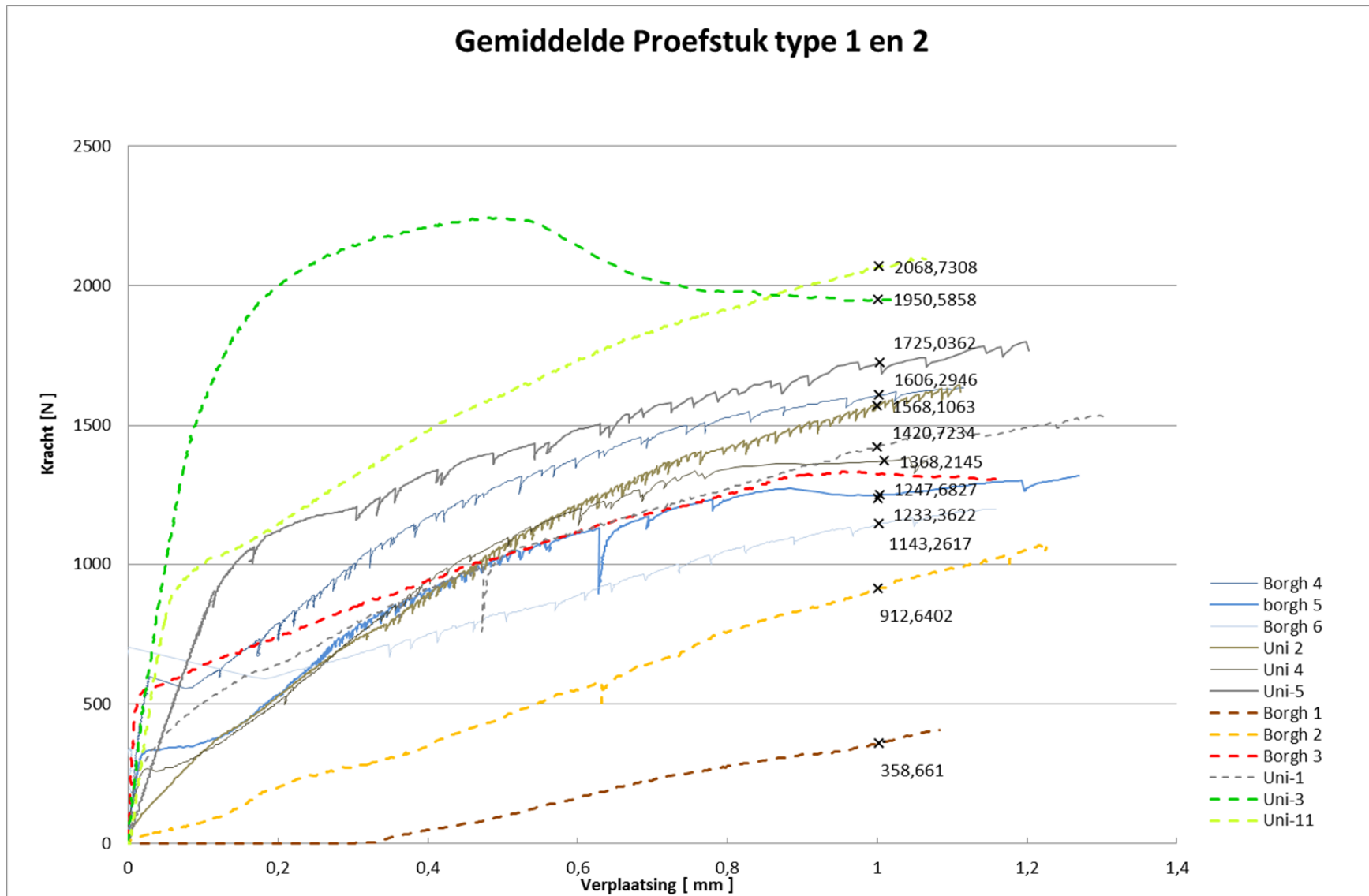
In *Grafiek 39* is een splitsing gemaakt tussen de typen spouwankers en niet de typen proefstukken. De doorgetrokken lijnen weergeven de B300 spouwankers en de stippellijnen weergeven de UNI275 spouwankers. Uit de grafiek is te concluderen dat de UNI275 spouwankers een hogere capaciteit hebben dan de B300 spouwankers, soms wel tot twee keer meer capaciteit.



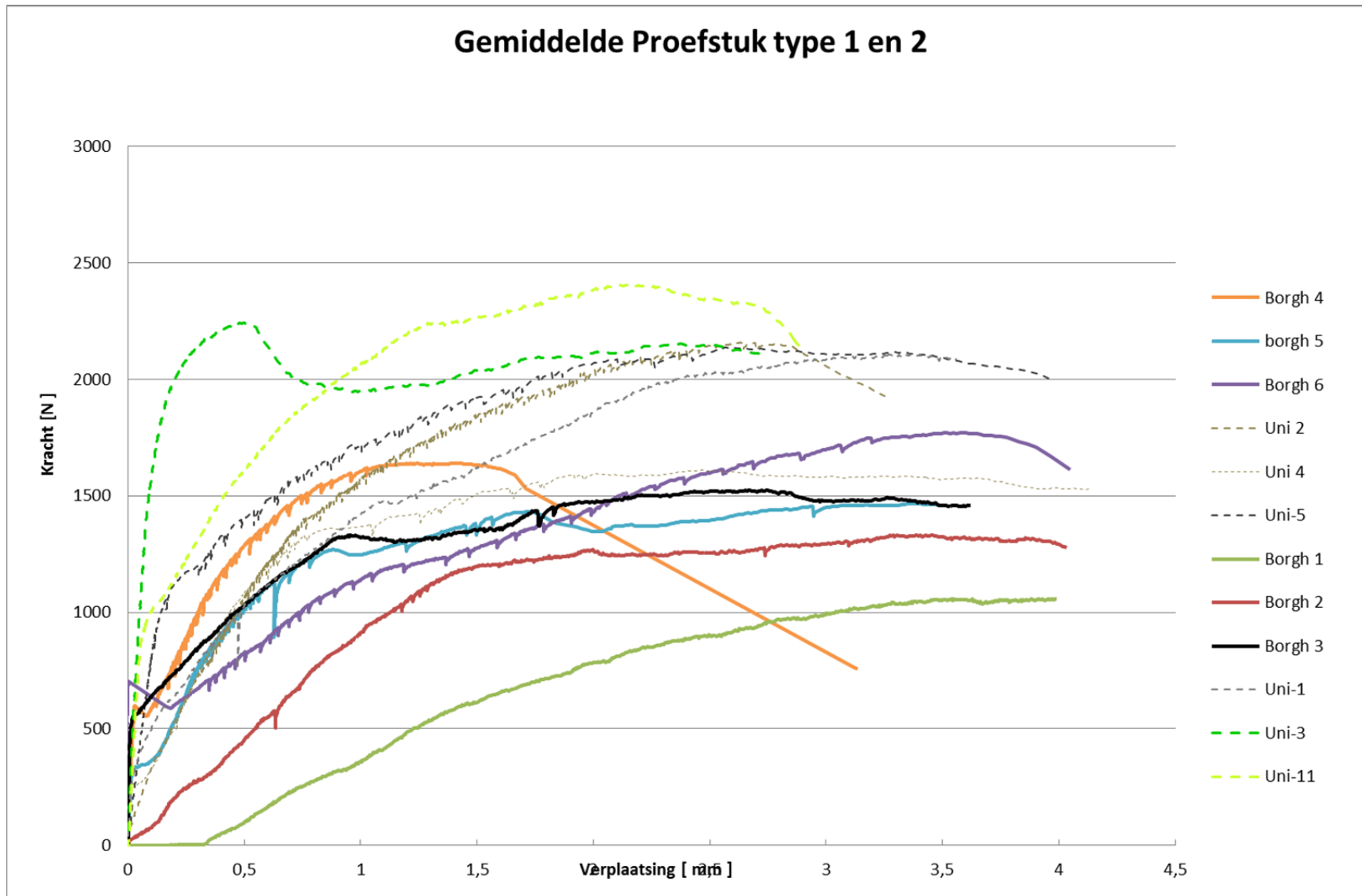
*Figuur 120: Links: Proefstuktype 1; Rechts: Proefstuktype 2.*



Grafiek 37: Samenvoeging van de kracht-verplaatsingsdiagrammen van Proefstuktype 1 en 2.



Grafiek 38: Kracht bij 1mm verplaatsing van het spouwanker.



Grafiek 39: Verschil in Borgh en Uni-slagspouwanker.

Om het verschil tussen de opneembare trekkracht ( $F_{t,max}$ ) van de typen spouwankers en proefstukken te beargumenteren, zijn een aantal parameters onderzocht om te bepalen wat het verschil in opneembare trekkracht ( $F_{t,max}$ ) veroorzaakt. In

Tabel 28 zijn de gemiddelde waarden weergegeven van de analyses die uitgevoerd zijn per spouwanker en per type proefstuk.

Tabel 28: Checklist analyses voor verschil in trekkracht, weergegeven in gemiddelde waargenomen waarden.

| Checklist   | Proefstuktype 1<br>(gemiddelde waarden)  |                   | Proefstuktype 2<br>(gemiddelde waarden)  |                   |
|---|--|-------------------|--|-------------------|
|   | Uni-slagspouwanker   | Borgh             | Uni-slagspouwanker   | Borgh             |
| ☑ Inlegdiepte spouwanker                              | 45.3 mm  | 35.7 mm           | 37.3 mm  | 36.7 mm           |
| ☑ Golven van het spouwanker                           | 5.3 mm   | 5.7 mm            | 5.5 mm   | 5.8 mm            |
| ☑ Staalkwaliteit spouwanker                           | RVS 316  | RVS 1.4362 duplex | RVS 316  | RVS 1.4362 duplex |
| ☑ Inlegplaats spouwanker in de voeg (excentrisch)     | 1.5 mm   | 1.17 mm           | 1.5 mm   | 1.7 mm            |
| ☑ Beginexcentriciteit van het spouwanker na plaatsing | 5.3 mm   | 9.1 mm            | 20.1 mm  | 11.0 mm           |
| ☑ Druksterkte mortel                                  | Buigtreksterkte: 1.96 N/mm <sup>2</sup><br>Druksterkte: 5.84 N/mm <sup>2</sup> |                   | Buigtreksterkte: 1.96 N/mm <sup>2</sup><br>Druksterkte: 5.84 N/mm <sup>2</sup> |                   |
| ☑ Druksterkte stenen en mortel                        | 287,88 kN  |                   | 287,88 kN  |                   |

Uit de tabel kan geconcludeerd worden dat alleen de staalkwaliteit van het spouwanker het verschil in trekkracht ( $F_{t,max}$ ) kan verklaren. Oftewel het spouwanker materiaal bepaald mede de uittrekwaarde van het spouwanker. Om deze reden worden trekproeven op het spouwanker zelf uitgevoerd om het materiaal te verifiëren met de uittrekwaarden volgens de leverancier. Ook wordt geanalyseerd of de oppervlaktebehandeling van de spouwankers gelijk aan elkaar zijn.

Een onderzoek uit Noorwegen [MAD80] toont aan dat de staalkwaliteit invloed heeft op de uittrekcapaciteit van het spouwanker. Hoe hoger de staalkwaliteit, hoe hoger de uittrekwaarde. Dat is de tweede reden, waarom de staalkwaliteit van de spouwankers getest dienen te worden.

Naast de analyse van de opneembare trekkracht ( $F_{t,max}$ ) kunnen een aantal aandachtspunten worden opgesteld waaraan gedacht dient te worden bij het metselen van de nieuwe proefstukken. Deze aandachtspunten zijn:

- Overall gelijke ondersteuning van de spouwankers tijdens en na het metselen om grote verschillen in de beginexcentriciteiten te verkleinen;
- De manier van inmetselen van het spouwanker. De golven van het spouwanker dienen horizontaal te lopen, de veroorzaakt minder spanningen in de mortel;
- De inlegdiepte van het spouwanker dient 40 mm te zijn (minimum eis uit NEN-EN 845) en bij het metselen moet deze waarde gecontroleerd worden.

In de hiervoor besproken grafieken is het verschil in uittrekwaarde van het spouwanker gemetseld in proefstuktype 1 of 2 niet te zien. Het type proefstuk heeft dus geen invloed op de uittrekwaarde van het spouwanker, maar de staalkwaliteit wel. Daarnaast zijn de bezwijkmechanismen van de spouwankers bij beide proefstuktypes gelijk aan elkaar en is er geen verschil tussen proefstuktype 1 en 2. Om een statistisch te kunnen aan tonen dat tussen proefstuktype 1 en 2 geen verschil bestaat voor de uittrekwaarde van het spouwanker wordt een regressieanalyse uitgevoerd.

#### Meervoudige lineaire regressieanalyse:

Bij meer dan een variabele, wordt bij een meervoudige lineaire regressie analyse de volgende formule gebruikt:

$$Y_k = \beta_0 + \beta_1 x_{1k} + \dots + \beta_m x_{mk} + \sigma U_k \text{ voor } k = 1, \dots, n \text{ en waarin de } U_k \text{ onderling onafhankelijk zijn en alle } N(0,1)\text{-verdeeld.}$$

Bij het invullen van de formule wordt met behulp van de kleinste kwadratenmethode de parameters (in dit geval  $\beta_i$ ) bepaald.

Verschillende waarde:  $x_{11}, \dots, x_{1n}, \dots, x_{m1}, \dots, x_{mn}$ ,

Verklarende variabelen:  $x_1, \dots, x_m$

Stochastische variabelen (onderling onafhankelijk):  $Y_1, \dots, Y_n$

De formule voor de meervoudige lineaire regressieanalyse worden de verschillende waarden van de verklarende variabelen de waarden  $y_1, \dots, y_n$  van de bijbehorende stochastische variabelen bepaald.



**Ingevoerde waarden:**

Tabel 29: De ingevoerde gegevens in de regressieanalyse en legenda voor deze regressieformule.

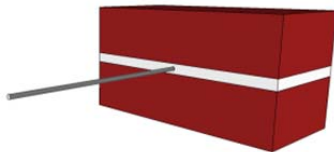
|     | Variabele $x_1$<br>Type spouwanker | Variabele $x_2$<br>Type proefstuk | $y$<br>Uittrekwaarde |
|-----|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 1.  | 1                                  | 12                                | 2109.6042            |
| 2.  | 1                                  | 12                                | 2243.2632            |
| 3.  | 1                                  | 12                                | 2408.5469            |
| 4.  | 0                                  | 12                                | 1121.5676            |
| 5.  | 0                                  | 12                                | 1332.1146            |
| 6.  | 0                                  | 12                                | 1525.4428            |
| 7.  | 1                                  | 11                                | 2160.6213            |
| 8.  | 1                                  | 11                                | 1609.2780            |
| 9.  | 1                                  | 11                                | 2136.7536            |
| 10. | 0                                  | 11                                | 1640.6044            |
| 11. | 0                                  | 11                                | 1466.9670            |
| 12. | 0                                  | 11                                | 1771.5783            |

| Legenda |                                  |
|---------|----------------------------------|
| $x_1$   | Spouwanker type                  |
| 1       | Uni-slagspouwanker               |
| 0       | Combifix Spouwanker (borgh)      |
| $x_2$   | Proefstuktype                    |
| 11      | Proefstuktype 2 (twee bakstenen) |
| 12      | Proefstuktype 1 (16 bakstenen)   |

De formule die hieruit volgt is:  $y = 634.96x_1 - 7.54x_2 + 1563.13$

Uit deze formule kan geconcludeerd worden dat het proefstuktype een zeer kleine invloed heeft in vergelijking met het spouwanker type. Daarnaast heeft proefstuktype 2 als voordeel dat minder bakstenen benodigd zijn. Tevens kunnen de proeven met proefstuktype 2 door één persoon worden uitgevoerd vanwege het lage gewicht en kleine afmeting van het proefstuk. Om deze redenen wordt gekozen om de proeven uit te voeren met een proefstuktype 2 en dus twee bakstenen en het spouwanker.



Figuur 121: Proefstuktype 2 die gebruikt wordt in het experimentele onderzoek voor het afstudeerproject.

**Bijlage 9 Analyse spouwankers voor beproeven**

In de onderstaande tabellen zijn de gegevens weergegeven van de gemeten waarden van de spouwankers. In de tabellen voor de spouwankers die belast zijn op trek, is de afname van de diameter te zien na het beproeven. Dit duidt erop dat de spouwankers tijdens de proef zijn gaan vloeien. Na controle van de materiaaleigenschappen blijkt dit te kloppen, omdat de spanningen in het spouwanker groter waren dan de vloeispanningen.

**UNI 250 spouwanker**

|                   | nummer | lengte | lengte met schroefdraad | diameter | golf hoogte | golf lengte | draad lengte | schroefdraad-lengte |
|-------------------|--------|--------|-------------------------|----------|-------------|-------------|--------------|---------------------|
| <b>Gemiddelde</b> |        | 250    | 219                     | 3,88     | 5,14        | 55          | 35           | 15,8                |
| <b>M5-druk</b>    |        |        |                         |          |             |             |              |                     |
| <b>1</b>          | 1      | 251    | 219                     | 3,88     | 5,16        | 53          | 35           | 18                  |
| <b>2</b>          | 2      | 251    | 218                     | 3,9      | 5,06        | 52          | 35           | 15                  |
| <b>3</b>          | 3      | 250    | 219                     | 3,87     | 5,12        | 52          | 35           | 16                  |
| <b>4</b>          | 4      | 249    | 219                     | 3,89     | 5,03        | 56          | 35           | 16                  |
| <b>5</b>          | 5      | 250    | 217                     | 3,91     | 5,16        | 57          | 35           | 16                  |
| <b>6</b>          | 6      | 250    | 222                     | 3,8      | 5,07        | 52          | 35           | 16                  |
| <b>7</b>          | 7      | 251    | 218                     | 3,88     | 5,14        | 57          | 35           | 14                  |
| <b>8</b>          | 8      | 250    | 218                     | 3,88     | 5,13        | 55          | 35           | 16                  |
| <b>9</b>          | 9      | 250    | 218                     | 3,88     | 5,17        | 54          | 35           | 14                  |
| <b>10</b>         | 10     | 250    | 222                     | 3,8      | 5,1         | 54          | 35           | 18                  |
| <b>11</b>         | 11     | 250    | 218                     | 3,87     | 5,19        | 56          | 35           | 17                  |
| <b>12</b>         | 12     | 251    | 221                     | 3,89     | 5,01        | 54          | 35           | 17                  |
| <b>M10-druk</b>   |        |        |                         |          |             |             |              |                     |
| <b>1</b>          | 13     | 250    | 219                     | 3,89     | 5,21        | 56          | 35           | 16                  |
| <b>2</b>          | 14     | 250    | 218                     | 3,87     | 5,07        | 56          | 35           | 16                  |
| <b>3</b>          | 15     | 250    | 217                     | 3,9      | 5,24        | 54          | 36           | 15                  |
| <b>4</b>          | 16     | 250    | 217                     | 3,88     | 5,21        | 53          | 35           | 14                  |
| <b>5</b>          | 17     | 250    | 217                     | 3,89     | 5,21        | 53          | 35           | 15                  |
| <b>6</b>          | 18     | 250    | 219                     | 3,87     | 5,15        | 57          | 35           | 15                  |
| <b>7</b>          | 19     | 250    | 219                     | 3,89     | 5,21        | 53          | 35           | 16                  |
| <b>8</b>          | 20     | 250    | 217                     | 3,89     | 5,25        | 53          | 35           | 15                  |
| <b>9</b>          | 21     | 250    | 218                     | 3,9      | 5,36        | 55          | 35           | 14                  |
| <b>10</b>         | 22     | 250    | 217                     | 3,88     | 5,06        | 54          | 36           | 18                  |
| <b>11</b>         | 23     | 250    | 219                     | 3,88     | 5,13        | 56          | 35           | 15                  |
| <b>12</b>         | 24     | 250    | 218                     | 3,89     | 4,96        | 55          | 35           | 17                  |

**UNI 275 spouwanker**

|                    | nummer | lengte | lengte voor proef | Lengte na proef | diameter voor proef | diameter na proef | golf hoogte | golf lengte | draad lengte | Schroef-draadlengte |
|--------------------|--------|--------|-------------------|-----------------|---------------------|-------------------|-------------|-------------|--------------|---------------------|
| <b>Gemiddelde</b>  |        | 274    | 239               | 240             | 3,88                | 3,87              | 5,37        | 63          | 36           | 16                  |
| <b>Proef-Proef</b> |        |        |                   |                 |                     |                   |             |             |              |                     |
|                    | 1      | 274    | 248               |                 | 3,88                |                   | 5,3         |             |              | 15                  |
|                    | 2      | 275    | 241               |                 | 3,9                 |                   | 5,5         |             |              | 20                  |
|                    | 3      | 277    | 241               |                 | 3,89                |                   | 5,2         |             |              | 17                  |
|                    | 4      | 273    | 238               |                 | 3,89                |                   | 5,5         |             |              | 19                  |
|                    | 5      | 276    | 241               |                 | 3,88                |                   | 5,5         |             |              | 19                  |
|                    | 11     | 274    | 240               |                 | 3,9                 |                   | 5,4         |             |              | 15                  |
| <b>M5-trek</b>     |        |        |                   |                 |                     |                   |             |             |              |                     |
| <b>1</b>           | 6      | 275    | 239               | 240             | 3,9                 | 3,87              | 5,42        | 62          |              | 16                  |
| <b>2</b>           | 7      | 275    | 239               | 238             | 3,9                 | 3,9               | 5,45        | 61          |              | 15                  |

|                 |    |     |     |       |      |      |      |    |    |    |
|-----------------|----|-----|-----|-------|------|------|------|----|----|----|
| 3               | 8  | 275 | 239 | 239   | 3,89 | 3,87 | 5,43 | 62 |    | 17 |
| 4               | 9  | 275 | 240 | 241   | 3,9  | 3,87 | 5,35 | 64 |    | 16 |
| 5               | 10 | 275 | 239 | 239   | 3,89 | 3,88 | 5,39 | 61 |    | 18 |
| 6               | 11 | 274 | 239 | 239   | 3,86 | 3,87 | 5,32 | 62 | 36 | 18 |
| 7               | 12 | 274 | 242 | 242   | 3,88 | 3,89 | 5,51 | 61 | 36 | 19 |
| 8               | 13 | 275 | 240 | 240   | 3,88 | 3,87 | 5,42 | 64 | 35 | 17 |
| 9               | 14 | 274 | 240 | 241   | 3,91 | 3,8  | 5,42 | 61 | 35 | 17 |
| 10              | 15 | 273 | 238 | 238   | 3,91 | 3,88 | 5,42 | 62 | 35 | 18 |
| 11              | 16 | 275 | 240 | 240   | 3,91 | 3,89 | 5,36 | 63 | 36 | 19 |
| 12              | 17 | 274 | 241 | 242   | 3,89 | 3,88 | 5,42 | 63 | 36 | 18 |
| <b>M10-trek</b> |    |     |     |       |      |      |      |    |    |    |
| 1               | 18 | 274 | 238 | 239   | 3,9  | 3,89 | 5,44 | 61 | 35 | 19 |
| 2               | 19 | 275 | 239 | 239,5 | 3,89 | 3,87 | 5,44 | 62 | 36 | 18 |
| 3               | 20 | 273 | 238 | 239   | 3,9  | 3,89 | 5,59 | 64 | 36 | 17 |
| 4               | 21 | 275 | 238 | 239   | 3,86 | 3,86 | 5,42 | 62 | 36 | 17 |
| 5               | 22 | 275 | 241 | 241,5 | 3,89 | 3,88 | 5,42 | 63 | 35 | 17 |
| 6               | 24 | 275 | 241 | 241   | 3,9  | 3,88 | 5,41 | 63 | 37 | 18 |
| 7               | 25 | 273 | 238 | 238   | 3,91 | 3,87 | 5,42 | 64 | 37 | 18 |
| 8               | 26 | 276 | 239 | 240   | 3,9  | 3,89 | 5,38 | 63 | 36 | 17 |
| 9               | 27 | 275 | 241 | 241   | 3,87 | 3,87 | 5,44 | 61 | 36 | 15 |
| 10              | 28 | 275 | 239 | 240   | 3,87 | 3,88 | 5,32 | 62 | 35 | 16 |
| 11              | 29 | 274 | 239 | 240   | 3,87 | 3,87 | 5,35 | 61 | 36 | 14 |
| 12              | 30 | 274 | 241 | 242   | 3,87 | 3,87 | 5,37 | 61 | 37 | 14 |
| <b>M5-druk</b>  |    |     |     |       |      |      |      |    |    |    |
| 1               | 31 | 274 | 240 |       | 3,86 |      | 4,85 | 66 | 35 | 18 |
| 2               | 32 | 273 | 238 |       | 3,85 |      | 5,35 | 61 | 36 | 15 |
| 3               | 33 | 271 | 238 |       | 3,8  |      | 5,3  | 64 | 34 | 16 |
| 4               | 34 | 274 | 239 |       | 3,87 |      | 5,21 | 62 | 35 | 16 |
| 5               | 35 | 275 | 240 |       | 3,88 |      | 5,39 | 64 | 36 | 16 |
| 6               | 36 | 273 | 238 |       | 3,87 |      | 5,27 | 62 | 36 | 18 |
| 7               | 37 | 275 | 239 |       | 3,87 |      | 5,27 | 65 | 35 | 17 |
| 8               | 38 | 274 | 238 |       | 3,85 |      | 5,35 | 61 | 36 | 15 |
| 9               | 39 | 271 | 237 |       | 3,86 |      | 5,3  | 64 | 40 | 16 |
| 10              | 40 | 275 | 239 |       | 3,87 |      | 5,29 | 64 | 35 | 15 |
| 11              | 41 | 274 | 238 |       | 3,88 |      | 5,43 | 63 | 35 | 15 |
| 12              | 42 | 271 | 239 |       | 3,86 |      | 5,37 | 60 | 39 | 18 |
| <b>M10-druk</b> |    |     |     |       |      |      |      |    |    |    |
| 1               | 43 | 273 | 238 |       | 3,86 |      | 5,33 | 63 | 36 | 15 |
| 2               | 44 | 273 | 240 |       | 3,87 |      | 5,42 | 63 | 35 | 15 |
| 3               | 45 | 274 | 240 |       | 3,86 |      | 5,31 | 65 | 36 | 14 |
| 4               | 46 | 274 | 238 |       | 3,87 |      | 5,44 | 66 | 36 | 14 |
| 5               | 47 | 273 | 240 |       | 3,86 |      | 5,42 | 63 | 35 | 16 |
| 6               | 48 | 275 | 241 |       | 3,86 |      | 5,24 | 63 | 35 | 16 |
| 7               | 49 | 274 | 238 |       | 3,88 |      | 5,32 | 64 | 35 | 16 |
| 8               | 50 | 276 | 241 |       | 3,86 |      | 5,4  | 63 | 36 | 15 |
| 9               | 51 | 274 | 238 |       | 3,87 |      | 5,27 | 63 | 36 | 13 |
| 10              | 52 | 274 | 239 |       | 3,87 |      | 5,26 | 62 | 36 | 16 |
| 11              | 53 | 274 | 240 |       | 3,8  |      | 5,27 | 63 | 36 | 15 |
| 12              | 54 | 273 | 239 |       | 3,87 |      | 5,36 | 63 | 33 | 14 |

**UNI 300 spouwanker**

|                   | nummer | lengte | lengte met schroefdraad | diameter | golf hoogte | golf lengte | draad lengte | schroefdraad-lengte |
|-------------------|--------|--------|-------------------------|----------|-------------|-------------|--------------|---------------------|
| <b>Gemiddelde</b> |        | 299    | 265                     | 3,87     | 5,64        | 62          | 37           | 15,2                |
| <b>M5-druk</b>    |        |        |                         |          |             |             |              |                     |
| <b>1</b>          | 1      | 300    | 266                     | 3,84     | 5,49        | 63          | 37           | 14                  |
| <b>2</b>          | 2      | 297    | 262                     | 3,88     | 5,67        | 61          | 37           | 15                  |
| <b>3</b>          | 3      | 299    | 265                     | 3,87     | 5,65        | 52          | 37           | 14                  |
| <b>4</b>          | 4      | 298    | 267                     | 3,86     | 5,66        | 63          | 38           | 16                  |
| <b>5</b>          | 5      | 299    | 263                     | 3,86     | 5,74        | 62          | 37           | 15                  |
| <b>6</b>          | 6      | 298    | 265                     | 3,88     | 5,5         | 60          | 35           | 15                  |
| <b>7</b>          | 7      | 298    | 265                     | 3,88     | 5,41        | 64          | 36           | 15                  |
| <b>8</b>          | 8      | 300    | 265                     | 3,87     | 5,69        | 63          | 38           | 14                  |
| <b>9</b>          | 9      | 299    | 266                     | 3,86     | 5,65        | 63          | 38           | 17                  |
| <b>10</b>         | 10     | 299    | 265                     | 3,86     | 5,63        | 63          | 38           | 16                  |
| <b>11</b>         | 11     | 300    | 266                     | 3,86     | 5,72        | 63          | 38           | 15                  |
| <b>12</b>         | 12     | 299    | 264                     | 3,86     | 5,66        | 62          | 38           | 15                  |
| <b>M10-druk</b>   |        |        |                         |          |             |             |              |                     |
| <b>1</b>          | 13     | 299    | 265                     | 3,88     | 5,54        | 60          | 35           | 16                  |
| <b>2</b>          | 14     | 299    | 267                     | 3,88     | 5,71        | 63          | 37           | 16                  |
| <b>3</b>          | 15     | 297    | 263                     | 3,86     | 5,76        | 62          | 36           | 14                  |
| <b>4</b>          | 16     | 300    | 265                     | 3,86     | 5,7         | 63          | 38           | 14                  |
| <b>5</b>          | 17     | 300    | 267                     | 3,89     | 5,62        | 65          | 38           | 16                  |
| <b>6</b>          | 18     | 298    | 263                     | 3,89     | 5,61        | 63          | 36           | 15                  |
| <b>7</b>          | 19     | 299    | 264                     | 3,86     | 5,64        | 63          | 38           | 16                  |
| <b>8</b>          | 20     | 298    | 265                     | 3,86     | 5,68        | 62          | 37           | 16                  |
| <b>9</b>          | 21     | 300    | 265                     | 3,86     | 5,61        | 63          | 38           | 15                  |
| <b>10</b>         | 22     | 300    | 264                     | 3,88     | 5,68        | 63          | 38           | 15                  |
| <b>11</b>         | 23     | 300    | 265                     | 3,87     | 5,68        | 63          | 38           | 16                  |
| <b>12</b>         | 24     | 299    | 264                     | 3,86     | 5,69        | 63          | 37           | 15                  |

**UNI 350 spouwanker**

|                   | nummer | lengte | lengte met schroefdraad | diameter | golf hoogte | golf lengte | draad lengte | schroefdraad-lengte |
|-------------------|--------|--------|-------------------------|----------|-------------|-------------|--------------|---------------------|
| <b>Gemiddelde</b> |        | 374    | 339                     | 3,87     | 5,70        | 66          | 37           | 16                  |
| <b>M5-druk</b>    |        |        |                         |          |             |             |              |                     |
| <b>1</b>          | 1      | 377    | 340                     | 3,86     | 5,71        | 66          | 38           | 16                  |
| <b>2</b>          | 2      | 377    | 340                     | 3,88     | 5,69        | 66          | 38           | 17                  |
| <b>3</b>          | 3      | 376    | 339                     | 3,88     | 5,71        | 65          | 37           | 17                  |
| <b>4</b>          | 4      | 375    | 338                     | 3,87     | 5,72        | 66          | 38           | 17                  |
| <b>5</b>          | 5      | 370    | 338                     | 3,87     | 5,72        | 65          | 33           | 15                  |
| <b>6</b>          | 6      | 377    | 340                     | 3,87     | 5,7         | 66          | 37           | 16                  |
| <b>7</b>          | 7      | 373    | 338                     | 3,88     | 5,76        | 63          | 37           | 15                  |
| <b>8</b>          | 8      | 371    | 334                     | 3,87     | 5,7         | 65          | 36           | 16                  |
| <b>9</b>          | 9      | 373    | 337                     | 3,87     | 5,63        | 67          | 37           | 16                  |
| <b>10</b>         | 10     | 373    | 338                     | 3,89     | 5,72        | 65          | 37           | 15                  |
| <b>11</b>         | 11     | 374    | 341                     | 3,87     | 5,71        | 67          | 38           | 16                  |
| <b>12</b>         | 12     | 374    | 342                     | 3,87     | 5,71        | 66          | 38           | 17                  |
| <b>M10-druk</b>   |        |        |                         |          |             |             |              |                     |
| <b>1</b>          | 13     | 373    | 340                     | 3,89     | 5,72        | 65          | 37           | 15                  |
| <b>2</b>          | 14     | 375    | 339                     | 3,89     | 5,69        | 66          | 38           | 16                  |
| <b>3</b>          | 15     | 375    | 339                     | 3,8      | 5,59        | 66          | 38           | 17                  |

|    |    |     |     |      |      |    |    |    |
|----|----|-----|-----|------|------|----|----|----|
| 4  | 16 | 373 | 341 | 3,87 | 5,54 | 65 | 38 | 16 |
| 5  | 17 | 371 | 334 | 3,88 | 5,77 | 66 | 34 | 16 |
| 6  | 18 | 375 | 338 | 3,89 | 5,72 | 66 | 38 | 15 |
| 7  | 19 | 373 | 337 | 3,89 | 5,71 | 66 | 37 | 15 |
| 8  | 20 | 375 | 338 | 3,88 | 5,68 | 66 | 38 | 17 |
| 9  | 21 | 373 | 340 | 3,87 | 5,72 | 64 | 37 | 16 |
| 10 | 22 | 374 | 339 | 3,88 | 5,71 | 66 | 38 | 15 |
| 11 | 23 | 374 | 340 | 3,87 | 5,68 | 65 | 38 | 16 |
| 12 | 24 | 376 | 339 | 3,88 | 5,72 | 65 | 38 | 17 |

**UNI Lijm spouwanker**

|                    | nummer | lengte | lengte voor proef | lengte na proef | diameter voor proef | diameter na proef | golf dikte voor proef | golf dikte na proef | golf hoogte | golf lengte | draad lengte | schroef draad-lengte |
|--------------------|--------|--------|-------------------|-----------------|---------------------|-------------------|-----------------------|---------------------|-------------|-------------|--------------|----------------------|
| <b>Gemiddelde</b>  |        | 288    | 268               | 247             | 3,89                | 3,87              | 1,97                  | 1,81                | 8,11        | 84          | 33           | 18                   |
| <b>Proef-Proef</b> |        |        |                   |                 |                     |                   |                       |                     |             |             |              |                      |
|                    | 1      | 252    |                   |                 | 3,94                |                   | 1,96                  |                     | 8,12        | 94          | 32           |                      |
|                    | 2      | 251    |                   |                 | 3,89                |                   | 2,07                  |                     | 7,81        | 94          | 31           |                      |
|                    | 3      | 252    |                   |                 | 3,88                |                   | 2,07                  |                     | 7,8         | 95          | 33           |                      |
|                    | 4      | 252    |                   |                 | 3,88                |                   | 2,07                  |                     | 7,86        | 94          | 32           |                      |
|                    | 5      | 251    |                   |                 | 3,87                |                   | 2,02                  |                     | 8,12        | 93          | 32           |                      |
|                    | 6      | 251    |                   |                 | 3,86                |                   | 1,99                  |                     | 8,49        | 95          | 34           |                      |
|                    | 7      | 251    |                   |                 | 3,89                |                   | 2,03                  |                     | 7,88        | 95          | 32           |                      |
|                    | 8      | 252    |                   |                 | 3,87                |                   | 1,97                  |                     | 8,16        | 95          | 33           |                      |
|                    | 9      | 252    |                   |                 | 3,87                |                   | 2,02                  |                     | 8,05        | 95          | 32           |                      |
| <b>M15-trek</b>    |        |        |                   |                 |                     |                   |                       |                     |             |             |              |                      |
| 1                  | 10     | 301    | 269               | 271             | 3,9                 | 3,88              | 1,93                  | 1,82                | 8,19        | 80          | 36           | 17                   |
| 2                  | 11     | 301    | 268               | 269             | 3,89                | 3,87              | 1,94                  | 1,8                 | 8,28        | 81          | 33           | 17                   |
| 3                  | 12     | 302    | 267               | 269             | 3,88                | 3,88              | 1,98                  | 1,84                | 8,09        | 79          | 33           | 18                   |
| 4                  | 13     | 301    | 267               | 269             | 3,89                | 3,87              | 1,92                  | 1,81                | 8,14        | 80          | 34           | 18                   |
| 5                  | 14     | 304    | 270               | 271             | 3,91                | 3,87              | 1,93                  | 1,79                | 8,1         | 80          | 34           | 17                   |
| 6                  | 15     | 301    | 268               | 268             | 3,89                | 3,87              | 1,96                  | 1,82                | 8,28        | 79          | 32           | 18                   |
| 7                  | 16     | 301    | 266               | 268             | 3,91                | 3,88              | 1,93                  | 1,81                | 8,25        | 78          | 33           | 18                   |
| 8                  | 17     | 302    | 269               | 270             | 3,89                | 3,88              | 1,99                  | 1,81                | 8,14        | 79          | 32           | 18                   |
| 9                  | 18     | 302    | 266               | 268             | 3,88                | 3,87              | 1,98                  | 1,82                | 8,12        | 79          | 33           | 18                   |
| 10                 | 19     | 302    | 267               | 2,68            | 3,88                | 3,87              | 1,97                  | 1,8                 | 8,02        | 79          | 34           | 18                   |
| 11                 | 20     | 301    | 271               | 271             | 3,88                | 3,87              | 1,96                  | 1,83                | 8,12        | 80          | 32           | 18                   |
| 12                 | 21     | 301    | 269               | 270             | 3,91                | 3,88              | 1,94                  | 1,82                | 8,29        | 80          | 32           | 19                   |
| <b>M15-druk</b>    |        |        |                   |                 |                     |                   |                       |                     |             |             |              |                      |
| 1                  | 22     | 302    | 270               |                 | 3,89                |                   | 1,99                  |                     | 8,17        | 80          | 34           | 18                   |
| 2                  | 23     | 302    | 271               |                 | 3,89                |                   | 1,98                  |                     | 8,2         | 79          | 33           | 17                   |
| 3                  | 24     | 302    | 266               |                 | 3,89                |                   | 1,98                  |                     | 8,08        | 81          | 33           | 18                   |
| 4                  | 25     | 301    | 268               |                 | 3,88                |                   | 1,93                  |                     | 8,27        | 79          | 33           | 19                   |
| 5                  | 26     | 301    | 267               |                 | 3,88                |                   | 1,94                  |                     | 8,22        | 80          | 33           | 17                   |
| 6                  | 27     | 302    | 266               |                 | 3,88                |                   | 1,94                  |                     | 7,97        | 79          | 33           | 17                   |
| 7                  | 28     | 302    | 267               |                 | 3,91                |                   | 1,95                  |                     | 7,95        | 79          | 31           | 19                   |
| 8                  | 29     | 302    | 267               |                 | 3,88                |                   | 1,9                   |                     | 8,1         | 79          | 34           | 16                   |
| 9                  | 30     | 301    | 266               |                 | 3,88                |                   | 1,92                  |                     | 8,15        | 80          | 34           | 17                   |
| 10                 | 31     | 301    | 266               |                 | 3,89                |                   | 2                     |                     | 8,05        | 81          | 33           | 17                   |
| 11                 | 32     | 301    | 265               |                 | 3,88                |                   | 1,98                  |                     | 8,2         | 78          | 32           | 17                   |
| 12                 | 33     | 303    | 268               |                 | 3,88                |                   | 1,95                  |                     | 8,1         | 83          | 34           | 18                   |

**UNI L spouwanker**

|                    | nummer | lengte | lengte voor proef | lengte na proef | diameter voor proef | Diameter na proef | golf lengte | Haak lengte | schroefdraadlengte |                               |
|--------------------|--------|--------|-------------------|-----------------|---------------------|-------------------|-------------|-------------|--------------------|-------------------------------|
| <b>Gemiddelde</b>  |        | 270    | 188               | 192             | 3,87                | 3,78              | 87          | 26          | 18                 |                               |
| <b>Proef-Proef</b> |        |        |                   |                 |                     |                   |             |             |                    |                               |
|                    | 1      | 277    |                   |                 | 3,88                |                   | 88          | 26          |                    |                               |
|                    | 2      | 277    |                   |                 | 3,92                |                   | 87          | 25          |                    |                               |
|                    | 3      | 278    |                   |                 | 3,89                |                   | 86          | 26          |                    |                               |
|                    | 4      | 277    |                   |                 | 3,9                 |                   | 87          | 25          |                    |                               |
|                    | 5      | 278    |                   |                 | 3,89                |                   | 88          | 26          |                    |                               |
|                    | 6      | 278    |                   |                 | 3,92                |                   | 87          | 26          |                    |                               |
|                    | 7      | 27     |                   |                 | 3,89                |                   | 87          | 26          |                    |                               |
|                    | 8      | 276    |                   |                 | 3,89                |                   | 89          | 26          |                    |                               |
|                    | 9      | 278    |                   |                 | 3,89                |                   | 87          | 26          |                    |                               |
| <b>M5-trek</b>     |        |        |                   |                 |                     |                   |             |             |                    |                               |
| <b>1</b>           | 10     | 276    | 187               | 201             | 3,85                | 3,79              | 87          | 25          | 17                 |                               |
| <b>2</b>           | 11     | 278    | 188               | 189             | 3,88                | 3,77              | 88          | 26          | 18                 |                               |
| <b>3</b>           | 12     | 277    | 186               | 202             | 3,86                | 3,75              | 87          | 27          | 18                 | Spouwanker is recht getrokken |
| <b>4</b>           | 13     | 277    | 187               | 189             | 3,87                | 3,82              | 85          | 25          | 17                 |                               |
| <b>5</b>           | 14     | 277    | 187               | 191             | 3,87                | 3,84              | 88          | 26          | 18                 |                               |
| <b>6</b>           | 15     | 277    | 188               | 191             | 3,87                | 3,85              | 88          | 25          | 18                 |                               |
| <b>7</b>           | 16     | 278    | 188               | 190             | 3,81                | 3,72              | 88          | 26          | 18                 |                               |
| <b>8</b>           | 17     | 277    | 186               | 191             | 3,87                | 3,73              | 88          | 26          | 17                 |                               |
| <b>9</b>           | 18     | 278    | 188               | 191             | 3,87                | 3,85              | 88          | 26          | 17                 |                               |
| <b>10</b>          | 19     | 277    | 187               | 189             | 3,87                | 3,83              | 88          | 26          | 19                 |                               |
| <b>11</b>          | 20     | 278    | 187               | 188             | 3,86                | 3,87              | 88          | 26          | 18                 |                               |
| <b>12</b>          | 21     | 277    | 186               |                 | 3,87                | 3,72              | 87          | 26          | 18                 |                               |
| <b>M10-trek</b>    |        |        |                   |                 |                     |                   |             |             |                    |                               |
| <b>1</b>           | 22     | 277    | 190               | 191             | 3,88                | 3,79              | 88          | 26          | 17                 |                               |
| <b>2</b>           | 23     | 278    | 186               | 194             | 3,87                | 3,8               | 88          | 26          | 19                 | spouwanker is vervormd        |
| <b>3</b>           | 24     | 277    | 188               | 189             | 3,86                | 3,72              | 87          | 26          | 18                 |                               |
| <b>4</b>           | 25     | 277    | 189               | 189             | 3,87                | 3,85              | 87          | 26          | 17                 |                               |
| <b>5</b>           | 26     | 277    | 189               | 192             | 3,88                | 3,72              | 87          | 25          | 19                 |                               |
| <b>6</b>           | 27     | 278    | 189               | 191             | 3,86                | 3,72              | 87          | 26          | 17                 | spouwanker is vervormd        |
| <b>7</b>           | 28     | 277    | 189               | 191             | 3,89                | 3,8               | 88          | 26          | 18                 |                               |
| <b>8</b>           | 29     | 277    | 189               | 198             | 3,85                | 3,75              | 87          | 26          | 18                 |                               |
| <b>9</b>           | 30     | 277    | 189               | 191             | 3,86                | 3,78              | 87          | 25          | 18                 |                               |
| <b>10</b>          | 31     | 278    | 189               | 192             | 3,87                | 3,87              | 87          | 26          | 16                 |                               |
| <b>11</b>          | 32     | 277    | 188               | 191             | 3,86                | 3,72              | 86          | 26          | 18                 |                               |
| <b>12</b>          | 33     | 277    | 188               | 191             | 3,86                | 3,77              | 87          | 26          | 19                 |                               |

**B300 spouwanker**

|                    | nummer | lengte | lengte voor proef | lengte na proef | diameter voor proef | diameter na proef | golf hoogte | golf lengte | draad lengte | Schroefdraadlengte |
|--------------------|--------|--------|-------------------|-----------------|---------------------|-------------------|-------------|-------------|--------------|--------------------|
| <b>Gemiddelde</b>  |        | 296    | 233               | 233             | 4,08                | 4,07              | 23,47       | 55          | 67           | 19                 |
| <b>Proef-Proef</b> |        |        |                   |                 |                     |                   |             |             |              |                    |
|                    | 1      | 295    | 230               |                 | 4,08                |                   | 5,1         |             |              | 18                 |
|                    | 2      | 297    | 231               |                 | 4,08                |                   | 5,9         |             |              | 19                 |
|                    | 3      | 295    | 232               |                 | 4,08                |                   | 6           |             |              | 19                 |
|                    | 4      | 296    | 232               |                 | 4,08                |                   | 5,9         |             |              | 19                 |
|                    | 5      | 296    | 233               |                 | 4,1                 |                   | 5,5         |             |              | 18                 |
|                    | 6      | 297    | 231               |                 | 4,08                |                   | 5,9         |             |              | 18                 |
| <b>M10-trek</b>    |        |        |                   |                 |                     |                   |             |             |              |                    |

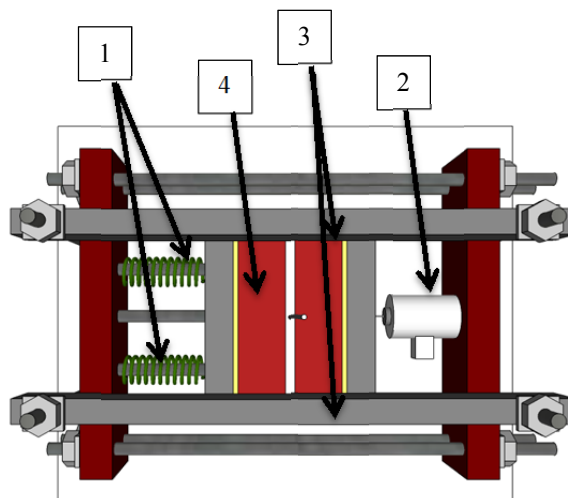
|                |    |     |     |       |      |      |      |    |    |    |
|----------------|----|-----|-----|-------|------|------|------|----|----|----|
| 1              | 7  | 297 | 231 | 231   | 4,09 | 4,07 | 5,5  | 56 |    | 19 |
| 2              | 8  | 297 | 231 |       | 4,08 |      | 5,36 | 55 |    | 37 |
| 3              | 9  | 296 | 230 | 229   | 4,08 | 4,07 | 5,53 | 54 |    | 18 |
| 4              | 10 | 297 | 232 | 232   | 4,09 | 4,07 | 5,35 | 56 |    | 17 |
| 5              | 11 | 298 | 234 | 235   | 4,08 | 4,07 | 5,57 | 55 | 68 | 20 |
| 6              | 12 | 295 | 231 | 231   | 4,07 | 4,06 | 5,52 | 55 | 66 | 12 |
| 7              | 13 | 297 | 233 | 233   | 4,08 | 4,05 | 5,44 | 56 | 67 | 19 |
| 8              | 14 | 298 | 235 | 235   | 4,09 | 4,07 | 5,46 | 57 | 69 | 18 |
| 9              | 15 | 297 | 232 | 232   | 4,07 | 4,07 | 5,45 | 54 | 67 | 18 |
| 10             | 16 | 296 | 231 | 232   | 4,09 | 4,06 | 5,48 | 56 | 68 | 18 |
| 11             | 17 | 295 | 233 | 234   | 4,08 | 4,07 | 5,46 | 55 | 67 | 20 |
| 12             | 18 | 295 | 235 | 235   | 4,1  | 4,05 | 5,54 | 55 | 67 | 19 |
| <b>M5-trek</b> |    |     |     |       |      |      |      |    |    |    |
| 1              | 19 | 295 | 233 | 233   | 4,08 | 4,06 | 5,34 | 56 | 67 | 17 |
| 2              | 20 | 295 | 234 | 234   | 4,1  | 4,08 | 5,54 | 55 | 67 | 20 |
| 3              | 21 | 297 | 234 | 234   | 4,07 | 4,07 | 5,37 | 55 | 68 | 21 |
| 4              | 22 | 295 | 232 | 232   | 4,1  | 4,07 | 5,59 | 54 | 67 | 16 |
| 5              | 23 | 295 | 232 | 231   | 4,08 | 4,08 | 5,5  | 54 | 66 | 21 |
| 6              | 24 | 295 | 234 | 233   | 4,08 | 4,08 | 5,48 | 54 | 67 | 20 |
| 7              | 25 | 296 | 234 | 235   | 4,07 | 4,06 | 5,45 | 56 | 68 | 18 |
| 8              | 26 | 297 | 235 | 235   | 4,1  | 4,07 | 5,34 | 55 | 68 | 22 |
| 9              | 27 | 297 | 234 | 235   | 4,07 | 4,06 | 5,42 | 56 | 68 | 21 |
| 10             | 28 | 295 | 233 | 233   | 4,07 | 4,06 | 5,54 | 53 | 66 | 20 |
| 11             | 29 | 295 | 233 | 233   | 4,09 | 4,09 | 5,54 | 53 | 67 | 19 |
| 12             | 30 | 295 | 231 | 231,5 | 4,1  | 4,07 | 5,5  | 53 | 67 | 18 |



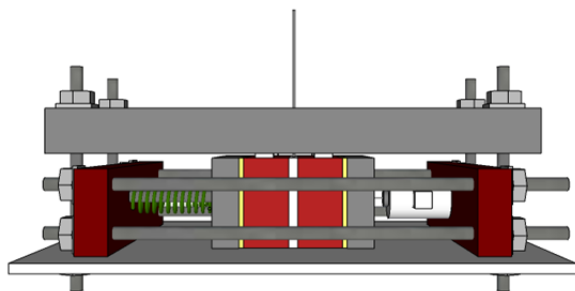
**Bijlage 10 Proefopstelling en frame voor het proefstuk**



Foto van de proefopstelling in de 250kN-bank, waarin de belasting op het spouwanker wordt aangebracht.

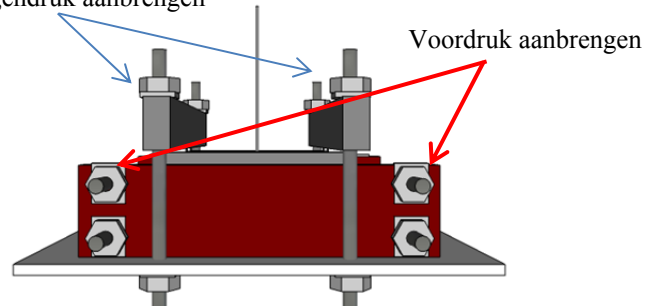


1. Veren voor constant voordruk tijdens de proef
  2. Krachtmeetdoos voor meting van de voordruk
  3. Een tegenwerkende kracht op het proefstuk
  4. Proefstuk met spouwanker
- Bovenaanzicht van het frame voor het proefstuk met de daarbij behorende uitleg van vier onderdelen.

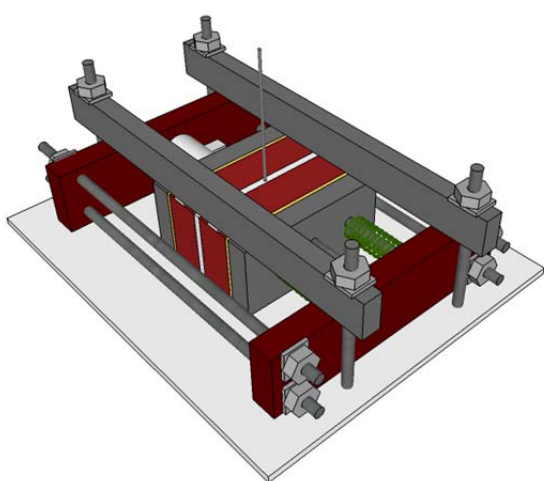


Zijaanzicht van het frame voor het proefstuk. Het spouwanker steekt omhoog, in een situatie met spouwmuur is het proefstuk een kwartslag gedraaid waarbij het spouwanker horizontaal ligt.

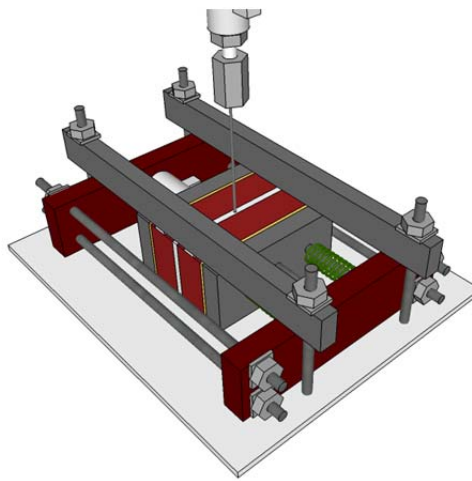
Tegendruk aanbrengen



Het voor- of achteraanzicht van het frame voor het proefstuk. De twee platen die zorgen voor de tegendruk wordt vastgedraaid met bouten, net als de aangebrachte voordruk.



Aanzicht frame voor het proefstuk in onbelaste toestand.



Aanzicht frame voor het proefstuk waarbij het spouwanker in de 250kN-bank geschroefd zit doormiddel van een bout.

**Bijlage 11 Proefresultaten spouwankers belast op trek: algemeen**

Voor alle typen spouwankers zijn relaties uitgewerkt tussen de verplaatsing-trekkraft en inlegdiepte-trekkraft in twee grafieken. Het UNI275 spouwanker gemetseld in M5-mortel is uitgewerkt in hoofdstuk 3, de overige spouwankers gemetseld in M5- of M10-mortel is in deze bijlage uitgewerkt.

Voor alle grafieken geldt:

- De inlegdiepte van de spouwankers is bepaald op 40 millimeter volgens NEN-EN 845, maar tijdens het metselen zijn afwijkingen geconstateerd die van invloed zijn op het uittrekgedrag (§3.1.2. [KOB14]).
- De verplaatsing van het spouwanker moet kleiner dan 5 mm zijn bij  $F_{t,max}$ .

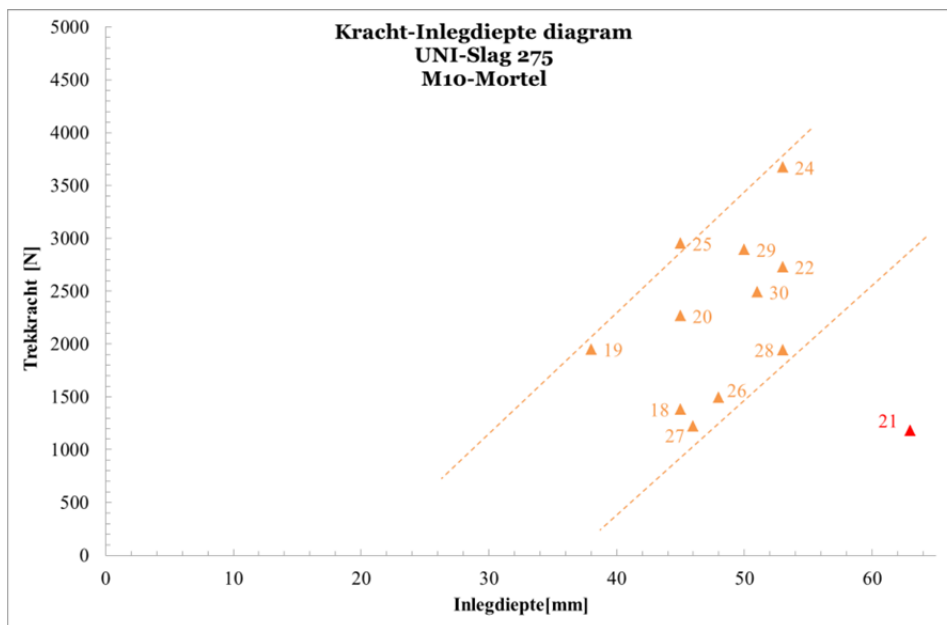
De volgorde van de beschreven spouwankers is als volgt:

UNI 275 in M10-mortel; B300 in M5-mortel; B300 in M10-mortel; UNI-L in M5mortel; UNI-L in M10-mortel en als laatste het UNI-Lijm in M15-mortel (lijmmortel).

UNI275 M10-MORTEL

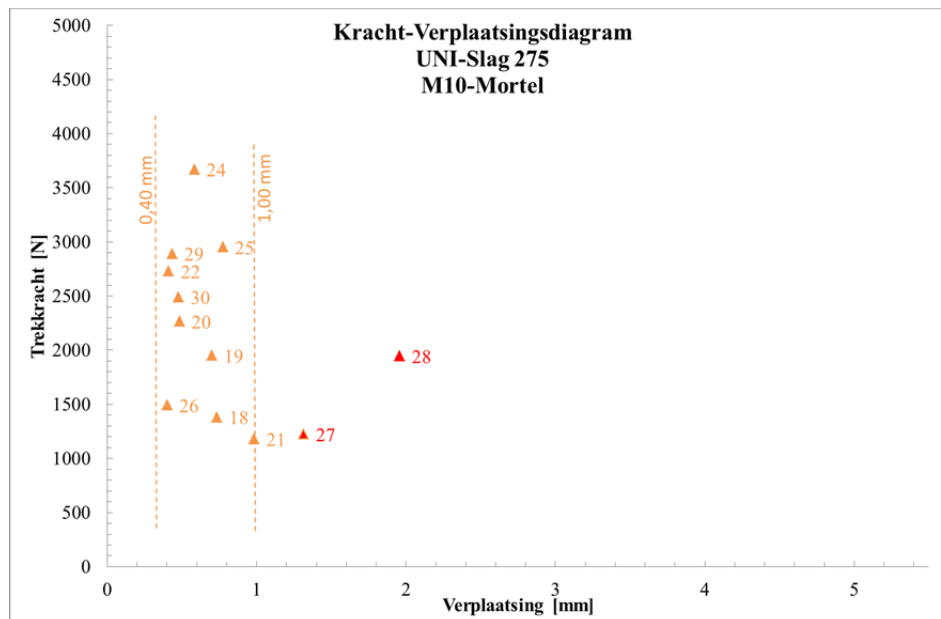
Aan de hand van *Grafiek 40* kan geconcludeerd worden dat bij een toename van de inlegdiepte, een toename van de trekcapaciteit wordt verondersteld.

Spouwanker 21 wijkt af van deze constatering, waarom deze afwijkt, moet blijken uit een verdere analyse uitgewerkt in hoofdstuk 3. Uit optische analyse kan niet worden geconstateerd waaraan de afwijking heeft gelegen.



*Grafiek 40: Kracht-Inlegdiepte diagram voor UNI 275 M10-mortel.*

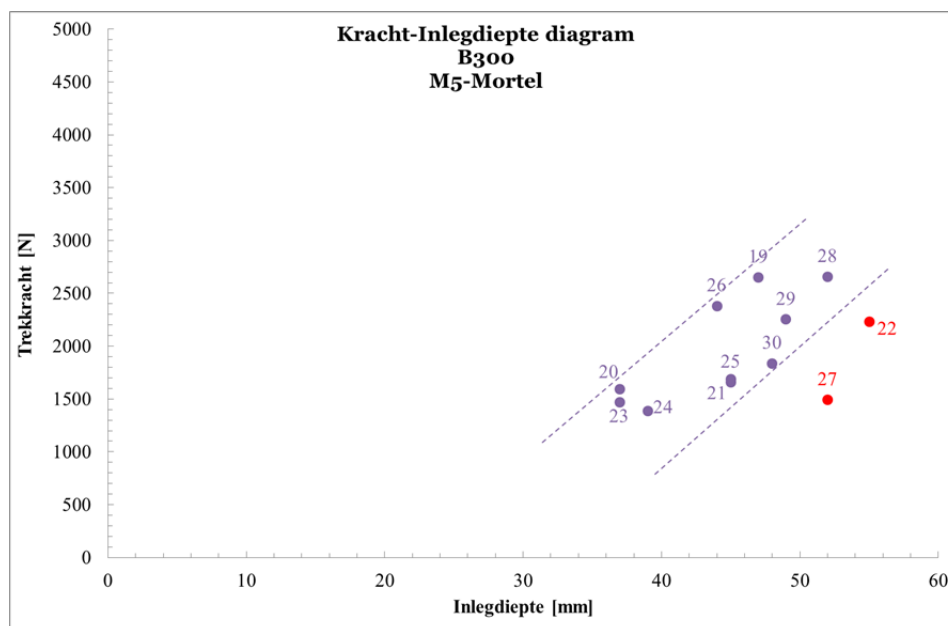
In *Grafiek 41* is de verplaatsing van het spouwanker ten opzichte van de steen uitgezet tegen de  $F_{t,max}$ .  $F_{t,max}$  grijpt bij tien van de twaalf proefstukken bij een verplaatsing tussen 0,40-1,00 mm aan. Spouwankers 27 en 28 hebben tijdens de proef eerst moeten zetten in de proefopstelling voordat kracht opgenomen kan worden, zo blijkt uit de kracht-verplaatsingsdiagrammen uitgewerkt in hoofdstuk 3. Wanneer deze zetting van het proefstuk niet meegenomen wordt bij de analyse, zijn de verplaatsingen van het spouwanker bij  $F_{t,max}$  kleiner en liggen deze tussen de 0,40-1,00 mm.



Grafiek 41: Kracht-verplaatsing diagram voor UNI 275 M10-mortel.

### B300 M5-MORTEL

Bij dit type spouwanker kan geconstateerd worden (Grafiek 42) dat bij een toename van de inlegdiepte, een toename van  $F_{t,max}$ . Spouwankers 22 en 27 wijken af van deze constatering, omdat deze spouwankers andere begincondities gehad hebben. De steen en de mortel waren voor beproeving onthecht, wat een lagere  $F_{t,max}$  oplevert. Dit is ook geconstateerd bij UNI275 spouwankers 27 en 28 gemetseld in M10-mortel in Grafiek 41.

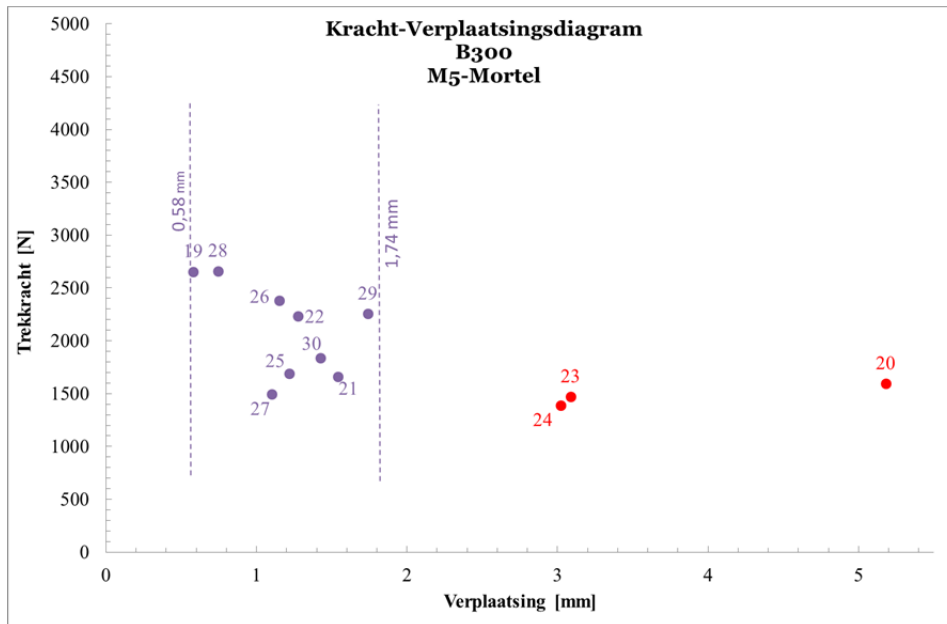


Grafiek 42: Kracht-Inlegdiepte diagram voor B300 M5-mortel.

In Grafiek 43 is de verplaatsing is uitgezet tegen  $F_{t,max}$ .  $F_{t,max}$  grijpt in negen van de twaalf gevallen aan tussen de 0,58 mm tot 1,74 mm. De spouwankers 23 en 24 wijken af van de groep, omdat de spouwankers voor het beproeven al los zaten. Vanwege de extra grote verplaatsing aan het begin van de proef door het los zitten van het spouwanker, is een ander uittrekgedrag aanwezig.

Spouwanker 20 wijkt ook af en bereikt  $F_{t,max}$  pas bij 5,2 mm. Eurocode 6 vermeldt dat het spouwanker bezwiken is na een verplaatsing van 5 mm of bij een verplaatsing van 1 mm op 1/3 van  $F_{t,max}$ . Spouwanker 20 voldoet in beide gevallen niet aan de eis en wordt in de analyse niet meegenomen. Daarnaast voldoen spouwanker 23 en 24 ook niet aan de eis van 1 mm verplaatsing bij 1/3 van  $F_{t,max}$ . Dat betekent dat drie van de twaalf van de spouwankers niet voldoen aan de eis uit EC6. Wanneer spouwankers 20, 23 en 24 in Grafiek 42 nader worden

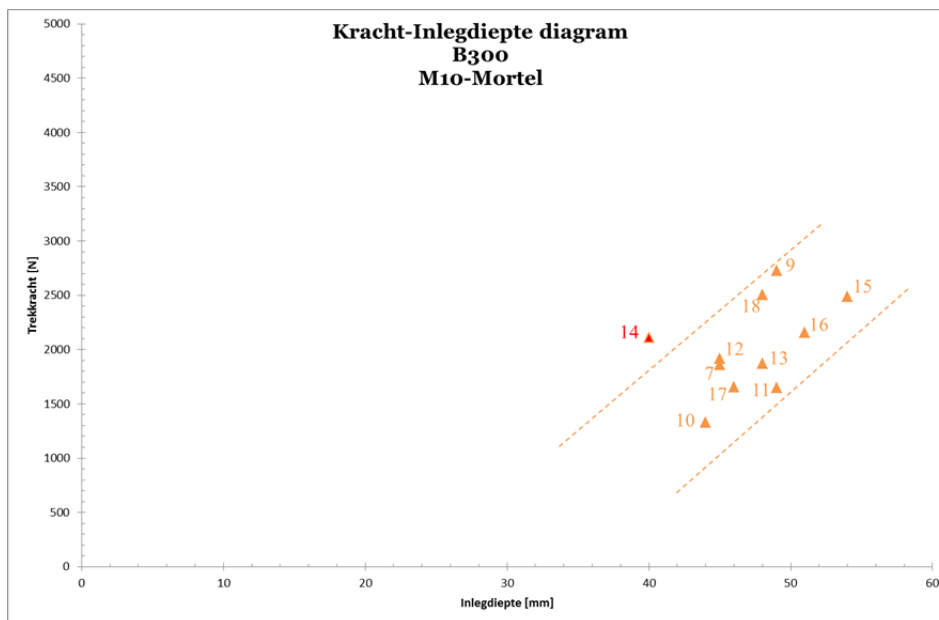
geanalyseerd, blijken deze spouwankers de kortste inlegdiepte en laagste  $F_{t,max}$  te hebben. Mogelijk is dat één van de oorzaken waarom deze drie spouwankers een lagere  $F_{t,max}$  hebben bij een grote verplaatsing.



Grafiek 43: Krachtverplaatsingsdiagram voor B300 M5-mortel.

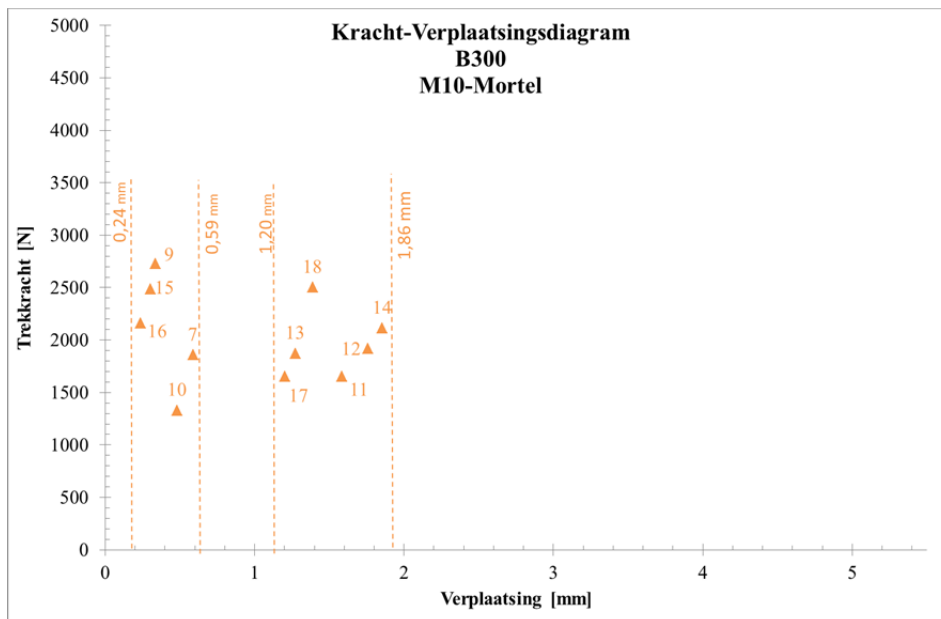
B300 M10-MORTEL

In het algemeen kan geconstateerd worden dat bij een toename van de inlegdiepte een toename  $F_{t,max}$  plaatsvindt, zoals volgt uit Grafiek 44. Alleen spouwanker 14 wijkt af van de groep. Dit spouwanker heeft een lagere  $F_{t,max}$  omdat de steen en de mortel voor het beproeven onthecht zijn, oftevel andere begincondities van de proefstukken.



Grafiek 44: Kracht-Inlegdiepte diagram voor B300 M10-mortel.

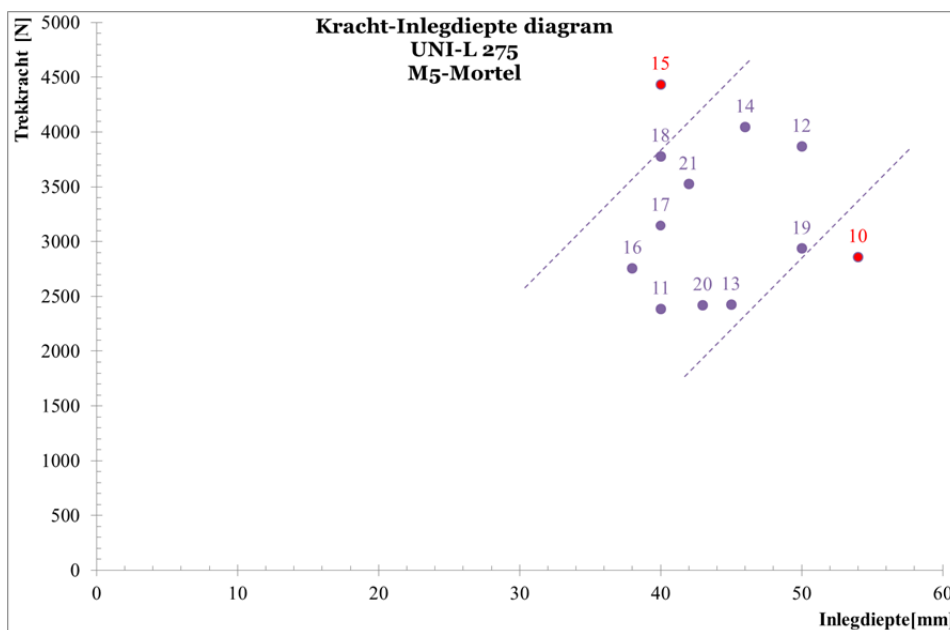
In Grafiek 45 is de verplaatsing uitgezet tegen  $F_{t,max}$ .  $F_{t,max}$  grijpt in vijf van de elf proefstukken aan tussen de 0,24 mm tot 0,59 mm en in zeven van de elf proefstukken tussen 1,20 mm tot 1,86 mm. Waarom de kracht-verplaatsingsdiagrammen twee groepen kent kan uit optische analyse niet worden bepaald. Uit hoofdstuk vier moet blijken waarom een tweedeling in de proefresultaten is ontstaan.



Grafiek 45: Krachtverplaatsingsdiagram voor B300 M10-mortel.

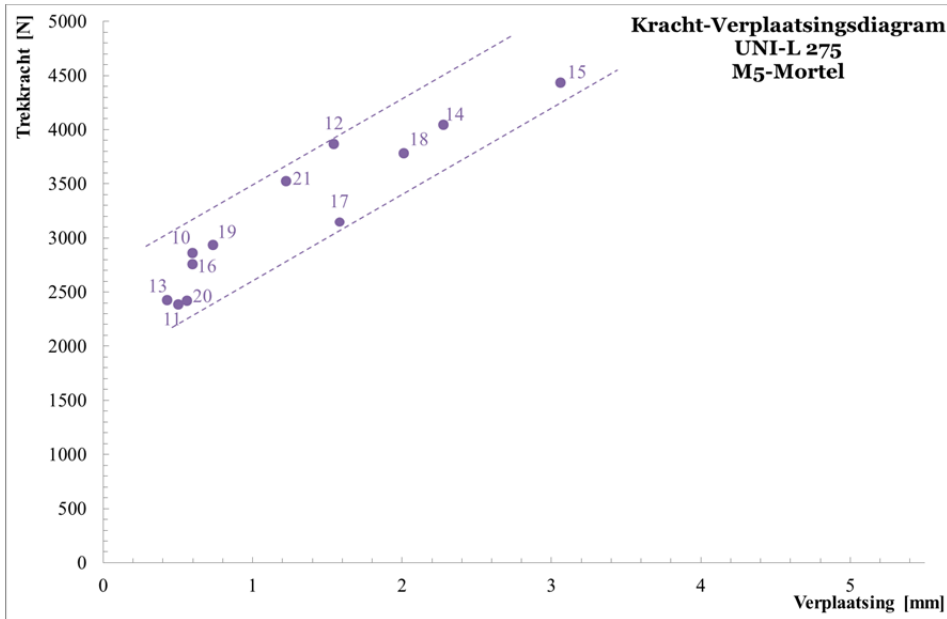
UNI-L M5

Uit Grafiek 46 kan geconstateerd worden dat bij een toename van de inlegdiepte, een toename van  $F_{t,max}$  optreedt. Spouwanker 10 wijkt hier deels vanaf en heeft een lagere trekkracht in vergelijking met de inlegdiepte. Dit kan mogelijk veroorzaakt zijn doordat het spouwanker niet in het hart van de voeg gemetseld is en tijdens de proef vervormd is. Spouwanker 15 valt ook buiten het gesitueerde bereik. Het spouwanker kan een hogere  $F_{t,max}$  opnemen en zit daardoor aan de veilige kant van het bereik. Het spouwanker presteert beter dan verwacht.



Grafiek 46: Kracht-Inlegdiepte diagram voor UNI-L M5-mortel.

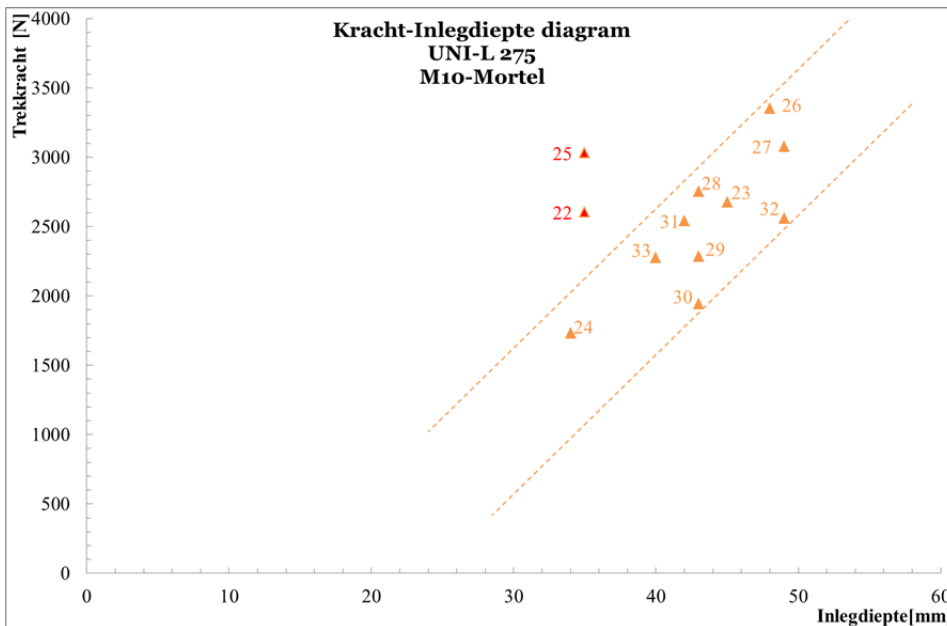
Dit geldt mede voor de verplaatsing die het spouwanker ondergaat bij  $F_{t,max}$ , zoals weergegeven in Grafiek 47. Hoe hogere  $F_{t,max}$ , hoe meer verplaatsing het spouwanker ondergaat. Bij dit type spouwanker neemt de verplaatsing ten opzichte  $F_{t,max}$  ook toe, zoals te zien is in Grafiek 47. De verplaatsingen zijn groter dan bij de rechte spouwankers doordat bij dit type spouwanker niet de verbinding tussen spouwanker en mortel bezwijkt, maar de steen en mortel onthechten. Hierdoor is de verplaatsing van het spouwanker ten opzichte van de steen groter.



Grafiek 47: Krachtverplaatsingsdiagram voor UNI-L M5-mortel.

UNI-L M10

Uit Grafiek 48 kan geconcludeerd worden dat bij een toename van de inlegdiepte, een toename van  $F_{t,max}$  optreedt. Twee spouwankers vallen buiten het geselecteerde bereik, blijken na analyse van de kracht-verplaatsingsgrafieken een ander uittrekgedrag te hebben. Daarnaast hebben ze een hogere waarde bij een kleinere inlegdiepte dan verwacht en bevinden de spouwankers zich aan de goede zijde van het bereik.

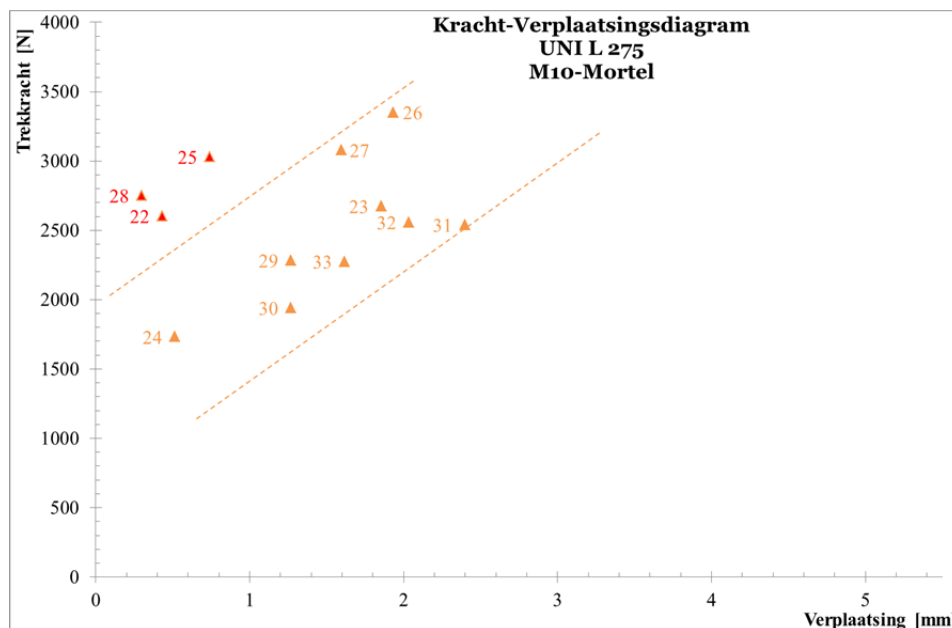


Grafiek 48: Kracht-Inlegdiepte diagram voor UNI-L M5-mortel.

Net als bij het UNI-L spouwanker gemetseld in M5-mortel, kan geconcludeerd worden dat bij toename van  $F_{t,max}$  een toename van de verplaatsing optreedt, zoals weergegeven in Grafiek 49. Bij het UNI-L spouwanker in M5-mortel was de oorzaak de hechting tussen steen en mortel. Gemetseld in M10-mortel kan deze conclusie niet direct getrokken worden omdat een ander uittrekgedrag plaatsvindt, de kracht-verplaatsingsgrafieken hebben namelijk twee pieken.

Spouwankers 22 en 25 vallen in Grafiek 48 en Grafiek 49 buiten het bereik. De resultaten van de twee spouwankers zitten in het veilige gedeelte van de grafiek, ze nemen meer kracht op, dan verwacht. Spouwanker 28 heeft een hoger  $F_{t,max}$ , dan binnen het bereik wordt geschat en daardoor valt dit spouwanker ook aan de veilige zijde van de grafiek.

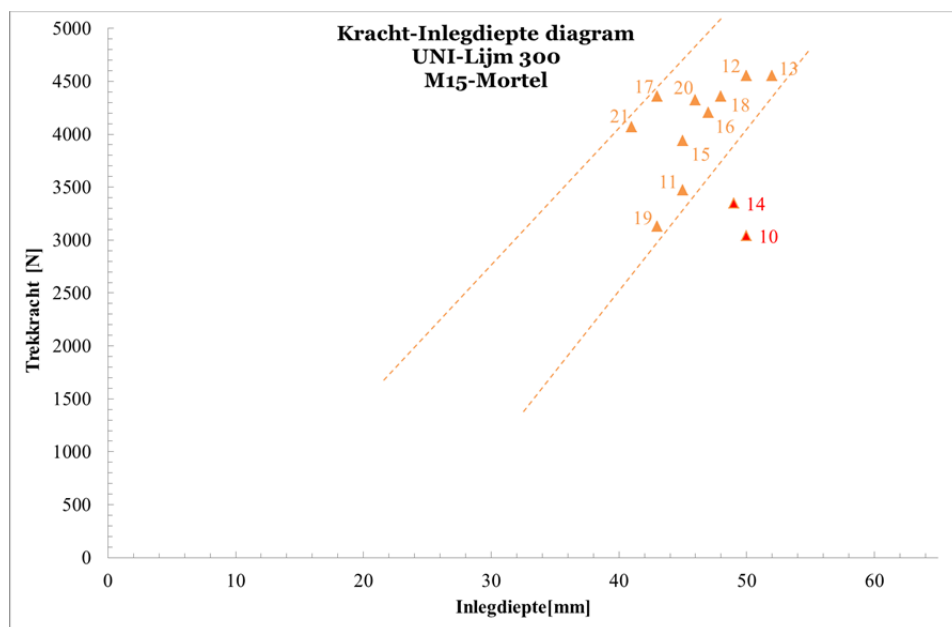
Bij deze typen spouwankers zijn geen uitschieters waarbij bijvoorbeeld de mortel niet gehecht heeft of de steen met mortel onthecht zijn, wat positief is voor het bepalen van het uittrekgedrag van het spouwanker.



Grafiek 49: Krachtverplaatsingsdiagram voor UNI-L M5-mortel.

UNI-Lijm

Uit Grafiek 50 kan geconcludeerd worden dat bij een toename van de inlegdiepte een toename  $F_{t,max}$  optreedt. De spouwankers 4 en 10 hebben beide een lagere  $F_{t,max}$  dan de spouwankers met dezelfde inlegdiepte. Na optische analyse blijken dat bij deze proefstukken geen gebreken zijn geconstateerd en de oorzaak van de lagere  $F_{t,max}$  dus ook niet.

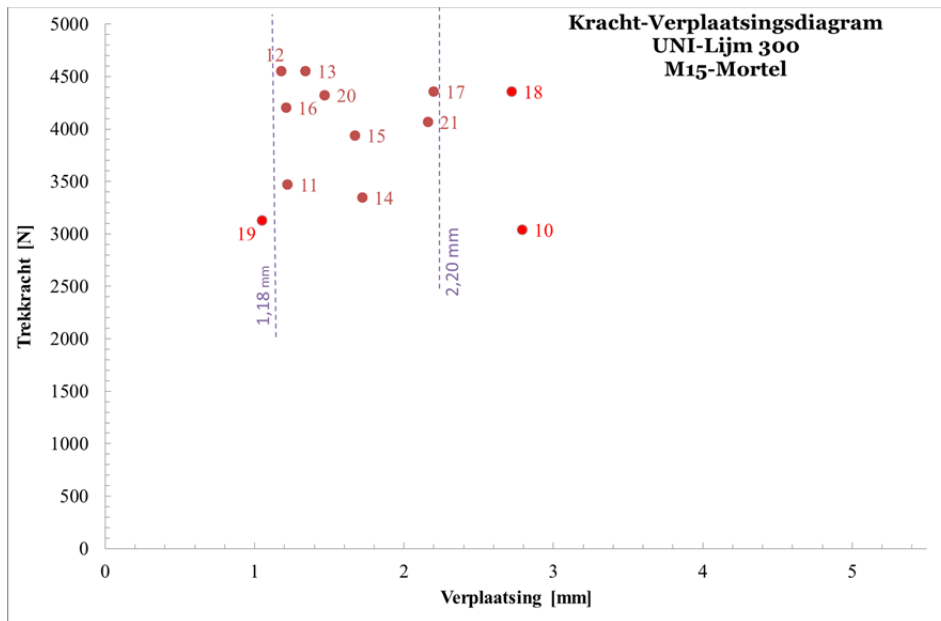


Grafiek 50: Kracht-Inlegdiepte diagram voor UNI-Lijm M15-Mortel

De verplaatsing ten opzichte van  $F_{t,max}$  is te centreren binnen een bereik van 1,18 mm tot 2,20 mm, weergegeven in Grafiek 51. Spouwanker 18 en 10 vallen buiten dit bereik en de spouwankers hebben een grotere verplaatsing, dan verwacht. Spouwanker 10 valt bij de inlegdiepte ook onder verwachtingen. Uit de kracht-verplaatsingsgrafiek van spouwanker 10 blijkt ook dat dit type spouwanker een ander uittrekgedrag vertoont dan de overige spouwankers (zie hiervoor hoofdstuk 3).



Spouwanker 14 heeft een kleinere verplaatsing dan het bereik van de groep spouwankers. Bij dit proefstuk is de steen en mortel onthecht en uit optische analyse blijkt dat het hechtoppervlak van de steen en mortel kleiner is geweest dan bij de overige proefstukken. Hierdoor is  $F_{t,max}$  ook lager. Hieruit blijkt dat de hechting tussen steen en mortel ook een belangrijke component is die gecontroleerd moet worden.



Grafiek 51: Krachtverplaatsingsdiagram voor UNI-Lijm M15-Mortel.

## Bijlage 12 Proefresultaten spouwankers belast op trek: kracht-verplaatsingsgrafieken 1

In hoofdstuk 3 is het UNI275 spouwankers in M5-mortel toegelicht en zijn de verschillende geconstateerde gebreken uitgewerkt. Daarnaast zijn de aparte grafieken van de gebreken weergegeven in bijlage 13. De spouwankers die niet in hoofdstuk 3 zijn uitgewerkt worden in deze bijlage verder toegelicht. In de bijlage worden de belangrijkste aspecten toegelicht en uitgewerkt. Voor de individuele grafieken van de gebreken wordt doorverwezen naar bijlage 13.

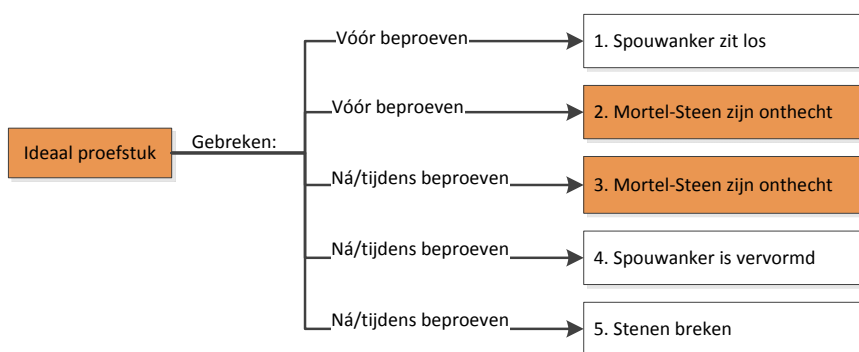
De bijlage is opgedeeld in drie verschillende typen spouwankers die beproefd zijn:

- **Rechte spouwankers**  
UNI275 spouwankers; leverancier A; M5-mortel → Uitgewerkt in hoofdstuk 3  
UNI275 spouwankers; leverancier A; M10-mortel  
B300 spouwankers; leverancier B; M5-mortel  
B300 spouwankers; leverancier B; M10-mortel
- **Spouwankers met een haak**  
UNI-L spouwankers; leverancier A; M5-mortel  
UNI-L spouwankers; leverancier A; M10-mortel
- **Platte spouwankers**  
UNI-Lijmspouwankers; leverancier A; M15-mortel

## Rechte Spouwankers

### *UNI275 M10-mortel*

In de proefstukken met het UNI275 spouwanker gemetseld in M10-mortel, zijn naast het ideale proefstuk twee gebreken geconstateerd, gemarkeerd in *Diagram 5*. Zowel het ideale proefstuk als de proefstukken met een “Gebrek n” worden in de hieronder toegelicht.



*Diagram 5: Geconstateerde gebreken (oranje gearceerd) van proefstukken met UNI275 spouwanker gemetseld in M10-mortel.*

### Ideaal proefstuk

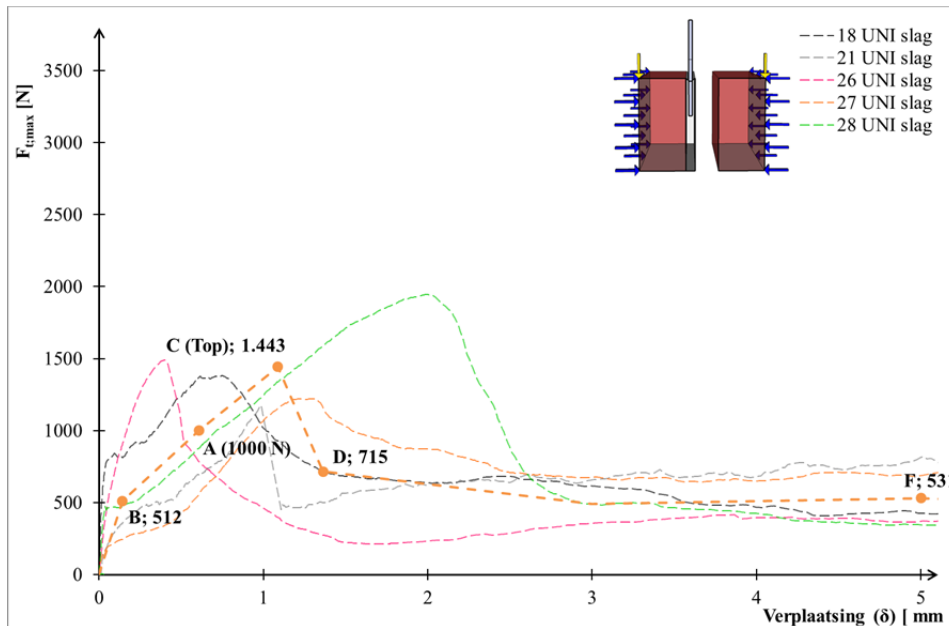
Bij twee van de twaalf proefstukken zijn geen gebreken geconstateerd voor, tijdens of na het beproeven. Spouwanker 20 en 30 hebben ieder een ander uittrekgedrag (bijlage 13), waardoor het formuleren van een x aantal punten voor een indicatie van het uittrekgedrag statistisch niet mogelijk is. Daarnaast heeft spouwanker 30 een directe terugval van de kracht en spouwanker 20 niet, waardoor de  $F_{t,max}$ -verplaatsingsgrafiek verschillen (zie *Grafiek 53*). De begincondities van deze twee spouwankers zijn gelijk aan de proefstukken met “Gebrek 3” en worden daarom in dezelfde grafiek weergegeven (*Grafiek 53*).

### “Gebrek 2” (onthecht steen-mortel)

“Gebrek 2” is geconstateerd bij vijf van de twaalf proefstukken. Dit houdt in dat de mortel en steen zijn onthecht voordat beproefd is. In *Grafiek 52* zijn de kracht-verplaatsingsgrafiek van de vijf proefstukken gegeven. In deze grafiek is een grote spreiding van: de  $F_{t,max}$  en  $F_{t,1000N}$  terug te zien. Om een indicatie van het uittrekgedrag te geven zijn vijf punten in *Grafiek 52* gedefinieerd. Voor een statistische benadering zijn dit te weinig resultaten, maar om een vergelijking te trekken met de proefstukken met “Gebrek 3” zijn gemiddelde waarden gebruikt.

Bij drie van de vijf spouwankers verandert onder de 500 N de stijfheid. Het proefstuk moet zich zetten in de proefopstelling. Wanneer het proefstuk wrijving heeft opgebouwd en dus weer kracht kan opnemen, wordt de stijfheid van de verbinding groter. De voegen van het proefstuk met spouwankers 21 en 26 zijn tijdens de proef onthecht van beide stenen na  $F_{t,max}$  (bijlage 13 en *Figuur 122*).

De gemiddelde  $F_{t,max}$  voor proefstukken met “Gebrek 3” is 1443 N bij een gemiddelde verplaatsing van 1,09mm.



Grafiek 52:  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek van proefstuk "Gebrek 2" met UNI275 spouwankergemetseld in M10-mortel. De oranje stippellijn geeft de gemiddelde  $F_{t,max}$ -verplaatsingsgrafiek weer van dit type proefstuk.



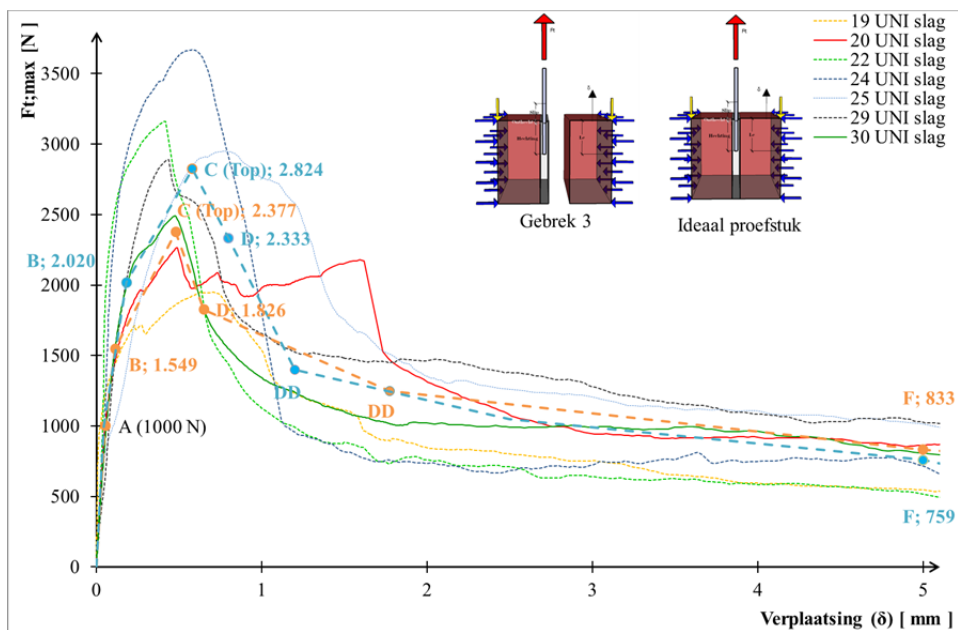
Figuur 122: Bezweken voegen, in drie verschillende proefstukken en begincondities.

### "Gebrek 3" (onthecht steen-mortel)

Bij vijf van de twaalf proefstukken is "Gebrek 3" geconstateerd, gemarkeerd in *Diagram 5*. Grafiek 53 weergeeft het principe van het ideale proefstuk (oranje lijn) en van proefstukken met "Gebrek 3" (blauwe lijn). Spouwankers 20 en 30 zijn afkomstig uit de groep ideale proefstukken. Omdat "Gebrek 3" dezelfde begincondities heeft als het ideale proefstuk, zijn relaties te vinden in het uittrekgedrag. Bijvoorbeeld dat de verplaatsing even groot is bij punt A bij beide groepen proefstukken. Het verdere verloop van de grafiek is gelijk, waarbij bij proefstukken met "Gebrek 3" de gemiddelde waarden hoger liggen. Proefstuk met spouwanker 19 wijkt af in vergelijking met de andere vier proefstukken met "Gebrek 3" doordat de steen en de mortel zijn onthecht voordat  $F_{t,max}$  bereikt is. Dit is terug te zien bij de terugval van de kracht in Grafiek 53.

Zoals besproken in §3.2 vindt vanaf punt 0-B het lineaire uittrekgedrag van het spouwanker plaats. Vanaf punt B begint de onthechting van het spouwanker met de mortel, totdat het spouwanker zich geheel onthecht heeft en deze alleen nog kracht kan opnemen door wrijving (punt C-D). Deze constatering is terug te zien in Grafiek 53. Tot punt B zijn de stijfheden van de spouwankers gelijk (tussen de 20000 en 50000 N/mm). Na punt B veranderen de stijfheden van de verbinding tussen spouwanker en mortel. Alleen spouwanker 25 wijkt af, daar veranderd de stijfheid na 1000N (Grafiek 53). Ook bij M10-mortel geldt: 'Bij een toename van de stijfheid en inlegdiepte, is een toename van  $F_{t,max}$  van toepassing.'

De gemiddelde  $F_{t,max}$  voor proefstukken met "Gebrek 3" is 2824 N bij een gemiddelde verplaatsing van 0,58 mm.



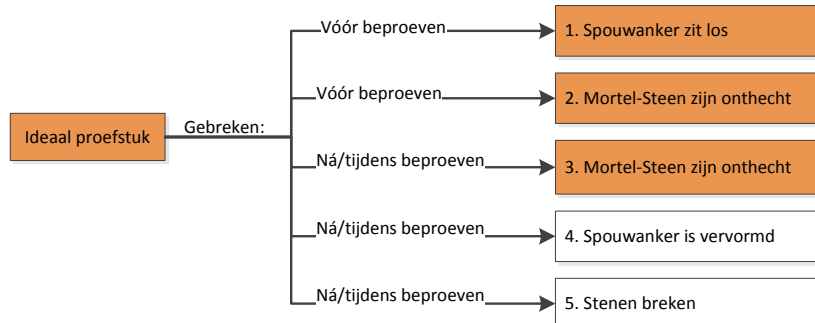
Grafiek 53:  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek van het ideale proefstuk en proefstuk "Gebrek 3" met UNI275 spouwankers gemetseld in M10-mortel. De oranje stippellijn geeft de gemiddelde  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek weer van dit type proefstuk.



Figuur 123: De getrokken UNI275 spouwankers uit de M10-mortel, nummers 7 t/m 18.

### B300 M5-mortel

Voor de B300 spouwankers gemetseld in M5-mortel, zijn naast het ideale proefstuk drie gebreken geconstateerd, aangegeven in *Diagram 6*, *Figuur 124* en *Figuur 125*. Het bezwijken van de voeg is gelijk aan het beschreven gedrag bij de UNI275 spouwankers. Het verschil met UNI275 spouwankers is dat dit B300 spouwankers de mortel meer verbrijzeld, er dus hogere spanningen in de mortel doen optreden, die zorgen voor een eerdere onthechting tussen mortel en spouwanker.



*Diagram 6: Geconstateerde gebreken (oranje gearceerd) van proefstukken met B300 spouwanker gemetseld in M5-mortel.*



**Ideaal proefstuk: B20**



**“Gebrek 1”: B21, B23, B24 of B29**

*Figuur 124: Bezwiken voegen na uittrekken B300 spouwanker Ideaal proefstuk of met “Gebrek 1” gemetseld in M5-mortel.*



**“Gebrek 2”: B22 of B27**



**“Gebrek 3”: B19, B25, B26, B28 of B30**

*Figuur 125: Bezwiken voegen na uittrekken B300 spouwanker met “Gebrek 2 of 3” gemetseld in M5-mortel.*

### Ideaal proefstuk

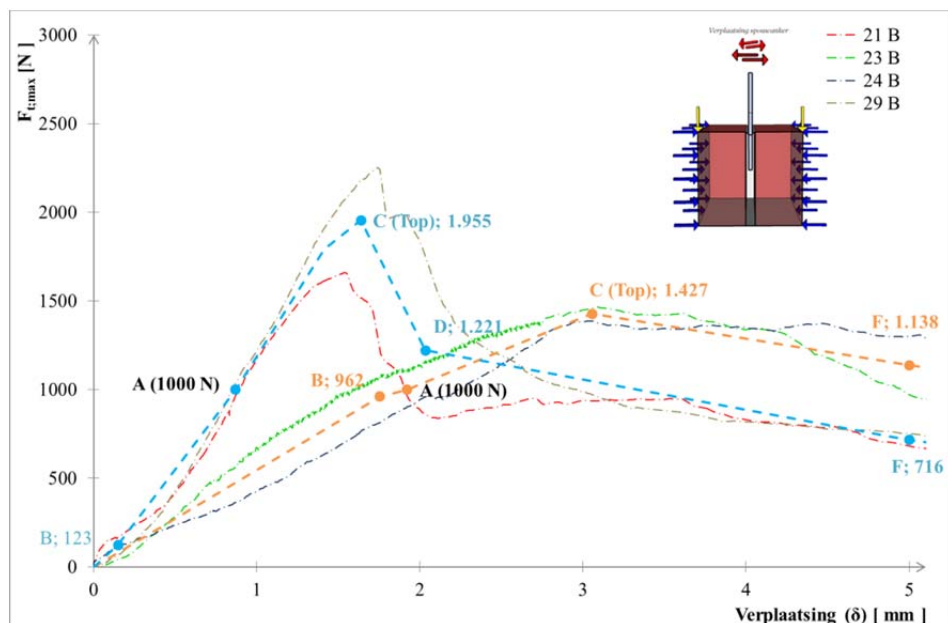
Spouwanker 20 (*Figuur 124*) bereikt  $F_{t,max}$  pas bij een verplaatsing van 5,2mm. EC6 adviseert dat het spouwanker bezwiken is na een verplaatsing van 5 mm of bij een verplaatsing van 1 mm bij  $1/3 \cdot F_{t,max}$ . Spouwanker 20 voldoet in beide gevallen niet aan het advies en wordt in deze analyse niet meegenomen (zie verder bijlage 13).

### “Gebrek 1” (spouwanker los)

Bij vier van de twaalf proefstukken is “Gebrek 1” geconstateerd (zie *Grafiek 54*). Daarbij zijn er twee spouwankers (23 en 24) die niet voldoen aan het advies beschreven in EC6. De spouwankers verplaatsen meer dan 1mm bij  $1/3 \cdot F_{t,max}$ . In *Grafiek 54* zijn twee verdelingen te zien, namelijk spouwankers 23-24 en 21-29 waarbij iedere groep van twee spouwankers een ander uittrekgedrag vertoont. Omdat met deze vier grafieken geen gemiddelde te definiëren is, wordt gekozen om van iedere groep een indicatie van het uittrekgedrag te geven (*Grafiek 54*: blauwe lijn (21 en 29) en oranje lijn (23 en 24)).

Alle vier de spouwankers in de proefstukken zaten los voor het beproeven en dat is terug te zien in de helling van punt A naar punt B in *Grafiek 54*. De spouwankers hebben een grotere verplaatsing tot  $F_{t,max}$  dan de spouwankers zonder begin gebreken (*Grafiek 55*). De verplaatsing van het spouwanker is groter doordat het spouwanker eerst wrijving moet ondervinden voordat het weer kracht kan opnemen.





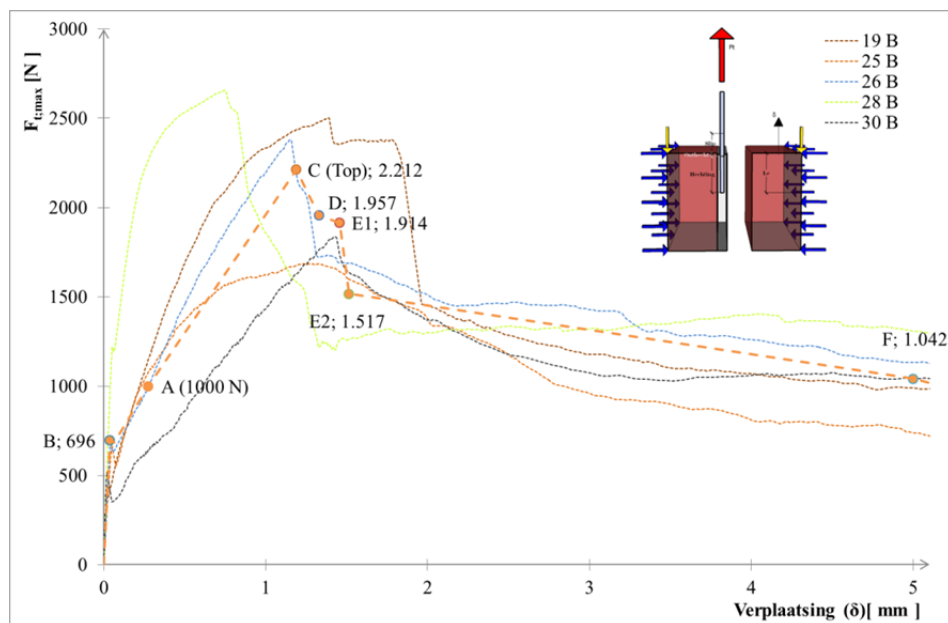
Grafiek 54:  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek van proefstuk “Gebrek 1” met B300 spouwanker gemetseld in M5-mortel. De oranje stippellijn geeft de gemiddelde  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek weer van dit type proefstuk.

“Gebrek 2” (mortel-steen verbinding onthecht)

Voor dit geconstateerde gebrek zijn slechts twee proefstukken beschikbaar (Figuur 125). Daarom is het maken van gemiddelde punten die het uittrekgedrag aangegeven niet reëel. De uitwerking van de twee spouwankers zijn in bijlage 13 gegeven. Over de grafieken kan vermeldt worden dat de stijfheid tot 500 N gelijk is van beide proefstukken. Daarna veranderen de stijfheden van ieder proefstuk totdat spouwanker 27  $F_{t,max}$  bereikt heeft (bij  $\pm 1500N$ ). Tijdens de proeven zijn geen opmerkelijke constatering gedaan.

“Gebrek 3” (mortel-steen verbinding onthecht)

“Gebrek 3” is geconstateerd bij vijf van de twaalf proefstukken en het uittrekgedrag is weergegeven in Grafiek 55. Aan de hand van de kracht-verplaatsingsgrafieken van de vijf spouwankers zijn zeven punten vastgelegd die het verloop van dit type proefstuk aanduiden (oranje lijn in Grafiek 55).



Grafiek 55:  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek van proefstuk “Gebrek 3” met B300 spouwanker gemetseld in M5-mortel. De stippellijn geeft de gemiddelde  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek weer van dit type proefstuk.

In het begin van alle grafieken zit een terugval van de kracht en dat kan de volgende twee oorzaken hebben:

1. Onthechting tussen steen en mortel
2. Onthechting tussen mortel en spouwanker

Bij twee van de vijf proefstukken is geen directe terugval van de kracht na het bereiken van  $F_{t,max}$  geconstateerd. Dit duidt erop dat de terugval in kracht aan het begin van de grafiek het onthechten van de steen en mortel is. Door de kleine terugval in kracht aan het begin van de proef verandert de stijfheid in het proefstuk en wordt de verplaatsing ten opzichte van  $F_{t,max}$  groter (wat duidelijk terug te zien bij spouwanker 30). De gemiddelde  $F_{t,max}$  voor proefstukken met ‘‘Gebrek 3’’ is 2212 N bij een gemiddelde verplaatsing van 1,19 mm.



Figuur 126: De getrokken B300 spouwankers in M5-mortel, nummers 19 t/m 30.

### B300 M10-mortel

Voor de B300 spouwankers gemetseld in M10-mortel, zijn naast het ideale proefstuk twee gebreken geconstateerd, gemarkeerd in *Diagram 7*. Het bezwijken van de voeg is gelijk aan die van het UNI275 spouwanker en B300 spouwanker in M5-mortel.

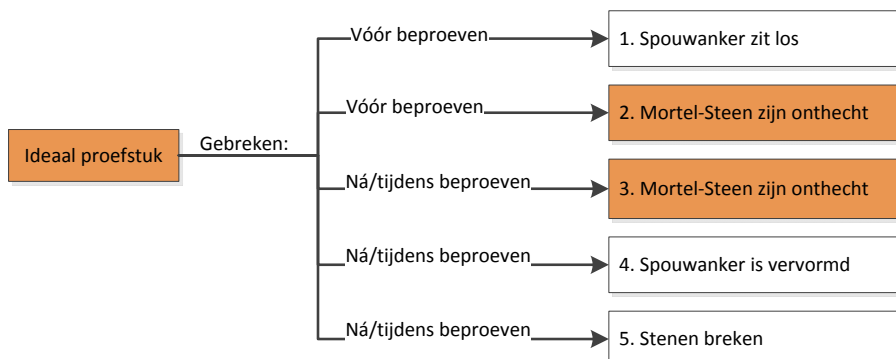


Diagram 7: Geconstateerde gebreken (oranje gearceerd) van proefstukken met B300 spouwanker gemetseld in M10-mortel.



### Ideaal proefstuk

Het ideale proefstuk heeft gelijke begincondities als de proefstukken met “Gebrek 3”. Omdat het ideale proefstuk slechts één proefstuk kent, wordt deze in de *Grafiek 56* bij de proefstukken met “Gebrek 3” besproken. Voor een individuele analyse van spouwanker 18, zie bijlage 13.

### “Gebrek 2”

Net als bij het ideale proefstuk geldt voor het proefstuk met “Gebrek 2”, dat één proefstuk in deze groep valt. In bijlage 13 is aangetoond dat spouwanker 14 afwijkt ten opzichte van de andere tien proefstukken. Het spouwanker kan minder kracht opbouwen omdat de steen en de mortel voor het beproeven al onthecht zijn. Voor uitwerkingen van spouwanker 14 zie bijlage 13.

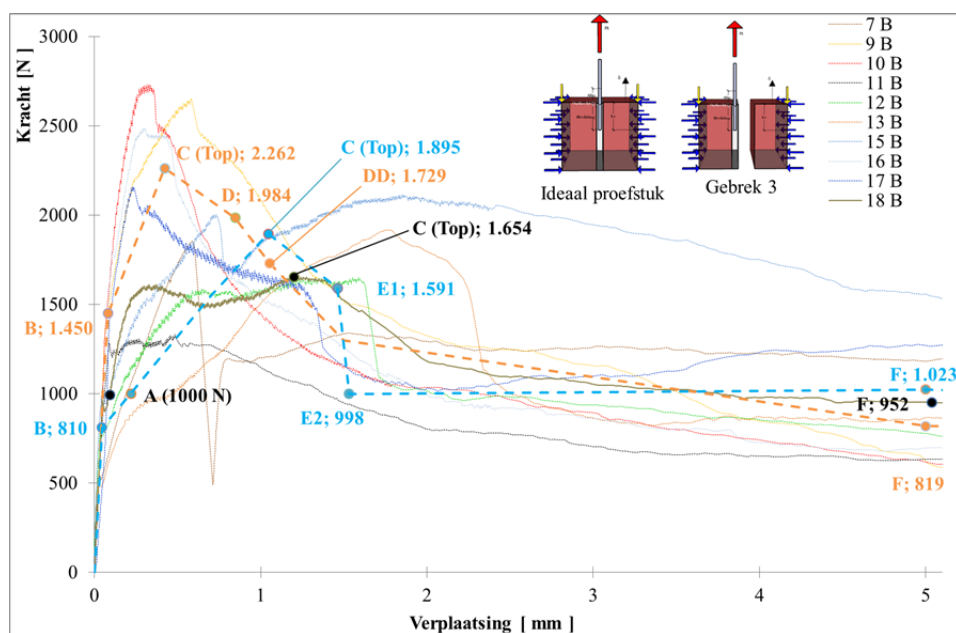
### “Gebrek 3”

Bij de B300 spouwankers gemetseld in M10-mortel zijn negen van de elf proefstukken aanwezig waarbij “Gebrek 3” geconstateerd is en het uittrekgedrag is gegeven in *Grafiek 56*. In de grafiek is spouwanker 18 ook weergegeven, omdat de begincondities van de twee typen proefstukken gelijk zijn. Met de kracht-verplaatsingsgrafieken van de negen spouwankers met “Gebrek 3” zijn vijf punten bepaald die het verloop van het uittrekgedrag van proefstukken met “Gebrek 3” aanduiden. In *Grafiek 56* zijn twee stippellijn weergegeven, de oranje lijn geeft het gemiddelde uittrekgedrag weer van de proefstukken die geen directe terugval van de kracht hebben. De blauwe stippellijn verbindt de gemiddelde punten van de proefstukken die na  $F_{t,max}$  een directe terugval van de kracht hebben, oftewel de steen en mortel onthechten. Spouwanker 11 heeft een ander uittrekgedrag dan de andere proefstukken met “Gebrek 3”. Daarom wordt deze niet meegenomen in de bepaling van het gemiddelde uittrekgedrag van het spouwanker.

Tot 800 N hebben alle proefstukken dezelfde stijfheid, daarna is de spreiding van de stijfheid van de verbinding tussen spouwanker en mortel groter. Proefstukken met een directe terugval van de kracht, hebben gemiddeld een lagere  $F_{t,max}$ , maar een hogere restcapaciteit. Over het ideale proefstuk kan weinig gezegd worden omdat dit slechts één proefstuk is.

Spouwanker 7 heeft net als bij de B300 spouwankers gemetseld in M5-mortel een kleine terugval van de kracht bij de 500N. De mortel en steen onthechten zich pas na  $F_{t,max}$ , omdat daar een directe terugval in kracht is waargenomen tijdens de proeven. Wat deze terugval in kracht aan het begin van de grafiek is, kan uit deze analyse nog niet worden geconstateerd.

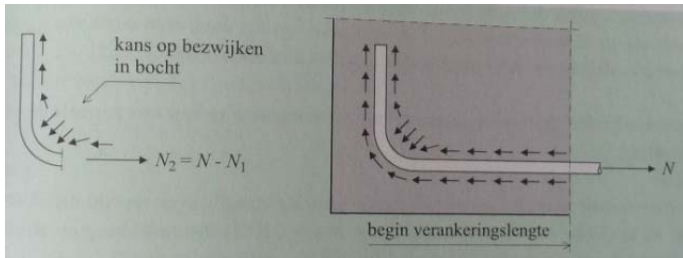
Spouwanker 15 heeft zelfs twee keer een kleine terugval van de kracht aan het begin van de proef. De eerste terugval van de kracht is bij 1000 N en leidt niet tot onthechting tussen steen en mortel. De tweede terugval van de kracht is bij 1750 N, waarbij de steen en mortel wel onthechten (*Figuur 127*). Het spouwanker vindt na deze twee terugvallen in kracht zijn wrijving terug en bezwijkt bij  $F_{t,max}$  van 2113N met een verplaatsing van 1,9 mm.



*Grafiek 56:  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek van ideaal proefstuk en “Gebrek 3” met B300 spouwanker gemetseld in M10-mortel. De stippellijn geeft de gemiddelde  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek weer van dit type proefstuk.*



Figuur 127: Onthechting van de steen met de voeg bij spouwanker 15.



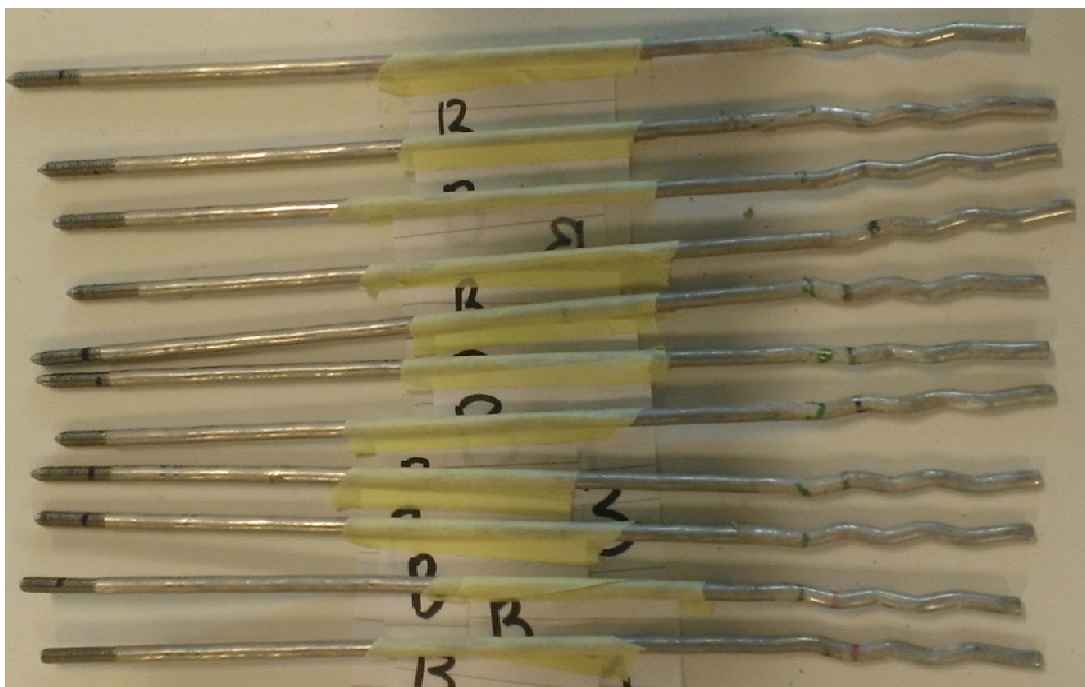
Figuur 128: Krachten in de mortel werkend op een gebogen staaf [CB2].



Figuur 129: Het spouwanker is door de mortel heen gesneden.



Figuur 130: Uittrekgedrag van het UNI-L spouwanker gemetseld in M5- of M10-mortel.



Figuur 131: De getrokken B300 spouwankers in M10-mortel, de nummers 7 t/m 18.

## Spouwankers met haak

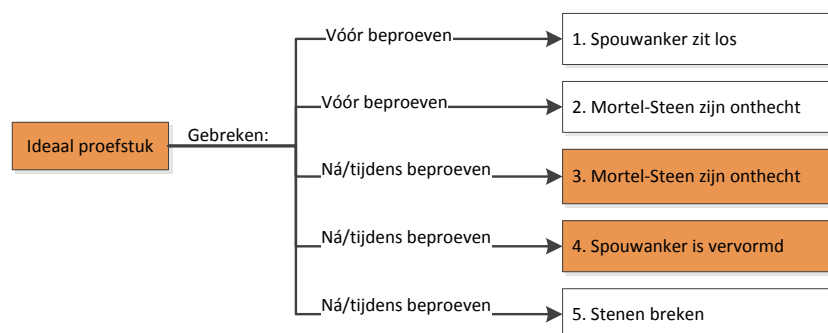
Het uittrekgedrag van een spouwanker met haak is anders dan een recht spouwanker. Dit komt doordat een spouwanker met haak op andere factoren bezwijkt dan alleen op de verbinding tussen spouwanker en mortel. Bij een spouwanker met haak speelt de hechting tussen steen en mortel een grotere rol. De haak ondergaat een grotere weerstand doordat deze vervormt moet worden of de mortel ten breedte van de haak uit de voeg getrokken moet worden. Het spouwanker met haak is zo ontworpen dat de haak een groot oppervlak van de mortel mee naar buiten (*Figuur 130*), omdat het spouwanker te stijf dan wel de mortel te bros is. De haak oefent ook kracht uit op de mortel, waardoor in de bocht van het spouwanker de mortel kan bezwijken door het overschrijden van de drukspanning van de mortel (*Figuur 129*). Stel er wordt aan het spouwanker getrokken met een kracht  $F$ , dan zal deze kracht verdeeld moeten worden over het spouwanker. Dit gebeurt op twee manieren (*Figuur 128*):

1. In het eerste gedeelte van de staaf tot de bocht wordt door aanhechtingskrachten de kracht op de mortel overgedragen ( $F_1$ ).
2. Het tweede gedeelte moet door de staafbocht naar de na de bocht gelegen stuk spouwanker worden geleid en deze kracht is ( $F_2=F-F_1$ ).

In deze bocht worden door het spouwanker drukkrachten uitgeoefend op de mortel (*Figuur 128*). Worden deze drukkrachten in de bocht te groot dan zal de mortel bezwijken en snijdt het spouwanker door de mortel heen (*Figuur 129*). Een voorbeeld van het uittrekgedrag van spouwankers met een haak is gegeven in *Grafiek 9* op pagina 54. Zoals volgt uit het uittrekgedrag is deze sterk afhankelijk van de condities waarin en waarmee de proefstukken vervaardigd zijn, zoals blijkt uit de hierop volgende analyses. Het spouwanker bereikt  $F_{t,max}$  afhankelijk van de hechtsterkte tussen steen en mortel.

### UNI-L M5-mortel

Voor de UNI-L spouwankers gemetseld in M5-mortel, zijn naast het ideale proefstuk twee gebreken geconstateerd, gemarkeerd in *Diagram 8*. Bij proefstukken met “Gebrek 4”, is ook “Gebrek 3” geconstateerd en zijn daarom in dezelfde kracht-verplaatsingsgrafiek (*Grafiek 57*) weergegeven.



*Diagram 8: Geconstateerde gebreken (oranje gearceerd) van proefstukken met UNI L spouwanker gemetseld in M5-mortel.*

### Ideale proefstuk

Het ideale proefstuk heeft dezelfde begincondities als de proefstukken met “Gebrek 3”. Pas na  $F_{t,max}$  (Punt C (Top)) in *Grafiek 57* wijken de grafieken afwijken, omdat bij proefstukken met “Gebrek 3” een directe terugval van de kracht optreedt. Bij het proefstuk met het UNI-L spouwanker gemetseld in M5-mortel is het uittrekgedrag van het ideale proefstuk ook gelijk aan dat van de proefstukken met “Gebrek 3”. Bij deze proefstukken gaat het namelijk om de hechting tussen steen en mortel. *Grafiek 57* geeft van beide groepen het uittrekgedrag. De doorgetrokken paarse lijn is het ideale proefstuk met spouwanker 21 die hetzelfde uittrekgedrag heeft. De top van de grafiek van het ideale proefstuk ligt op 3524 N met een verplaatsing van 1,22 mm. De analyse van de grafiek van het ideale proefstuk wordt in bijlage 13 gegeven.

### “Gebrek 3 en 4”

Bij elf van de twaalf proefstukken is “Gebrek 3” geconstateerd en het uittrekgedrag is gegeven in *Grafiek 57*. Twee spouwankers (spouwanker 10 en 12) hebben zowel “Gebrek 3” als “Gebrek 4” (het vervormen van het spouwanker tijdens het uittrekken; *Figuur 132* en het niet vervormen tijdens het uittrekken; *Figuur 133*). Deze twee spouwankers zijn in *Grafiek 56* gestippeld en hebben een ander uittrekgedrag.



*Figuur 132: Vervormt spouwanker na uittrekken.*



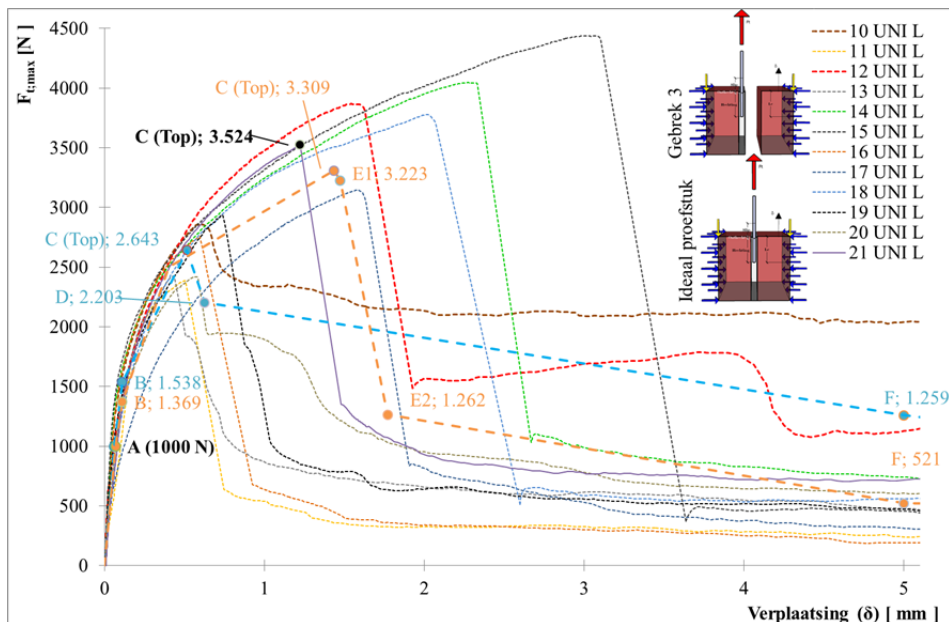
*Figuur 133: Niet vervormt spouwanker na uittrekken.*



In *Grafiek 56* zijn drie groepen proefstukken weergegeven, namelijk:

1. Het ideale proefstuk (doorgetrokken streep; spouwanker 21)
2. Proefstuk met “Gebrek 3” (dunne stippellijnen)
3. Proefstuk met “Gebrek 3 en 4” (stippellijnen; spouwanker 10 en 12)

Aan de hand van de kracht-verplaatsingsgrafieken van de elf spouwankers (exclusief ideaal proefstuk) zijn zes punten vastgelegd die het verloop van proefstukken met “Gebrek 3” en/of “Gebrek 4” aanduiden. *Grafiek 56* weergeeft twee streepjes lijnen die de gemiddelde waarden, gevonden op zes punten in de grafiek verbinden. De oranje streepjes lijn geeft de gemiddelde waarden weer van de proefstukken die na  $F_{t,max}$  een directe terugval in de kracht hebben. De blauwe streepjes lijn met de laagste gemiddelde top verbindt de punten van de spouwankers die geen directe terugval in de kracht hebben. Deze spouwankers hebben pas een directe terugval van de kracht na een verplaatsing van het spouwanker van bijvoorbeeld 8,78 mm (spouwanker 10).



*Grafiek 57:  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek van het ideale proefstuk en proefstukken met “Gebrek 3 en 4” met UNI L spouwanker gemetseld in M5-mortel. De stippellijn geeft de gemiddelde  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek weer van dit type proefstuk.*

Zoals besproken in §3.2 is de hechting tussen steen en mortel van belang bij de trekcapaciteit van het spouwanker. Hoe slechter de hechting, hoe lager  $F_{t,max}$ . Bij dit spouwanker type bepaald de hechtsterkte tussen steen en mortel de capaciteit van het spouwanker, of beter gezegd het proefstuk. Tien van de twaalf proefstukken is bezweken op de hechting tussen steen en mortel en slechts twee van de twaalf proefstukken bezweek door de hechting tussen spouwanker en mortel en daarna pas op mortel met steen. Uit de analyse van de voegen blijkt, dat het hechtoppervlak van de mortel met steen zeer klein is en de manier van vervaardigen van de proefstukken grote invloed hierop heeft.

De trekproeven op de UNI-L spouwankers hebben twee resultaten waarbij het spouwanker vervormd is. In *Grafiek 56* is terug te vinden dat spouwanker 10 en 12 een hogere restcapaciteit hebben na  $F_{t,max}$ . Door mechanische verankering van het spouwanker in de mortel, kan het spouwanker na bezwijken nog extra trekkracht opnemen (de restcapaciteit). Het plastisch vervormen van het spouwanker is dan al begonnen. Het spouwanker moet vervormen omdat de mortel om het spouwanker stijver is dan het spouwanker zelf (zie *Figuur 130(C)*). Bij een tweede terugval van de kracht in de grafiek is het spouwanker plastisch vervormd en is de mortel verbrijzeld (*Figuur 129*) en kan uit het spouwanker uit de voeg getrokken worden. Het vervormde spouwanker en aantasting van de mortel is terug te zien in *Figuur 132*.

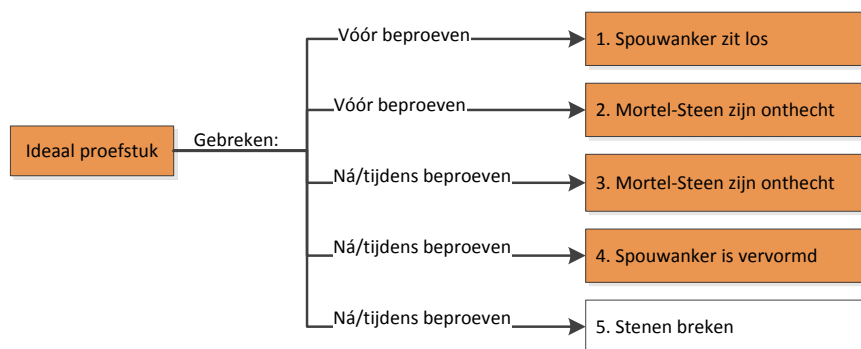
Ondanks dat het spouwanker vervormd is, hebben alle proefstukken een stijfheid van ongeveer 15.000 N/mm bij een kracht van 2000 N. Daarna zijn de stijfheden niet meer lineair en bezwijken de proefstukken ieders bij  $F_{t,max}$  afhankelijk van de hechtsterkte tussen steen en mortel. De gemiddelde  $F_{t,max}$  voor proefstukken met “Gebrek 3 en/of 4” is 3188 N bij een gemiddelde verplaatsing van 1,27 mm.



Figuur 134: De getrokken UNI-L spouwankers in M5-Mortel, de nummers 10 t/m 21.

### UNI-L M10-mortel

Voor het UNI-L spouwanker gemetseld in M10-mortel zijn naast het ideale proefstuk vier gebreken geconstateerd, gemarkeerd in *Diagram 9*. Bij proefstukken met “Gebrek 4” is ook “Gebrek 3” geconstateerd en zijn daarom in hetzelfde kracht-verplaatsingsgrafiek (*Grafiek 59*) weergegeven.



*Diagram 9: Geconstateerde gebreken (oranje gearceerd) van proefstukken met UNI L spouwanker gemetseld in M10-mortel.*

### Ideaal proefstuk

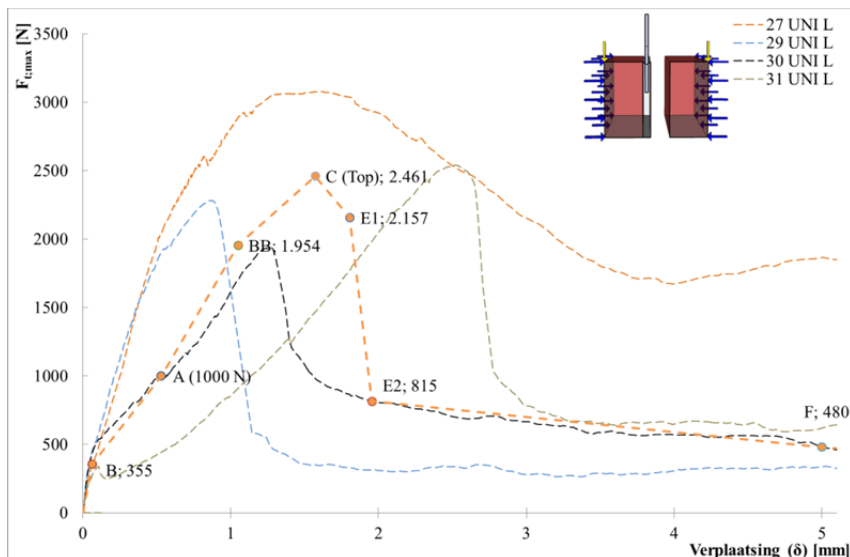
Eén proefstuk had geen gebreken. De begincondities van dit proefstuk zijn gelijk aan proefstukken met “Gebrek 3” en worden daarom in dezelfde grafiek weergegeven, *Grafiek 59*. De individuele analyse van spouwanker 22 is in bijlage 13 gegeven.

### “Gebrek 1 en 3”

Bij twee van de twaalf spouwankers treedt zowel “Gebrek 1” als “Gebrek 3” op, uitgewerkt in bijlage 13. Voordat begonnen is aan de proef, zat het spouwanker los, waardoor dit een ander uittrekgedrag geeft dan wanneer het spouwanker vast zit. Desondanks is geen verband te vinden in het uittrekgedrag van spouwanker 24 en 26. Bij spouwanker 26 zijn steen en mortel onthecht na  $F_{t,max}$  (punt E1-E2), bij spouwanker 24 is dat onbekend. Wel heeft spouwanker 24 een kleine terugval van de kracht voor  $F_{t,max}$ . Mogelijk is daar de mortel met de steen al onthecht. Na het proeven is bij beide proefstukken de steen en mortel onthecht.

### “Gebrek 2 en 4”

Bij vier van de twaalf proefstukken is de steen van de mortel onthecht voordat beproefd kon worden. Waarvan bij één van de twaalf proefstukken het spouwanker tijdens de proef vervormd is (*Figuur 132*). Om het gemiddelde uittrekgedrag van de proefstukken met “Gebrek 2” uit te werken, zijn meer gegevens nodig. Op basis van drie van de twaalf spouwankers is de oranje stippellijn bepaald in *Grafiek 58*, exclusief spouwankers vanwege het andere uittrekgedrag.



Grafiek 58:  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek van proefstuk “Gebrek 2 en 4” met UNI L spouwanker gemetseld in M10-mortel. De stippellijn geeft de gemiddelde  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek weer van dit type proefstuk.

### “Gebrek 3”

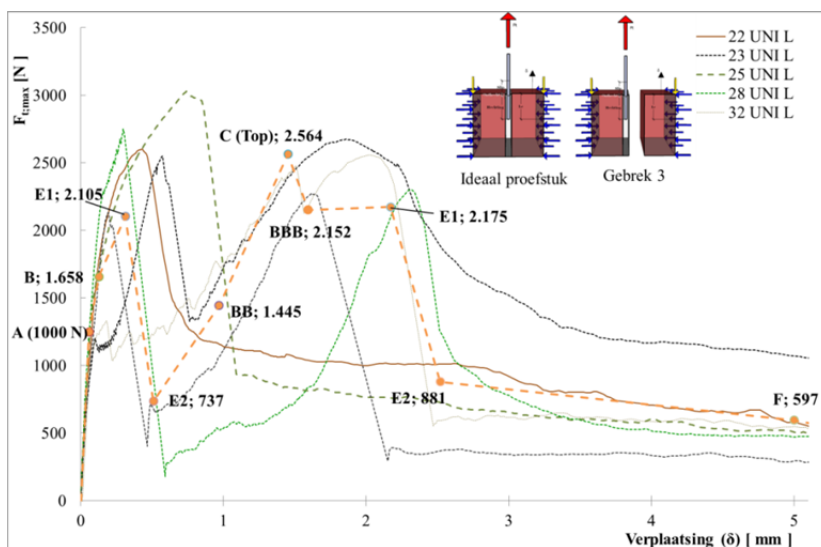
“Gebrek 3” kent vier van de twaalf proefstukken, gegeven in Grafiek 59. Spouwankers 28 is na het beproeven ook vervormd, zoals te zien is in Figuur 132. Aan de hand van de kracht-verplaatsingsgrafieken van vier spouwankers zijn tien punten vastgelegd die het verloop van dit type proefstuk aanduiden (oranje lijn in Grafiek 59). Naast de proefstukken met “Gebrek 3” wordt in Grafiek 59 ook het ideale proefstuk weergegeven.

Tot  $F_{t,max}$  zijn geen verschillen te herkennen tussen het ideale proefstuk 22 en proefstukken met “Gebrek 3”. De stijfheden van de verbinding van het spouwanker met de mortel zijn gelijk, namelijk tussen de 15.000 – 20.000 N/mm

Bij spouwanker 22 neemt na  $F_{t,max}$  de trekkracht af naarmate de verplaatsing toeneemt, tegenovergestelde van het gedrag bij proefstukken met “Gebrek 3”. Daarbij stijgt de trekkracht na de eerste terugval van de kracht weer, tot  $F_{t,max}$  van het spouwanker. De eerste piek in Grafiek 59 is het onthechten van de steen met de mortel (Figuur 135). Bij de tweede piek is  $F_{t,max}$  bereikt en bezwijkt de verbinding tussen spouwanker en mortel.

Na de eerste piek daalt de kracht tot ongeveer 737 N waarna het daarna weer toeneemt tot  $F_{t,max}$ . Het bereiken van de eerste piek wordt als  $F_{t,max}$  aangenomen vanwege de grote terugval in kracht die daarop volgt. Bij dit type spouwanker kan dus net als bij spouwankers met haak gemetseld in M5-mortel geconstateerd worden dat de capaciteit van het spouwanker afhankelijk is van de hechtsterkte tussen mortel en steen.

De gemiddelde  $F_{t,max}$  voor proefstukken met “Gebrek 3” is 2152 N bij een gemiddelde verplaatsing van 1,60 mm.



Grafiek 59:  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek van het ideale proefstuk en “Gebrek 3” met UNI-L spouwanker gemetseld in M10-mortel. De stippellijn geeft de gemiddelde  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek weer van dit type proefstuk.



Figuur 135: Het onthechten van de steen met de mortel bij het uittrekken van het UNI-L spouwanker.

## Platte spouwankers

Voor het UNI-Lijm spouwanker gelijmd in M15-mortel, zijn naast het ideale proefstuk twee gebreken geconstateerd, gemarkeerd in *Diagram 10*.

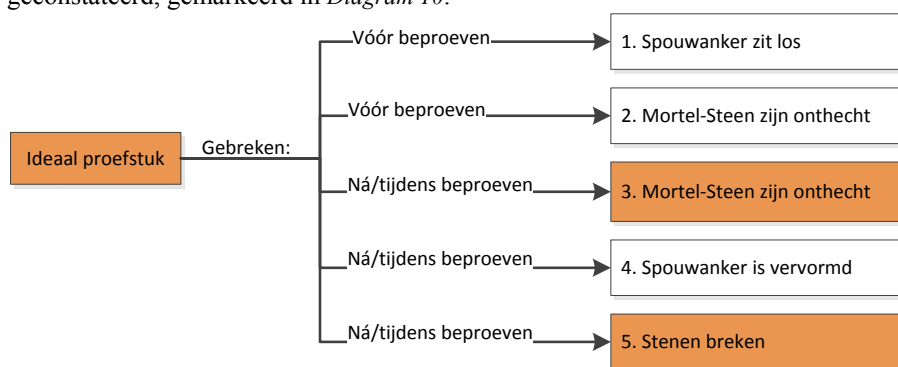


Diagram 10: Geconstateerde gebreken (oranje gearceerd) van proefstukken met UNI Lijm Spouwanker gemetseld in M15-mortel.

Het uittrekgedrag van een plat spouwanker is gelijk aan het uittrekgedrag van een recht spouwanker. Dit komt doordat het platte spouwanker alleen plat is aan de zijde die ingemetseld wordt in het gelijmde spouwblad, de rest van het spouwanker heeft een diameter van 4 mm. Het platte spouwanker heeft daarom ook dezelfde eigenschappen als een recht spouwanker.

Het bezwijken van de proefstukken is anders dan de andere twee typen spouwankers (rechte spouwankers en spouwankers met haak), omdat de verbinding tussen de lijm-mortel en steen stijver is. De drie manieren van bezwijken zijn:

1. Spouwanker wordt uit de lijm-mortel getrokken en verbrijzeld de mortel (*Figuur 138B*)
2. Voeg bezwijkt. Steen en mortel zijn onthecht en in de voeg zijn scheuren zichtbaar. In *Figuur 138C* is de afdruk van het spouwanker te zien, waaruit blijkt dat de mortel nauwelijks verbrijzeld is. De voeg is door de trekkracht open gespleten en het spouwanker kon zonder verbrijzelen van de mortel uit de mortel getrokken worden (*Figuur 138C*).
3. De stenen breken (*Figuur 138A*). Dit komt doordat de hechting tussen steen en mortel ideaal is en de buigtreksterkte van de steen lager is dan de hechtsterkte van de mortel met de steen.

De spouwankers zijn met twee stroken lijm gelijmd tussen twee stenen, waardoor de lijm niet tot aan de rand komt, (zie *Figuur 137* en *Figuur 138C*). Hierdoor hebben de spouwankers een kleinere inlegdiepte gekregen dan de 40 mm die vereist was, (zie *Figuur 136*).





Figuur 136: Plaats van het spouwanker in de voeg. Dieper ingelegd dan 40 mm waardoor de spouwbreedte vergroot is en het hechtoppervlak verkleind is.



(A)



(B)



(C)



Figuur 137: Aanbrengen lijmmortel op stenen,

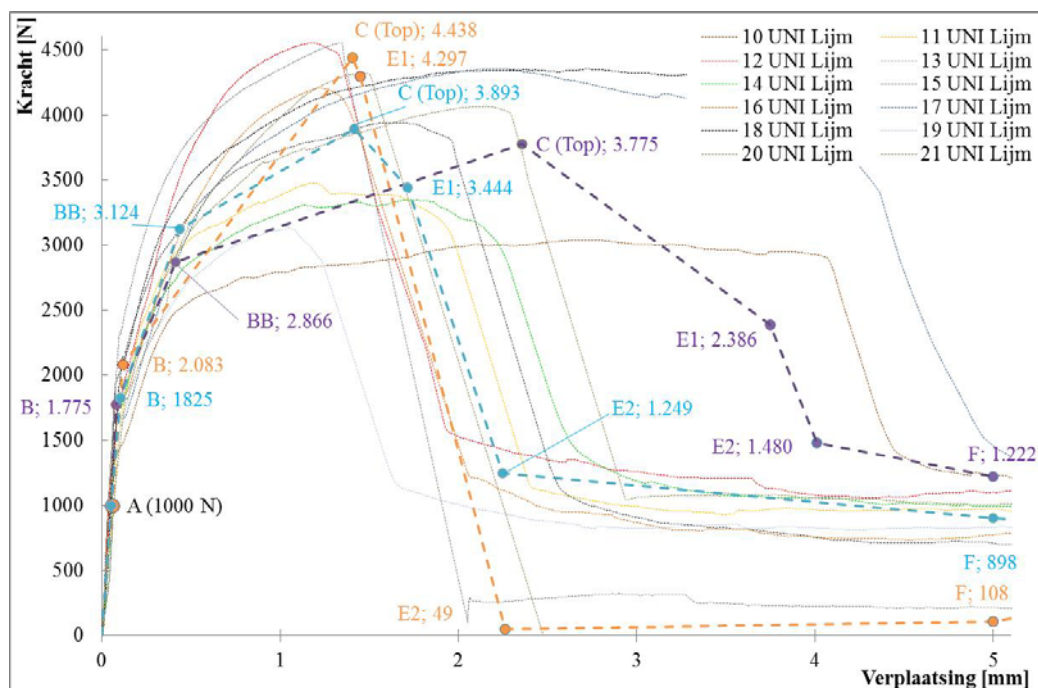
Figuur 138: Bewijken mortel na uittrekken spouwanker.

### Proefstukken Algemeen

Aan de hand van de kracht-verplaatsingsgrafieken van de proefstukken met gebreken zijn punten bepaald die het verloop van dit type gebrek aanduiden (Grafiek 60):

- Ideaal proefstuk: Paarse lijn
- Proefstuk met “Gebrek 3”: Blauwe lijn
- Proefstuk met “Gebrek 5”: Oranje lijn

Deze drie typen proefstukken zijn in één grafiek weergegeven omdat de begincondities van de proefstukken gelijk aan elkaar zijn. Daardoor zijn relaties te vinden in de kracht-verplaatsingsgrafieken van de proefstukken, weergegeven in Grafiek 60. Voor de individuele analyse van de groepen proefstukken zie bijlage 13.



Grafiek 60:  $F_{t,max}$ -verplaatsingsgrafiek voor UNI-Lijm voor ideaal proefstuk (paarse lijn), “Gebrek 3” (blauwe lijn) en “Gebrek 5” (oranje lijn). De stippellijn geeft de gemiddelde  $F_{t,max}$ -Verplaatsingsgrafiek weer van dit type proefstuk.

De punten A (1000N) en B zijn bij alle drie de groepen gelijk aan elkaar, met een stijfheid van ongeveer 6.000 N/mm. Vanaf punt B (1500N) zijn de stijfheden van de verbinding van de typen proefstukken veranderd. Na 1500 N zit een kleine terugval van de kracht bij drie van de vier grafieken (behalve spouwanker 10),

waarnaar het spouwanker zijn kracht herpakt tot  $F_{t,max}$ . De gemiddelde  $F_{t,max}$  is voor alle proefstukken verschillend, waarbij proefstukken met “Gebrek 5” de hoogste  $F_{t,max}$  hebben.

De gemiddelde verplaatsing bij 1000 N is 0,05 mm met een spreiding van +/-0,01mm. Waaruit geconstateerd kan worden dat de spouwankers dezelfde begincondities hebben gehad.

Uit *Grafiek 60* volgt:

*“Bij toename van de stijfheid van de verbinding, toename van  $F_{t,max}$  niet vanzelfsprekend is, maar mede afhankelijk is van de inlegdiepte van het spouwanker (bijlage 9 en Grafiek 10 in hoofdstuk 3).”*

*“Hoe slechter de hechting tussen steen en mortel, hoe lager  $F_{t,max}$  is.”*

Uit analyse van de voegen blijkt, dat het hechtoppervlak van de steen met de lijm mortel veel beter is dan de hechtsterkte tussen steen en mortel. De hechting bezwijkt doordat de sterkte van de steen zwakker is dan de lijm. Dit is terug te zien in  $F_{t,max}$ .

*“Twaalf proefstukken hebben dezelfde stijfheid van de verbinding tot een kracht van 2000N. Vanaf 2000 N treden verschillen op die afhankelijk zijn van het uittrekgedrag van het proefstuk, gerelateerd aan het gebrek.”*

*“Het breken van de stenen kan als bovengrens van het bezwijken van het proefstuk gezien worden.”*

### Ideaal proefstuk

Bij vier van de twaalf proefstukken zijn geen gebreken geconstateerd en zijn weergegeven in *Grafiek 60*. Uit de algemene constatering over de verplaatsing en inlegdiepte beschreven in bijlage 9, wijken spouwanker 10, 14 en 18 af. In *Grafiek 60* zijn deze afwijkingen terug te zien. Spouwanker 18 heeft pas na de 5 mm een directe terugval van de kracht (op 6,37 mm), wat niet leidt tot onthechting tussen steen en mortel. De spouwankers 17 en 18 hebben wel hetzelfde uittrekgedrag en een grote verplaatsing bij  $F_{t,max}$ . Dit geldt ook voor spouwanker 10.

De gemiddelde  $F_{t,max}$  is 3755 N met een gemiddelde verplaatsing van 0,09 mm.

### “Gebrek 3” (steen-mortel verbinding onthecht)

Bij het UNI-Lijm spouwanker zijn bij zes van de twaalf proefstukken “Gebrek 3” geconstateerd en uitgewerkt in *Grafiek 60*. Uit *Grafiek 60* volgt dat alle zes de spouwankers zijn bezweken op de hechting tussen steen en mortel, doordat in de grafiek een directe terugval van de kracht is geconstateerd. Tot punt B is de stijfheid van de verbinding van de spouwankers met de mortel nagenoeg gelijk aan elkaar, tussen de 3000-6000 N/mm. Bij 1800 N hebben de zes spouwankers een terugval van de kracht in de grafiek, net als bij het ideale proefstuk. Deze terugval van de kracht zal de eerste onthechtingsfase van de mortel met het spouwanker zijn. Na de terugval van de kracht herpakt het spouwanker de kracht (punt B-BB in *Grafiek 60*). Behalve spouwanker 19, die bezwijkt eerder en bij  $F_{t,max}$  is een directe terugval van de kracht wat resulteert in onthechting. De hechting tussen steen en mortel is slechter geweest dan bij de overige proefstukken, omdat het hechtoppervlak kleiner is, (zie *Figuur 139* en *Figuur 140*).

De gemiddelde  $F_{t,max}$  voor proefstukken met “Gebrek 3” is 3893 N bij een gemiddelde verplaatsing van 1,42 mm.



*Figuur 139:*  
*Hechtoppervlak UNI-lijm*  
*spouwanker 19.*



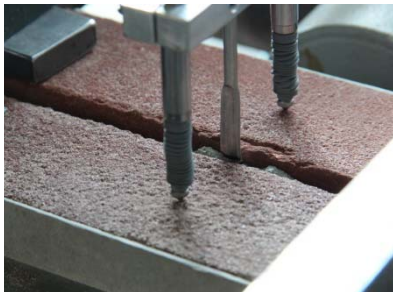
*Figuur 140: Hechtoppervlak*  
*van proefstukken met ‘Gebrek*  
*3’ van het UNI-Lijm*  
*spouwanker.*

### “Gebrek 5” (gespleten stenen)

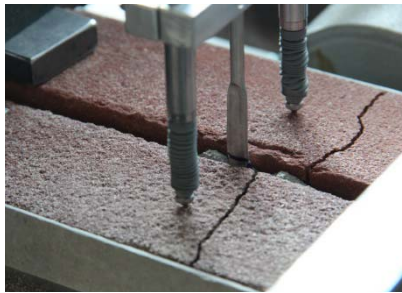
Bij slechts twee van de twaalf proefstukken is “Gebrek 5” geconstateerd en ook uitgewerkt in *Grafiek 60*. Met twee resultaten is het maken van een gemiddelde grafiek, statistisch niet verantwoordelijk. Om een indicatie te geven van het uittrekgedrag van het spouwanker, zijn zes punten bepaald met behulp van de twee grafieken (oranje lijn in *Grafiek 60*). Het uittrekgedrag van beide spouwankers zijn vrijwel gelijk aan elkaar, totdat de

buigtreksterkte van de baksteen bereikt is. Bij deze typen proefstukken is de hechtsterkte tussen de steen en mortel hoger dan de buigtreksterkte van de steen.

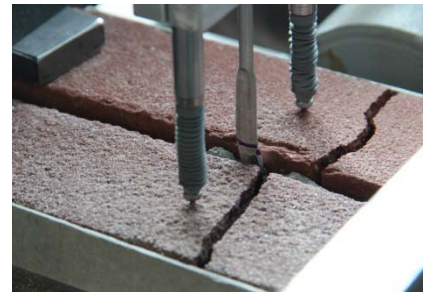
De gemiddelde  $F_{t,max}$  voor proefstukken met “Gebrek 5” is 4438 N bij een gemiddelde verplaatsing van 1,41 mm.



Geen gebreken aan het proefstuk



Het splijten van de stenen bij maximaal opneembare belasting (Punt E1-E2)



Het open splijten van de stenen

*Figuur 141: Splijten van de stenen door uittrekken spouwanker.*

### Bijlage 13 Proefresultaten spouwankers belast op trek: kracht-verplaatsingsgrafieken 2

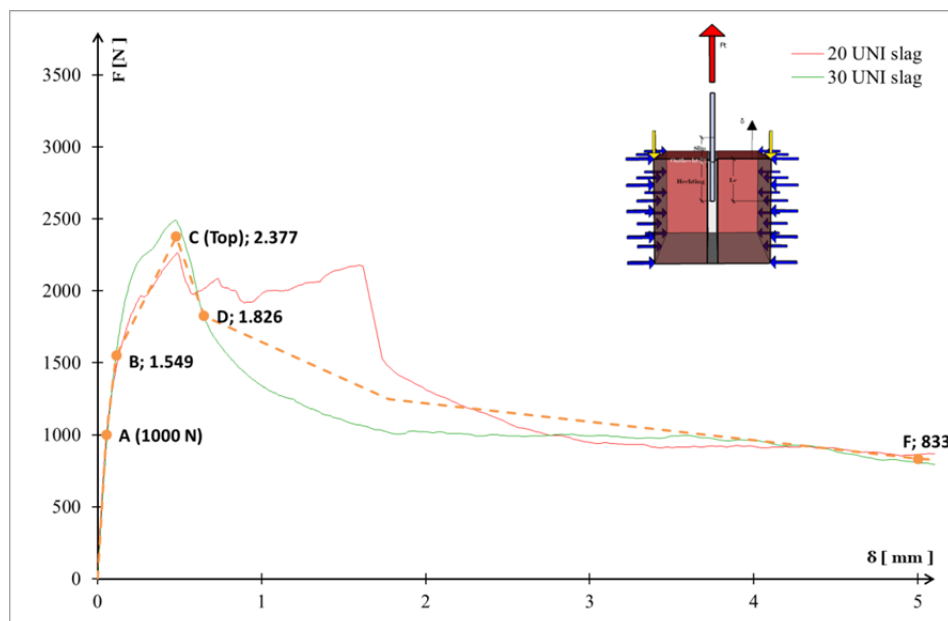
Voor alle spouwankers zijn kracht-verplaatsingsgrafieken gemaakt voor het bepalen van het uittrekgedrag en controleren van de gestelde eisen in Eurocode 6. Deze eisen luiden:

1. De maximale verplaatsing moet kleiner zijn dan 5mm
2. De verplaatsing bij  $1/3$  van  $F_{t,max}$  moet kleiner zijn dan 1 mm
3. De minimale uittrekwaarde moet gelijk aan 1000N zijn.

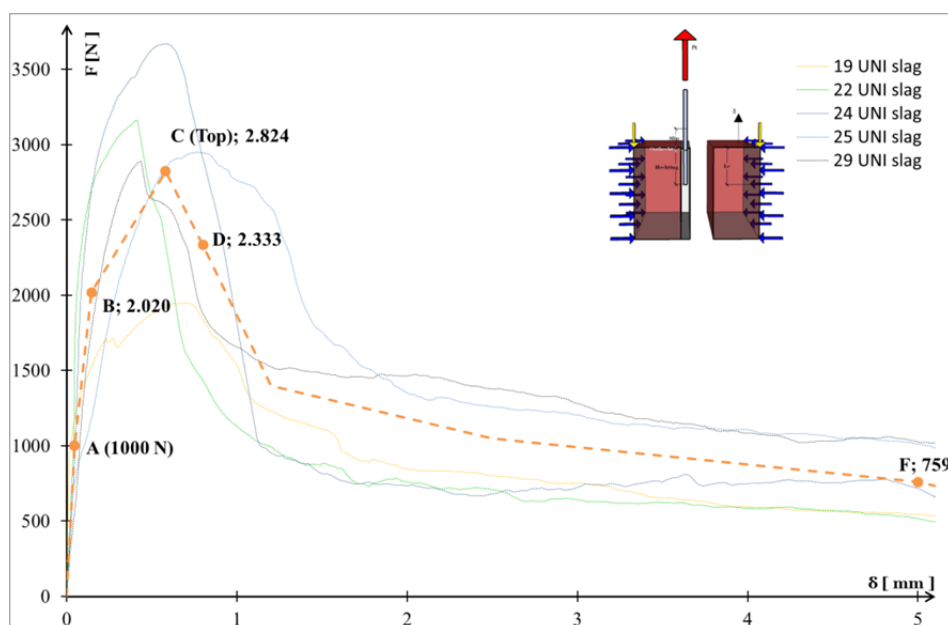
De kracht-verplaatsingsgrafieken die niet in hoofdstuk 3 en bijlage 12 uitgewerkt zijn, worden beschreven in deze bijlage opgedeeld per type spouwanker en mortelkwaliteit.

#### UNI275 M10-Mortel

In bijlage 12 zijn een aantal kracht-verplaatsingsgrafieken weergegeven. De twee hieronder weergegeven *Grafiek 61* en *Grafiek 62* geven per geconstateerd gebrek het uittrekgedrag weer van de spouwankers. In de grafieken is een verschil terug te zien in de verplaatsing die het spouwanker ondergaat voordat  $F_{t,max}$  bereikt wordt. Dit komt door de verschillende begincondities van de proefstukken. In de hieronder weergegeven grafieken worden de kracht-verplaatsingsgrafieken van het ideale proefstuk en proefstukken met “Gebrek 3” weergegeven.



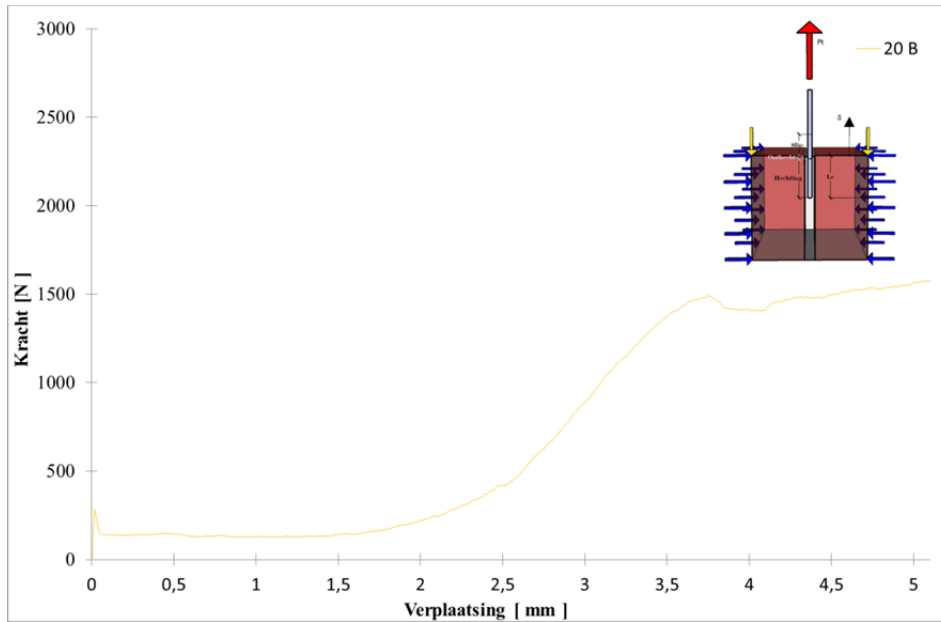
Grafiek 61: Kracht-Verplaatsingsgrafiek van het ideale proefstuk met UNI275 spouwanker gemetseld in M10-mortel.



Grafiek 62: Kracht-Verplaatsingsgrafiek van “Gebrek 3” met UNI275 spouwankers gemetseld in M10-mortel.

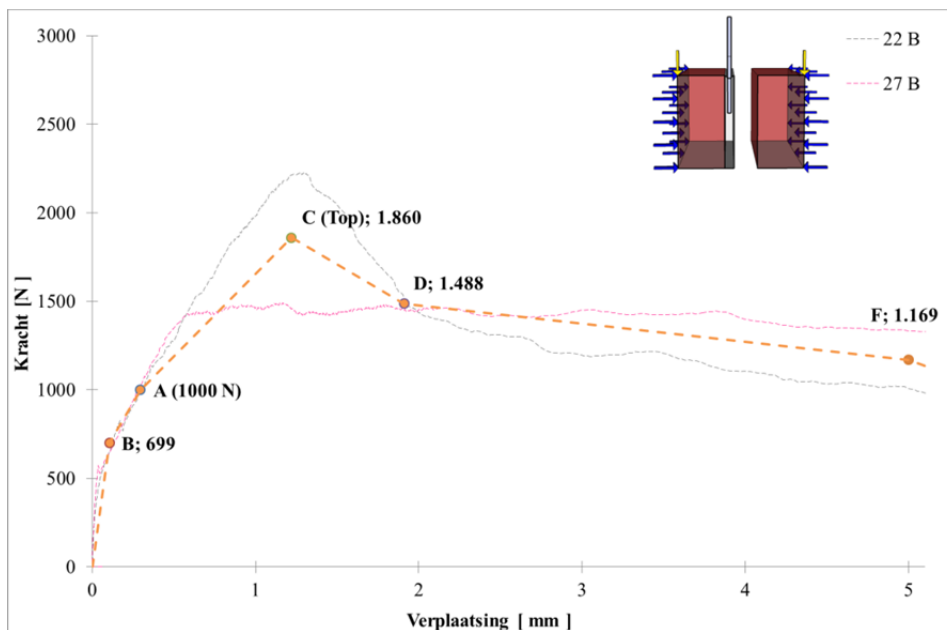
B300 M5-Mortel

In bijlage 12 zijn een aantal kracht-verplaatsingsgrafieken weergegeven, behalve van het ideale proefstuk en proefstuk met ‘‘Gebrek 2’’. In Grafiek 63 is het kracht-verplaatsingsgrafiek weergegeven van het ideale proefstuk. Dit spouwanker heeft bij  $F_{t,max}$  een verplaatsing van meer dan 5 mm waardoor deze niet voldoet aan de eis uit EC6, waarbij de verplaatsing bij  $F_{t,max}$  maximaal 5 mm mag zijn. Daarnaast voldoet het spouwanker ook niet aan de tweede eis, want het verplaatst meer dan 1 mm bij  $1/3$  van  $F_{t,max}$ . Dit spouwanker wordt niet meegenomen in de analyse.



Grafiek 63: Kracht-Verplaatsingsgrafiek van het ideale proefstuk met B300 spouwankers in M5-mortel.

In Grafiek 64 zijn de twee krachtverplaatsingsdiagrammen van proefstukken met ‘‘Gebrek 2’’ weergegeven. Deze grafieken wijken van elkaar af bij  $F_{t,max}$ , maar in het begintraject van het uittrekgedrag zijn de stijfheden van de verbinding gelijk aan elkaar. Dit suggereert dat tot ongeveer 1500 N gezegd kan worden dat het uittrekgedrag gelijk aan elkaar is. Daarna is de verbinding tussen spouwanker en mortel de invloedsfactor die bepaald wanneer de  $F_{t,max}$  bereikt wordt. De gemiddelde  $F_{t,max}$  is lager dan het totale gemiddelde omdat de steen en mortel voor het beproeven al onthecht waren.

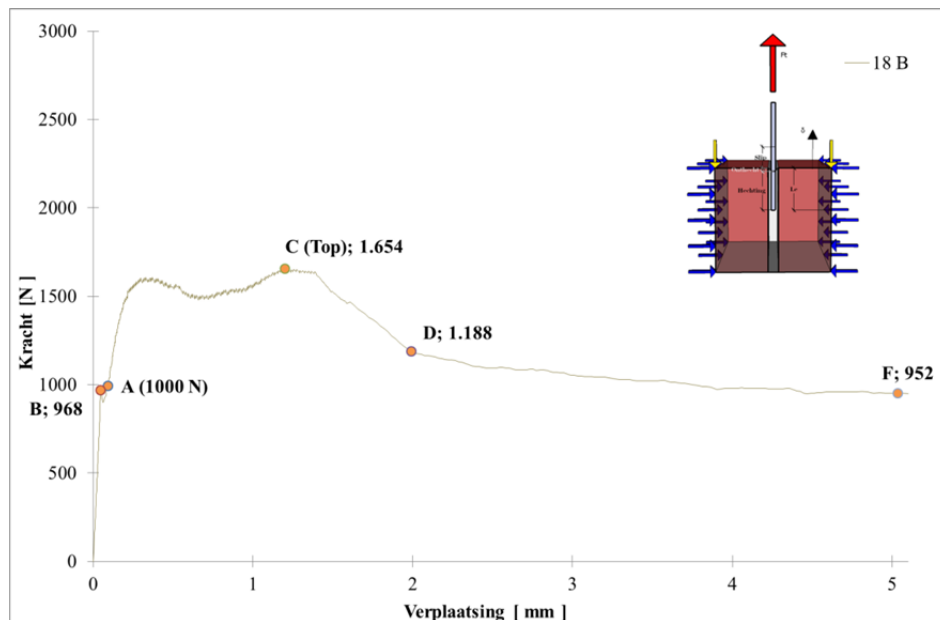


Grafiek 64: Kracht-Verplaatsingsgrafiek van proefstukken met ‘‘Gebrek 2’’ waarin B300 spouwankers zijn ingemetseld in M5-mortel.



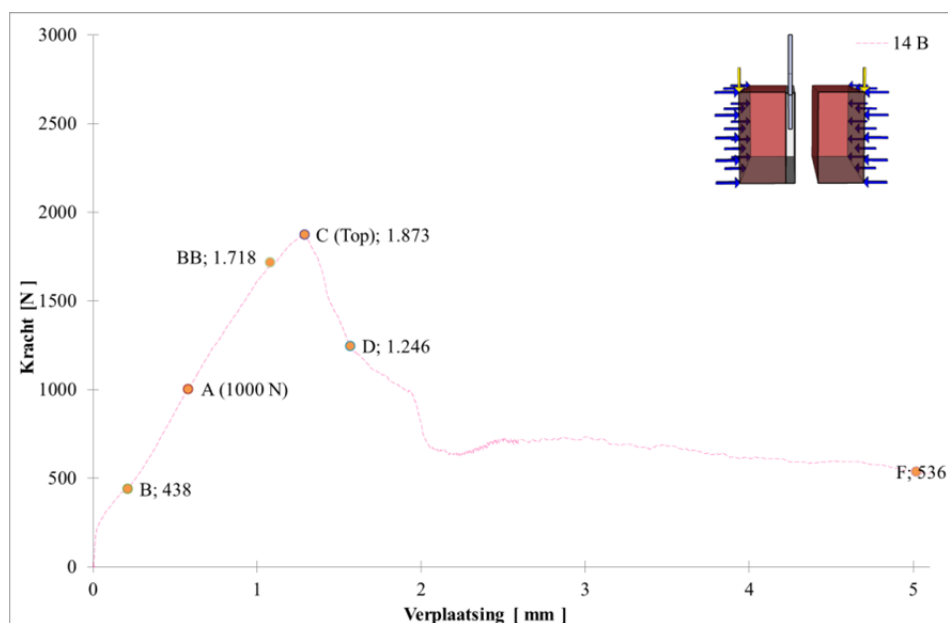
B300 M10-Mortel

In bijlage 12 zijn een aantal kracht-verplaatsingsgrafieken weergegeven, behalve van het ideale proefstuk en proefstuk met “Gebrek 2”. De twee hieronder weergegeven *Grafiek 61* en *Grafiek 62* geven per geconstateerde gebrek het uittrekgedrag weer van de spouwankers. *Grafiek 65* geeft de kracht-verplaatsingsdiagram weer van spouwanker 18B. Dit spouwanker heeft twee pieken, waarbij bij de eerste piek al gezegd kan worden dat het spouwanker bezwiken is. Omdat niet met zekerheid gezegd kan worden dat het spouwanker een tweede piek bereikt die hoger is dan de eerste. Spouwanker 18B was het enige spouwanker in het ideale proefstuk, maar heeft een van de laagste gemiddelde uittrekwaarden.



Grafiek 65: Kracht-Verplaatsingsgrafiek van het ideale proefstuk met B300 spouwankers in M10-mortel.

In *Grafiek 66* is het spouwanker in proefstukken met “Gebrek 2” weergegeven. Ook dit is het enige spouwanker in een proefstuk die voor het proeven onthecht is. Doordat het proefstuk voor het beproeven al onthecht is tussen steen en mortel is de verplaatsing van het spouwanker bij  $F_{t,max}$  groter dan de gemiddelde waarden van het B300 spouwanker (zie hoofdstuk 3 voor gemiddelde waarden).

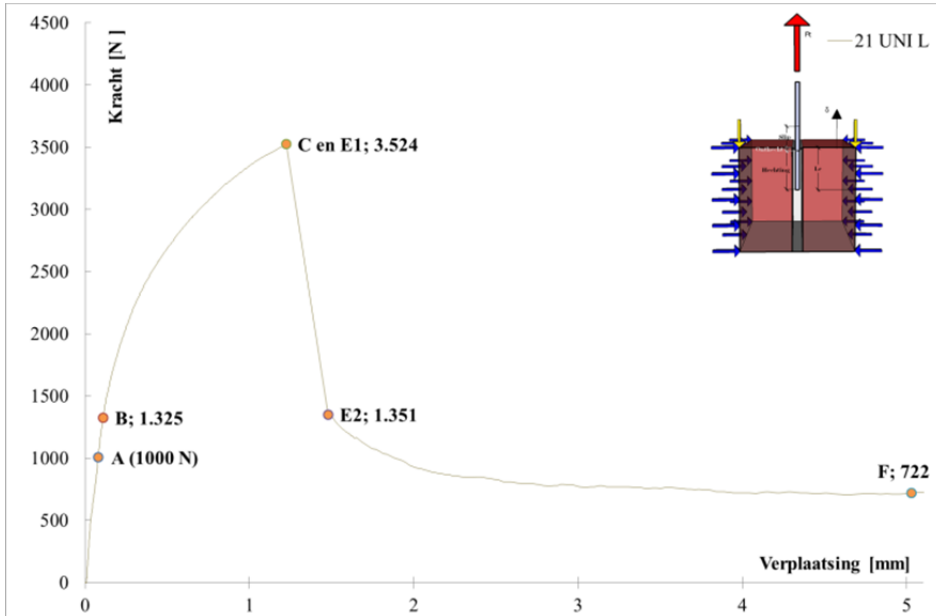


Grafiek 66: Kracht-Verplaatsingsgrafiek van proefstuk met “Gebrek 2” met B300 spouwankers in M10-mortel.

UNIL M5-Mortel

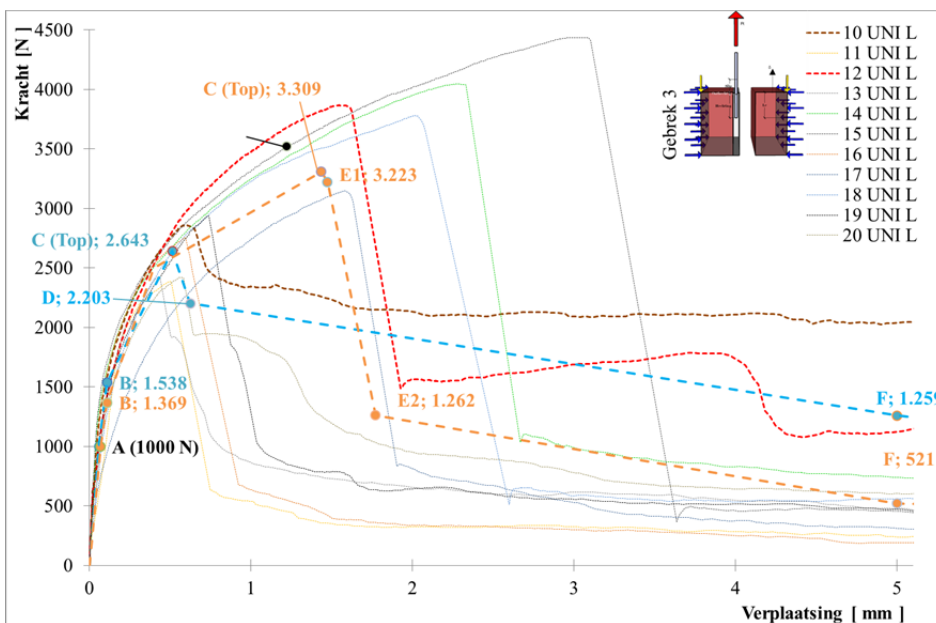
De krachtverplaatsingsgrafieken van alle geconstateerde gebreken zijn in bijlage 12 samengevoegd in één grafiek. In onderstaande twee grafieken zijn de gebreken apart geplot.

Grafiek 67 geeft het spouwanker 21 weer die als enige in een proefstuk heeft gezeten zonder gebreken. De gemiddelde  $F_{t,max}$  is hoger dan die van de proefstukken met gebreken, net als de verplaatsing die het spouwanker ondergaat. Het proefstuk is bezwiken op hechting tussen mortel en spouwanker.



Grafiek 67: Kracht-Verplaatsingsgrafiek van het ideaal proefstuk met UNI-L spouwankers in M5-mortel.

Grafiek 68 laat alle spouwankers zien waarbij de steen en mortel onthecht zijn tijdens het beproeven.  $F_{t,max}$  is bij deze proefstukken bereikt door de onthechting tussen steen en mortel. Deze onthechting resulteert in een directe terugval in de kracht (punt E1 naar punt E2). Daarbij kunnen de spouwankers vervorming en een hogere restcapaciteit overhouden zoals bij spouwankers 10 en 12.



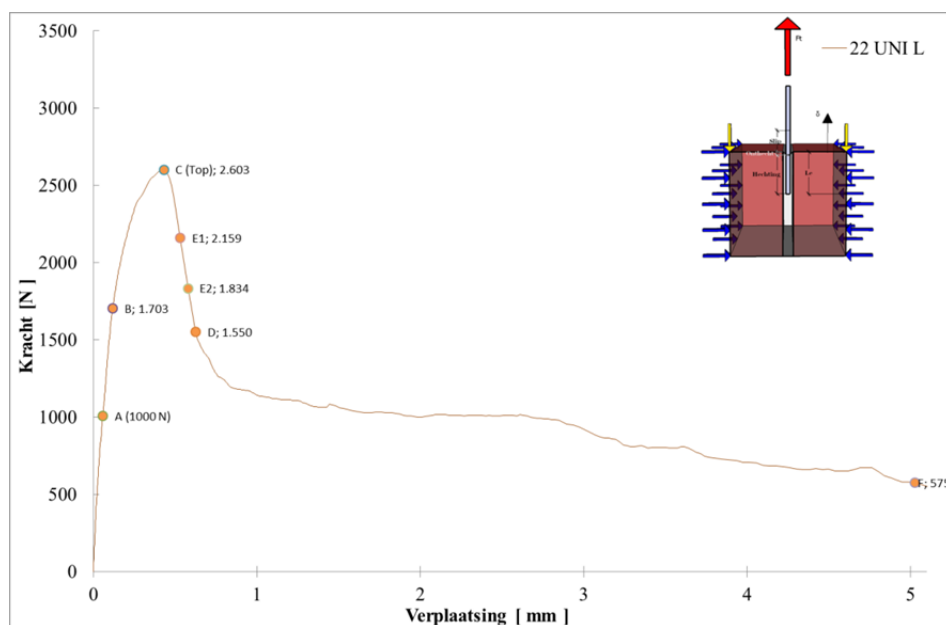
Grafiek 68: Kracht-verplaatsingsgrafiek van proefstukken met "Gebreke 3" met UNI L spouwankers in M5-mortel.



UNI L M10-Mortel

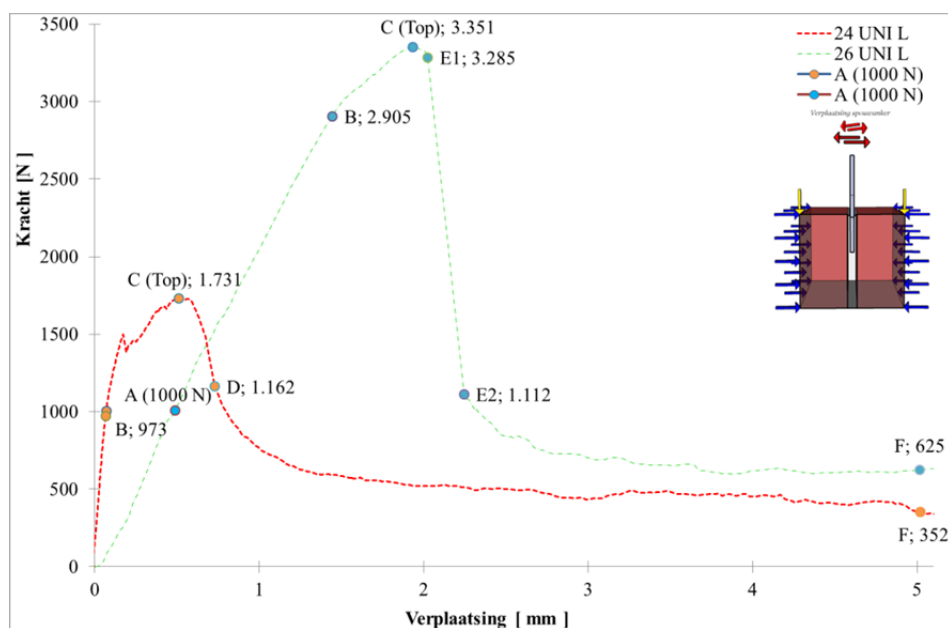
Het UNI L spouwanker gemetseld in M10-mortel heeft een ander uittrekgedrag dezelfde spouwankers gemetseld in M5-mortel. Bij de spouwankers gemetseld in M5-mortel is  $F_{t,max}$  bereikt door de onthechting tussen steen en mortel, bij M10-mortel worden twee pieken gevonden, waarbij de eerste piek de onthechting tussen steen en mortel is en de tweede piek de onthechting tussen spouwanker en mortel.

Voor spouwankers gemetseld in een ideaal proefstuk zijn deze twee pieken niet geconstateerd. Daarbij wordt hetzelfde gedrag gevonden als de UNI L spouwankers gemetseld in M5-mortel en weergegeven in *Grafiek 69*. De restcapaciteit die het spouwanker heeft is hoger dan bij rechte spouwankers, doordat het haakje aan het spouwanker een wrijving ondervindt.



Grafiek 69: Kracht-Verplaatsingsgrafiek van het Ideaal Proefstuk met het UNI-L spouwanker in M10-mortel.

Voor spouwankers die voor het beproeven al los zaten, zijn de kracht-verplaatsingsgrafieken uitgewerkt in *Grafiek 70*. De twee resultaten zijn uiteenlopend en een gemiddeld uittrekgedrag van het spouwanker is niet te definiëren. De begincondities blijken ook niet gelijk te zijn, omdat de lijnen niet een gelijke verplaatsing bij een gelijke kracht hebben.

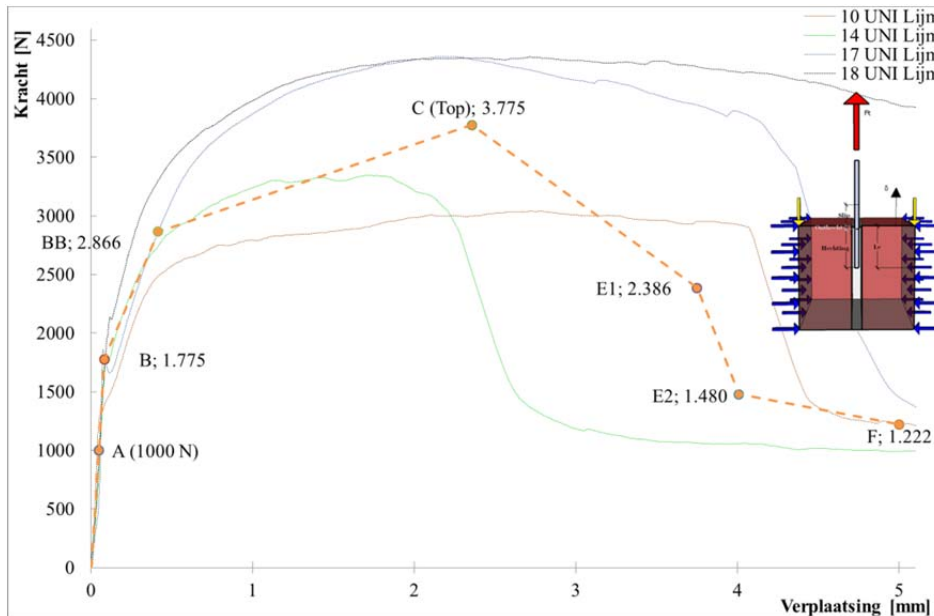


Grafiek 70: Kracht-Verplaatsingsgrafiek voor proefstukken met "Gebrek 1 en 3" met UNI-L spouwanker gemetseld in M10-mortel.

UNI Lijm M15-Mortel

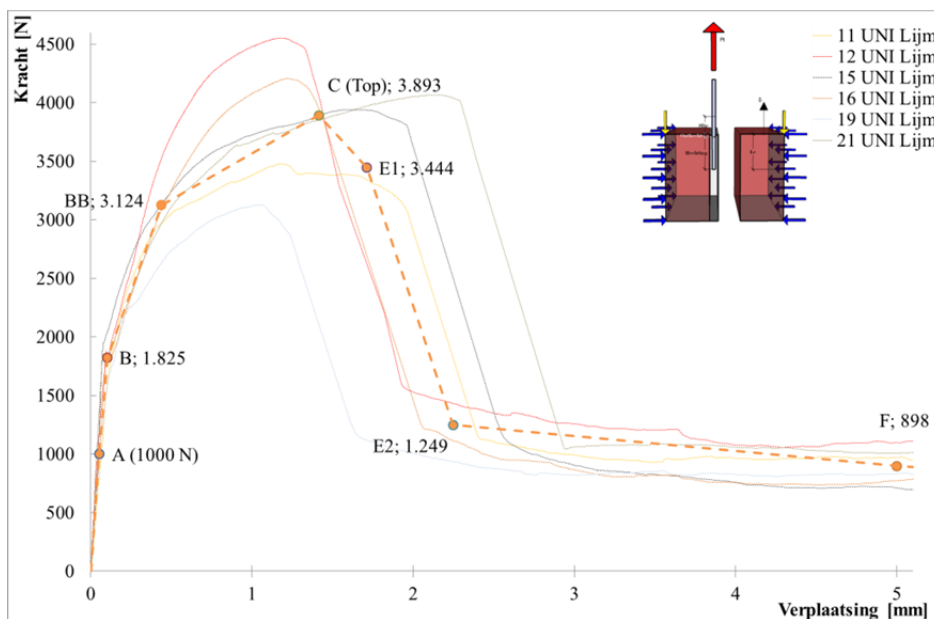
De UNI Lijm spouwankers hebben allemaal dezelfde stijfheid van de verbinding tot een kracht van ongeveer 1500N, daarna zijn de gebreken die geconstateerd zijn zichtbaar in de grafiek.

Grafiek 71 laat de kracht-verplaatsingsgrafieken zien van het ideale proefstuk. De oranje stippellijn is het gemiddelde uittrekgedrag van het spouwanker in een ideaal proefstuk. Ook hier is de restcapaciteit in vergelijking met de overige typen spouwankers hoog. Deze blijft boven de 1000 N, die anders bij de andere typen spouwankers niet hoger dan 400 N komen.



Grafiek 71: Kracht-Verplaatsingsgrafiek van het ideaal proefstuk met het UNI-Lijm spouwanker in M15-mortel.

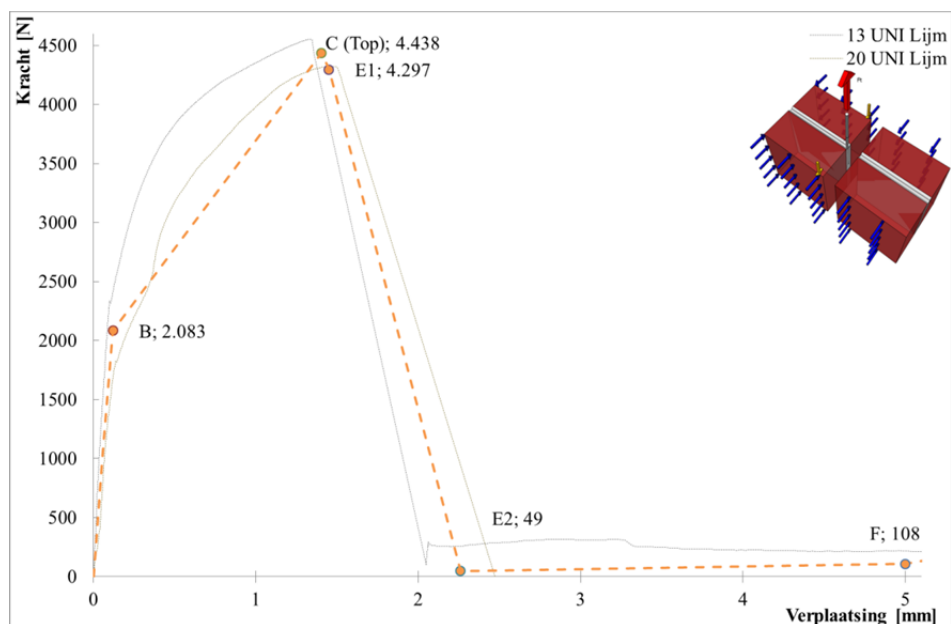
Grafiek 72 laat de kracht-verplaatsingsgrafieken van de proefstukken met “Gebrek 3” zien. Hierin zijn de stijfheden van de verbinding in de beginfase gelijk aan elkaar van alle spouwankers tot een kracht van 3000 N. Gezegd kan worden dat de verbinding tussen lijm-mortel en spouwanker stijver en eenduidiger is dan bij metselmortel met spouwanker.



Grafiek 72: Kracht-Verplaatsingsgrafiek van proefstukken met “Gebrek 3” met het UNI-Lijm spouwanker in M15-mortel.

De proefstukken met “Gebrek 5” treden alleen op bij proefstukken die gelijmd zijn, omdat de hechting tussen lijm-mortel en spouwanker stijver is dan steen met metselmortel. Dit resulteert in het bereik van de buigtreksterkte van de steen dat bij twee proefstukken het bezwijkmechanisme is van het proefstuk (*Grafiek 73*). Voor de toetsing van het spouwanker moet dus niet alleen de treksterkte van het spouwanker getoetst moet worden maar ook:

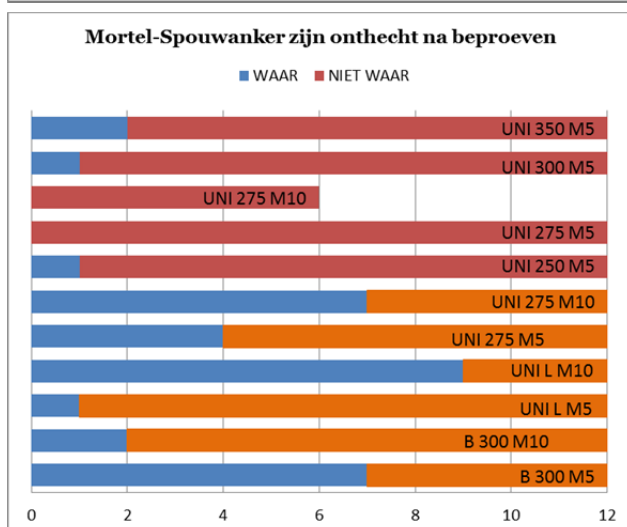
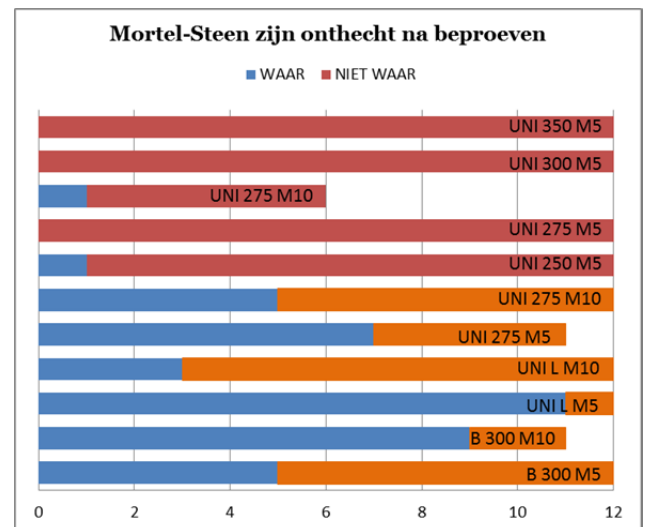
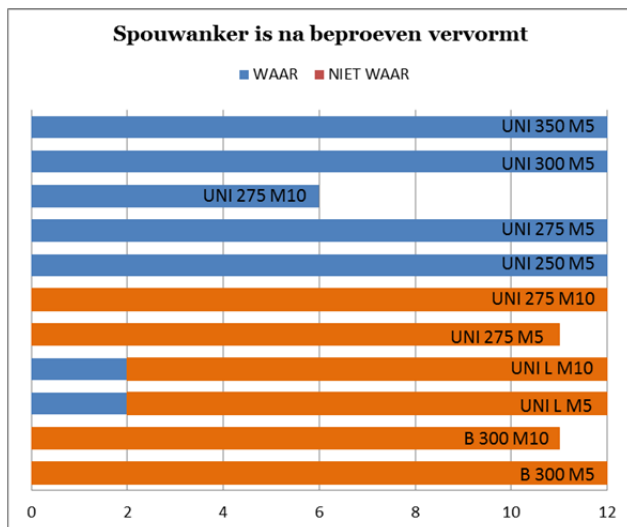
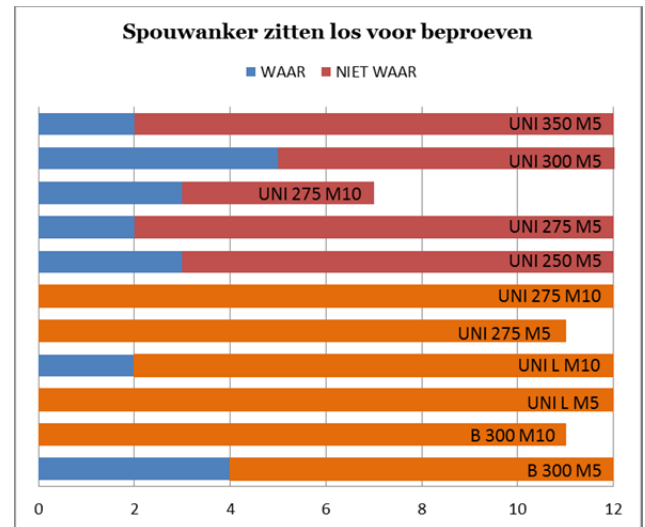
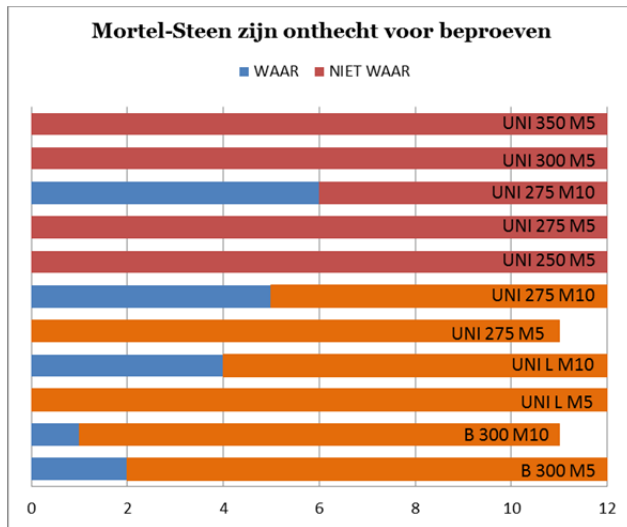
- De hechting tussen steen en mortel
- De hechting tussen spouwanker en mortel
- De buigtreksterkte van de baksteen



Grafiek 73: Kracht-Verplaatsingsgrafiek van proefstuk met “Gebrek 5” met UNI-Lijm spouwankers in M15-mortel.

**Bijlage 14 Geconstateerde gebreken**

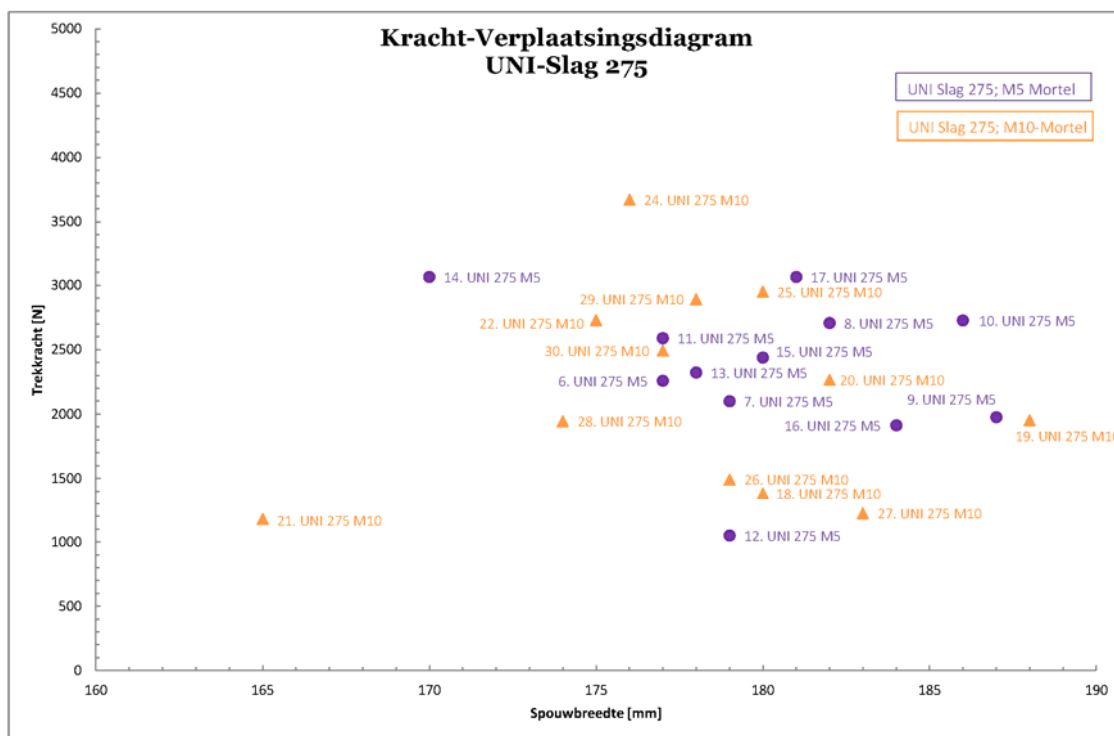
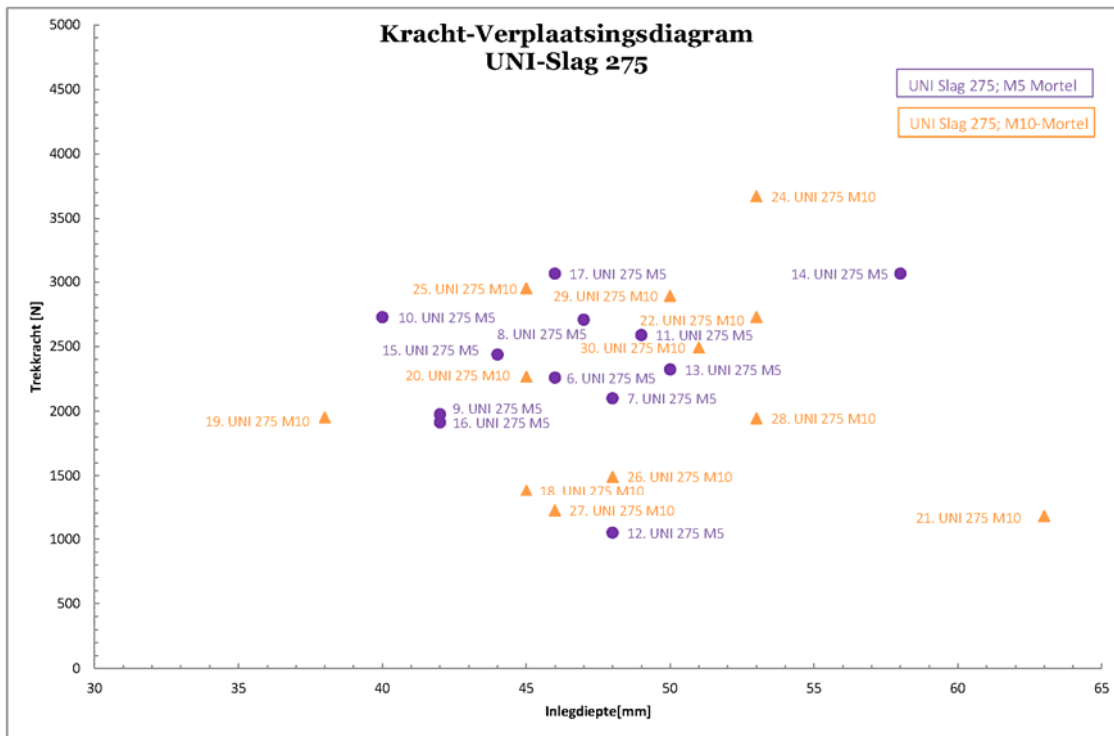
Een samenvatting van alle geconstateerde gebreken zijn in onderstaande staafgrafieken weergegeven. Daarbij zijn zowel de resultaten van de trek- als de drukproeven weergegeven, aangegeven met rood is trekproeven en oranje is drukproeven.

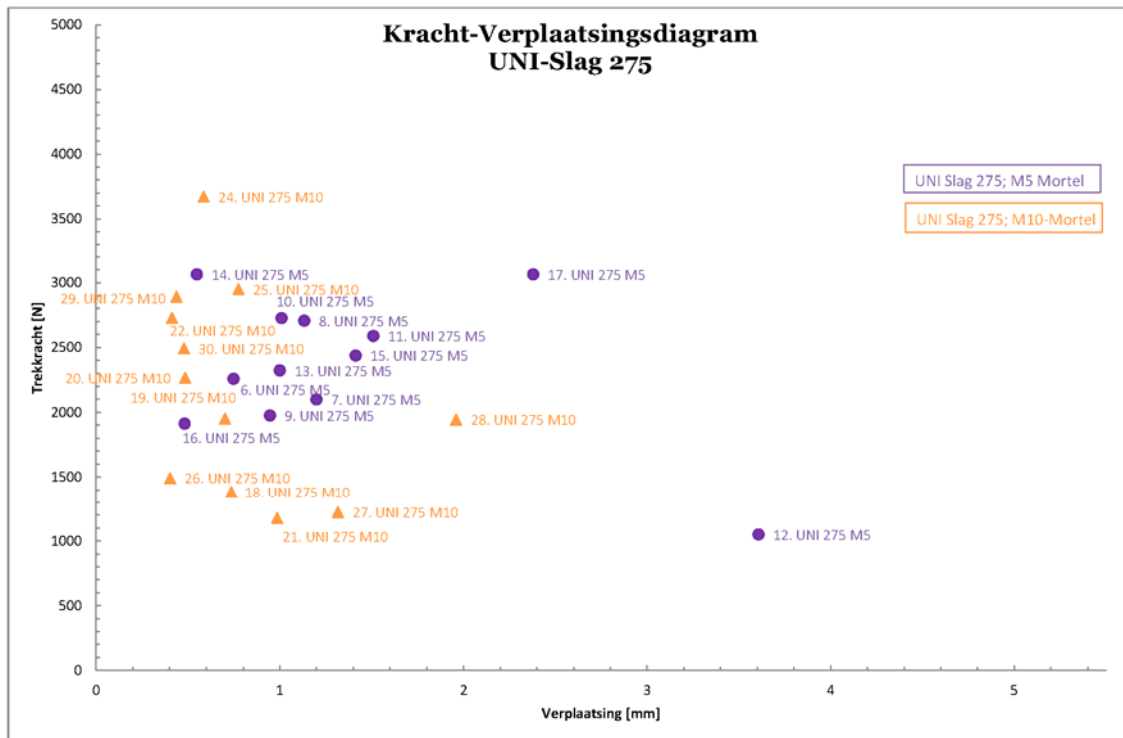


**Bijlage 15 Volgorde uitgevoerde proeven**

De volgorde van het uitvoeren van de proeven kan invloed uitoefenen op de resultaten van de proeven. In onderstaande drie grafieken is de volgorde van de proeven aangegeven door opeenvolgende nummers beginnend bij 1. Daarnaast zijn zowel de spouwankers gemetseld in M5- als M10-mortel weergegeven, respectievelijk paars en oranje aangegeven. De volgorde van de proeven is in drie grafieken aangeven:

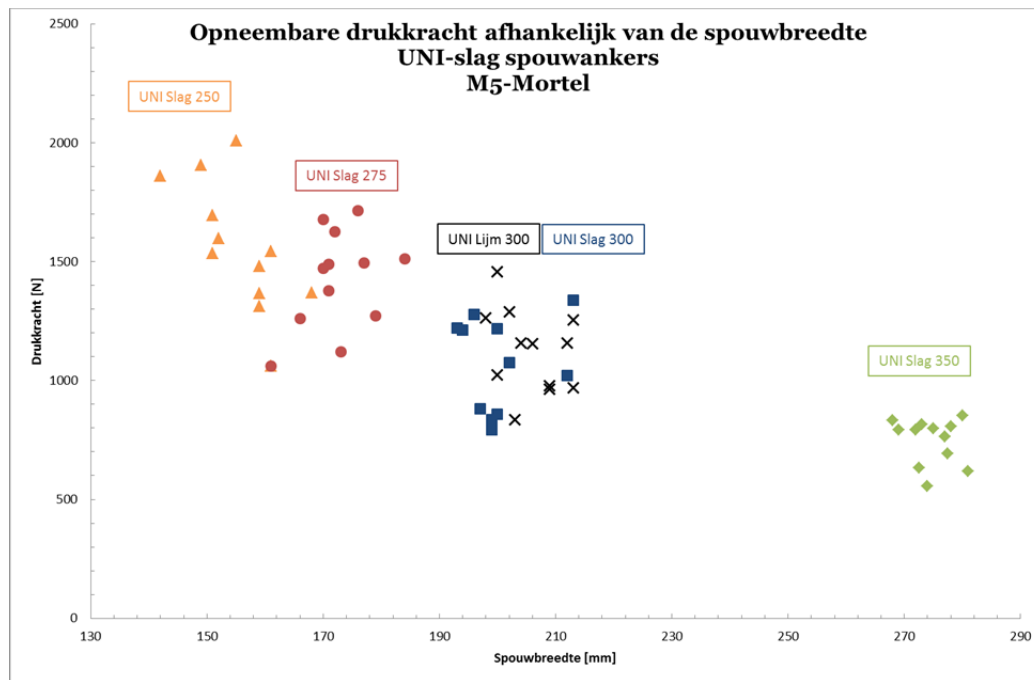
1. Kracht-inlegdieptegrafiek voor UNI275 spouwankers
2. Kracht-spouwbreedtegrafiek voor UNI 275 spouwankers
3. Kracht-verplaatsingsgrafiek voor UNI275 spouwankers





**Bijlage 16 Proefresultaten drukproeven**

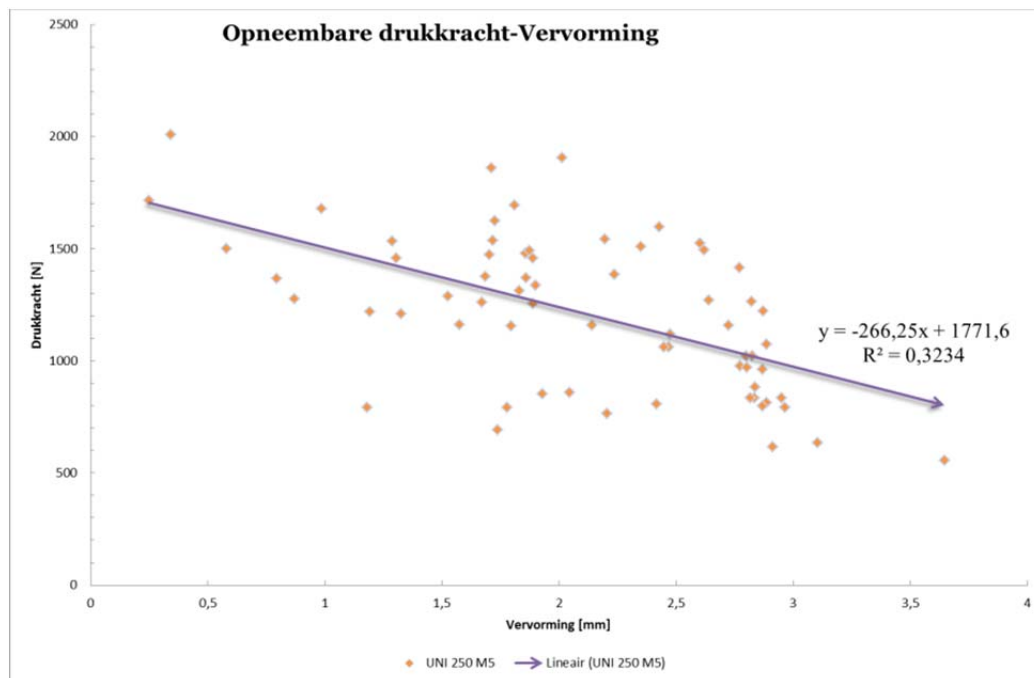
De resultaten van de drukproeven kunnen weergegeven worden in één kracht-spouwbreedte grafiek. Elke kleur geeft een ander type spouwanker weer en die zijn afhankelijk van de spouwbreedte en/of morteltype. In *Grafiek 74* zijn de vijf typen spouwankers weergegeven waarbij alleen het UNI-Lijm spouwanker in een andere mortel type is ingelijmd. De overige vier typen spouwankers zijn ingemetseld in M5-metselmortel. Uit *Grafiek 74* kan geconcludeerd worden dat een relatie tussen de lijm mortel en metselmortel aanwezig is, omdat de resultaten op gelijk drukkracht en spouwbreedte liggen. De inklemming in de mortel kan uit deze grafiek niet worden vastgesteld.



*Grafiek 74: Kracht-spouwbreedte grafiek voor spouwankers belast op druk.*

*Grafiek 75* laat de vervorming van het spouwanker ten opzichte van de kracht zien. De vervorming die uitgezet is in de grafiek, is de uitbuiging die het spouwanker heeft ondergaan exclusief de beginexcentriciteit. Uit de verkregen resultaten is te concluderen dat:

*Hoe groter de vervorming van het spouwanker, hoe lager de opneembare drukkracht ( $F_{d,max}$ ) is.*

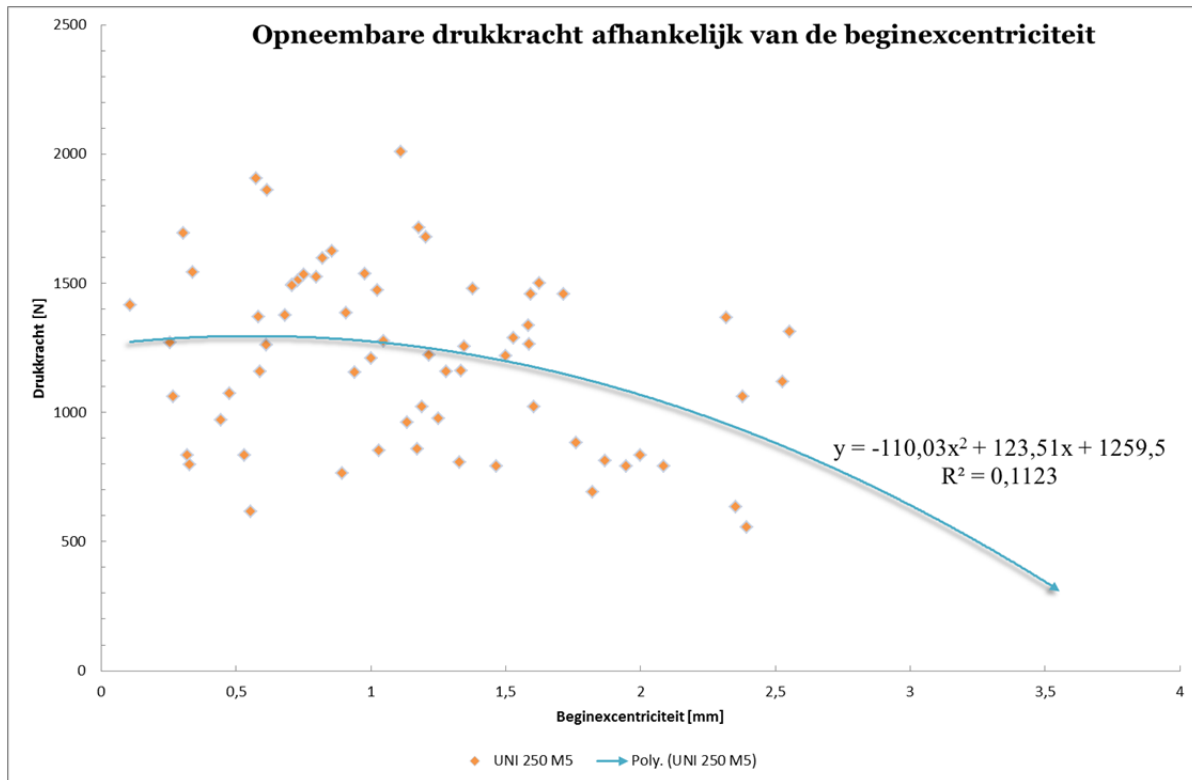


*Grafiek 75: Kracht-vervormingsgrafiek voor spouwankers belast op druk.*



Als alleen de beginexcentriciteit van het spouwanker uitgezet wordt tegen de drukkracht, is geen relatie met een fit van  $R^2=1$  of bijna gelijk daaraan te vinden. Dat wil zeggen dat deze beginexcentriciteit een kleine of geen invloed uitoefent op de opneembare drukkracht van het spouwanker. In *Grafiek 76* is de beginexcentriciteit uitgezet tegen de opneembare drukkracht. Hieruit kan geconcludeerd worden:

*Hoe groter de vervorming bij  $F_{d,max}$ , hoe lager de maximaal opneembare drukkracht.*



*Grafiek 76: Kracht-beginexcentriciteit grafiek voor op druk belaste spouwankers, waarin de beginexcentriciteit de vervorming van het spouwanker is in het hart van de spouw voor belasten.*

**Bijlage 17 Vergelijking mechanicamodellen**

Voor de bepaling van de vergelijking van de trendlijn die getrokken kan worden door de proefresultaten van de drukproeven, wordt uit de volgende vergelijking F geëlimineerd:

$$\sigma \geq \frac{M}{W} \cdot \frac{n}{n-1} + \frac{F}{A} \quad \text{waarin } n = \frac{F_E}{F} \quad (17.1)$$

Met mathematica kan F uit formule 17.1 geëlimineerd worden wat resulteert in de volgende formule:

$$F = \frac{Al^2pw + bin^2(Ae+w) + \sqrt{-4Abil^2p\pi^2w^2 + (Abei\pi^2 + Al^2pw + bin^2w)^2}}{2l^2w} \quad (17.2)$$

In deze formule zijn de volgende aanduidingen gebruikt:

A = oppervlakte spouwanker;

w = weerstandsmoment spouwanker;

b = Elasticiteitsmodulus spouwanker;

i = traagheidsmoment spouwanker;

l = kniklengte spouwanker;

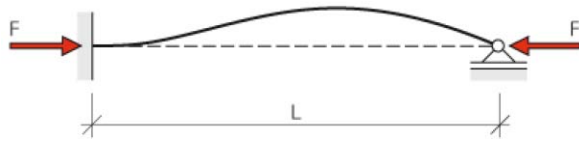
e = excentriciteit

p = vloeispanning van het spouwanker

Uit formule 17.2 kan afgeleid worden dat wanneer F vrijgemaakt wordt, de spouwbreedte in het kwadraat in de formule wordt meegenomen. Daarom wordt de trendlijn van de proefresultaten van de drukproeven een tweede graads polynoom.

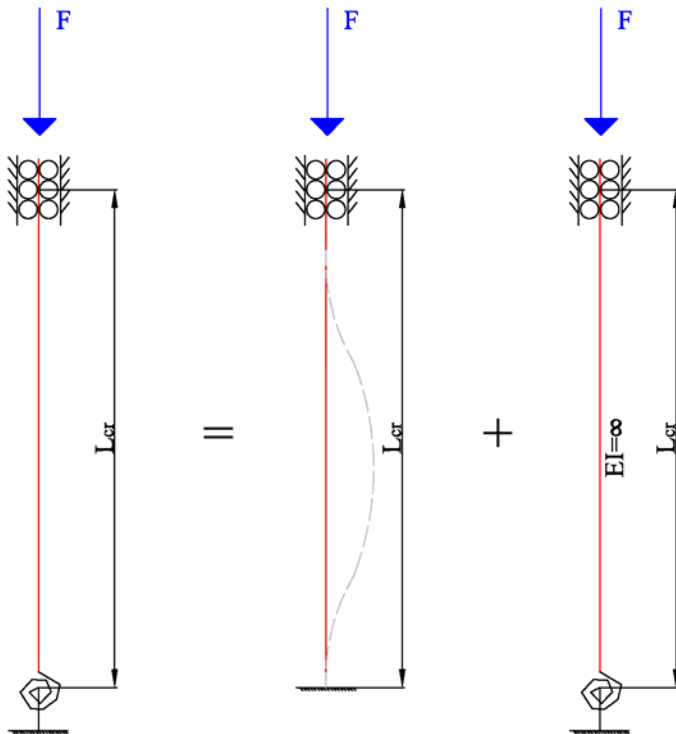
**Bijlage 18 Inklemming spouwanker in mortel**

Voor de bepaling van de inklemming van het spouwanker in de mortel is in hoofdstuk 2 het volgende mechanica schema aangehouden:



Figuur 142: mechanica schema zoals uitgewerkt is in hoofdstuk 3 voor bepaling van de kniklengte van het spouwanker

Voor de bepaling van de veerstijfheid van de inklemming in de mortel, worden de veerstijfheid als volgt berekend:



Figuur 143: Gebruikte mechanica schema voor de bepaling van de inklemming van het spouwanker door de mortel

$$\frac{1}{F_E} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2}$$

met:  $F_E = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 EI}{(0,5L)^2}$  en  $\rho = \frac{cl}{EI}$  en  $F = \frac{c}{l}$

$$\frac{1}{\frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2}} = \frac{1}{\frac{\pi^2 EI}{(0,5L)^2}} + \frac{1}{c}$$

$$\frac{L_{cr}^2}{\pi^2 EI} = \frac{(0,5L)^2}{\pi^2 EI} + \frac{l}{c}$$

$$\frac{L_{cr}^2}{l^2} = \frac{\pi^2 EI}{cl} + 0,25$$

$$\frac{L_{cr}^2}{l^2} = \frac{\pi^2}{\rho} + 0,25$$

De veerstijfheid voor lijmmortel is gelijk aan:

$$\frac{(0,70 \cdot 205,75)^2}{(205,75)^2} = \frac{\pi^2}{\rho} + 0,25$$

$$\rho = 41,12$$

$$\rho = \frac{cl}{EI}$$

$$41,12 = \frac{C \cdot 205,75}{195000 \cdot 11,19}$$

$$C = 436127,39 \text{ Nmm/rad}$$

De veerstijfheid voor M10-mortel is gelijk aan:

$$\frac{(0,72 \cdot 172,5)^2}{(172,5)^2} = \frac{\pi^2}{\rho} + 0,25$$

$$\rho = 36,77$$

$$\rho = \frac{cl}{EI}$$

$$36,77 = \frac{C \cdot 172,5}{195000 \cdot 11,16}$$

$$C = 463877,53 \text{ Nmm/rad}$$

Hieruit kan geconcludeerd worden, dat de veerstijfheden zeer dicht bij elkaar liggen en de invloed van het type mortel klein is. Uit de bepaling van de kniklengte doormiddel van optische analyse en bepaling aan de hand van buig- en normaalspanningen in het spouwanker, kan deze concludering geverifieerd worden.

Naast de berekening van de veerstijfheid van de mortel, kan ook aan de hand van de vervormingen van het spouwanker de knikkromme bepaald worden. De verplaatsingen die het spouwanker in horizontale richting heeft gemaakt zijn gelijk aan:

Tabel 30: De vervormingen van het spouwanker bij  $F_{d,max}$  en naar  $25\% \cdot F_{d,max}$  doorbelasten.

| Spouwanker                 | LVDT 1 (mortelzijde)*             |  | LVDT 2 (midden spouwanker)*       |  | LVDT 3 (250kN bank zijde)*        |  |
|----------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------------|--|-----------------------------------|--|
|                            | Verplaatsing bij $F_{d,max}$ [mm] | Verplaatsing bij $F_{d,max+25\%}$ [mm] | Verplaatsing bij $F_{d,max}$ [mm] | Verplaatsing bij $F_{d,max+25\%}$ [mm] | Verplaatsing bij $F_{d,max}$ [mm] | Verplaatsing bij $F_{d,max+25\%}$ [mm] |
| <b>UNI 250 spouwankers</b> |                                   |  |                                   |  |                                   |  |
| 1. UNI250                  | 1.59                              | 2.84                                   | 2.47                              | 3.53                                   | 1.90                              | 2.09                                   |
| 2. UNI250                  | 0.20                              | 0.95                                   | 2.01                              | 2.92                                   | 0.97                              | 0.99                                   |
| 3. UNI250                  | 1.12                              | 2.84                                   | 2.43                              | 3.46                                   | 1.36                              | 1.69                                   |
| 4. UNI250                  | 2.30                              | 2.30                                   | 1.86                              | 3.17                                   | 0.25                              | 0.27                                   |
| 5. UNI250                  | 2.05                              | 2.05                                   | 1.72                              | 3.31                                   | 0.19                              | 0.34                                   |
| 6. UNI250                  | 1.15                              | 2.70                                   | 1.83                              | 3.16                                   | 1.48                              | 1.71                                   |
| 7. UNI250                  | 0.71                              | 1.98                                   | 0.34                              | 1.91                                   | 1.29                              | 1.05                                   |
| 8. UNI250                  | 0.53                              | 1.54                                   | 0.80                              | 2.61                                   | 1.25                              | 0.38                                   |
| 9. UNI250                  | 1.10                              | 2.28                                   | 1.71                              | 2.51                                   | 1.41                              | 1.34                                   |
| 10. UNI250                 | 1.63                              | 3.36                                   | 1.86                              | 3.59                                   | 0.56                              | 0.62                                   |
| 11. UNI250                 | 1.11                              | 2.76                                   | 1.81                              | 3.57                                   | 0.61                              | 0.69                                   |
| 12. UNI250                 | 0.69                              | 1.71                                   | 2.20                              | 3.90                                   | 1.28                              | 1.37                                   |
| <b>UNI 275 spouwankers</b> |                                   |  |                                   |  |                                   |  |
| 31. UNI275                 | 0.24                              | 0.81                                   | 2.64                              | 3.22                                   | 0.74                              | 0.89                                   |
| 32. UNI275                 | 0.40                              | 1.55                                   | 2.35                              | 2.90                                   | 1.17                              | 1.20                                   |
| 33. UNI275                 | 0.50                              | 1.53                                   | 1.73                              | 3.28                                   | 0.41                              | 0.60                                   |
| 34. UNI275                 | 0.96                              | 2.43                                   | 0.99                              | 3.23                                   | 0.61                              | 0.29                                   |
| 35. UNI275                 | 1.16                              | 2.80                                   | 1.70                              | 3.21                                   | 0.62                              | 0.58                                   |
| 36. UNI275                 | 0.54                              | 1.69                                   | 2.45                              | 3.40                                   | 1.21                              | 1.19                                   |
| 37. UNI275                 | 1.05                              | 2.34                                   | 2.62                              | 3.30                                   | 1.08                              | 1.22                                   |

|  |      |      |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|------|------|
| 38. UNI275   | 0.58 | 1.83 | 1.67 | 3.24 | 0.53 | 0.36 |
| 39. UNI275   | 1.20 | 2.74 | 2.47 | 3.43 | 0.77 | 0.85 |
| 40. UNI275   | 0.57 | 1.91 | 0.25 | 2.50 | 0.97 | 0.57 |
| 41. UNI275   | 1.04 | 1.79 | 1.87 | 2.90 | 1.32 | 1.20 |
| 42. UNI275   | 1.10 | 2.47 | 1.69 | 3.35 | 1.18 | 1.30 |
| <b>UNI 300 spouwankers</b>   |      |      |      |      |      |      |
| 1. UNI300  | 1.04 | 1.91 | 1.19 | 2.12 | 0.77 | 0.61 |
| 2. UNI300  | 0.62 | 1.44 | 2.80 | 2.90 | 1.03 | 1.11 |
| 3. UNI300  | 0.75 | 1.82 | 2.87 | 3.22 | 0.58 | 0.77 |
| 4. UNI300  | 1.22 | 1.84 | 1.32 | 2.82 | 0.77 | 0.80 |
| 5. UNI300  | 1.59 | 2.80 | 1.18 | 2.74 | 0.72 | 0.85 |
| 6. UNI300  | 0.77 | 1.68 | 2.87 | 3.12 | 1.41 | 1.63 |
| 7. UNI300  | 1.80 | 2.75 | 2.95 | 3.74 | 1.11 | 1.18 |
| 8. UNI300  | 0.58 | 1.31 | 1.58 | 3.28 | 0.69 | 0.54 |
| 9. UNI300  | 1.24 | 2.13 | 1.90 | 3.61 | 1.03 | 1.09 |
| 10. UNI300   | 2.70 | 3.77 | 2.84 | 3.68 | 1.02 | 0.96 |
| 11. UNI300   | 0.31 | 1.00 | 0.87 | 2.93 | 0.38 | 0.26 |
| 12. UNI300   | 1.76 | 2.71 | 2.05 | 2.31 | 0.49 | 0.48 |
| <b>UNI 350 spouwankers</b>   |      |      |      |      |      |      |
| 1. UNI350  | 0.81 | 1.99 | 1.93 | 2.47 | 0.81 | 1.05 |
| 2. UNI350  | 0.97 | 1.74 | 2.20 | 2.22 | 0.48 | 0.47 |
| 3. UNI350  | 1.24 | 2.67 | 3.10 | 3.30 | 0.83 | 0.68 |
| 4. UNI350  | 0.29 | 0.86 | 2.87 | 2.89 | 1.01 | 1.14 |
| 5. UNI350  | 0.36 | 1.56 | 2.97 | 3.50 | 1.13 | 0.98 |
| 6. UNI350  | 0.44 | 1.53 | 2.42 | 3.35 | 0.80 | 0.85 |
| 7. UNI350  | 0.86 | 1.69 | 2.87 | 2.90 | 0.75 | 0.60 |
| 8. UNI350  | 0.70 | 1.70 | 2.83 | 3.11 | 0.90 | 0.92 |
| 9. UNI350  | 1.71 | 2.96 | 3.65 | 3.36 | 0.67 | 1.08 |
| 10. UNI350   | 0.85 | 2.01 | 1.74 | 3.13 | 0.83 | 0.07 |
| 11. UNI350   | 1.57 | 2.83 | 1.24 | 2.91 | 0.88 | 1.02 |
| 12. UNI350   | 0.59 | 1.84 | 1.78 | 1.83 | 0.67 | 0.52 |
| <b>UNI-Lijm spouwankers **</b>   |      |      |      |      |      |      |
| 22.UNILijm   | 2.67 | 2.85 | 2.82 | 2.89 | 1.67 | 1.87 |
| 23.UNILijm   | 1.93 | 2.81 | 2.72 | 2.88 | 0.79 | 0.85 |
| 24.UNILijm   | 2.39 | 2.73 | 2.87 | 2.92 | 1.58 | 1.85 |
| 25.UNILijm   | 2.06 | 2.77 | 2.83 | 2.86 | 1.15 | 1.38 |
| 26.UNILijm   | 1.60 | 2.81 | 2.14 | 2.83 | 0.52 | 0.74 |
| 27.UNILijm   | 1.80 | 2.98 | 2.82 | 3.04 | 1.19 | 1.38 |
| 28.UNILijm   | 1.14 | 2.53 | 1.89 | 3.17 | 0.97 | 1.02 |
| 29.UNILijm   | 2.82 | 2.95 | 2.77 | 2.73 | 1.11 | 1.28 |
| 30.UNILijm   |      |      |      |      |      |      |
| 31.UNILijm   | 1.87 | 3.27 | 1.80 | 2.75 | 0.35 | 0.07 |
| 32.UNILijm   | 2.73 | 2.72 | 2.80 | 2.87 | 1.12 | 1.18 |
| 33.UNILijm   | 1.06 | 1.40 | 1.53 | 2.81 | 2.18 | 2.85 |
| * De verplaatsing van de LVDT is berekend door Pythagoras te gebruiken. In zowel x- als y-richting is de vervorming van het spouwanker berekend. Door met Pythagoras de schuine component te berekenen weet men de verplaatsing van het spouwanker.  |      |      |      |      |      |      |
| ** Omdat de LVDT's een bereik hebben van 2mm + en 2mm – is bij de UNI-Lijm spouwankers niet de totale vervorming van het spouwanker gemeten, wanneer bij LVDT 1 en 2 de verplaatsing tussen de twee metingen niet toeneemt, heeft de LVDT zijn maximum bereikt. Het gaat in deze tabel slechts om een indicatie van de vervorming van het spouwanker, maar met de niet gemeten vervorming moet rekening worden gehouden. |      |      |      |      |      |      |

---

Uit *Tabel 30* kan geconcludeerd worden, dat de inklemming van het spouwanker tussen een scharnier en inklemming bevind. Als de vervorming bij  $F_{d,max}$  met de vervorming bij  $F_{d,max+25\%}$  worden vergeleken, is het volgende te concluderen:

- De verplaatsing van het spouwanker bij de inklemming van het spouwanker in de mortel wordt groter soms tot twee keer zo groot → Geen inklemming van het spouwanker maar een verende inklemming met een onbekende stijfheid van de veer.
- De verplaatsing in het hart van het spouwanker wordt ook groter
- De verplaatsing van het spouwanker bij de inklemming met de 250kN-bank stagneert en verandert tijdens het doorbelasten niet → De inklemming van het spouwanker in de 250kN-bank kan als inklemming worden aangenomen

Het mechanicschema dat is aangenomen voor de berekening van de kniklengte en bepaling van de mate van inklemming van de mortel is correct. Uit de resultaten van de vormingen volgt dezelfde conclusie. Wel moet constateert worden dat tijdens het uitvoeren van de proef het buigpunt van het spouwanker veranderd, waardoor de randcondities in de mortel ook.

**Bijlage 19 Hallergetal**

Datum uitvoeren proeven: 23-01-2014

Het hallergetal is een maat voor de wateropzuiging van de baksteen en is bepaald om bij het metselen steeds dezelfde vochtigheid van de stenen te hebben.

Voor de onderdompelingstijd is 3,5 minuut aangehouden wat resulteert in de gegevens in

Tabel 31: Resultaten uit de hallerproef.

| Steen<br>→ | Lengte x<br>breedte x<br>hoogte<br>(dm) | Legvlak<br>O=lx<br>(dm <sup>2</sup> ) | Gewicht<br>droog, G <sub>d</sub><br>(gram) | Gewicht<br>nat, G <sub>n</sub><br>(gram) | Wateropname<br>G <sub>n</sub> -G <sub>d</sub> (gram) | Hallergetal G <sub>n</sub> -<br>G <sub>n</sub> -G <sub>d</sub> /O<br>(g/dm <sup>2</sup> /min) | Initiële<br>wateropzuiging<br>G <sub>n</sub> -G <sub>d</sub> /O/10<br>(g/dm <sup>2</sup> /min) |
|------------|---|---------------------------------------|--|--|--|---|--|
| 1          | 2,04*0,95<br>*0,47                      | 1,9380                                | 1605,8                                     | 1727,9                                   | 122,1  | 18,00   | 1,800  |
| 2          | 2,03*0,94<br>*0,47                      | 1,9082                                | 1591,6                                     | 1726,8                                   | 135,2  | 20,24   | 2,024  |
| 3          | 2,04*0,96<br>*0,48                      | 1,9584                                | 1592,9                                     | 1721,6                                   | 128,7  | 18,78   | 1,878  |
| Gemiddelde |   | 1,9361                                | 1596,8                                     | 1725,4                                   | 128,7  | 19,01   | 1,901  |

Voor het bepalen van het gemiddelde hallergetal is statistiek gebruikt en resulteert in het volgende:

|                  |          |                 |          |
|------------------|----------|-----------------|----------|
| mediaan          | 18,78    |                 |          |
| gem.             | 19,00667 |                 |          |
| spr. Breedte     | 2,24     |                 |          |
| 1e kwartiel      | 18,39    |                 |          |
| 3e kwartiel      | 19,51    | min             | 18,12682 |
| kwartiel afstand | 1,12     | max             | 19,88651 |
| min              | 18       |                 |          |
| max              | 20,24    | Betrouwbaarheid | 95%      |
| st. afw.         | 1,137072 | significantie   | 5%       |
| n:               | 10       |                 |          |
| wortel n:        | 3,162278 | kritieke T      | 2,446912 |



**Bijlage 20 Bepaling normaliteit van de proefresultaten****UNI275 M5****IDEAAL M5****Bepaling verdeling:**

De verdeling is normaal verdeeld als deze nul is.

Scheefstand: zijn de waarde onder nul is de verdeling scheef georiënteerd en boven nul rechts georiënteerd.

Spitsheid: Heeft een minimale waarde van -3 waarbij de resultaten een vlakke grafiek weergeven.

$$\text{Scheefstand} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^3}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^{3/2}} \right] = -0,46 \text{ (De resultaten zijn evenwichtig verdeeld)}$$

$$\text{Spitsheid} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^4}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^2} \right] - 3 = -1,50$$

**GEBREK 3 M5:****Bepaling verdeling:**

De verdeling is normaal verdeeld als deze nul is.

Scheefstand: zijn de waarde onder nul is de verdeling scheef georiënteerd en boven nul rechts georiënteerd.

Spitsheid: Heeft een minimale waarde van -3 waarbij de resultaten een vlakke grafiek weergeven.

$$\text{Scheefstand} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^3}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^{3/2}} \right] = 0,67 \text{ (Rechts georiënteerd)}$$

$$\text{Spitsheid} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^4}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^2} \right] - 3 = -0,61$$

**UNI275 M10****GEBREK 2 M10:****Bepaling verdeling:**

De verdeling is normaal verdeeld als deze nul is.

Scheefstand: zijn de waarde onder nul is de verdeling scheef georiënteerd en boven nul rechts georiënteerd.

Spitsheid: Heeft een minimale waarde van -3 waarbij de resultaten een vlakke grafiek weergeven.

$$\text{Scheefstand} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^3}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^{3/2}} \right] = 0,93406 \text{ (rechts georiënteerd)}$$

$$\text{Spitsheid} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^4}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^2} \right] - 3 = -0,51215$$

**GEBREK 3 M10:****Bepaling verdeling:**

De verdeling is normaal verdeeld als deze nul is.

Scheefstand: zijn de waarde onder nul is de verdeling scheef georiënteerd en boven nul rechts georiënteerd.

Spitsheid: Heeft een minimale waarde van -3 waarbij de resultaten een vlakke grafiek weergeven.

$$\text{Scheefstand} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^3}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^{3/2}} \right] = -0,0998 \text{ (De resultaten zijn evenwichtig verdeeld)}$$

$$\text{Spitsheid} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^4}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^2} \right] - 3 = -1,23$$

**B300 M5**

**GEBREK 3 M5:**

Bepaling verdeling:

De verdeling is normaal verdeeld als deze nul is.

Scheefstand: zijn de waarde onder nul is de verdeling scheef geïorienteerd en boven nul rechts geïorienteerd.

Spitsheid: Heeft een minimale waarde van -3 waarbij de resultaten een vlakke grafiek weergeven.

$$\text{Scheefstand} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^3}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^{3/2}} \right] = -0,295 \text{ (De resultaten zijn evenwichtig verdeeld)}$$

$$\text{Spitsheid} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^4}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^2} \right] - 3 = -1,64452$$

**B300 M10**

**GEBREK 3 M10:**

Bepaling verdeling:

De verdeling is normaal verdeeld als deze nul is.

Scheefstand: zijn de waarde onder nul is de verdeling scheef geïorienteerd en boven nul rechts geïorienteerd.

Spitsheid: Heeft een minimale waarde van -3 waarbij de resultaten een vlakke grafiek weergeven.

$$\text{Scheefstand} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^3}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^{3/2}} \right] = -0,11465 \text{ (De resultaten zijn evenwichtig verdeeld)}$$

$$\text{Spitsheid} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^4}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^2} \right] - 3 = -1,01549$$

**UNI-L M5**

**GEBREK 3 M5:**

Bepaling verdeling:

De verdeling is normaal verdeeld als deze nul is.

Scheefstand: zijn de waarde onder nul is de verdeling scheef geïorienteerd en boven nul rechts geïorienteerd.

Spitsheid: Heeft een minimale waarde van -3 waarbij de resultaten een vlakke grafiek weergeven.

$$\text{Scheefstand} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^3}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^{3/2}} \right] = 0,42727 \text{ (De resultaten zijn evenwichtig verdeeld)}$$

$$\text{Spitsheid} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^4}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^2} \right] - 3 = -1,23054$$

**UNI-L M10****GEBREK 3 M10:****Bepaling verdeling:**

De verdeling is normaal verdeeld als deze nul is.

Scheefstand: zijn de waarde onder nul is de verdeling scheef georienteerd en boven nul rechts georienteerd.

Spitsheid: Heeft een minimale waarde van -3 waarbij de resultaten een vlakke grafiek weergeven.

$$\text{Scheefstand} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^3}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^{3/2}} \right] = -0,90112 \text{ (De resultaten zijn evenwichtig verdeeld)}$$

$$\text{Spitsheid} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^4}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^2} \right] - 3 = -0,66482$$

**UNI-LIJM M15****IDEAAL PROEFSTUK M15:****Bepaling verdeling:**

De verdeling is normaal verdeeld als deze nul is.

Scheefstand: zijn de waarde onder nul is de verdeling scheef georienteerd en boven nul rechts georienteerd.

Spitsheid: Heeft een minimale waarde van -3 waarbij de resultaten een vlakke grafiek weergeven.

$$\text{Scheefstand} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^3}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^{3/2}} \right] = -0,09913 \text{ (De resultaten zijn evenwichtig verdeeld)}$$

$$\text{Spitsheid} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^4}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^2} \right] - 3 = -1,86894$$

**GEBREK 3 M15:****Bepaling verdeling:**

De verdeling is normaal verdeeld als deze nul is.

Scheefstand: zijn de waarde onder nul is de verdeling scheef georienteerd en boven nul rechts georienteerd.

Spitsheid: Heeft een minimale waarde van -3 waarbij de resultaten een vlakke grafiek weergeven.

$$\text{Scheefstand} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^3}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^{3/2}} \right] = -0,32247 \text{ (De resultaten zijn evenwichtig verdeeld)}$$

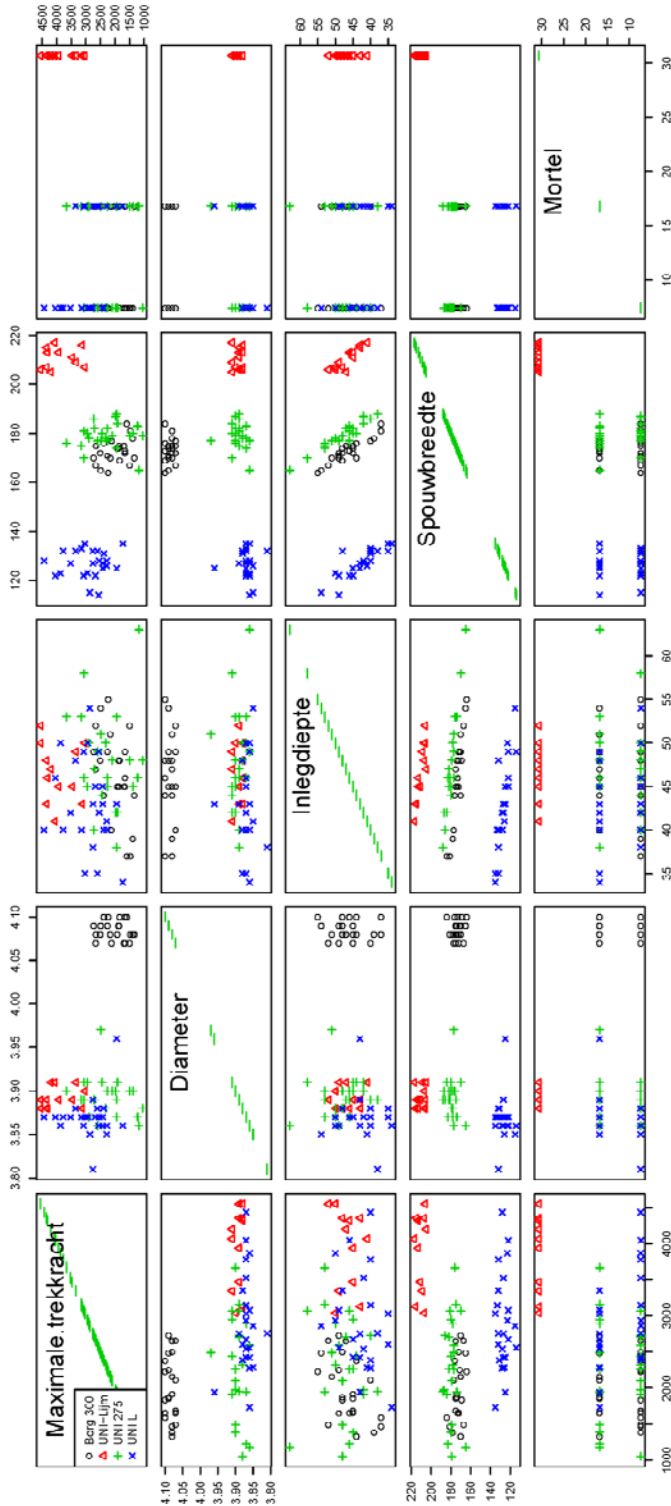
$$\text{Spitsheid} = \left[ \frac{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^4}{n} \right)}{\left( \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n} \right)^2} \right] - 3 = -1,04574$$

**Bijlage 21 Script voor trek- en drukproeven statistiek**

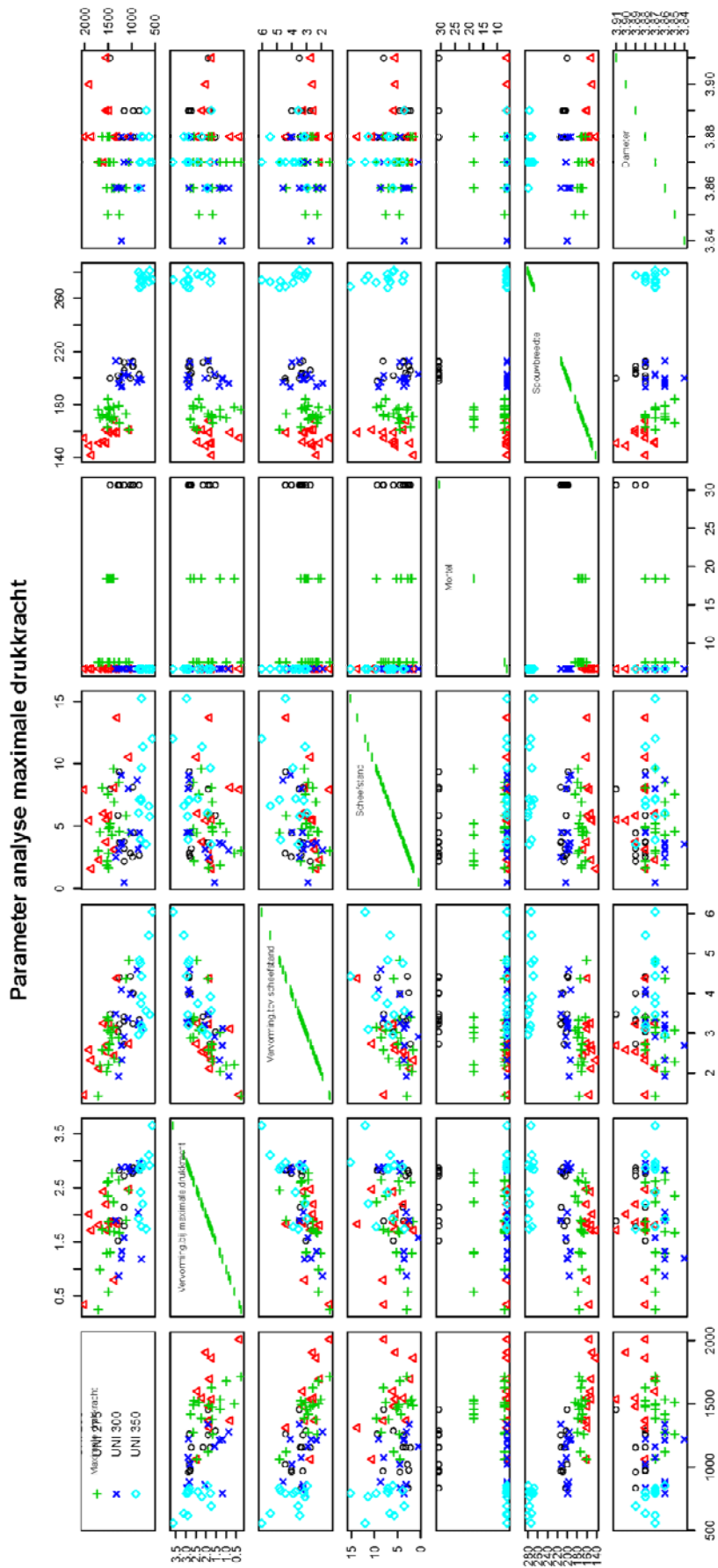
De scatterplots die op deze en de volgende pagina weergegeven zijn, zijn plots die alle parameters bevatten die gebruikt zijn bij de analyse. De scatterplot moet als volgt gelezen worden:

- Op de horizontale as moet de parameter gelezen worden die met de verticale as kruist
- Op de verticale as moet de parameter gelezen worden die met de horizontale as kruist

Oftewel, wordt naar de grafiek rechtsboven gekeken, is op de horizontale as de inlegdiepte uitgezet (staat onderaan de scatterplot in verticale lijn met de grafiek) en op de verticale as de trekkracht (staat rechts van de scatterplot in horizontale lijn met de grafiek). Zo kunnen alle parameters met elkaar vergeleken worden.



Grafiek 77: Scatterplot van de parameters die invloed kunnen uitoefenen op de trekkracht van het spouwanker



Grafiek 78: Scatterplot van de parameters die invloed kunnen uitoefenen op de drukkracht van het spouwanker

Uit deze scatterplots moeten de relatie van de parameters op de druk- of trekkracht bepaald worden (zoals beschreven in het hoofdverslag). Uit de scatterplots zijn een aantal conclusies te trekken:

**TREK:**

- Spouwbreedte wordt verkleind door diepere inlegdiepte. Dit is terug te zien in de relatie tussen beide parameters.
- B300 presteert gemiddeld slechter dan de Gebroeders Bodegraven spouwankers.
  - Grotere spreiding van de resultaten
  - Grotere verplaatsing bij  $F_{t,max}$
  - $F_{t,max}$  is lager dan bij de spouwankers van Gebroeders Bodegraven
- Een mogelijke relatie tussen verplaatsing van het spouwanker bij  $F_{t,max}$  en  $1/3$  van  $F_{t,max}$ .
- Zowel de inlegdiepte als de diameter kunnen een parameter zijn in deze analyse. Als dit niet zo is, moet de variatie tussen de proefstukken vergroot worden. Daarna kan pas definitief bepaald worden of deze twee factoren invloed hebben op  $F_{t,max}$ .
- De spouwbreedte kan een invloedsfactor zijn, maar deze relatie komt hoogstwaarschijnlijk door het gebruikte type spouwanker.

**DRUK:**

- Spouwbreedte wordt verkleind door diepere inlegdiepte. Dit is terug te zien in de relatie tussen beide parameters.
- Per type spouwanker heeft de scheefstand van het spouwanker geen invloed op de drukcapaciteit van het spouwanker. Voor de totale groep spouwanker heeft de scheefstand degelijk invloed op de drukcapaciteit van het spouwanker.
  - Daarnaast heeft de scheefstand van het spouwanker invloed op de uiteindelijke vervorming van het spouwanker.
- De vervorming van het spouwanker neemt met toename van  $F_{d,max}$  af. Hoogstwaarschijnlijk komt dit door de spouwbreedte die invloed heeft op  $F_{d,max}$ .
- De diameter van het spouwanker heeft in deze analyse geen invloed omdat dit een stabiele factor in de analyse is. Om te kijken of de diameter van het spouwanker een parameter is bij de opname van  $F_{d,max}$  dient hierna extra onderzoek te moeten worden gedaan.
- Inlegdiepte heeft per type spouwanker een kleine invloed, maar op het totaal plaatjes is deze invloed niet terug te zien. Deze wordt niet als parameter meegenomen in de studie

Voor de statistische waarde bepaling van de resultaten wordt een statistisch model opgesteld die met 95% zekerheid kan zeggen wat de minimale uittrekwaarde is van een bepaald type spouwanker in een bepaalde mortel met een inlegdiepte.

De gebruikte scripts zijn:

**Script statistiek TREK**

```
#inlezen data
setwd("C:/Users/Maaïke/Documents/Bouwkunde/Eindhoven/2de jaar Master/Fase II/Uitwerking
proeven/Proef/Statisticus")
trek <- read.csv2("Waarde trekproeven_2003_aangepast.csv")
str(trek)
names(trek)
#vergeet bij de analyse de historie niet aan te zetten, hierdoor
#kunnen de grafieken na het plotten nogmaals bekeken worden.

#ANALYSE RESULTAAT EXPERIMENTEEL ONDERZOEK
scatterplotMatrix(~Maximale.trekkracht++X1.3.van.de.trekkracht+Verplaatsing.spouwanker.bij.maximale.trekkr
acht+Verplaatsing.bij.1.3.van.de.kracht+Leverancier+Spouwbreedte+Inlegdiepte+Mortel+Diameter|
  Type.spouwanker, reg.line=FALSE, smooth=FALSE, spread=FALSE, span=0.5, id.n=0,
  diagonal='oned', by.groups=TRUE, data=trek,las=1, main="Parameterstudie maximale trekkracht")

#na optische analyse is de volgende scatterdiagram overgebleven
```

```

scatterplotMatrix(~Maximale.trekkraacht+Inlegdiepte+Mortel+Diameter|
  Type.spouwanker, reg.line=FALSE, smooth=FALSE, spread=FALSE, span=0.5, id.n=0,
  diagonal='oned', by.groups=TRUE, data=trek, las=1, main="Parameterstudie maximale trekkraacht")
#parameter 'Leverancier' is niet meegenomen in de analyse, maar is verwerkt in de
#parameter diameter. De diameters van het spouwanker is namelijk afhankelijk
#van de leverancier. De diameter is wel als parameter meegenomen in de analyse.

#Regressieanalyse voor het bepalen of de data normaal verdeeld is of niet?
RegModel.1 <- lm(Maximale.trekkraacht~Diameter+Inlegdiepte+Mortel+Type.spouwanker, data=trek,
main="Regressie analyse Trek")
summary(RegModel.1)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.1, pch=19, las=1)
par(mfrow=c(1,1))
par(pch=16, las=1, lwd=2)

#Hoe normaal verdeeld is de groep en zijn er afwijkingen te constateren?
plot(density(rstandard(RegModel.1)), main="Density plot of residuals", las=1)
#In deze plot een kleine dip bij de top van de grafiek geconstateerd. De afwijkende
#spouwankers worden niet meegenomen in de analyse van de dataset.
#Verwijderen van Data omdat deze afwijkingen vertoont
Trek2 <- trek[-c(29,54,63,44,72),]

#actief maken van de dataset Trek2, zodat de plots van de
#grafieken met deze dataset worden gemaakt.
attach(Trek2)

#Regressieanalyse maken voor de nieuwe dataset
RegModel.2 <- lm(Maximale.trekkraacht~Diameter+Inlegdiepte+Mortel+Type.spouwanker, data=Trek2)
summary(RegModel.2)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)
#Alle vier de parameters zijn significant.

#INVLOEDFACTOREN APART ANALYSEREN OF DEZE OOK ECHT INVLOED HEBBEN OP DE
#MAXIMALE TREKKRACHT
#TYPE SPOUWANKER: vergelijking verdeling van de spouwankers

Trek3 <- Trek2[Trek2$Type.spouwanker%in% c("UNI 275", "UNI L", "B300", "UNI Lijm"),]
Trek3 <- droplevels(Trek3)
attached(Trek3)

Boxplot(Maximale.trekkraacht~Type.spouwanker, data=Trek3,
id.method="y", las=1, main="Type Spouwanker")

densityPlot(Maximale.trekkraacht~Type.spouwanker, data=Trek3, bw="SJ", adjust=1,
kernel="gaussian", las=1, main="Invloed Type Spouwanker")
abline(v=min(Trek3$Maximale.trekkraacht), col="red", lwd=2.5)
abline(v=max(Trek3$Maximale.trekkraacht), col="red", lwd=2.5)
#Spouwankers 10.11.14.19 UNI Lijm veroorzaken de eerste punt in de grafiek.
#Deze hebben geen afwijking ten opzichte van de andere proefstukken. Ze kunnen
#dus niet verwijderd worden uit de #populatie.

#TYPE-SPOUWANKER IN M5: vergelijking van de type spouwankers
#gemetseld in M5-mortel. De invloed van het type bepalen.

fix(Trek2)
#verander de Spouwankers gemetseld in M5-mortel in naam ...(spouwanker
#naam) M5, dan kan de invloed van het spouwanker per mortelkwaliteit
#geanalyseerd worden.

```



```
Trek4 <- Trek2[Trek2$Type.spouwanker%in% c("B300 M5", "UNI 275 M5", "UNI L M5"),]
Trek4 <- droplevels(Trek4)
```

```
Boxplot(Maximale.trekkraft~Type.spouwanker, data=Trek4,
id.method="y",las=1,main="Trek voor spouwankers gemetseld in M5-mortel")
```

```
densityPlot(Maximale.trekkraft~Type.spouwanker, data=Trek4, bw="SJ", adjust=1,
kernel="gaussian",las=1,main="Trek voor spouwankers gemetseld in M5-mortel")
abline(v=min(Trek4$Maximale.trekkraft),col="red",lwd=2.5)
abline(v=max(Trek4$Maximale.trekkraft),col="red",lwd=2.5)
#Het spouwankertype heeft invloed op de trekkraft. Ook is een tweedeling in de
#borg spouwanker terug te zien. Deze tweedeling is nergens vanaf te leiden en is
#niet bekend waardoor de tweedeling komt.
```

```
#TYPE-SPOUWANKER BIJ M10: vergelijking van de type spouwankers
#gemetseld in M10-mortel. De invloed van het type bepalen.
fix(Trek2)
#verander de Spouwankers gemetseld in M5-mortel in
#naam ...(spouwanker naam) M10, dan kan de invloed van het
#spouwanker per mortelkwaliteit geanalyseerd worden.
Trek5 <- Trek2[Trek2$Type.spouwanker%in% c("B300 M10", "UNI 275 M10", "UNI L M10"),]
Trek5 <- droplevels(Trek5)
Boxplot(Maximale.trekkraft~Type.spouwanker, data=Trek5,
id.method="y",las=1,main="Trek voor spouwankers gemetseld in M10-mortel")
```

```
densityPlot(Maximale.trekkraft~Type.spouwanker, data=Trek5, bw="SJ", adjust=1,
kernel="gaussian",las=1,main="Trek voor spouwankers gemetseld in M10-mortel")
abline(v=min(Trek5$Maximale.trekkraft),col="red",lwd=2.5)
abline(v=max(Trek5$Maximale.trekkraft),col="red",lwd=2.5)
#het type spouwanker heeft minder invloed dan gemetseld in M5-mortel, maar het
#heeft wel invloed op de treccapaciteit van het spouwanker.
```

```
#TYPE-MORTEL PER SPOUWANKER TYPE UNI 275: analyseren van de
#invloed van de mortel op het type spouwanker
fix(Trek2)
#verander de Spouwankers gemetseld in M5 en M10-mortel in UNI 275 M10 of
#UNI 275 M5, dan kan de invloed van het spouwanker per mortelkwaliteit
#geanalyseerd worden.
Trek6 <- Trek2[Trek2$Type.spouwanker%in% c("UNI 275 M10","UNI 275 M5"),]
Trek6 <- droplevels(Trek6)
```

```
Boxplot(Maximale.trekkraft~Type.spouwanker, data=Trek6,
id.method="y",las=1,main="Trek voor UNI 275 Spouwanker M5- of M10- mortel")
```

```
densityPlot(Maximale.trekkraft~Type.spouwanker, data=Trek6, bw="SJ", adjust=1,
kernel="gaussian",las=1,main="Trek voor UNI 275 Spouwanker M5- of M10-mortel")
abline(v=min(Trek6$Maximale.trekkraft),col="red",lwd=2.5)
abline(v=max(Trek6$Maximale.trekkraft),col="red",lwd=2.5)
#De mortel heeft niet tot nauwelijks invloed op het type #spouwanker.
```

```
#TYPE-MORTEL PER SPOUWANKER TYPE B300: analyseren van de invloed
#van de mortel op het type spouwanker
```

```
fix(Trek2)
#verander de Spouwankers gemetseld in M5-mortel in B300 M10 of B300 M5,
#dan kan de invloed van het spouwanker per mortelkwaliteit geanalyseerd worden.
Trek7 <- Trek2[Trek2$Type.spouwanker%in% c("B300 M10", "B300 M5"),]
Trek7 <- droplevels(Trek7)
```

```
Boxplot(Maximale.trekkraft~Type.spouwanker, data=Trekspouw4,
id.method="y",las=1,main="Trek voor Borg 300 Spouwanker M5 of M10 mortel")
```

```
densityPlot(Maximale.trekkraft~Type.spouwanker, data=Trekspouw4, bw="SJ", adjust=1,
kernel="gaussian",las=1,main="Trek voor Borg 300 Spouwanker M5 of M10 mortel")
abline(v=min(Trekspouw4$Maximale.trekkraft),col="red",lwd=2.5)
abline(v=max(Trekspouw4$Maximale.trekkraft),col="red",lwd=2.5)
#2-deling van B300 M5, dit moet opgelost worden. De mortel heeft geen drastisch invloed op de uittrekwaarde
```

```
#TYPE-MORTEL PER SPOUWANKER TYPE UNI L: analyseren van de
#invloed van de mortel op het type spouwanker
fix(Trek2)
#verander de Spouwankers gemetseld in M5-mortel in
#UNI L M10 of UNI L M5, dan kan de invloed van het
#spouwanker per mortelkwaliteit geanalyseerd worden.
```

```
Trek8 <- Trek2[Trek2$Type.spouwanker%in% c("UNI L M10","UNI L M5"),]
Trek8 <- droplevels(Trek8)
```

```
Boxplot(Maximale.trekkraft~Type.spouwanker, data=Trek,
id.method="y",las=1,main="Trek voor UNI L Spouwanker M5 of M10 mortel")
```

```
densityPlot(Maximale.trekkraft~Type.spouwanker, data=Trek8, bw="SJ", adjust=1,
kernel="gaussian",las=1,main="Trek voor UNI L 275 Spouwanker M5 of M10 mortel")
abline(v=min(Trek8$Maximale.trekkraft),col="red",lwd=2.5)
abline(v=max(Trek8$Maximale.trekkraft),col="red",lwd=2.5)
#Grote spreiding bij UNI L M5, kleine spreiding bij UNI L M10. Daarbij is het
#gemiddelde van UNI L M5 hoger dan die van UNI L M10.
```

```
#CONCLUSIE:
#het is afhankelijk welk type spouwanker gebruikt wordt met het type mortel
#waarin het gemetseld is. Hiermee moet dus rekening worden gehouden tijdens de
#parameter studie die uitgevoerd wordt.
```

```
#TYPE MORTEL: vergelijking verdeling van de spouwankers
fix(Trek2)
#verander de Spouwankers gemetseld in M5-mortel in UNI 275 M10 of UNI 275
#M5, dan kan de invloed van het spouwanker per mortelkwaliteit geanalyseerd
#worden.
Trek9 <- Trek2[Trek2$Type.spouwanker%in% c("UNI 275 M5","UNI 275 M10", "UNI-Lijm"),]
Trek9 <- droplevels(Trek9)
```

```
Boxplot(Maximale.trekkraft~Type.spouwanker, data=Trek9,
id.method="y",las=1,main="Type mortel")
```

```
densityPlot(Maximale.trekkraft~Type.spouwanker, data=Trek9, bw="SJ", adjust=1,
kernel="gaussian",las=1,main="Type mortel"))
abline(v=min(Trek9$Maximale.trekkraft),col="red",lwd=2.5)
abline(v=max(Trek9$Maximale.trekkraft),col="red",lwd=2.5)
#Bij het UNI spouwanker lopen de kracht bij toename van de sterkte van de mortel
#toe! Bij het UNI L spouwanker is dit niet het geval. De kwaliteit van het metselen
#is dus van groot belang. Daarnaast is de combinatie tussen mortel, spouwanker
#en steen een belangrijk aspect dat onderzocht moet worden.
```

```
#LEVERANCIER: vergelijking van de spouwankers per leverancier bij
#alle spouwankers:
Trek10 <- Trek2[Trek2$Leverancier%in% c("Borgh","Gebroeders Bodegraven"),]
Trek10 <- droplevels(Trek10)
```

```
Boxplot(Maximale.trekracht~Leverancier, data=Trek10,
id.method="y",las=1,main="Invloed Leverancier")
```

```
densityPlot(Maximale.trekracht~Leverancier, data=Trek10, bw="SJ", adjust=1,
kernel="gaussian",las=1,main="Invloed Leverancier")
abline(v=min(Trek10$Maximale.trekracht),col="red",lwd=2.5)
abline(v=max(Trek10$Maximale.trekracht),col="red",lwd=2.5)
#Het verschil in leverancier is van toepassing omdat het B300
#spouwanker lagere waarden opleveren dan de spouwankers van gebroeders
#Bodegraven.
```

```
#LEVERANCIER: Alleen bij UNI 275 en Borgh 300 omdat deze dezelfde
#vorm en uitgangspunten hebben:
Trek11 <- Trek2[Type.spouwanker%in% c("B300", "UNI 275"),]
Trek11 <- droplevels(Trek11)
```

```
Boxplot(Maximale.trekracht~Leverancier, data=Trek11,
id.method="y",las=1,main="Invloed leverancier")
```

```
densityPlot(Maximale.trekracht~Leverancier, data=Trek11, bw="SJ", adjust=1,
kernel="gaussian",las=1,main="Invloed Leverancier")
abline(v=min(Trek11$Maximale.trekracht),col="red",lwd=2.5)
abline(v=max(Trek11$Maximale.trekracht),col="red",lwd=2.5)
#Zelfde conclusie als bij alle resultaten van de spouwankers van Gebroeders
#Bodegraven namelijk: Het verschil in leverancier is van toepassing omdat de
#B300 spouwankers lagere waarden opleveren dan de spouwankers van
#Gebroeders Bodegraven.
```

#Met voorgaande analyses zijn de proefresultaten gefilterd en kan de significantie, #verdeling en kans op bezwijken bepaald worden van de proefresultaten. In #onderstaande analyse wordt uitgegaan van alle spouwankers die op 1 hoop #gegooit zijn, daauit wordt de voorspelling met de gestelde randvoorwaarden #gehaald. Allereerst de regressie analyse die aan het begin van deze statistische #waarde bepaling ook is uitgevoerd.

```
RegModel.2 <- lm(Maximale.trekracht~Diameter+Inlegdiepte+Mortel+Type.spouwanker, data=Trek2)
attach(Trek2)
```

#alternatieve modellen om te analyseren of de gegevens normaal verdeeld zijn en #of bepaalde waarden buiten de populatie vallen. De interactie tussen de #parameters kan van invloed zijn:

```
RegModel.2 <- lm(Maximale.trekracht~Diameter*Inlegdiepte*Mortel*Type.spouwanker-
Diameter:Inlegdiepte:Mortel:Type.spouwanker, data=Trek2)
#de interactie tussen de parameters hebben een negatief effect op
#elkaar waardoor geen van de parameters meer significant zijn.
```

#standardized residuals versus model predictions / fitted values

#Naast de regressieanalyses kunnen de gestandaardiseerde gegevens geplotted #worden met de verwachtingen. Ook hierbij moeten de uitschieters nader #geanalyseerd worden.

```
plot(fitted(RegModel.2),rstandard(RegModel.2),xlab="fitted values",ylab="standardized
residuals",pch=19,las=1)
abline(h=0)
abline(h=2.5,col="red")
abline(h=-2.5,col="red")
```

#Geen van de spouwankers valt buiten de eisen van 2.5. De uitschieters moeten #afzonderlijk geanalyseerd worden.

#standardized residuals versus independent variable

#Bij de vorige analyses zijn uitschieters geconstateerd. Om daadwerkelijk de #uitschieters uit de populatie te mogen halen moeten deze per afzonderlijke #parameter onderzocht worden.

```
plot(Diameter,rstandard(RegModel.2),xlab="Diameter",ylab="standardized residuals", main="Standard
Residuals Diameter"))
abline(h=0)
```

```

abline(h=2.5,col="blue")
abline(h=-2.5,col="blue")

plot(Inlegdiepte,rstandard(RegModel.2),xlab="Inlegdiepte",ylab="standardized residuals",main="Standard
Residuals Inlegdiepte")
abline(h=0)
abline(h=2.5,col="orange")
abline(h=-2.5,col="orange")
#In deze grafieken zijn gaten geconstateerd, maar deze zijn niet dramatisch en kan #alleen consequenties hebben
wanneer grotere afwijkingen zichtbaar zijn.

plot(Mortel,rstandard(RegModel.2),xlab="Mortel",ylab="standardized residuals", main="Standard Residuals
Mortel")
abline(h=0)
abline(h=2.5,col="yellow")
abline(h=-2.5,col="yellow")
#Door de mortel met gestandariseerde waarde is een lineaire lijn te trekken en #heeft dus invloed op de
maximale trekkracht.

plot(Type.spouwanker,rstandard(RegModel.2),xlab="Type.spouwanker",ylab="standardized residuals",
main="Standard Residuals Type Spouwanker")
abline(h=0)
abline(h=2.5,col="red")
abline(h=-2.5,col="red")
#Spreiding neemt toe bij UNI L en UNI Lijm. Dit komt doordat deze twee type #spouwankers afhankelijk zijn
van de hechting tussen steen- en mortel en is dus de #variatie van de maximale trekkracht groter.

# studentized residuals versus hatvalues (leverage)
plot(hatvalues(RegModel.2),rstudent(RegModel.2),xlab="leverage",ylab="studentized residuals")
plot(density(rstandard(RegModel.2)),main="Density plot of residuals")

qqnorm(rstandard(RegModel.2))
qqline(rstandard(RegModel.2),col="red")

#check for normality 3: Shapiro-Wilk test for normality,
#low p-value indicates nonnormality
shapiro.test(rstandard(RegModel.2))
#P-waarde=0.44 dus de verdeling is normaal verdeeld
# model predictions with accuracy (prediction intervals)
# hier kan de waarden van de spouwankers voorspelt worden. De minimale #waarden per type spouwanker dat
gevraagd wordt. Daarnaast kan de variabelen #veranderd worden wanneer de toetstanden van de mortel
veranderen of het #spouwanker een andere diameter krijgen.
predict(RegModel.2,interval="prediction",level=0.90)

predict(RegModel.2,data.frame(Diameter=4,Inlegdiepte=40,Mortel=7.5,Type.spouwanker="B300"),interval="pr
ediction",level=0.90)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)
predict(RegModel.2,data.frame(Diameter=4,Inlegdiepte=40,Mortel=7.5,Type.spouwanker="UNI
275"),interval="prediction",level=0.90)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)
predict(RegModel.2,data.frame(Diameter=4,Inlegdiepte=40,Mortel=7.5,Type.spouwanker="UNI
L"),interval="prediction",level=0.90)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)
predict(RegModel.2,data.frame(Diameter=4,Inlegdiepte=40,Mortel=15,Type.spouwanker="B300"),interval="pr
ediction",level=0.90)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)

```

```
predict(RegModel.2,data.frame(Diameter=4,Inlegdiepte=40,Mortel=15,Type.spouwanker="UNI
275"),interval="prediction",level=0.90)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)
predict(RegModel.2,data.frame(Diameter=4,Inlegdiepte=40,Mortel=15,Type.spouwanker="UNI
L"),interval="prediction",level=0.90)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)
predict(RegModel.2,data.frame(Diameter=4,Inlegdiepte=40,Mortel=30,Type.spouwanker="UNI
Lijm"),interval="prediction",level=0.90)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)
```

### #tweede vraag

#ANALYSE DIE NIET MAG WORDEN UITGEVOERD OMDAT DE #SPOUWANKERS OP 1 HOOP WORDEN GEGOOIT, DE GEMIDDELDE #WAARDE DIE ALS UITKOMST VOLGT IS NIET DE WERKELIJK #WAARDE DIE HET SPOUWANKER KAN OPNEMEN. HET IS WEL EEN #GOEDE INDICATIE. OM DE TREKKRACHT TE BEPALEN DIE HET #SPOUWANKER KAN OPNEMEN MOET DE HIERBOVEN BESCHREVEN #ANALYSE WORDEN UITGEVOERD.

```
t.test(Trek2$Maximale.trekkkracht, alternative='less', mu=1000, conf.level=.95)
t.test(Trek2$Verplaatsing.bij.1.3.van.de.kracht, alternative='less', mu=1, conf.level=.95)

t.test(Trek2$Inlegdiepte, alternative='less', mu=40, conf.level=.95)
```

### Script statistiek DRUK

```
#Inlezen data
setwd("C:/Users/Maaïke/Documents/Bouwkunde/Eindhoven/2de jaar Master/Fase II/Uitwerking
proeven/Proef/Statisticus")
druk <- read.csv2("Waarde drukproeven_2003_aangepast_DEF.csv")
str(druk)
names(druk)
#vergeet bij de analyse de historie niet aan te zetten, hierdoor kunnen de grafieken #na het plotten nogmaals
bekeken worden.

# ANALYSE RESULTAAT EXPERIMENTEEL ONDERZOEK
#parameter diameter is niet meegenomen in de analyse omdat deze in dit #onderzoek geen parameter maar een
vaste waarde is, want deze is afhankelijk van #de leverancier. De vorm van het spouwanker is verwerkt in het
type spouwanker.
#De uitput waarden zijn: Maximale drukkracht, vervorming bij maximale #drukkracht, vervorming tov
scheefstand en scheefstand. De scheefstand is een #ander soort input dan de overige drie inputs, omdat deze niet
gestuurd/bepaald #kan worden.
scatterplotMatrix(~Maximale.drukkracht+Vervorming.bij.maximale.drukkracht+Vervorming.tov.scheefstand+S
cheefstand+Mortel+Spouwbreedte+Diameter|
  Type.spouwanker, reg.line=FALSE, smooth=FALSE, spread=FALSE, span=0.5, id.n=0,
  diagonal='oned', by.groups=TRUE, data=druk, las=1, main="Parameter analyse maximale drukkracht")

#Regressieanalyse voor het bepalen of de data normaal verdeeld is of niet?
RegModel.1 <-
lm(Maximale.drukkracht~Vervorming.bij.maximale.drukkracht+Vervorming.tov.scheefstand+Scheefstand+Spo
uwbreedte, data=druk)
summary(RegModel.1)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.1,pch=19,las=1)
par(mfrow=c(1,1))
par(pch=16,las=1,lwd=2)

#Hoe normaal verdeeld is de groep en zijn er afwijkingen te constateren?
plot(density(rstandard(RegModel.1)),main="Density plot of residuals",las=1)
#Zeer normale verdeling op het plaatje te zien. Geen oneffenheden in de grafiek.
```

```
#Verwijderen van Data omdat deze afwijkingen vertoont 1. UNI 250, 37. UNI 300 #en 29. UNI 275 worden
verwijderd omdat dit spouwanker voordat beproefd #wordt los zit. 37. UNI 300 heeft andere randvoorwaarden
gehad, doordat dit het #eerste proefstuk was en daardoor is deze niet meegenomen in de analyse.
```

```
Druk2 <- druk[-c(1,37,29,39,55),]
```

```
#actief maken van de dataset Druk2, zodat de plots van de grafieken met deze #dataset worden gemaakt.
attach(Druk2)
```

```
#Regressieanalyse maken voor de nieuwe dataset
```

```
RegModel.2 <-
```

```
lm(Maximale.drukkracht~Vervorming.tov.scheefstand+Scheefstand+Inlegdiepte+Spouwbreedte+Diameter,
  data=Druk2)
```

```
summary(RegModel.2)
```

```
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
```

```
plot(RegModel.2)
```

```
#Alle parameters zijn significant, ook bij toevoeging van de parameters die #twijfelachtig zijn.
```

```
#INVLOEDFACTOREN APART ANALYSEREN OF DEZE OOK ECHT #INVLOED HEBBEN OP DE
MAXIMALE DRUKKRACHT
```

```
#TYPE SPOUWANKER: vergelijking UNI-lijm en UNI 300 want die hebben #dezelfde spouwbreedte en kan de
invloed van het type spouwanker los van de #spouwbreedte geanalyseerd worden
```

```
Druk3 <- Druk2[Druk2$Type.spouwanker%in% c("UNI-Lijm 275","UNI 300"),]
```

```
Druk3 <- droplevels(Druk3)
```

```
attach(Druk3)
```

```
#Detail analyse voor de invloed van het type spouwanker
```

```
scatterplotMatrix(~Maximale.drukkracht+Vervorming.bij.maximale.drukkracht+Vervorming.tov.scheefstand+S
cheefstand+Spouwbreedte+Diameter|
```

```
  Type.spouwanker, reg.line=FALSE, smooth=FALSE, spread=FALSE, span=0.5, id.n=0,
```

```
  diagonal='oned', by.groups=TRUE, data=Druk3,las=1,main="Druk voor alleen UNI-Lijm en UNI 300")
```

```
Boxplot(Maximale.drukkracht~Type.spouwanker, data=Druk3,
```

```
id.method="y",las=1,main="Druk voor alleen UNI-Lijm en UNI 300")
```

```
densityPlot(Maximale.drukkracht~Type.spouwanker, data=Druk3, bw="SJ", adjust=1,
```

```
kernel="gaussian",las=1,main="Druk voor alleen UNI-Lijm en UNI 300")
```

```
abline(v=min(Druk3$Maximale.drukkracht),col="red",lwd=2.5)
```

```
abline(v=max(Druk3$Maximale.drukkracht),col="red",lwd=2.5)
```

```
#De type UNI-Lijm 300 en UNI 300 vertonen geen verschil, waardoor #geconcludeerd kan worden dat het type
spouwanker in dit experimentele #onderzoek geen invloed heeft op Fdmax. De spouwbreedte is wel maatgevend
en #daarin is tevens het type spouwanker verwerkt.
```

```
#TYPE-MORTEL: vergelijking UNI-275 M5 en UNI-275 M10 want het zijn #dezelfde spouwankers gemetseld
in verschillende morteltypes
```

```
fix(Druk2)
```

```
#verander de UNI-275 gemetseld in M10-mortel in UNI 275 M10, dan kan de #invloed van de mortel ook
geanalyseerd worden.
```

```
Druk4 <- Druk2[Druk2$Type.spouwanker%in% c("UNI 275","UNI 275 M10"),]
```

```
Druk4 <- droplevels(Druk4)
```

```
Boxplot(Maximale.drukkracht~Type.spouwanker, data=Druk4,
```

```
id.method="y",las=1,main="Druk voor UNI 275 in M5 of M10 mortel")
```

```
densityPlot(Maximale.drukkracht~Type.spouwanker, data=Druk4, bw="SJ", adjust=1,
```

```
kernel="gaussian",las=1,main="Druk voor UNI 275 in M5 of M10 mortel")
```

```
abline(v=min(Druk4$Maximale.drukkracht),col="red",lwd=2.5)
```

```
abline(v=max(Druk4$Maximale.drukkracht),col="red",lwd=2.5)
```

```
#de spreiding van M5-mortel is groter dan die van M10-mortel. Er zijn 6 #proefstukken M10-mortel beproefd en
12 proefstukken M5-mortel. dit kan de #spreiding veroorzaken. Het gemiddelde zit wel op dezelfde hoogte.
```

```
Voor #bepaling van de invloed van de mortel, moeten de spouwbreedtes/type #spouwankers gevarieerd worden.
```

```
#ALLE TYPE SPOUWANKERS: vergelijking verdeling van de spouwankers
Boxplot(Maximale.drukkracht~Type.spouwanker, data=Druk2,
id.method="y",las=1,main="Maximale drukkracht voor alle type spouwankers")
```

```
densityPlot(Maximale.drukkracht~Type.spouwanker, data=Druk2, bw="SJ", adjust=1,
kernel="gaussian",las=1,main="Maximale drukkracht voor alle type spouwankers")
abline(v=min(Druk2$Maximale.drukkracht),col="red",lwd=2.5)
abline(v=max(Druk2$Maximale.drukkracht),col="red",lwd=2.5)
#Uit de densityplot blijkt dat zowel UNI300, UNI350 als UNI 275 uit twee #groepen bestaat. Bij het UNI300
kan niet gevonden worden waaraan dit ligt. Het #UNI 350 bestaat ook uit twee groepen, waarbij één groep een
grotere vervorming #heeft bij Fmax dan de andere groep. Mogelijk is dit een oorzaak van de #tweedeling. De
verdeling van het UNI275 spouwanker komt doordat in deze #vergelijking de spouwankers in M10-mortel ook
zijn meegenomen in de analyse. #Als de analyse voor zowel M5-mortel als M10-mortel wordt gemaakt, dan is er
#geen tweedeling in de resultaten.
```

#Met voorgaande analyses zijn de proefresultaten gefilterd en kan de significantie, #verdeling en kans op bezwijken bepaald worden van de proefresultaten. In #onderstaande analyse wordt uitgegaan van alle spouwankers die op 1 hoop #gegooit zijn, daaruit wordt de voorspelling met de gestelde randvoorwaarden #gehaald. Allereerst de regressie analyse die aan het begin van deze statistische #waarde bepaling ook is uitgevoerd.

```
RegModel.2 <- lm(Maximale.drukkracht~Scheefstand+Inlegdiepte+Spouwbreedte+Diameter,
data=Druk2)
attach(Druk2)
```

#alternatieve modellen om te analyseren of de gegevens normaal verdeeld zijn en #of bepaalde waarden buiten de populatie vallen. De interactie tussen de #parameters kan van invloed zijn:

```
RegModel.2 <- lm(Maximale.drukkracht~Scheefstand*Inlegdiepte*Spouwbreedte*Diameter-
Scheefstand:Inlegdiepte:Spouwbreedte:Diameter,
data=Druk2)
summary(RegModel.2)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.1,pch=19,las=1)
par(mfrow=c(1,1))
par(pch=16,las=1,lwd=2)
```

```
RegModel.2 <- lm(Maximale.drukkracht~Scheefstand+Inlegdiepte+Spouwbreedte+Diameter,
data=Druk2)
attach(Druk2)
```

#standardized residuals versus model predictions / fitted values  
#Naast de regressieanalyses kunnen de gestandaardiseerde gegevens geplotted worden #met de verwachtingen. Ook hierbij moeten de uitschieters nader geanalyseerd #worden.

```
plot(fitted(RegModel.2),rstandard(RegModel.2),xlab="fitted values",ylab="standardized
residuals",pch=19,las=1)
abline(h=0)
abline(h=2.5,col="red")
abline(h=-2.5,col="red")
#gaten in de verdeling terug te zien, dit komt mogelijk door de spouwbreedte!
```

```
plot(Scheefstand,rstandard(RegModel.2),xlab="Scheefstand",ylab="standardized residuals",main="Standard
Residuals Scheefstand")
abline(h=0)
abline(h=2.5,col="orange")
abline(h=-2.5,col="orange")
```

```
plot(Inlegdiepte,rstandard(RegModel.2),xlab="Inlegdiepte",ylab="standardized residuals", main="Standard
Residuals Inlegdiepte")
abline(h=0)
abline(h=2.5,col="yellow")
```



```

abline(h=-2.5,col="yellow")

plot(Spouwbreedte,rstandard(RegModel.2),xlab="Spouwbreedte",ylab="standardized residuals",
main="Standard Residuals Spouwbreedte")
abline(h=0)
abline(h=2.5,col="blue")
abline(h=-2.5,col="blue")

plot(Diameter,rstandard(RegModel.2),xlab="Diameter",ylab="standardized residuals", main="Standard
Residuals Diameter")
abline(h=0)
abline(h=2.5,col="purple")
abline(h=-2.5,col="purple")
#Drie spouwankers hebben een lagere diameter dan de overige spouwankers. #mogelijk horen deze niet in deze
populatie, afhankelijk van de overige #parameters of de spouwankers daar ook afwijken.

# studentized residuals versus hatvalues (leverage)
plot(hatvalues(RegModel.2),rstudent(RegModel.2),xlab="leverage",ylab="studentized residuals")

plot(density(rstandard(RegModel.2)),main="Density plot of residuals")
qqnorm(rstandard(RegModel.2))
qqline(rstandard(RegModel.2),col="red")
#check for normality 3: Shapiro-Wilk test for normality,
#low p-value indicates nonnormality
shapiro.test(rstandard(RegModel.2))
#hoge P-waarde
#Spouwankers die afwijken in de grafieken die opgesteld zijn in
#voorgaande analyses worden verwijderd.
Druk2 <- druk[-c(1,37,29,39,55),]

#Een nieuwe regressieanalyse moet uitgevoerd worden.
RegModel.2 <- lm(Maximale.drukkracht~Scheefstand+Beginexcentriciteit+Spouwbreedte+Diameter,
  data=Druk2)
summary(RegModel.2)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)
par(mfrow=c(1,1))
par(pch=16,las=1,lwd=2)
attach(Druk2)

#De scheefstand heeft geen invloed Fd;max en wordt uit de analyse gehaald.
RegModel.2 <- lm(Maximale.drukkracht~Beginexcentriciteit+Spouwbreedte+Diameter,
  data=Druk2)
summary(RegModel.2)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)
par(mfrow=c(1,1))
par(pch=16,las=1,lwd=2)
attach(Druk2)

#controle of de juiste parameters uitgewerkt zijn
stepwise(RegModel.3, direction='forward', criterion='AIC')
library(leaps, pos=4)

#welke parameter heeft invloed op de parameter vervorming tov scheefstand.
RegModel.3 <- lm(Vervorming.tov.scheefstand~Beginexcentriciteit+Spouwbreedte+Diameter+Scheefstand,
  data=Druk2)
summary(RegModel.2)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)

```

```

par(mfrow=c(1,1))
par(pch=16,las=1,lwd=2)
attach(Druk2)

#De interactie tussen de parameters kan invloed hebben op Fd;max
RegModel.2 <- lm(Maximale.drukkracht~Beginexcentriciteit*Spouwbreedte*Diameter,
  data=Druk2)
summary(RegModel.2)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)
par(mfrow=c(1,1))
par(pch=16,las=1,lwd=2)
attach(Druk2)

#model predictions with accuracy (prediction intervals)
#hier kan de waarden van de spouwankers voorspelt worden. De minimale #waarden per type spouwanker dat
gevraagd wordt. Daarnaast kan de variabelen #veranderd worden wanneer de toetstanden van de mortel
veranderen of het #spouwanker een andere diameter krijgen.
predict(RegModel.2,interval="prediction",level=0.90)
predict(RegModel.2,data.frame(Scheefstand=1,Diameter=4,Inlegdiepte=40,Spouwbreedte=170,Type.spouwanke
r="UNI 250"),interval="prediction",level=0.90)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)
predict(RegModel.2,data.frame(Scheefstand=1,Diameter=4,Inlegdiepte=40,Spouwbreedte=195,Type.spouwanke
r="UNI 275"),interval="prediction",level=0.90)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)
predict(RegModel.2,data.frame(Scheefstand=1,Diameter=4,Inlegdiepte=40,Spouwbreedte=220,Type.spouwanke
r="UNI 300"),interval="prediction",level=0.90)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)
predict(RegModel.2,data.frame(Scheefstand=1,Diameter=4,Inlegdiepte=40,Spouwbreedte=270,Type.spouwanke
r="UNI 350"),interval="prediction",level=0.90)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)
predict(RegModel.2,data.frame(Scheefstand=1,Diameter=4,Inlegdiepte=40,Spouwbreedte=220,Type.spouwanke
r="UNI-Lijm 275"),interval="prediction",level=0.90)
oldpar <- par(oma=c(0,0,3,0), mfrow=c(2,2))
plot(RegModel.2)

cbind(predict(RegModel.2,data.frame(Beginexcentriciteit=2,Diameter=4,Spouwbreedte=seq(270,290,5)),interval
="prediction",level=0.90),
Spouwbreedte=seq(270,290,5))[,c(2,4)]

plot(cbind(predict(RegModel.2,data.frame(Beginexcentriciteit=2,Diameter=4,Spouwbreedte=seq(270,290,5)),int
erval="prediction",
level=0.90),Spouwbreedte=seq(270,290,5))[,c(4,2)])
Spouwbreedte=seq(270,290,5))

#tweede vraag
#Mag voor druk niet gebruikt worden, omdat bij druk de Fd;max afhankelijk is #van de spouwbreedte. In deze
analyse wordt een #gemiddelde waarde berekend #voor alle spouwankers tezamen.
t.test(Druk2$Maximale.drukkracht, alternative='less', mu=1000, conf.level=.95)

t.test(Druk2$Inlegdiepte, alternative='less', mu=40, conf.level=.95)
t.test(Druk2$Inlegdiepte, alternative='less', mu=46, conf.level=.95)

```

**Bijlage 22 Analytisch onderzoek (trek)**

Voor het bepalen van de uittrekwaarde van een spouwanker met de formules die gebruikt worden voor de bepaling van de verankeringslengte van wapeningsstaven kunnen de volgende twee verschillende berekeningen worden gemaakt:

Uitgegaan wordt van: inlegdiepte = 40 mm

**1) Minimale verankeringslengte wapeningsstaaf op trek [CB2]**

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{b,min}$$

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{s,d}}{f_{bd}}$$

Uitgegaan wordt van slechte aanhechtomstandigheden ( $\eta_1 = 0,7$ ) en M10-mortel:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctb} = 2,25 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 4,0 = 6,3 \text{ N/mm}^2$$

Waarin  $f_{bd}$  de rekenwaarde van de uiterste opneembare aanhechtspanning tussen mortel-spouwanker en  $f_{ctb}$  de rekenwaarde van de treksterkte van de mortel. In deze berekening is voor de treksterkte van de mortel, de buigtreksterkte van de mortel verkregen uit de uitgevoerde schaduwproeven gebruikt. Dat resulteert in een minimale basis inlegdiepte van:

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{s,d}}{f_{bd}} = \frac{4}{4} \cdot \frac{220}{6,3} = 34,92 \text{ mm}$$

Dan kan de inlegdiepte berekend worden voor rechte spouwankers door:

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_2 = 1 - \frac{0,15(c_d - \emptyset)}{\emptyset} = 1 - \frac{0,15(4,5 - 4)}{4} = -0,98$$

$$0,7 \leq \alpha_2 \leq 1,0 \text{ dus } \alpha_2 = 0,98$$

$$\alpha_3, \alpha_4 \text{ en } \alpha_5 = 1,0$$

$$l_{bd} = 1 \cdot 0,98 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 34,92 = 34,22 \text{ mm}$$

Deze berekening kan voor verschillende mortelkwaliteiten, typen spouwankers en aanhechtomstandigheden worden gemaakt. In *Tabel 32* zijn de resultaten getoond.

*Tabel 32: Uitkomsten minimale inlegdiepte spouwankers afhankelijk van mortelkwaliteit.*

| $\eta_1$                               | $f_{ctb}$ | $f_{bd}$ | $l_{b,rqd}$ | $l_{bd}$ |
|--|-----------|----------|-------------|----------|
| <b>M5-mortel; recht spouwanker</b>     |           |          |             |          |
| 0,7                                    | 2,5       | 3,94     | 55,84       | 54,72    |
| 1,0                                    | 2,5       | 5,63     | 39,11       | 38,33    |
| <b>M10-mortel; recht spouwanker</b>    |           |          |             |          |
| 0,7                                    | 3,5       | 5,51     | 39,93       | 39,13    |
| 1,0                                    | 3,5       | 7,88     | 27,82       | 27,26    |
| <b>M15-mortel; recht spouwanker</b>    |           |          |             |          |
| 0,7                                    | 4,5       | 7,09     | 31,03       | 30,41    |
| 1,0                                    | 4,5       | 10,13    | 21,72       | 21,29    |
| <b>M5-mortel; spouwanker met haak</b>  |           |          |             |          |
| 0,7                                    | 2,5       | 3,94     | 39,93       | 39,93    |
| 1,0                                    | 2,5       | 5,63     | 27,82       | 27,82    |
| <b>M10-mortel; spouwanker met haak</b> |           |          |             |          |
| 0,7                                    | 3,5       | 5,51     | 31,03       | 31,03    |
| 1,0                                    | 3,5       | 7,88     | 21,72       | 21,72    |

Uit *Tabel 32* kan geconcludeerd worden dat met deze berekeningsmethode alleen rechte spouwankers in M5-Mortel niet genoeg inlegdiepte heeft die geadviseerd wordt door de NEN-EN 845 en gelijk is aan 40mm. De overige typen spouwankers en variatie in mortelkwaliteiten voldoen wel.

## 2) Verankeringslengte wapening in metselwerk

Een tweede manier voor het berekenen van de inlegdiepte van een spouwanker, kan worden uitgewerkt met de berekeningsmethode voor de verankeringslengte van wapening in metselwerk.

$$l_b = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bod}} \quad [\text{NEN-EN 1992-1-1}]$$

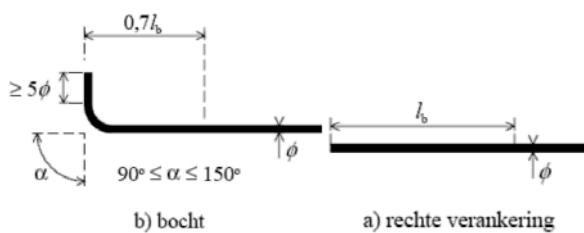
Waarin  $f_{yd}$  de vloeigrens van het spouwanker is en  $f_{bod}$  de aanhechtsterkte van het spouwanker is (waarde tussen 1 en 2).

$$l_b = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bod}} = \frac{4}{4} \cdot \frac{220}{1,0} = 220 \text{ mm}$$

$$l_b = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bod}} = \frac{4}{4} \cdot \frac{220}{1,5} = 147 \text{ mm}$$

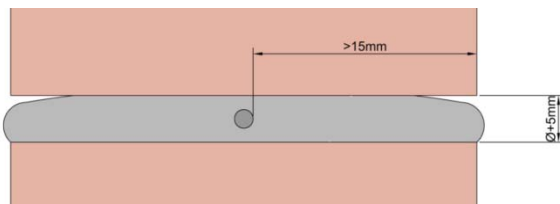
$$l_b = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bod}} = \frac{4}{4} \cdot \frac{220}{2,0} = 110 \text{ mm}$$

Bij staven belast op trek mag  $0,7f_{bod}$  worden toegepast. Spouwankers met een haak mogen bij op druk belaste constructie niet toegepast worden volgens de regels beschreven voor verankeringslengte bepaald voor wapening in metselwerk.



Figuur 144: Inlegdiepte voor rechte en gebogen wapeningsstaven in metselwerk [1].

Ook moeten de spouwankers een minimale inlegdiepte van 15 mm vanaf de buitenzijde van het metselwerk hebben ter voorkoming van invloed van buitenaf. Bij het spouwanker betekent dit ook dat het spouwanker niet te ver doorgelegd mag worden waardoor het aan de andere zijde van de mortel een afstand tot de rand kleiner is dan 15 mm, waardoor het mogelijk kan gaan ponsen.



Figuur 145: Inlegdiepte van het spouwanker volgens eisen van wapeningsstaven in metselwerk [1].

Na het berekenen van de inlegdiepte die minimaal benodigd is voor het kunnen overdragen van de krachten, kan berekend wordt of  $F_{t,max}$  opneembaar is voor de verbinding spouwanker-mortel.

De uitgangspunten zijn gelijk aan die van de eerste berekeningen hierboven beschreven [CB2]. Waaruit de minimale inlegdiepte gelijk moet zijn aan 34,22 mm. Nu kan de aanhechtsterkte van de mortel met het spouwanker berekend worden door:

$$f_b = \frac{1}{4} \cdot \frac{\phi \cdot \sigma_{s,max}}{l_{bond}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{4 \cdot 520}{34,22} = 15,20 \text{ N/mm}^2$$

Waarin  $\sigma_{s,max}$  de treksterkte van het spouwanker materiaal is. Dat resulteert in hogere aanhechtspanningen die het spouwanker moet kunnen overdragen aan de mortel en dus een grotere inlegdiepte. Uitgegaan wordt van de vloeispanning van het materiaal, omdat bij vloeien de diameter van het spouwanker afneemt en daardoor de hechtsterkte afneemt en de verbinding tussen spouwanker en mortel bezwijkt.

De aanhechtingskracht die het spouwanker vervolgens kan weerstaan is gelijk aan:

$$f_b = \frac{1}{4} \cdot \frac{\phi \cdot \sigma_{s,max}}{l_{bond}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{4 \cdot 220}{34,22} = 6,43 \text{ N/mm}^2$$

$$H = l_{bond} \cdot \pi \cdot \phi \cdot f_b = 34,22 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 6,43 = 2765 \text{ N}$$

Nu wordt uitgegaan dat de inlegdiepte van de spouwankers 40mm zijn en resulteert in de resultaten in Tabel 33.

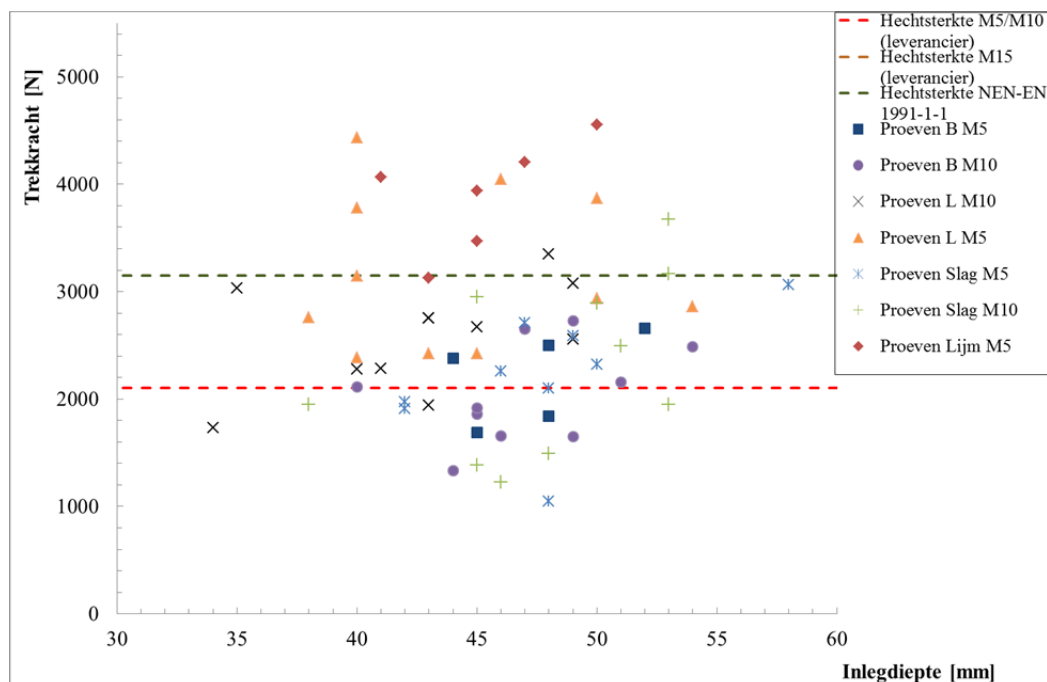
Tabel 33: Resultaten van de opneembare trekkracht door de verbinding spouwanker-mortel.

| $\eta_1$                               | $f_{ctb}$ | $f_{bd}$ | $l_{bd}$ | $f_b$ | H    |
|--|-----------|----------|----------|-------|------|
| <b>M5-mortel; recht spouwanker</b>     |           |          |          |       |      |
| 0,7                                    | 2,5       | 3,94     | 40       | 4,02  | 2021 |
| 1,0                                    | 2,5       | 5,63     | 40       | 5,74  | 2885 |
| <b>M10-mortel; recht spouwanker</b>    |           |          |          |       |      |
| 0,7                                    | 3,5       | 5,51     | 40       | 5,62  | 2825 |
| 1,0                                    | 3,5       | 7,88     | 40       | 8,07  | 4056 |
| <b>M15-mortel; recht spouwanker</b>    |           |          |          |       |      |
| 0,7                                    | 4,5       | 7,09     | 40       | 7,23  | 3634 |
| 1,0                                    | 4,5       | 10,13    | 40       | 10,33 | 5192 |
| <b>M5-mortel; spouwanker met haak</b>  |           |          |          |       |      |
| 0,7                                    | 2,5       | 3,94     | 40       | 5,51  | 2770 |
| 1,0                                    | 2,5       | 5,63     | 40       | 7,91  | 3976 |
| <b>M10-mortel; spouwanker met haak</b> |           |          |          |       |      |
| 0,7                                    | 3,5       | 5,51     | 40       | 7,09  | 3564 |
| 1,0                                    | 3,5       | 7,88     | 40       | 10,13 | 5092 |

Uit Tabel 33 kan geconcludeerd worden dat de spouwankers met haak een grotere trekkracht kunnen opnemen dan een recht spouwanker. Dit is tevens een constatering uit het experimenteel onderzoek. De berekening van de uittrekwaarde van het spouwanker is dus een goede methode. Uit hoofdstuk 7 moet blijken of de analytische berekeningen overeenkomen met de resultaten van het experimenteel onderzoek.

### Hechtsterkte steen-mortel

Naast het bezwijken van de verbinding tussen spouwanker en mortel, kan ook de verbinding tussen steen en mortel bezwijken. De berekende hechtsterkte met de gegevens van de leverancier zijn in Grafiek 79 met een stippellijn weergegeven. De proefstukken die bezweken zijn op hechting tussen steen en mortel zijn met markeringen aangegeven in de grafiek.



Grafiek 79: Een kracht-inlegdiepte grafiek, waarin de gemiddelde hechtsterkte volgens de normen of leverancier met een stippellijn is weergegeven en de proefresultaten zijn gemarkeerd.

Uit Grafiek 79 is te concluderen dat de berekening met de gegevens van de leverancier een goede benadering is voor de hechtsterkte van de steen-mortel. Slechts ongeveer 15 proefstukken zijn onder deze berekende waarde bezweken, de overige spouwankers hadden een betere hechting. De berekeningen volgens de normen is een bovengrens, omdat deze boven de proefresultaten ligt.