

#### 4.2.4 Belasting door boomwortels

In de Nederlandse binnensteden staan op veel locaties bomen direct langs kadeconstructies. Deze harde constructies vormen een beperking voor het wortelstelsel waardoor de boom minder goed kan ankeren en de kans op omwaaien groter wordt. De wortels in de grond kunnen tijdens een storm aanzienlijke belastingen op de kadeconstructie genereren. Daarnaast kan de wortelgroei in de loop der tijd ook extra belastingen veroorzaken. In deze paragraaf wordt een aanbeveling gegeven hoe kan worden omgegaan met deze belastingen. Daarbij dient het eigen gewicht van een boom beschouwd te worden als een permanente belasting. Afhankelijk van de strijklengte, kan de wind een belangrijke invloed hebben op de wortelbelasting tegen de kademuur. Windbelasting is variabel en dient beschouwd te worden als een veranderlijke belasting. De situatie van een omgevallen boom in relatie tot de verankering van de kadeconstructie dient als een bijzondere belasting in rekening te worden gebracht.

Door de aanwezigheid van bomen binnen de invloedssfeer van een kadeconstructie bestaande uit een enkelvoudig verankerde damwand is de kans van optreden van een of meerdere faalmechanismen groter geworden. We onderscheiden hierbij een toename van de belasting op de kade en eventuele verankering als gevolg van:

- eigen gewicht van de boom;
- expansiebelasting door het wortelstelsel op de kade of verankeringsconstructie;
- windbelasting op de boom die via het wortelstelsel naar de ondergrond wordt overgebracht;
- omwaaien van de boom waardoor een ontgrondingskuil ontstaat.

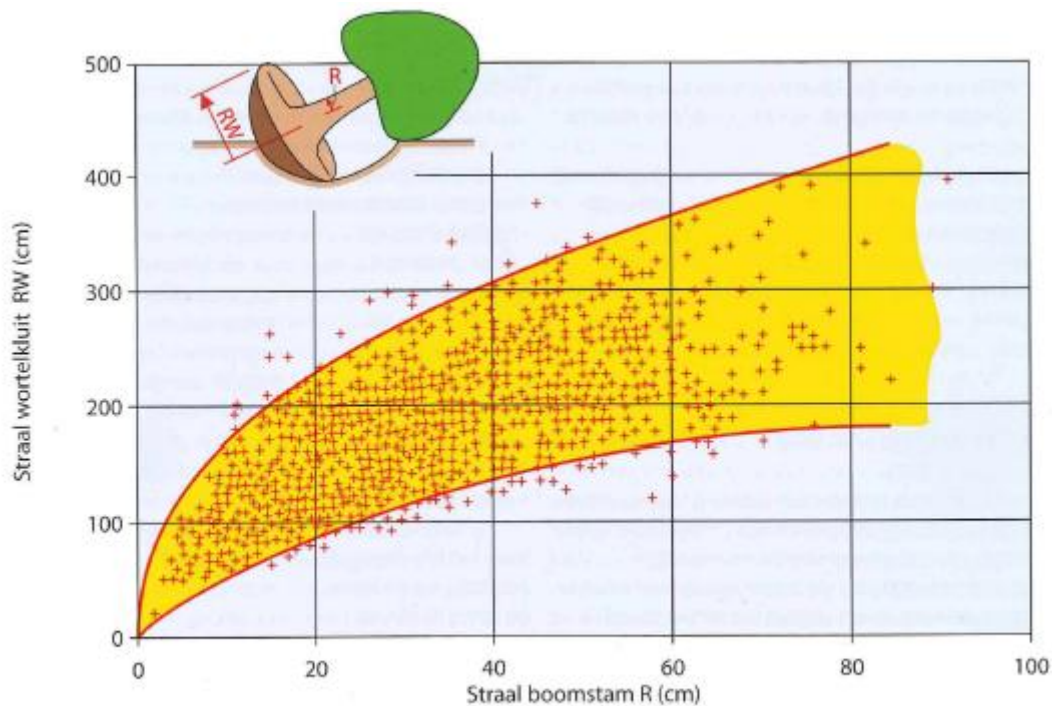
Daarnaast zijn een aantal aspecten van belang uit oogpunt van beheer en onderhoud. Met name de bereikbaarheid van een kadeconstructie voor inspectie en onderhoud kan relatief complex zijn door de aanwezigheid van bomen. Ook zijn de kosten voor het uitvoeren van onderhoudswerkzaamheden hoger. Daarnaast dienen vaak aanvullende voorzieningen als boomkransen of wortelbescherming in de kadeconstructie opgenomen te worden om bomen in stand te houden. In geval van renovatie of nieuwbouw wordt geadviseerd om bomen daarom op enige afstand van de kadeconstructie te plaatsen.

#### Kwantificering boombelasting

Voor het bepalen van het eigen gewicht en de windbelasting op de boom zijn de hoogte van de boom en de omvang van de kroon van belang. In tabel 12 is voor een aantal boomsoorten een aantal indicatieve grootheden opgenomen.

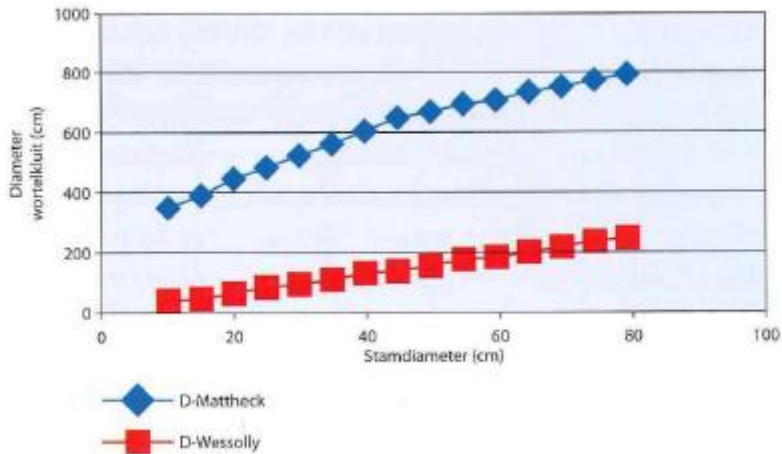
<i>Tabel 12: Indicatieve grootheden per boomsoort</i>		Eik	Linde	Populier
Boomhoogte	$h_b$	15 m	15 m	20 m
Kroondiameter	$d_k$	10 m	10 m	10 m
Stamdiameter	$d_s$	0,4 m	0,4 m	0,4 m
Stamhoogte	$h_s$	5 m	5 m	5 m
Kroonhoogte	$h_k$	10 m	10 m	15 m
Eigen gewicht	G	20 kN	15 kN	15 kN
Doorlatendheidsfactor	$C_w$	0.25	0.25	0.20

De overdracht van de gewichts- en windbelasting op de ondergrond vindt plaats via het wortelstelsel. Voor ieder type boom geldt dat het wortelstelsel bestaat uit een zogenaamd dragend en voedend deel. Het eerstgenoemde deel bestaat uit dikkere wortels, hieraan ontleent de boom zijn stabiliteit. Het tweede deel bestaat uit fijnere (haar)wortels en zorgt ervoor dat de boom wordt voorzien van stoffen die nodig zijn voor de groei. De omvang van beide delen van het wortelstelsel ligt niet exact vast. De ontwikkeling ervan is afhankelijk van een groot aantal factoren, zoals de boomsoort, de plaats en de diepte van het grondwater. Wortels van de meest voorkomende boomsoorten in Nederland ontwikkelen zich minder goed of helemaal niet onder de grondwaterstand.



Figuur 4-4 Relatie stamafmeting versus wortelkruit.

Naar de dimensies van een ontgrondingskuil bij omgevallen bomen zijn studies gedaan door Mattheck en Wessolly. Wat direct opvalt is dat Mattheck de dimensies van een ontgrondingskuil aanmerkelijk ruimer neemt dan Wessolly. Beide relaties zijn uitgezet in onderstaande figuur. Waar in dit geval de "waarheid" ligt, is lastig aan te geven. Voor oudere, maar vooral ook jonge bomen zit Mattheck te conservatief. Wessolly is mogelijk te optimistisch, omdat er nog een correctie moet worden toegevoegd voor de stamdiameter op maaiveld ten opzichte van die op 1,3 m hoogte. In overleg met een deskundige kan eventueel een aangepaste correctiefactor van 1,2 à 1,5 aangehouden worden, al naar gelang de boomsoort en het ontwikkelingsstadium van de boom. Voor bomen die zijn omgevallen omdat wortels tevens verrot waren, komt de lijn van Wessolly dicht bij waarnemingen in de praktijk. Hoewel de methode van Mattheck een overschatting geeft voor de relatief jonge en oude bomen wordt deze relatie veelal als bovengrens aangehouden. In de onderstaande figuur kan de diameter van de wortelkruit vastgesteld worden. De straal  $r_w$  van deze cirkelvormige doorsnede is gelijk verondersteld aan de helft van de diameter van de wortelkruit. Deze waarde dient door een boomdeskundige geverifieerd te worden.



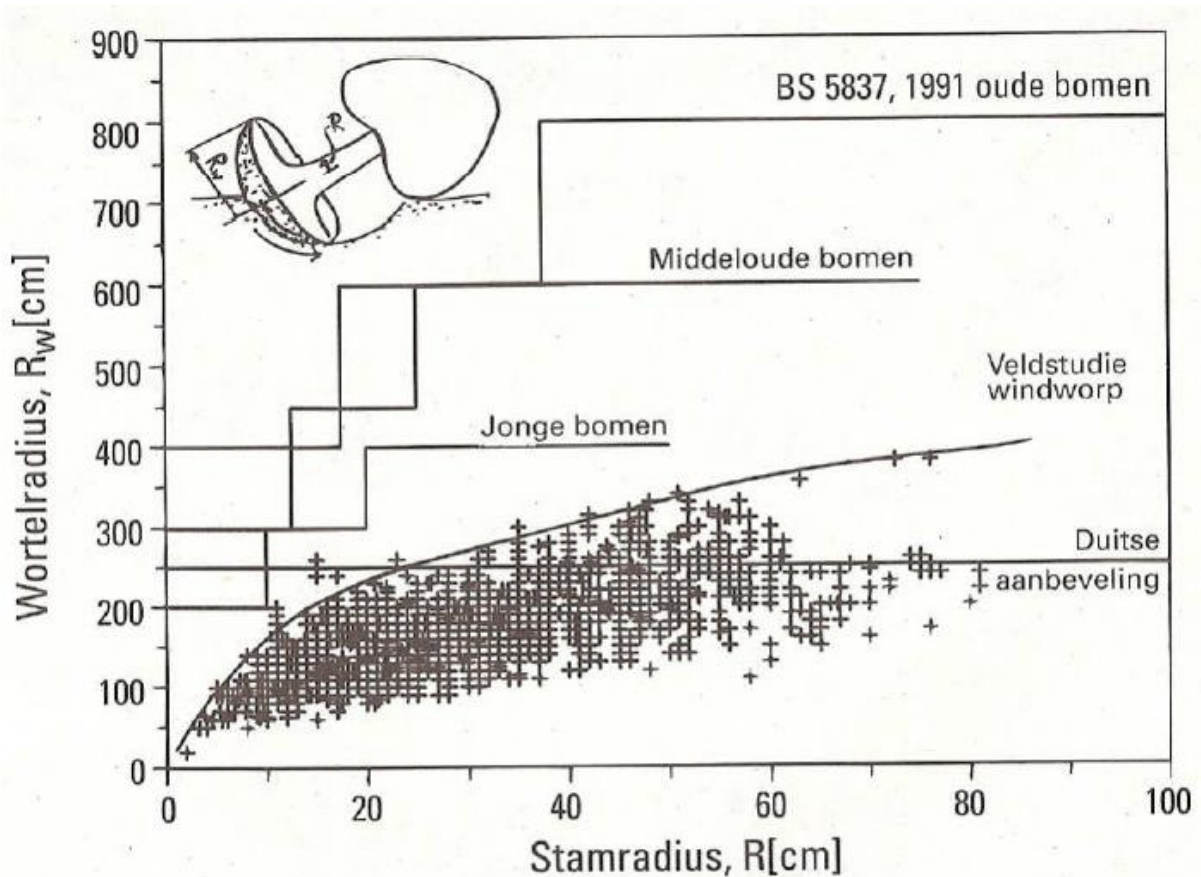
Aangenomen wordt dat het eigengewicht van de boombeplanting gelijkmatig wordt overgedragen door het dragende deel van het wortelstel, resulterend in een cirkelvormige bovenbelasting  $q$ :

$$q_{eg;rep} = \frac{G_{rep}}{\pi r_d^2}$$

En:

$$b_{eg} = \sqrt{\pi} r_d$$

Voor de schematisering van de damwandberekening mag deze cirkelvormige belasting worden vervangen door een even grote gelijkmatig verdeelde belasting die gelijkmatig is verdeeld over een rechthoekig oppervlak met zijden gelijk  $\sqrt{\pi} r_d$ . De belastingspreiding in de ondergrond kan worden bepaald conform de driedimensionale spanningspreiding van Boussinesq.



Figuur 127: Radius van de wortelplaat  $R_w$  uitgezet tegen de stamradius  $R$  die boven de wortelaanzet gemeten werd en de wortelradius volgens de Engelse norm BS 5837 die ook voor statische wortels geldt.

## Windbelasting

De grootte van de windbelasting wordt voornamelijk bepaald door de omvang, transparantie en de hoogte van de kroon en is een veranderlijke belasting. Voor de berekening van windbelasting op bomen zijn geen vastgestelde rekenregels voorhanden. Om deze reden wordt verwezen naar een in de praktijk toegepaste rekenregel voor het bepalen van de windbelasting op bomen:

$$Q_{w;rep} = c_w * A_{ref} * v_{m(z)}^2 * \rho_{lucht}$$

Waarin:

- $Q_{w;rep}$  = Resultante windbelasting
- $c_w$  = Doorlatendheidsfactor
- $A_{ref}$  = Frontaal oppervlak kroon
- $v_{m(z)}$  = Gemiddelde windsnelheid op hoogte  $z$
- $\rho_{lucht}$  = Soortelijk gewicht lucht

Deze windbelasting wordt naar de ondergrond overgedragen via een horizontale schuifkracht ter grootte van  $Q_w$  en een verticaal koppel(moment)  $M_w$ . Voor het verticale koppel(moment) geldt:

$$M_{w;rep} = Q_{w;rep} (h_s + 0,5h_k)$$

Waarin:

$M_{w;rep}$  = Koppelmoment

$Q_{w;rep}$  = Resultante windbelasting

$h_k$  = Kroonhoogte

$h_s$  = Stamhoogte

Afhankelijk van de buigstijfheid van de kadeconstructie en de veerstijfheid van de verankering zal de schuifkracht gespreid worden over een aan de hand van de wortelkluit te bepalen breedte. Middels een analyse van de herverdelingscapaciteit van de betreffende kadeconstructie kan inzicht verkregen worden in de mate van spreiding. Ter vereenvoudiging mag deze kracht ook direct worden vertaald in een toename van de te leveren ankerkracht door de aangrenzende ankers. Hierbij wordt aangenomen dat een boom in het midden tussen twee ankers is gepositioneerd en aan ieder aangrenzend anker de helft van de horizontale schuifkracht ( $0,5 Q_{w;rep}$ ) wordt toegerekend. De horizontaalkracht kan onder het maaiveld worden aangebracht, ter plaatse van de onderkant van het wortelpakket. Het verticale koppel  $M_{w;rep}$  op het maaiveld bestaat uit een drukkracht ( $Q_{v;rep}$ ) en een even grote trekkracht ( $Q_{v;rep}$ ) op onderlinge afstand  $x_{druk} + x_{trek}$ .

Voor de drukkracht wordt het zwaartepunt van de helft van het dragende deel van het wortelstelsel, met straal  $r_d$  ( $r_d \geq r_w$ ), als aangrijpingspunt  $x_{druk}$  aangenomen. Voor het aangrijpingspunt van de trekkracht, verder  $x_{trek}$  genoemd, kan niet zonder meer dezelfde redenering worden opgezet. Immers grond kan geen trek opnemen. Dit betekent dat de trekkracht moet worden geleverd door het grondgewicht dat aan dit deel van het wortelstelsel hangt. De omvang van deze grondmoot wordt bepaald door de meewerkende dikte ervan en door het volumiek gewicht van de grond. Het deel dat de trekkracht moet leveren is voor te stellen als een halve cirkel met straal  $r_t$  :

$$x_{druk} = 4r_d/3\pi$$

$$x_{trek} = 4r_t/3\pi$$

$$Q_{v;rep} = 0.5 \pi r_t^2 \gamma_s h_m$$

Waarin:

$Q_{v;rep}$  = Resultante trek/druk belasting (kN)

$h_m$  = Meewerkende breedte grondpakket (aanname 1,0 m)

$\gamma_s$  = Volumiek gewicht grond (kN/m<sup>3</sup>)

Met behulp van deze relaties kunnen  $Q_{v;rep}$  en  $r_t$  berekend worden. Vervolgens kan de strokenbelasting als volgt bepaald worden:

$$q_{druk;rep} = Q_{v;rep} / 0.5 \pi r_d^2$$

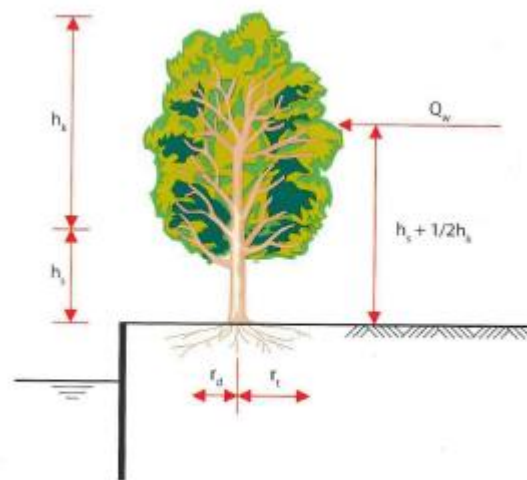
$$q_{trek;rep} = Q_{v;rep} / 0.5 \pi r_t^2$$

Waarin:

$$b_{druk} = 0.5 \sqrt{\pi r_d}$$

$$b_{trek} = 0.5 \sqrt{\pi r_t}$$

De bovenstaande formules geven aan dat de spanningen in de drukzone nabij de stam aanzienlijk kunnen zijn. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat geen rekening gehouden is met vervormingscapaciteit/buigstijfheid van de boom en de kademuur. Hierdoor zullen de werkelijke spanningen op de ondergrond en in de kademuur minder groot zijn. De constructeur dient de



Figuur 4-6 Schematisatie windbelasting op boom.

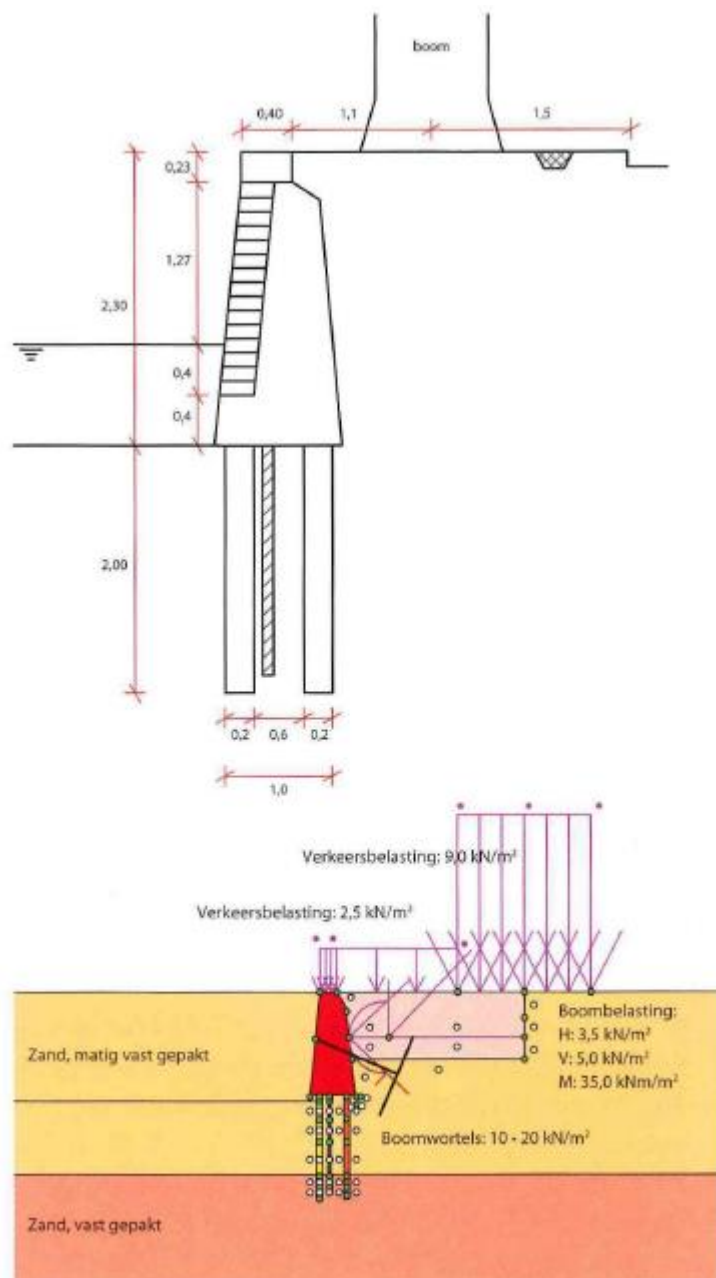


buigstijfheid van de binnenstedelijke kadeconstructie mee te nemen bij de toetsing en het ontwerp. Immers naarmate de buigstijfheid van de kadeconstructie toeneemt, worden de belastingen gespreid over een grotere lengte. Hierdoor neemt de lijnlast per strekkende meter kade af. Naarmate de afstand van de boom tot de kade toeneemt zal door spannings spreiding in de grond de invloed van de boom op een kadeconstructie aanzienlijk afnemen.

De hiervoor beschreven modellering is in veel gevallen conservatief, waardoor niet aan de eisen uit de vigerende normen wordt voldaan. Optimalisatie kan in veel gevallen tot een sterke reductie van de belastingen leiden. Hierbij kan gedacht worden aan het nauwkeuriger vaststellen van de weerstandcoëfficiënt. Ook een nauwkeurige bepaling van de wortelkluit en aanwezige penwortels is van grote invloed op de belasting van de kademuur. Uit trekproeven bij bomen bij kades blijkt bij hoge trekkrachten slechts een beperkte vervorming van de grond tegen de kademuur. Daarnaast kan in veel gevallen een maatwerkoplossing tot nauwkeurigere en realistischere resultaten leiden, waarbij een integrale modellering met behulp van bijvoorbeeld een programma gebaseerd op de eindige elementenmethode wordt uitgevoerd.

Een veel voorkomende situatie in binnenstedelijk gebied is de aanwezigheid van bomen die zijn aangeplant op korte afstand van kadeconstructies. De belasting door bomen op een kademuur is tweeledig. Enerzijds veroorzaakt het groeiende wortelstelsel een zekere worteldruk tegen de muur. Anderzijds resulteert windbelasting op de kruin in een te leveren reactiekracht in het grondmassief direct achter de kadeconstructie en mogelijk tegen de kadeconstructie zelf. Voor een gedetailleerde beschrijving van deze belastingen wordt verwezen naar paragraaf 4.2.4. Het voorgestelde belastingschema geldt als eerste, conservatieve inschatting van de belastingeffecten.

Wanneer uit een gevoeligheidsanalyse blijkt dat genoemde belastingen een significante invloed op de stabiliteit van de kademuur zouden kunnen hebben, wordt aanbevolen een integraal eindig elementenmodel te gebruiken. Een dergelijk model geeft een betere weergave van de werkelijke belastingafdracht naar de ondergrond en indirect de invloed op de kadeconstructie. Een in Nederland veel gebruikt eindig elementenprogramma is PLAXIS. Tevens kunnen effecten van mogelijke maatregelen beter worden onderzocht/gesimuleerd.



Figuur 4-7a en b Bodemopbouw en de belastingen.

Voor de binnenstedelijke kademuur langs de Prinsessegracht te Den Haag is een dergelijke beschouwing uitgevoerd voor een representatieve doorsnede, zie figuur 4-7 a en b. Het betreft hier een situatie van een betonnen kademuur met aan de voorzijde metselwerk, gefundeerd op houten palen. Tevens is een houten kwelscherm aangebracht. Middels eindige elementen berekeningen is het huidige veiligheidsniveau van de totale constructie in kaart gebracht, inclusief boombelasting en verkeersbelasting. De omvang van het wortelstelsel is hier aangenomen van maaiveldniveau tot de hoogste grondwaterstand en de kluit is geschematiseerd als een gewapende grondmoot door aan deze grondmoot cohesie toe te kennen. De boombelasting is gemodelleerd als set van een horizontale lijnlast, een verticale lijnlast en een moment die aangrijpen op één meter onder maaiveldniveau. Aangezien de bovenzijde van de betreffende kadeconstructie aan horizontale vervormingen onderhevig was, is het effect van een aan te brengen schuine verankering onderzocht om de constructie in dit geval weer op het gewenste veiligheidsniveau te brengen.

Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat geen rekening gehouden is met vervormingscapaciteit / buigstijfheid van de boom. Hierdoor zullen de werkelijke spanningen op de ondergrond minder groot zijn. Daarnaast dient de constructeur de buigstijfheid van de binnenstedelijke kadeconstructie mee te nemen bij de toetsing en het ontwerp. Immers, naarmate de buigstijfheid van de kadeconstructie toeneemt, worden de belastingen gespreid over een grotere lengte. Hierdoor neemt de lijnlast per strekkende meter kade af. Desalniettemin dient in het ontwerp en bij het toetsen van kadeconstructies boombelasting meegenomen te worden. Naarmate de afstand van de boom tot de kade toeneemt zal door spanningsverspreiding in de grond de invloed van de boom op een kadeconstructie aanzienlijk afnemen.

Veel gemeentes hebben aangegeven dat bomen in de directe nabijheid van kadeconstructies schade hebben veroorzaakt. Of deze schadegevallen zijn veroorzaakt door expansiedruk door wortels, of door windbelasting op de bomen of constructie, is veelal niet bekend. De windbelasting in binnenstedelijk gebied kan sterk gereduceerd worden door de aanwezigheid van lokale bebouwing. Aan de andere kant kan lokaal door tunnelvorming de windsnelheid aanzienlijk hoger liggen.

### **Omgevallen boom**

De meest ongunstige situatie voor de stabiliteit van de verankering doet zich voor wanneer de boom omwaait en een kuil in de grond ontstaat voor bijvoorbeeld een ankerschot of voor een ankerscherm. Dit kan als een bijzondere belasting beschouwd worden. Uit observaties van omgewaaide bomen (eik en linde) blijkt een maximale kuildiepte van 1,0 à 1,5 meter te kunnen ontstaan over een oppervlakte gelijk aan het dragende deel van het wortelstelsel. Deze kuildiepte en oppervlakte dient met een boomexpert vastgesteld te worden. In de meeste gevallen kan de grondwaterstand als referentie aangehouden worden. Als eerste benadering lijkt een oppervlak van 3,0 bij 3,0 meter een veilige aanname (linde en eik). Afhankelijk van de plaats van de boom ten opzichte van het ankerschot dient bij de bepaling van de passieve weerstand van het ankerschot met deze "ontgronding" rekening te worden gehouden.