

Figur 1. TRE FØRSTE FORANKRINGSKOMPONENTER
 1. Rodkagen med vægt og kohæsjon.
 2. Støtterødderne som laver en bred rodplade og forstærker de to andre komponenter med en længere 'vægtstang'.
 3. Trækrødder som binder rodkage og rodskive i jorden.

Træernes skjulte halvdel II

Den ideelle rodstruktur

Mindst fire horisontale støtterødder. En intakt pælerod. Mange dybe og tætte sænkerødder. Symmetri i horisontalrødderne.

Af Christian Nørgård Nielsen

De grove rødders funktioner er primært at forankre træet i jorden og skabe et skelet som bærer af de vand- og næringsoptagende finrødder. For at opnå det, skal man - groft sagt - have mindst fire horisontale støtterødder, gerne en intakt pælerod, mange dybe og tætte sænkerødder og symmetri i horisontalrødderne.

Forankring af træet

Hvordan et rodsystem forankrer træet har været genstand for en hel forskning i flere årtier. Forankringens fysik baseres på fire forankringskomponenter:

1. Rodkagedannelse
2. Støtterødder
3. Trækrødder
4. Belastningshomogenitet

Det er faktisk lykkedes tre forskere (herunder forfatteren) at måle og kvantificere betydningen af disse komponenter i gran og lærk. Det giver derfor god mening at opdele og forstå træets forankring i disse komponenter.

Rodbagen

Rodbagen af rødder og jord er vigtig for skovtræer fordi den bidrager med op til 60% af træets samlede forankringsstyrke (figur 1). Vægten af rodkagen kan let udgøre 1-2

TRÆERNES SKJULTE HALVDEL

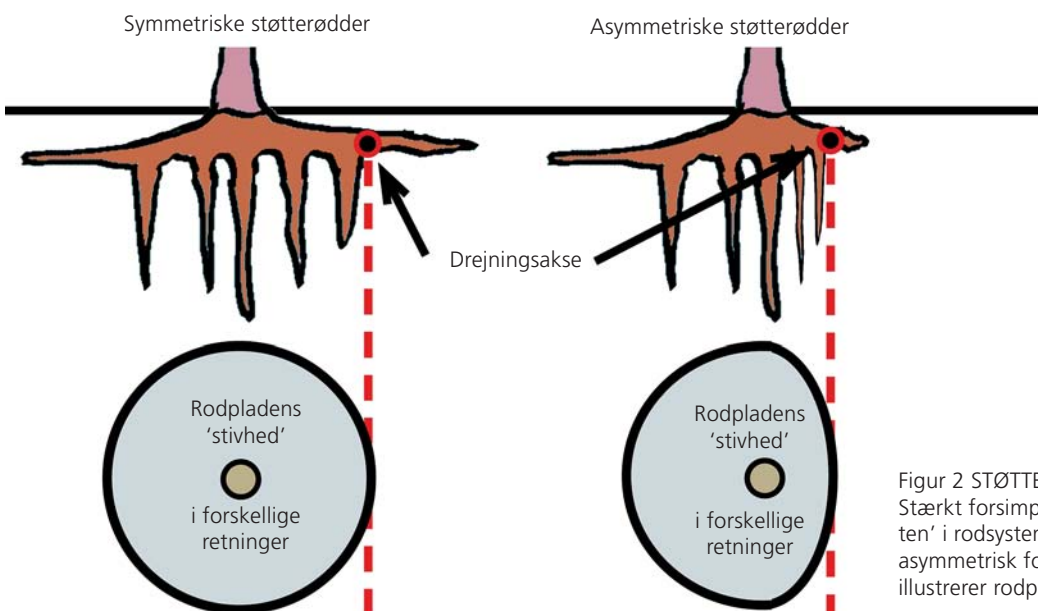
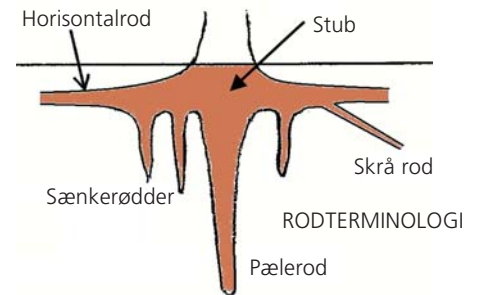
Grønt Miljø sætter i en artikelserie af Christian Nørgård Nielsen fokus på træernes rødder, deres funktioner, struktur og vækstøekologi. Efter sidste nummers introduktion ses her på hvad en god rodstruktur er, og hvilke funktioner roden tjener. Det er forudsætningen for de følgende artikler om hvordan rodstrukturen påvirkes og hvilke fordele og ulemper forskellige rodtyper har.

tons og i gamle løvtræer op mod 4 tons. Også kohæsjonen (sammenhængskraften) mellem jorden i og uden om rodkagen spiller en væsentlig rolle. I solitære træer spiller rodkagen dog en væsentlig mindre rolle.

Støtterødderne

Støtterødderne er meget vigtige fordi de giver træet en stiv 'plade' at stå på. Den stive rodplade opstår ved at støtterødderne bliver meget stive tæt på stammen og først begynder at bøje eller brække et stykke længere ud ad roden hvor roden bliver tyndere. Stærke støtterødder skubber rodsystemets drejningsakse udad og definerer derved rodpladens kant.

I fysiske termer skaber støtterødderne en stærk 'arm' i forankringsmomentet (drejningsmoment = kraft x arm). Hvis støtterødderne er svage eller manglende i en bestemt retning, bliver rodpladen svag i denne retning (figur 2).



Figur 2 STØTTERØDDER

Stærkt forsimplet skitsering af 'støtterødder' i rodsystemer med henholdsvis symmetrisk og asymmetrisk fordeling af støtterødder. Den grå cirkel illustrerer rodpladens stivhed i forskellige retninger.



Figur 3. Rodkagen fra en væltet ædelgran. Bemærk de døde og rådne sænkerødder.

Ud over at støtterødderne i sig selv udgør en vigtig del af forankringen, har de også en betydelig supplerende virkning på rodkagekomponenten. En stor rodkagevægt er mindre effektiv hvis rodsystemets drejningsakse ligger tæt på stammen (figur 1).

3. Trækrødderne

Trækrødderne - der også kaldes bardunrødderne - kan forstås som de mindre rødder som 'sømmer' rodpladen og rodkagen fast til undergrunden (figur 4). Enhver hovedrod fungerer naturligvis både som støtterod inden for 'rodpladen' og som trækrød uden for 'rodpladen' - alt efter hvilken retning vinden påvirker træet.

Man kan dog ikke sige at gode støtterødder medfører gode trækrødder og vice versa. Selv om vi betragter forskellige dele af den samme rod, er styrken af de to forankringskomponenter i høj grad uafhængige af hinanden og styret af forskellige faktorer. Til gengæld er der en stærk vekselvirkning mellem støtte-

og trækrødder som gør at de forstærker hinanden (figur 1).

Sprængte rødder

Når vinden river i toppen, kan trækrødderne rives over. Det har stor betydning i praksis, men det er svært at bedømme hvor alvorlige skaderne er. Et træs forankring ødelægges stort set aldrig i ét stærkt vindstød. Derimod sprænges rødderne i reglen én efter én i en længere proces som ofte kan strække sig over flere storme og flere år. Denne proces beskrives også med begrebet belastningshomogeniteten.

Ældre træer har tusindvis af

trækrødder som sprænges mere eller mindre gruppevist i takt med at de bliver belastede. Jo flere rødder, som på grund af rodsystemets struktur belastes på samme tid, desto mere effektivt udnyttes røddernes styrke.

Hvis alle trækrødder blev spændt homogent og på samme tid (som i figur 4), så ville træet opnå en meget stor styrke fra trækrødderne. Hvis rødderne bliver spændt én efter én i takt med at andre rødder sprænges, så bliver forankringen mindre effektiv. Man kan sammenligne trækrøddernes effektivitet med tovtrækning:

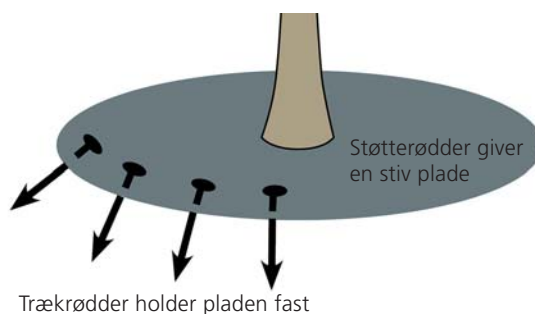
Hvis alle på holdet trækker i takt, er holdet stærkt. Hvis alle trækker hver for sig og ukoordineret, så er holdet svagt.

Afhænger af stedet

De fire forankringskomponenter er ikke ens for alle voksesteder. Kvantitative data har vi kun fra skovtræer, men forfatterens kvalitative iagttagelser og skøn over forankringsmekanismernes relative betydning i landskabelige solitært-ræer er gengivet i tabel 1.

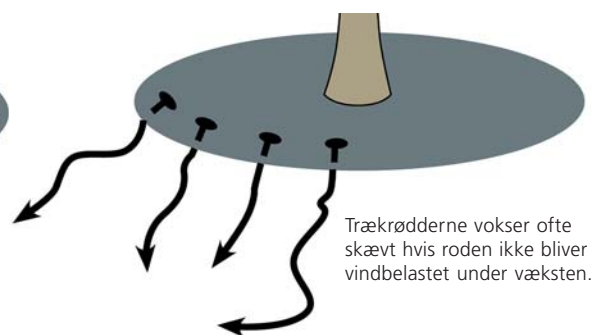
I skovtræer hvor den biomekaniske tilpasning er langt ringere end i de solitære landskabstræer, er belastningsho-

Figur 4. SAMSPIL MELLEML STØTTE- OG TRÆKRØDDER



Figur 5. SPÆNDING OG STYRKE

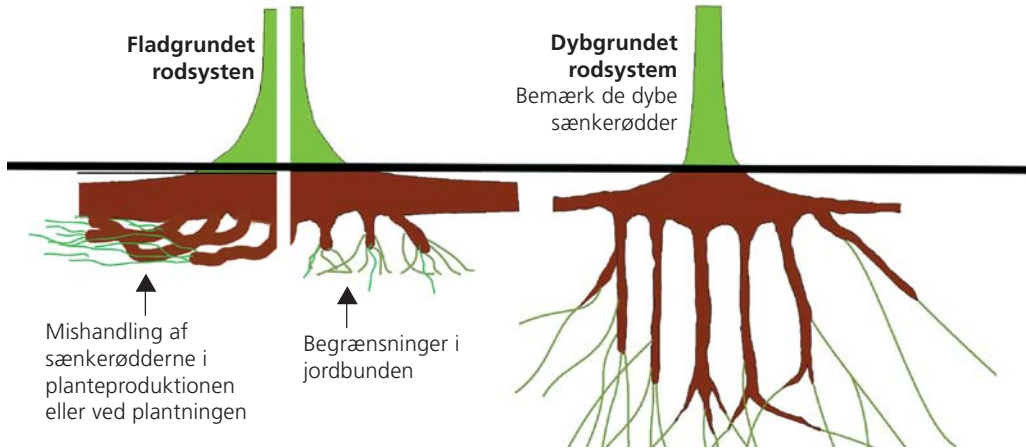
Når trækrødderne ikke spændes synkront, sprænges de også asynkront og den samlede styrke formindskes.



Figur 6. Dybtgrundede versus fladgrundede rodsystemer - med vægt på hvor dybt vertikalerødderne får lov at udvikle sig. Roddybden afhænger både af jordbund, træart samt eventuelle deformationer af rodsystemet.

Forankringskomponent	Skovtræer	Solitære træer
Rodkagen	50-60%	~ 10-20%
Støtterødder	25-30%	~ 15-20%
Trækrødder	10-25%	~ 60-75%
Belastningshomogenitet	lav	høj

Tabel 1. Hvilken komponent der betyder mest, kommer an på voksestedet. I skoven, hvor der er meget læ, er rodkagen afgørende, mens støtte- og trækrødder ikke udvikles særligt meget.



FAKTA OM FINRØDDER

Det meste vand og alle næringsstoffer optages gennem finrødderne. Finrødderne har en diameter på mellem 0,1 og 2 mm og er *ikke* forveddede. Finrødder er altså urteagtige og lever oftest kun få uger eller måneder. Finrødder med stabil forsyning af vand kan dog leve flere år.

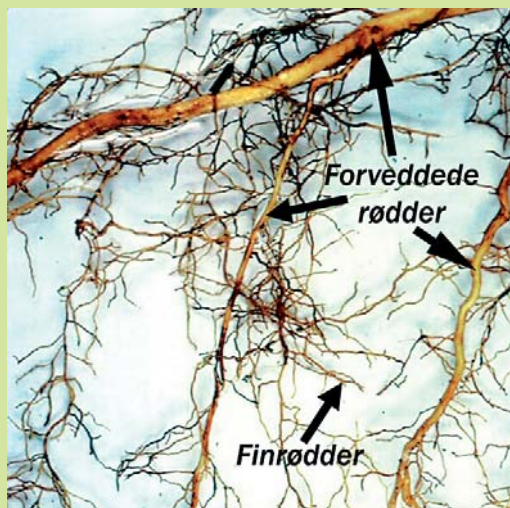
Groft sagt udskiftes alle et træs finrødder gennemsnitligt én gang årligt. Et gammelt egetræ i skoven producerer derfor mellem 100 og 500 kg nye finrødder årligt, hvilket nærmer sig stammens tilvækst. Stressede træer bruger endnu mere energi på at vedligeholde deres finrodssystem.

De udvalgte finrødder som lever længe og vokser i tykkelsen, danner vedceller i deres første årring og træder derved ind i divisionen af forveddede rødder (figur 7).

Finrødderne opdeles i 'langrødder' og 'kortrødder'.

Langrøddernes funktion er primært at vokse i længden og indtage nye rodtrum samt at være bærer af kortrødderne. Diameteren er ret stor (0,5-2,0 mm), og rodspidsen har aldrig symbiose med mykorrhiza.

Kortrøddernes funktion er at optage vand og næring. De er meget tynde (0,05-0,5 mm), i reglen kun 0,5-3 cm lange, har rodhår i starten og senere mykorrhizabelægning (figur 8). Da kortrødder er små og ikke vokser efter de har fået mykorrhiza, udtømmer de hurtigt de jordporer hvor de er dannede, hvorefter kortrodden dør. Nye kortrødder dannes hele tiden i nye porer. Kortrødderne mistes næsten altid når rødderne graves op, f.eks. ved omplantning.



Figur 7. Forveddede rødder og finrødder. Bemærk at alle finrødderne er 'lang-rødder'. Kilde: Shigo CD-set.



Figur 8. 'Kortrødder' blandt finrødderne er få cm lange og bliver ofte belagt med hyfer af ectomykorrhiza svampe. Det giver dem et bamseagtigt udseende. Kilde: University of Edinburgh.

mogeniteten i trækrødderne særlig lav og rodkage og støtterødder har absolut størst betydning. I fritstående træer i det åbne landskab (herunder parker og kirkegårde) sker der dog en biomekanisk tilpasning af træernes trækrødder, så de i modsætning til figur 5 har langt mere rette og lige trækrødder, ligesom rødderne er meget længere og tykkere end i skovtræer. Der er derfor ingen tvivl om at trækrødder-komponenten har en meget større betydning i solitærtræer end i skovtræer.

Roden som vandhenter

Det strukturelle, forveddede rodsystems anden funktion er at være det permanente skelet hvor finrødderne løbende udskiftes. Finrødderne som optager det meste vand og alle næringsstoffer, lever forholdsvis kort og der sker en konstant fornyelse af finrødderne (se boksen).

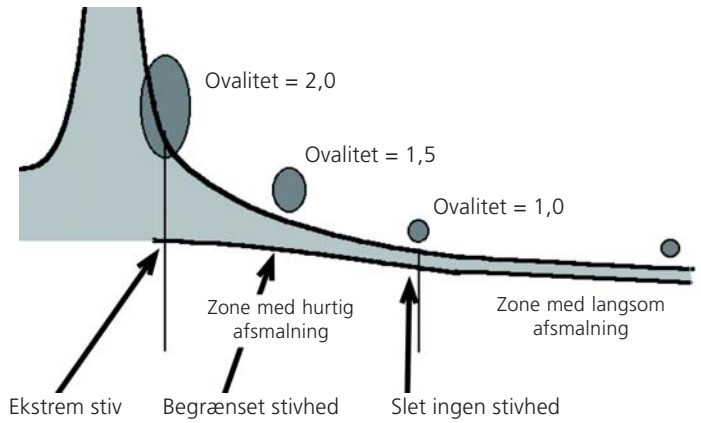
Da finrødderne sjældent bliver særlig lange (typisk 10-30 cm), er det altså udbredelsen af det forveddede, strukturelle rodsystem som afgør hvor stort et jordvolumen træet kan afsøge efter vand og næring.

Hvis ikke træets rødder bliver begrænsede i udbredelsen, vil et træ automatisk søge at udvikle rodsystemets kapacitet så det sikrer en gennemsnitlig balanceret forsyning af kronen med vand og næring. På en tør og fattig sandjord danner et træ således op mod fire gange så mange små- og finrødder som på en fugtig og næringsrig jord. Derved bestræber træet sig på at sikre en balanceret forsyning under 'normale' gennemsnitlige klimaforhold. De fleste træarter optimerer altså deres struktur og rodmasse efter de fremherskende vandforsyningsforhold og er altså *ikke* optimeret til stærke tørkesituationer.

Generelt spiller jordbunden og træarternes evne til dyb rodudvikling en stor rolle for træets vandbalance i tørkeperioder (figur 6). I forholdsvis 'naturlige' jorder sker udtørringen af jorden altid først i de øverste lag og først senere i de dybere jordlag. Derfor spiller det en stor rolle om træet har udviklet dybe pæle- og sænkerødder hvorfra 'buske' eller



Figur 9. Sænkerødder fra bøg. Nogle er døde og har mistet finrødderne (til venstre). Andre er endnu i live og i stand til at udvikle finrødder i stor dybde (til højre). De døde sænkerødder blev dræbt på grund af rod-kageløsning i stormen 1999, men træet væltede først i 2005.



Figur 10. Støtterøddernes stivhed aftager meget hurtigt jo længere man bevæger sig væk fra rodbasis. Det skyldes både aftagende diameter og ovalitet på roden. Det ovale tværsnit opstår gennem dannelse af reaktionsved som svar på bøjebelastningerne (biomekanisk tilpasning).

'fingre' af finrødder kan udvikles (figur 9 og 13). Også i bymiljøet, hvor den naturlige vandtilførsel ofte er hindret eller hæmmet af belægninger, kan træets evne til at hente vand i dybere jordlag spille en stor rolle for træets sundhed.

Stivhed og symmetri

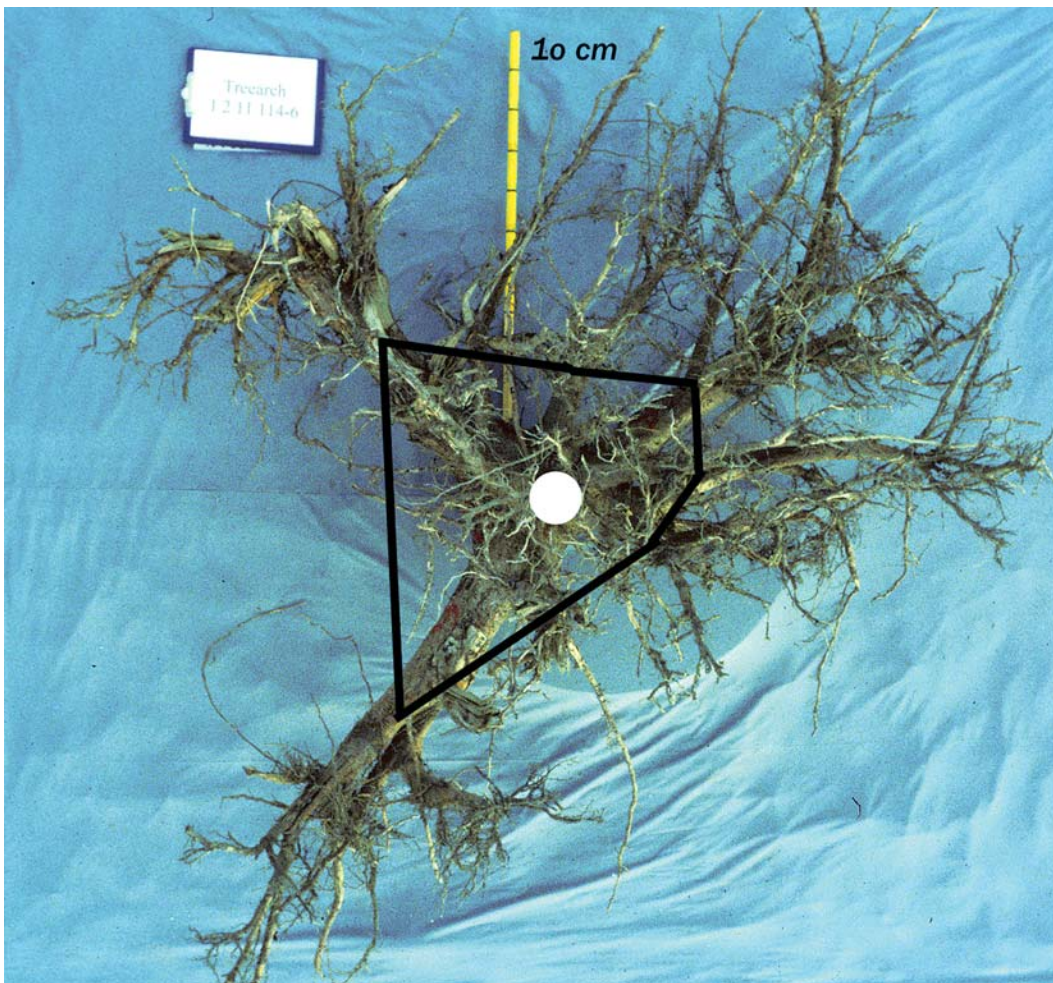
For på basis af ovenstående redegørelse at kunne udlede kravene til et godt og funktion-

nelt rodsystem, må vi først bedre forstå støtterodens bøjestykke.

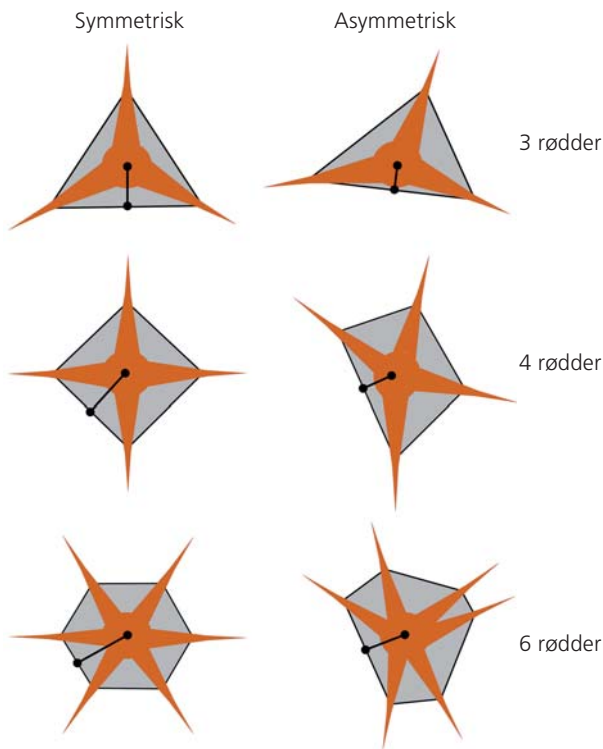
Støtterodens 'stivhed' er afhængig af rodens diameter i fjerde potens, og der er derfor et voldsomt fald i stivhed fra rodens basis og udefter (figur 10). Forgrening af støtteroden medfører at diameteren falder meget pludseligt og støtterøddernes forgreninger bestemmer ofte rodpladens ydre grænse og rodsystemets drejningsakse (se f.eks. figur 11).

Støtterøddernes diameter aftager også jo flere støtterødder træet danner. Hvis antallet af støtterødder bliver større end 7-8, stiger symmetrien ganske vist, men de enkelte rødders stivhed aftager. Hvis der - som hos nogle løvtræarter - optræder mere end 12 strukturelle støtterødder, så bliver støtten temmelig svag fordi alle støtterødder er ret tynde. Til gengæld stiger homogeniteten i trækrødderne - dvs. komponent 3 og 4.

Det optimale antal støtterødder ligger altså mellem 4 og 8. Som det illustreres i figur 12 bliver rodpladen altid meget svag i mindst én retning, hvis der er færre end 4 støtterødder. Det er især tydeligt, jo mere asymmetrisk rodsystemet er. Efter at have studeret og målt hundredvis af rodsystemer, kan forfatteren fastslå at perfekt symmetriske rodsystemer aldrig dannes i naturen. Man må derfor gå ud fra en vis asymmetri som det normale, men samtidig forsøge at undgå for meget asymmetri fordi det forringer træets funktionalitet.



Figur 11. Foto af et cirka 25 år gammelt sitkagran-rodssystem. Den sorte kant viser forfatterens vurdering af støtterodseffekten (stiv rodplade). Træets rodsystemer er aldrig perfekt symmetriske.



Figur 12. Illustration af hvordan antallet af støtterødder og deres symmetri påvirker støtterods-komponenten i forskellige retninger.

Også for trækrøddernes vedkommende er det meget vigtigt at rødderne er nogenlunde symmetrisk fordelt. Et telt uden barduner i den ene side giver jo heller ikke nogen god nattesøvn.

De vertikale rødder - altså pæle- og sænkerødder - spiller også en meget stor rolle for træets langsigtede funktioner. Vertikalrødderne har dels betydning for rodkagedannelsen, dels betydning for vandoptag i tørkeperioder.

Rodkagens størrelse afhænger meget af hvor dybe, hvor mange og hvor tætsiddende vertikalrødderne er. Da sænkerødderne sidder på horisontalrødder, vil en dårlig symmetri i horisontalrødderne stærkt formindske vægten af jord i rodkagen, fordi der opstår 'huller' uden sænkerødder hvor jorden ikke kan fastholdes.

Vertikalrøddernes antal og dybde er meget vigtige for træets vandforsyning i tørre perioder hvor de overfladiske horisontalrødder kommer til kort. Bemærk hvordan pæleroden i figur 13 ender med at dele sig voldsomt op i mange tynde rødder hvorfra mange finrødder hurtigt kan dannes.

Som det ses i figur 13 kan en intakt pælerod være særdeles vigtig for at opretholde træets vandbalance i tørre perioder, fordi den bringer finrødder

ned i dybere jordlag med mere vand. Men pæleroden er også i høj grad med til at afstive stammen, og der er påvist en klar sammenhæng mellem stammens rethed og pælerodens størrelse. Desværre mistes pæleroden ofte gennem omskolingerne i planteskolerne.

Det ideelle rodsystem

På basis af den ovenstående gennemgang kan man formulere nogle få, men meget vigtige

krav til en god og funktionel rodstruktur.

A. Mindst 4 horisontale støtterødder. Med kun 3 støtterødder vil den stive rodplade altid have mindst én svag retning, hvor afstanden mellem stammen og rodsystemets drejningsakse bliver meget lille. Træet vil derfor altid være følsomt over for vindstød fra den modsatte side, med fare for rodløsning og brækkede eller flækkede rødder.

Hvis antallet af støtterødder overstiger 7-8, aftager rodpladens stivhed i alle retninger fordi rødderne alle bliver tyndere og stivheden afhænger af roddiameteren i fjerde potens. Et stort antal horisontale hovedrødder styrker til gengæld rodsymmetrien og trækrods-komponenten ganske voldsomt (som i mange arter med hjerterodssystemer).

B. En intakt pælerod er hensigtsmæssig. Pæleroden kan være meget vigtig for vandforsyningen og understøtter en god stammeform.

C. Et stort antal dybe og tætte sænkerødder. Som vist både i figur 1, 6 og 13 er det en forudsætning for at danne en tung og stabil rodkage at vertikalrødderne er dybe og optræder i stort antal. Hvis tætheden af sænkerød-

derne ikke er stor nok, vil jorden imellem rødderne gradvist falde af når rodsystemet begynder at vippe i løsningsprocessen. Sænkerødderne er også meget vigtige for vandforsyningen i tørre perioder.

D. En høj grad af symmetri i horisontalrødderne. Som det udførligt er illustreret i figur 3 og 12, vil effektiviteten af alle fire forankringskomponenter blive alvorligt svækkede, hvis ikke de horisontale hovedrødder fordeler sig med en rimelig god symmetri. Hvis vinklen mellem støtterødderne er 120 grader, forringes rodpladens stivhed i denne retning til halvdelen (cosinus til den halve vinkel) og en yderligere lille stigning til 140 grader forringer rodpladen til en tredjedel i den givne retning.

Disse strukturelle forhold varierer naturligt mellem træarter, men påvirkes desværre også ofte negativt af den måde vi dyrker og planter vores træer på. Forskelle mellem træarter og positive og negative dyrkningseffekter behandles i de følgende artikler. □

SKRIBENT

Christian Nørgård Nielsen er forstkandidat, dr.agro. Han har i mange år forsket i træer og skovens økologi på Skov & Landskab, Københavns Universitet, og har nu eget rådgiverfirma, SkovByKon.dk. Skribenten har taget de billeder hvor ikke andet er anført.



Figur 13. Længden, antallet og tætheden af vertikale rødder (pæle- og sænkerødder) afgør om et rodsystem kan fastholde en stor og tung rodkage eller ej. Denne almindelige ædelgran havde en meget kraftig og dyb pælerod, men næsten ingen sænkerødder og kunne derfor ikke skabe og fastholde en tung rodkage.