



## Proefbelastingen op houten palen in Overamstel, Amsterdam, vergroten inzicht draagvermogen



Rodriaan Spruit

Ingenieursbureau Gemeente Rotterdam



Dianne Jacobs

TU Delft



Siavash Honardar

Van Oord



## Overzicht



- Aanleiding
- Glasvezelrekmetingen algemeen
- Proefbelastingen druk
- Conclusies
- Proefbelastingen trek
- Conclusies

## Waarom proefbelasten houten palen

- 250 bruggen
- 200 kilometer kademuur
- Wat is het draagvermogen nu echt?
- Hoeveel negatieve kleef treedt er op?



## Gedistribueerde metingen

- Leon Nicolas Brillouin
- [Brillouin, Léon](#) (1922). "Diffusion de la lumière et des rayons X par un corps transparent homogène". *Annales de Physique. EDP Sciences. 9 (17): 88–122*
- *Verstrooiingsfrequentie van licht in een medium is afhankelijk van rek*

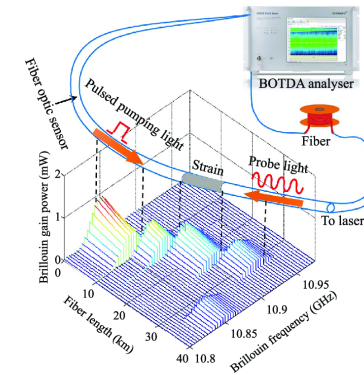


22-9-2024

5

22-9-2024

6



## Ontwikkeling BOTDA/R

- 2000
  - Plaatsresolutie 1 m
  - Rekresolutie 50 microstrain
  - Meettijd 30 minuten
  - Interrogator 300k
- 2017
  - Plaatsresolutie 0,25 m
  - Rekresolutie 6 microstrain
  - Meettijd 1,5 minuten
  - Interrogator 70k
- 2020
  - Plaatsresolutie 0,02 m
  - Rekresolutie 0,02 microstrain
  - Meettijd 0,5 seconden of zelfs dynamisch (tot 100 Hz) op een beperkt deel van de fiber
  - Interrogator 700k



22-9-2024

7

## Voorbeeldtoepassingen

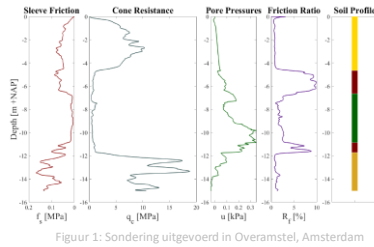
- 3D verplaatsingen ondergrondse waterleiding monitoren 2001
- Euromaxkade 2003
  - Ankerkrachten
  - Axiale kracht in vibropalen
  - Doorbuiging diepwand
  - Ontgronding
- Diverse proefbelastingen op prefabpalen, S.I.-palen, ankers, betonnen balken (2003-heden)
- Lekdetectie dijken (temperatuurprofielen)
- Temperatuurprofielen bij betonstorten / uitharden (2009)
- Monitoring effluentverdeling rioolstelsel
- Proefbelastingen houten palen Amsterdam (2018)
- Horizontale verplaatsing van palen / optische hellingmeetbuis
- Structural health monitoring assets



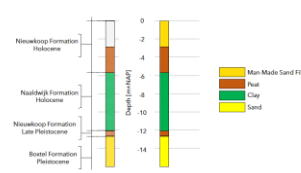
## Grondonderzoek en lithologie



- Representatief van geologische sfeer van Amsterdam
- 3 sonderingen per paalpositie



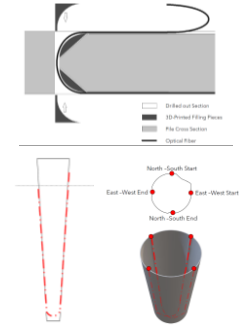
Figuur 1: Sondering uitgevoerd in Overamstel, Amsterdam



Figuur 2: Maatgevende grondprofiel

## Instrumentatie

- Noord-Zuid en Oost-West vezellussen.
- Diepste doorvoer t.b.v. de glasvezel geboord op de 'paalpunt' (NZ).
- 2cm daarboven → tweede boorgat voor OW
- Middelen van metingen over alle 4 kanten:
  - Effecten zoals buigen
  - Uniforme verdeling van rekken

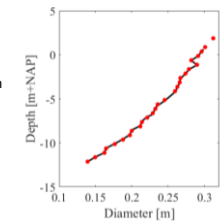


Figuur 3: Instrumentatie

## Paal Eigenschappen



- Geometrie en mechanische eigenschappen
  - Taps toelopend met variabele diameters langs de lengte
  - Natuurlijk materiaal → variabiliteit in mechanische eigenschappen
    - Stijfheid



Figuur 4: Paaldiameter als functie van lengte/diepte (positie op de paal zelf)

## Paalbelasting en Referentierame



- Op de paalkop: drukverdelende staalplaat met daarop een vijzel en drukdoos geplaatst.
  - Gezamenlijk weegt dit 70 kg (=circa 0,7 kN).
  - Belasting tot gemiddeld 400
  - Nauwkeurigheid ca. 1 kN
  - Gewicht van vijzel en drukdoos verwaarloosd
- Stijve aluminium vakwerkligger
- Tijdens eerste twee proeven → ligging van het referentierame wordt door een RTS gecontroleerd.

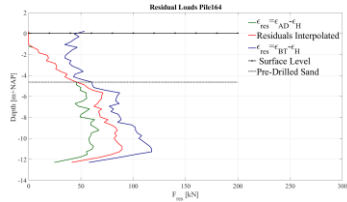


Figuur 5: Referentierame

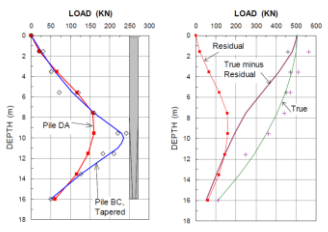


### Heispanningen

- Residuele kracht als gevolg van het heienproces
- Kunnen aan de hand van de instrumentatie, als functie van de tijd bepaald worden.



Figuur 6: Residuele rekken in paal 164

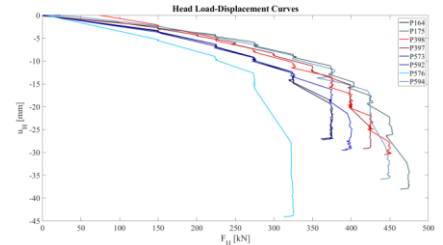


Figuur 7: Heispanningen

Gregersen et al., 1975 and reprinted from Folkens, B. (2002). Determining the true distribution of load in instrumented piles. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1392-5583\(2002\)104:1\(104\)104-104](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1392-5583(2002)104:1(104)104-104)

### Paalkop verplaatsingsgedrag

- 16 palen op druk getest.
- 8 worden in mijn afstudeerwerk geanalyseerd;
- Ontlast-herbelast cycli verwijderd i.v.m. leesbaarheid

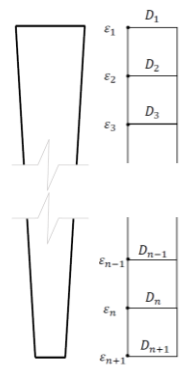


Figuur 8: Resultaat 8 palen, zonder ontlast-herbelast stappen

### Methodiek

Berekening

- $F_i = EA_i \epsilon_i = 0.25E\pi D_i^2 \epsilon_i \quad i = [1, n + 1]$
- $\tau_j = \frac{F_i - F_{i+1}}{L_j \theta_j} \quad i = [1, n + 1], j = [1, n]$
- $Q_{b,0.1D} = F_{n+1,0.1D}$
- $Q_{s,0.1D} = \frac{F_{k,0.1D} - F_{l,0.1D}}{(l-k) \frac{D_k + D_l}{2}}$ 
  - k= diepte bovenkant van een grondlaag
  - l= diepte onderkant van een grondlaag



Figuur 9: Discretisatie

### Resultaat proefbelasting op druk

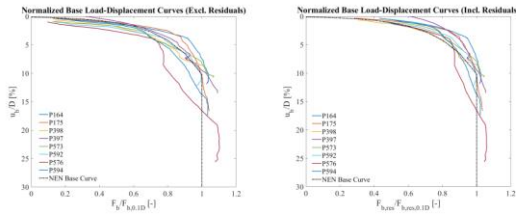
Tabel 1: Samenvatting Resultaten proefbelasting op druk

Pile		D <sub>tip</sub>	u <sub>H</sub>	u <sub>b0.1D</sub>	F <sub>H</sub>	F <sub>b0</sub>	F <sub>brek</sub>	Tip Level
ID	Category	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[m NAP]
164	A	137	24.4	13.6	373	76	115	-12.3
175	A	159	26.2	15.9	451	162	195	-12.2
398	B	143	30.0	14.3	448	212	256	-12.3
397	B	139	24.5	14.6	424	91	154	-12.1
573	C	158	25.4	15.8	373	139	217	-12.5
592	C	141	26.5	14.4	399	157	243	-12.7
576	C	131	27.9	18.1	322	77	132	-12.5
594	C	142	28.7	18.7	444	124	190	-12.8

## Resultaat proefbelasting op druk



- Incl. Residuele spanningen → Stijver gedrag aan de paalpunt
- bezwijkgedrag zoals dat wordt gevonden bij het inclusief de aanwezige heispanningen

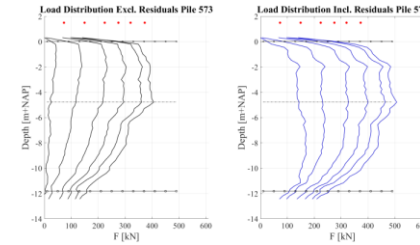


Figuur 10: Vergelijking genormaliseerde belasting-verplaatsingsgrafieken voor paalpunt

## Resultaat proefbelasting op druk



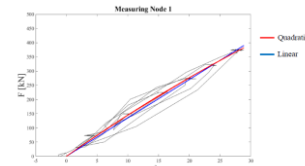
- Verloop van krachten worden voor die 2 scenario's bepaald.
- Spanningen zijn gebaseerd op stijfheden bepaald door het vergelijken van rekken en paalkop belasting boven maaienveld.



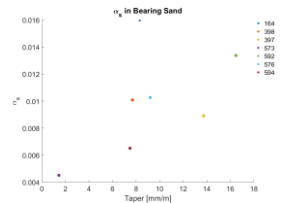
Figuur 11: Verloop van krachten paal 573

## Conclusies proefbelasting op druk

- Bio-variabiliteit in hout
  - Geometrie
  - Mechanische eigenschappen
- Hysteresisch gedrag van paalkop onder druk
- Residuele krachten kunnen o.b.v. referentiemetingen gekwantificeerd worden.
- Taptheid → Toename van schachtwrijving
- Gebruik van BOTDA/R → bewezen dat het een effectieve methode is voor houtenpalen.



Figuur 12: Kwadratisch vs. Lineer gedrag van paal kop

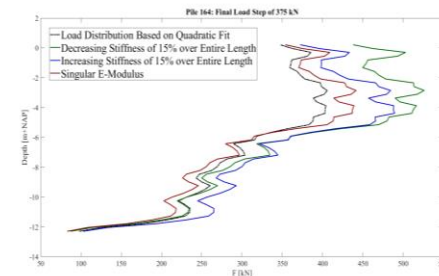


Figuur 13: Wrijvingsfactor  $\alpha_s$  vs. Taptheid [mm/m]

## Conclusies proefbelasting op druk



- Stijfheid speelt een belangrijk rol in het kwantificering van krachten.
- Dit aspect is verder onderzocht in het houtlab van de TU Delft.

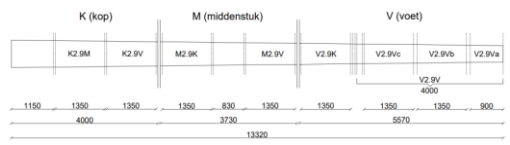


Figuur 13: Effect van stijfheid op kracht distributie



### Resultaat drukproeven TU Delft

- Hoogste stijfheid gemeten in paalkop, laagste in paalpunt
- Verschil tussen stijfheid paalkop en paalpunt tussen 2 tot 7 GPa

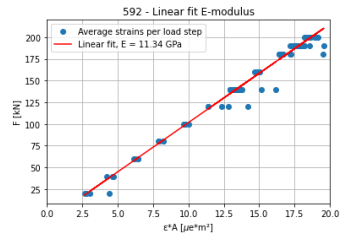


Figuur 13: Splitsing van paal 592 voor drukproeven (Pagella, 2021)

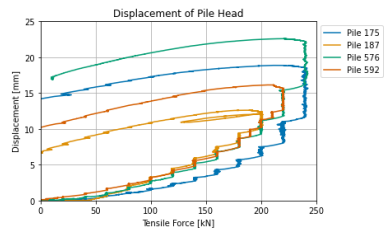


### Vergelijking berekende en gemeten E

- 11.489 GPa uit test houtlab op overeenkomende sectie
- Relatieve rekken
- $R^2 = 0.9816$

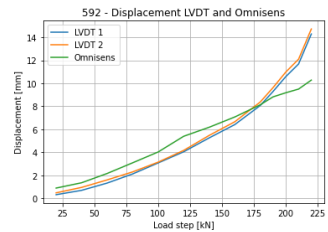


### Last-ervormingsdiagrammen trekproeven

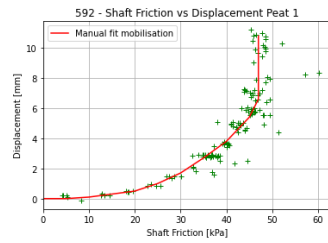
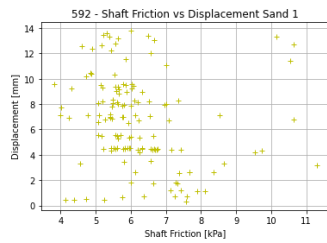


### Mobilisatiecurves

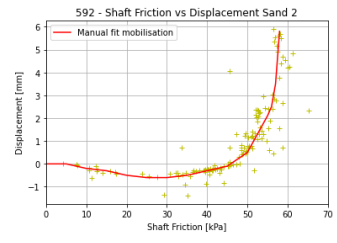
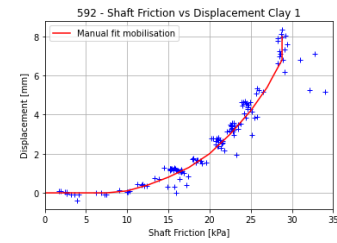
- LVDT meet verplaatsing net boven maaiveld
- Integraal rekken berekend voor verplaatsing Omnisens
- Minder dan 1 mm verschil



### Mobilisatiecurves



### Mobilisatiecurves



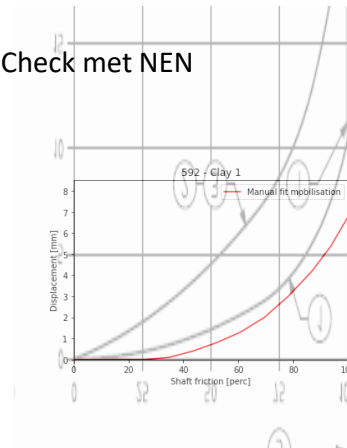
### Alfa factoren



592	Alfa_s	Alfa_t,ber	Alfa_t,TU
1 <sup>e</sup> veenlaag	0.075	0.0446	0.0698
Kleilaag	0.095	0.068	0.0612

576	Alfa_s	Alfa_t,ber	Alfa_t,TU
1 <sup>e</sup> veenlaag	0.032	0.0419	0.0419
Kleilaag	0.056	0.0434	0.0283

### Check met NEN



## Check met NEN

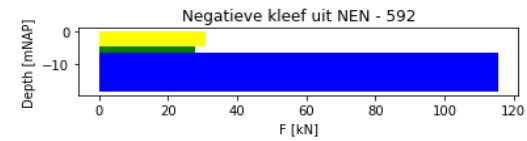
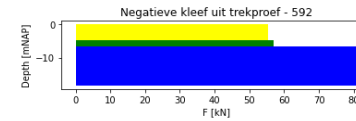


- Berekening negatieve kleeft voor alleenstaande paal
- Gemiddeld over gehele slappe lagen-pakket: redelijk goede overeenkomst tussen NEN en Omnisens data

$$F_{nk,k} = O_{s,gem} \times \sum_{j=1}^{j=n} d_j \times K_{0,j,k} \times \tan(\delta_{j,k}) \times \frac{\sigma'_{v,j-1,k} + \sigma'_{v,j,k}}{2}$$

Paal	Fnk,k NEN [kN]	Fnk,k Om [kN]
592	174.59	193.31
576	150.71	110.2

## Check met NEN: per laag grote verschillen



## Conclusies proefbelastingen op trek



- Meetmethode
  - Minimaal 2 U-vezels (4 zijden) nodig
  - Integraal rekmetingen en paalkopverplaatsing komen goed overeen
- Vergelijking met NEN
  - Aandeel negatieve kleeft veel groter in kleilaag volgens NEN
    - Grondprofiel met alleen klei: overschatting neg. kleeft bij methode NEN
    - Grondprofiel met alleen veen: onderschatting neg. kleeft bij methode NEN
- Alfa-factoren
  - Duidelijk verschil alfa\_s en alfa\_t bij paal 592