



Trækmåling på træer: Kan rådne eller ødelagte rødder måles?

Af Christian Nørgård Nielsen

august 2017



En stærk forkortet version af notatet er bragt som artikel i Grønt Miljø 7/17

Faktaboks: Trækmålingsmetodens teknik

Metoden består af to forskellige målinger: 1) En trækmåling på træet, hvor man måler kraftens udvikling i sammenhæng med bevægelser i stamme og på rodtæerne (figur A) . 2) En fotogrametisk måling af trækronens tværsnitsareal til beregning af de vindkræfter, som kan påvirke træet ved forskellige vindhastigheder (figur B).

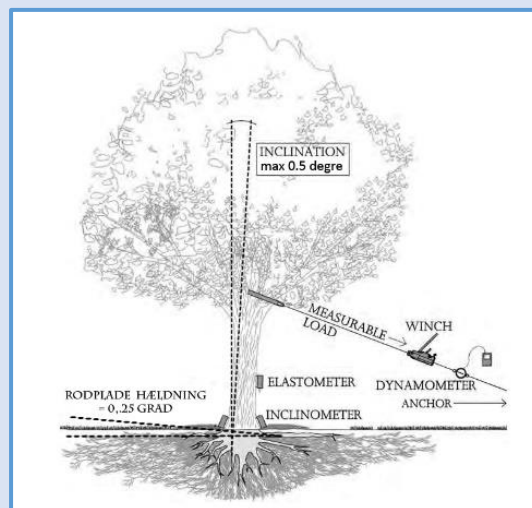
Den vindbelastning, som er beregnet ved en valgt kritisk vindhastighed (der er valgt 27.5 m/sek i figur C) sættes så i forhold til de målte kræfter (drejningsmoment) fra trækmålingen. Dette forhold danner Y-aksen i figur C.

Da vindbelastningen er konstant, stiger dette forholdstal i takt med at momentet stiger i trækmålingen og rodtæerne bevæger sig, og disse data afbildes i figur C, som viser forløbet fra testtræet i Sorgenfri Slotshave (trækretning 2).

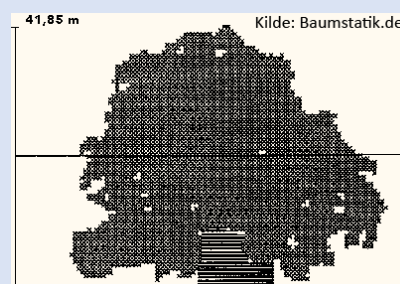
Figur C viser 3 kurver – en kurve for hver af de tre anvendte rodbevægelses-sensorer (gul, rød, blå). Alle tre kurver stammer fra samme trækmåling, men da de tre rodanløb blev løftet forskelligt (se figur 7) ligger de tre kurver også med forskellige niveauer.

Sammenfattende viser denne trækttest, at to rodanløb opviser stor modstand i trækmålingen, mens den tredje rodmåler bliver løftet hurtigere opad – vel at mærke ved samme kraft som de to andre rodanløb.

Det gode spørgsmål er så: Viser dette, at der er råd eller ødelagte rødder?

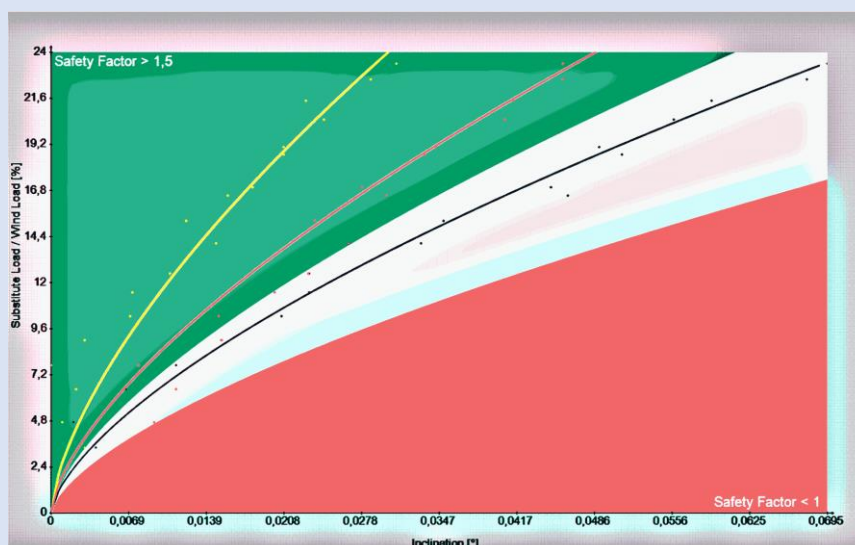


Figur A: Trækmålingen gennemføres med håndspil og wire mens kraften, rodbevægelse, stammeudbøjning og kompression/strækning af stammeved måles.



Figur B: Til beregning af vindens kraft på træet, måles trækronens tværnit fotogrametrisk.

Figur C: Til slut plottes forholdet mellem trækmålingens moment og vindens kraft (Y-aksen) over rodhævningen for de tre rodbevægelsesmålere, og i et beregningsmodul anføres også et kritisk (rødt) og sundt (grønt) område.



Indledning:

En gammel bøg på Slots- og Kulturstyrelsens areal i Sorgenfri har haft flere kæmpeporesvampfrugtlegmer siddende mellem rodudløbene, og Styrelsen har overvejet hvor stor en risiko træet udgør. Derfor blev Harald Schmidt fra Norge og Peter Müller fra Argus Elektronik i Tyskland den 22. juni inviteret til at demonstrere deres udstyr til trækmåling på træer (fig. 1). Metoden kan også anvendes til at belyse effekten af overskårne rødder.

Det forekommer ret logisk, at man burde kunne registrere en lavere trækkraft, hvis træets rødder er svækkede eller døde, og det hævdes fra metodens ophavsmand i Tyskland (Günther Sinn), at døde rødder kan registreres ved 0.25 grad hævning af rodpladen. Princippet gennemgås i faktaboksen.

Forfatteren har i sit doktorarbejde og i senere projekter lavet trækmålinger på cirka 200 træer og diskuterer her fordele og ulemper ved metoden. Metoden er i øvrigt sammen med andre rodundersøgelsesmetoder beskrevet kort i Grønt Miljø 8/14.



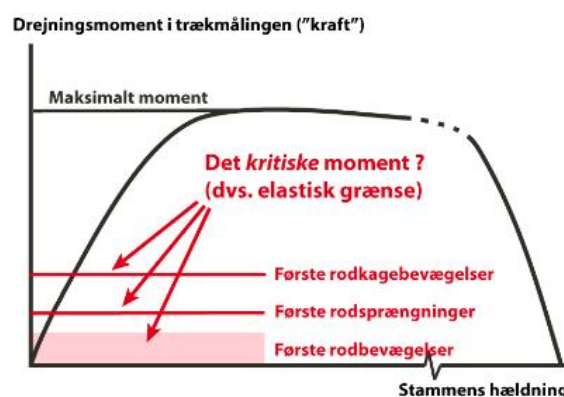
Konklusion på metoden

Lad mig starte med at slå fast, at metoden godt kan levere den ønskede viden, hvis den anvendes og tolkes korrekt. Djævelen ligger dog netop i detaljerne. Og at komme frem til den rigtige konklusion kræver megen erfaring og biologisk indsigt. Da metoden i praksis også er teknisk omstændelig, vil der ofte være bedre alternativer (se senere). Picus Elektronik's apparatur fungerer overbevisende og leverer gode data – som sagt ligger vanskelighederne i tolkningen.

I det følgende gennemgås nogle af de forhold, som bør inddrages ved tolkning af metodens resultater.

Trækmålingens kritiske grænse?

I forskning trækkes træet i reglen helt ned, hvorefter f.eks. rødderne kan undersøges. Ved undersøgelse af bevaringsværdige træer skal trækmålingen begrænses til kun at trække til en "kritisk / elastisk" grænse, således at træets rodsystem ikke bliver beskadiget. Men hvad er den kritiske grænse for trækmålingen? Den præsenterede metode trækker rodsystemet til en hældning på 0.25 grad (fig A). Er det en fornuftig grænse?



Figur 2: Momentudvikling og forskellige kritiske hændelser ved destruktiv trækmåling.

Figur 2 viser momentudviklingen som funktion af stammehældningen, når træet trækkes helt ned.

Normalt vil vi kunne registrere rodbevægelser længe før

der optræder finrods-sprængninger – rodsprængninger kan registreres med jordmikrofon. Og ofte vil man registrere rodsprængninger længe før hele rodkagen (med jord) begynder at løfte sig (fig. 2). Men sådan er det ikke altid og det afhænger af, hvor på roden der måles bevægelser. Den parameter, som bedst angiver

en kritisk belastningsgrænse, kan altså variere mellem træer – alt efter om rodsystemet er løsnet i jorden, eller om hele rodkagen er løsnet fra jorden.

Som udgangspunkt er rodbevægelser "normale" og forekommer almindeligt i stærk blæst og kuling, og positionen for montering af rodhævningsmåler spiller en kolossal rolle for de målte værdier. Serier af finrodssprængning ved træk i spillet er det bedste generelle mål for en kritisk / elastisk grænse for trækmålingen. Kun i det tilfælde, hvor træet har en løsnet rodkage (og altså tidligere har lidt subletal storm skade), kan det være, at rodkagehævning optræder før rodsprængning. Metoden kan altså forfines betydeligt ved at koble i det mindste en jordmikrofon på systemet, men bevægelsesmåler på jorden modsat trækretningen giver også ekstra tolkningsmuligheder vedr. rodlageløsning.

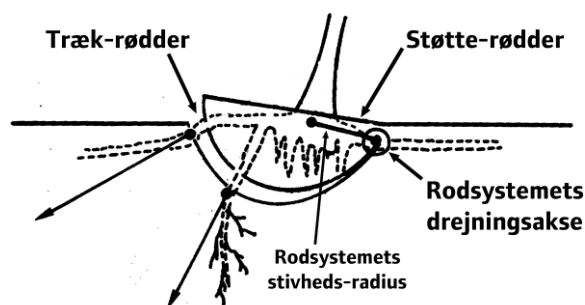
Når den præsenterede trækmålingsteknik fokuserer på en rodhævning på 0.25 grad, så skyldes det dels at man i de fleste tilfælde holder sig under den kritiske belastning, og dels at forsøg har vist en tålelig korrelation mellem trækmoment ved 0.25 grad rodhævning og maksimalt trækmoment (fig. 2 og Detter/Rust 2013).

Er rodsystemet et stift system?

En af forudsætningerne for at kunne arbejde med trækmålinger ved 0.25° rodhældning er, at rødderne udgør et stift system og at alle rødder bevæger sig som én samlet "betonklods". Denne forudsætning kan godt gøres gældende, hvis man måler tilstrækkeligt langt inde på rodudløbet. Altså meget tæt på stammen eller på rodudløbene på stammen.

Når man gennemfører destruktive trækmålinger, kan man efter en vis træhældning se, at rodsystemet har en drejningsakse, hvorom rodsystemet hæver sig (figur 3). Afstanden mellem stammens midte og drejningsaksen kan man f.eks. kalde "stivheds-radius" (eller rodsystemets "arm" i trækrøddernes drejningsmoment). Man må være bevidst om, at rødder bøjer indenfor denne radius, men de store støtterødder danner til drejningsaksen en forholdsvis stiv (men svagt bøjeligt) "rod-tallerken". De mindre rødder indenfor stivheds-radius kan dog udmærket opvise stærke bøjninger (se nedenfor).

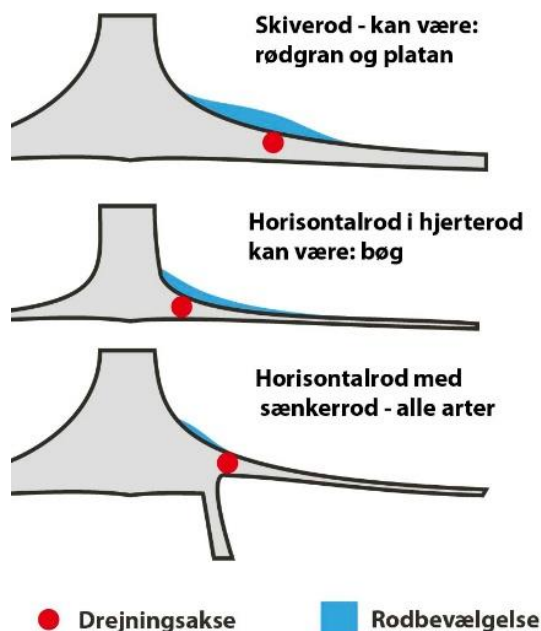
Men hvad afgør, hvor stor stivheds-radius er?



Figur 3: De dominerende horisontale rødder danner en stiv "rod-tallerken", men mellem de stiveste rødder er mange mindre og bøjelige rødder.

Røddernes stivhed afhænger af rodens diameter i 4. potens! Rodsystemets stivhed og drejningsaksens placering er altså meget afhængig af, hvor stor de dominerende rødders afsmalning er i de første 100 cm fra stammen (fig. 4). Sænkerrods-systemer med langsom afsmalning har tykke rødder 50-100 cm fra stammen og drejningsaksen forskubbes langt væk fra stammen (figur 4A). Dette ses mest ekstrem hos træer på mosebund (figur 8). Træer med hurtig afsmalning på rødderne (f.eks. bøg – fig. 4B) har derimod drejningsakse næsten ved stammens basis. Jordbunden spiller også en rolle: Jo mere fladgrundet rodvækst, jo længere ud flyttes drejningsaksen, fordi støtterødderne kompenserer og bliver tykkere ved mangel på dybe rødder. Forekomst af sænker-rødder ændrer således drejningsaksens position (figur fig. 4C). Træarten og jordbunden spiller altså en meget stor rolle for den "stive rodtaalkens" diameter (se også fig. 8).

Figur 4: Stivheds-radius afhænger af rodarkitektur og jordbund og derfor optræder naturlige rodbevægelser også på forskellige steder langs rødderne og der dannes hulrum om rødderne på forskellige steder og i forskelligt omfang.



Rodbevægelser

Mange mennesker tror, at rodsystemet er fastlåst i jorden – indtil det rives op i storm. Men i blæsevejr bevæger rødderne sig naturligvis i jorden – både op og ned, sideværts og frem og tilbage. Især støtterødderne tæt på træet er konstant udsat for bøjninger og røddernes asymmetriske tværsnit er jo netop reaktionsved, som respons på bevægelser (fig. 5). Rodbevægelser kan måles med elektroniske vinkelmålere (fig. 6).

Den blå skravering i figur 4 antyder hvor og hvor meget rødderne må forventes at bevæge sig naturligt indenfor den elastiske grænse ved forskellige udformninger af rødder. Erfaring med træarternes rodarkitektur og respons på jordbundsforhold er således vigtig, for at kunne placere og tolke rodbevægelsesmålere korrekt. Forskellene mellem de tre rodmålerne i figur 7 kan således skyldes forskelle i roddiameter eller fravær af sænker-rødder, ligeså vel som forskellene kan være udtryk for råd i den rod, som bevæger sig mest.

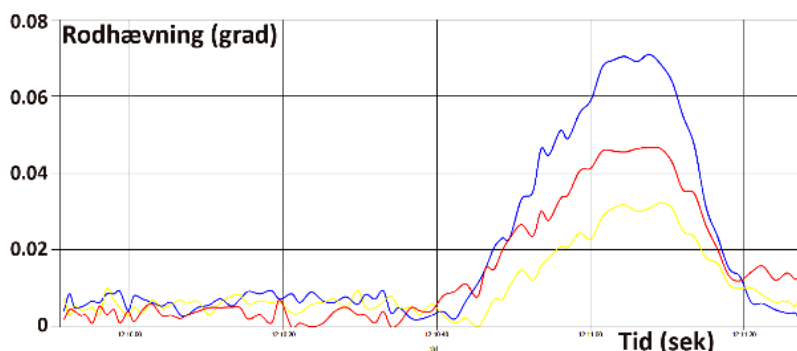


Figur 5 (t.h): Rodbevægelser i støtterødderne medfører en kraftig dannelse af reaktionsved, som giver ovale og asymmetriske rodtværsnit.

Figur 6: Rodbevægelsesmålerne sættes på rødder eller rodanløb med to skruer og nulstilles før påbegyndt måling.

Ideelt set, bør man altså med trykluft eller en håndskovl som minimum fritlægge den mest kritiske målte rod, således at arkitekturen af roden kan indgå i tolkning.

Figur 7: Rodbevægelserne fra 3 målere fra demonstrationsmålingen i Sorgenfri. Det ses at de tre målere viser forskellige hældninger. Høj bevægelighed kan skyldes råd, men det kan også skyldes rodarkitekturen. Se teksten.



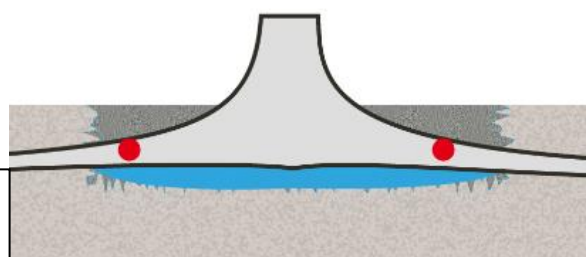
Løsning af rodsystem eller rodkage?

Man skal også være opmærksom på, om træet kan have fået sit rodsystem løsnet i tidligere storme (Nielsen 2011). Dette er næsten mere reglen end undtagelsen i mange skovtræer over en vis højde – dokumentation kan findes i Skovbykon.dk's artikel-samling. Jo mere man bevæger sig fra det beskyttede skovmiljø ud i det åbne land, jo mere søger træerne at tilpasse sig vinden og beskytte sig mod løsning af forankringssystemet – f.eks. stiger rod/top-forholdet i grove træk til det dobbelte! Hvor man med træer i et vindbeskyttet miljø må regne med løsnede rodsystemer (og endda løsnede rodkager), falder risikoen markant i solitærtræer. Solitære træer resistens mod rod- og rodkageløsning forudsætter dog dybgrundede rodsystemer – dvs. træer med dybtgående rødder. Hvor jorden indeholder et højt stående vandspejl eller en komprimeret underjord, udvikles rodsystemet fladt, idet der kompenseres for dybe rødder med ekstra tykke og fladstrygende støtterødder (figur 4A). Manglen på dybe rødder vil ofte medføre, at sådanne solitære træer får en løsnet rodkage (figur 8), og der danner sig en permanent brudflade under rodkagen (figur 9). I så tilfælde vil rodkagebevægelse være en vigtig registrering til indikation af, at rodbevægelserne optræder ved meget lave træk-momenter.



Figur 8: Alle træer på fladgrundet mosebund har rodkageløsning og står og vipper på en løsnet rodkage. Det kan også forekomme på en jord med komprimeret underjord. Her en birk på mosejord

Figur 9: Rodkageløsning kan ofte ikke ses overjordisk, men det har stor betydning for data i trækmålingsundersøgelser



Faktaboks: Elastisk versus plastisk belastning i rodsystemet

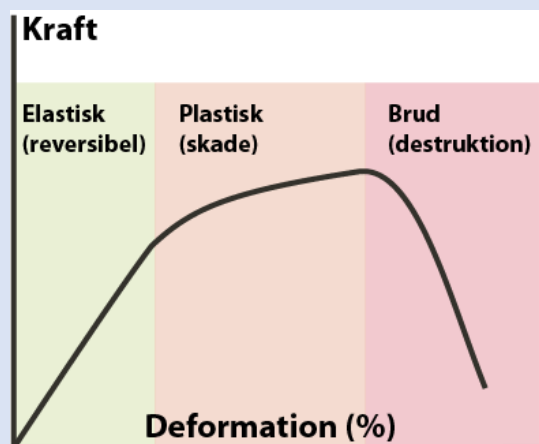
Når der i vedteknologisk forskning laves træk- og tryk-målinger på homogene træklodser for at bestemme veddets styrke, så tales der om et elastisk og et plastisk interval.

I det elastiske interval er belastningen reversibel, og kraftudviklingen er nogenlunde lineær over veddets deformation. Der er proportionalitet. Det betyder frem for alt, at belastningen kan fjernes, og træklodsen vender tilbage til den oprindelige og uskadede form.

Trækkes eller trykkes der videre ind i det plastiske område, begynder der at opstå brud på træfibre eller sammenhængen mellem træfibrene, men træklodsen er stadig ubrudt. Den bliver dog permanent deformeret i en vis grad. Overgangen mellem det elastiske og det plastiske interval er altså en kritisk grænse for belastning og formændring. Øges belastningen videre, øges også de permanente deformationer, indtil der opstår et brud.

Teorien bag den anvendte trækmålingsmetode er, at rodsystemet optræder som et homogent stykke træ, og at belastningerne i trækmålingen holder sig indenfor det "elastiske" interval.

Det antages altså, at sammenhængen mellem kraft og rodsystemets bevægelse er lineær samt at belastningen er reversibel og uskadelig, når der trækkes op til maksimalt en rodhævning på 0.25 grad. Artiklen diskuterer denne forudsætning.



Figur D: Det elastiske og plastiske interval i belastningstests på homogene træklodser

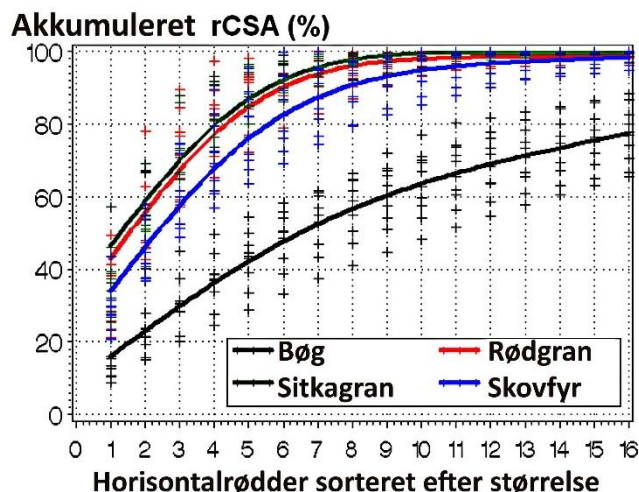
Elastisk belastningsinterval og proportionalitet?

En af forudsætningerne i den demonstrerede beregningsmetode er, at rodsystemet udgør et elastisk og homogent "emne" i intervallet op til 0.25° rodhævning, således at der er proportionalitet i kraft-rodhævnings-kurven. Se nærmere om teorien bag elasticitet og proportionalitet i faktaboksen.

Forudsat at rodsystemet kan opfattes som en elastisk, homogen enhed kan man ekstrapolere trækmomentet ved 0.06° rodhævning til en 0.25° rodhævning gennem lineær ekstrapolation. Dette er f.eks. nødvendigt, når det anvendte trækspil ikke er stærkt nok til at nå op på en 0.25° hævning. Ved demonstrationen i Sorgenfri opnåedes således kun rodhævninger på mellem 0.03 og 0.07° (figur 7).

Men denne forudsætning er nok i reglen en grov forenkling. Ved siden af spørgsmålene om rod- og rodka­geløsning, skal rodarkitekturen tages i betragtning. Rodsystemet indenfor stivheds­radiussen opdeler sig i mange rødder med meget variabel størrelse og stivhed.

Som eksempel vises forfatterens målinger på 10 større bøgetræer. Figur 10 viser for bøg, at de to største horisontalrødder gennemsnitligt er *dobbelt så store* som den 4. - 5. største rod. Imellem disse største rødder fandtes gns. 80 andre mindre rødder i samme radius.



Figur 10: Horisontale rødder i 50 cm radius fra stammemidte i 14-25 høje træer ordnet efter største rod til venstre på X-aksen med aftagende rod­størrelse mod højre. Y-aksen viser den akkumulerede "rodmasse". Alle kurver er gennemsnit af 10 træer.

Røddernes horisontale fordeling er også asymmetrisk, idet 40% af horisontalrøddernes biomasse fandtes i den "største" kvadrant, mens kun 15% af røddernes biomasse fandtes i den midste kvadrant (figur 11). En del af asymmetrien kan skyldes tilpasning til den fremherskende vindretning. (Det bør nævnes at solitære træer i reglen har en bedre symmetri grundet biomekanisk tilpasning, men aldrig i nærheden af perfekt symmetri).

Det ses heraf, at rodsystemet også tæt på træet danner en meget heterogen struktur, og der er stor forskel på røddernes størrelse og bøjninger under belastning. Selv om man udmærket kan tale om et elastisk belastnings-interval, skal forudsætningen om proportionalitet i moment/rodhævning anvendes med betydelig forsigtighed. Det afhænger meget af den pågældende rods tykkelse og arkitektur samt af bevægelsesmålerens placering.



Figur 11: Man kan analysere rodsymmetrien ved at beregne rodmassen i hver af 4. kvadranter. Data fra rødder i 50 cm radius fra stammemidte. Gns. af 10 semi-solitære bøgetræer i højden 14-18 meter.

Elasticitet, plasticitet og graden af solitærtilpasning

Jo mere et træ udsættes for konstant hård vind, jo mere tilpasses og styrkes rodsystemet. Rodsystemet ændres både anatomisk, morfologisk og i biomasse. Stærkt eksponerede solitærtræer har en meget mere homogen stress-fordeling i rodsystemet og dermed en højere kritisk belastningsgrænse.

Forfatteren har flere gange oplevet pinen ved komplet trækmåling på solitærtræer, som efter en stammehældning på 45-50° fra lodret stadig ydede modstand med det maksimale moment-niveau. Resultatet har i reglen været, at jeg "opgav" efter en times pinefuldt arbejde ved træksplet, og bardunrødderne måtte kappes med en økse for at få træet ned. Plasticiteten i solitære træer er altså meget meget større end ved vindbeskyttede træer (figur 12). Ved skovtræer falder træet af sig selv ved en hældning på omkring 30-40 grader fra lodret.

Det er derfor vigtigt at være opmærksom på graden af vindeksponering! Dybkronede, fritstående træer er ikke nødvendigvis tilpasset stærk vind – f.eks. ikke hvis det omgives af høje træer eller bygninger. Dette har betydning for, hvor homogen stress-fordelingen (og dermed elasticiteten) er i rodsystemet.

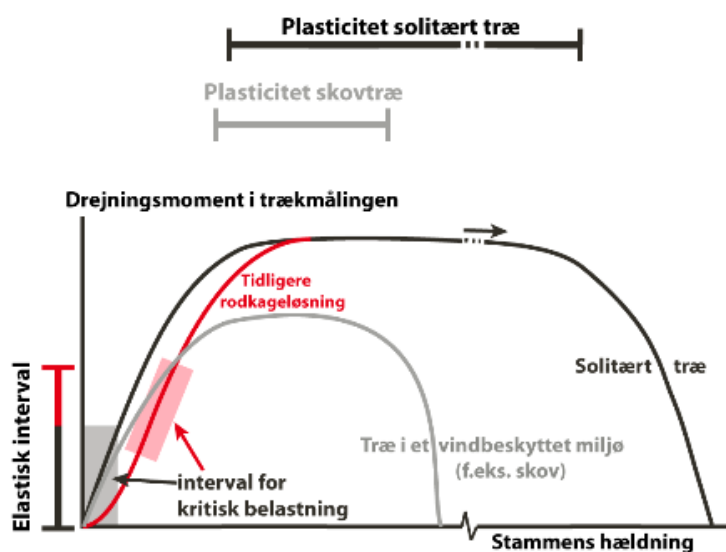
Som en vigtig krølle på emnet bør nævnes, at solitærtræer med tidligere stormskader og rodkageløsning, ofte kan yde samme maksimale moment som uskadte træer, men det moment, som skal tilføres for at udløse nye skader (kritisk belastning), er højere end i et uskadet træ (figur 12).

Beregning af træets vindbelastning

Alle de hidtil diskutererede emner handler om tolkning af forankringsmålingen. Men i figur C (faktaboksen) sættes forankringsmomentet i relation til en beregnet vindbelastning af kronen. Faktisk er denne beregning i høj grad præget af en række subjektivt ansatte parametre.

Mens kronens tværsnitsareal kan bestemmes nogenlunde præcist, indgår der en række variable i beregningen, som kræver et betydeligt kendskab til meteorologisk/fysisk forskning for rimelig justering.

Det drejer sig f.eks. om vindprofilen. Vindhastigheden stiger eksponentielt med stigende højde over jorden og beskrives i en logaritmisk formel, hvor det foran liggende landskabs "ruheds-faktor" indgår som en vigtig faktor. Over en lav græsplæne er der ringe modstand og turbulens, hvilket giver en stejl vindprofil. Vinden over et landskab med små træer og buske bremses af stor vindmodstand tæt på jorden, hvilket danner



Figur 12: Plasticiteten (og stormstabiliteten) er meget højere i solitære træer end i skovtræer. Den elastiske (kritiske) grænse i trækmålingen afhænger dog i høj grad af evt. tidligere stormskader

stærk jordnær turbulens, og dette medfører et mere flad vindprofil. Også bygninger og stærk topografi kan enten bremse eller kanalisere vind til det pågældende træ, hvilket ikke altid er let at vurdere.

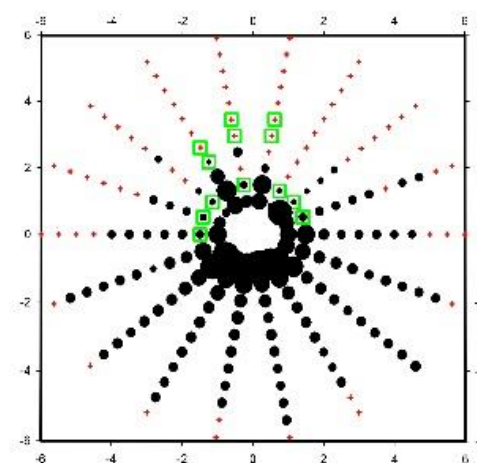
En anden vanskelig faktor er kronens tilpasning med stigende vindhastighed. Grene, kviste og blade ensrettes tiltagende med stigende vindhastighed, og herigennem formindskes kronens angrebsflade med stigende vindhastighed. Jeg kan ikke gennemskue, om dette forhold tages i betragtning i metodens beregningsmodel.

En tredje kvalitativ faktor er forekomsten af turbulenser. En *turbulensfaktor* indgår i beregningerne af vindbelastningen ved en vindstyrke på f.eks. 27 m/sek. Men hvordan værdisættes den? I mindre storme optræder vinden næsten altid med kraftige jordnære turbulenser, som endda kun rammer dele af store løvtrækroner. I ekstreme orkaner kan det laminare vindfelt være så kraftigt, at det når helt ned til jorden og rammer hele kronen med den gennemsnitlige vindhastighed. Vurderingen af turbulensfaktoren er altså også en meget kritisk faktor.

Konklusion om trækmotoden

Når metodens ophavsmænd således ender med at lægge forholdet mellem vindbelastning og forankringsmåling op i et skema som i figur C (faktaboksen), ligger der altså en lang række subjektive valg af vind-parametre samt subjektivt valgte placeringer af rodbevægelses-målere til grund. Jeg stiller mig derfor ret kritisk overfor præsentation af beregningerne til grønne, hvide og røde felter, som i figur C.

Dette betyder IKKE, at jeg forkaster metoden, for de frembragte data kan kvalitativt vurderes i samspil med simple undersøgelser af røddernes arkitektur. Personligt ville jeg også altid gentage trækmålingerne i mindst 3 retninger, og forskellene mellem de tre trækforsøg vil ofte kunne fortælle noget om rødderne i forskellige retninger. Kurverne i figur C giver altså ikke et objektivt svar på spørgsmålet om råd i rødderne, men yder et bidrag til tolkning af træet.



**Figur 13: Alternativ til trækmåling:
Bestemmelse af rodråd med
impulstomografi. Rød prik = målepunkt.
Størrelse på sort prik = styrke af
signaloverførsel. Grøn firkant =
kæmpeporesvamp. Kilde: SkovByKon.**

Alternativer til trækmåling

Et andet af metodens problemer er mangel på plads og mangel på egnede anker-træer til forankring af trækspillet i de rigtige retninger. I demonstrationen i Sorgenfri brugtes en traktor som anker. Men der skal også være plads til træ i alle retninger.

Forfatteren anvender i reglen to alternative metoder til test af røddernes sundhed. Med en impulstomografisk undersøgelse i et radiale koordinat-net rundt om træet kan man f.eks. fastslå, når rødder "er spist" af kæmpeporesvamp



**Figur 14: Resistografmåling på rødder til kontrol af
svækkelse og råd**

(fig 13). Den anden metode er resistograf-målinger på horisontalrødderne. Med denne metode fjernes 5-20 cm jord med håndskovl ned til røddernes overflade, så røddernes sundhed kan måles med resistograf (fig 14.). Disse metoder i reglen billigere, teknisk lettere at anvende og beskrevet i Grønt Miljø 8/14 (se grontmiljo.dk eller skovbykon.dk)

Tak

Tak til Harald Smit og Peter Müller for dialog og tilsendt materiale og tak til Kristin Seybold for at organisere demonstrationen.

Litteratur

Detter, A / Rust, S. (2013): Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen. Jahrbuch der Baumpflege 2013, p. 87-100.

Nielsen, CCN (1990): Einflüsse von Pflanzenabstand und Stammzahlhaltung auf Wurzelform, Wurzelbiomasse, Verankerung sowie auf die Biomassenverteilung im Hinblick auf die Sturmfestigkeit der Fichte, Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, 100, J.D. Sauerländer's, Frankfurt am Main

Nielsen, CCN (2011), Træers forankring er meget mere dynamisk og omskiftelig end hidtil antaget. Skoven 43(3), p. 137-139.

www.baumstatik.de