



Vlaanderen
is erfgoed

Onderzoeksrapport

**Onderzoek naar betrouwbare instrumenten voor het evalueren van
de sterkte van historisch waardevol bouwhout**

Eindrapport 2016

Agentschap
Onroerend
Erfgoed

54



Onderzoeksrapport agentschap Onroerend Erfgoed

COLOFON

Dit rapport maakt deel uit van de reeks Onderzoeksrapporten agentschap Onroerend Erfgoed.

Onderzoeksrapport agentschap Onroerend Erfgoed 54 Onderzoek naar betrouwbare instrumenten voor het evalueren van de sterkte van historisch waardevol bouwhout

Eindrapport 2016

Een uitgave van agentschap Onroerend Erfgoed
Wetenschappelijke instelling van de Vlaamse Overheid,
Beleidsdomein Ruimtelijke Ordening, Woonbeleid en Onroerend Erfgoed
Published by the Flanders Heritage Agency
Scientific Institution of the Flemish Government,
Policy area Town and Country Planning, Housing Policy and Immovable Heritage

Verantwoordelijke uitgever: Sonja Vanblaere

Auteurs:

Van Acker Joris, Van den Bulcke Jan, Botter Erik, Ablorh Sebastian & Willen Stijn

In opdracht van:

Agentschap Onroerend Erfgoed
Koning Albert II-laan 19, bus 5
1210 Brussel

Volgens:

Bestek nr. 2014/OA Beheer project 32.
Met startdatum: 15 januari 2015

Uitgevoerd door:

Universiteit Gent (UGent)
Laboratorium voor Houttechnologie (Woodlab)
Coupure links 653
9000 Gent
www.woodlab.be

Omslagillustratie: schuur abdij ter Doest, Lissewege

Foto: Kris Vandevorst | copyright: Onroerend Erfgoed

agentschap Onroerend Erfgoed
Koning Albert II-laan 19 bus 5, 1210 Brussel
T +32 2 553 16 50
info@onroenderfgoed.be
www.onroenderfgoed.be

Dit werk is beschikbaar onder de Open Data Licentie Vlaanderen v. 1.2.

This work is licensed under the Free Open Data Licence Flanders v. 1.2

Dit werk is beschikbaar onder een Creative Commons Naamsvermelding 4.0 Internationaal-licentie. Bezoek <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> om een kopie te zien van de licentie.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.



ONDERZOEK NAAR BETROUWBARE INSTRUMENTEN VOOR HET EVALUEREN VAN DE STERKTE VAN HISTORISCH WAARDEVOL BOUWHOUT

Eindrapport 2016

Joris Van Acker

Jan Van den Bulcke

Erik Botter

Sebastian Ablorh

Stijn Willen

In opdracht van:

Agentschap Onroerend Erfgoed
Koning Albert II-laan 19, bus 5
1210 Brussel

Volgens:

Bestek nr. 2014/OA Beheer project 32.
Met startdatum: 15 januari 2015

Uitgevoerd door:

Universiteit Gent (UGent)
Laboratorium voor Houttechnologie (Woodlab)
Coupure links 653
9000 Gent
www.woodlab.be

INHOUDSTAFEL

TOELICHTING BIJ EINDRAPPORTAGE.....	1
DEEL 1: Evaluatie van de sterkte-eigenschappen van eikenhout m.b.v. boorweerstand-metingen.....	2
1.1. Algemeen - introductie	3
1.1.1. Opbouw van een molen en belasting	3
a. Benamingen en generieke opbouw van staakmolens.....	3
b. Soorten houten staakmolens.....	5
c. Functie van de standaard (molenstaak).....	5
d. Mechanische belastingen op de standaard (indicatief).....	6
e. Fysisch-chemische belastingen.....	7
f. Belastingen van biologische oorsprong.....	8
1.1.2. Berekenen van de sterkte en stijfheid (deterministisch, statisch)	8
a. Bepaling ontwerpsterkte materiaal.....	8
b. Berekenen sterkte van een constructie-element – invloed van aantasting.....	9
c. Berekenen van de sterkte van een houten constructie.....	11
1.1.3. Bepaling van de reststerkte van houten constructie-elementen	11
1.1.4. Niet-destructief bepalen van de sterkteklasse van het eikenhout	12
a. Sterkteklasse en mechanische eigenschappen Europees eiken.....	12
b. Niet-destructief bepalen van de factor k_a (natuurlijke veroudering van het hout).....	15
c. Niet-destructief bepalen van de factor k_{con}	15
1.1.5. Overzicht semi-/niet destructieve onderzoeksmethoden	16
a. Resistograaf.....	16
b. Tomografie (2D) op basis van geluidsgolven door hamer (<i>Sonic Tomography</i> - SoT).....	19
c. Tomografie op basis van elektrische impedantie (<i>Electrical Impedance Tomography</i> – EIT).....	21
d. Ultrasonische geluidsdetectie van elasticiteitsmoduli.....	21
e. Inslaghamers (onder andere <i>Pyloodyn</i>).....	23
f. <i>Mobile timber grader</i>	24
g. Boorkernen nemen.....	24
h. Aanbrengen van een proefbelasting.....	25
i. Thermografie.....	26
j. Visuele beoordeling.....	26
1.2. Ontwikkelen van een methodiek voor het constructief evalueren van de reststerkte van historisch waardevolle houtconstructies	27
1.3. Resistograaftechniek in detail	29

1.3.1.	Algemene invloedsfactoren.....	29
1.3.2.	Bepalen van de dichtheid - volumegewicht.....	32
a.	Gemiddelde waarde (total average V_{med}) en variabiliteit (V_{des})	32
b.	Bepaling van gemiddeld maximum M_{max} en gemiddeld minimum M_{min}	32
1.3.3.	Aandachtspunten bij het opzetten van een proefprogramma voor resistograaf	34
1.3.4.	Experimenteel werk.....	35
1.4.	Evaluatie van uitgevoerde inspecties.....	36
1.4.1.	Uitgevoerde inspecties aan de Steenakermolen met resistograaf	36
DEEL 2:	Beoordeling van de sterkte van de staak bij het beheer van staakmolens; gevalstudies	45
2.1.	Metingen aan referentieproefstukken	45
2.1.1.	Kalibratieproefstuk	45
2.2.	Onderzoek stalen Steenakermolen en kerk.....	50
DEEL 3:	Overzicht activiteiten - conclusies.....	59
DEEL 4:	Beoordelingsrichtlijn.....	60
4.1	Monitoring en inspecties	60
4.1.1	Visuele beoordeling	60
4.1.2.	Resistograaf metingen.....	61
4.1.3.	Andere opties.....	64
4.2.	Beslissingsboom en onderhoud	65
4.2.1.	Beslissingsboom.....	65
4.2.2.	Onderhoud	65
BIJLAGE A:	Terminologie	67
BIJLAGE B:	Geraadpleegde bronnen	69
BIJLAGE C:	Densitometrie.....	71
BIJLAGE D:	Paper Sebastian Ablorh (WCTE, 2016).....	72

TOELICHTING BIJ EINDRAPPORTAGE

Dit eindrapport is een bundeling van de resultaten bekomen in het kader van onderzoek binnen de studieopdracht verleend door Agentschap Onroerend Erfgoed aan het Laboratorium voor Houttechnologie van de Universiteit Gent (UGent – Woodlab): “ONDERZOEK NAAR BETROUWBARE INSTRUMENTEN VOOR HET EVALUEREN VAN DE STERKTE VAN HISTORISCH WAARDEVOL BOUWHOUT”.

Deze studie heeft als doelstelling een antwoord te bieden op de vraag hoe de sterkte-eigenschappen van historisch waardevol bouwhout kunnen afgeleid worden uit metingen van de boorweerstand (uitgevoerd met een resistograaf), en of er momenteel alternatieve technieken en methoden bestaan die *in situ* toepasbaar zijn. Nadat deze vragen beantwoord zijn, wordt aan de hand van enkele praktijkvoorbeelden bij staakmolens nagegaan hoe de sterkte-eigenschappen van het hout in deze molens op een betrouwbare manier moet geëvalueerd en gerapporteerd worden. Dit houdt echter niet in dat de resultaten enkel bij staakmolens van tel zijn. Ook bij andere historisch houtconstructies zijn de bevindingen van dit onderzoeksproject toepasbaar.

Probleemstelling:

Vlaanderen telt een 80-tal beschermde houten staakmolens. Bij de regelmatig terugkerende onderhouds- en restauratiewerken tracht men steeds zoveel mogelijk authentiek materiaal te behouden omdat deze onderdelen deel uitmaken van het beschermde monument. Indien de mechanische sterkte-eigenschappen van het constructiehout niet langer voldoen, is vervanging van het materiaal echter noodzakelijk. Voorafgaand aan de beslissing om tot vervanging over te gaan worden vaak boorweerstandsmetingen aangeraden en uitgevoerd (met een resistograaf of aanverwant toestel) om de residuele sterkte van het constructiehout te bepalen.

De wetenschappelijke basis waarop de interpretatie van de boorweerstand-metingen is gebaseerd is echter niet voldoende gekend. Mede daardoor wordt niet op een eenduidige manier geëvalueerd en gerapporteerd. Daaruit is de vraag ontstaan hoe men de sterkte van structurele houten elementen uit een staakmolen het best kan evalueren *in situ* en rapporteren.

Doelstellingen:

Deze studie is opgedeeld in 2 delen. In een eerste deel staat de relatie tussen boorweerstand en de werkelijke sterkte-eigenschappen van eikenhout centraal. Door middel van literatuurstudie en mechanische testen op proefstalen wordt de kennis over de toepasbaarheid van de boorweerstandprofielen bij het beoordelen van de sterkte van historisch waardevolle houtconstructies gesynthetiseerd en onderbouwd met concrete data. In een tweede deel wordt de toepassing van de opgedane kennis uit Deel1 aan de praktijk getoetst. Aan de hand van een gevalstudie waarbij staakmolens centraal staan, wordt een evaluatie uitgevoerd van de sterkte van het bouwhout, en een modelrapportering uitgewerkt.

Voor deze studie werden een aantal gevalstudies aangereikt waar ofwel een destructieve staalname kan uitgevoerd worden op de staak en/of steenbalk van staakmolens, ofwel reeds eerder een studie van de residuele sterkte van het constructiehout werd uitgevoerd.

DEEL 1: Evaluatie van de sterkte-eigenschappen van eikenhout m.b.v. boorweerstand-metingen

De vertaling van de opgemeten boorweerstandsmeting naar de sterkte-eigenschappen van het bouwhout documenteren en verder wetenschappelijk onderbouwen, is het hoofddoel van deze deelstudie. Een literatuurstudie van de bestaande wetenschappelijke publicaties en studies over dit onderwerp vormen het vertrekpunt, waarbij een *status quaestionis* wordt opgemaakt over de relatie tussen boorweerstand-profielen en de orthotrope sterkte-eigenschappen van eikenhout. Dit wordt getoetst en verder onderbouwd met experimenten op teststalen en hout uit historisch waardevolle houten constructies.

Vanuit de verzamelde gegevens wordt een antwoord geformuleerd op volgende concrete vragen:

- a. Hoe sterk is de relatie tussen de boorweerstand (gemeten met een resistograaf), dichtheid en mechanische eigenschappen van eikenhout, en hoe wordt deze het best afgeleid uit een opgemeten boorweerstand-profiel?
- b. Welke variabelen (bvb. vochtgehalte, dichtheid, groeisnelheid, oriëntatie van de groeiringen, ouderdom van het hout, ...) spelen hierbij een belangrijke rol?
- c. Hoe vertalen de puntmetingen die worden uitgevoerd met een resistograaf zich tot de evaluatie van de totale sterkte van een zwaar stuk constructiehout uit eik?
- d. Wat is de relatie tussen de metingen van de boorweerstand en aantastingen van insecten of schimmels, het aanwezig zijn van barsten, etc? Welke defecten kunnen geregistreerd worden door de resistograaf, en welke niet?
- e. Kan aan de hand van de opgedane kennis en beoordelingsrichtlijn (*best practice*) opgesteld worden voor het onderzoeken van bouwhout met een resistograaf of aanverwant toestel.
- f. Zijn er alternatieve methoden en technieken die vergelijkbare of betere resultaten kunnen opleveren, die eveneens in situ kunnen toegepast worden (akoestische technieken, tomografie, trillingen, ...)?

1.1. Algemeen - introductie

Verschillende literatuurbronnen werden geraadpleegd tijdens het opstellen van voorliggend rapport. Een overzicht ervan is terug te vinden in Bijlage B. Specifiek werd gericht gezocht naar informatie betreffende:

- mechanica van grote structuren onder windbelasting,
- mechanica van windmolens (draaiend en niet-draaiend),
- mechanische eigenschappen van grote bomen en staken,
- invloed van knopen, rot (w.o. hartrot) op mechanische eigenschappen,
- overzicht van geschikte houtsoorten, intraspecifieke variabiliteit (traag en snelgegroeid eiken),
- methodes om mechanische eigenschappen van bomen en staken te evalueren: akoestisch, resistograaf.

Op basis van dit literatuuronderzoek werd volgende analyse en bundeling van gegevens opgemaakt.

1.1.1. Opbouw van een molen en belasting

- a. Benamingen en generieke opbouw van staakmolens

De onderstaande benamingen worden gebruikt:

- Staakmolen of Standaardmolen (West- en Oost-Vlaanderen)
- Standerdmolen (Nederland)
- Kas(t)molen (Limburg)

Een goede startpagina voor algemene informatie over houten staakmolens is <https://nl.wikipedia.org/wiki/Standerdmolen>. Desbetreffende pagina bevat een algemene beschrijving van de opbouw van een molen, essentieel voor de terminologie in het rapport.

De generieke opbouw van een houten staakmolen is weergegeven in Figuur 1. Het belangrijkste aspect van deze figuur is de molenstaak (standerd), aangegeven met het cijfer 1, gezien het belang ervan voor het functioneren van de molen en aldus hoofdonderwerp van dit rapport. De steenbalk (2) rust op de standerd. De molenkast kan via de steenbalk roteren op de kop van de standerd. Een stormpen aan de bovenkant van de standerd voorkomt dat de molenkast (i.e. steenbalk) van de standerd afschuift (bijvoorbeeld onder windbelasting). M.a.w. zowel de horizontale krachten (winddruk) als de verticale krachten (eigengewicht van de molenkast) worden door de staak gedragen, die ook roteren mogelijk maakt. Het is aldus van groot belang dat de integriteit van de staak gewaarborgd blijft.

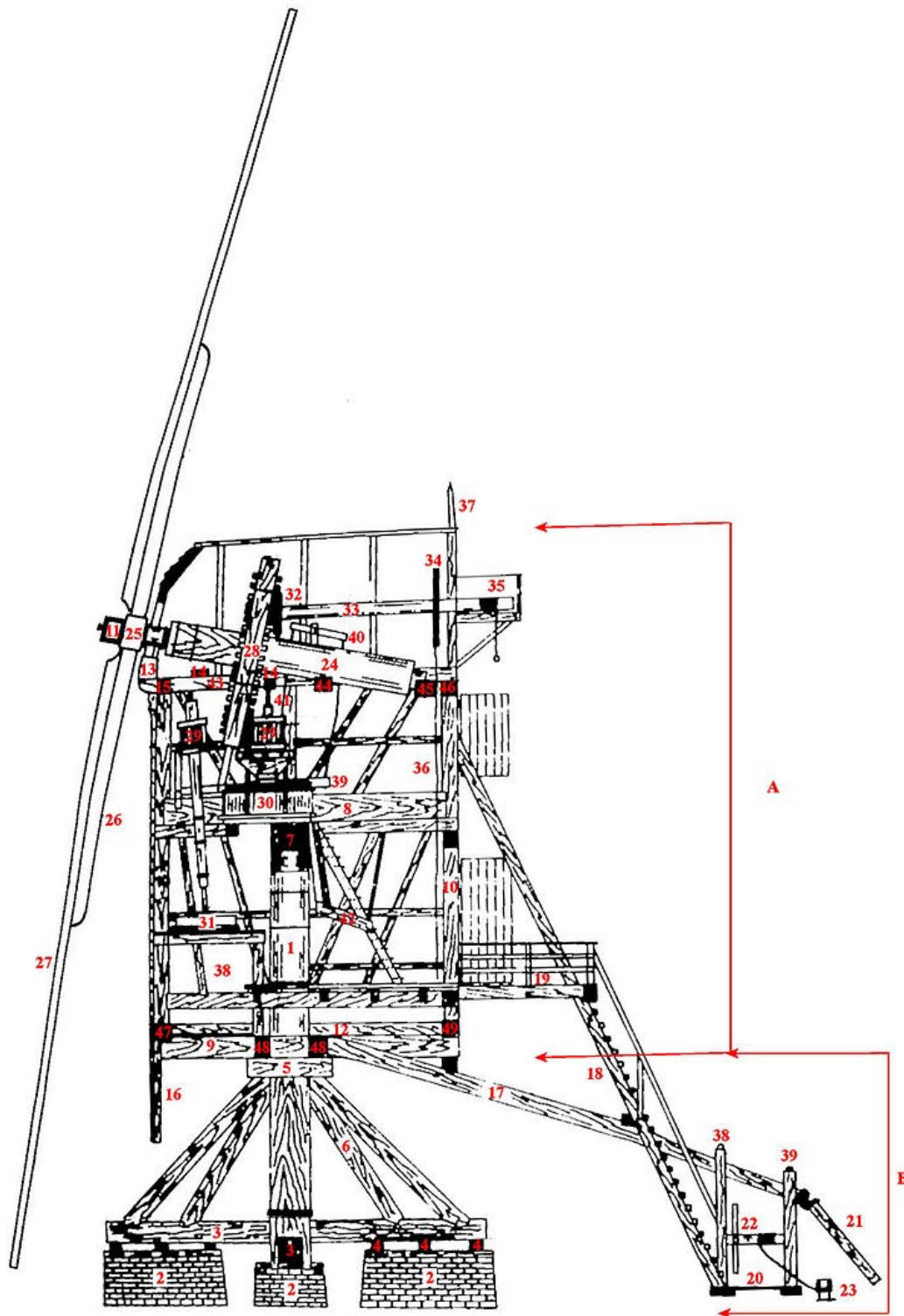


Fig. 1. Doorsnede van een standermolen met twee maalkoppels: A=kast, B=voet. 1 stander, 2 teerlingen, 3 kruisplaten, 4 zonneblokken, 5 zetel, 6 steekbanden, 7 steenbalk, 8 lange burriebalk, 10 hoekstijl, 11 roegat, 12 waterlijst, 13 windpeluw, 14 ijzerbalken, 15 tempelbalk, 16 borstnaald, 17 staartbalk, 18 trapboom, 19 galerij, 20 kruibank, 21 loopschoor, 22 kruihaspel, 23 kruipaal, 24 bovenas, 25 insteekkop, 26 borst, 27 oplanger, 28 bovenwiel, 29 steenrondsels, 30 maalkoppel, 31 maalkoppel, 32 varkenswiel, 33 luias, 34 gaffelwiel, 35 luikap, 36 luireep, 37 makelaar, 38 hel, 39 vangbalk, 40 binnenvangstok, 41 vangtouw, 42 maalbak, 43 daklijst, 44 koppelbalk, 45 penbalk, 46 achterbalk, 47 voorzomer, 48 korte burriebalken, 49 achterzomer.

(bron: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Standerdmolen>)

b. Soorten houten staakmolens

Bij staakmolens wordt onderscheid gemaakt in de opbouw van de voet en het aantal maalwerken, dat kan variëren van 1 maalwerk tot maximaal 4 maalwerken, wat zeer uitzonderlijk is. Men kent staakmolens met de open, halfgesloten en gesloten voet.

Met een gesloten voet wordt de standerd (grotendeels) tegen directe weersinvloeden beschermd. De gesloten voet dient tevens ter opslag van (gemalen) producten. Met de open voet staat de standerd aan directe weersinvloeden bloot. In Figuur 2 een voorbeeld van een staakmolen met open voet en een detail van de staak (standerd).



Fig. 2. Staakmolen met open voet (links; bron: <http://www.panoramio.com/photo/1310843>) en onderconstructie met standerd (rechts; bron: <http://www.molendatabase.nl/nederland/molen.php?nummer=180>).

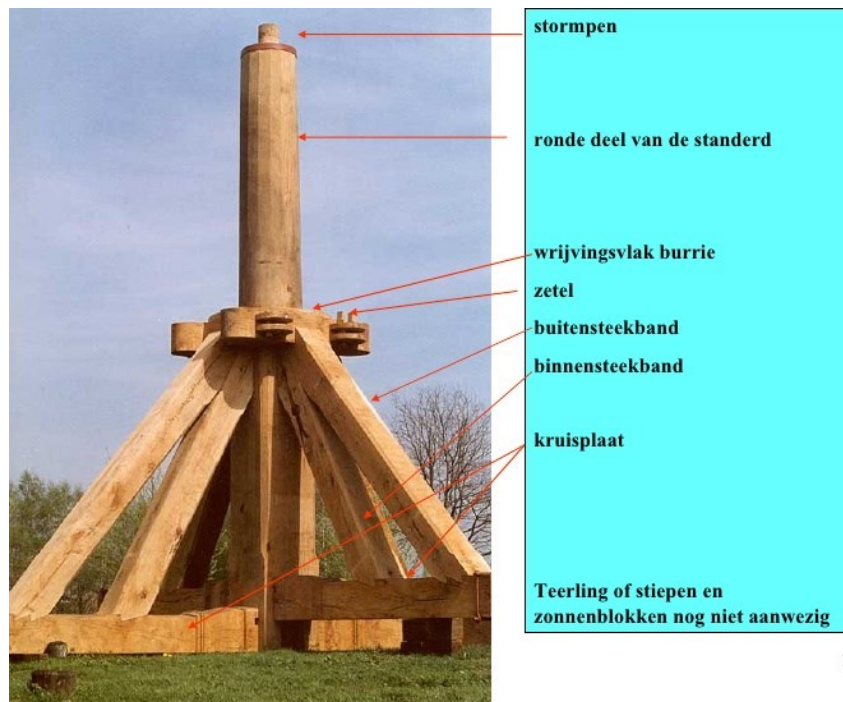
Staakmolens worden in de volgende landen aangetroffen: Noord-Frankrijk, België, Nederland (circa 47 stuks), Engeland, Noord-Duitsland en Denemarken .

Meer informatie over verschillende molens in België en Nederland kan gevonden worden op volgende websites: <http://www.molendatabase.nl/> (Nederland) en <http://www.molenechos.org/> (België).

c. Functie van de standerd (molenstaak)

Zoals voorheen vermeld kan de molenkast roteren op de standerd. De standerd is een rechtopstaande, ongeveer 60-80 cm dikke stam uit eikenhout, doorgaans zomereik (*Quercus robur*) of wintereik (*Quercus petraea*) of zeer sporadisch ook olm (*Ulmus* sp.); bvb. de Pietendriesmolen in Knesselare. Het gewicht van de

molenkast wordt via het bovenste deel van de stander naar de zetel (nr 5 in Figuur 1) en de steekbanden (nr 6 in Figuur 1) afgedragen naar de fundering (teerlingen). De stander draagt in principe niet af naar de kruisplaten (Figuur 3).



13

Fig. 3. Molen in opbouw (bron: <http://www.slideshare.net/keesvanger/de-standermolen-presentation-864502>)

De stormpen, die op de kop van de stander zit, voorkomt dat de molenkast van de stander afschuift onder windbelasting en bij het draaien van de molenkast. Om het draaien aan de wind van de molenkast minder zwaar te laten verlopen, wordt de stormpen gesmeerd, net zoals de bovenkant van de zetel. De smering bestaat vaak uit reuzel, groene zeep met grafiet, bijenwas, of een ander smeermiddel. Voor soepel draaien wordt de stormpen en het corresponderende deel in de (brasem van de) steenbalk meestal in staal of brons uitgevoerd (Bauters 1998-2002, deel 2).

De stander zit nooit precies op het geometrische midden van de molenkast, maar is enigszins uit het midden geplaatst. Dit ter compensatie van het gewicht van de wieken en de te malen producten en om de momentwerking op de stander zo klein mogelijk te houden (Bauters 1998-2002).

De zetel zelf draagt circa 10-20% van het gewicht van de kast. Het andere deel, 90 à 80%, wordt op het bovenzvlak van de stander ingeleid.

d. Mechanische belastingen op de stander (indicatief)

De mechanische belasting van de stander bestaat uit onder andere de volgende componenten:

- Eigen gewicht van de complete, draaiende molenkast (*vast, orde grootte circa 35 ton*)

- Totaalgewicht van te malen of al gemalen producten opgeslagen in de molenkast (*variabel, maximaal circa 15 ton*)
- Zwaartepunt molenkast t.o.v. middenlijn molenkast (*vast*)
- Windbelasting (*in principe variabel, maar doorgaans herleid tot vaste waarde voor maximale windsnelheid in de regio van de molen*):
 - o Wieken
 - o Molenkast
- Draaibelasting tijdens draaien molenkast (*vast/variabel*)
- Nominale/initiële excentriciteiten (*vast*):
 - o Scheefstand van standerd
 - o Middenlijn standerd wijkt af van middenlijn stormpen

De uitwendige belastingen op de standerd en de wijze van ondersteuning zijn in Figuur 4 schematisch weergegeven. De belastingen als gevolg van excentriciteiten zijn nog onbekend.

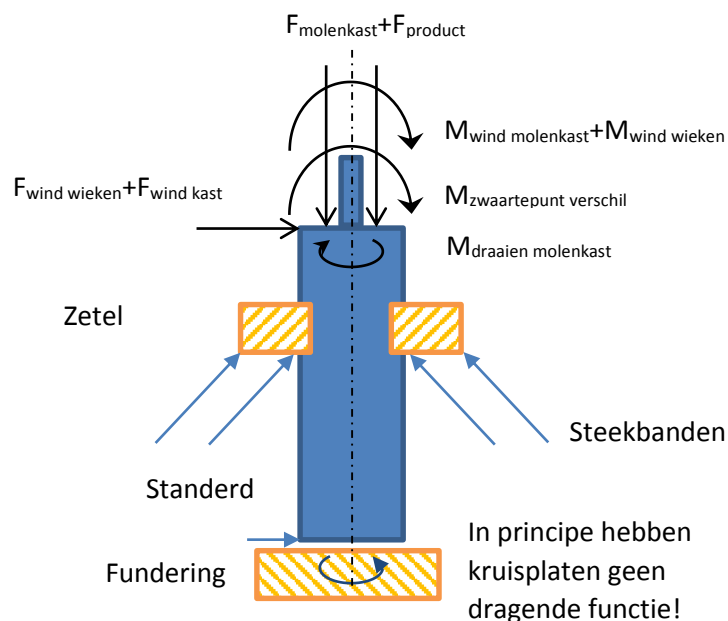


Fig. 4. Schematische weergave van de belastingen op een molen.

e. Fysisch-chemische belastingen

Naast de mechanische belastingen werken ook de onderstaande belastingen nog in op de standerd, vooral bij molens met een open voet:

- Temperatuur (T_{max} , T_{min} , $\Delta T/s$, aantal cycli per dag of jaar)
- Relatieve luchtvochtigheid (RV_{max} , RV_{min} , $\Delta RV/s$, aantal cycli per dag of jaar)
- Regenwater / condenserend vocht
- IJs

- UV-straling
- Smeermiddel zetel
- Luchtverontreinigingen (Ozon, N_xO_x, S_xO_x, etc.)
- etc

f. Belastingen van biologische oorsprong

In aanvulling op bovenstaande belastingen is er ook belasting als gevolg van organismen:

- Houtaantastende schimmels
- Oppervlakteschimmels (meestal niet schadelijk)
- Bacteriën
- Algen
- Insecten

De bescherming/conservering van het hout tegen biologische aantastingen wordt veelal algemeen bekeken voor historisch bouwhout en niet specifiek voor staakmolens.

1.1.2. Berekenen van de sterkte en stijfheid (deterministisch, statisch)

a. Bepaling ontwerpsterkte materiaal

De belasting op de standaard (en andere houten onderdelen van de molen) zou bij het nieuw ontwerpen van de molen moeten berekend worden volgens Eurocode 5 (EN1995-1-1). Hierin worden twee zogenaamde limit states onderscheiden:

- *Ultimate limit state* (ULS), die betrekking heeft op sterkte
- *Serviceability limit state* (SLS), die betrekking heeft op vervorming (stijfheid)

Een constructieonderdeel voldoet niet, bezwijkt, als de berekende ontwerpsterkte kleiner is dan de berekende (combinatie van) belasting(en). De ontwerpsterkte is onder andere afhankelijk van de ontwerpsterkte van het materiaal in kwestie. Machado *et al.* (2011) geven een beschrijving hoe deze ontwerpsterkte van het materiaal te bepalen voor hout dat al voor gebouwde houten constructies wordt toegepast (vergelijking 1):

$$X_d = \frac{k_1}{\gamma_M} \cdot X_k \cdot k_h \cdot k_{con} \cdot k_a \quad (1)$$

met X_d = ontwerpsterkte materiaal, k_1 = modificatie factor om rekening te houden met tijdsduur van belasting en vochtgehalte (merk op: in de Eurocode 5 wordt k_1 aangeduid als k_{mod}), γ_M = materiaal factor, X_k = karakteristieke sterkte hout, k_h = factor voor de doorsnede afmetingen, k_{con} = reductie in eigenschappen van het hout *voor de volledige doorsnede* en op basis van de status van de conservering en k_a is de reductie in de houteigenschappen gedurende de tijd (ageing factor).

De factoren k_1 , k_h en γ_M zijn rechtstreeks te bepalen uit Eurocode 5 (EN 1995-1-1:2005 + C1:2006) op grond van de worst case scenario voor de belastingen.

Voor k_1 (of k_{mod}) gelden de waarden zoals vermeld in onderstaande tabel 1.

Tabel 1. Belastingduurklasse voor gezaagd hout.

Materiaal	Norm	Klimaat-klasse	Belastingduurklasse				
			Blijvend	Lang	Middellang	Kort	Zeer kort
Gezaagd hout	EN 14081-1	1	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
		2	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
		3	0.50	0.55	0.65	0.70	0.90

De partiele materiaalfactor γ_M voor gezaagd hout bedraagt 1,3.

De karakteristieke sterkte X_k wordt doorgaans bepaald op basis van indeling in sterkteklasse (visuele sortering of machinale beoordeling). Voor hout in bestaande constructies is de karakteristieke sterkte X_k *niet direct te bepalen*, maar moet deze worden overeengekomen op basis van waarnemingen (niet-destructief en destructief) uit de praktijk. Ook moet worden overeengekomen of de sterkteklasse geldt op basis van de laagst aangetroffen sterkteklasse (conservatief) of specifiek per constructie-element. De factoren k_{con} en k_a zijn niet eenduidig af te leiden. Voor eikenhout lijkt factor k_a op 1 te kunnen worden gesteld, aangezien er bij natuurlijk verouderd eiken geen belangrijke wijziging in mechanische eigenschappen kon worden vastgesteld (Kranitz, 2014). *De factor k_{con} moet door experts worden vastgesteld* op basis van de (kwantitatieve) beoordeling van de waargenomen aantasting door bijvoorbeeld houtaantastende schimmels en insecten. Opmerking: Dit geldt voor de aantasting over de volle doorsnede van het constructie-element. Voor lokale aantasting, dat wil zeggen gezond naast aangetast hout, gelden andere uitgangspunten voor het beoordelen van de reststerkte van het constructie-element, zie ook de volgende paragraaf.

Verder is van belang te beseffen dat de mechanische eigenschappen van hout orthotroop zijn. Dat wil zeggen dat de sterkte evenwijdig aan de vezelrichting bijvoorbeeld verschilt van deze loodrecht op de vezelrichting. Bij een check op de sterkte van een constructie-element moet telkens worden bepaald of de ontwerpsterkte in alle richtingen niet overschreden wordt.

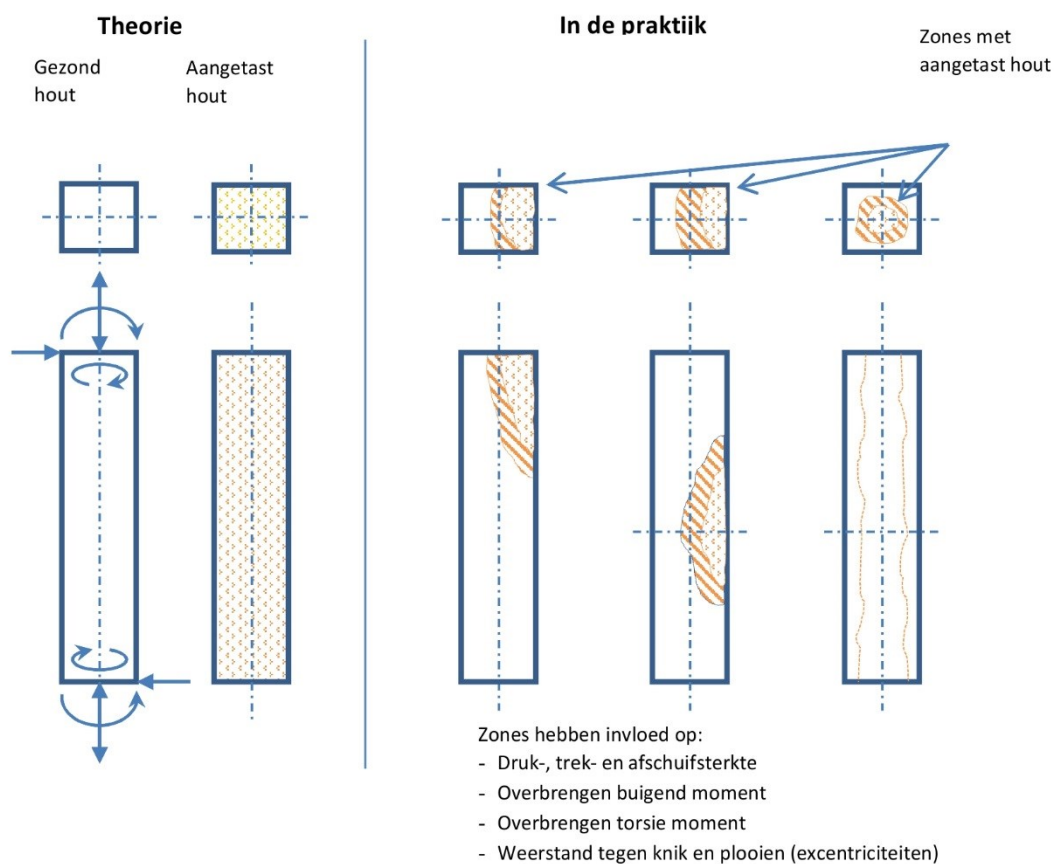
b. Berekenen sterkte van een constructie-element – invloed van aantasting

Bij het berekenen van de sterkte van een houten constructie-element wordt doorgaans aangenomen dat de ontwerpsterkte voor het materiaal (X_d) in een bepaalde oriëntatie over de gehele doorsnede gelijk is. Bij het vaststellen van factor k_{con} is dit ook het geval. Er vindt een reductie van de ontwerpsterkte plaats over de gehele doorsnede van het desbetreffende constructie-element. In de praktijk zal de aantasting veelal gelokaliseerd zijn en wordt gezond, niet aangetast hout geflankeerd door hout dat in verschillende stadia en vormen van aantasting kan verkeren. Dit betekent dat lokale parameters zoals het traagheidsmoment (I) en weerstandsmoment (W) opgebouwd zijn uit bijvoorbeeld een combinatie van $I_{gezondhout}$ en $I_{aangetasthout}$. Dit is

analoog aan het bepalen van een I of W voor constructie-elementen uit samengestelde delen zoals een I-ligger of een *box-girder*.

Voor constructie-elementen die hoofdzakelijk op druk worden belast, kan een lokale aantasting ook invloed hebben op de stabiliteit (weerstand tegen knik of plooiën). Bij een lokale aantasting met bijvoorbeeld reststerkte nul zal de lengte-as lokaal niet langer samenvallen met de globale lengte-as van het constructie-element. De excentriciteit zal toenemen en de weerstand tegen knik zal afnemen. In het ergste geval zal een extra scharnier ontstaan en de weerstand tegen knik nul worden. Bij aantasting van binnenuit zal de reststerkte binnen veel lager zijn dan aan de buitenkant. In dit geval moet het constructie-element als een buisvormig profiel worden beschouwd en wordt de weerstand tegen plooiën van belang.

In Figuur 5 zijn de diverse scenario's schematisch uitgewerkt.



Fig; 5. Theorie en praktijk van het effect van aantastingen van de molenstaak

Naast de invloed van zones met aangetast hout in diverse stadia moet ook rekening worden gehouden met de invloed van:

- Smeermiddel voor de zetel op mechanische eigenschappen van het hout
- Aanwezigheid van conserveringsmiddel(en)

- Aanwezigheid van (droog)scheuren
- Aanwezigheid van knopen
- Draadverloop en hoek

De laatste drie invloedfactoren zijn tevens onderdeel van de (visuele) beoordeling van de houtconstructie en bepalen mede de sterkteklasse van het hout en hieraan gekoppeld de karakteristieke sterkte X_k .

De wijze waarop lokale aantasting en lokale defecten/afwijkingen invloed hebben op de constructieve eigenschappen van het constructie-element moet nog volledig worden uitgewerkt.

c. Berekenen van de sterkte van een houten constructie

Een houten constructie is samengesteld uit de afzonderlijke constructie-elementen, de onderlinge verbindingen tussen twee of meerdere constructie-elementen en de wijze van opleggen. Samen bepalen zij of deze houten constructie de optredende belasting(en) kan weerstaan (ULS en SLS). Dat een constructie-element nauwelijks nog reststerkte heeft, betekent niet automatisch dat een houten constructie ook zal bezwijken. Belastingen op een constructie worden doorgaans via meerdere wegen afgedragen naar de opleggingen (parallele systemen). Ook maken niet alle constructie-elementen deel uit van de primaire draagconstructie, maar van secundaire of zelfs tertiaire draagstructuren. Een grondige analyse van de constructie door een ter zake kundige houtconstructeur is dan ook van belang. Ten aanzien van de standaard, de steenbalk en binnen-/buitensteekbanden mag worden geconcludeerd dat bij onvoldoende reststerkte de veiligheid van de staakmolen in het gedrang is.

1.1.3. Bepaling van de reststerkte van houten constructie-elementen

Uit de voorgaande beschouwing is gebleken dat het bepalen van de reststerkte van houten constructie-elementen niet evident is. Het is nog onbekend:

1. Wat de sterkteklasse is van het houten constructie-element en hiermee samenhangend de karakteristieke sterkte (X_k) en andere materiaaleigenschappen van belang voor de houtconstructeur.
2. Wat de precieze invloed is van lokale aantastingen, defecten en afwijkingen.
3. Wat de invloed is van excentriciteit (initieel en nieuw) en andere maat- en vormafwijkingen.
4. Wat de invloed is van veroudering van het hout (factor k_a).

Punten 2 en 3 kunnen alleen op basis van een uitgebreide constructieve analyse worden bepaald (Eurocode 1 en Eurocode 5 en/of bijvoorbeeld eindige elementen analyse). De analyse kan alleen worden uitgevoerd als de locatie en afmetingen van aangetaste zones en mate van afwijkingen bekend zijn. Voor punt 4 geldt dat hiertoe aanvullende literatuuronderzoek moet worden uitgevoerd. Voor punt 1 en punt 2 moet de beste wijze nog worden vastgesteld. Wel staat vast dat voor historische houten constructies alleen het uitvoeren van niet-destructief onderzoek en semi-niet-destructief onderzoek in aanmerking komt. Slechts in bijzondere gevallen, bijvoorbeeld bij al bezwiken (delen van) houten constructies, kan gebruikt gemaakt worden van destructief onderzoek zoals druk- trek, afschuif – en buigproeven. Op grond hiervan wordt hieronder een overzicht gegeven van (semi)-niet destructieve onderzoeksmethoden, omdat deze uiteindelijk input moeten leveren voor het vaststellen van de sterkteklasse en factor k_{con} en eventueel factor k_a .

1.1.4. Niet-destructief bepalen van de sterkteklasse van het eikenhout

a. Sterkteklasse en mechanische eigenschappen Europees eiken

Voor Europees eikenhout (*Quercus petraea / robur* L.) wordt standaard een sterkteklasse D30 aangehouden.

Aan de sterkteklasse zijn, zoals eerder aangegeven, diverse mechanische eigenschappen gekoppeld die voor het uitvoeren van een constructieve berekening van belang zijn. Deze lijst is hieronder weergegeven in Tabel 2 (Houtinfo.nl; infoblad hout eigenschappen):

Tabel 2. Karakteristieke eigenschappen en sterkteklassen van gezaagd loofhout

	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70	
$f_{m,k}$	18	24	30	35	40	50	60	70	N/mm ²
$E_{0,mean}$	9,5	10	11	12	13	14	17	20	kN/mm ²
ρ_{mean}	570	580	640	650	660	750	840	1080	kg/m ³
ρ_k	475	485	530	540	550	620	700	900	kg/m ³
$f_{t;0;k}$	11	14	18	21	24	30	36	42	N/mm ²
$f_{t;90;k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	N/mm ²
$f_{c;0;k}$	18	21	23	25	26	29	32	34	N/mm ²
$f_{c;90;k}$	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5	N/mm ²
$f_{v;k}$	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0	N/mm ²
$E_{0,05}$	8,0	8,5	9,2	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8	kN/mm ²
$E_{90,mean}$	0,63	0,67	0,73	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33	kN/mm ²
G_{mean}	0,59	0,62	0,69	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25	kN/mm ²
$G_{0,05}$	0,50	0,53	0,58	0,63	0,68	0,74	0,89	1,05	kN/mm ²

De betekenis van de eigenschappen is hieronder weergegeven (Houtinfo.nl; infoblad hout eigenschappen):

$f_{m,k}$	buigsterkte evenwijdig aan de vezel;
$E_{0;mean}$	elasticiteitsmodulus evenwijdig aan de vezel;
ρ_{mean}	gemiddelde volumieke massa;
ρ_k	volumieke massa in de uiterste grenstoestand;
$f_{t;0;k}$	treksterkte evenwijdig aan de vezel;
$f_{t;90;k}$	treksterkte loodrecht op de vezel;
$f_{c;0;k}$	druksterkte evenwijdig aan de vezel;
$f_{c;90;k}$	druksterkte loodrecht op de vezel;
$f_{v;0;k}$	schuifsterkte;
$E_{0,05}$	elasticiteitsmodulus evenwijdig aan de vezel in de uiterste grenstoestand;
$E_{90;mean}$	elasticiteitsmodulus loodrecht op de vezel;
G_{mean}	afschuifmodulus;
$G_{0,05}$	afschuifmodulus in de uiterste grenstoestand;

Opmerking: voor berekeningen conform de Eurocode hout (EN 1995-1-1) is de afschuifmodulus in de uiterste grenstoestand benodigd. Deze mag aangehouden worden als 1/16 van de elasticiteitsmodulus evenwijdig aan de vezel in de uiterste grenstoestand: $G_{0,05} = E_{0,05}/16$.

In de praktijk wordt met een sterkteklasse gerekend, omdat de constructeur dan weet dat de eigenschappen van het toe te passen hout met zeer grote waarschijnlijkheid minimaal deze sterkte of andere gemiddelde eigenschappen heeft. Een balk of plank kan dus ook een veel hogere volumieke massa (dichtheid), sterkte en/of stijfheid hebben. In het specifieke geval van een al toegepaste molenstaak (stander) of steenbalk kunnen de mechanische eigenschappen van het gezonde hout van deze afzonderlijke elementen veel hoger zijn en zelfs in een andere, hogere sterkteklasse vallen. Dit kan invloed hebben op de beoordeling van de reststerkte van deze constructie-elementen en de beoordeling van de veiligheid van de constructie als geheel.

De niet-destructieve methode(s) moet er dus op gericht zijn om de waarde van enkele belangrijke mechanische eigenschappen betrouwbaar vast te stellen. *Hiermee kan dan worden gecontroleerd of het gezonde hout nog steeds aan bovenvermelde eisen voldoet.* Tabel 3 geeft een overzicht welke *niet destructieve onderzoekstechniek (NDO)* geschikt is voor het bepalen van een specifieke eigenschap (volgens EN 384) en via welke route de te bepalen eigenschap wordt verkregen (meestal op basis van berekeningen en/of correlaties in een aantal stappen).

Tabel 3. Overzicht van geschikte NDO (niet destructieve onderzoekstechniek) methodes

Materiaal- Eigenschap EN 384	Niet-destructieve methode				
	Resistograaf	Boorkernen	US Indirect	Inslag hamers (geen volle doorsnede)	Proefbelasting
<i>Buigsterkte</i> $f_{m,k}$	Vermogen -> ρ -> f_m	Kracht + afm. -> f_m	ToF + ρ -> E_{dyn} -> E_b -> f_m	Diepte -> ρ -> f_m	Buiging + afm. -> E_b -> f_m
<i>E-modulus</i> $E_{0,mean}$	Vermogen -> ρ -> $E_{0,mean}$	Buiging + afm. -> E_b -> $E_{0,mean}$	ToF + ρ -> E_{dyn} -> $E_{0,mean}$	Diepte -> ρ -> $E_{0,mean}$	Buiging + afm. -> E_b -> $E_{0,mean}$
<i>Dichtheid</i> ρ_{mean}	Vermogen -> ρ_{mean}	Massa + vol.-> ρ_{mean}	ToF + E_{dyn} -> ρ_{mean}	Diepte -> ρ_{mean}	nvt
<i>Dichtheid</i> ρ_k	Berekende waarde obv ρ_{mean}	Berekende waarde obv ρ_{mean}	Berekende waarde obv ρ_{mean}	Berekende waarde obv ρ_{mean}	nvt
<i>Treksterkte parallel</i> $f_{t;0;k}$	Berekende waarde obv $f_{m,k}$	Kracht + afm. -> $f_{t;0;k}$	Berekende waarde obv $f_{m,k}$	Berekende waarde obv $f_{m,k}$	Berekende waarde obv $f_{m,k}$
<i>Treksterkte loodrecht</i> $f_{t;90;k}$	Standaardwaarde	Standaardwaarde	Standaardwaarde	Standaardwaarde	Standaardwaarde
<i>Druksterkte parallel</i> $f_{c;0;k}$	Berekende waarde obv $f_{m,k}$	Kracht + afm. -> $f_{c;0;k}$	Berekende waarde obv $f_{m,k}$	Berekende waarde obv $f_{m,k}$	Berekende waarde obv $f_{m,k}$
<i>Druksterkte loodrecht</i> $f_{c;90;k}$	Berekende waarde obv ρ_k	Kracht + afm. -> $f_{c;90;k}$	Berekende waarde obv ρ_k	Berekende waarde obv ρ_k	nvt
<i>E-modulus</i> $E_{0,05}$	Berekende waarde obv $E_{0,mean}$	Berekende waarde obv $E_{0,mean}$	Berekende waarde obv $E_{0,mean}$	Berekende waarde obv $E_{0,mean}$	Berekende waarde obv $E_{0,mean}$
<i>E-modulus</i> $E_{90,mean}$	Berekende waarde obv $E_{0,mean}$	Berekende waarde obv $E_{0,mean}$	Berekende waarde obv $E_{0,mean}$	Berekende waarde obv $E_{0,mean}$	Berekende waarde obv $E_{0,mean}$
<i>Afschuif- modulus</i> G_{mean}	Berekende waarde obv $E_{0,mean}$	Berekende waarde obv $E_{0,mean}$	Berekende waarde obv $E_{0,mean}$	Berekende waarde obv $E_{0,mean}$	Berekende waarde obv $E_{0,mean}$
<i>Afschuif- modulus</i> $G_{0,05}$	Berekende waarde obv $E_{0,05}$	Berekende waarde obv $E_{0,05}$	Berekende waarde obv $E_{0,05}$	Berekende waarde obv $E_{0,05}$	Berekende waarde obv $E_{0,05}$

Als het te onderzoeken hout van de molenstaak en steenbalk (en ook de steekbanden) aan alle (of de meest belangrijke, dat moet vooraf worden overeengekomen) grenswaarden voldoet, dan kan een bepaalde sterkteklasse worden aangehouden. Dit kan hoger zijn dan D30. Bijkomend kan bekeken worden of Poisson's ratios ook bepaald dienen te worden.

b. Niet-destructief bepalen van de factor k_a (natuurlijke veroudering van het hout)

Onder normale condities, zonder feitelijke aantasting, zullen de eigenschappen van hout niet zo snel veranderen. Pas in de loop van vele honderden jaren kunnen de eigenschappen significant afnemen (Wood Handbook Chapter 5). Een eventuele terugval wordt echter niet kwantitatief gemaakt. Kranitz (PhD-thesis ETH, 2014) presenteert een literatuuroverzicht met welke waardes een terugval vertonen. Voor eiken (*Quercus*) is maar minimaal informatie aanwezig. Uit eigen onderzoek van Kranitz blijkt dat Europees eikenhout nauwelijks effecten laat zien van natuurlijke veroudering, zie ook tabel 4. Vooralsnog kan factor k_a op 1 worden gesteld.

Tabel 4. Overzicht van trends hoe eigenschappen wijzigen in functie van veroudering (↑: stijgend; ↓: dalend; ≈ geen verschil)

material	age (year)	equilibrium moisture cont.	differential swelling radial	differential swelling tang.	differential swelling long.	bending strength	Young's modulus in bending	elastic mod. eigenfr.	elastic modulus ultrasound	shear modulus ultrasound	side hardness	Impact bending strength	fracture toughness	fracture energy in bending	elastic limit in bending	
softwoods	current study															
	spruce	90-210				≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈
		90-320	≈	↑/≈	↑/≈											
	fir	120				≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈
		120-470	≈	↓/≈	↓/≈											
	literature															
various species and age					?	?			?	?	↓	↓				
hardwoods	current study															
	oak	210-290	≈	≈	≈	≈			≈	≈	≈		≈	≈		
		210-470	≈	≈	≈											
	literature															
various species and age	↓	?	?		↓	↓				↓ ²	↓	↓				

¹ contradictory results; ² determined by mechanical test

c. Niet-destructief bepalen van de factor k_{con}

Op basis van vergelijking 1 geldt k_{con} alleen maar voor de gehele doorsnede van het houten constructie-element. In de praktijk zal dit echter maar sporadisch het geval zijn. Aangezien er voor eiken tijdens natuurlijke veroudering (honderden jaren) nauwelijks verschillen optreden in de mechanische eigenschappen van het gezonde hout (Kranitz, 2014) kan de waarde voor aangetast hout als volgt worden bepaald:

$$k_{con} = \frac{\text{ karakteristieke waarde eigenschap aangetast hout } }{\text{ karakteristieke eigenschap gezond hout } }$$

Hiertoe moet zowel de eigenschap van gezond als aangetast kunnen worden bepaald en bij voorkeur met hout van hetzelfde constructie-element. Mocht dit niet mogelijk zijn, dan kan k_{con} worden op basis van onderstaande vergelijking:

$$k_{con} = \frac{\textit{karakteristieke waarde eigenschap aangetast hout}}{\textit{karakteristieke eigenschap eiken volgens sterkteklasse}}$$

1.1.5. Overzicht semi-/niet destructieve onderzoeksmethoden

Er zijn diverse methoden die kunnen worden ingezet om op niet-destructieve wijze eventueel een uitspraak te kunnen doen over de sterkteklasse en de karakteristieke sterkte. Verder kan met een aantal methoden de aanwezigheid en de aard van (lokale) aantastingen in kaart worden gebracht. De volgende methoden zijn in gekend:

- Resistograaf (microboorweerstandsmetingen)
- Tomografie (2D) op basis van time of flight van geluidsgolven door hamer
- Tomografie (2D) op basis van elektrische impedantiemetingen
- Ultrasonische geluidsdetectie voor bepaling van dynamische elasticiteitsmodulus
- Inslag hamers (dynamische impacthamers)
- Mobile timber grader
- Boorkernen nemen
- Aanbrengen van een proefbelasting (deflectiometingen bij een vooraf bepaalde mechanische belasting)
- Thermografie
- Visuele beoordeling

a. Resistograaf

Bij deze techniek wordt een boor met een relatief kleine diameter met constante aanvoersnelheid (instelbaar) in het te onderzoeken hout geduwd. Hierbij wordt tevens het toerental van de boor constant gehouden (instelbaar). Ondervindt de boor meer weerstand, dan moet de motor (lineaire gelijkstroommotor) die de omwentelingen regelt meer elektrisch vermogen leveren. De variatie aan vermogen als functie van de indringdiepte wordt tijdens het boren geregistreerd (elke 1/10 mm of 1/100 mm). Vanwege de werking en de geometrie van de boor is het opgenomen vermogen een indicatie voor de variatie aan sterkte van het hout. De lokale sterkte (meest waarschijnlijk betreft dit de afschuifsterkte (Rinn, 2012)) is weer gekoppeld aan de dichtheid (en hardheid) van het hout (poreus materiaal). Vandaar dat in de literatuur deze methode vaak wordt beschreven als een methode om de dichtheid van het hout te bepalen en indirect de sterkte. Vergelijking met microdichtheidsmetingen op basis van X-stralenanalyse vertonen een nagenoeg 1 op 1 relatie tussen het geregistreerd vermogensprofiel en de lokale dichtheid (Figuur 8).

Figuur 6 illustreert verschillende mogelijke boorgeometrieën. Tegenwoordig wordt vooral gebruikt gemaakt van het onderste boorprofiel van Figuur 6a. Dit geeft een optimum tussen minimale beschadiging van de boom of houten constructie-element (verminderen indringen pathogenen), optimale stijfheid van de boor en het verminderen van de wrijvingsweerstand (Rinn, 2012). De boren zijn niet voorzien van voorsnijders.

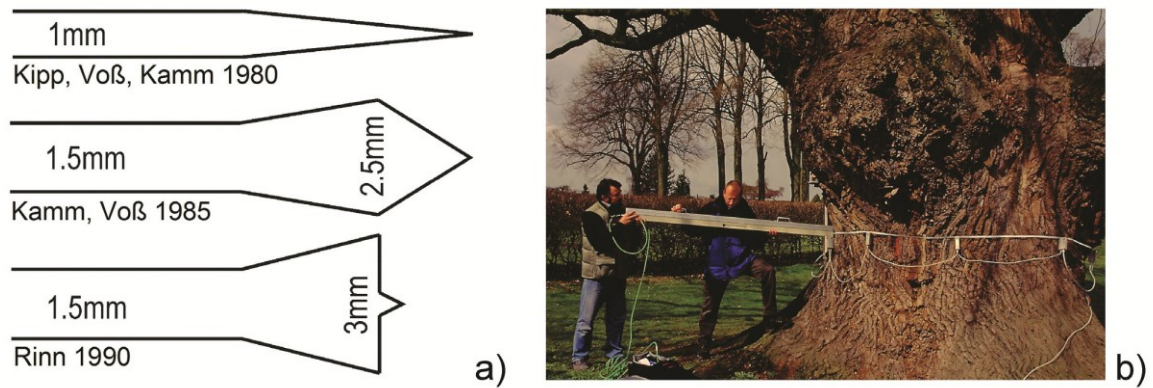


Fig. 6. Verschillende boorgeometrieën (a) en aanboren van een boom (b)

In Figuur 7 wordt een voorbeeld gegeven van de uitvoer van de resistograaf (Rinn, 2012) na boring op verschillende locaties in een balk. Het is meteen duidelijk dat het opgenomen elektrische vermogen (verticale as) afhankelijk is van de weerstand die de boor ondervindt als gevolg van het doorboren van de jaarringen (verschil tussen vroeg- en laathout). Verder is goed te zien dat de richting waarin wordt geboord invloed heeft op het gemeten profiel. Dit is ook van belang bij het boren in bestaande constructies, omdat daar niet altijd duidelijk waar het (virtuele) hart van de balk is.



Fig. 7. Het effect van boren op verschillende locaties

In Figuur 8 (Rinn, 2012) is goed te zien dat het profiel van de resistograafmetingen (rode lijn) goed correspondeert met de dichtheid bepaald met behulp van X-stralen (zwarte lijn). Er is wel een faseverschil tussen de toppen van de twee profielen.

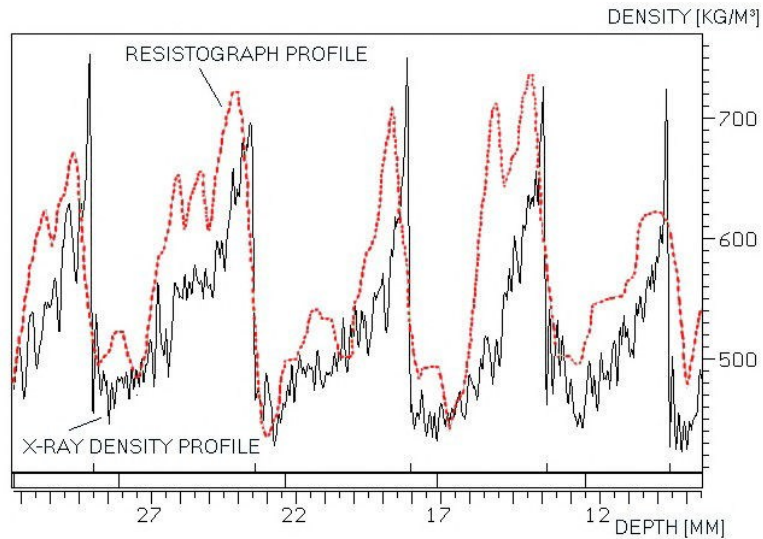


Fig. 8. Overeenkomst tussen resistograaf en X-stralen dichtheid

Dit kan allerlei oorzaken hebben, maar een belangrijke oorzaak is de ligging van de aanstraal-as van de X-stralen ten opzichte van de jaarring (groeiing; zie Figuur 9).

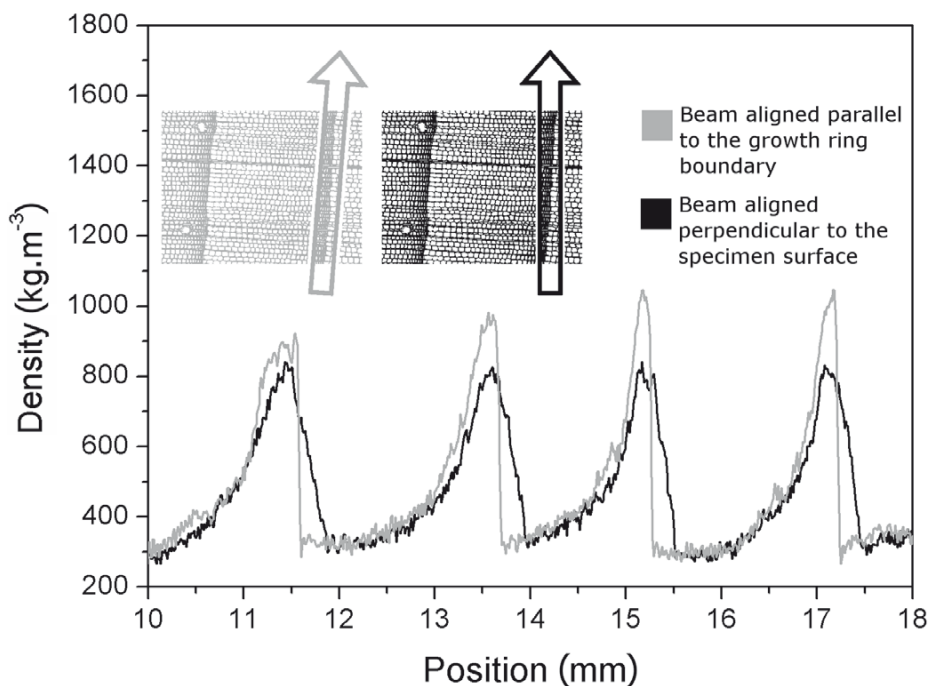


Fig. 9. Invloed van de uitlijning van de aanstraalas (beam alignment) op het gemeten dichtheidsprofiel (Keunecke *et al.*, 2010).

Bij uitlijning parallel aan de groei- of jaarring wordt een beter beeld gekregen van het werkelijk dichtheidsverloop (er vindt geen uitmiddeling plaats). Dit probleem is echter niet aan de orde wanneer gebruikt gemaakt wordt van X-stralen tomografie, waarbij een 3D beeld verkregen wordt van het object onder studie.

Verder zal vanwege de specifieke geometrie van de gebruikte boor, die voorzien is van een scherpe punt welke als priem fungeert, er ook in de boorricting een kracht worden uitgeoefend. Deze kracht kan het hout lokaal samendrukken, in ieder geval bij grote verschillen in dichtheid (grensovergang laathout naar vroeghout). Het laathout ondervindt in boorricting weinig ondersteuning van het vroeghout.

b. Tomografie (2D) op basis van geluidsgolven door hamer (*Sonic Tomography* - SoT)

Bij deze techniek wordt gebruikt gemaakt van geluidsgolven die door het materiaal lopen. De voortplantingsnelheid van de geluidsgolf (v) is onder andere afhankelijk van de dichtheid (ρ) en elasticiteitsmodulus (E) van het materiaal. De relatie is (Review artikel Johnstone *et al.*, 2010):

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

De snelheid van de geluidsgolf wordt hiermee een variabele van de houtsoort, het houtvochtgehalte, temperatuur en specifieke richting van de geluidsgolf ten opzichte van de anatomische structuur. Verder heeft aantasting van het hout invloed op de voortplantingsnelheid van een geluidsgolf. Bij tomografie op bomen worden meestal 8 tot 16 stuks ontvangers (sensors of sonde) gebruikt, die op bepaalde punten op de boom wordt geplaatst met behulp van nagels die door de schors in het hout worden geslagen. De geluidsgolf wordt verkregen door elke nagel afzonderlijk een tikje met een speciale hamer te geven (Figuur 10).

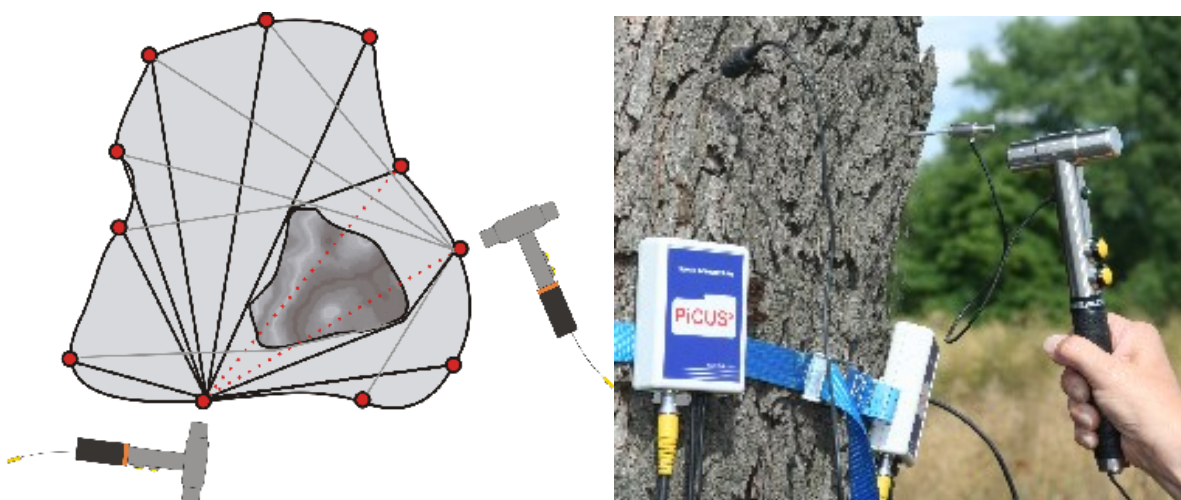


Fig. 10. Akoestische tomografie (Bron: <http://www.argus-electronic.de/index.php/picus-sonic-tomograph>)

Het tikken met de met hamer zendt geluidsgolven (trillingen) door de boom. Op basis van de bekende afstand tussen elke ontvanger en de timing van het tikken met de hamer wordt de voortplantingsnelheid bepaald

van de geluidsgolf. Na signaalbewerking met een speciaal algoritme wordt een 2D beeld gekregen. Door op meerdere hoogtes te meten kan een 3D gelijkend beeld worden verkregen (Figuur 11).

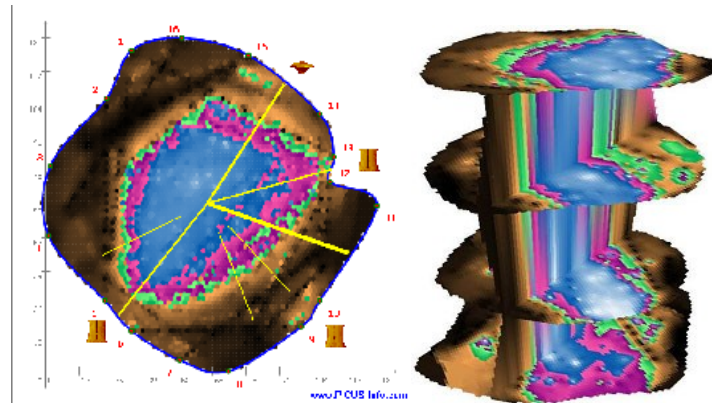


Fig. 11. Reconstructie van akoestische tomografie in 2D (links) en pseudo 3D (rechts) (Bron: <http://www.argus-electronic.de/index.php/picus-sonic-tomograph>)

Zones met afwijkende geluidssnelheid worden met aparte kleuren aangeduid. Zo kunnen aangetaste zones ten opzichte van gezond hout in kaart worden gebracht, afhankelijk van de keuze van de drempelwaarden door de operator.

Omdat de hoogfrequente geluidsgolven (trillingen) zeer snel dempen in lucht, vormen scheuren in het hout een probleem bij de methode en kunnen zo een verkeerd beeld opleveren.

De methode geeft ook geen directe uitspraak over de (rest)sterkte van het hout of de boom. Wel is deze geschikt om niet direct zichtbare aantasting op te sporen in het binnenste van de stam of houten balk. Daarnaast kan de diepte van wel zichtbare aangetaste zones in kaart worden gebracht.

c. Tomografie op basis van elektrische impedantie (*Electrical Impedance Tomography – EIT*)

Tomografie op basis van meting van de elektrische impedantie lijkt in grote lijnen op tomografie op basis van geluidsgolven. De verkregen beelden zijn vergelijkbaar (Figuur 12).

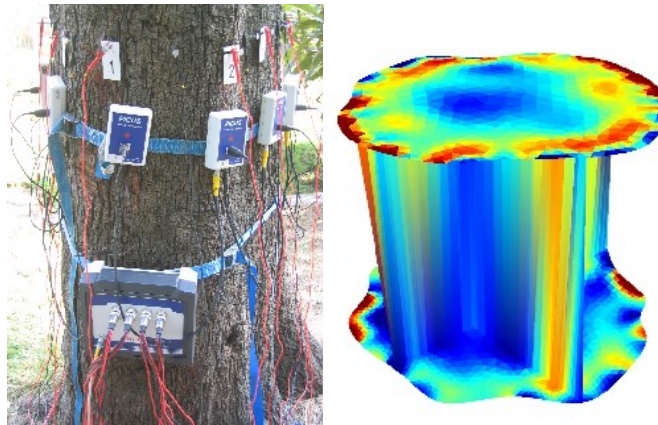


Fig. 12. Elektrische Impedantie tomografie (Bron: <http://www.argus-electronic.de/index.php/en/picus-treetric>): rood is gezond hout, blauw aangetast hout.

Bij deze methode wordt de elektrische impedantie (weerstand waarbij de stroom niet in fase is met de spanning) gemeten. De elektrische impedantie wordt van sensor naar sensor gemeten. De impedantie is afhankelijk van het houtvochtgehalte, de celstructuur van het hout en de aanwezigheid van inhoudsstoffen. In gezond hout is de elektrische impedantie anders dan van aangetast hout. Gezond hout heeft een relatief hoge elektrische impedantie en aangetast hout een lagere elektrische impedantie, omdat aangetast hout meestal meer vocht bevat.

EIT en SoT kunnen complementair aan elkaar worden toegepast, waardoor betere uitspraken te doen zijn over de specifieke toestand van het hout zoals de aanwezigheid van scheuren, holtes en omvang en ligging van aangetaste zones. Uitspraken over (rest)sterkte zijn niet direct mogelijk.

d. Ultrasonische geluidsdetectie van elasticiteitsmoduli

Bij deze techniek wordt ook gebruik gemaakt van geluidsgolven, maar dan in het ultrasound bereik (MHz bereik). De geluidsgolven worden via piezo-transducers uitgezonden en weer ontvangen. Er bestaan twee hoofdvarianten (Machado *et al.*, 2011):

- De directe methode
- De indirecte methode

Bij de directe methode worden de geluidsgolven via het ene kopse eind van een balk verzonden en via het andere kopse eind weer ontvangen. Op basis van de tijd die een geluidsgolf nodig heeft om de afstand tussen de kopse einden af te leggen, kan de geluidssnelheid (v_l) worden bepaald en in combinatie met de dichtheid (ρ) van het onderzochte materiaal kan de dynamische elasticiteitsmodulus E_{dyn} worden berekend volgens onderstaande formule:

$$E_{dyn} = \frac{1}{4} \rho v_L^2 \quad (3)$$

De indirecte methode is vooral bruikbaar voor het meten aan bestaande houten constructies waarbij de kopse einden van de constructie-elementen niet toegankelijk zijn. De zender en ontvanger worden daarom op de zijkanten/flanken van het constructie-element geplaatst, want deze zijn meestal wel vrij toegankelijk. Ook bij de indirecte methode wordt de E_{dyn} bepaald volgens bovenstaande vergelijking.

In Figuur 13 wordt de plaatsing getoond van de zender en ontvanger bij gebruik van de indirecte methode.



Fig. 13. Ultrasonische geluidsdetectie (Bron: Machado *et al.*, 2011)

De dynamische elasticiteitsmodulus E_{dyn} en de globale elasticiteitsmodulus E_g zijn met elkaar gecorreleerd. Machado *et al.* (2011) geven deze correlatie als:

$$E_g = a + m \cdot E_{dyn} \quad (4)$$

Figuur 14 geeft een voorbeeld voor maritime pine (*Pinus pinaster*).

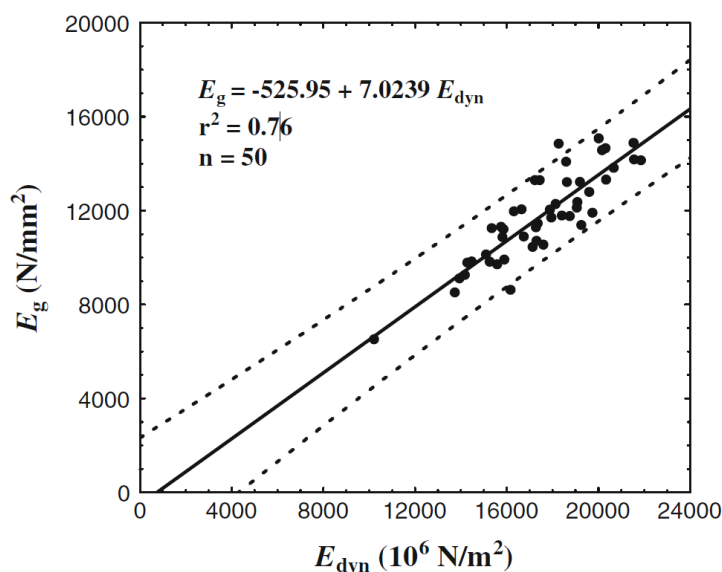


Fig. 14. Correlatie tussen globale en dynamische modulus van maritime pine (Bron: Machado *et al*, 2011)

De globale elasticiteitsmodulus E_g (ook wel **E_b** genoemd) is ook gecorreleerd aan de buigsterkte **f_m** van het constructie-element (zie Figuur 15).

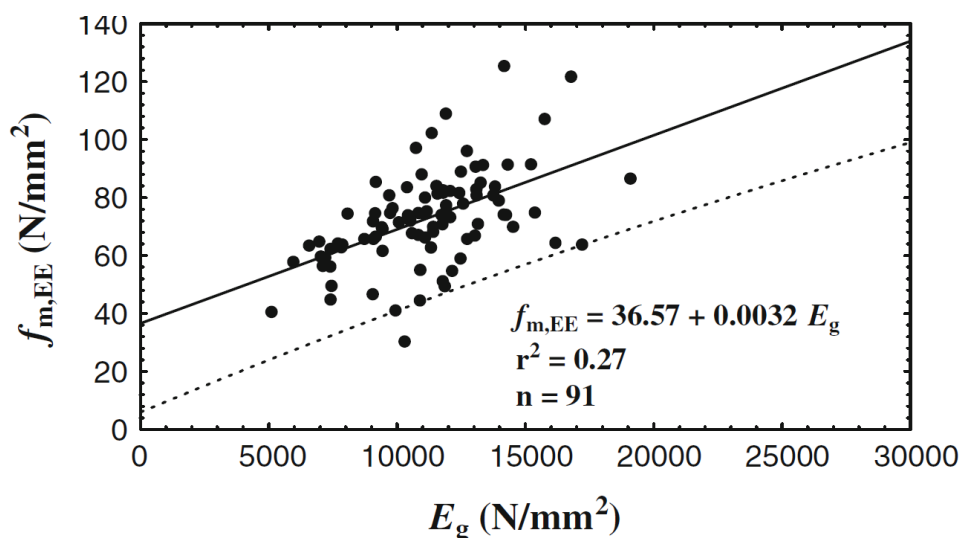


Fig. 15. Correlatie tussen buigsterkte en globale elasticiteitsmodulus (Bron: Machado *et al*, 2011)

De verkregen waarde zijn wel afhankelijk van de actuele testcondities zoals temperatuur van het hout en het houtvochtgehalte, zoals beschreven door Llana *et al*. (2014).

e. Inslaghamers (onder andere *Pylodyn*)

Bij deze methode wordt een metalen pin met bepaalde startenergie in een houten constructie-element gedreven (*dynamic impact testers*). De penetratiediepte van de pin is omgekeerd evenredig met de hardheid van het onderzochte materiaal. Indirect kan hiermee de dichtheid van het materiaal worden bepaald. Bij aangetast hout zal de metalen pin dieper penetreren. De penetratiediepte kan direct worden afgelezen.

Figuur 16 geeft een voorbeeld van de correlatie tussen penetratiediepte bij gezond hout en het volumegewicht ervan. Ter referentie is ook de relatie tussen de meetwaarde voor resistograaf en dichtheid weergegeven.

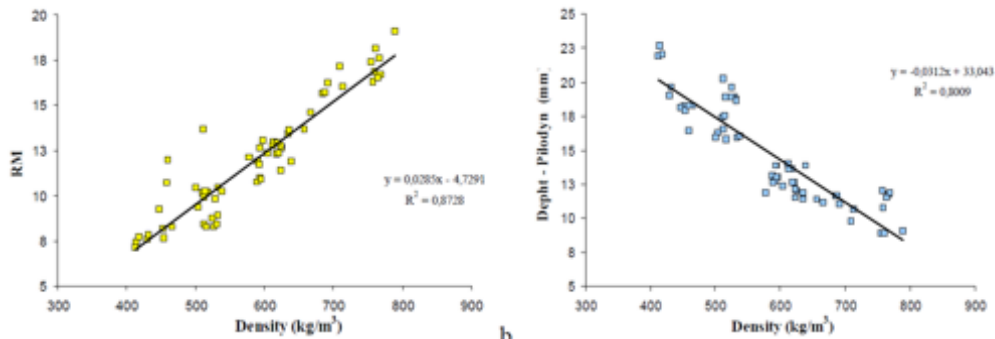


Fig. 16. Volumegewicht versus a. Resistograafmetingen en b. Penetratiediepte Pilodyn (Bron: Henriques *et al*, 2011)

f. Mobile timber grader

Het principe van de *mobile timer grader* lijkt op dat van de tomografie met behulp van geluidsgolven. Bij de *mobile timber grader* verzorgt een intern ingebouwde hamer voor een gedefinieerd impact (tik). De geluidsgolven reizen nu van het punt van “inslag” naar het tegenover liggende vlak en worden dan teruggekaatst en opgevangen door een in dezelfde behuizing geplaatste sensor (Figuur 17). Op basis van de opgegeven geometrie (lengte) en geschatte dichtheid van het proefstuk (balk) wordt de dynamische elasticiteitsmodulus berekend en hieraan gekoppeld de sterkteklasse van de balk of plank. Vanwege de opbouw van de *mobile timer grader*, zie onderstaande figuur, is deze tot nu toe alleen geschikt voor metingen aan de kopse eind van balken of planken (i.e. vergelijkbaar met de directe US methode), waardoor deze methode slechts beperkt inzetbaar is voor bestaande houten constructies.



Fig. 17. Mobile timber grader sensor van Brookhuis (Bron: <http://www.brookhuis.com/timber-grader-mtg.html>)

g. Boorkernen nemen

Bij deze methode worden met een holle boor boorkernen uit het te onderzoeken hout of boomstam gehaald. De diameter van de boorkernen varieert. Bij kleine diameters (circa 5 mm doorsnede) wordt, indien het mogelijk is om een boorkern onbeschadigd uit de boom te halen, er een buigproef (radiaal) uitgevoerd. De buighoek waarbij breuk optreedt, is een maat voor de stijfheid van het hout. De kracht waar bij de boorkern breekt, is een maat voor de radiale buigsterkte (Fractometer Figuur 18, beschreven in Mattcheck *et al.*, 1995).

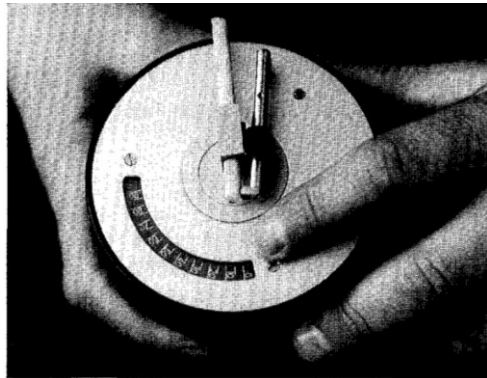


Fig. 18. Fractometer ter bepaling van buigsterkte van boorspaan (Bron: Mattheck *et al*, 1995)

Met de analyse kunnen wel zones met aantasting kwantitatief in kaart worden gebracht, zie tabel 5.

Tabel 5. Klassering aantasting op basis van Fractometer metingen

Fractometer		Decay effect	Wood property
Fracture moment	Fracture angle		
large	small	low	high stiffness and high strength
large	large	lignin destruction	low stiffness but high strength
small	small	cellulose destruction	high stiffness but low strength
small	large	lignin and cellulose destruction	low stiffness and low strength

Met doorontwikkelde varianten (Fractometer II en Fractometer III) kan ook de druksterkte in twee verschillende richtingen worden bepaald (axiaal en radiaal), de afschuifsterkte (tangenteel en radiaal) en tevens de tangentiële buigsterkte.

Met boorkernen van grotere diameters kunnen dezelfde eigenschappen worden bepaald. Nadeel van het nemen van grote boorkernen is dat er veel grotere openingen ontstaan in het te onderzoeken hout, waardoor de kans op het binnendringen van pathogenen in belangrijke mate toeneemt in vergelijking met de boorgaten van de resistograaf.

h. Aanbrengen van een proefbelasting

Bij deze techniek wordt een constructie(-onderdeel) of bomen met een bekende, vooraf bepaalde belasting getest en moet deze de test zonder problemen kunnen weerstaan. Bij eenvoudige constructie-elementen, zoals elektriciteitspalen, is de opzet en uitvoering in verhouding eenvoudig en kan de reststerkte of maximaal toelaatbaar buigmoment betrouwbaar worden bepaald (Hron *et al*, 2011). Bij complexe constructies uit samengestelde constructie-elementen moet het krachtenspel zeer goed worden begrepen, waarbij er tevens rekening moeten worden gehouden met al aangetaste delen en verzwakte verbindingen. Ook is het niet eenvoudig om op een afzonderlijk constructie-element van een constructie een gekende proefbelasting aan te brengen. Vanwege de specifieke opbouw van de standerdmolen, lijken er wel betere mogelijkheden om

de standaard (of molenstaak) van een proefbelasting te voorzien. Punt van aandacht is wel het introduceren van de belasting via de molenkast.

In deze context kunnen ook de mogelijkheden voor speckle pattern interferometry worden bekeken (Bijvoorbeeld VIC 3D).

i. Thermografie

Met behulp thermografie kan de temperatuur van constructie-elementen worden bepaald. Dit kan door het contactloos uitvoeren van spotmetingen met bijvoorbeeld een infrarood thermometer of oppervlaktemetingen met een infraroodcamera. Meestal gebeurt dit statisch, dat wil zeggen dat de temperatuur bij de heersende omstandigheden wordt vastgelegd, maar een interessante variant is wellicht een methode waarmee hoogvermogen lampen/flitsers kortstondig het op te warmen constructie-elementen bestralen. Direct na het uitzetten van de verlichting wordt het warmtebeeld geregistreerd en gevolgd in de tijd (*Pulsed thermography*). Zones met hoge thermische geleiding zullen de warmte sneller naar de massa afvoeren dan zones met een lage thermische geleiding. In principe zouden hiermee zones met een hoger houtvochtgehalte of achterliggende holle ruimte in kaart kunnen worden gebracht.

j. Visuele beoordeling

De visuele beoordeling wordt door ter zake kundige personen uitgevoerd en bestaat vooral uit kijken en gestructureerd vastleggen van de waarnemingen. Ter ondersteuning wordt gebruikt van hulpmiddelen, zoals camera's, loepen, lampen, boroscopen, houtvochtmeters, scheurdieptemeters, etc. Met visuele beoordeling kan onder andere inzicht verkregen worden in:

1. Aanwezigheid van (droog)scheuren aan het oppervlak:
 - a. Ligging
 - b. Oriëntatie
 - c. Grootte (diepte, breedte, lengte)
2. Aanwezigheid van knopen aan het oppervlak
3. Draadverloop en hoek t.o.v. de axiale as
4. Aantastingen zichtbaar aan het oppervlak:
 - a. Afmetingen
 - b. Aard van de aantasting
5. Houtvochtgehalte
6. Overige zichtbare bijzonderheden of afwijkingen:
 - a. Verkleuringen
 - b. Missen van constructie-element(en)
 - c. Toegepaste conserveringsmethode
 - d. ...

1.2. Ontwikkelen van een methodiek voor het constructief evalueren van de reststerkte van historisch waardevolle houtconstructies

Het ontwikkelen van een dergelijke methodiek valt buiten het doel van deze studie, maar het is duidelijk dat om tot een gefundeerde beslissing te kunnen komen, de interpretatie van de metingen met de resistograaf dienen te kaderen in een:

- Inzicht in de veiligheid van:
 - constructie als geheel
 - per constructie-element
- Eurocodes als leidraad:
 - uniforme rekenwijze voor elke houtconstructie (schematisering en berekenen)
 - overschrijden Limit States voor sterkte (ULS) en stijfheid (SLS)
 - uitbreiden methodiek kansberekening (*probabilistic design*) en updaten met nieuwe meetgegevens (Bayesian)

→ **wel of niet behoud authentiek materiaal constructief verantwoord**

Een constructief verantwoorde beslissing gebaseerd op een deterministische aanpak, is weergegeven in Figuur 19 (linker grafiek)

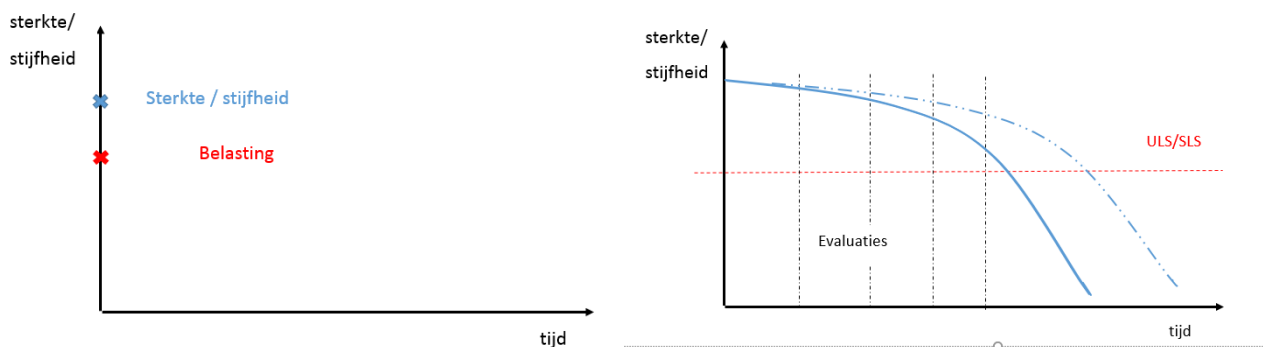


Fig. 19. Deterministische beslissing reststerkte in functie van tijd

Met inachtnaam van veroudering, dan zal het dit in functie van de tijd verlopen zoals weergegeven in Figuur 19 (rechter grafiek van Figuur 19). Echter, gezien het materiaal inherent variabel is, is er een probabilistische karakteristiek die eveneens in rekening gebracht moet worden (Figuur 20, linker grafiek). Als laatste, kan de levensduur uiteraard verlengd worden door het uitvoeren van bepaalde interventies (rechter grafiek van Figuur 20).

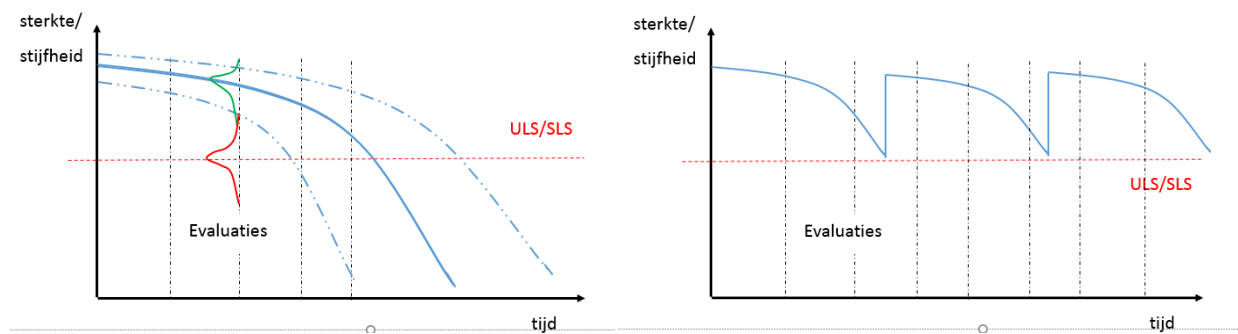


Fig. 20. Probabilistische benadering

Uiteindelijk wil een constructeur volgende informatie:

- Constructieve opbouw van de constructie:
 - Globale opbouw van de constructie
 - Vorm en afmetingen constructie-elementen
 - Materiaal constructie-elementen
 - Detaillering verbindingen
 - Steunpunten afdracht krachten
 - Aangrijpingspunten belasting
- Gebruiksfunctie
- Regio

➔ **veiligheid constructie als geheel en delen**

En zou een inspectie dus volgende info moeten kunnen leveren:

- Opbouw van de constructie:
 - *Globale opbouw van de constructie*
 - *Vorm en afmetingen constructie-elementen (met name ligging + grootte aangetaste zones)*
 - *Materiaal constructie-elementen (sterkteklasse toegepaste houtsoort(en))*
 - *Detaillering verbindingen (indien noodzakelijk)*
 - Steunpunten afdracht krachten
 - Aangrijpingspunten belasting
- Gebruiksfunctie
- Regio
-

➔ *Evaluatie veiligheid constructie*

➔ *In overleg beslissing interventie en soort interventie*

➔ *Controle op uitvoering interventie*

De resistograaftechniek zoals hieronder verder beschreven is uiteraard slechts een onderdeel van een groter beslissingsproces.

1.3. Resistograaftechniek in detail

De keuze van eender welke niet-destructieve inspectietechniek zal afhangen van:

- Bereikbaarheid constructie-elementen
- Te verzamelen informatie
- Kostprijs
- Betrouwbaarheid/reproduceerbaarheid
- Gevoeligheid/resolutie

De keuze voor resistograaf kan beargumenteerd worden omdat deze techniek volgende eigenschappen heeft:

- Relatief snel en eenvoudig uitvoerbaar en goedkoop
- In principe detectie aangetaste zones goed mogelijk
- Indirecte info over karakteristieke sterkte gezond hout
- Relatief kleine beïnvloede zone (voordeel; meerdere metingen in hetzelfde gebied)
- Kleine inspectiezone per meting (nadeel, lijnmeting)
- Reproduceerbaar!?

1.3.1. Algemene invloedsfactoren

Zoals eerder al beschreven, wordt met de resistograaf inzicht verkregen in het verloop van het opgenomen elektrische vermogen (amplitude) tijdens het binnendringen van een kleine boor in het te onderzoeken hout. Figuur 21 geeft een uitsnede van een dergelijk meetresultaat van een inspectie uitgevoerd op de houten delen van de Steenakkermolen.

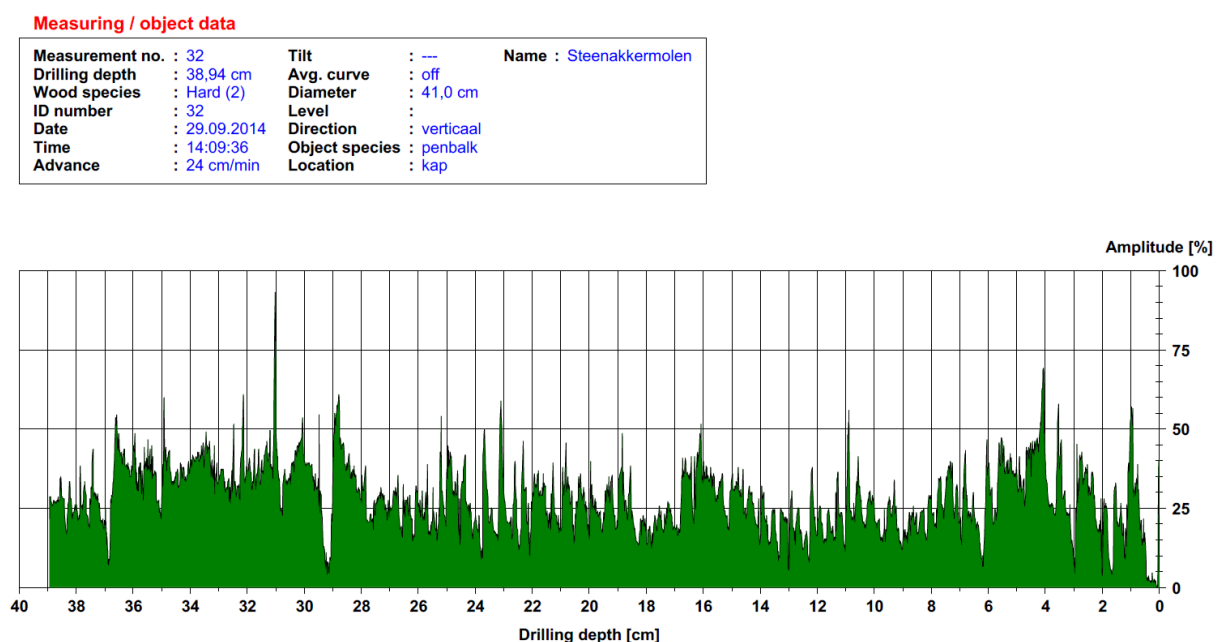
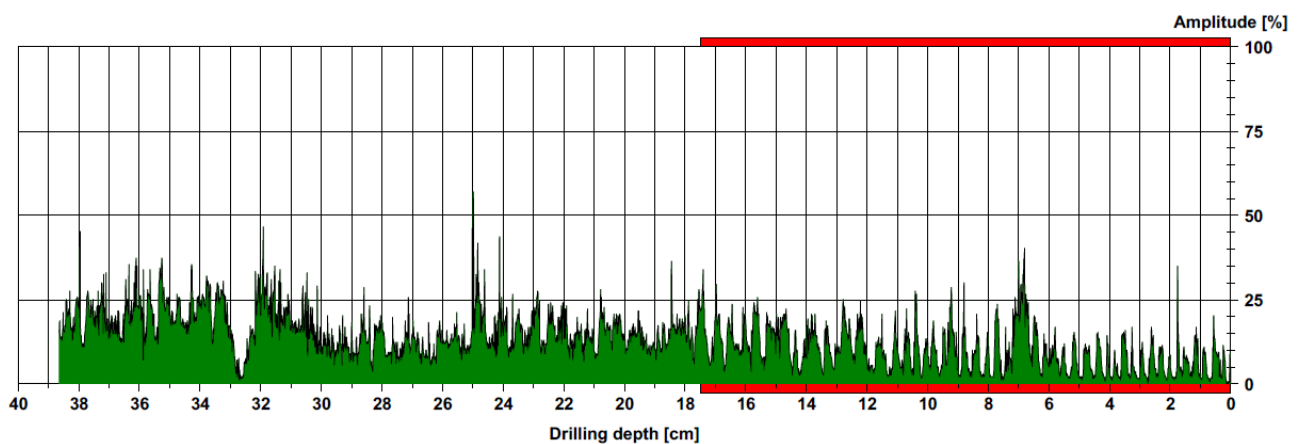


Fig. 21. Voorbeeld van resistograaf meetresultaat van de steenakkermolen, nl. penbalk (Bron: Rapport 8060R1, Steenakkermolen)

Een dergelijke meetcurve moet worden vertaald naar de dichtheid en (rest)sterkte van het onderzochte hout en tot slot vertaald worden naar een reststerkte van het onderzochte constructie-element. Bovenstaande meetcurve geldt echter voor een balk die bij visuele beoordeling als goed is bestempeld. Bij aangetaste balken ziet de meetcurve er anders uit en moet waarschijnlijk gewerkt worden met zonering omdat het eerste deel visueel als verzwakt wordt beoordeeld (Figuur 22).

Measuring / object data

Measurement no. : 36	Tilt : ---	Name : Steenakkermolen
Drilling depth : 38,65 cm	Avg. curve : off	
Wood species : Hard (2)	Diameter : 55,0 cm	
ID number : 36	Level :	
Date : 29.09.2014	Direction : verticaal	
Time : 14:53:57	Object species : bovenas	
Advance : 25 cm/min	Location : kap	



Assessment

■	From 0,0 cm to 17,5 cm : verzwakt
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :

Comment

balk matig

Fig. 22. Voorbeeld van resistograaf meetresultaat van de steenakkermolen, nl.bovenas (Bron: Rapport 8060R1, Steenakkermolen)

Uit bovenstaande meetcurves wordt duidelijk dat het bepalen van de mechanische eigenschappen niet eenduidig en eenvoudig is. Acuna *et al.* (2011) geven echter een beschrijving van een methodiek om de meetwaardes te vertalen naar een dichtheid. Deze methodiek wordt hierna beschreven. Dat op basis van resistograafmetingen de dichtheid van hout goed (+/- 20 kg/m³) kan worden voorspeld, blijkt onder andere uit onderzoek van SHR en de Universiteit van Wageningen (Figuur 23). De door deze twee partijen toegepaste methode is echter niet beschreven. Wel vermelden de onderzoekers dat elke houtsoort zijn eigen ijklijn heeft en dat alleen dosse en kwartierse metingen zinvol zijn, waarbij de boorricting niet uitmaakt. In hoeverre deze laatste waarnemingen altijd gelden is niet onderbouwd. Ook is niet bekend welke invloed slijtage van de boor heeft.

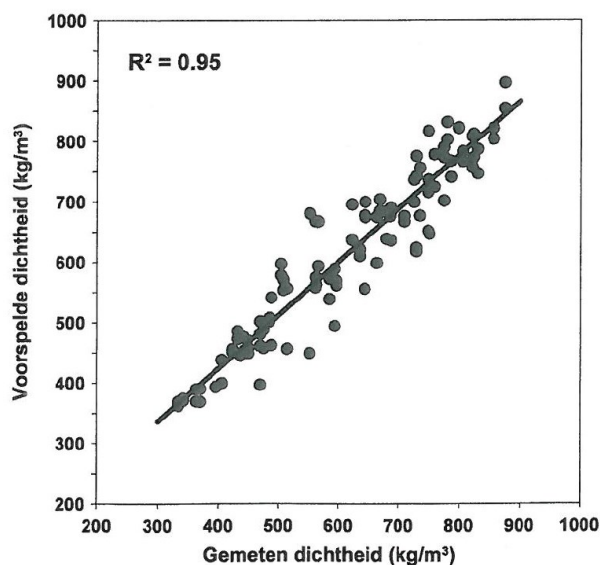


Fig. 23. Verband tussen conventioneel gemeten dichtheid van meranti en de voorspelde dichtheid (Bron: Houtwereld, nr 11, 2012)

Een bijkomstige complicatie is het typische verloop van het globale profiel voor specifieke houtsoorten. In Figuur 24 wordt hiervan een voorbeeld gegeven voor naaldhout, verspreidporig/diffuusporig hout en ringporig hout (bijvoorbeeld eik).

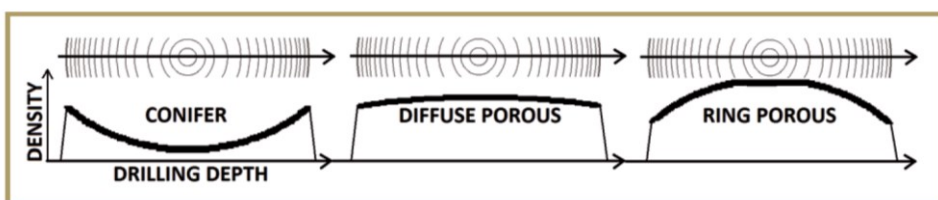


Fig. 24. Typische trend curves van de boorweerstandprofielen (Read *et al.*, 2011, Bron: Rinn, 2012)

Verder heeft ook het houtvochtgehalte een invloed op de gevonden profiel waarden (gemiddelde boorweerstand of average drill resistance), zie ook Lin *et al.* (2003). Bij hoger houtvochtgehalte neemt ook de boorweerstand toe (Figuur 25).

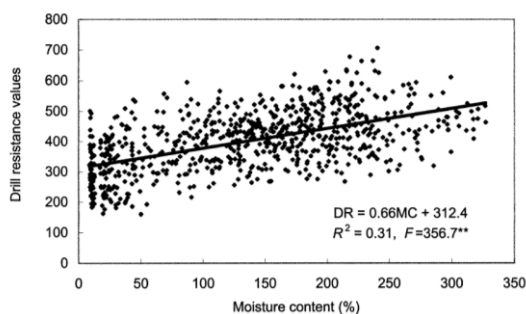


Fig. 25. Relatie tussen boorweerstand en vochtgehalte (11 tot 320%) (Bron: Lin *et al.*, 2003)

1.3.2. Bepalen van de dichtheid - volumegewicht

Acuna *et al.* (2011) geven een gedetailleerde methode om op basis van het gemeten boorweerstandspatiefiel een uitspraak te doen over de dichtheid van het onderzochte hout en op basis van specifieke variaties in het verloop ook welke houtsoort het betreft. Hiertoe worden diverse parameters en hun invloed bepaald. Onderstaande figuren geven een overzicht van de onafhankelijk van elkaar te bepalen parameters.

a. Gemiddelde waarde (total average V_{med}) en variabiliteit (V_{des})

De gemiddelde waarde wordt omschreven als het gemiddeld opgenomen elektrisch vermogen per lengte-eenheid (i.e. oppervlak onder de curve gedeeld door de boorlengte). De variabiliteit V_{des} wordt voor dezelfde meetreeks bepaald.

$$\text{Media} = V_{med} = \frac{\int_0^A f(x)}{0A} \quad [1]$$

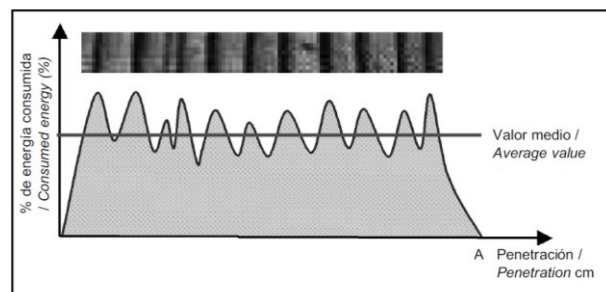


Fig.26. Gemiddelde waarde

b. Bepaling van gemiddeld maximum M_{max} en gemiddeld minimum M_{min}

Voor de bepaling van het gemiddeld maximum M_{max} en minimum M_{min} wordt elke afzonderlijke topwaarde en dalwaarde verzameld en gedeeld door het aantal waarnemingen.

$$\text{Media de mínimos} = M_{min} = \frac{\sum_{j=1}^m m_j}{m} \quad [3]$$

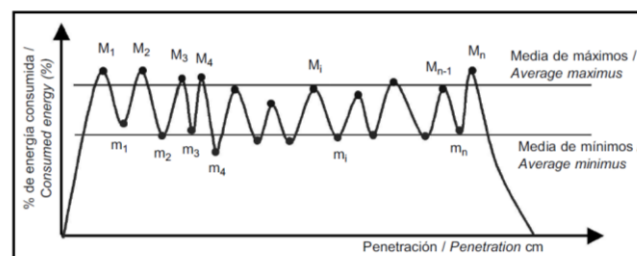


Fig. 27. Gemiddelde maxima en minima

Verder kunnen nog de volgende onafhankelijk parameters worden verzameld: V_{max} , V_{min} en initiële stijghoek ANG (Figuur 28).

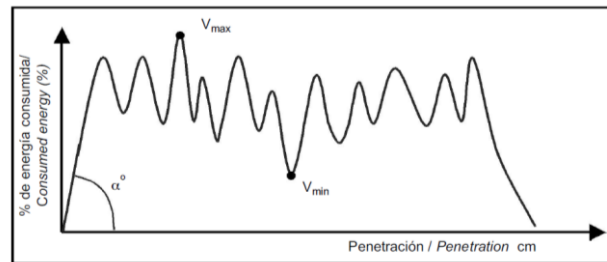


Fig. 28. Initiële stijghoek en absoluut maximum en minimum

Tabel 5 geeft een overzicht van onafhankelijke en afhankelijk te bepalen parameters (kolom 2). Dergelijke parameters kunnen ook voor andere boorrictingen worden bepaald en kunnen bijvoorbeeld helpen bij het identificeren van de gebruikte houtsoort, bijvoorbeeld welke eikensoort.

Tabel 5. Onafhankelijke en afhankelijke parameters

Código / Code	Variables / Variables	ANOVA entre grupos / ANOVA among groups		Intervalos resistográficos / Resistographic Intervals		
		Valor F / Value F	p val. / p val.	A	B	C
1	$V_{med} \otimes$	2.93	0.053 *	318.4 +	340.4	339.6
2	$V_{DES} \otimes$	207.54	0.000 *	79.0	40.9 +	42.3
3	V_{CV}	542.66	0.000 *	26.5	13.5 +	13.9
4	$V_{min} \otimes$	0.40	0.520		239.6 +	234.8
5	$V_{max} \otimes$	0.22	0.800	510.5	498.4 +	504.8
6	Valor J	39.54	0.000 *	57.2 +	44.4	46.4
7	Valor H	4.04	0.044 *		28.2 +	29.7
8	$M_{max} \otimes$	0.03	0.966	352.4 +	355.0	354.6
9	$M_{min} \otimes$	0.03	0.968	317.1 +	319.4	319.1
10	$M_{max} - M_{min}$	0.00	0.983		34.5 +	34.6
11	$M_{max} - V_{med}$	0.20	0.652	(10.2)	4.5 +	4.7
12	$M_{min} - V_{med}$	0.02	0.891		5.5 +	5.5
13	$V_{max} - M_{max}$	0.82	0.366	(129.7)	116.9 +	121.3
14	$V_{min} - M_{min}$	1.30	0.254		2.3 +	2.3
15	Ang1000 \otimes	2.93	0.053	16.8 +		
16	Ang1500 \otimes	207.54	0.000	16.9 +		

\otimes - Variables independientes / Independent variables.

+ - Intervalo resistográfico seleccionado para cada variable / Resistographic interval selected for each variable.

Interval A heeft betrekking op de gehele meetcurve. Bij interval B worden de eerste en de laatste cm niet gebruikt. Bij interval C worden de eerste 1,5 cm en de volledige tweede helft van de meetreeks niet gebruikt. Waarde J is gedefinieerd als

$$J = 100 \times \frac{V_{min} - V_{med}}{V_{med}} \quad (5)$$

Waarde H is gedefinieerd als:

$$H = 100 \times \text{abs}\left(\frac{V_{min} - V_{med}}{V_{med}}\right) \quad (6)$$

1.3.3. Aandachtspunten bij het opzetten van een proefprogramma voor resistograaf

De volgende aandachtspunten kunnen/dienen te worden beschouwd:

- Invloed van houtvochtgehalte
- Invloed van temperatuur
- Invloed van scheuren
- Invloed van boorproces:
 - o Indringsnelheid
 - o Omwentelingssnelheid
 - o Boorgeometrie
 - o Boorlengte
 - o Slijtage boor
- Invloed van boorrichting:
 - o Radiaal
 - o Tangentieel
 - o Hoek t.o.v. axiale as
- Invloed van groeicondities:
 - o Dichtheid samples molenstaak en referenties
 - o Gemiddelde jaarringbreedte samples molenstaak en referenties
- Invloed van eikensoort
- Invloed van aangetaste zones:
 - o Witrot
 - o Bruinrot
 - o Insecten
- Invloed van chemische substanties:
 - o Conserveringsmiddelen
 - o Smeermiddelen
- Invloed van software-instellingen NDO methoden:
 - o Bewerkte output (black box)
 - o Ruwe meetdata



1.3.4. Experimenteel werk

Het experimenteel werk kan opgedeeld worden in verschillende acties:

- Evaluatie van uitgevoerde inspecties: interpretatie van weerstandsprofielen en vereisten bij rapportage
- Indirecte bepaling karakteristieke sterkte op basis van dichtheid en vervolgens relaties met E-mod en buigsterkte:
 - Radiaal en tangentiaal boorprofiel
 - Defectvrij hout
 - Buigproeven voor bepaling globale elasticiteitsmodulus (E_b) en buigsterkte (f_m)
 - Dynamische E-modulus (*resonalyzer*)
 - Dichtheidsbepalingen (massa, densometrie)
 - Invloed kunstmatige defecten, boorsnelheid en slijtage boor

→ *Kenmerken gezond hout*

- Boorprofielen praktijk duiden:
 - stalen uit verwijderd materiaal van molens (validatie)
 - vergelijken van boorprofiel met dwarsdoorsnede hout (o.a. dichtheid, jaarring, specifieke aantasting, etc.)

→ *Kenmerken aangetast hout – Beoordelingsrichtlijn boorprofielen*

Op basis van dit alles werd een beoordelingsrichtlijn (*'best practice'*) opgesteld (zie **DEEL 4 van dit onderzoeksrapport**).

1.4. Evaluatie van uitgevoerde inspecties

1.4.1. Uitgevoerde inspecties aan de Steenakkermolen met resistograaf

Hieronder worden de evaluaties beschreven van de inspecties uitgevoerd aan de Steenakkermolen, waarvan in Figuur 29 een schaalmodel en tekening is gegeven.

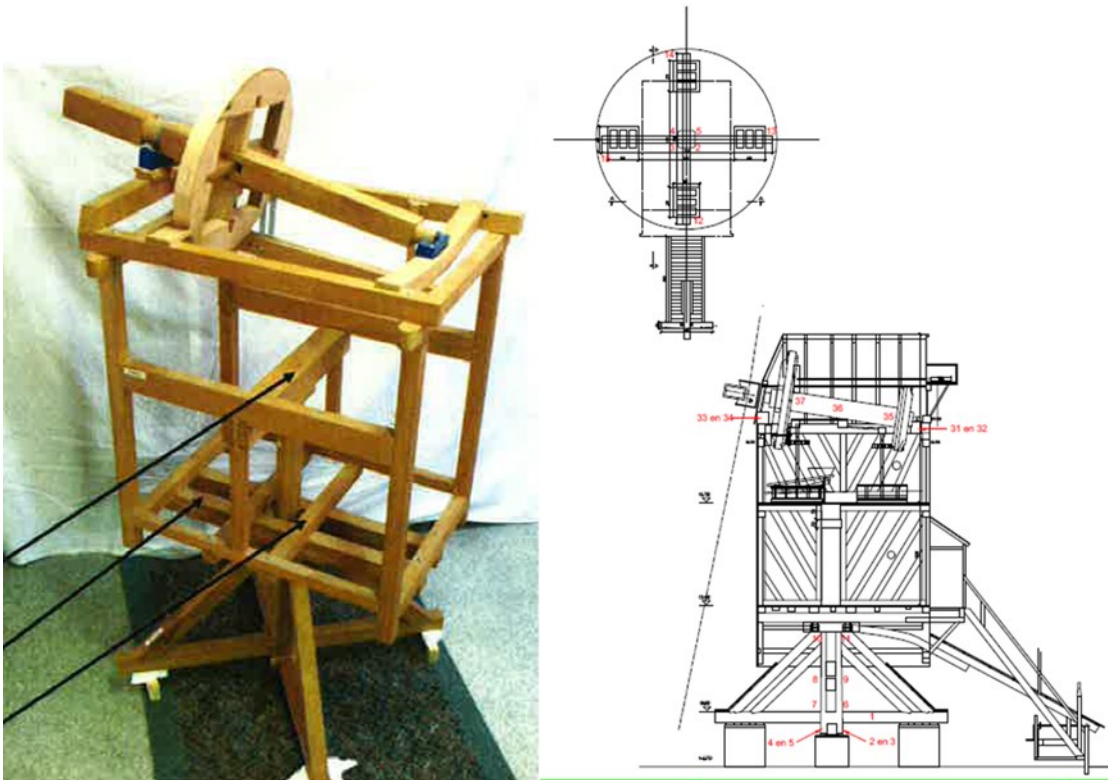


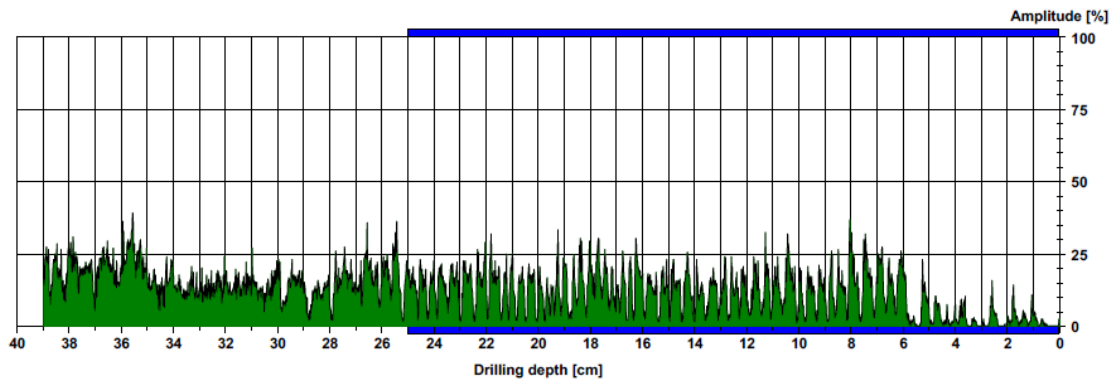
Fig. 29. Schaalmodel en tekening staakmolen (Tekening: © ir arch Sabine Okkerse - architectenbureau Sabine Okkerse bvba)

De twee profielen die in Figuur 30 weergegeven zijn, krijgen elk een andere beoordeling, maar vertonen wel een gelijkaardig verloop, behalve de eerste 5-6 cm van het profiel (te bekijken van rechts naar links). Profiel A vertoont een duidelijke insectenaantasting in de spintzone, maar bevat verder vanaf 6 cm diepte gezond hout, gelijkaardig aan het profiel B.

Profiel A

Measuring / object data

Measurement no. : 10	Tilt : --	Name : Steenakkermolen
Drilling depth : 38,96 cm	Avg. curve : off	
Wood species : Hard (2)	Diameter : 70,0 cm	
ID number : 10	Level :	
Date : 29.09.2014	Direction : horizontaal	
Time : 10:15:13	Object species : staak	
Advance : 23 cm/min	Location : gelijkvloers	



Assessment

<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input checked="" type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 25,0 cm : grote houtwormkever
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :

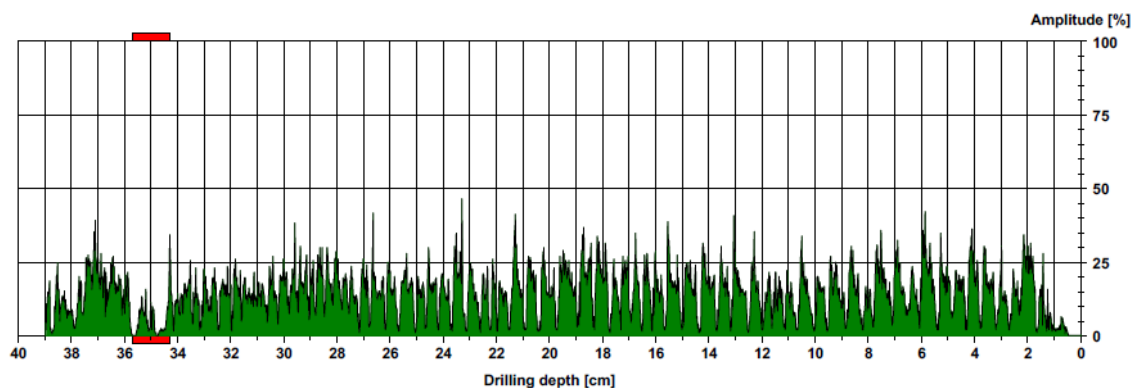
Comment

van 0 tot 25cm slecht

Profiel B

Measuring / object data

Measurement no. : 8	Tilt : --	Name : Steenakkermolen
Drilling depth : 38,95 cm	Avg. curve : off	
Wood species : Hard (2)	Diameter : 74,0 cm	
ID number : 8	Level :	
Date : 29.09.2014	Direction : horizontaal	
Time : 09:55:07	Object species : staak	
Advance : 23 cm/min	Location : gelijkvloers	



Assessment

<input checked="" type="checkbox"/>	From 34,3 cm to 35,7 cm : krimpscheur
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :

Comment

aantasting door grote houtwormkever

Fig. 30. Profielen Steenakkermolen, staak-gelijkvloers, profielen A en B

De beoordeling van het profiel (Figuur 31) van de steenbalk is eveneens moeilijk te interpreteren. Er is een duidelijk verschil met voorgaande profielen, maar een gelijkaardige beoordeling als profiel A (Figuur 30) wordt gegeven. Zonder bijkomende informatie is dit moeilijk te interpreteren.

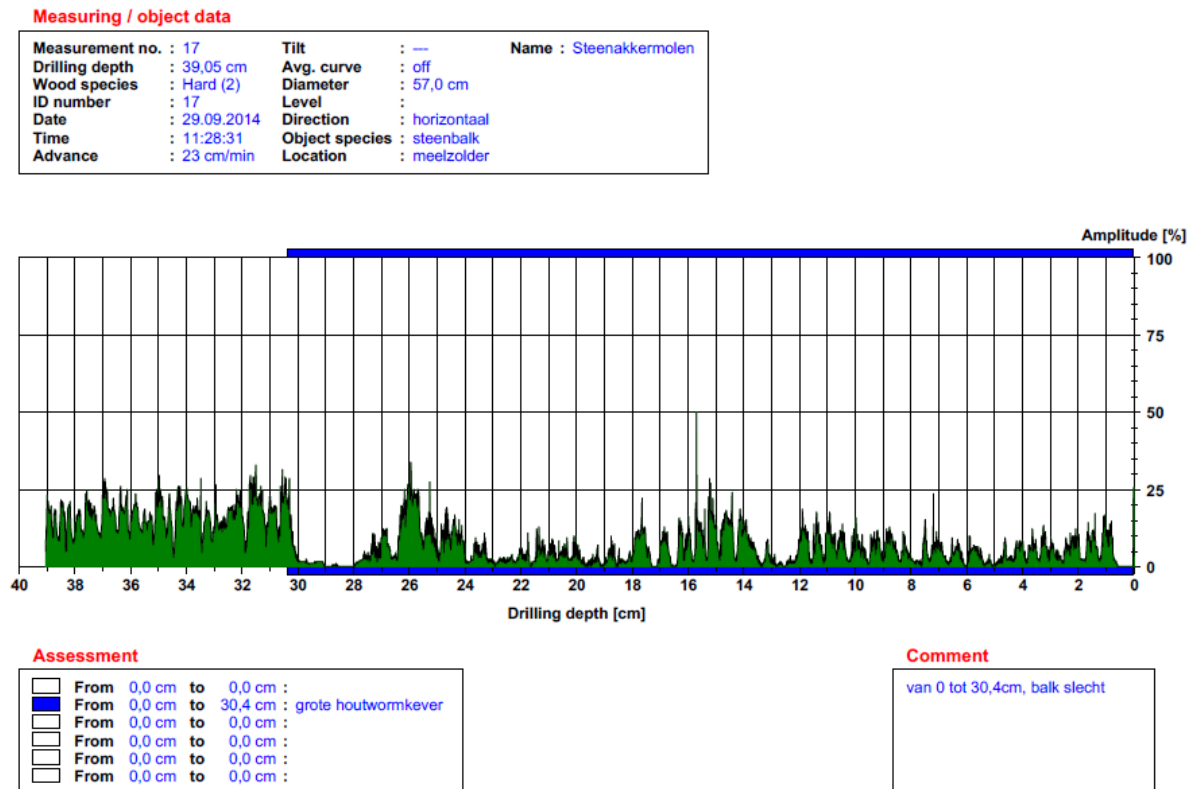


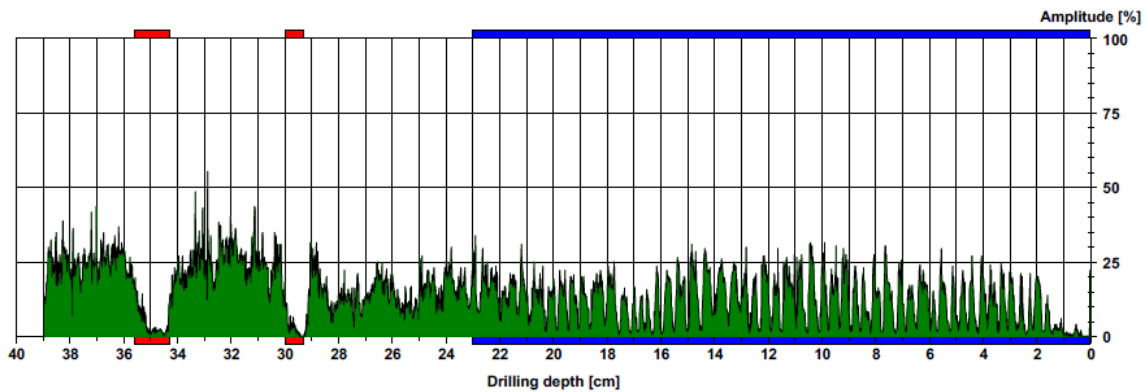
Fig. 31. Profiel Steenakkermolen, steenbalk

Het profiel A in Figuur 32, waarbij een de staak ter hoogte van de meelzolder werd aangeboord, vertoont eenzelfde verloop als beide profielen in Figuur 30. Ook hier werd het profiel als een aantasting van de grote houtwormkever tot 23 cm diepte geïnterpreteerd, wat niet het geval is. Dit is uiteraard moeilijk te interpreteren, en de scherpe pieken en dalen zijn daarvan de oorzaak. De krimpscheuren zijn daarentegen duidelijk in het profiel aanwezig. Hetzelfde kan gezegd worden voor profiel B in Figuur 32. Er is dus sprake van een mogelijke inconsistente beoordeling.

Profiel A

Measuring / object data

Measurement no. : 21	Tilt : --	Name : Steenakermolen
Drilling depth : 38,94 cm	Avg. curve : off	
Wood species : Hard (2)	Diameter : 58,0 cm	
ID number : 21	Level :	
Date : 29.09.2014	Direction : horizontaal	
Time : 12:03:52	Object species : staak	
Advance : 23 cm/min	Location : meelzolder	



Assessment

■	From 29,3 cm to 30,0 cm : krimpseur
■	From 0,0 cm to 23,0 cm : grote houtwormkever
■	From 34,3 cm to 35,6 cm : krimpseur
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :

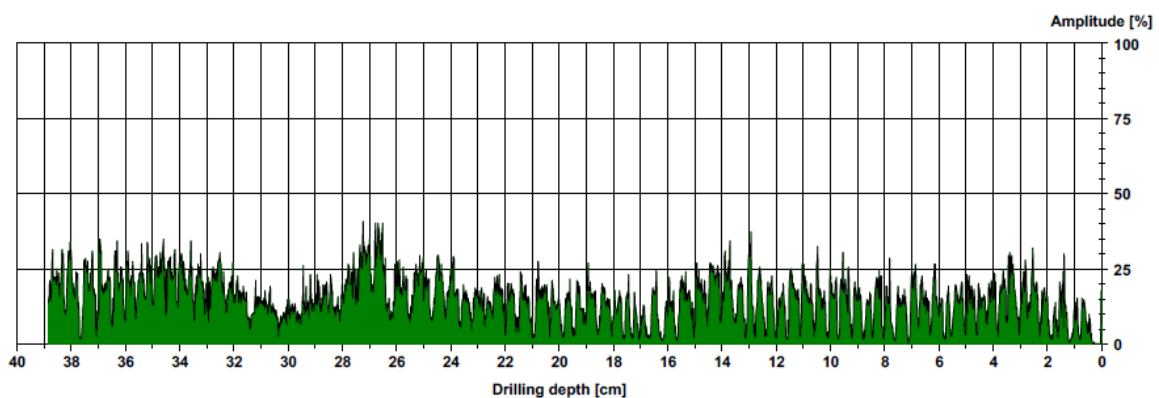
Comment

van 0 tot 23cm, balk matig

Profiel B

Measuring / object data

Measurement no. : 20	Tilt : --	Name : Steenakermolen
Drilling depth : 38,84 cm	Avg. curve : off	
Wood species : Hard (2)	Diameter : 58,0 cm	
ID number : 20	Level :	
Date : 29.09.2014	Direction : horizontaal	
Time : 11:59:00	Object species : staak	
Advance : 23 cm/min	Location : meelzolder	



Assessment

□	From 0,0 cm to 0,0 cm :
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :

Comment

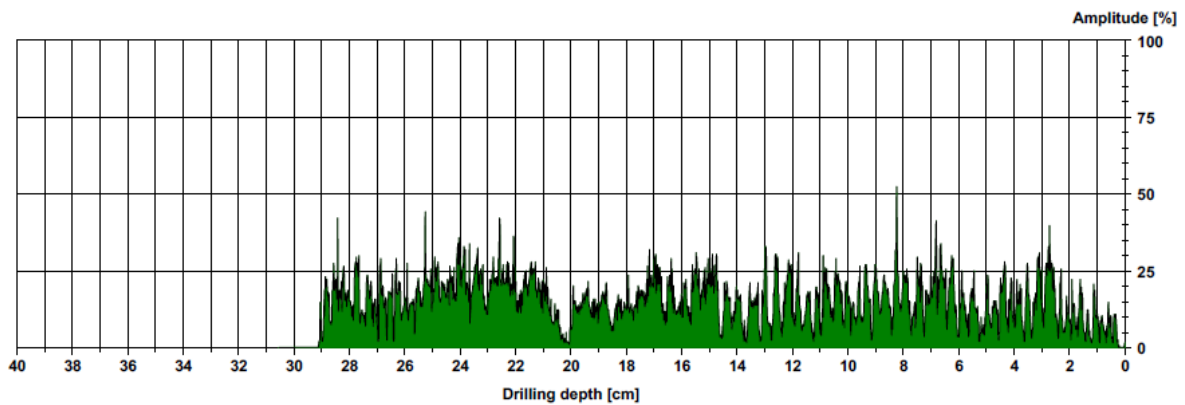
--

Fig. 32. Profielen Steenakermolen, staak, profielen A en B

Enkele andere voorbeelden (Figuur 33) tonen mogelijke “onderschatte” beoordelingen aan, waarbij de profielen opnieuw niet eenvoudig te interpreteren zijn, maar op basis van visuele waarnemingen aan de staak zelf weldegelijk defecten vertonen.

Measuring / object data

Measurement no. : 1	Tilt : —	Name : Steenakkermolen
Drilling depth : 30,54 cm	Avg. curve : off	
Wood species : Hard (2)	Diameter : 29,0 cm	
ID number : 1	Level :	
Date : 29.09.2014	Direction : horizontaal	
Time : 08:19:47	Object species : kruisbalk	
Advance : 24 cm/min	Location : gelijkvloers	



Assessment

<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :

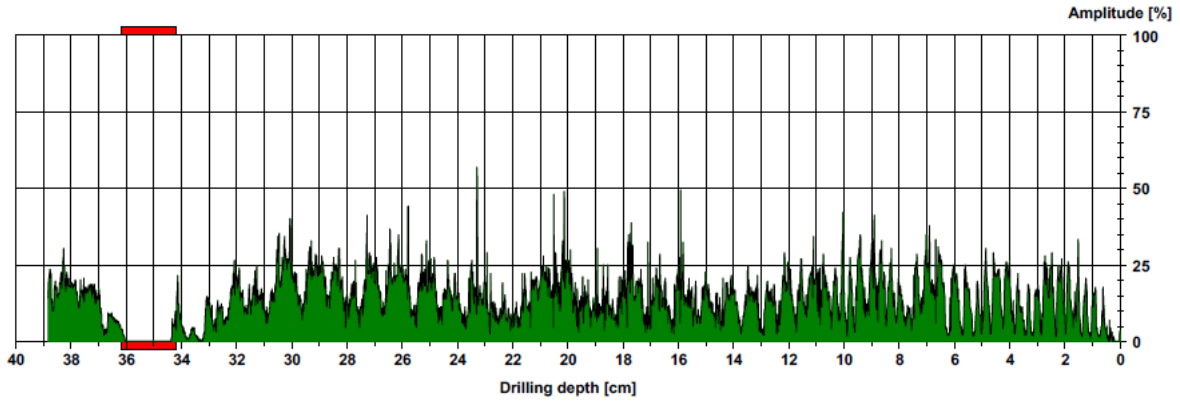
Comment

kruisbalk op gezonde locatie geboord

Fig. 33A. Profiel Steenakkermolen, kruisbalk

Measuring / object data

Measurement no. : 19	Tilt : ---	Name : Steenakkermolen
Drilling depth : 38,83 cm	Avg. curve : off	
Wood species : Hard (2)	Diameter : 66,0 cm	
ID number : 19	Level :	
Date : 29.09.2014	Direction : horizontaal	
Time : 11:51:28	Object species : brasem	
Advance : 23 cm/min	Location : meelzolder	



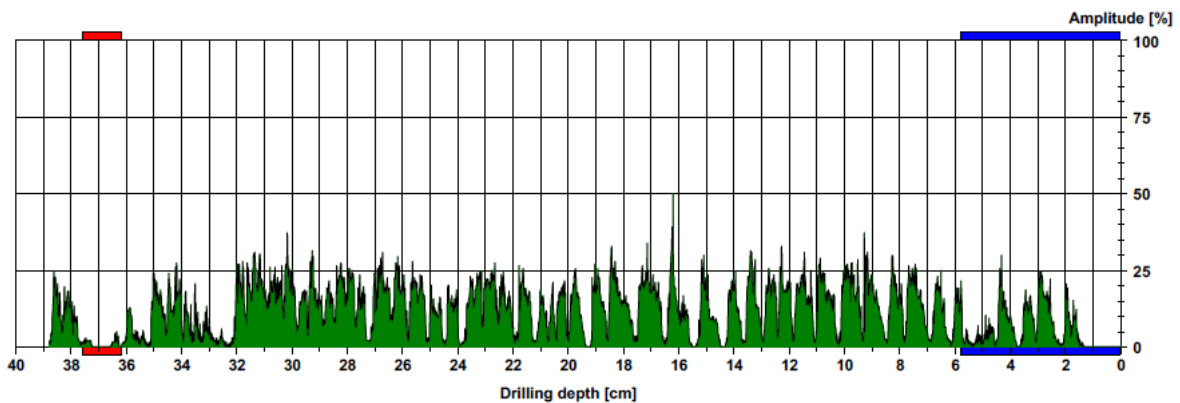
Assessment

■	From 34,2 cm to 36,2 cm : krimpscheur
■	From 0,0 cm to 0,0 cm :
■	From 0,0 cm to 0,0 cm :
■	From 0,0 cm to 0,0 cm :
■	From 0,0 cm to 0,0 cm :
■	From 0,0 cm to 0,0 cm :

Comment

Measuring / object data

Measurement no. : 7	Tilt : ---	Name : Steenakkermolen
Drilling depth : 38,79 cm	Avg. curve : off	
Wood species : Hard (2)	Diameter : 74,0 cm	
ID number : 7	Level :	
Date : 29.09.2014	Direction : horizontaal	
Time : 09:50:03	Object species : staak	
Advance : 24 cm/min	Location : gelijkvloers	



Assessment

■	From 36,2 cm to 37,6 cm : krimpscheur
■	From 0,0 cm to 5,8 cm : grote houtwormkever
■	From 0,0 cm to 0,0 cm :
■	From 0,0 cm to 0,0 cm :
■	From 0,0 cm to 0,0 cm :
■	From 0,0 cm to 0,0 cm :

Comment

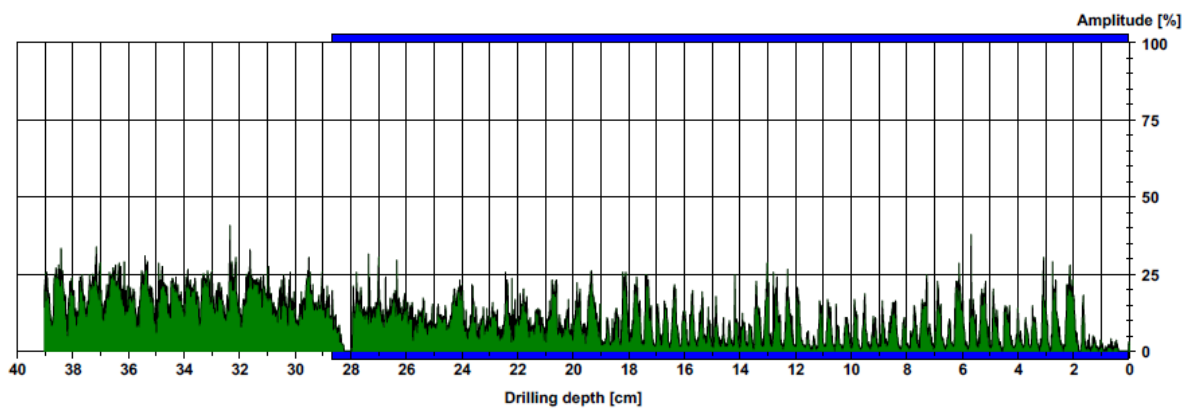
van 0 tot 5,7cm matig/slecht

Fig. 33B. Profielen Steenakkermolen, brasem en staak

Overschatting van een aanwezige aantasting is eveneens een risico, en dat is waarschijnlijk het geval bij profiel gegeven in Figuur 34. Dit is eveneens reeds gedocumenteerd voor enkele van de eerste profielen hierboven gegeven. Er is onzekerheid over het eigenlijke probleem, maar mogelijks is de insectenaantasting niet van die aard dat bijna 30 centimeter van de steenbalk aangetast zou zijn.

Measuring / object data

Measurement no. : 16	Tilt : --	Name : Steenakkermolen
Drilling depth : 39,03 cm	Avg. curve : off	
Wood species : Hard (2)	Diameter : 57,0 cm	
ID number : 16	Level :	
Date : 29.09.2014	Direction : horizontaal	
Time : 11:21:15	Object species : steenbalk	
Advance : 23 cm/min	Location : meelzolder	



Assessment

	From 0,0 cm to 0,0 cm :
	From 0,0 cm to 28,7 cm : grote houtwormkever
	From 0,0 cm to 0,0 cm :
	From 0,0 cm to 0,0 cm :
	From 0,0 cm to 0,0 cm :
	From 0,0 cm to 0,0 cm :

Comment

van 0 tot 28,5cm balk slecht

Fig. 34. Profiel Steenakkermolen, steenbalk

Een laatste profiel (Figuur 35) toont nogmaals aan hoe moeilijk een interpretatie kan zijn. Er is hier sprake van een aantasting in de eerste centimeters van de staak, maar het is moeilijk oordelen of de staak nog verder is aangetast of niet.

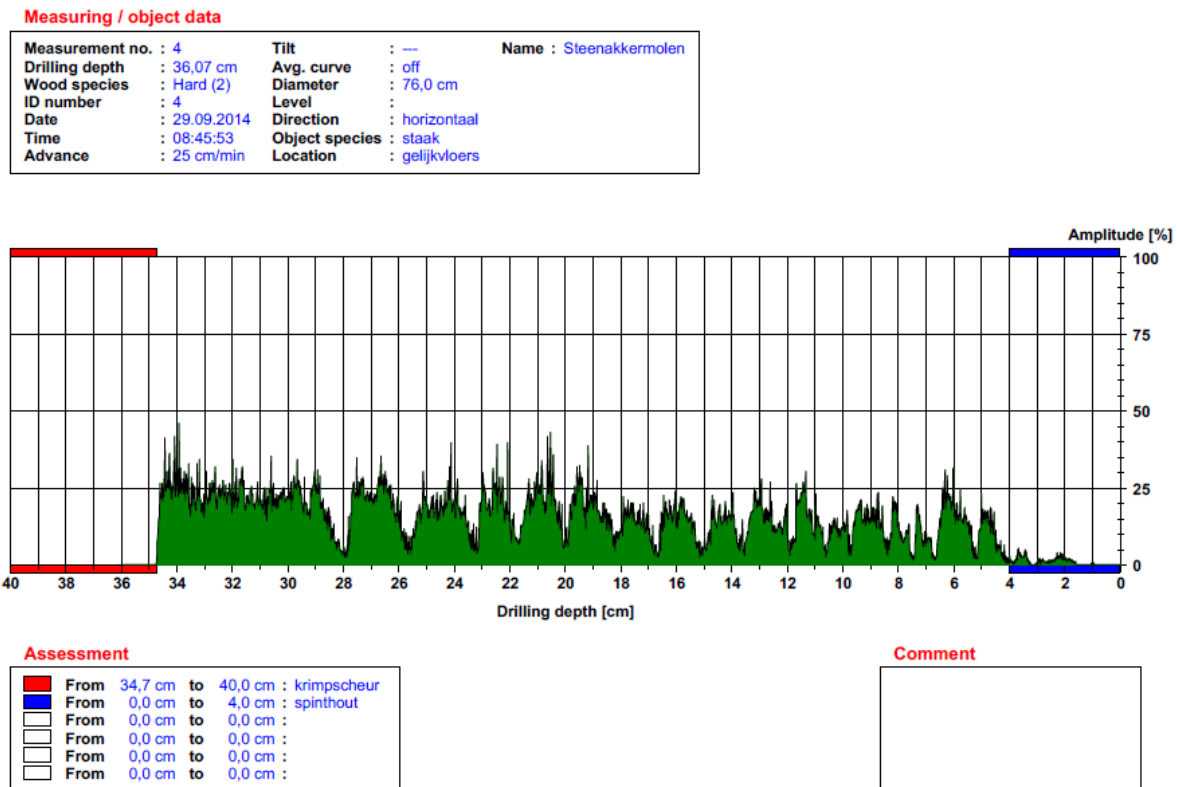


Fig. 35. Profiel Steenakkermolen, staak

Alle bovenstaande voorbeelden duiden erop dat men de profielen met de nodige expertise dient te interpreteren. Het blijft een moeilijke taak om louter en alleen op basis van een aantal boorprofielen een gefundeerde uitspraak te doen over de toestand van de staak van de molen. Samengevat zijn volgende gevallen te vermelden bij de uitgevoerde beoordeling met de resistograaf:

- Consistentie beoordeling: invloed van operator zeker aanwezig
- Overschatte beoordeling: voortijdige interventie
- Onderschatte beoordeling: te late interventie
- Aangetaste zones meestal wel herkend, maar wordt alles wel goed geduid?
- Geen informatie over sterkte gezond hout
- Geen 3D informatie over aangetaste zones (geen richtlijn voor vervolgboringen)

In tabel 6 wordt een overzicht geboden van uitgevoerde inspecties aan een aantal verschillende molens, gecompileerd aan een aantal dossiers die ter onze beschikking werden gesteld.

Tabel 6. Overzicht en analyse van door externen uitgevoerde inspecties

Overzicht uitgevoerde inspecties mbv microboorweerstandsmetingen											
Object en plaats	Datum	Uitvoering		Type resistograaf	Boorgegevens			hoeken	nieuwe boor	boortype	Temperatuur
	inspectie	Firma	Operator		vaste snelheid	variabele snelheid					
Westerstaketsel te Oostende	16/06/2014	TRI Consult	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	
Koutermolen	23/11/2011	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	
Abtsvleugel te Sint-Truiden	NB	NB	NB	NB	NB	NB	90/45	NB	NB	NB	
Steenakermolen	29/09/2014	De houtarts	Ja	IML F-Serie?	circa 23 cm/min	NVT	90	NB	NB	NB	
Pastorie te Laar	11/06/2013	TRI Consult	Ja	IML F-serie?	NVT	zeer divers	90/45	NB	NB	NB	
Keesemolen te Kasterlee	21/01/2013	De houtarts	Ja	IMF F-serie?							
Beukelaeremolen te Houthulst	04/05/2011										
Lystermolen te Westouter	06/06/2011	Aannemingen Attic	Ja	DMP	NB	NB	90/45	Ja	stomp	NB	
Schaffensestraat te Diest	30/01/2013	TRI Consult	Ja	IMF F-serie?	NVT	zeer divers	90/45	NB	NB	NB	
OLV-Kathedraal te Antwerpen	13/03/2009 en 18/03/2009	KMMA	Ja	IML Resi B-400	NB	NB	NB	NB	NB	NB	

Er blijkt duidelijk dat volgende informatie in ieder geval vermeld dient te worden in een inspectierapport:

- Firma en inspecteur (gevolgde trainingen?)
- Type apparaat
- Type boor en toestand van boor (aantal geboorde meters voor en na inspectie)
- Boorsnelheid en boorhoek per meting
- Omstandigheden tijdens metingen
- Bijzonderheden en waarnemingen
- Grondslag voor beoordelen profielen
- Kalibratieproefstuk? (zie verder)

DEEL 2: Beoordeling van de sterkte van de staak bij het beheer van staakmolens; gevalstudies

In dit deel wordt de kennis uit vorige delen toegepast op een aantal concrete gevalstudies, met focus op bouwhout uit staakmolens. Bij deze gevalstudies stelt zich de vraag of de beslissingen die werden/worden genomen in kader van de restauratie en het beheer van deze molens te onderbouwen zijn, met de kennis die hiervoor werd opgebouwd.

Aan de hand van gerichte resistograaf metingen werd de sterkte bepaald. Door aanvullend enkele boorkernen te nemen worden de metingen visueel getoetst.

Het materiaal werd verzameld (4 november 2015) bij het atelier van Molenbouw Wieme Roland en Kris aan de Leihoekstraat 71, 9870 Machelen / Zulte.

2.1. Metingen aan referentieproefstukken

2.1.1. Kalibratieproefstuk

Eén van de belangrijkste bevindingen is het feit dat een boorprofiel afhangt van een hele reeks factoren (cf. hierboven beschreven). Om de verschillen tussen verschillende types resistografen, type en ouderdom boor, boorrichting, etc te kunnen duiden, is een mogelijke oplossing het gebruik van een referentieproefstuk of kalibratieproefstuk. De idee is om een dergelijk object te gebruiken om op een correcte manier het verkregen profiel te kunnen interpreteren en dit ook toe te voegen aan het inspectierapport. Dit laat toe om na te gaan hoe gevoelig een bepaald toestel/boortype is en de impact ervan op het boorprofiel.

Hieronder worden een aantal voorbeelden gegeven van boringen in een mogelijk kalibratieproefstuk. Het proefstuk is specifiek voor dit doeleinde vervaardigd en heeft een aantal specifieke eigenschappen:

- Groepering op jaarringbreedte: brede en smalle jaarringen geven uiteraard aanleiding tot een verschillen boorprofiel, door een uitgesproken verschil in dichtheid tussen de vroeg- en laathoutzone in eiken;
- Bepaalde boorgaten en zaagsneden kunnen aangebracht worden die kleiner zijn dan boordiameter om na te gaan in hoeverre dergelijke defecten al dan niet gedetecteerd kunnen worden;
- Bepaalde boorgaten en zaagsneden groter dan boordiameter kunnen aangebracht worden om na te gaan op welke manier deze kunstmatige defecten in het boorprofiel verschijnen.

In Figuur 36 wordt een mogelijk kalibratieproefstuk voorgesteld met detaillering betreffende zaagsneden en boorgaten, evenals het bekomen boorprofiel.

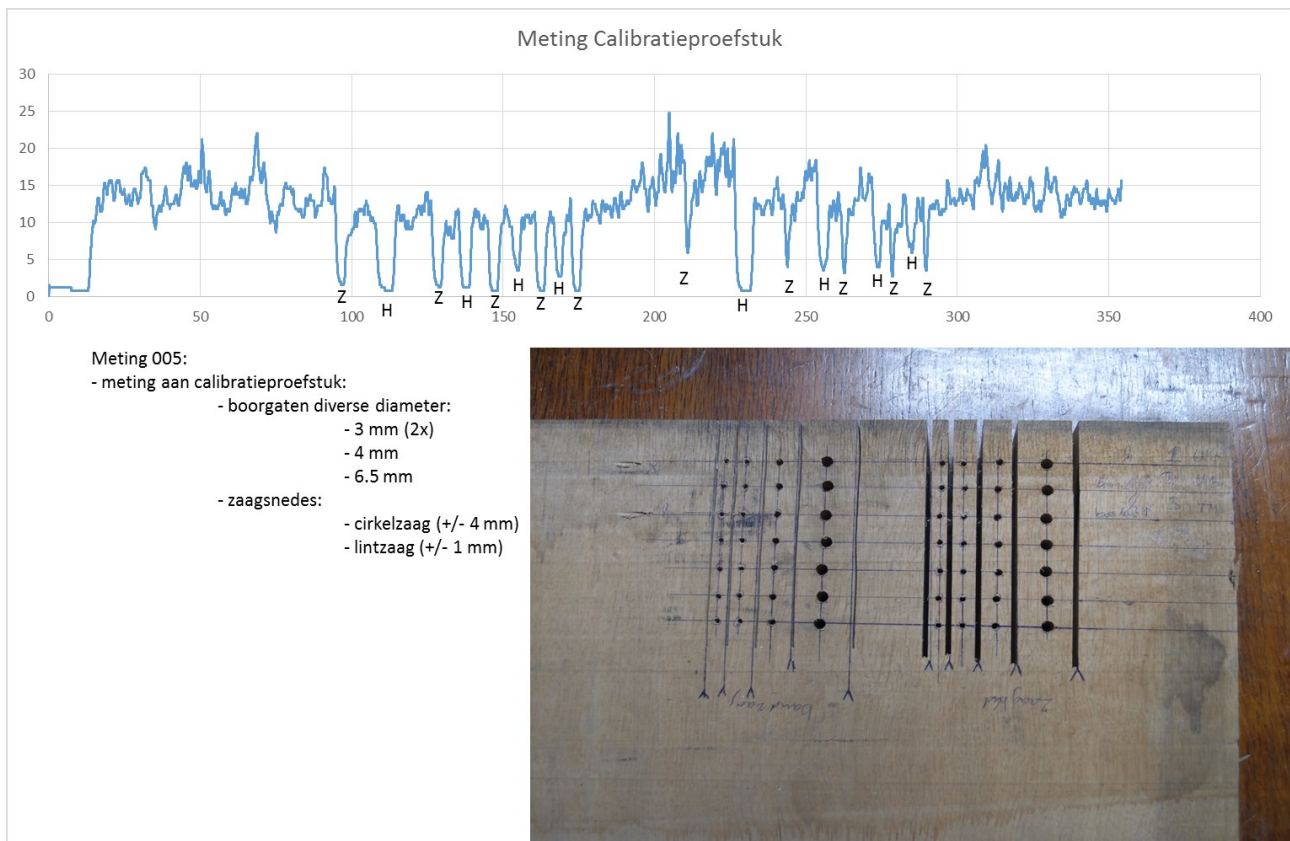


Fig. 36. Kalibratieproefstuk (X-as is afstand (mm), Y-as is amplitude (%)).

Nagenoeg alle zaagsneden en boorgaten kunnen met dit type resistograaf en boor onderscheiden worden op het kalibratieproefstuk. Afhankelijk van de grootte van de opening, zal de terugval van de weerstand variëren. De boorricting beïnvloedt ook in belangrijke mate het verloop van het weerstandsprofiel. Zo is in Figuur 37 een profiel weergegeven bij boring in een kleiner staal, waarbij tangentieel geboord wordt: de weerstand neemt duidelijk toe gezien er verder in het laathout wordt geboord en niet in radiale richting, loodrecht op de jaarringrens.

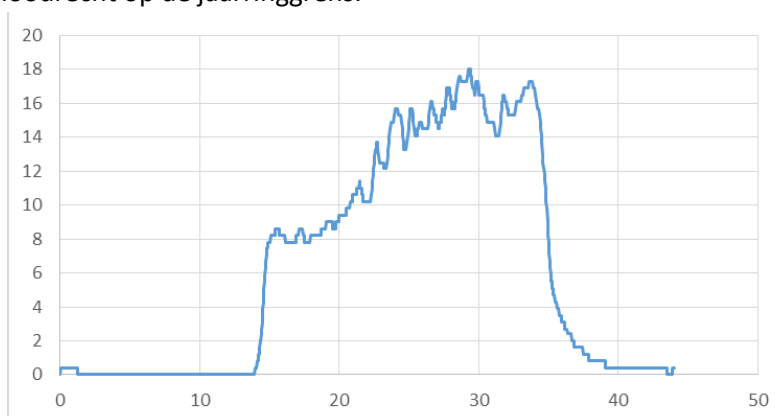


Fig. 37. Impact van boorricting (Proefstuk 142A-nr6 (tang, 10 cm/min); X-as is afstand (mm), Y-as is amplitude (%)). Boorricting is van links naar rechts

We kunnen dus stellen dat:

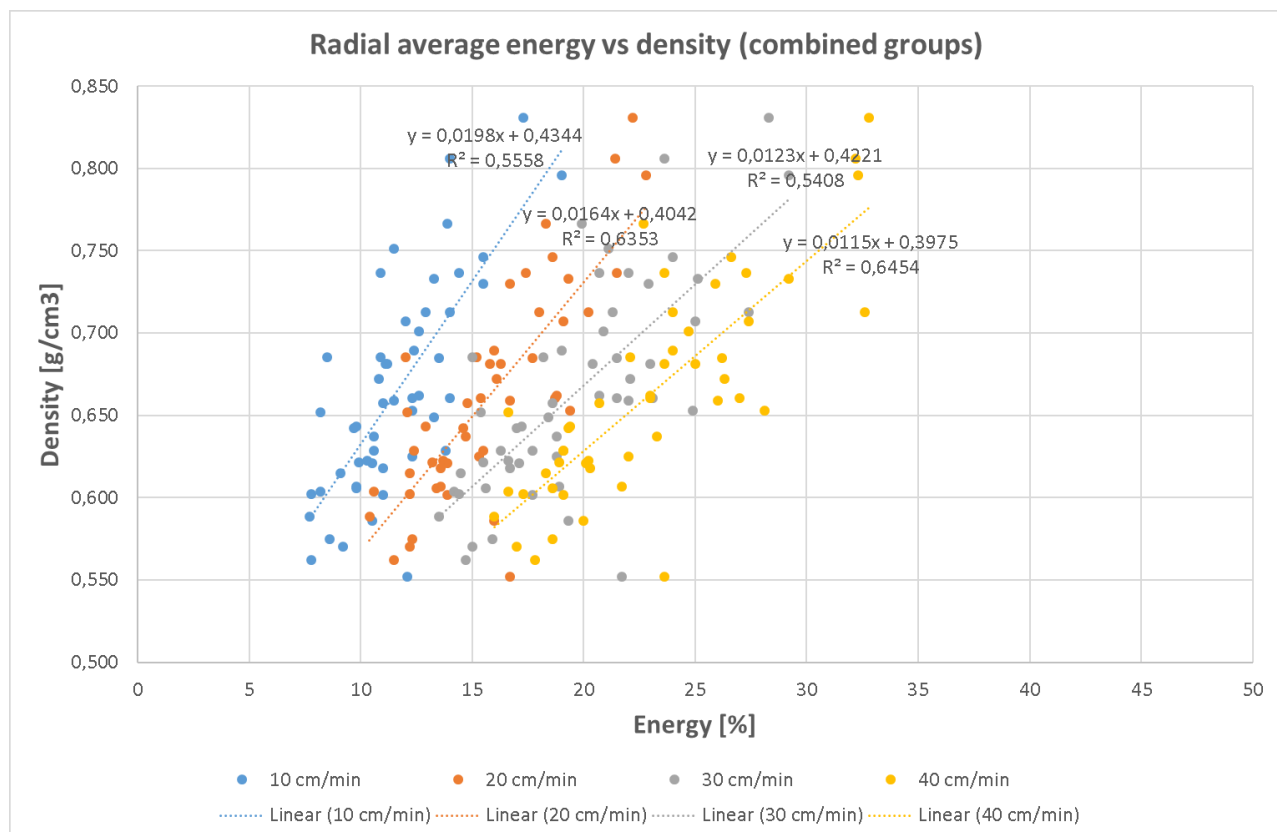
- Scheuren 1 mm breed in principe nog te herkennen in gemeten profiel bij gezond hout.

- Gaten ter grootte boordiameter ook te herkennen bij zuiver aanboren en gezond hout. Onder “zuiver boren” wordt verstaan boren loodrecht op de jaarringen, m.a.w. in radiale richting.

2.1.2. Referentieproefstukken

Om de invloed van radiaal (loodrecht op de jaarringen) en tangentieel (parallel aan de jaarringen) boren na te gaan, evenals van de snelheid waarmee geboord wordt, werden een reeks experimenten uitgevoerd op vooraf geselecteerde blokjes met een welbepaalde densiteit. Op die manier kan de ‘energie’ (energie door boor gebruikt om te kunnen boren, m.a.w. hoe hoger de energie, hoe hoger de weerstand) ook gelinkt worden aan de sterkte via de densiteit-sterkte relatie. Figuur 38 toont het verband tussen de verschillende parameters. Het is duidelijk dat een hogere boorsnelheid een hogere energie vereist, en dat de relatie met de densiteit snelheidsafhankelijk is. De lineaire relatie blijft, maar verschuift. Verder dient ook opgemerkt te worden dat, ook al is er een relatie tussen densiteit en boor-energie, er een grote variatie is, ook al wordt hier gewerkt met referentiestalen. Daaruit volgt duidelijk dat bij het uitvoeren van boringen ‘in het veld’, deze relatie nog veel geringer zal zijn en het dus steeds belangrijk is de bekomen profielen met de nodige achtergrondkennis te interpreteren. Het is ten eerste af te raden dergelijke relaties zonder meer toe te passen op bekomen profielen.

A: Radiale richting



B: Tangentiale richting

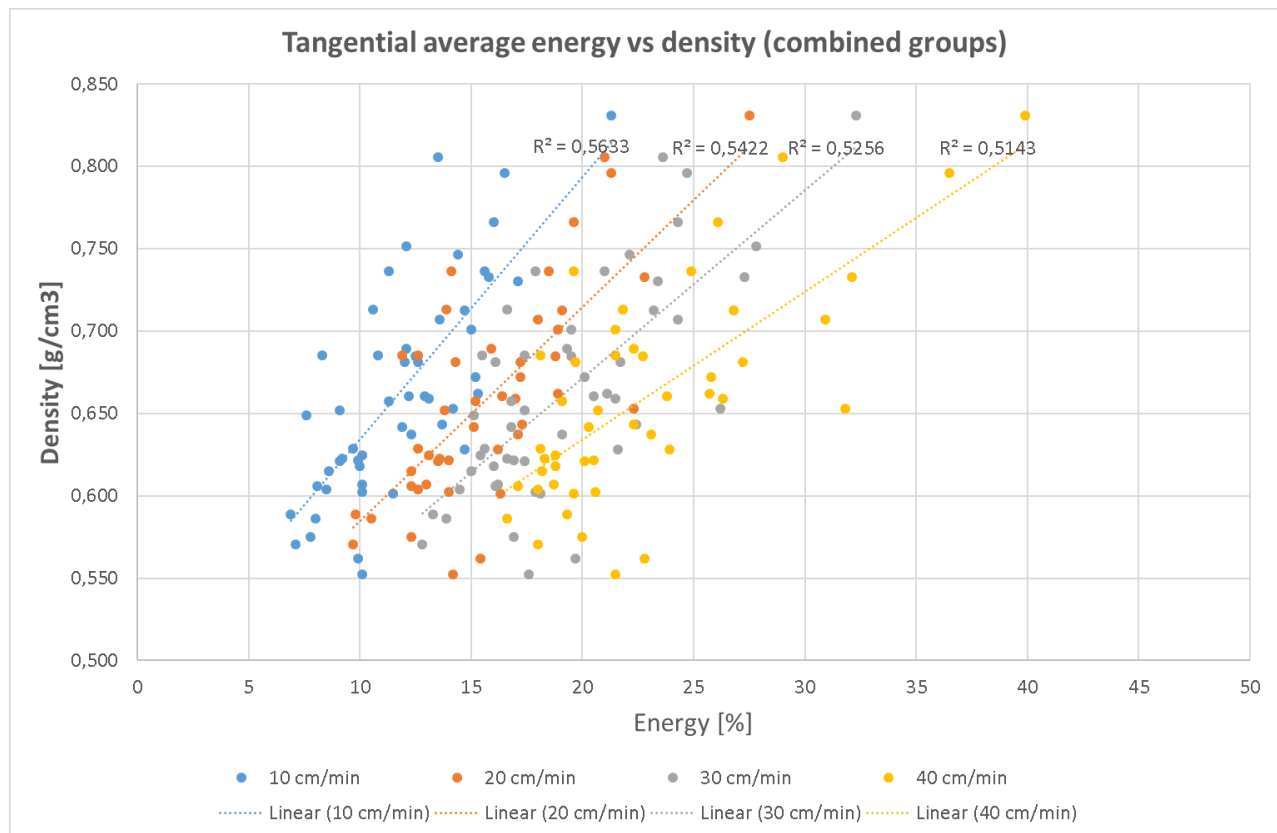


Fig. 38. Boorweerstand (energy) en volumegewicht (densiteit) in radiale (A) en tangentielle (B) richting

Er is een verband tussen de densiteit en de energie van het boren, met andere woorden hoe hoger de densiteit, hoe hoger de weerstand en dus de energie om die weerstand te overwinnen om aan een bepaalde snelheid te kunnen boren. Uit bovenstaande figuren blijkt ook dat radiaal en tangentieel boren niet dezelfde resultaten oplevert. Dit is belangrijk omdat een profiel in realiteit niet wordt uitgevoerd op kleine, gekende staaltjes, wat meestal resulteert in een profiel dat hoofdzakelijk een radiale component kent, maar evenzeer een tangentielle component kan bevatten wat het inschatten van de relatie met densiteit op zich al bemoeilijkt.

Het is een feit dat er een relatie is tussen de densiteit en de sterkte / stijfheid van het hout, zoals in Figuur 39 weergegeven. Hiertoe werden de referentieproefstukken met behulp van de Resonalyzer opgemeten (bepalen van de dynamische E-modulus aan de hand van trillingen) en werden de gevonden E-moduli uitgezet ten opzichte van de densiteit. Gezien ook op deze relatie een duidelijke variatie aanwezig is, is te begrijpen dat het verband tussen energie van de boor en de sterkte van het materiaal met de nodige omzichtigheid geïnterpreteerd dient te worden.

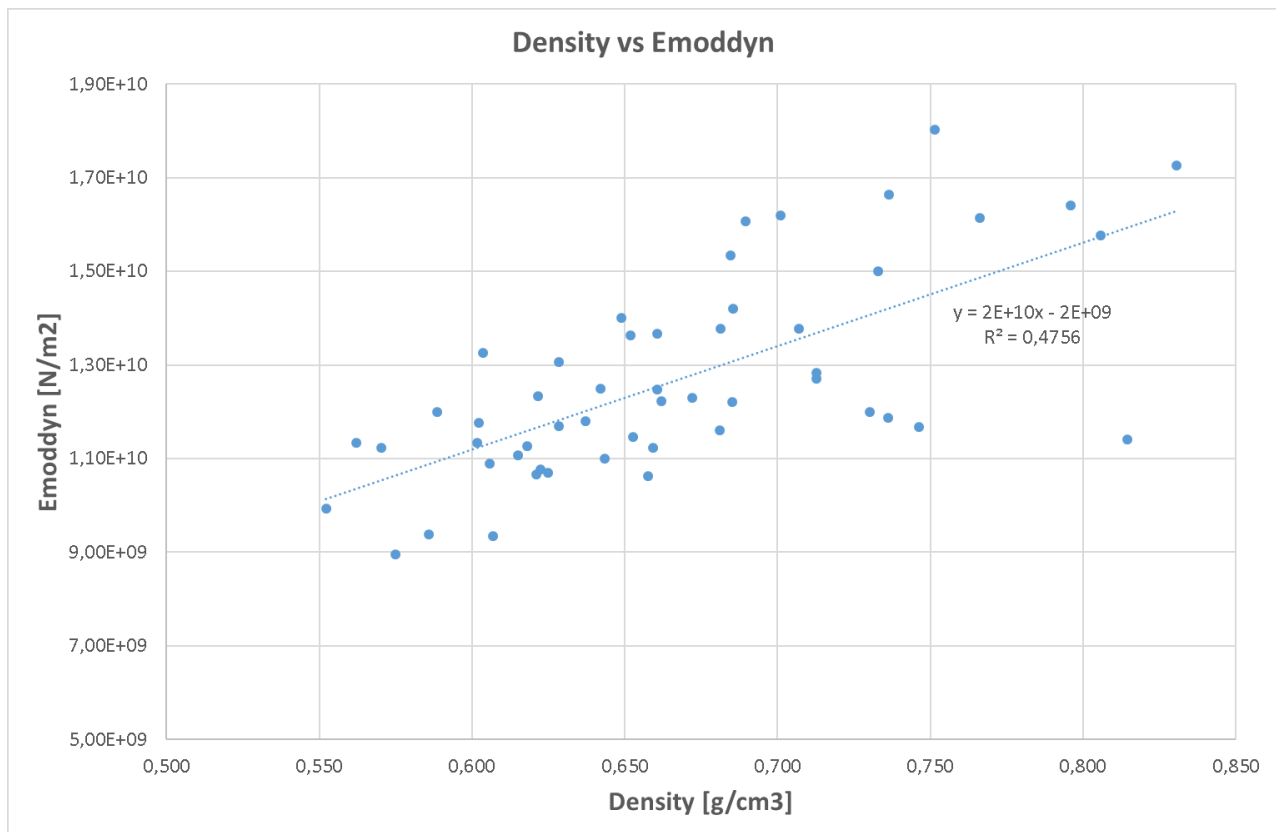


Fig. 39. Verband volumegewicht (density) en dynamische elasticiteitsmodulus ($E_{mod_{dyn}}$) voor de referentieproefstukken

Er kan met andere woorden geconcludeerd worden dat:

- Er is een invloed van boorsnelheid op energieniveau: hogere snelheid is hogere energiewaarde (vuistregel 4x sneller boren gemeten energie circa 2x zo hoog)
- Dichtheidsbepaling mogelijk is op basis van gemeten gemiddelde energie (bij voorkeur radiaal): daarbij dient wel rekening gehouden te worden met de invloed van boorsnelheid (relatieve waarde);
- Daaraan kan de waarde van de Emod en buigsterkte gekoppeld worden (en eventueel geluidssnelheid);
- Deze waarden kunnen eventueel als input gebruikt worden voor een rekenmodel van de constructeur, maar dienen gezien de variatie en de omstandigheden bij het boren 'in het veld' met de nodige achtergrondkennis geïnterpreteerd te worden;
- De ondergrens van de energie die gelinkt is aan gezond hout, is eveneens afhankelijk van de boorsnelheid;
- Het is van belang steeds een onafhankelijke validatie uit te voeren.

2.2. Onderzoek stalen Steenakkermolen en kerk

De staak van de Steenakkermolen en een aantal aangetaste balken uit de Sint-Martinuskerk te Aalst werden ter beschikking gesteld van Woodlab-UGent voor het uitvoeren van testboringen ter verfijning van de testmethodiek.

- Staak van Steenakkermolen:

- Aantal boringen uitgevoerd op ongeveer dezelfde plekken als tijdens inspectie van 2014 (originele profielen worden meegegeven waar beschikbaar)
- Boringen uitgevoerd bij de zwaluwstaartverbindingen van de zetel
- Stalen worden tevens gebruikt voor validatieproeven

- Balken uit Sint-Martinuskerk:

- Wegens specifieke vorm van de aantasting zijn deze stalen van nut voor het uitvoeren van een aantal testboringen en interpretatie van het profiel

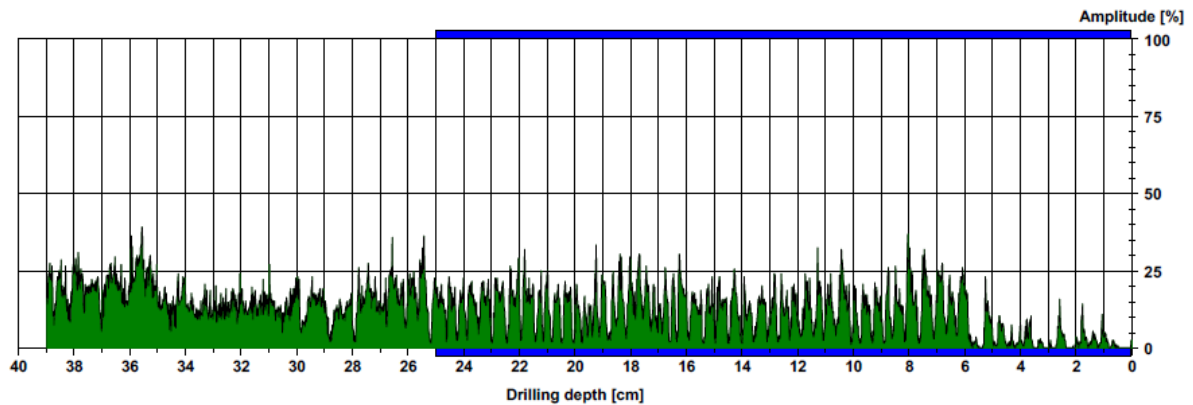
Het eerste proefstuk is afkomstig uit een zone die voorheen werd geïnterpreteerd als zijnde ernstig aangetast (zie Figuur 40 bovenaan). Als we nu echter op die plaats de boring hernemen, dan zien we dat er de eerste 5-6 cm idd een aantasting is, maar dat het profiel verder een normaal verloop vertoont in vergelijking met de 'onaangetaste' zones van ons kalibratieproefstuk. M.a.w. de aantasting die gedetecteerd wordt tot 25 cm diepte, is niet aanwezig. Het hout is volledig gezond en is onaangetast vanaf 7 cm diepte; de aangetaste zone komt goed overeen met de aanwezigheid van spinthout. De scherpe pieken en dalen op het inspectieprofiel kunnen verkeerdelijk geïnterpreteerd worden als aantasting, maar zijn in feite niets anders dan opeenvolgende vroeg- en laathoutzones. Naarmate de boor dieper het staal binnendringt, verhoogt het tangentiële karakter van de boring en aldus verhoogt de weerstand.

Bovenstaande bevindingen konden ook visueel bevestigd worden bij verzagen van de molenstaak. Er dient hier echter opgemerkt dat dit niet wil zeggen dat de staak behouden kan worden. Dit is enkel een interpretatie van het boorprofiel en doet geen uitspraak over de integriteit van de structuur (cf. master thesis van Sebastian Ablorh en de invloed van diepte en locatie van aantasting op de stabiliteit van de molen). Wat hier duidelijk blijkt, is dat het gebruik van een referentieproefstuk alvast helpt bij de interpretatie van het profiel. Een boorkern ter hoogte van dit profiel werd eveneens uitgeboord en met X-stralen CT gevisualiseerd (Figuur 41). Alhoewel de aantasting niet over de volledige eerste 7 cm van dit staal zichtbaar is, toch zijn de gaten op sommige plaatsen, al dan niet opgevuld met boormeel, zichtbaar.

A

Measuring / object data

Measurement no. : 10	Tilt : --	Name : Steenakkermolen
Drilling depth : 38,96 cm	Avg. curve : off	
Wood species : Hard (2)	Diameter : 70,0 cm	
ID number : 10	Level :	
Date : 29.09.2014	Direction : horizontaal	
Time : 10:15:13	Object species : staak	
Advance : 23 cm/min	Location : gelijkvloers	



Assessment

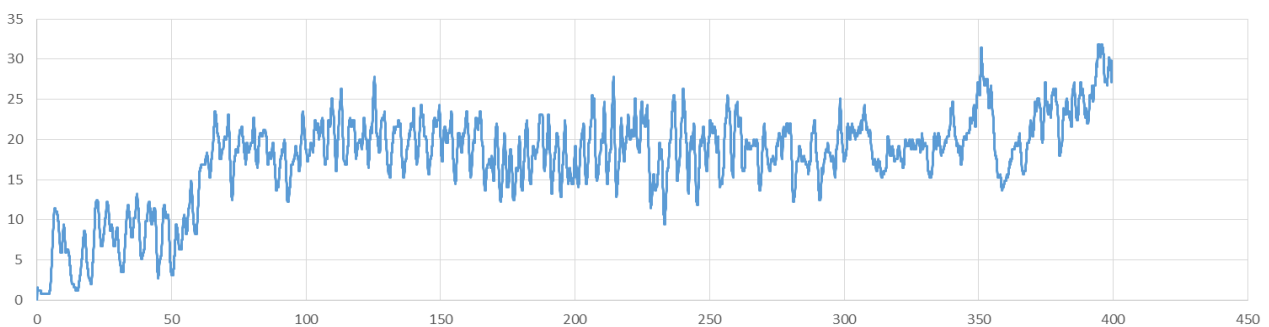
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input checked="" type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 25,0 cm : grote houtwormkever
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :
<input type="checkbox"/>	From 0,0 cm to 0,0 cm :

Comment

van 0 tot 25cm slecht

B

Meting blok Steenakkermolen: meting 010



Meting 010:

- meting ter hoogte van de zwaluwstaartverbinding van de zetel met molenstaak
- op hoekpunt geboord:
 - circa 15 cm hoger geboord dan boorlocatie nummer 10 inspectie Steenakkermolen
- eerste 70 mm aantasting (ook visueel zeer duidelijk te herkennen):
 - lijkt overeen te komen met zone van spinthout
- hart van proefstuk rond 330 mm:
 - te herkennen aan minder dynamisch profiel
 - groot aandeel tangential

Fig. 40. Metingen Steenakkermolen, staak gelijkvloers (locatie 10). Bij grafiek A start de meting aan de rechterzijde, bij grafiek B aan de linkzijde.

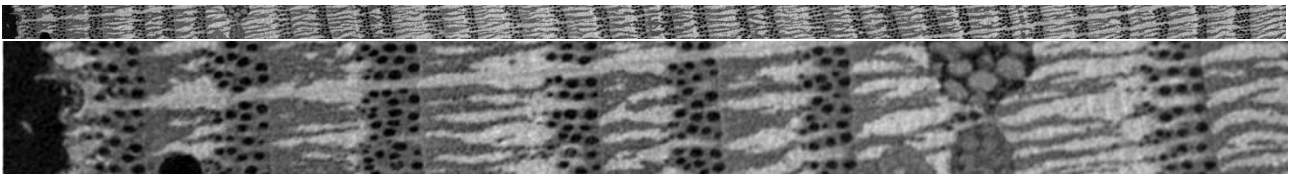


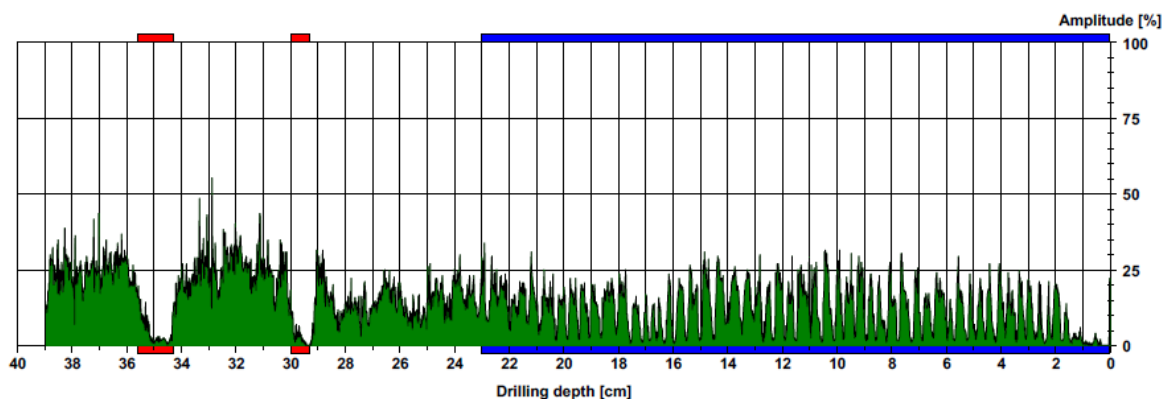
Fig. 41. Detail van boorkern met een lege en een gevulde vraatgang van insectenlarven

Een ander voorbeeld betreft een boring in de staak ter hoogte van de meelzolder (Figuur 42). Ook hier het profiel geïnterpreteerd als aangetast tot heel diep in de staak. Wanneer nu de boring opnieuw wordt uitgevoerd, valt op te merken dat, op de eerste 2 cm van het boorprofiel na, de staak op die plaats nauwelijks is aangetast. De boor behoudt een hoge weerstand die overeenkomt met het gezonde hout van het kalibratieproefstuk (en de weerstand is zelfs nog een stuk hoger). M.a.w. de dichtheid van het materiaal op die plaats is hoog, en daaraan gerelateerde de residuele sterkte.

A

Measuring / object data

Measurement no. : 21	Tilt : ---	Name : Steenakermolen
Drilling depth : 38,94 cm	Avg. curve : off	
Wood species : Hard (2)	Diameter : 58,0 cm	
ID number : 21	Level :	
Date : 29.09.2014	Direction : horizontaal	
Time : 12:03:52	Object species : staak	
Advance : 23 cm/min	Location : meelzolder	



Assessment

■	From 29,3 cm to 30,0 cm : krimpscheur
■	From 0,0 cm to 23,0 cm : grote houtwormkever
■	From 34,3 cm to 35,6 cm : krimpscheur
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :
□	From 0,0 cm to 0,0 cm :

Comment

van 0 tot 23cm, balk matig

B

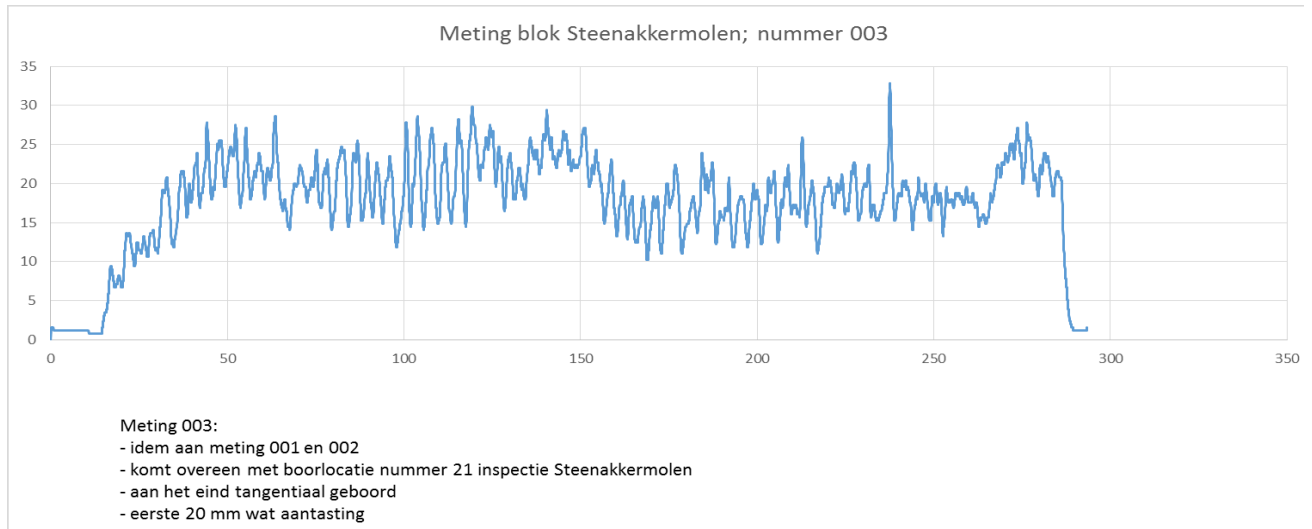
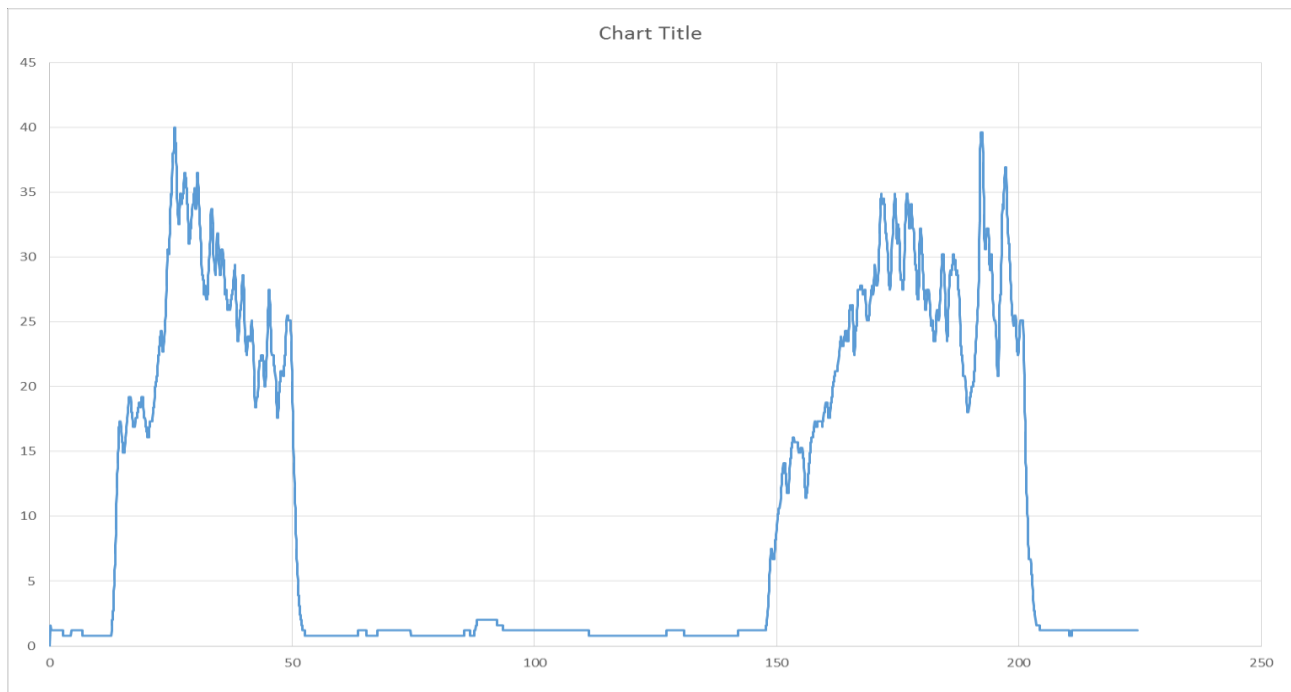


Fig. 42. Metingen Steenakkermolen, staak meelzolder (locatie 21). Bij grafiek A start de meting aan de rechterzijde, bij grafiek B aan de linkerzijde.

Twee metingen werden verricht op de aangetaste balk uit een kerk en worden weergegeven in Figuur 43. Het bovenste profiel toont duidelijk een sterk aangetaste centrale zone van de balk, terwijl er bij het onderste profiel centraal een hoeveelheid materiaal is die nog een zekere integriteit heeft. Echter, in beide gevallen toont het profiel een duidelijke terugval in boor-energie, veel duidelijker dan de terugval die kenmerkend is voor een boring doorheen het vroeghout.



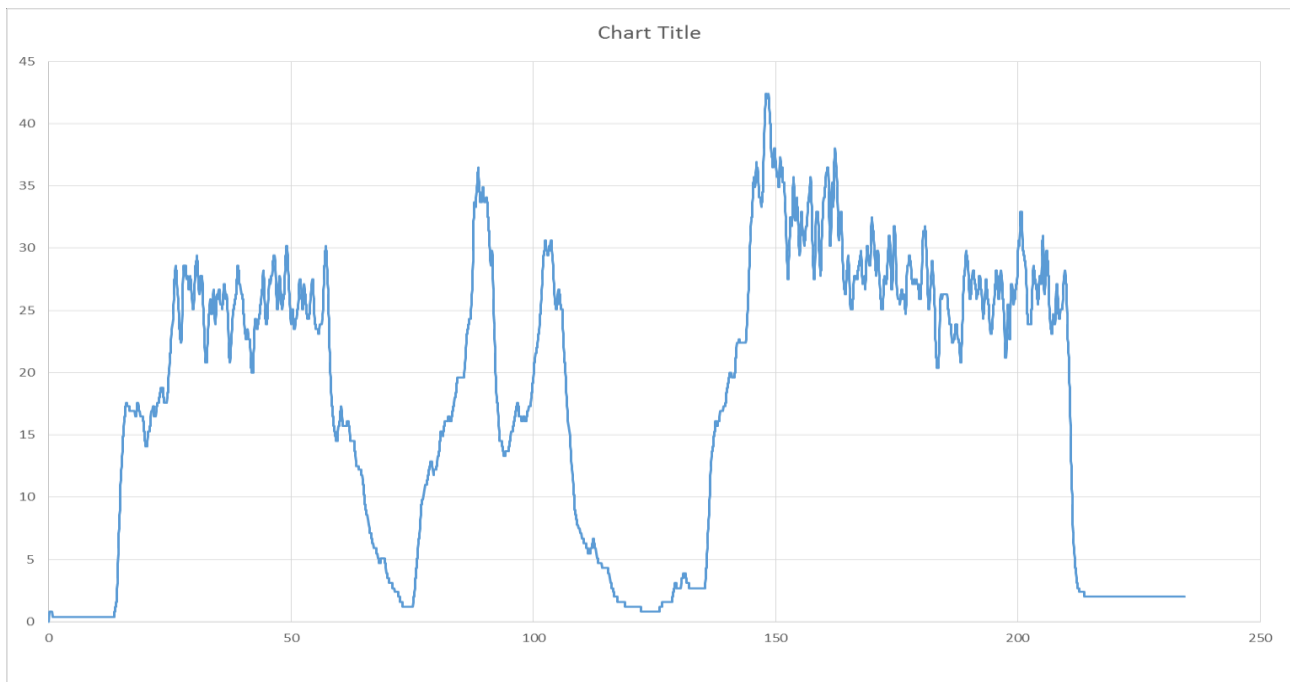


Fig. 43. Meting op aangetaste balk uit kerk

Samengevat kan het volgende gesteld worden:

- De intrede van de boor bepaalt voor een groot deel of boor rechtuit gaat;
- Zones zonder sterkte zijn zeer duidelijk te herkennen en te horen tijdens boringen;
- Aangetaste zones zijn te herkennen als gezond hout aanwezig is. Anders bestaat de mogelijkheid om een drempelwaarde, uit referentieproeven, toe te passen bij een bepaalde boorsnelheid;
- Invloed van resistograaf op dynamisch verloop boorprofiel: kans op foute interpretaties, maar waarschijnlijk minder invloed op gemiddelde waarde;
- Inspectie geeft niet altijd correcte duiding en duiding is veelal zonder onderbouwing.

Naast een vergelijkende analyse zoals hierboven weergegeven, werden ook een hele reeks profielen verzameld op verschillende plaatsen van de staak van de Steenakermolen. De staak van de Steenakermolen werd daarvoor in 3 verschillende blokken opgedeeld (boven, midden en onder) en elke blok werd op zijn beurt opgedeeld in drie kwadranten. Per kwadrant werden 6 boringen verricht. Tussen de boringen werden telkens verschillende stalen genomen voor het bepalen van de elasticiteitsmodulus. Van een selectie van die stalen werd ook een boorkern gescand met de X-stralen tomografie scanner van Woodlab-UGent (beelden en data te vinden in Bijlage C). De staalname is weergegeven in Figuur 44.

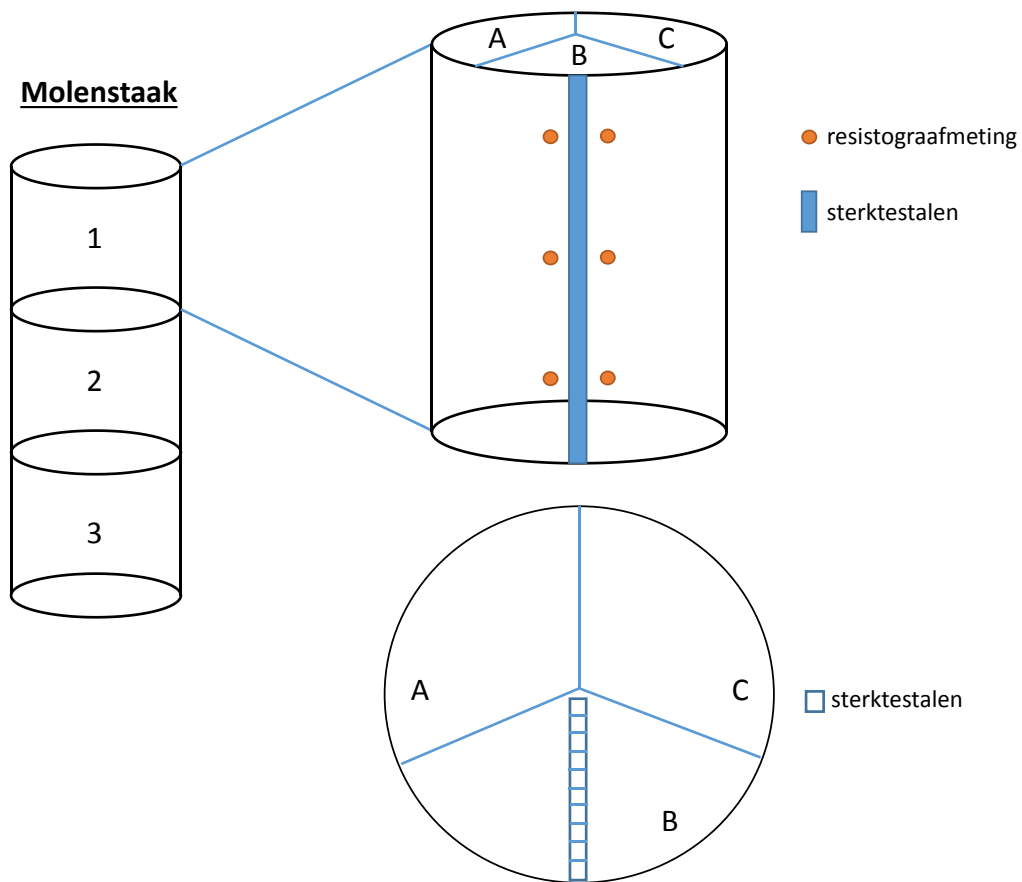


Fig. 44. Staalname Steenakkermolen

Alle gegevens van de stalen zijn te vinden in tabel 7.

Tabel 7. Analysedata van de stalen van de staakmolen

Code	Lengte (mm)	Breedte (mm)	Dikte (mm)	Massa (g)	Hz	MOE N/m ²	E+6	E+7	E+8	E+9	E+10	
1A1	400	20.08	20.03	100.36	49.951			9.4				
1A2	400	19.98	20.08	107.68	49.951				1.01			
1A4	400	20.03	20.03	106.38	11.138		4.97					
1A5	400	20.06	20.09	114.10	54.613				1.27			
1A6	400	20.02	20.03	109.98	14.987		9.3					
1A7	400	20.02	20.03	117.16	29.003			3.71				
1A8	400	20.06	20.07	110.65	9.0423		3.38					
1A9	400	20.05	20.10	120.11	27.819			3.46				
1A10	400	20.02	20.09	105.13	15.388			9.29				houtworm
1B1	400	20.09	20.10	99.93	17.327				1.11			
1B2	400	20.05	20.12	104.10	15.697		9.51					
1B3	400	20.10	20.09	108.22	12.447		6.23					
1B4	400	20.06	20.09	108.21	17.492				1.23			
1B5	400	20.05	20.07	118.37	19.127				1.58			
1B6	400	20.09	20.12	115.85	13.517		7.83					



1B7	400	20.06	20.04	116.90	14.136		8.76					
1B8	400	20.09	20.00	111.96	28.571			3.44				
1B9	400	20.05	20.01	117.01	12.283		6.66					
1B10	400	20.07	20.11	114.38	7.89		2.64					houtworm
1C1	400	20.05	20.06	107.84	13.324		7.16					
1C2	400	20.07	20.07	104.80	10.413		4.24					
1C3	400	20.11	20.08	105.97	13.216		6.88					
1C4	400	20.12	20.05	107.94	10.13		4.14					
1C5	400	20.09	20.08	110.02	533.98						1.17	
1C6	400	20.09	20.04	107.83	566.09						1.29	
1C7	400	19.96	20.05	110.40	570.7						1.35	houtworm
1C8	400	20.04	20.02	109.31	552.79						1.26	houtworm
1C9	400	20.02	19.99	111.48	543.91						1.25	houtworm
1C10	400	20.01	20.01	114.50	553.41						1.32	houtworm
1C11	400	20.06	20.03	118.52	532.11						1.26	houtworm
2A1	400	20.00	20.10	111.73	485.14					9.81		
2A2	400	19.99	20.05	109.15	498.66						1.02	
2A3	400	19.99	20.00	109.85	528.57						1.16	
2A4	400	20.01	20.03	107.63	547.51						1.22	
2A5	400	19.99	20.03	111.80	543.94						1.25	
2A6	400	19.99	20.05	112.60	529.33						1.19	
2A7	400	19.94	19.92	114.42	542.96						1.3	
2A8	400	20.05	19.97	109.48	552.58						1.27	
2A9	400	20.08	19.92	111.07	542.3						1.25	
2A10	400	20.03	20.01	115.54	544.95						1.29	
2B1	400	20.10	20.13	98.12	522.54					9.9		
2B2	400	20.05	20.07	103.24	518.37						1.04	
2B3	400	20.06	20.10	105.17	464.15					8.42		
2B4	400	20.04	20.08	110.83	527.25						1.15	
2B5	400	20.03	20.05	115.53	545.13						1.29	
2B6	400	20.06	20.09	110.59	540.97						1.21	
2B7	400	20.04	20.04	112.30	528.06						1.18	
2B8	400	20.07	20.12	114.38	530.07						1.19	
2B9	400	20.04	20.05	115.87	504.06						1.1	houtworm
2C1	400	20.13	20.14	94.46	286.47					2.85		
2C2	400	20.12	20.13	105.24	465.75					8.42		
2C3	400	20.09	20.09	103.12	495.83					9.43		
2C4	400	20.05	20.08	104.42	500.05					9.74		
2C5	400	20.01	20.01	107.93	283.61					3.28		
2C6	400	20.03	20.05	106.41	492.05					9.66		
2C7	400	20.01	20.04	105.41	439.01					7.64		
2C8	400	20.04	20.07	106.56	495.3					9.77		
2C9	400	19.97	20.07	106.31	494.51					9.75		
2C10	400	20.01	20.10	106.78	491.14					9.6		houtworm

2C11	400	20.00	20.06	112.67	484.48					9.92		houtworm
3A1	400	20.10	20.09	104.25	494.12					9.46		
3A2	400	20.11	19.96	106.95	494.11					9.89		
3A3	400	20.03	20.07	106.61	498.97					9.93		
3A4	400	20.05	20.09	115.15	197.55					1.67		
3A5	400	20.12	20.05	114.95	493.57						1.05	
3A6	400	20.05	20.07	114.89	443.61					8.45		
3A7	400	20.05	20.00	123.96	421.4					8.31		
3A8	400	20.07	20.04	120.66	486.44						1.07	
3A9	400	20.05	20.05	121.36	477.61						1.04	
3B1	400	20.11	20.07	94.84	492.11					8.56		
3B2	400	20.09	20.07	103.76	495.01					9.48		
3B3	400	20.07	20.06	103.04	489.61					9.23		
3B4	400	20.05	20.06	104.54	497.56					9.68		
3B5	400	20.06	20.04	101.80	185.61					1.32		
3B6	400	20.04	20.05	101.59	451.93					7.78		
3B7	400	20.05	20.07	109.45	447.66					8.2		
3B8	400	20.02	20.02	108.93	135.09				7.49			
3C1	400	20.11	20.12	108.03	495.68					9.81		
3C2	400	20.09	20.03	108.30	487.99					9.67		
3C3	400	20.10	20.09	111.03	339.59					4.76		
3C4	400	20.09	20.07	108.97	136.87				7.61			
3C5	400	20.07	20.02	104.17	304.32					3.63		
3C6	400	20.06	20.05	106.24	495.12					9.76		
3C7	400	20.06	20.07	117.55	490.94						1.06	
3C8	400	19.99	20.05	123.08	398.19					7.34		
3C9	400	20.08	19.97	124.24	430.18					8.71		

Het verband tussen densiteit en weerstand die de boor ondervindt, zoals voorheen gevonden voor welbepaalde referentiestalen, is uiteraard veel minder rechtlijnig te duiden bij stalen die niet of slechts gedeeltelijk zijn aangetast. Gedeeltelijke aantasting zorgt namelijk voor een lokale verminderde dichtheid en heeft dus enkel lokaal een invloed op het boorprofiel en is niet eenvoudig te onderscheiden. Een correcte interpretatie is hierbij van groot belang.

Gezien de specifieke staalname, worden de 6 boorprofielen per kwadrant uitgemiddeld en wordt die zone geselecteerd en uitgemiddeld die overeenkomt met het desbetreffende sterktestaal, gelijkaardig aan de procedure zoals uitgewerkt voor de referentiestalen. Door nu die specifieke energiewaarde uit te zetten t.o.v. de overeenkomstige E-modulus, kan nagegaan worden wat het verband is tussen beide parameters. Zoals uit Figuur 45 blijkt, is dit verband nauwelijks aanwezig. Dit betekent niet dat aantasting niet zichtbaar is in het boorprofiel, maar dat dergelijke aantasting niet eenvoudig is af te lijnen in het meetprofiel en niet zomaar eenduidig kan vertaald worden naar een residuele sterkte.

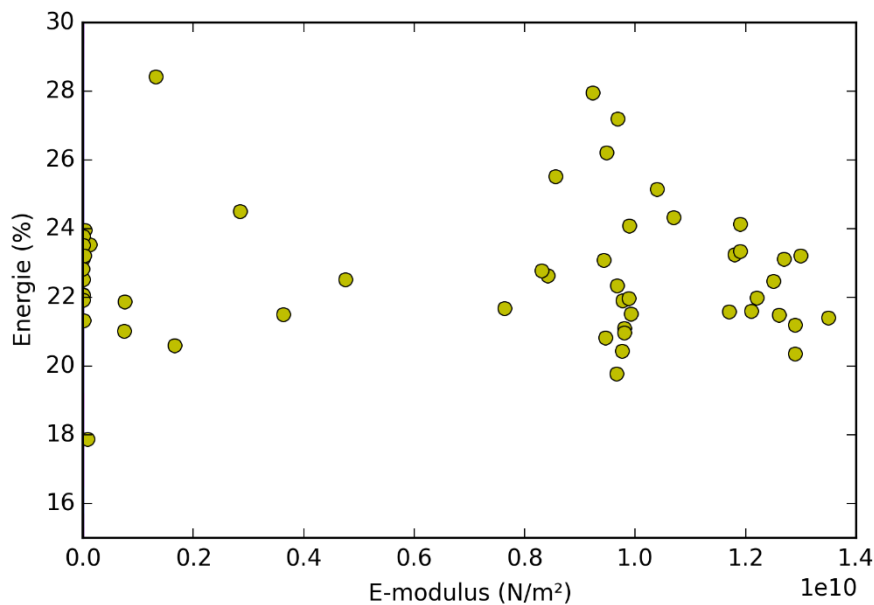


Fig. 45. Verband tussen E-modulus en Energie van de boor

Er wordt dan ook aangeraden om profielen onderling te vergelijken met elkaar en met een profiel van een gezond stuk genomen in dezelfde staak / balk (en met een referentieproefstuk zoals hierboven vermeld). In Figuur 46 wordt dit getoond voor 2 profielen van de 54 gemeten trajecten. De aantasting is duidelijk zichtbaar in de rechter figuur. Dergelijke informatie kan zeker worden gebruikt om de graad van aantasting in te schatten en kan ook als mogelijke input gebruikt worden in het model dat in het kader van de thesis van Sebastian Ablorh werd ontwikkeld.

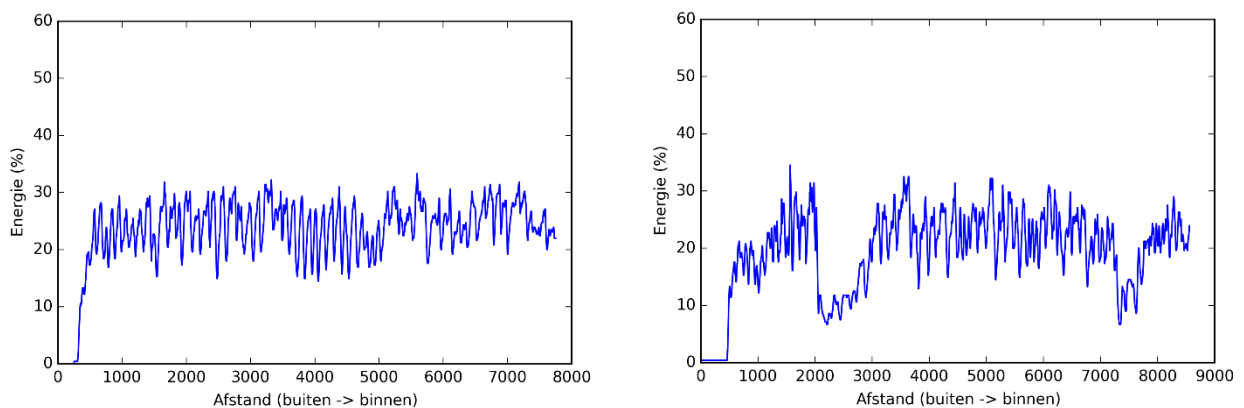


Fig. 45. Een boorprofiel zonder (links) en met (rechts) aantasting

DEEL 3: Overzicht activiteiten - conclusies

(1) Consistente rapportage en interpretatie van resistograaf-metingen is een primair doel van dit onderzoek. Zo werden de gerapporteerde resistograafprofielen uit het restauratiedossier van de Steenakkermolen geanalyseerd. Opvallend is de niet-uniforme interpretatie van de profielen. De basis waarop deze interpretaties gestoeld zijn, is soms onduidelijk. Dit duidt op een noodzaak aan standaardisatie van rapportage. Wat eveneens opvalt bij de rapporten waarin de residuele sterkte van historische houten constructies wordt geëvalueerd, is dat er zelden een visuele appreciatie (aanwezigheid knoesten, draaigroei, ...) van het hout in wordt opgenomen. Om deze reden werden alle inzichten in deze context gebundeld in een beoordelingsrichtlijn, die terug te vinden is in DEEL 4 van dit onderzoeksrapport.

(2) De proefboringen met een resistograaf op teststalen leren ons dat de reproduceerbaarheid van de metingen met dit toestel soms problematisch kan zijn. Dit betekent dat het riskant is om op basis van één meting conclusies te trekken.

(3) De werking van een resistograaf kan best op een referentieproefstaal worden gedemonstreerd en de gemeten boorweerstandprofielen kunnen daarna hiermee vergeleken worden. Dit referentieproefstuk laat aldus toe om ook types boren en toestellen onafhankelijk met elkaar te vergelijken. Daarenboven wordt verder ook aangeraden om een boring uit te voeren in een gezond deel van dezelfde staak of balk die bestudeerd wordt, zodat de te beoordelen zone relatief vergeleken kan worden.

(4) Binnen dit onderzoek werden analyses uitgevoerd op aangetast hout van de Steenakkermolen en bijkomende analyses werden uitgevoerd op bouwhout dat werd vervangen in staakmolens na evaluatie op basis van resistograafmetingen. Dit hout was ter beschikking in het atelier van de molenbouwer en werd aldus herbekeken. Er kan worden geadviseerd om nog dergelijke vergelijkingen toe te voegen in de toekomst.

(5) Dit project is bedoeld om tot een optimale methodologie voor het gebruik van de resistograaf te komen. Het linken met de reststerkte van het hout is geen eenvoudige taak, gezien de zeer lokale invloed van de aantasting. Tijdens interacties op de vergadering eind 2015 werd reeds gesuggereerd om opvolgingstechnieken uit te werken op basis van rekstrookjes. Er werd ook aangetoond dat modellering een belangrijke meerwaarde kan bieden. Een eindig elementen model van de molenstaak en steekbanden werd ontwikkeld in het kader van de master thesis van Sebastian Ablorh in samenwerking met de onderzoeksgroep van Prof. Wim Van Paepegem. Doel van dit werk was om na te gaan waar de kritieke plaatsen in een molen waar prioritair metingen verricht dienen te worden en op welke manier aantasting van invloed is op de stabiliteit van de molen. De full paper is toegevoegd in Bijlage D.

DEEL 4: Beoordelingsrichtlijn

Deze beoordelingsrichtlijn is een resultaat van discussies en onderzoek in het kader van een studieopdracht verleend door Agentschap Onroerend Erfgoed aan het Laboratorium voor Houttechnologie van de Universiteit Gent (UGent – Woodlab): “ONDERZOEK NAAR BETROUWBARE INSTRUMENTEN VOOR HET EVALUEREN VAN DE STERKTE VAN HISTORISCH WAARDEVOL BOUWHOUT”.

Dit document heeft als bedoeling een leidraad te zijn voor de beoordeling van historisch waardevol bouwhout en is specifiek uitgewerkt in relatie tot de beoordeling van de zware eikenhouten structuren binnen historische staakmolens met vooral tot doel analyses met de resistograaf te onderbouwen. Deze beschrijving van ‘best practice’ heeft enerzijds tot doel de elementen te beschrijven in relatie tot monitoring en inspecties en anderzijds ook zaken te duiden met betrekking tot beslissingen en onderhoud van historisch waardevol bouwhout. De uiteindelijke focus ligt bij een ‘best practice’ voor het gebruik van de resistograaf op zich naar uitvoering, randvoorwaarden en interpretatieve aspecten van een resistograafonderzoek. Deze richtlijn is gebaseerd op voorbeelden van de aansluiting van de binnensteekbanden met de zetel van een molenstaak, maar ook geldig voor de steenbalk met middenlijsten als structureel belangrijke molenonderdelen, en ten slotte ook uitbreidbaar naar ander zware eikenhouten structuren of analoge materialen tot en met divers historisch waardevol bouwhout in het algemeen.

4.1 Monitoring en inspecties

Inspecties zijn veelal wenselijk of noodzakelijk wanneer veranderingen in mechanische mogelijkheden van een constructie worden vermoed. Dit kan eerder indicatief zijn of duidelijk gelinkt aan schadepatronen met betrekking tot brand, houtrot of aanwezigheid van insectenaantastingen. Veelal bestaat een inspectie van historisch waardevol bouwhout uit een visuele beoordeling aangevuld door technische metingen die een inzicht moeten geven in de mechanische functionaliteit.

Dikwijls worden metingen aan de hand van een resistograaf beschouwd als essentieel om tot een inzicht te komen over de eventuele aantastingsgraad en behoud van functionaliteit (sterkte en stijfheid).

4.1.1 Visuele beoordeling

Bij een inspectie van een houten (eiken) balk of staak welke grote dimensies heeft zijn de waarnemingen aan het oppervlak niet steeds representatief voor de volledige doorsnede, maar kunnen alvast indicaties geven over wat de algehele toestand is.

Verder zijn dikwijls de meest kritische zones niet makkelijk toegankelijk of bereikbaar voor inspectie of het hout soms zelfs niet zichtbaar (bv. bepleisterde moerbalken). Voor een degelijke inspectie zijn volgende voorwaarden van toepassing: 1) toegankelijkheid 2) voldoende verlichting 3) proper oppervlak.

Toch is het aangewezen om een plan op te maken met de onderdelen van de constructie waarop de ‘meest kritische zones’ worden aangeduid aangevuld met een inschatting van de toestand, wat zichtbare defecten en schade zijn en waar metingen uitgevoerd dienen te worden.

De vaststelling van zones die wijzen op houtrot zijn essentieel en kunnen vooral op basis van verlies aan samenhang van het materiaal worden ingeschat. Hout verliest al vlug in die mate sterkte door

houtrot dat het makkelijk kan worden gepenetreerd met een puntig voorwerp (mes of schroevendraaier) en veelal zal het ook aanzienlijk meer water bevatten dan gezond hout.

Houtrot door schimmelaantasting kan aanleiding geven tot mechanische verzwakking met meer dan 30%, zelfs wanneer nog maar beperkt massaverlies (< 3%) werd veroorzaakt. Detectie van hogere vochtgehaltes als enig criterium is moeilijk omdat ook hogere vochtgehaltes kunnen voorkomen zonder houtrot. Indicatief zijn vochtgehaltes waarbij vrij water voorkomt (boven vezelvezadigingspunt, richtwaarde zo'n 30%) een goede indicator voor houtrot als geen andere vochtbronnen (lekkage, insijpeling, condensatie, ...) aanwezig zijn. Gezien door houtrot de chemische en structurele opbouw van hout wijzigt en dat indirecte bepalingmethoden ook minder accuraat zijn bij hogere houtvochtgehaltes moet voor het gebruik van de elektrische weerstandsmethode (EN 13183-2:2002) of door middel van condensatorcapaciteit (EN 13183-3:2005) enige omzichtigheid qua interpretatie worden voorzien.

Insectenaantastingen zijn meestal waarneembaar op basis van uitvliegopeningen en bijhorend boormeel. Aantasting van eikenhout door *Xestobium* of grote houtworm kan echter lange tijd onopgemerkt blijven omdat over een langere tijd (10 jaar) intern het materiaal wordt aangetast vooraleer er uitvliegopeningen zijn.

Naast de vaststelling van eventuele aantastingen is het zeker ook nuttig om de houtkwaliteit in te schatten. Sommige elementen kunnen reeds aanwezig zijn van bij de opbouw, nl. voorkomen van spint, kwasten/knopen en rechtdradigheid, maar zaken zoals scheuren en barsten kunnen duidelijk evolueren.

Bij de keuze van de inspectiemethoden die worden ingezet zal rekening gehouden moeten worden met de mogelijke schade aan de structuur of onderdelen, de bereikbaarheid van constructie-elementen, de te verzamelen informatie, de kostprijs, de betrouwbaarheid/reproduceerbaarheid en de gevoeligheid/resolutie nuttig voor de beslissing achteraf.

4.1.2. Resistograaf metingen

Voorals met visuele inspecties enkel de buitenkant van een balk of staak kan worden beoordeeld is het nuttig om deze aan te vullen met een inwendige inspectie, bijvoorbeeld met een resistograaf.

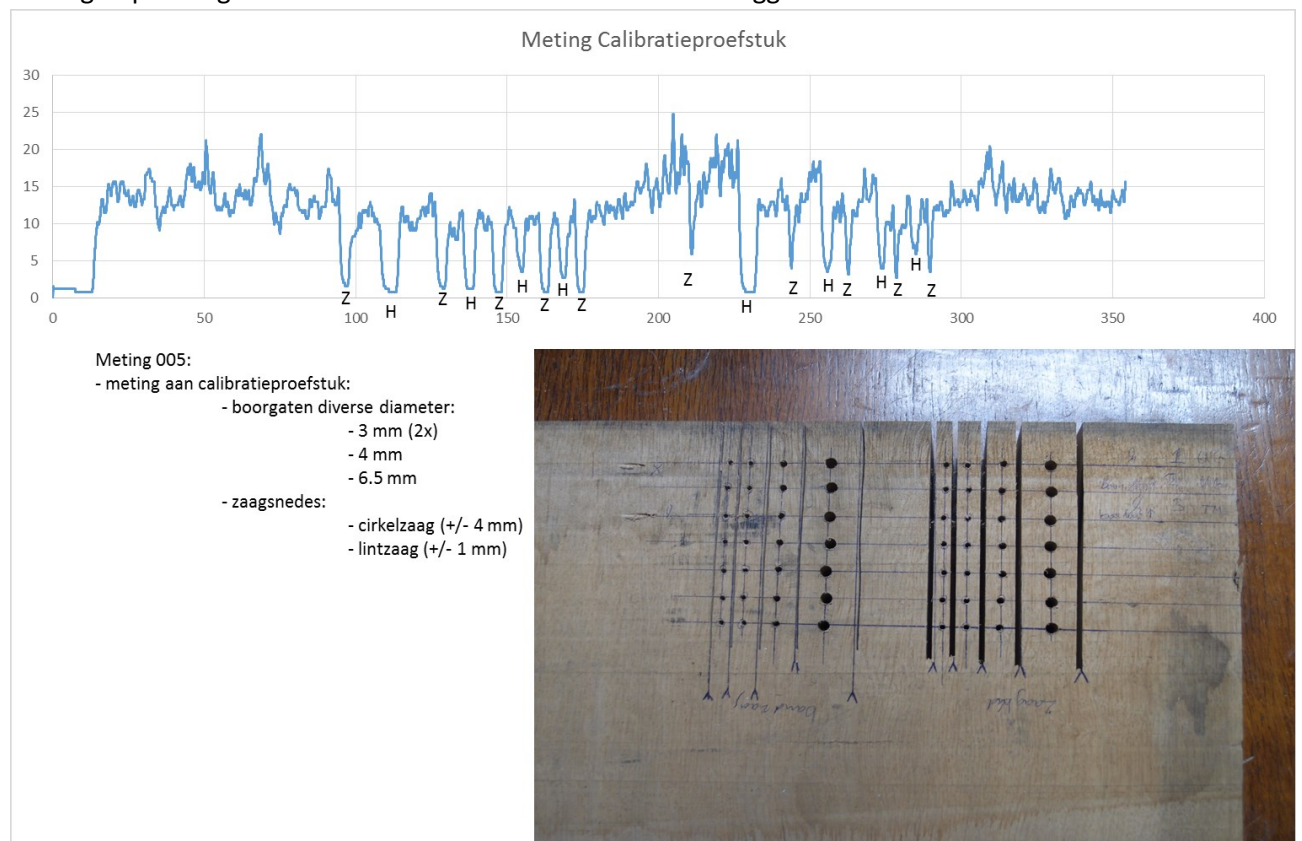
De keuze om een resistograaf te gebruiken is gebaseerd op het feit dat deze metingen relatief snel, eenvoudig uitvoerbaar en goedkoop zijn. De detectie van aangetaste zones is meestal goed mogelijk en je bekomt indirect ook info over de karakteristieke sterkte van gezond hout. Het toestel beïnvloedt door de meting een relatief kleine zone, zodat meerdere metingen in hetzelfde gebied zondermeer kunnen. Het feit dat de inspectiezone van deze lijnmeting relatief beperkt is kan aanzien worden als een nadeel en de reproduceerbaarheid en interpretatie van profielen wordt soms in vraag gesteld.

Er zijn verschillende toestellen beschikbaar op de markt, en aldus is het essentieel dat in elk rapport wordt vermeld welk toestel werd gebruikt (type en ouderdom).

Metingen kunnen gebruik maken van verschillende types boren en snelheden en dit dient dan ook gespecificeerd te worden.

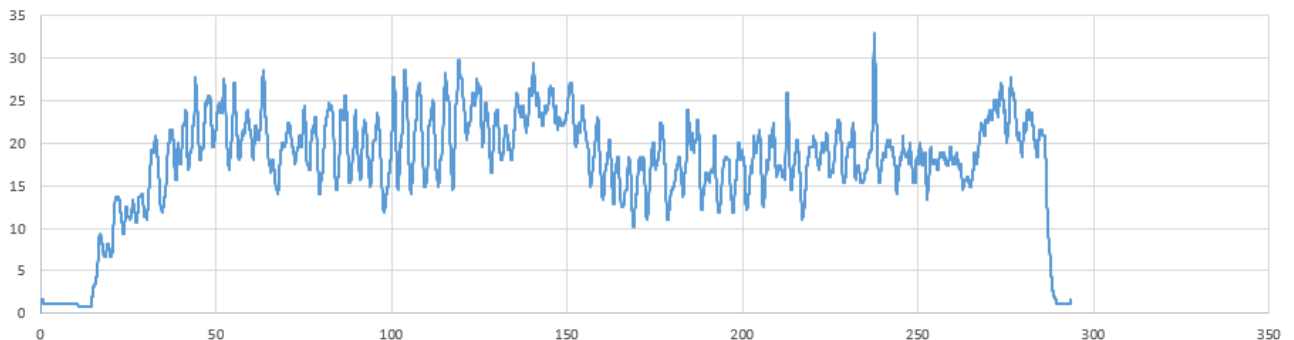
Als algemene leidraad kan in elk geval verwezen worden naar de Europese/Belgische norm die hiervoor bestaat NBN_EN16085:2012 “Conservation of cultural property: Methodology for sampling from materials of cultural property – General Rules”.

Om de resultaten goed te kunnen inschatten is het sowieso aangewezen om steeds een referentiestaal te meten onder dezelfde omgevingsomstandigheden. Dit referentiemateriaal kan verder gespecificeerd worden naar fysische eigenschappen (volumegegewicht, vochtgehalte) en mechanische eigenschappen (sterkte en stijfheid). Best ga je uit van een referentiestaal opgebouwd uit materiaal zo dicht mogelijk aansluitend met wat dient geanalyseerd te worden zowel naar houtsoort en fysische- en mechanische eigenschappen. Het is ook nuttig om op dit referentiemateriaal de jaarringen te analyseren en deze te plaatsen naast het bekomen resistograafprofiel. Om ook een inzicht te krijgen in het detectievermogen kan een referentiestaal worden aangeboord met vooraf aangebrachte kunstmatige defecten zoals uitsparingen. Hieronder wordt als voorbeeld een type referentiestaal weergegeven. Dit kalibratieproefstuk bevat boorgaten van verschillende diameter evenals verschillende breedte zaagsnedes. De hieronder weergegeven meting of profiel geeft aan in welke mate deze artefacten teruggevonden kunnen worden.



De beoordeling van de profielen dient met voldoende omzichtigheid te gebeuren. Zo zal de overgang tussen de jaarringen van eikenhout niet voor elk toestel en gebruikte instellingen leiden tot een voldoende resolutie om een scherpe aftekening te krijgen tussen jaarringen op basis van dichtheitsverschillen tussen laathout en vroeghout.

De belangrijkste basis om hout als niet aangetast te identificeren is het voorkomen van een min of meer regelmatig jaarringpatroon dat zichtbaar is op een relatief stabiel weerstandsniveau zoals hieronder als voorbeeld weergegeven.



Let echter wel op dat door naar het centrum van een balk te boren loopt men het risico de jaarringen niet langer loodrecht aan te boren en aldus zal het bekomen profiel de jaarringovergangen verzwakt of niet meer weergeven.

Het is nuttig om zones die aangeduid worden als aangetast op basis van bepaalde kenmerken van het resistograafprofiel ook nog verder te verifiëren. Zo moet er sowieso sprake zijn van daadwerkelijk een lagere weerstand en moeten bepaalde parameters uitgesloten die ook aanleiding geven tot een veranderd weerstandsniveau zoals scheuren of barsten of de opbouw van weerstand bij de aanzet van een resistograafboring.

Om het aantal resistograafmetingen te beperken tot deze die van nut zijn voor de beoordeling, is het weinig relevant om metingen uit te voeren in zones met weinig aantastingsrisico evenals deze waar geen visuele waarnemingen wijzen op enige aantasting. De zones die niet aangetast zijn, zijn echter ook van belang om te gebruiken als referentie. Maw een boring in deze zone kan, aanvullend op het gebruik van een kalibratieproefstuk, een beeld geven van een boring in gezond hout, waartegenover de profielen van andere, mogelijks aangetaste zones, relatief met vergeleken kunnen worden.

Verder zijn de belangrijkste zones voor inspectie die dus steeds moeten meegenomen worden zijn deze die meest kritisch zijn voor mogelijke accumulatie van water. Vanzelfsprekend zijn dit zones die blootgesteld zijn aan regen of lekkages van de constructie. Dit wordt nog versterkt door de aanwezigheid van kopse houtdoorsnedes, bijvoorbeeld te hoogte van houtverbindingen waar insijpelend water dikwijls gevangen zit.

Om nu juist die metingen niet te missen die essentieel zijn voor de volledige beoordeling van een constructie dient dikwijls gebruik gemaakt te worden van lange boren en deze schuin te richten op het centrum van een knooppunt (bv. de staak t.h.v. de zetel). Probeer de hoek echter zo klein mogelijk te houden om toch het jaarringpatroon te kunnen volgen en afwijkend verloop van het boor te vermijden. Het kan dan ook nuttig zijn om verschillende metingen tot in het hart te combineren in plaats van doorheen de volledige balk of staak te boren.

Gezien het resultaat van een resistograafboring gelinkt is aan wat in de lineaire baan van de boor wordt aangeboord, kan het nuttig zijn om vanuit verschillende richtingen te boren om zo een beter inzicht te krijgen in ruimtelijke aspecten. Aanvullende boringen in dezelfde zone kunnen ook duidelijk maken of naar het merg toe of gewoonweg dieper in de balk of staak interpretatie wel voldoende duidelijk is. Door toevallig daar tot een boorricting te komen eerder parallel met de jaarringen

(tangentiële boring) en dus sterk afwijkend van de beoogde loodrechte richting (radiale boring) gaat het jaarringpatroon verloren. Door extra boringen kan afgetoetst worden of dergelijke zone met relatief vlakke uitlezing van weerstand, juist wordt geïnterpreteerd en niet zomaar als houtrot wordt geduid.

De waarnemingen om te kunnen duiden of een balk of staak verzwakt is door aantasting zijn vooral nuttig ter hoogte van de sterkst belaste zone. Dit wil zeggen dat bepaalde onderdelen zoals bijvoorbeeld de aansluiting van de (binnen)steekbanden op de zetel van de staakmolen de grootste gevolgen hebben bij een eventuele houtrot- of insectenaantasting. Andere zwaarbelaste structurele elementen naast de steekbanden zijn: windpeluw, pinnebalk en molenas, steenbalk en middenlijsten. Deze laatste twee zijn ook onderhevig aan vochtindringing. Bij moeder- en kinderbalk constructies moet de inspectie zich vooral richten op de balkkoppen die op de muren liggen.

Voor het gebruik van een resistograaf en de bijhorende beoordeling is het best om toch rekening te houden met het feit dat een consistentie beoordeling soms moeilijk is omwille van de invloed van de operator. Dit kan zeker aanleiding geven tot een overschatting van het risico met mogelijks een voortijdige interventie tot gevolg. Anderzijds zou een te lage inschatting aanleiding kunnen geven tot een te late interventie. De aangetaste zones worden meestal wel herkend, maar de interpretatie en daaropvolgende beslissingen kunnen mogelijks foutief zijn. Een inschatting van de reststerkte van het gezonde hout kan nuttig zijn om een betere inschatting te verkrijgen van de aangetaste zones. Dit kan door de mate van relatieve veranderde boorweerstand te bekijken. Om alles nog te verduidelijken kunnen vervolgboringen vanuit verschillende richting zinvol zijn, en op die manier een inschatting van het volume van de aantasting mogelijk maken.

4.1.3. Andere opties

Vanzelfsprekend kunnen ook andere technieken gebruikt worden om te achterhalen of de binnenste zone van een balk of staak is aangetast. Naast de mechanische boring met een resistograaf kunnen ook scantechnieken worden ingezet om te achterhalen of bepaalde zones een verminderde hoeveelheid houtige celwand als gevolg van aantasting, en aldus minder mechanische weerstand hebben.

Volgende technieken worden toegepast als inspectietechnieken (NDO: niet destructieve onderzoekstechnieken) voor het opsporen van een (lokale) aantasting:

- Resistograaf (microboorweerstandsmetingen)
- Tomografie (2D) op basis van time of flight van geluidsgolven door hamer
- Tomografie (2D) op basis van elektrische impedantiemetingen
- Ultrasonische geluidsdetectie voor bepaling van dynamische elasticiteitsmodulus
- Inslaghamers (dynamische impacthamers)
- Mobile timber grader
- Boorkernen nemen en analyseren
- Aanbrengen van een proefbelasting (deflectiometingen bij een vooraf bepaalde mechanische belasting)
- Thermografie

De mogelijkheden om vervormingen van houten balken en staken op te volgen over de tijd heen bieden ook mogelijkheden voor periodieke inspecties. Het gebruik van bijvoorbeeld op rekstrookjes

gebaseerde vervormingsmetingen kunnen nuttig zijn om stabiliteit van een houten component in te schatten.

4.2. Beslissingsboom en onderhoud

De beslissing om historisch waardevol bouwhout omwille van aantasting te vervangen is niet eenvoudig. Zo werden de componenten die mechanisch belast worden in staakmolens zodanig gedimensioneerd dat ze zeker geen aanleiding konden geven tot vroegtijdig falen. Falen of breken van dergelijke componenten is echter onderhevig aan vele randvoorwaarden. Allereerst is er de dimensie en kwaliteit van het hout. Deze wordt echter ook constant belast door het gewicht van de constructie evenals de belasting door wind (belangrijk bij een staakmolen). Deze belastingen zijn deels constant in de tijd, maar vooral het dynamisch karakter, bijvoorbeeld belasting door functionering van een molen, zullen een rol spelen in de duursterkte en het tijdstip waarop een staak dient te worden vervangen. Historisch werden staken ook vervangen om hieraan te blijven voldoen. Blijkbaar werd in onze contreien vervanging voorzien na en om en bij de 100 jaar voor functionele staakmolens.

4.2.1. Beslissingsboom

Gezien het al dan niet operationeel houden van een staakmolen een belangrijk criterium is voor de vereiste mechanische eigenschappen van de staak is dit een eerste element waarover dient beslist te worden. Wanneer een staakmolen niet langer functioneel hoeft te zijn zal de staak, zelfs wanneer beperkte aantastingen aanwezig zijn, toch nog heel lang zorgen voor constructieve stabiliteit.

Aantasting ter hoogte van de meest kritische punten, zoals ter hoogte van de aansluiting van de (binnen)steekbanden op de zetel van een staakmolen, is veel kritischer dan ter hoogte van de delen daaronder of zelfs daarboven. Verder is de impact van een beperkte centrale inwendige aantasting ook minder kritisch dan een sterke eenzijdige aantasting vooral van het buitenste deel van de balk of staak, want deze beïnvloeden vooral de trek- en/of drukzijde en geven dan ook vlugger aanleiding tot falen.

Verder is de beslissing om een component zoals een steekband en nog meer een onderliggende kruisplaat te vervangen eenvoudiger dan te zoeken naar oplossingen om de aangetaste zones te versterken. Niet alleen omdat deze technisch makkelijker kunnen worden vervangen, maar ook omdat deze sneller worden aangetast en hun functionaliteit verliezen, dit voornamelijk door de blootstelling aan weer en wind van de steunpunten ervan.

4.2.2. Onderhoud

Aantasting van hout wordt dikwijls veroorzaakt door laattijdig ingrijpen of gebrek aan onderhoud van de constructie die de houten elementen beschermt. Het is dan ook essentieel om de impact van lekkages zo snel mogelijk te remediëren. Dit kan onder geen beding uitgesteld worden tot bijvoorbeeld de volledige goedkeuring van een restauratiedossier.

Om nu zoals dit onderhoud alsook tussentijdse inspecties beter te kunnen inschatten is een monitoring op basis van vocht en vervorming een nuttig alternatief voor de eenmalige visuele inspecties al dan niet aangevuld door resistograaf- of andere metingen. Door monitoring over

langere periodes (jaren) van het houtvochtgehalte en de vervorming van houten elementen zoals de staak van een staakmolen op de meest kritische plaatsen (bijvoorbeeld ter hoogte van de zetel), zal inzicht verworven worden in enerzijds de risico's met betrekking tot een aantasting door houtrot en anderzijds een analyse kunnen worden gemaakt van het mechanisch gedrag, en aldus van de resterende te verwachten levensduur. Een toestel zoals de "Deformometric Kit", weliswaar ontwikkeld door Italiaanse onderzoekers voor houten panelen als drager van schilderijen, kan ook nuttig zijn om meer algemeen te worden ingezet.

Minimumvereisten bij rapportering van onderzoek van historisch bouwhout met een resistograaf:

- Toestel: merk, type en jaar van productie.
- Naald: merk, type, aantal keer gebruikt (schatting, nieuw?).
- Snelheid van boren: aantal omwentelingen per mm?
- Hoek waaronder werd geboord t.o.v. de vezelrichting van het hout > per boring
- Houtsoort
- Visuele beoordeling van de zone waarin werd geboord:
 - o Aanwezigheid van knopen en kwasten
 - o Aanwezigheid van scheuren of barsten
 - o Aanwezigheid spint/schors
 - o Aanwezigheid houtrot
 - o Aanwezigheid uitvliegopeningen/boormeel/insectenaantasting
 - o Rechtdradig/spiraalgroei/lokale verstoring
- Boorprofiel van referentiestaal met zelfde toestel en gelijkaardige instellingen als bij de boringen in het historisch bouwhout
- Karakteristieken van referentiestaal (volumegewicht, vochtgehalte, ...)
- Operator en persoon die beoordeling van resultaat doet
- Motivatie van interpretatie van resultaat boring

BIJLAGE A: Terminologie

De BAST is het secundair floëem, of deel van de schors dat door het cambium voortgebracht werd. (Liber; secondary phloem; sekundäres Phloem).

DIFFUUSPORIG HOUT is hout met regelmatige verdeling van de poriën over de groeiring (bois à pores épars ou disséminés, diffuse porous wood, zerstreutporiges Holz).

Het FLOEEM of zeefweefsel vormt de banen van het dalend sap. Zolang de cortex bestaat, is hij van de bast gescheiden door het primair floëem. (phloème, phloem, Phloem).

De GROEIRING is de aanwas, op transversaal vlak, van één groeiperiode (anneau ligneux ou cerne, growth ring, Zuwachsring).

HOUT of XYLEEM is dus het geheel van de stam- en wortelweefsels, die uit verhoutte elementen samengesteld zijn en hoofdzakelijk tot steun of tot waterbaan dienen. (Fr. bois; Eng. wood; Dts. Holz).

Wanneer de groeiring een jaarlijkse aanwas is, wordt hij JAARRING genoemd (couche annuelle, annual ring, Jahrring), bestaande uit VROEGHOUT of lentehout (bois de printemps, spring wood, Frühlingholz) en LAATHOUT of zomerhout (bois d'été, summer wood, Sommerholz).

KERN(HOUT): gedifferentieerd deel van het hout (bois de coeur ou bois parfait, ou duramen, heartwood, Kernholz).

Wanneer een deel van een tak werd overgroeid door de stam dan krijg je **KNOPEN OF KWASTEN**. Een kwast in het zaaghout – in de volksmond ook wel eens “noest”, “knoop” of “wier” genoemd – is dus het visueel resterende deel van een tak van een boom.

LAATHOUT is het deel van de periodieke aanwas dat laatst gevormd wordt en zich dikwijls onderscheidt door een dichtere bouw (bois final, late wood, Spätholz).

Het MERG is het parenchymatisch weefsel van het centrum van de stam en de wortel. (moëlle; pith; Mark).

NDO: niet destructieve onderzoekstechniek.

RINGPORIG HOUT is hout waarin een deel van de groeiring opvallend verschilt door het aantal poriën of hun grootte (bois à zone poreuse, ringporous wood, ringporiges Holz).

Men noemt in het algemeen SCHORS, het stam- en wortelweefsel dat aan de buitenzijde van het cambium ligt. (écorce; bark; Rinde).

SPINT(HOUT): levend of fysiologisch actief deel van het hout (aubier, sapwood, Splintholz).

STERKTE slaat op de mogelijkheid van een materiaal om krachten of lasten te dragen.

STIJFHEID of de weerstand tegen vervorming is de hoeveelheid materiaal die samengedrukt, vernield of gebogen wordt onder de toegepaste belasting.



Het **VOLUMEGEWICHT** is de verhouding van de massa van het hout (incl. holtes en water) tot het volume en dit bij een welbepaald vochtgehalte.

VROEGHOUT is het deel van de periodieke aanwas dat eerst gevormd is en bij veel houtsoorten onderscheiden door zijn samenstelling (bois initial, early wood, Frühholz).

BIJLAGE B: Geraadpleegde bronnen

Internet

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Standerdmolen>

<http://www.panoramio.com/photo/1310843>

<http://www.molendatabase.nl/nederland/molen.php?nummer=180>

<http://www.slideshare.net/keesvqnger/de-standerdmolen-presentation-864502>

<http://www.molendatabase.nl>

<http://www.molenechos.org>

<http://www.argus-electronic.de/index.php/picus-sonic-tomograph>

<http://www.argus-electronic.de/index.php/picus-tretronic>

<http://www.brookhuis.com/timber-grader-mtg.html>

https://en.wikipedia.org/wiki/Thermographic_inspection

http://www.houtinfo.nl/sites/default/files/Infoblad_Houteigenschappen_Sterktegegevens_mrt2014.pdf

Normen

EN1995-1-1: 2005 + C1:2006 "Eurocode 5 - Ontwerp en berekening van houtconstructies - Deel 1-1: Algemeen - Gemeenschappelijke regels en regels voor gebouwen"

EN384: 2010 "Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density"

Rapporten

Rapport 8060R1, Steenakermolen, 2014

Boeken

Bauters P. 1998: Van zadelsteen tot zetelkruier, tweeduizend jaar molens in Vlaanderen. Geschiedenis van het malen met natuurlijke drijfkracht. Provinciebestuur Oost-Vlaanderen, Gent, 288pp.

Bauters P. 2000: Van zadelsteen tot zetelkruier, tweeduizend jaar molens in Vlaanderen. Bouw en werking van de molens met natuurlijke drijfkracht rond 1850 en in de natijd. Provinciebestuur Oost-Vlaanderen, Gent, 367pp.

Bauters P. & Pouw G. 2002: Van zadelsteen tot zetelkruier, tweeduizend jaar molens in Vlaanderen. Geïllustreerd molenwoordenboek. Provinciebestuur Oost-Vlaanderen, Gent, 254pp.

Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 5. Centennial ed. General technical report FPL ; GTR-190. Madison, WI : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 5.1-5.46.

Artikels

Acuna, L., Basterra, L.A., Casado, M., Lopez, G., Ramon-Cueto, G., Relea, E., Martinez, C., Gonzalez, A. (2011) "Application of resistograph to obtain the density and to differentiate wood species", *Materiales de Construccion* 303: 451-464

Henriques, D.F., Nunes, L., Machado, J.S., de Brito; J. (2011) "Timber in buildings: Estimation of some properties using Pilodyn and Resistograph", International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto, Portugal.

Hron, J., Yazdani, N. (2011) "Non-destructive strength assessment of in-place wood utility poles", *Journal of Performance of Constructed Facilities* 25: 121-129

Johnstone, D., Moore, G., Tausz, M., Nicolas, M. (2010) "The measurement of wood decay in landscape trees", *Arboriculture & Urban Forestry* 36(3): 121-127

Keunecke, D., Mannes, D., Niemz, P., Lehmann, E., Evans, R. (2010) "Silviscan vs. Neutron imaging to generate radial softwood density profiles", *Wood Research* 55: 49 – 60.

Klaassen, R. (2012) "Houtdichtheid – Nondestructieve methode", *Timmerfabrikant* 11: 27-29

Kranitz, K. (2014) "Effect of natural ageing on wood", Dissertation ETH Zurich, No. 21661

Lin, C-J., Wang, S-Y., Lin, F-C., Chiu, C-M. (2003) "Effect of moisture content on the drill resistance value in taiwania plantation wood", *Wood and Fiber Science* 35(2): 234-238

Llana, D.F., Iniguez-Gonzalez, G., Arriaga, F., Niemz, P. (2014) "Influence of temperature and moisture content on non-destructive measurements in scots pine wood", *Wood Research* 59(5): 769-780

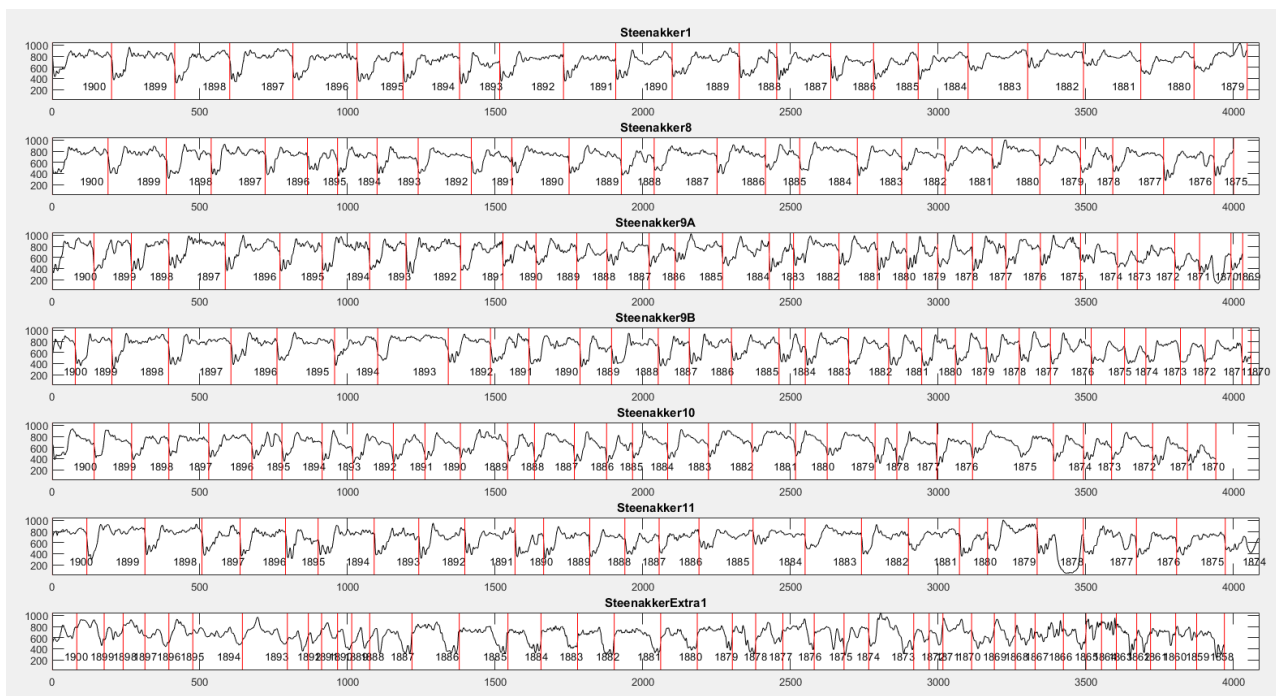
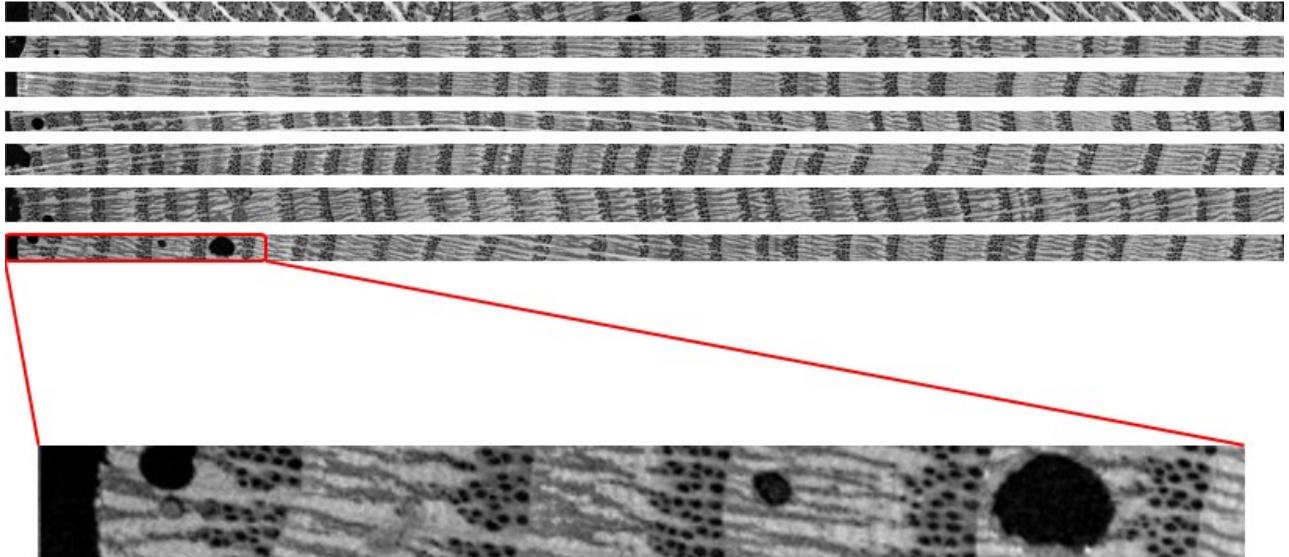
Machado, J.S., Lourenço, P.B., Palma, P. (2011) "Assessment of the structural properties of timber members in situ – a probabilistic approach", International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, Lisbon, Portugal.

Mattheck, C.G., Breloer, H., Bethge, K.A., Albrecht, W.A., Zipse, A.W. (1995) "Use of the fractometer to determine the strength of wood decay with incipient decay", *Journal of Arboriculture* 21(3): May

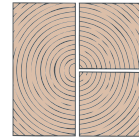
Rinn, F. (2012) "Basics of micro-resistance drilling for timber inspection", *Holztechnologie* 53(3): 24-29

BIJLAGE C: Densitometrie

Doorsnedes doorheen microdensitometrische profielen van een aantal eiken boorkernen



BIJLAGE D: Paper Sebastian Ablrh (WCTE, 2016)



SIMULATING THE BEHAVIOUR OF HISTORICAL VALUABLE TIMBER STRUCTURES: A CASE STUDY ON WOODEN MILLS

Sebastian Ablorh¹, Jan Van den Bulcke², Erik Botter², Joris Van Acker², David Garoz¹, Wim Van Paepegem¹

ABSTRACT: There is a current code of practice to maintain as much as historical valuable timber as possible whilst ensuring both human safety as well as structural integrity. A wooden post mill – constructed using *Quercus robur* or *Quercus petraea* wood - is an example of a structure that should remain safe and functional with minimal loss of valuable fabric.

This study focuses on creating a computational tool to model deterioration in the structure of a post mill and assess the replacement of elements, thus preventing unnecessary loss of valuable timber. The post is determined to be the critical structural element, both due to its structural and financial importance. The zone at the saddle experiences high stresses and failure is likely to occur here.

Deterioration was modelled in the outer ring of the post. The width of the degraded ring and the degree of residual strength were investigated. The stability was determined for a mill both in and out of service, and for both average and Eurocode strength values. All cases were able to tolerate a certain amount of deterioration. The Abaqus model proved useful, provided that adequate input is given.

KEYWORDS: Post mill, Oak wood, Deterioration, Restoration, Abaqus, Finite Elements

1 INTRODUCTION

There is an increasing interest in the conservation of historical timber structures, but the limited available knowledge on their structural behaviour and lack of design codes necessitates in-depth research. Typically, modern standards are used, leading to a conflict between safety standards and conservation.

A wooden post mill, of which many are classified monuments and important landmarks along several walk and cycle routes in Flanders (Belgium), is an exquisite example of such a valuable structure requiring proper knowledge to balance restoration and conservation. This structure was, therefore, used as case study for investigating the structural behavior of valuable timber structures.

The goal of this study was to create a computational tool to simulate the distribution of forces, locate the critical points in the post mill structure and eventually model structures with wood deterioration to formalize decisions on the replacement of elements.

Based on literature data, one basic model was created for testing with the finite element software package Abaqus. This model can be changed to simulate differences in geometry of other mills or deterioration by scripting the input file in Python. Changing the geometry or other characteristics can then be accomplished simply by changing a set of pre-defined parameters.

2 THE POST MILL

2.1 STRUCTURE OF A POST MILL

The post mill consists of a stationary and moving part. The trestle and mill body (buck) form the stationary part, whereas the sail stock is considered moving (Figure 1).

¹ Sebastian Ablorh, Ghent University, Department of Materials Science and Engineering, Technologiepark-Zwijnaarde 903, 9052 Zwijnaarde, Belgium, sebastian.ablorh@ugent.be

² Jan Van den Bulcke, Ghent University, Faculty of Bioscience Engineering, Department of Forest and Water Management, Laboratory of Wood Technology - Woodlab Coupure Links 653 B-9000 Gent, jan.vandenbulcke@ugent.be

² Erik Botter, Ghent University Faculty of Bioscience Engineering Laboratory of Wood Technology - Woodlab Coupure Links 653 B-9000 Gent, erik.botter@ugent.be

²Joris Van Acker, Ghent University Faculty of Bioscience Engineering Laboratory of Wood Technology - Woodlab Coupure Links 653 B-9000 Gent, joris.vanacker@ugent.be

¹David Garoz, Ghent University, Department of Materials Science and Engineering, Technologiepark-Zwijnaarde 903, 9052 Zwijnaarde, Belgium, david.garoz@ugent.be

¹Wim Van Paepegem, Ghent University, Department of Materials Science and Engineering, Technologiepark-Zwijnaarde 903, 9052 Zwijnaarde, Belgium, wim.vanpaepegem@ugent.be

The trestle -which provides the structure's stability- is an upright post (6.5 m high, diameter 60cm) with eight diagonal legs, called quarter bars. The latter provide horizontal and vertical support at the saddle, located halfway the post, and transfer the forces to the four block foundations (piers). The perpendicularity of the post is ensured by cross trees, laying on the piers and preventing lateral movement of the post at the bottom. The mill body is supported on and revolves around the post, enabling the mill to be turned to face the wind. The sail stock consists of 4 sails and a windshaft that is connected to mill stones in the attic of the buck.

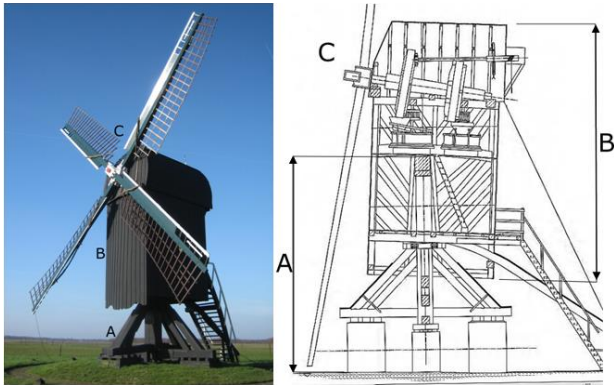


Figure 1: Exterior and interior view of a post mill (A-Trestle; B-Buck; C-Sail stock) [1, 2]

The high strength and toughness characteristics of oak led to an almost exclusive use of oak in post mills. The oak species indigenous to Belgium and thus used to construct the mills are pedunculate (*Quercus robur*) and sessile oak (*Quercus petraea*).

2.2 LOADS ON A POST MILL

A post mill is subjected to vertical and horizontal loads. Vertically, the weight of the structure (mill buck, wind shaft and post) is considered. Horizontally, the wind, on buck and sail stock, is acting on the structure. The weight of the buck with sail stock weighs approximately 35 tons [3], whereas the post weighs approximately 2 tons. The wind load is calculated according to Eurocode NBN-EN 1991-1-4. Several wind load cases are distinguished based on the wind speed and corresponding covering of the sails, see Table 1 and Figure 2.

Table 1: Wind load cases (Note: the basic wind speed is the upper value of the Beaufort class)

Beaufort class	Wind speed [km/h]	Sail covering	Basic speed [m/s]
<4	0-29	Full	8.1
5	30-38	Three-quarter	10.6
6	39-49	Half	13.6
7	50-61	One-quarter	16.9
>8	>61	None	26

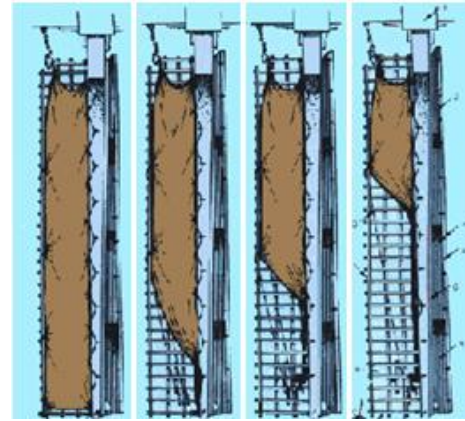


Figure 2: From left to right: full, three-quarter, half and one-quarter sails [4]

The most critical case, one-quarter covered sails, is determined to have a total characteristic wind load, on the buck and sails combined, of 51.4 kN (Table 2). The vertical load is transferred from the post to the quarter bars and finally to the piers. Horizontally, the quarter bars and the cross trees ensure the stability.

Table 2: Characteristic horizontal and vertical wind load

	Full sails	Three-quarter sails	Half	One-quarter	No sails
Horizontal load [kN]	21.0	33.4	43.4	51.4	48.0
Vertical load [kN]	2.9	4.5	5.3	5.5	0.0

3 ANALYTICAL APPROACH

Simplifying the aforementioned situation, the post can be considered a beam with two supports (cross trees and saddle), cantilevering one support (saddle), with the vertical and horizontal load concentrated at the end of the cantilever (Figure 3). The compressive and bending stresses, reaction forces and deflections are determined. This allows to locate the critical points and will serve as a verification of the Abaqus model. Values for the strength and stiffness parameters, parallel and perpendicular to the grain direction are found in class D30, European Oak, according to Eurocode [5].

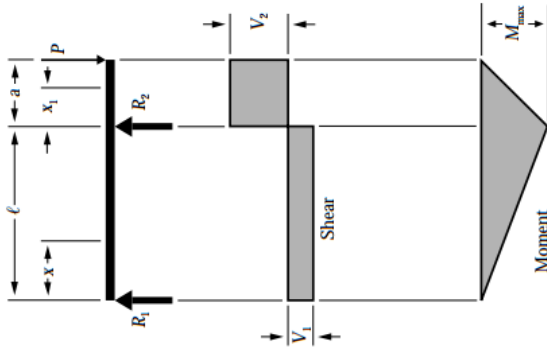


Figure 3: Simplification of the post as a cantilever beam [6]

3.1 RESULTS AND VERIFICATION

The highest bending stresses, due to the horizontal load and geometrical non-linearity, are located at the saddle. The compressive stresses, due to the vertical load, are significantly lower. The horizontal and vertical design loads are shown in Table 3.

Table 3: Horizontal and vertical design loads

	Full sails	Three-quarter sails	Half	One-quarter	No sails
Horizontal design load [kN]	31.5	50.1	65.1	77.1	72.0
Vertical design load [kN]	490.2	492.6	493.9	494.1	485.9

3.1.1 Vertical

The quarter bars take the entire vertical load, which is simplified by a vertical reaction force at the saddle. The resulting compressive stress in the upper part of the post is obtained by dividing the load by the cross-sectional area at the saddle, A_{saddle}^4 , (Table 4).

Table 4: Vertical reaction force and compressive stress

	Full sails	Three-quarter sails	Half	One-quarter	No sails
$R_{saddle,V}$ [kN]	490.2	492.6	493.9	494.1	485.9

⁴ The diameter at the saddle is 60 cm, resulting in an A_{saddle} of $\pi \cdot (0.3 \text{ m})^2 = 0.28 \text{ m}^2$.

$\sigma_{compression}$ [MPa]	1.73	1.74	1.75	1.75	1.72
------------------------------	------	------	------	------	------

3.1.2 Horizontal

The maximum moment at the saddle due to the horizontal load is calculated according to:

$$M_{saddle} = Pa = 3.25 \text{ m} \cdot P \text{ [Nm]} \quad (1)$$

The resulting bending stress can be obtained by dividing the bending moment by the section modulus at the saddle, W_{saddle} .

The results for all wind load cases can be found in Table 5.

Table 5: Reaction forces, bending stresses and compressive stresses

Sail covering	1	3/4	1/2	1/4	0
$R_{cross \text{ trees}}$ [kN]	31.5	50.1	65.1	77.1	72.0
$R_{saddle,H}$ [kN]	63.0	100.3	130.2	154.1	144.0
$R_{saddle,V}$ [kN]	490.2	492.6	493.9	494.1	485.9
$\sigma_{bending-NON \text{ LINEAR}}$ [MPa]	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
$\sigma_{bending-LINEAR}$ [MPa]	4.8	7.6	10.0	11.8	11.0
$\sigma_{bending,TOTAL}$ [MPa]	5.0	7.9	10.3	12.2	11.4
$\sigma_{compression}$ [MPa]	1.73	1.74	1.75	1.75	1.72

Not only the highest bending stresses occur at the saddle, it also withstands a high horizontal reaction force, up to 154 kN. This is double the reaction force at the cross trees, which is 77 kN at the most. The bending is clearly the dominating factor in the stress generation, being a factor 3 to 7 larger than the compressive stresses. The total bending stress includes the stress caused by bending

due to the horizontal force and the additional bending due to non-linearity. The latter is created when the horizontal force causes a lateral deflection at the top of the post. The vertical force is now acting with a certain eccentricity, causing the additional bending moment.

3.1.3 Verification

The tension, bending and compression strength of timber are not equal, so unity checks are developed giving the summation of the ratios between the different stress and strength values. When the summation exceeds 1.0 it is assumed that the material fails.

Equation (1) from Eurocode EN 1995-1-1:2004 is used to verify the results:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + \frac{n_y}{n_y - 1} \frac{F}{W_y} \frac{w_0}{f_{m,0,d}} + \frac{\sigma_{m,0,d,z}}{f_{m,0,d}} + \frac{n_z}{n_z - 1} \frac{F}{W_z} \frac{v_0}{f_{m,0,d}} + \frac{\sigma_{m,0,d,y}}{f_{m,0,d}} \leq 1.0 \quad (2)$$

where $\sigma_{c,0,d}$ = compressive stress parallel to grain direction, $\sigma_{m,0,d,y/z}$ = bending stress parallel to grain direction, $f_{c,0,d}$ = compressive strength parallel to grain direction, $f_{m,0,d}$ = bending strength parallel to grain direction, F = vertical load, w_0 and v_0 = initial deflections.

The results of the unity checks are shown in Table 6.

Table 6: Unity checks for all cases

	Full sails	Three-quarter sails	Half	One-quarter	No sails
Unity check [-]	0.32	0.43	0.53	0.60	0.55

Even in the heaviest loaded case (one-quarter covered sails), a value of only 0.60 is reached for the unity check. Post mills are clearly highly overdimensioned structures, which explains why they can last for centuries when properly maintained.

4 FINITE ELEMENT ANALYSIS (ABAQUS)

4.1 THE ABAQUS MODEL

The trestle's stability is analysed in the linear elastic domain with the finite element software package Abaqus. The geometry and the material properties are approximated as detailed as possible to obtain accurate results. The post, saddle and quarter bars are modelled (Figure 4) and interact by means of normal and

transverse (friction) contact (Figure 5); the cross trees are not modelled explicitly, but their connections with the quarter bars and post are approximated by boundary conditions (Figure 6 and Figure 7). Engineering constants are used to assign moduli of elasticity and Poisson's ratios in the longitudinal, radial and transversal direction, thus approximating the orthotropic nature of wood.

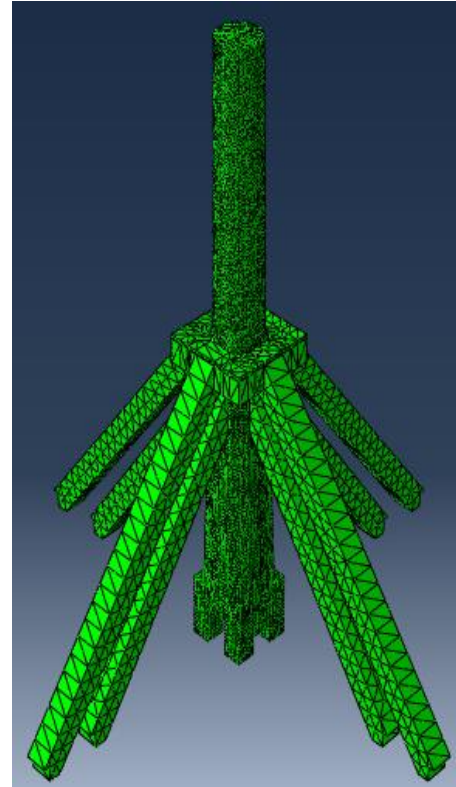


Figure 4: Abaqus model

4.1.1 Interaction and boundary conditions

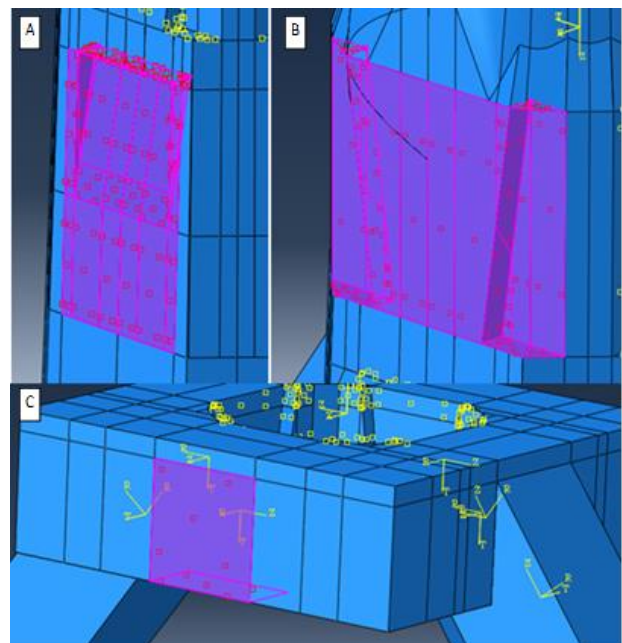


Figure 5: Interaction: post-inner quarter bar at the notches (A); post-saddle at the dovetails (B); saddle-outer quarter bar (C)

The toes of the quarter bars are embedded in the cross trees, thus movement parallel and perpendicular to the beam is prevented. The toes of the quarter bars are therefore restricted in all translational directions.

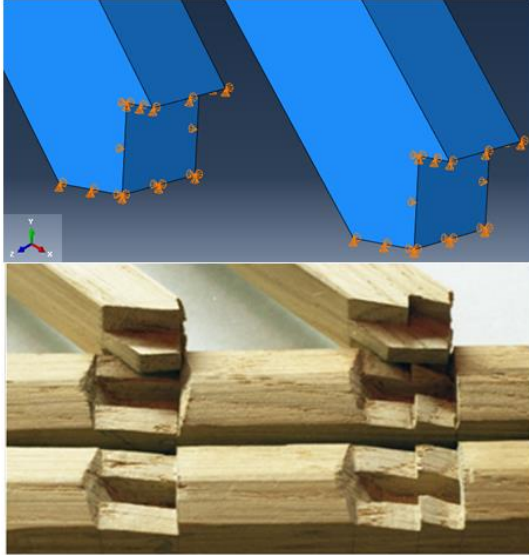


Figure 6: Boundary condition: toes quarter bars (top = in Abaqus model; bottom = in scale model)

At the bottom of the post, the heels hang over the cross trees as a steady. Cross trees ensure the perpendicularity of the post and cross tree keys are positioned in such a way to secure close contact between the cross trees and the post heels. The keys transfer a force parallel to the cross tree, which is stiff in the longitudinal direction. Consequently, the strain will be negligible and thus the translation at the contact surface of the keys is fixed (Figure 7).

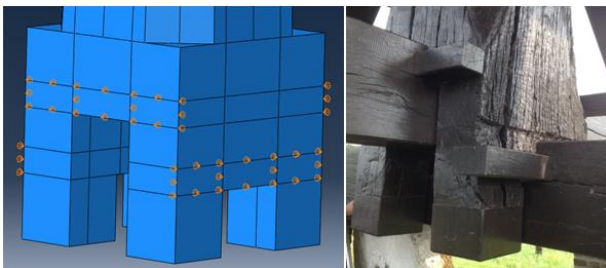


Figure 7: Boundary conditions: bottom of the post

4.1.2 Model input

The computational tool is scripted in Python, allowing the modification of the input parameters. The forces acting on the model and the material characteristics of the construction subjected to the forces are defined by the predefined parameters.

The loads were determined during the analytical calculations. The material characteristics are implemented using engineering constants.

Table 7: Input loads in the model

Load	Force [kN]	Pressure [MPa]
Dead	463.5	2.0
Wind Horizontal	77.1	0.9
Wind Vertical	8.2	0.03

Table 8: Poisson's ratios [7]

Species	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	ν_{TR}	ν_{RL}	ν_{TL}
Sessile Oak	0.43	0.55	0.50	0.48	0.07	0.05

Table 9: Eurocode E-moduli for Sessile Oak

E_L	9200.00
E_R	1632.26
E_T	986.91
G_{RT}	425.51
G_{RL}	1638.12
G_{TL}	1276.64

A cylindrical coordinate system is used in Abaqus, where the radial, transversal and longitudinal direction are represented by the 1, 2 and 3 direction respectively. Figure 8 shows the relation between the strains and stresses in an orthotropic material, where ϵ_{ij} are the strains, σ_{ij} are the stresses, ν_{ij} are Poisson's ratios, E_i are the elastic moduli and G_{ij} are the shear moduli.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix}$$

Figure 8: Strain-stress relationship [8]

4.1.3 Mesh

The stresses in the model are calculated by dividing the parts in smaller elements and calculating the stress in the integration points of the elements. To cope with the complex geometry at the dovetails and notches quadratic tetrahedron 10 node elements (C3D10) are used (Figure 9).

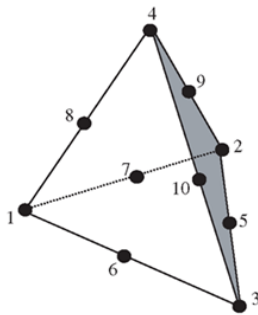


Figure 9: Quadratic tetrahedron element [9]

4.2 RESULTS AND VERIFICATION

The Abaqus model confirms the high bending stresses at the saddle as can be seen in Figure 10.

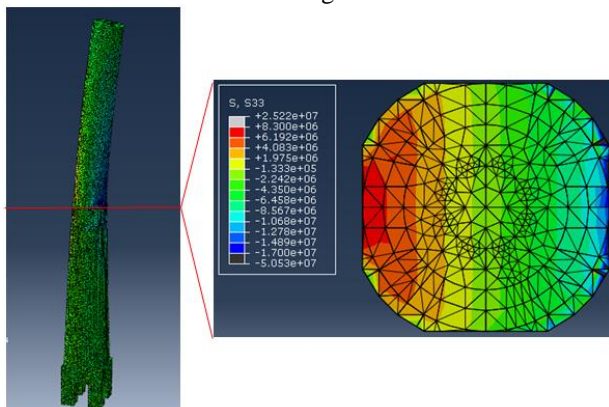


Figure 10: Compression and tensile zone in post: entire post (left); cross-section at CAS (right)

However, the values are higher than those calculated analytically. This difference can be explained by the complex geometry at this zone. The cross-section changes from polygonal (bottom) to circular (top). In addition, dovetail connections on the post keep the saddle in place, creating large recesses in the post, which

are a source of stress concentrations. The same applies to the compressive stresses. The peak stresses are further investigated in a submodel (Figure 11), which allows a refinement of the mesh in the critical zone without drastically increasing the computational time. The extreme stresses were determined to be caused by numerical singularities, therefore, the stresses in the Circle At the Saddle (CAS) are used for the verification with Equation (1). This is a circle of 60 cm in diameter, at the transition of the post (Figure 11) which is theoretically the most critical cross-section. The CAS is less influenced by the peak stresses and distorted elements and thus expected to give more accurate results.

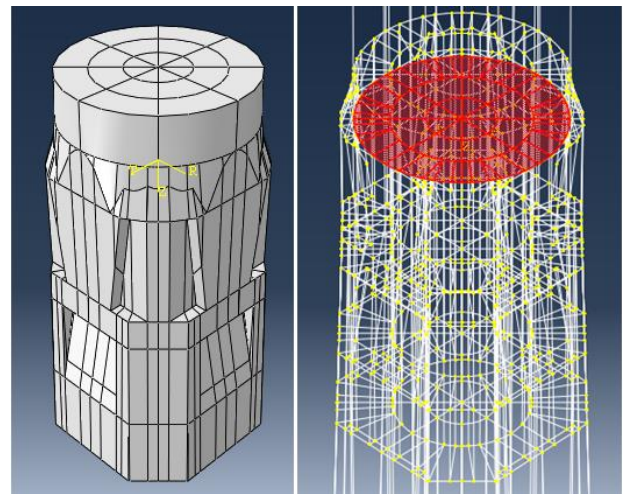


Figure 11: Submodel (left); Circle At Saddle (right, indicated in red)

5 DETERIORATION

The influence of deterioration on the stability is investigated and makes it possible to determine the functionality of a post mill with a certain amount of deterioration and can thus be used to assist in the restoration assessment of post mills. Deteriorated regions of the post were simulated by assigning lower values for the elastic moduli to those zones and the strength limits were reduced accordingly as well.

Deterioration is commonly detected using a resistograph. The amount of resistance a drilling needle experiences is a measure of the residual strength of the deteriorated zone and the resistance in function of the actual depth of the drilling is its output (Figure 12).

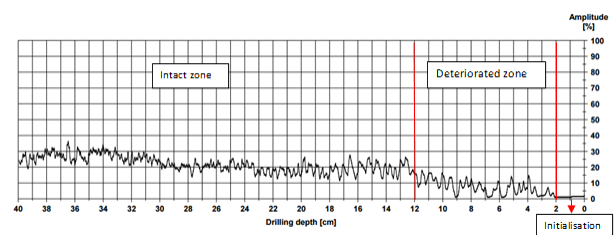


Figure 12: Resistograph measurement output of the Steenakker mill post

The influence of deterioration on the stability is investigated according to Eurocode 5 design strength values for the worst wind load case, which is the situation with one-quarter covered sails. A deteriorated post is often no longer used for milling and stripped from its sails, hence the wind load case without sails should be considered as well.

An outer ring is assumed to be degraded, simulating deterioration initiated by the sapwood, which is susceptible to fungal decay and insect attack. The width of the degraded ring and the degree of residual strength were investigated. The investigated deterioration occurs in the critical zone around the saddle, either from the transition to the notches of the inner quarter bars or from the transition to the bottom of the dovetails.

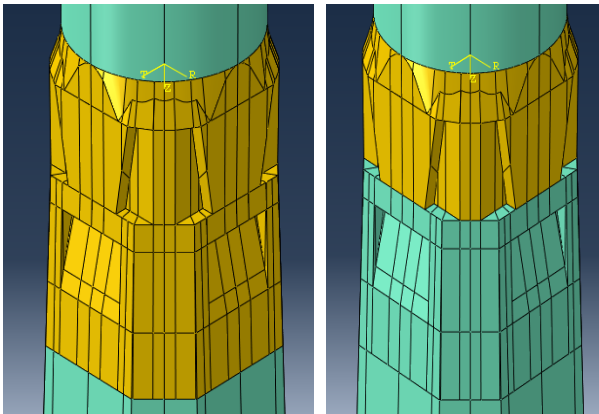


Figure 13: Boundary condition: toes quarter bars (left - to the notches; right – to the dovetails)

As a case study, the mill of Steenakker is considered. This mill –which was stripped from its sails - had a deteriorated post, with a degraded outer ring of 12 cm without residual strength from the transition to the notches. Average strength limit values, which are significantly higher than the design values, are used for the verification.

Table 10: Average E-moduli for Sessile Oak [10, 11]

Density	710	kg/m ³
E_L	11000	kN/mm ²
$f_{m,k}$	95	N/mm ²
$f_{c;0;k}$	50	N/mm ²

In case of deterioration to the notches and a deteriorated ring with no residual strength, the post fails immediately according to the Eurocode 5 design strength values. Verifying with average values yields a stable post up to a deterioration width of 16 cm. The deflection at the top of the post with this degree of deterioration is 15 cm, indicating that the serviceability should be considered as well to assess the functionality of a mill.

For all other cases a certain amount of deterioration, 5 to 7 cm (Table 12, 13 and 14), was possible without failure, depending on the residual strength. For residual strengths higher than 80%, failure does not occur.

In the following tables, F means failure at CAS; F* means failure at the notches, NF means failure of the deteriorated ring, but not of the intact core and NF means no failure at all.

5.1 Deterioration to notches

A deteriorated ring without residual strength immediately leads to failure at the notches. Higher residual strengths, up to 70%, can tolerate widths up to 6 cm. Residual strengths of 80 and 90% do not lead to failure of the post.

In other words, if a post starts deteriorating at the outer ring, initial degradation (residual strengths 80-90%) will not affect the stability. If the deterioration degrades the outer ring up to a residual strength of 70%, the post can tolerate a deterioration width of 6 cm. Any further increase of the deterioration width leads to failure.

In the case of quarter-covered sails, a deteriorated ring without residual strength will immediately lead to failure at the notches. Higher residual strengths, up to 70%, can tolerate widths up to 5 cm, which is one centimetre less than in the wind load case without sails. Residual strengths of 80 and 90% will not lead to failure of the post in this case either.

Table 11: Deterioration to notches – one-quarter covered sails

Det. width [cm]	Residual strength [%]			
	0	10-70	80	90
2	F*	NF	NF	NF
6	F*	NF	NF	NF
7	F*	F	NF	NF
30	F*	F	NF	NF

Table 12: Deterioration to notches – no sails

Det. width [cm]	Residual strength [%]			
	0	10-70	80	90
2	F*	NF	NF	NF
5	F*	NF	NF	NF
6	F*	F	NF	NF
30	F*	F	NF	NF

5.2 Deterioration to bottom dovetails

In the wind load case of quarter covered sails, a post with a degraded outer ring with residual strengths of 70% and lower, can tolerate deterioration widths up to 5 cm. When loaded according to the wind load case without sails, the tolerated width is 6 cm, except for a residual strength of 70%, which is still safe with a deterioration width of 7 cm. For both wind load cases, the post is stable when the residual strength exceeds 80%.

Table 13: Deterioration to bottom dovetails– one-quarter covered sails

Det. width [cm]	Residual strength [%]			
	0	10-70	80	90
2	NF	NF	NF	NF
5	NF	NF	NF	NF
6	F	F	NF	NF
30	F	F	NF	NF

Table 14: Deterioration to bottom dovetails– no sails

Det. width [cm]	Residual strength [%]				
	0	10-60	70	80	90
2	NF	NF	NF	NF	NF
6	NF	NF	NF	NF	NF
7	F	F	NF	NF	NF
8	F	F	F	NF	NF
30	F	F	F	NF	NF

6 CONCLUSIONS

The goal of this work was to create a tool to assist in the assessment of deteriorated structural timber elements in a post mill, using the finite element software package Abaqus. The post of the mill is considered the most important element of the structure due to its structural and financial importance.

Provided availability of adequate and correct input data on the strength and stiffness of the timber elements, this FEM tool can be helpful when assessing restoration cases. Both the analytical calculation and finite element model, indicate a critical zone around the saddle, as such

confirming the importance of proper monitoring of that region.

The investigation of the deterioration has shown that the detection of degraded timber elements does not always require the replacement of the element. The serviceability should however be kept in mind to ensure the functionality of the post mill.

ACKNOWLEDGEMENT

We greatly acknowledge the Flanders Heritage Agency for the opportunity to work on this project. We are also thankful to the mill restorers Roland and Kris Wieme for their insight and expertise on the subject.

REFERENCES

- [1] "Exterior of a Post Mill," ed.
- [2] S. Okkerse, "Ontwerp re restauratie Westermolen," ed, 2013.
- [3] P. Bauters, *Van zadelsteen tot zetelkruier: 2000 jaar molens in Vlaanderen*. Gent: Provincie Oost-Vlaanderen, 1998.
- [4] "Covering of sails," ed.
- [5] N.-B. f. standardisation, "Eurocode 5: Design of timber structures," in *Common rules and rules for buildings*, ed, 2006.
- [6] T. A. W. Council, "Beam Overhanging One Support - Concentrated Load at End of Overhang," ed, 2007.
- [7] T. Y. A. Ergün Güntekin, Peter Niemz, "Some orthotropic mechanical properties of sessile oak (*Quercus petraea*) as influenced by moisture content," presented at the 27th International Conference Research for furniture industry, Turkey, 2015.
- [8] (2015). *Abaqus/CAE's User Manual*. Available: <http://www.egr.msu.edu/software/abaqus/Documentation/docs/v6.7/books/usi/default.htm?startat=pt04ch21s09s04.html>
- [9] "Quadratic tetrahedron element," ed.
- [10] C. Hout, "Houteigenschappen - Sterktegegevens van gezaagd en gelamineerd hout," ed, 2014.
- [11] "Europese Eik," H. I. Bois, Ed., ed, 2006.

