

4 VOCHT- VOORZIENING

4.1 INLEIDING

In hoofdstuk 2 van dit deel van het vademecum is behandeld hoe bomen stoffen via houtweefsel en bastweefsel transporteren. Het verdampen van water via de bladeren is daarbij één van de drijvende krachten. Verdamping vindt slechts in beduidende omvang plaats in het groeiseizoen. Dit is globaal van 1 mei tot 1 oktober. Bij bladverliezende bomen loopt het seizoen vanaf het moment dat de knoppen gaan zwellen tot aan de bladval. (De genoemde data zijn dus geen hard gegeven.) Bij wintergroene naald- en loofbomen komen transport en verdamping in de winter eveneens grotendeels tot stilstand, ook al blijven naalden of loof aan de boom. De behoefte aan water concentreert zich dus in het groeiseizoen. Het is van belang te weten of de boom in het groeiseizoen over voldoende vocht kan beschikken. Dit is te bepalen door een balans op te stellen: een vochtbalans van de aan- en afvoer over het gehele groeiseizoen (figuur 66).

In dit hoofdstuk worden de onderdelen van de vochtbalans behandeld. Het is de bedoeling aan te kunnen geven hoeveel een boom nodig heeft, hoeveel een bodem kan leveren, hoeveel wordt aangevoerd en hoeveel er in het stedelijk milieu voor de boom verloren gaat (paragraaf 4.5). Alvorens hierop in te gaan, wordt in meer algemene zin een aantal begrippen uit de bodemkunde

AANVOER	AFVOER
+ infiltratie neerslag	- vochtopname boom (verdamping + groei)
+ vochtvoorraad begin van het groeiseizoen	- uitzijging naar het grondwater
+ opstijging vanuit het grondwater	- directe verdamping vanaf de bovengrond en het blad

figuur 66. de vochtbalans: dekt de aanvoer het verbruik?

behandeld. Deze hebben te maken met het gedrag van water in de bodem en de wateronttrekking door plante (paragraaf 4.4 en 4.3). Als eerste wordt echter kort iets gezegd over het belang van water voor de boom.

4.2 BELANG VAN WATER

water Bomen hebben vocht (water) nodig.

- Water wordt door de boom verdampt (transpiratie, 95 % van het waterverbruik).
- Water is het belangrijkste bestanddeel van de levende cellen; 80 tot 90 % van het versgewicht van actief groeiend weefsel bestaat uit water.
- Water is het middel waarin het transport van allerlei stoffen door de plant plaatsvindt.
- Water is nodig bij de fotosynthese in de groene delen en bij andere scheikundige processen in de plant.

Water is essentieel bij het instandhouden van de turgor (celspanning) in de zachte delen van de plant. Kortom, zonder water is geen (planten)leven mogelijk.

watertekort Het is van groot belang dat de aanvoer van water uit de bodem de behoefte van de boom in voldoende mate kan dekken. Water is in onze streken de belangrijkste factor die de groei van de boom beïnvloedt. In vochtige gebieden kan 70 tot 80 % van de variatie in de groeiringsbreedte worden toegeschreven aan vochttekort. In droge gebieden is dit zelfs 90 %.

water en boomgroei De groei is (bij verder optimale omstandigheden) maximaal, wanneer er zoveel water in de bodem voorradig is, dat de boom in principe onbeperkt kan verdampen. Een beperking in de verdamping betekent minder groei. Verdamping en fotosynthese (en daarmee groei) hangen namelijk sterk met elkaar samen. Het verdampende water en het koolzuurgas (CO_2) voor de fotosynthese moeten beide door de huidmondjes. Bij vochttekort sluiten de bladeren hun huidmondjes geheel of gedeeltelijk en loopt de uitwisseling van gassen sterk terug, dus ook de opname van koolzuurgas.

verwelking Een boom kan zijn verdamping nooit helemaal stoppen, ook al zijn de huidmondjes dicht. Wanneer een situatie met vochttekort lang duurt, zal de celspanning in de bladeren daarom verminderen en verwelken de bladeren (figuur 67). De verwelking kan tijdelijk zijn. Wanneer de boom weer voldoende water kan opnemen, herstellen de bladeren zich. Wanneer de te droge toestand echter te lang duurt, verdrogen de bladeren en verdorren. Er wordt dan gesproken van permanente verwelking. Blijvende schade aan de boom als geheel treedt echter

permanente verwelking



figuur 67. watertekort doet het blad verwelken waardoor de groei stopt

doorgaans alleen in extreem droge jaren op. Ook bij boomsoorten, zoals populier, berk en linde, die bij aanhoudende droogte massaal bladeren kunnen laten vallen tot een niveau waarop vochtaanbod en verdamping weer in evenwicht zijn.

fotosynthese en groei

Door deze reacties van de boom lopen de opname van koolzuurgas, de fotosynthese en dus de groei terug. Zolang de fotosynthese groter blijft dan de ademhaling, blijft de boom nog een beetje groeien. Zijn ze beide even groot, dan staat de groei stil. De boom leeft dan nog wel, maar daar houdt het ook mee op. Wanneer de fotosynthese kleiner wordt dan de ademhaling gaat de boom meer suikers verbruiken dan hij produceert. De boom staat dan te kwarren en sterft uiteindelijk af. Al lang voor dit moment is een dergelijke boom vatbaarder voor aantastingen door bepaalde schimmels (bepaalde vormen van bastkanker).

wateroverlast

Teveel water in de bodem is ook niet goed. De wortels van de boom hebben zuurstof nodig om te leven en te functioneren. Zuurstof kan alleen via met lucht gevulde poriën in voldoende mate in de bodem doordringen en bij de wortels komen. Overmaat aan water verdringt de lucht uit de bodem en belemmert de zuurstofvoorziening.

vochtbalans

De vochtbalans uit figuur 66 kan voor een boom in de verharding verder worden uitgewerkt in een schema, zoals weergegeven in figuur 68. Uit dit schema blijkt, dat het van verschillende factoren afhangt of er voor de boom voldoende water beschikbaar is.

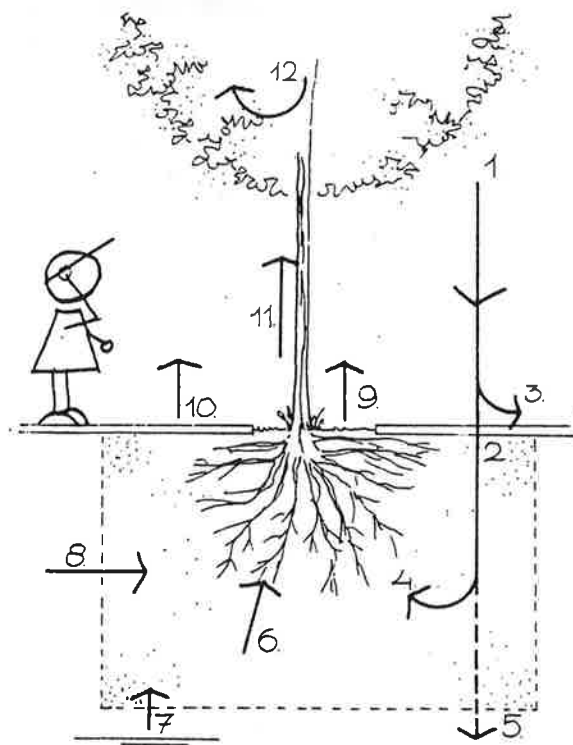
vochtbehoefte en wortelstelsel

Het is voor de boom belangrijk het beschikbare water uit een zo groot mogelijk bodemvolume op te kunnen nemen. Een diep en breed vertakt wortelstelsel is het sterkste wapen van de boom tegen droogte. Beperkingen van de wortelgroei door een te klein doorwortelbaar volume of storende lagen maken een boom droogtegevoelig. Beschadigingen van het wortelstelsel betekenen een verkleining van de opnamecapaciteit en maken een boom (tijdelijk) droogtegevoelig.

4.3 VOCHTGEHALTE EN LEVERING VAN VOCHT DOOR DE BODEM

Een belangrijk gegeven voor boomgroei is hoeveel vocht uit de bodem kan worden opgenomen.

- 1: neerslag
- 2: infiltreert door het wegdek
- 3: stroomt af over de verharding
- 4: toevoeging aan watervoorraad en boomspiegel
- 5: zakt naar het grondwater
- 6: in de bodem gebonden vocht (vochtvoorraad)
- 7: capillaire opstijging uit het grondwater
- 8: zijdelingse aanvoer uit niet doorwortelde grond
- 9: verdamping vanuit de bovenlaag van de bodem
- 10: verdamping van regenwater vanaf (en door) de verharding
- 11: verdamping van opgenomen en getransporteerd water door de bladeren
- 12: verdamping van op de bladeren gevallen neerslag (interceptie)



figuur 68. factoren die de vochtvoorziening van de boom bepalen

vochtgehalte De absolute hoeveelheid water in de grond wordt aangeduid met het vochtgehalte. Dit vochtgehalte wordt uitgedrukt in gram vocht per 100 gram droge grond (gewichtspercentage) of in cm^3 vocht per cm^3 grond (volumepercentage). Dit begrip zegt echter nog niets over de hoeveelheid vocht die een boom kan opnemen.

vochtigheid De toestand van het water in de grond wordt vaak aangeduid als de vochtigheid. De vochtigheid hangt samen met de mate waarin het water aan de bodemdeeltjes is gebonden. Zand (dat vocht niet sterk bindt) voelt bij hetzelfde vochtgehalte natter aan dan klei (dat vocht wel sterk bindt). Dit verschil zou wel eens betekenis kunnen hebben voor de beschikbaarheid van vocht voor planten.

uitdrogingstoestand De kracht waarmee het water aan de grond is gebonden geeft een beter inzicht in de vochttoestand dan het vochtgehalte. Het resultaat van de werking van deze kracht wordt de energietoestand van het bodemwater ofwel de uitdrogingstoestand van de bodem genoemd. De kracht wordt gemeten ten opzichte van de zwaartekracht, die op het water werkt. De energietoestand, en niet het absolute vochtgehalte, is bepalend voor de opneembaarheid van het water door de plant.

Dit kan worden geïllustreerd met het volgende voorbeeld. Van twee bloempotten met een inhoud van een liter is er één gevuld met in de oven gedroogd (stoofdroog) zand en één met stoofdroke klei. Aan beide potten wordt een deciliter water toegevoegd. Ze hebben nu hetzelfde vochtgehalte. De pot met zand zal na enige tijd vochtig aanvoelen, de pot met klei nog droog. Een slap hangende (maar niet permanent verwelkte) plant in de pot met zand zal opfleuren, die in de pot met klei herstelt zich niet. Het water is te sterk aan de kleideeltjes gebonden zodat de plant het niet kan opnemen.

drukhoogte De energietoestand van het water in de grond wordt gegeven als de druk van een aantal centimeters water in een kolom, gemeten op de bodem van die kolom. Als maat wordt de hoogte van een waterkolom gebruikt, die nodig is om de druk te veroorzaken. Dit wordt de drukhoogte (h , in cm, vroeger "cm-waterkolom") van het water genoemd. De drukhoogte is negatief als de grond onverzadigd is. Dit is het geval in situaties boven de grondwaterspiegel. De drukhoogte is nul op het niveau van de grondwaterspiegel. Onder de grondwaterspiegel is de drukhoogte positief. Naast de officiële term drukhoogte worden in de praktijk ook nog de (verouderde) termen vocht- en zuigspanning gebruikt. De drukhoogten in de grond, en dus de waarden van h , kunnen zeer sterk verschillen: bij verzadiging geldt $h = 0$ cm, bij normaal vochtige grond $h = -100$ cm en bij verwelking van planten $h = -16.000$ cm (figuur 69).

DRUKHOOGTE h (cm)	WAARDERING VOCHTTOESTAND	WAARDERING DRUKHOOGTE
- 16.000	zeer droog (verwelkingspunt)	laag
- 100	vochtig (veldcapaciteit)	normaal
- 10	zeer nat	hoog
≥ 0	verzadigd	

figuur 69. verband tussen drukhoogte en vochttoestand

pF en drukhoogte

Vroeger werd van de absolute (dat wil zeggen de positief gemaakte) waarde van de drukhoogte de logaritme genomen. Deze waarde werd de pF genoemd.

$$\begin{aligned} h = 1 \text{ cm} & \text{ geeft een } pF = 0 \\ h = 100 \text{ cm} & \text{ geeft een } pF = 2 \\ h = 16.000 \text{ cm} & \text{ geeft een } pF = 4,2 \end{aligned}$$

vocht karakteristiek

Het blijkt, dat verschillende gronden bij eenzelfde energietoestand van het bodemvocht verschillende vochtgehalten hebben. Andersom: bij hetzelfde vochtgehalte verschilt de kracht waarmee het vocht is gebonden. Elke grond(soort) blijkt een eigen karakteristiek verband te bezitten tussen energietoestand (drukhoogte) en vochtgehalte. De lijn die dit verband aangeeft wordt de vocht karakteristiek genoemd (vroeger "pF-curve"). De vocht karakteristiek wordt voornamelijk bepaald door het organische-stofgehalte, het lutum- of leemgehalte en de dichtheid van de grond. In figuur 70 staan als voorbeeld de vocht karakteristieken van drie verschillende grondsoorten.

verzadiging

Bij $h = 0$ zijn alle poriën gevuld met water. De grond bevat dan geen lucht meer. Hij is met water verzadigd.

porositeit

De volumefractie water bij verzadiging geeft de volumefractie poriën in de grond (porositeit, respectievelijk 0,41, 0,50 en 0,58 voor de gronden in figuur 70). Het overige deel (tot 100 %) is de vaste fase.

veldcapaciteit

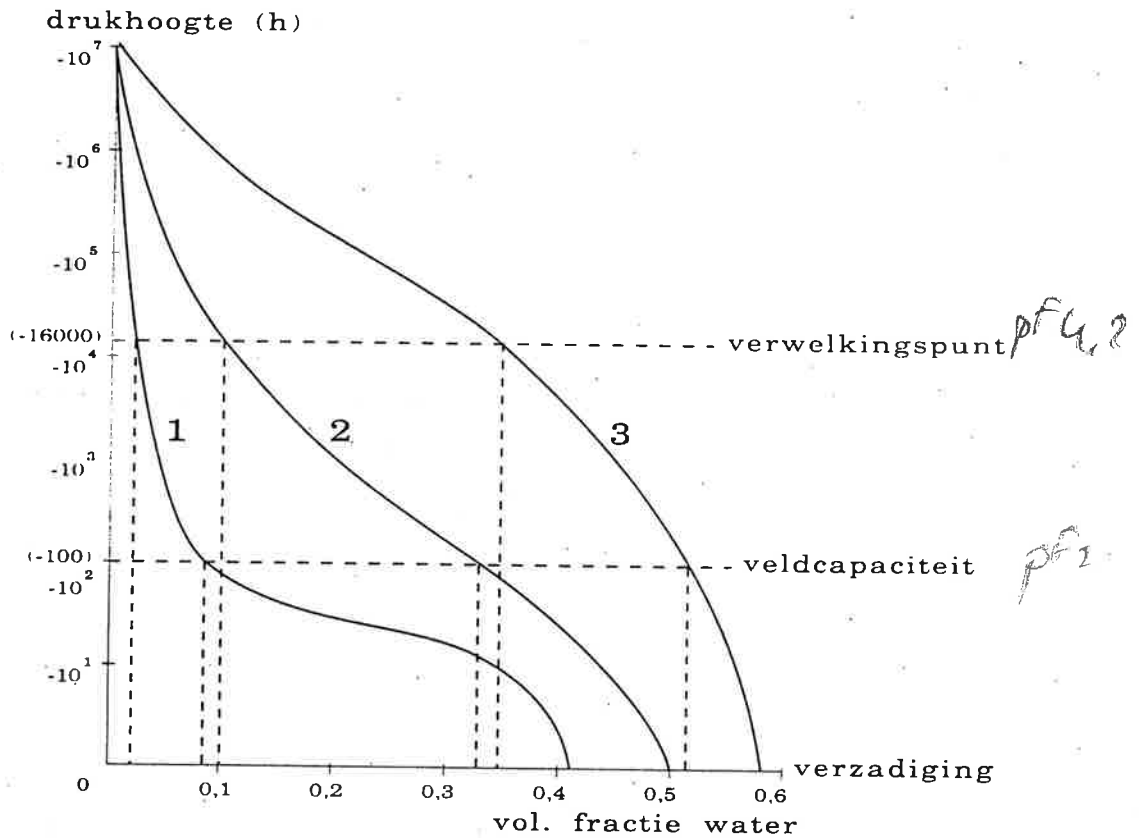
Wanneer vocht wordt onttrokken tot een drukhoogte van -100 cm komt de grond op veldcapaciteit. Dit is de toestand waarin een bodem verkeert, wanneer al het water dat niet kan worden gebonden is weggezakt. Een drukhoogte van -100 cm komt namelijk overeen met de kracht waarmee de zwaartekracht aan het water trekt. De bodem is nu "uitgelekt". Dit is de toestand van de meeste gronden in het vroege voorjaar, voordat de vegetatie gaat verdampen.

veldcapaciteit en drukhoogte

Wanneer nauwkeurig wordt gekeken, dan blijkt de drukhoogte bij veldcapaciteit niet altijd precies -100 cm

vochtverlies tot veldcapaciteit

te zijn. De drukhoogte bij veldcapaciteit is afhankelijk van de diepte van het grondwater niveau. Bij hoge grondwaterstanden is de drukhoogte bij veldcapaciteit -50 tot -100 cm, bij erg diepe grondwaterstanden ongeveer -200 cm. Het vochtverlies van verzadiging tot aan de veldcapaciteit is af te lezen uit de vocht karakteristiek. In de zandgrond uit figuur 70 daalt het vochtgehalte tussen verzadigingspunt en veldcapaciteit zeer sterk van 0,41 tot 0,09. In de zware klei treedt een veel kleiner vochtverlies van 0,58 naar 0,51 op. De zandgrond verliest dus bij een relatief geringe onderdruk al een groot deel van zijn vocht, de zware klei daarentegen maar weinig. Dit komt omdat zand veel meer wijde poriën heeft dan klei. De wijde poriën binden het water maar in geringe mate en verliezen dus snel hun vocht. De vocht karakteristiek van een zavelgrond ligt tussen die van een klei- en een zandgrond in.



VERZADIGING (H = 0) VOCHTGEHALTE (VOL.FRACTIE)	<-----> VOCHTVERLIES DOOR UITLEKKEN (VOL.FRACTIE)	VELDCAPACITEIT (H = -100) VOCHTGEHALTE (VOL.FRACTIE)	<-----> BESCHIKBAAR VOCHT (VOL.FRACTIE)	VERWELKINGSPUNT (H = -16.000) VOCHTGEHALTE (VOL.FRACTIE)
1. zand	0,41	0,32	0,09	0,02
2. zavel	0,50	0,17	0,33	0,10
3. komklei	0,58	0,07	0,51	0,35

figuur 70. vocht karakteristiek en volumefracties beschikbaar en niet beschikbaar vocht van drie gronden

- beschikbaar vocht* Voor de plant (boom) is vooral het traject tussen $h = -100$ cm en $h = -16.000$ cm van belang. Al het vocht beneden een drukhoogte van -100 cm zal in principe uitzakken naar het grondwater. Dit vocht is op zich wel opneembaar, wanneer de plant het uit de bodem kan halen voordat het wegzakt. Veel vocht komt echter buiten het groeiseizoen, in de winter, in de bodem en zakt weg terwijl de wortels niets opnemen. De plant kan niet over het gehele traject van beschikbaar vocht ($h = -100$ cm tot $h = -16.000$ cm) even gemakkelijk water opnemen. Naarmate de drukhoogte negatiever wordt, verloopt de opname moeilijker. Bij een drukhoogte van -1000 cm hebben planten al de eerste last van droogte.
- verwelkingspunt* Het vocht dat sterker is gebonden dan een drukhoogte van -16.000 cm is voor de boomwortels geheel niet opneembaar. Deze drukhoogte wordt daarom het verwelkingspunt van de grond genoemd.
- berekening beschikbaar vocht* Wanneer een vocht karakteristiek van een grond bekend is, kan de hoeveelheid beschikbaar vocht worden berekend door de volumefractie vocht bij veldcapaciteit en bij verwelkingspunt van elkaar af te trekken (zie figuur 70). Voor de zandgrond is dit $0,09 - 0,02 = 0,07$ cm³ vocht/cm³ bodem = 70 liter/m³.
- vochtbergend vermogen* De totale hoeveelheid water die in de bodem kan worden opgeslagen (het vochtbergend vermogen, dit is de hoeveelheid vocht tussen veldcapaciteit, $h = -100$ cm, en volledige uitdroging, $h \ll -16.000$ cm) zegt dus niet alles. Klei kan weliswaar in totaal het meeste water bevatten, maar heeft niet het meeste voor de boom beschikbare water. Het heeft veel zeer fijne poriën die het water te sterk binden.
- vochtbinding* Het gemak waarmee de bodem zijn water afstaat of vasthoudt zegt ook niet alles. Duinzand heeft maar heel weinig zeer fijne poriën en geeft dan ook heel gemakkelijk zijn water af. Dat heeft echter tot gevolg dat een groot deel van de neerslag uit de regenrijke winter naar de ondergrond wegzakt voordat het ten goede komt aan de planten.
- bodemluchtgehalte* Ook het luchtgehalte van een grondlaag kan uit de vocht karakteristiek worden afgelezen. Waar water uit poriën verdwijnt, komt er lucht voor in de plaats. Het luchtgehalte is dan gelijk aan de porositeit minus de volumefractie water. Voor de zavelgrond uit figuur 70 is dit bij veldcapaciteit $0,50 - 0,33 = 0,17$ ofwel 17 %, bij het verwelkingspunt 0,50.

vochtleverend vermogen

Het vochtleverend vermogen van de grond is de hoeveelheid vocht, die de bodem gedurende een groeiseizoen van 150 dagen in een 10 % droog jaar kan leveren. In de landbouw, waar deze begrippen vandaan komen, wordt hier de periode van 1 april tot 1 september voor genomen. Voor bomen ligt het groeiseizoen doorgaans ongeveer een maand later: van 1 mei tot 1 oktober. In het algemeen valt er in september meer neerslag dan in april, terwijl de verdamping van open water minder is. Het vochtleverend vermogen wordt bepaald door de hoeveelheid water die in de bewortelde zone kan blijven hangen én het water dat door capillaire opstijging uit het grondwater de wortelzone kan bereiken. Wanneer het grondwater geen invloed heeft in de bewortelde zone, dan is het vochtleverend vermogen gelijk aan de hoeveelheid beschikbaar vocht in de bodem.

gradaties vochtleverend vermogen

In het vochtleverend vermogen worden gradaties onderscheiden zoals aangegeven in figuur 72. Een grond die in een 10 % droog jaar nog goed in de vochtbehoefte van een plant kan voorzien, wordt omschreven als een bodem met een zeer groot vochtleverend vermogen. Een grond die onder dergelijke omstandigheden minder dan 50 mm kan leveren, heeft een zeer gering vochtleverend vermogen. Naarmate het vochtleverend vermogen kleiner is, zal de watervoorraad in de bodem eerder in het groeiseizoen op zijn en de boom droogteverschijnselen gaan vertonen. Een grond(mengsel) voor bomen in de verharding moet minimaal gradatie 3 hebben (figuur 72).

*vochtleverend vermogen
bepalende factoren*

In welke categorie een grond thuishoort is afhankelijk van een aantal factoren:

- de hoeveelheid beschikbaar vocht per volume-eenheid grond;
- de dikte van de doorwortelde/doorwortelbare zone;
- de hoogte en het verloop van de grondwaterstand tijdens het groeiseizoen;
- de capillaire eigenschappen van de ondergrond (opstijging vanuit het grondwater).

GRADATIE	VOCHT- LEVEREND VERMOGEN (mm)	OMSCHRIJVING	AANTAL JAREN MET VOCHTTEKORT PER 10 JAAR
1	> 200	zeer groot	< 1
2	150 - 200	vrij groot	1 à 2
3	100 - 150	matig	2 à 5
4	50 - 100	vrij gering	5 à 7
5	0 - 50	zeer gering	> 7

figuur 72. gradaties in vochtleverend vermogen: bij straatbomen is minimaal waarde 3 vereist (bron: Locher en De Bakker, 1990: 277)

scheikundige waterbinders

Om het vochtbergend vermogen van de bodem te vergroten, worden scheikundige produkten op de markt gebracht, die grote hoeveelheden water kunnen opnemen en geleidelijk weer afgeven. Deze stoffen moeten dan door de grond worden gemengd om de voorraad beschikbaar vocht te vergroten. De bedoelde stoffen werken in principe, dat wil zeggen ze nemen water op. Daarbij zwellen ze op. Onder de verharding heeft dat tot gevolg, dat de verharding afwisselend wordt opgedrukt en weer inzakt. Het opzwellen van de stof en het vele water in de bodem kunnen tot problemen leiden met de luchthuishouding. Daarnaast is een aantal van de toegepaste stoffen na drie jaar afgebroken. Een stof als acryl-amide wordt veel langzamer afgebroken: 2 % per jaar. Deze stof is echter giftig, al is zij toegelaten onder een EG-nummer. Een belangrijk gegeven is, dat deze synthetische waterbinders in vergelijking met alternatieven (zoals zwartveen) erg duur zijn. Toepassing bij bomen in de gebouwde omgeving is daarom niet relevant.

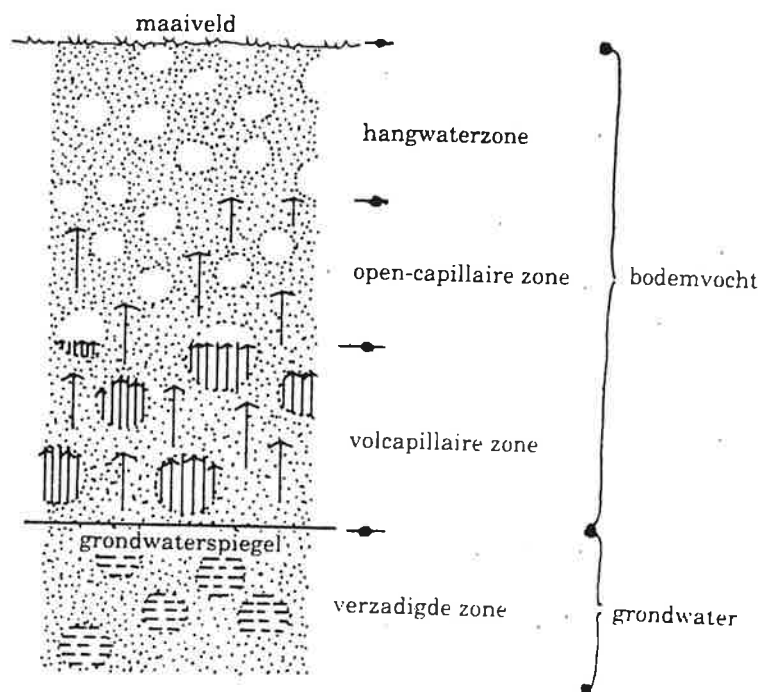
vochtleverend vermogen en effectieve wortelzone

Voor het vaststellen van het vochtleverend vermogen wordt als bewortelde zone de zone beschouwd, waarin nog net voldoende wortels aanwezig zijn om het aanwezige vocht tot het verwelkingspunt te kunnen onttrekken. Hiervoor dienen minimaal twee wortels zichtbaar te zijn in een (aan de wand van bijvoorbeeld een profielkuil gemeten) vlakje van 10 cm breed en 5 cm hoog (ofwel 4 per dm²). Er wordt in dit verband ook wel gesproken van de effectieve of werkzame worteldiepte (wortelzone). Deze wordt ook gedefinieerd als het profielgedeelte waarin zich 80 tot 90 % van de wortels van de boom bevindt. In de stad zal dit (uiteindelijk) vaak samenvallen met het doorwortelbaar gemaakte bodemvolume (de ten behoeve van de boom gemaakte plantplaats). Daarom wordt bij de bepaling van het vochtleverend vermogen bij bomen in plantplaatsen uitgegaan van het totale volume waarover bodemverbetering heeft plaatsgevonden. Een pas geplante boom kan echter nog niet over dit volume beschikken.

vochtleverend vermogen en grondwater

Het vochtleverend vermogen is niet alleen gerelateerd aan het in de bodemporiën aanwezige opneembaar vocht, maar ook aan de mogelijkheid om vocht te leveren vanuit het grondwater. Wanneer een bodem in profiel wordt bekeken op het grondwaterregime, dan kunnen van boven naar beneden drie zones worden onderscheiden (zie figuur 73):

- de hangwaterzone;
- de capillaire zone (onderverdeeld in de open- en de volcapillaire zone);
- de grondwaterzone.



figuur 73. vochtzones in een bodemprofiel (naar: BBK)

hangwaterzone

In de hangwaterzone heeft het grondwater geen directe invloed. Het kan niet tot deze hoogte opstijgen. Al het vocht wordt aangevoerd door infiltratie van bovenaf.

capillaire zone

De capillaire zone staat onder invloed van het grondwater. De poriën zuigen zich, net als een filterpapiertje, vol met water. Dit gebeurt het sterkst in de meest nauwe poriën. In deze poriën kan het water dan ook het hoogste stijgen. Dicht bij het grondwater zijn alle poriën met water gevuld (de vol-capillaire zone). Verder naar boven in het profiel wordt de invloed van de zwaartekracht steeds sterker ten opzichte van de bindingskracht (adhesie) van het water in de poriën. In deze zone zijn niet alle poriën meer met water gevuld (de open-capillaire zone). Hoe dik de vol- en open-capillaire zone zijn, hangt af van de mate van capillaire opstijging. Deze hangt weer af van de grondsoort en de structuur.

capillaire opstijging

Van homogene bodems (bodems met een gelijkmatig profiel) is bekend tot welke hoogten en met welke snelheid het grondwater door de capillaire zone kan opstijgen. In zandgronden, waarin veel grote poriën voorkomen, is deze opstijging vrij gering, maar verloopt vrij snel. In fijne zavel of klei kan het water veel verder opstijgen omdat hierin veel fijne poriën aanwezig zijn. Met het kleiner worden van de porie en met het

*capillaire opstijging
in heterogene gronden*

toenemen van de afstand tot het grondwater neemt de stijgsnelheid af.

In heterogene bodems, waar de structuur met de diepte verandert en storende lagen kunnen voorkomen, is de opstijging veel moeilijker te bepalen. Overgangen tussen twee bodemlagen kunnen bijvoorbeeld sterk remmend werken op de opstijging. Dit kan worden gedemonstreerd met twee suikerklontjes. Een klontje gedoopt in koffie neemt zeer snel koffie op. Wanneer een tweede klontje bovenop het eerste wordt gehouden, dan wordt hierin nog maar weinig koffie opgenomen. In de stad komen heterogene bodemsituaties vaak voor, zoals bijvoorbeeld de overgang van de grond onder het plantgat naar het grondmengsel in het plantgat. Met behulp van onder andere grondpijlers naar het grondwater of het doorspitten van het onderste deel van het ingebrachte grondmengsel met de ondergrond is hierin verbetering te brengen.

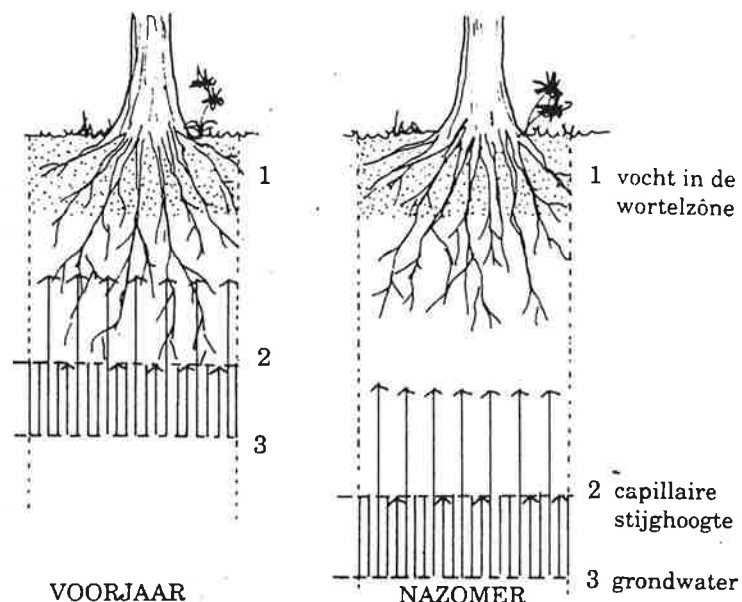
grondwaterzone

De grondwaterzone is het gebied dat volledig met water is verzadigd en waar het water in horizontale richting kan bewegen (horizontale waterstroming). In de vol-capillaire zone is geen horizontale waterstroming meer mogelijk. Hier beweegt het water alleen in verticale richting.

freatisch vlak

grondwatertrappen

Het scheidingsvlak tussen het grondwater en de vol-capillaire zone wordt de grondwaterspiegel of het freatische vlak genoemd. Het niveau van het grondwater kan sterke schommelingen vertonen en kan bijvoorbeeld in de winter aanzienlijk hoger staan dan in de zomer. Dit wordt veroorzaakt door het neerslagoverschot in najaar en winter en de vochtonttrekking door de planten in de zomer (zie figuur 74). De capillaire zone zal door



figuur 74. daling van de grondwaterstand tijdens het groeiseizoen en de betekenis voor de vochtvoorziening (naar: BBK)

deze fluctuaties eveneens wisselen. Voor de bodemkartering in Nederland wordt met betrekking tot de schommelingen in de grondwaterstanden een aantal klassen onderscheiden. De klassen worden begrensd door een gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG, treedt doorgaans op in de winter) en een gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG, treedt doorgaans op in de zomer). De klassen worden grondwatertrappen genoemd. De grondwatertrappenindeling is ontworpen voor bodemkaarten met een schaal van 1 : 50.000 en heeft daardoor vrij ruime grenzen. De gegevens van deze kaarten zijn in de gebouwde omgeving vaak niet toe te passen. Een stedelijk gebied, al bebouwd toen de kaart werd gemaakt, wordt dan ook als wit gebied weergegeven. De kaart kan bij stadsuitbreiding wel een indruk geven van de geschiktheid van het oorspronkelijke bodemprofiel voor bebouwing en de aanleg van groenvoorzieningen. Na de bouw komt het grondwater doorgaans definitief lager te staan dan de bodemkaart aangeeft. Een (eigen) net van peilbuizen is nodig om de grondwaterstand precies bij te houden. In principe kan daarbij wel worden aangesloten bij de grondwatertrappenindeling. Figuur 75 geeft de grondwatertrappen met hun GHG en GLG.

worteldiepte

Omdat wortels ook zuurstof nodig hebben, kunnen zij niet veel dieper groeien dan tot enkele centimeters in de vol-capillaire zone. Hier is alle lucht in de poriën vervangen door water. De wortels zijn in de winterperiode, bij lage temperaturen, nauwelijks actief. In deze periode kunnen zij gedurende enige dagen, weken of zelfs maanden wel een grondwaterstand verdragen die boven de onderzijde van de wortelpruik uitstijgt. Na het uitlopen van de bladeren neemt het zuurstofverbruik van de wortels sterk toe. Zuurstofgebrek kan dan grote schade aanrichten. Bij veel boomsoorten zullen wortels die dan te ver beneden de open capillaire zone zitten afsterven. Hierdoor is de hoogte van de volcapillaire zone rond half april als regel maatgevend voor de mogelijke permanente bewortelingsdiepte. Gedurende de zomer zakt het grondwater vaak dieper weg. Jonge wortels kunnen dan doordringen tot vlak boven de laagste grondwaterstand. Het volgend voorjaar zullen deze wortels, omdat ze onder water staan, afsterven. In de zomer dringen nieuwe wortels weer naar beneden. Het één en ander is echter afhankelijk van de situatie ter plaatse en de boomsoort. Scheuren in de grond bevatten geen capillair water en kunnen een diepere, permanente beworteling mogelijk maken. Wilgen zijn in staat in zware kleigronden het grondwater omlaag te "trekken" (door wateropname en verdamping) en zo de doorwortelingsdiepte plaatselijk met meer dan een meter te vergroten.

grondwaterregime De bewegingen van de grondwaterspiegel kennen een jaarlijkse regelmaat tussen GHG en GLG (zie figuur 75). Met betrekking tot dit grondwaterregime worden onderscheiden:

- hangwaterprofielen;
- grondwaterprofielen;
- contactprofielen.

Grondwaterprofielen staan altijd onder invloed van het grondwater. Hangwaterprofielen worden in het geheel niet beïnvloed door het grondwater. Contactprofielen zitten hier tussen in: een gedeelte van het jaar (het begin van het groeiseizoen) beïnvloedt het grondwater de vochthuishouding, om daarna naar een onbereikbare diepte weg te zakken.

hangwaterprofiel Als hangwaterprofielen worden die gronden beschouwd, die geen grondwaterinvloed in de bewortelbare zone hebben. Het vochtleverend vermogen wordt uitsluitend bepaald door de hoeveelheid beschikbaar vocht in de bewortelbare (hangwater)zone. Al in het voorjaar is de afstand van de grondwaterspiegel tot de bewortelde zone te groot voor opstijging van vocht vanuit het grondwater tot in de wortelzone. De precieze afstand is afhankelijk van de grondsoort en wel van de mate van capillaire opstijging en bewortelbare diepte.

vochtleverend vermogen hangwaterprofiel Het vochtleverend vermogen van hangwaterprofielen is vast te stellen door de hoeveelheid beschikbaar vocht van de grondsoort, in liters per m³, te vermenigvuldigen met het doorwortelde volume. De hoeveelheid beschikbaar vocht

GRONDWATERTRAP	GHG (cm -mv)	GLG (cm -mv)
I	-	< 50
II ')	-	50 - 80
III ')	< 40	80 - 120
IV	> 40	80 - 120
V ')	< 40	> 120
VI	40 - 80	> 120
VII ")	> 80	> 120

cm -mv = centimeters beneden maaiveld

') Bij deze grondwatertrappen wordt met een * achter de code als onderverdeling een droger deel onderscheiden, bijvoorbeeld met een GHG dieper dan 25 cm beneden maaiveld.

") Bij deze grondwatertrap wordt met een * achter de code als onderverdeling een zeer droog deel aangegeven, hier is de GHG dieper dan 140 cm beneden maaiveld.

figuur 75. de grondwatertrappenindeling voor Nederlandse bodemkaarten heeft vrij ruime grenzen (bron: Locher en De Bakker, 1990)

is te bepalen aan de hand van een vocht karakteristiek. Bij het ontbreken van vocht karakteristieken kan worden uitgegaan van globale normen zoals ze staan in figuur 76. Bij bomen in de verharding wordt voor de berekening doorgaans de gehele plantplaats als bewortelde zone genomen. Er wordt van uitgegaan dat de boom dit volume (uiteindelijk) volledig benut. Gewoonlijk vallen hangwaterprofielen met een dunne bewortelbare zone (tot 20 à 30 cm) wat betreft hun vochtleverend vermogen in de gradaties 4 of 5 (zie figuur 72). Bodems met een dikkere wortelzone vallen vaak in de gradaties 2 of 3. Een hangwaterprofiel valt slechts zelden in de gradatie 1. Behalve het vocht uit het doorwortelde bodemvolume kunnen de boomwortels ook nog vocht onttrekken aan een strook omringende, niet bewortelde grond. Wanneer deze bodem uit zand bestaat, dan zal nog onttrekking uit een laag met een dikte van 10 à 15 cm plaatsvinden. Bestaat de bodem uit zavel dan kan deze zone variëren van 30 tot 50 cm. Dit wordt het randeffect genoemd. Bij bomen op een hangwaterprofiel kan een berekening van het vochtleverend vermogen noodzakelijk zijn, om vast te stellen of de vochtvoorziening toereikend is.

randeffect

*noodzaak berekening
vochtleverend vermogen*

GRONDSOORT	HOEVEELHEID BESCHIKBAAR VOCHT IN LITER/M GROND
Straatzand (humusloos, matig fijn)	70
Humusarm duinzand	80
Grondmengsel (matig fijn zand + 2% organische stof)	100
Zeer zware klei	110
Matig zware klei	130
Humusarm dekzand (leemarm)	150
Grondmengsel (matig fijn zand + 5% organische stof)	150
Lichte klei	160
Matig humeus dekzand (leemarm)	160
Zware zavel	190
Grondmengsel (matig fijn zand + 8% organische stof)	200
Lichte zavel	210
Matig humeus dekzand (sterk lemig)	230
Löss	260
Zeer humeus dekzand (sterk lemig)	270
Veen (20% organische stof)	330
Vergraard veen (60% organische stof)	400

figuur 76. het beschikbaar vocht bepaalt in een hangwaterprofiel grotendeels het vochtleverend vermogen

Hetzelfde geldt voor contactprofielen, waarbij de tijdelijke opstijging vanuit het grondwater in de berekening wordt meegenomen. Zakt het grondwater in de loop van de zomer weg, dan is de boom voor de rest van het seizoen op de vochtvoorraad in de doorwortelde zone aangewezen. In hoofdstuk 10 wordt nader op deze berekeningen ingegaan.

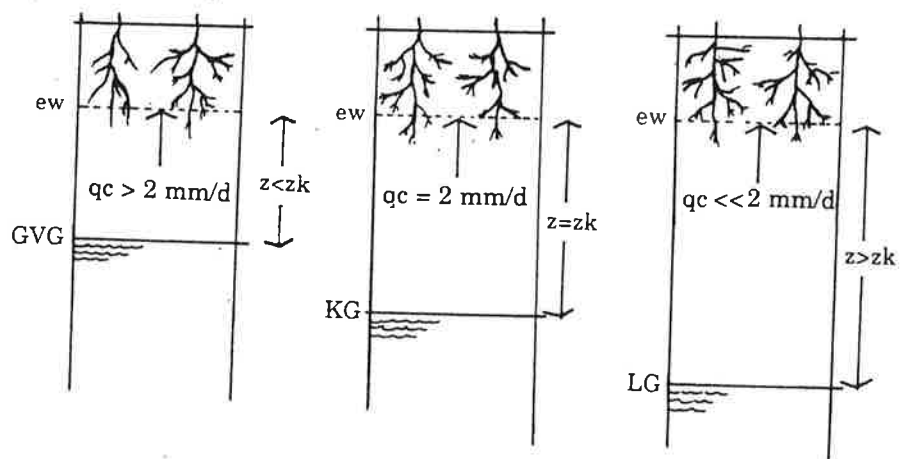
Voor grondwaterprofielen is een dergelijke berekening doorgaans niet noodzakelijk. Op deze profielen wordt immers het voor de verdamping van de boom onttrokken water continu aangevuld vanuit het grondwater. Hier is het van belang dat de aanvoer door middel van capillaire opstijging voldoende groot is.

grondwaterprofiel

kritieke stijgafstand

Voor indeling van een grond bij de grondwaterprofielen is de grondwaterstand aan het eind van het groeiseizoen in een 10% droog jaar doorslaggevend. De afstand (Z) tussen deze grondwaterstand en de onderkant van de bewortelde zone moet dan kleiner zijn dan Z_k . Z_k is de kritieke stijgafstand. Het is de maximale afstand waarover nog een capillaire nalevering van 2 mm per dag (2 liter per m^2 per dag) mogelijk is (figuur 77). bewortelde zone moetDe kritieke stijgafstand is afhankelijk van de grondsoort. Figuur 78 geeft waarden voor de kritieke stijgafstand Z_k in verschillende grondsoorten. De waarde van 2 mm per dag komt uit de landbouw en is de grens om tot de grondwaterprofielen te worden gerekend. Deze twee millimeter hoeft niet voldoende te zijn om volledig in de behoefte van de boom te voorzien. Hier kan meer voor nodig zijn, afhankelijk van andere omstandigheden.

- z verticale afstand t.o.v. de grondwaterspiegel
- z_k kritieke stijgafstand
- q_c capillaire stijgsnelheid
- ew effectieve worteldiepte
- GVG gemiddelde voorjaars-grondwaterstandsdiepte
- KG kritieke grondwaterstand (tijdens groeiseizoen)
- LG laagste grondwaterstandsdiepte in een 10%-droog jaar



figuur 77. bij $Z > Z_k$ levert het grondwater geen vocht meer aan de wortels (naar: Locher en De Bakker, 1990)

stijgsnelheid Dit alles wil niet zeggen dat het grondwater niet hoger kan opstijgen dan de in figuur 78 aangegeven waarden van Zk. Het water kan wel degelijk hoger komen. Naast de stijghoogte is voor de vochtvoorziening echter ook de stijgsnelheid van belang. Het gaat namelijk om de hoeveelheid water die per tijdseenheid (dag) aan de boom wordt geleverd. Hoe hoger het water komt, hoe lager de stijgsnelheid wordt en dus hoe kleiner de vochtleverantie is. Het water kan door steeds minder poriën opstijgen, waarbij steeds de grootste het eerst afvallen.

*grondwaterprofiel
bepalende factoren* De meeste zavel-, klei-, en veengronden en sommige natte zandgronden behoren tot de grondwaterprofielen. Factoren die daartoe bijdragen zijn:

- een ondiepe grondwaterstand (veengronden en natte zandgronden);
- een grote kritieke stijgafstand (onder andere zavel- en kleigronden met een aflopend profiel, dit is een profiel dat met de diepte geleidelijk minder kleihoudend wordt);
- een diepe beworteling bij diepe ontwatering (kleigronden).

Zeer zware kleigronden (kom- en knipkleigronden) worden vanwege de kleine Zk niet tot de grondwater-, maar tot de contactprofielen gerekend.

*vochtleverend vermogen
grondwaterprofiel* In de regel daalt het grondwaterniveau door wateronttrekking gedurende de zomer (het groeiseizoen). Wanneer aan het einde van een groeiseizoen in een 10% droog jaar Z kleiner is dan Zk, is in alle omstandigheden vochttransport naar de wortelzone gewaarborgd en hebben we te maken met een zeer groot vochtleverend vermogen (gradatie 1, zie figuur 72).

GRONDSOORT	Zk (in cm)	
	gemiddeld	spreiding
Kleiarm zeezand	40	30 - 50
Kleiïg zeezand	70	50 - 100
Kleiarm rivierzand	40	30 - 70
Leemarm dekzand	70	50 - 90
Zwak lemig dekzand	110	90 - 140
Sterk lemig dekzand	160	140 - 250
Lichte zavel	130	100 - 180
Zware zavel	90	70 - 120
Lichte klei	70	60 - 100
Matig zware klei	60	50 - 80
Zeer zware klei	40	30 - 60
Oud mosveen	30	10 - 40
Zeggeveen	40	30 - 60

figuur 78. kritieke stijgafstanden (Zk) bij verschillende grondsoorten
(bron: Locher en De Bakker, 1990: 281)

- grondwaterstandverlaging* Hoe hoger de grondwaterstand van een grondwaterprofiel, des te groter is de invloed van een (kunstmatige) grondwaterstandverlaging. De wortels hebben zich op het hoge grondwater ingesteld en de beworteling is niet diep. Zakt het grondwater nu beneden de Z_k weg, dan wordt de boom met zijn oppervlakkige wortelstelsel erg droogtegevoelig.
- kleine kritieke stijgafstand* Ook een kleine Z_k heeft een grote invloed. Op bijvoorbeeld een zandgrond met een kleine Z_k kunnen geringe verschillen in hoogteligging ten opzicht van het grondwater al grote verschillen in de vochtaanvoer betekenen. Goede bewortelingsmogelijkheden zijn hier, maar ook in het algemeen, van groot belang.
- bereikbaarheid grondwater* Wanneer het grondwater op bereikbare diepte voorkomt, is het daarom altijd zinvol de groeiplaats tot ongeveer 10 cm boven het laagste grondwaterniveau (GLG) doorwortelbaar te maken. Op deze manier kan al gauw 20 mm per dag worden geleverd. In het algemeen zullen geen problemen met de vochtvoorziening ontstaan wanneer de grondwaterstand in het groeiseizoen (GLG) niet dieper daalt dan 30 cm (zand) tot 50 à 80 cm (zavel) onder de wortelzone.
- grondpijlers* Het is ook mogelijk, bij wat grotere diepte van de grondwaterstand, de groeiplaats door middel van zogenaamde grondpijlers met het grondwater te verbinden. Met name de zogenaamde waterhalers van het wortelstelsel groeien deze grondpijlers in. Het kleinere contactoppervlak met het grondwater (minder vierkante meters) betekent echter wel een kleinere vochtleverantie dan bij een contact over de gehele groeiplaats.
- contactprofiel* Bij contactprofielen (tijdelijke grondwaterprofielen) is slechts gedurende een deel van het groeiseizoen een capillaire aanvoer van 2 mm of meer per dag naar de wortelzone mogelijk (zie figuur 77). Aan het begin van het groeiseizoen is de grondwaterstand nog zodanig dat voldoende capillair vocht wordt geleverd ($Z < Z_k$). Door daling van de grondwaterstand in de loop van het groeiseizoen komt deze toevoer echter tot stilstand. Hoe eerder dat in het seizoen gebeurt, hoe meer zo'n profiel gaat lijken op een hangwaterprofiel.
- vochtleverend vermogen contactprofiel* Contactprofielen behoren wat het vochtleverend vermogen betreft tot de gradaties 4, 3, of 2, en bij grote bewortelingsdiepte ook wel tot gradatie 1 (zie figuur 72). De hoeveelheid beschikbaar vocht in de bewortelbare zone (zie figuur 76) is in eerste instantie bepalend voor de gradatie. Afhankelijk van de periode waarover voldoende capillaire aanvoer naar de wortelzone plaatsvindt, schuift de indeling nog een of twee gradaties op.

Ter illustratie een voorbeeld.

- Stel een doorwortelde zone bevat ongeveer 120 mm vocht (gradatie 3). Hiervan is bijvoorbeeld sprake bij een effectieve bewortelingsdiepte van 80 cm in een grondmengsel met 5 % organische stof. Daaronder is in dit voorbeeld leemarm dekzand aanwezig ($Z_k = 70$ cm).
- Stel, in een bepaald jaar is het neerslagtekort in het groeiseizoen ongeveer 170 mm. Van het begin van het groeiseizoen tot begin juni bedraagt het neerslagtekort ongeveer 60 mm.
- Het blijkt dat op dit profiel na 1 juni het grondwater dieper dan 70 cm onder de wortelzone wegzakt. Op dat moment houdt de vochtlevering vanuit het grondwater op. Tot op dat moment echter heeft de grond het neerslagtekort (= 60 mm) uit het grondwater kunnen dekken, zonder de "eigen" voorraad aan te spreken.
- Vanaf 1 juni is de plant aangewezen op de vochtvoorraad in het doorwortelde profiel om het neerslagtekort aan te vullen. Dit is de volle 120 mm die het profiel kan bevatten.
- Dit betekent een vochtleverend vermogen van:

60 mm	van het begin van het groeiseizoen	
	tot 1 juni vanuit het grondwater	
120 mm	vanaf 1 juni geleverd uit het beschikbaar	
_____+	vocht in de bewortelde zone	
180 mm	dat wil zeggen gradatie 2	
	(150 tot 200 mm, zie figuur 72).	

De boom heeft geen last van droogte door de extra 60 mm uit het grondwater tot 1 juni. Met alleen de 120 mm hangwater was er een tekort opgetreden.

4.5 VOCHTBALANS VAN DE BOOM

vochtbehoefte

Zoals reeds aan het begin van dit hoofdstuk is aangegeven, hangt de vochtbehoefte van een boom voor het grootste gedeelte samen met de verdamping. De mate waarin een boom verdampt hangt af van:

- het totaal verdampend bladoppervlak (bladbezetting of dichtheid bladerdek of totale bladmassa);
- de stand van de huidmondjes;
- het dampspanningsdeficit, dit wordt bepaald door:
 - de luchttemperatuur;
 - de hoeveelheid zonnestraling;
 - de windsnelheid;
 - de luchtvochtigheid;
- het vocht aanbod (vanuit de bodem).

verdamping open water

De mate van verdamping van planten is dus voor een deel afhankelijk van factoren in de plant zelf en voor een deel van externe factoren. Deze externe factoren zijn dezelfde als die, welke de verdamping van open water bepalen. Daarom is de open water verdamping op een bepaald moment als basis te gebruiken voor het vaststellen van verdampingswaarden van de boom op datzelfde moment. Door onder andere het KNMI worden dagelijks metingen verricht naar de verdamping van open water (E_o). Deze wordt voor 15 weerstations weergegeven in het "Maandelijks overzicht der weersgesteldheid". Het KNMI geeft ook dagelijks verdampingsgegevens: de zogenaamde referentieverdamping. Door een minder nauwkeurige, maar daardoor wel snellere berekeningswijze is de referentieverdamping ($E\text{-ref}$) niet geheel gelijk aan de E_o uit de maandelijkse overzichten. Wel kunnen nu dagelijks de cijfers van de vorige dag van een aantal waarnemingsstations worden gemeld via de radio (mededelingen voor de land- en tuinbouw). Het is ook mogelijk deze telefonisch op te vragen bij het betreffende weerstation.

referentieverdamping

In een gemiddeld groeiseizoen is de referentieverdamping ongeveer 500 mm. De referentieverdamping geldt voor de situatie rond het weerstation. Tenzij het weerstation in de stad staat, wijkt het klimaat, en dus de verdamping, in de stad iets af van de gemeten verdamping bij het weerstation. Voor nauwkeurige berekeningen moet dus met zorg de juiste referentieverdamping worden verkregen. Voor globale berekeningen, om een gemiddelde indruk te verkrijgen, kan met de gemiddelde waarde van 500 mm worden gewerkt.

potentiële verdamping

Uit de referentieverdamping wordt via een correctiefactor f de potentiële verdamping van een gewas afgeleid volgens $E\text{-pot} = f \times E\text{-ref}$. De correctiefactor f is afhankelijk van het gewas, het groeistadium en de bedekkingsgraad. Een boom is niet helemaal vergelijkbaar met een landbouwgewas. De boom vangt meer wind en heeft meer bladetages. Toch kan op dezelfde manier als in de landbouw ook voor een boom de potentiële verdamping worden afgeleid uit de referentieverdamping. Bomen zijn onderling niet over één kam te scheren. De ene boom staat alleen in het open veld, een andere in een dicht bos, omgeven en beschermt door omringende bomen. Door de vrijstaande boom waait meer wind, wat de verdamping verhoogt ten opzichte van de bosboom. Bomen verschillen daarnaast in het aantal vierkante meters totaal bladoppervlak. Afhankelijk van de situatie wordt daarom met verschillende waarden voor f gewerkt. Voor bomen in de



figuur 79. een L.A.I. van resp. 1,7, 3,0 en 5,0: minder blad (en dus minder verdamping) betekent niet direct een minder fraaie boom

"Leaf Area Index"

gebouwde omgeving varieert f van 1,2 tot 2,0, met als veel voorkomende waarde 1,5.

Voor een nauwkeurige bepaling van E -pot moet ook de bladbezetting per boom hierbij worden betrokken (onder aanpassing van f). Deze bladbezetting wordt uitgedrukt in de "Leaf Area Index" (L.A.I.). Dit is het aantal vierkante meters blad per vierkante meter kroonprojectie. De Leaf Area Index kan voor bomen in de gebouwde omgeving globaal variëren tussen 2 en 8 m² blad/m² kroonprojectie. Dit is mede afhankelijk van de soort. Een gemiddelde boom met een goede conditie heeft een L.A.I. van 4. Bij een L.A.I. groter dan 5 kan, staand onder de boom en recht omhoog kijkend, nauwelijks door de kroon heen worden gekeken. Een boom met een L.A.I. van 2 kan er echter nog heel redelijk uitzien, maar verdampt minder dan het gras wat eronder staat. Figuur 79 laat links het aanzicht en rechts het doorzicht zien van drie bomen met een verschillende L.A.I. De L.A.I. is hier berekend volgens de formule:

$$L.A.I = \frac{-\ln(\text{doorzicht-fractie})}{K}$$

waarbij geldt, wanneer van onder de kroon recht omhoog wordt gekeken:

$$K = \frac{\text{zichtbaar bladoppervlak}}{\text{werkelijk bladoppervlak}}$$

Over de L.A.I. en de mate van verdamping van de boom is nog niet alles duidelijk. Bovendien is het nog niet mogelijk de L.A.I. (met name K) in het veld op eenvoudige wijze betrouwbaar te bepalen. Daarom moet voorlopig nog van de volgende richtlijnen worden uitgegaan:

<i>waarden potentiële verdamping</i>	E-pot in een bos	=	1,0 x E-ref	=	500 mm
	E-pot vrijstaande boom				
	in het open veld	=	1,5 x E-ref	=	750 mm
	E-pot parkboom in min of meer				
	gesloten beplanting	=	1,0 x E-ref	=	500 mm
	E-pot laanboom (gesloten rij) **	=	1,5 x E-ref	=	750 mm
E-pot solitaire straatboom ***	=	2,0 x E-ref	=	1000 mm	

* E-ref = 500 mm

** of solitaire boom op schaduwrijke plaats

*** geldt voor dichtbebouwde gebieden, aan de zuidzijde van de gevels.

Een boom in de stad verdampt meer dan een boom in het bos (bij dezelfde L.A.I.) door een hogere temperatuur in die stad en door de lagere luchtvochtigheid. Ook 's nachts

BOOMSOORT (-CULTIVAR)	WATER- VERBRUIK GEHELE BOOM (l)	WATERVERBRUIK (LITER PER M ² BLADOPPERVLAK)	PRODUKTIVITEIT (TOENAME STAMVOLUME) VAN HET WATERVERBRUIK (dm ³ /100 l)	PRODUKTIVITEIT (VORMING BLADOPPERVLAK) VAN HET WATERVERBRUIK (m ² /100 l)
<i>Salix alba</i> 'Liempde'	823	159	0,60	0,63
<i>Populus</i> 'Robusta'	747	99	0,29	1,00
<i>Populus</i> 'Barn'	850	97	1,10	1,00
<i>Populus</i> 'Oxford'	657	90	0,45	1,10
<i>Fraxinus excelsior</i>	342	96	0,73	0,96
<i>Alnus glutinosa</i>	369	94	0,90	0,89
<i>Acer pseudoplatanus</i>	110	87	0,85	0,87
<i>Acer platanoides</i>	141	56	1,30	1,80

Gegevens van jonge bomen onder optimale vochtvoorziening

figuur 80. waterverbruik en water-economie (naar: Braun, 1976)

verdamping en bladkoeling

is de temperatuur in de gebouwde omgeving hoger dan daarbuiten. Wegen en gebouwen slaan overdag een deel van de warmte op en geven die later op de avond en in de nacht weer af in de vorm van warmtestraling.

In tegenstelling tot wat wel wordt beweerd, verdampt een boom niet om z'n bladeren te koelen. Het kleinste zuchtje wind door de kroon zorgt voor voldoende warmte-uitwisseling met de langsstromende lucht. Het blad neemt dus de luchttemperatuur aan, of het nu door de zon wordt aangestraald of niet. Koeling en opwarming van bladeren wordt bepaald door de luchttemperatuur. Koeling door verdamping is wel nodig bij gras en andere lage, gesloten gewassen, omdat daar de lucht stilstaat. Koeling door verdamping is dan bij bomen wellicht alleen van belang bij volkomen windstil weer of op een zodanig beschutte plaats dat de lucht stilstaat.

water-economie

Of de boom ook werkelijk de potentiële hoeveelheid vocht zal verdampen hangt af van het vocht aanbod en de zuinigheid waarmee de boom dit vocht gebruikt. Het is bekend dat niet iedere boomsoort (of cultivar) evenveel water gebruikt en er even zuinig mee omspringt wanneer het voorhanden is. Bomen verschillen in hun water-economie. Dit wordt geïllustreerd in figuur 80. Vooral de *Acer platanoides* enerzijds en de *Salix alba* anderzijds springen eruit. Uit de tabel is echter niet af te leiden wat de bomen doen bij een vochttekort. Wel zal bij een zuinige boom minder snel een tekort optreden. Het vermoeden bestaat dat er relaties zijn tussen de verdamping enerzijds en de huidmondjesdichtheid op het blad, de huidmondjesgrootte, de dikte en scheikundige samenstelling van de cuticula en de grootte van het blad anderzijds. Op dit terrein is onderzoek gaande.

actuele verdamping

Op basis van gegevens uit het bosbouwkundig onderzoek wordt gesteld, dat een "gemiddelde" boom nog voldoende vitaal blijft wanneer de werkelijke (actuele) verdamping (E-act) in één groeiseizoen gemiddeld 75 % van de potentiële verdamping bedraagt. In een 10 % droog jaar kan de verdamping daarbij (tijdelijk) dalen tot 50 % van E-pot. Er zijn echter ook soorten die met minder toe kunnen. Sommige droogteresistente soorten hebben genoeg aan 20 % van E-pot. Hierover is echter nog te weinig bekend om concrete richtlijnen per soort te kunnen geven. Bij verdampingsberekeningen moet daarom worden uitgegaan van 75 % van E-pot. Er zou dan eenvoudig de formule $E\text{-act} = 75 \% \times E\text{-pot}$ kunnen worden gebruikt. Bij een dergelijke rekenkundige benadering wordt ervan uitgegaan dat de boom het gehele groeiseizoen op het minimum leeft en dat er aan het eind geen druppel opneembaar vocht meer in de grond aanwezig is. Aangezien aan het einde van het seizoen (september) de neerslag de (open water) verdamping weer gaat overtreffen (figuur 71), lijkt een dergelijke situatie te theoretisch. Daarom wordt een marge van 5 % bij de berekeningen aangehouden. Deze 5 % is gebaseerd op praktijkervaringen. Wanneer er verdampingsberekeningen worden gemaakt, kan daarom worden uitgegaan van de volgende normen voor een nog acceptabele groei (conditie):

verdampingsnormen boom

E-act parkboom	= 80 % x 500	= 400 mm (= l/m ² kroonprojectie)
E-act laanboom	= 80 % x 750	= 600 mm (= l/m ² kroonprojectie)
E-act straatboom	= 80 % x 1000	= 800 mm (= l/m ² kroonprojectie)

verdamping en kroondiameter

Omdat het aantal mm hetzelfde is als het aantal liters per m², kan de verdamping in liters voor één boom worden bepaald door het oppervlak van de kroon (de kroonprojectie) te vermenigvuldigen met de potentiële verdamping voor het beplantingstype (laanboom, straatboom).

Met het toenemen van de kroondiameter neemt de kroonprojectie en dus de verdamping kwadratisch toe. Een (bolvormige) kroon van vijf meter doorsnede verdampst $3,14 \times (2,5)^2 \times 600 = 11.775$ liter per seizoen, een kroon met een doorsnede van 10 meter 47.100 liter. Een verdubbeling van de diameter betekent vier maal zoveel verdamping.

De kroonprojectie is representatief voor een boom met een bolvormige of piramidale kroon. Wanneer de kroonvorm hiervan sterk afwijkt, bijvoorbeeld bij zuilvormen, dient de kroonprojectie met een omrekeningsfactor te worden bijgesteld (zie figuur 81).

In deze factor wordt de hoogte (lengte) van de kroon (H)

gedeeld door de breedte (diameter D). Bij een zuilvormige kroon ($H > D$) verdampt de boom dus een grotere hoeveelheid water per oppervlak loodrechte projectie. Het verband tussen diameter en verdamping blijft echter kwadratisch.

Bij bomen in een gesloten laanbeplanting ligt dit iets anders. Bij een bepaalde kroondiameter gaan de kronen elkaar raken. Dit vermindert de verdamping. Wanneer de kroon nu nog verder uitgroeit, verliest zij haar oorspronkelijke ronde vorm en wordt ei-rond tot (afgerond) rechthoekig, omdat zij nog maar naar twee kanten (buiten de rij) kan groeien.

vochtaanbod

Naast de verdamping is het vochtaanbod van belang. Het vochtaanbod voor de boom bestaat uit:

- de infiltrerende ofwel effectieve neerslag;
- de vochtvoorraad in de bodem aan het begin van het groeiseizoen;
- de (eventuele) levering vanuit het grondwater.

neerslag

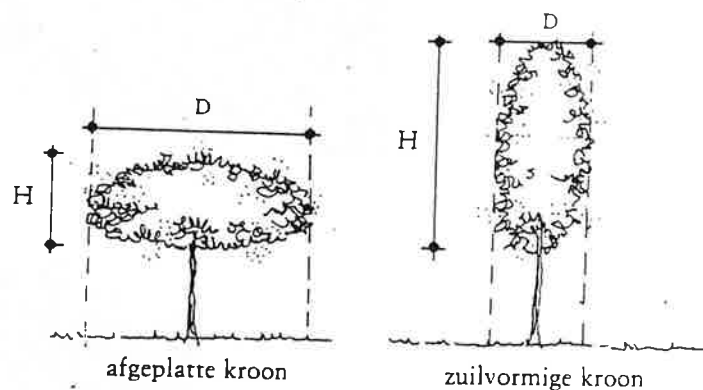
Evenals de verdamping verschilt de neerslag van jaar tot jaar. Voor Nederland is de gemiddelde neerslag per maand terug te vinden in figuur 71.

effectieve neerslag

In het groeiseizoen (1 mei tot 1 oktober) bedraagt de neerslag in een gemiddeld jaar 350 mm (l/m^2). Dit kan variëren van 125 mm in een zeer droog, tot 540 mm in een zeer nat jaar. Een gedeelte van deze neerslag wordt opgevangen door het bladerdek en verdampt vandaar (de zogenaamde interceptie). De rest bereikt de grond. Een deel hiervan vloeit af over het oppervlak en het resterende deel zakt in de bodem. Dit laatste is de effectieve neerslag.

afstroming via oppervlak

Neerslag die via het oppervlak (bijvoorbeeld de verharding) afstroomt betekent een verlies voor de boom. Hoeveel water



$$\text{kroonprojectie} = 3,14 \times (0,5 D)^2 \times H/D$$

figuur 81. omrekeningsfactoren voor de kroonprojectie bij afwijkende kroonvormen

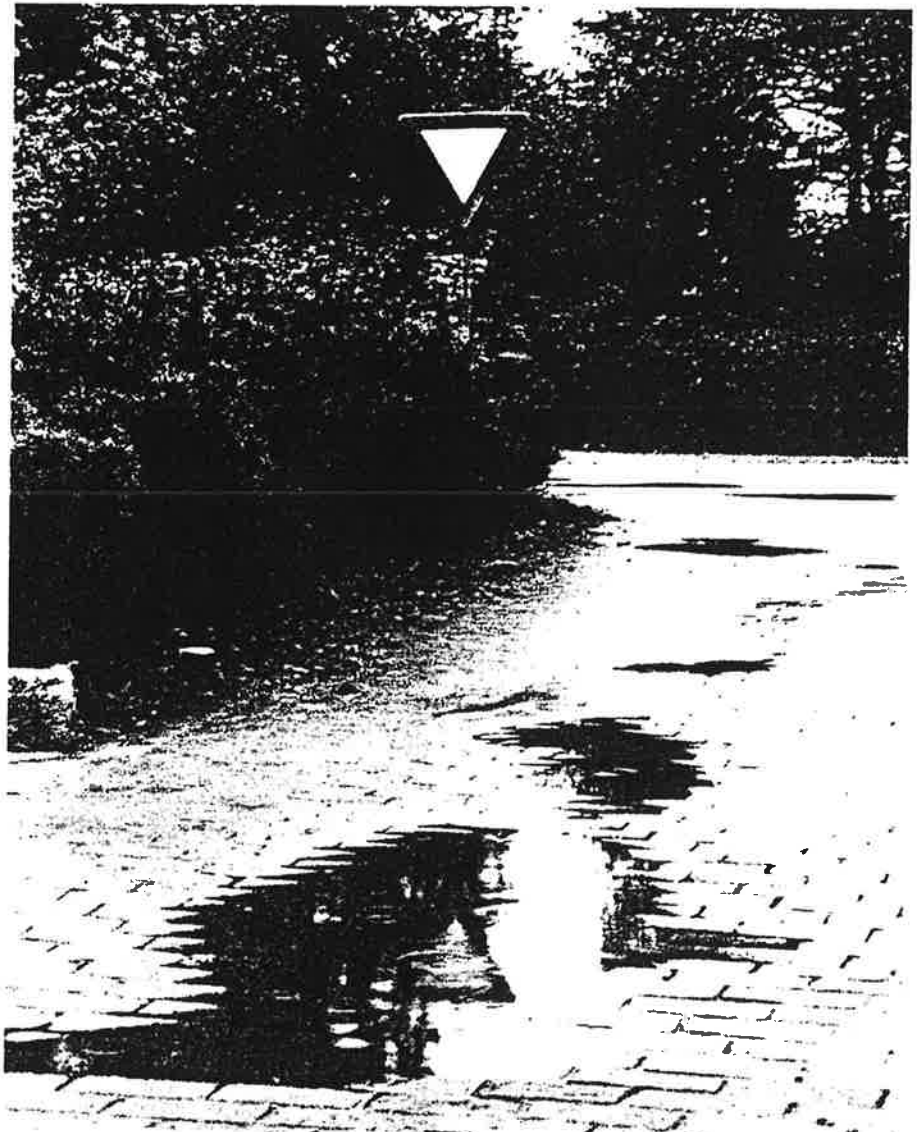
afstroomt zonder dat het boven de doorwortelde ruimte kan infiltreren, is afhankelijk van de neerslagintensiteit en de infiltratiesnelheid van het bodemoppervlak.

neerslagintensiteit

De neerslagintensiteit speelt een grote rol. Wanneer na een periode van droogte het intensief begint te regenen, kan een op zich open bodem dichtslaan. Zo staan bij een wolkbreuk de straten, maar ook open grond, blank, terwijl de grond zo goed als droog blijft. Bij een zacht buitje kan de bodem wel goed worden bevochtigd en kan daarna ook intensievere regen aan.

infiltratiesnelheid

Bij verhardingen moet ook rekening worden gehouden met de waterdoorlatendheid van het oppervlak en het afschot (de helling) van de verharding. Bij een verharding kan het water alleen maar via de voegen infiltreren, in een open grond door bijna alle poriën. In principe kan alle neerslag infiltreren zolang de neerslagintensiteit lager blijft dan de infiltratiesnelheid. Valt er op een bepaald moment meer regen dan er kan infiltreren, dan



figuur 82. plasvorming en afstroming treden op als het water niet snel genoeg kan wegzakken

treedt afvloeiing of plasvorming op (figuur 82). Een lage infiltratiesnelheid en een groot afschot geven veel afstroming. Bij bomen in de verharding stroomt in veel situaties 50 à 60 % (tot soms zelfs 85 %) onbenut in de straatkolken. Een groter aantal, of bredere, voegen resulteert in meer infiltratie. De boom is het meest gediend met een zo groot mogelijke infiltratie en waterberging. De civieltechnische eisen zijn vaak gericht op een snelle afvoer. Gelukkig voor de beplanting dringt steeds meer het besef door dat een grotere waterberging in de bodem (dus meer infiltratie) leidt tot kostenbesparing op rioleringsystemen en zuive-ringsinstallaties, omdat er minder hoeft te worden afgevoerd.

infiltratieberekening

Om uit te kunnen rekenen hoeveel neerslag door een oppervlak infiltreert is een omrekeningstabel gegeven (figuur 83). Deze tabel is gebaseerd op de neerslaggegevens (intensiteit, tijdsduur, hoeveelheid) gedurende een groot aantal jaren. In de zomer infiltreert minder dan 's winters, omdat de intensiteit van de buien in de zomer gemiddeld groter is waardoor er meer water afstroomt. Wanneer de infiltratiesnelheid (I) van het water in het bodemoppervlak bekend is, kan met behulp van deze tabel de infiltratie worden berekend. Omdat de infiltratie bij open bodems veel groter is dan 20 mm/uur, benadert de infiltratie hier de 100% (= 350 mm per groeiseizoen). Bij verhardingen treedt slechts infiltratie op door de voegen. De I van een verhard oppervlak ($I_s = I\text{-straat}$) is hierdoor gelijk aan het percentage voegen van het oppervlak maal de I_v (voeg) van de voegvulling. De I_v van normaal vervuild straatzand is ongeveer 450 mm/uur (BAKKER, 1992). Het voegenzand is losser dan vrij zand dat belopen wordt en heeft vaak nog gangetjes van allerlei beestjes. Daardoor is de infiltratiesnelheid per voeg zo groot. De totale infiltratie is desondanks laag, omdat de voegen altijd maar een paar procent van het verhardingsoppervlak uitmaken.

infiltratie door verharding

PERIODE	INFILTRATIESNELHEID (I) IN MM/UUR (= L/M ² /UUR)									
	0,33	1	2	3	4	5	6	8	10	20
1-5/1-10	16	37	58	68	75	79	82	86	89	95
1-10/1-5	25	54	79	88	93	95	97	98	99	100
jaar	20	46	69	79	84	88	88	92	94	98

figuur 83. percentage van neerslag dat infiltreert bij verschillende infiltratiesnelheden (bron: Bakker, 1983)

*infiltratiesnelheid
en voegenpercentage*

Het percentage voegen is geen vast gegeven. Dit hangt per situatie af van het type bestrating en de wijze waarop deze is gelegd. Voor nauwkeurige waarden moet daarom het percentage ter plaatse worden gemeten en berekend. Figuur 84 geeft uit onderzoek berekende gemiddelde waarden voor voegenpercentages bij verschillende verhardingstypen, en kan als indicatie gelden. Uit de figuur blijkt bijvoorbeeld dat er bij vervanging van trottoirtegels door klinkers 1,5 maal zoveel regenwater voor de boom beschikbaar komt (figuur 85). De keuze van het verhar-

BOVENLAAG	MATEN lxbxh	% VOEG 1)	INFILTRATIE SNELHEID I-s (mm/u) 2)	% INFIL- TRATIE 1-5 tot 1-10 3)	HOEVEELHEID INFILTRATIE 1-5 tot 1-10 (mm) 4)
warm asfalt	x10	0	0	0	0
tegels	60x60x7	0,5	2,3	61	215
		0,6	2,7	65	230
tegels	60x40x7	0,7	3,2	69	240
		0,8	3,6	72	250
tegels	30x30x5	1,1	5,0	79	275
tegels	30x30x7	1,1	5,0	79	275
klinkers (b.b.k.)	20x10x10	4,0	18,0	94	330
		5,1	23,0	95	335
klinkers (w.f.)	20x 5x10	7,7	34,7	95	335
ventilatiegels	60x60x7	1,8	8,1	86	300
		1,9	8,6	87	205
ventilatiegels	30x30x5	5,6	25,2	95	335
stooftegel	30x30x6	11,9	53,6	95	330
graskei	20x20x10	30,0	70 ⁵⁾	95	330
kinderkopjes	x15	6,0	27	95	330
poreuze tegels	30x30x 3,5	niet			
nieuw (E = 0,25) ⁶⁾		meege-	> 1000	100	350
na 4 jaar		rekend	1	37	130
poreus carpave	x10				
nieuw (E = 0,30)			> 1000	100	350
na 2 jaar onder druk verkeer			ca. 1	37	130
zeer open asfaltbeton (E = 0,35)	x12				
na 6 jaar (extensief			1500	100	350
na 12-jaar gebruik)			1500	100	350
open grond/					
gravel	--	--	>>20	100	350
(zandgrond			40 - 80)		
(kleigrond			30 - 50)		

Bij verharding gerekend met matig vervuilde voeg. (Iv (voegvulling) = 200 l/m /uur).

1) gemeten voeggrootte, gedeeld door gemeten oppervlak

2) $I_s = \% \text{ voeg} / 100 \times I_v = \% \text{ voeg} / 100 \times 450 \text{ mm/uur}$.

3) zie figuur 83

4) 350 mm x % infiltratie, op veelvoud van 5

5) gerekend met lagere I_s , daar infiltratie door begroeiing en vervuiling kan worden geremd

6) E = porositeit (cm /cm)

dingsmateriaal kan dus van groot belang zijn voor de vochtvoorziening van de boom. Het kiezen voor een ander type verhardingsmateriaal levert een oppervlak met een andere doorlatendheid op (figuur 86).

poreuze tegels

Om de infiltratie via de bestrating te vergroten zijn poreuze tegels te verkrijgen. Wanneer deze tegels nieuw zijn, laten ze inderdaad veel meer water door dan een dek met gewone tegels. Vuil, slib en algengroei doen met de tijd de doorlatendheid afnemen. Het is mogelijk dat de tegels uiteindelijk totaal geen vocht meer doorlaten. Infiltratie is dan alleen nog mogelijk via de voegen.

poreus asfalt

Poreus asfalt wordt in de eerste plaats gebruikt om het regenwater snel van het wegoppervlak te krijgen. Het doorgaans maximaal verdichte wegcunet zal geen beworteling onder het asfalt mogelijk maken. Alleen via zijdelingse aanvoer kunnen wortels dus van dit water profiteren. Overigens geldt ook hier: vuil verstopt de poriën. Wordt op deze wegen gladheidsbestrijding met zout toegepast, dan bestaat het gevaar voor inspoeling van dit zout in de wortelruimte.

vochtvoorraad

Naast het infiltrerende deel van de neerslag in het groeiseizoen kan de boom beschikken over de vochtvoorraad die is opgebouwd in de winter. In de meeste gevallen zal de bodem aan het begin van het groeiseizoen op veldcapaciteit zijn. Ook dit is echter (mede) afhankelijk van de doorlatendheid van de verharding. In het winterseizoen valt gemiddeld ongeveer 400 mm neerslag. Met behulp van de figuren 83 en 84 is te berekenen hoeveel hiervan infiltreert. Is dit minder dan de hoeveelheid vocht bij veldcapaciteit, dan bestaat er een grote kans dat de bodem in het voorjaar niet op veldcapaciteit is. De resterende hoeveelheid vocht aan het eind van het vorige groeiseizoen speelt ook een rol, maar deze zal onder de verharding doorgaans niet groot zijn. Wel kan gedurende de winter de vochtvoorraad mede door capillair opstijgend grondwater worden aangevuld.

vochtbalans

Nu aan de gegevens uit de vochtbalans waarden zijn toe te kennen, is het mogelijk het schema uit figuur 68 in te vullen. Het saldo van deze vochtbalans geeft aan in welke mate er een vochtoverschot of -tekort is te verwachten. In figuur 87 is de vochtbalans nogmaals schematisch weergegeven.

*grondwaterprofiel
en vochtbalans*

Op een grondwaterprofiel zal de vochtbalans doorgaans een overschot vertonen. Hiervoor moeten de wortels wel over een voldoende oppervlakte contact kunnen maken met de capillaire zone, zodat de waterbehoefte voldoende wordt

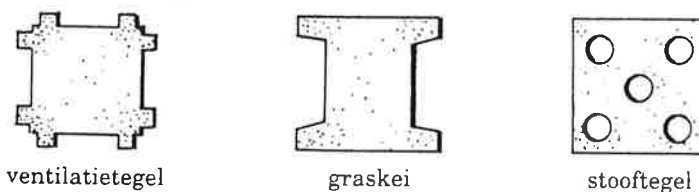


figuur 85. een klinkerverharding laat door een groter aantal voegen beduidend meer water door dan een tegelverharding

*vuistregel vocht-
voorziening*

gedekt. Wanneer de wortels over een oppervlak van bijvoorbeeld 10 m^2 tot dicht bij het grondwater (10 à 20 cm) kunnen groeien, dan voorziet het grondwater voor 90 tot 95% in de vochtbehoefte.

Er is een vuistregel die zegt, dat een boom $\frac{3}{4} \text{ m}^3$ doorwortelbare grond nodig heeft per m^2 kroonprojectie. Dit geldt bij een grond(mengsel) met 3 tot 5% organische stof. De boom kan dan over voldoende vocht en voedings-elementen (stikstof) beschikken. Deze vuistregel geldt bij grondwaterprofielen, en bij een hangwaterprofiel met 100% infiltratie en minimaal gradatie 2 wat betreft het vochtleverend vermogen (figuur 72). Wanneer de bodem wordt afgedekt met verharding, dan is bij een hangwaterprofiel een groter bodemvolume per vierkante meter kroonprojectie nodig. Bij gronden met een organische-stofgehalte groter dan 7% kan bij voldoende vochtvoorziening worden uitgegaan van $\frac{1}{2} \text{ m}^3/\text{m}^2$ kroonprojectie. Door het hogere organische-stofgehalte kan toch in de stikstofbehoefte worden voorzien. Het zal in

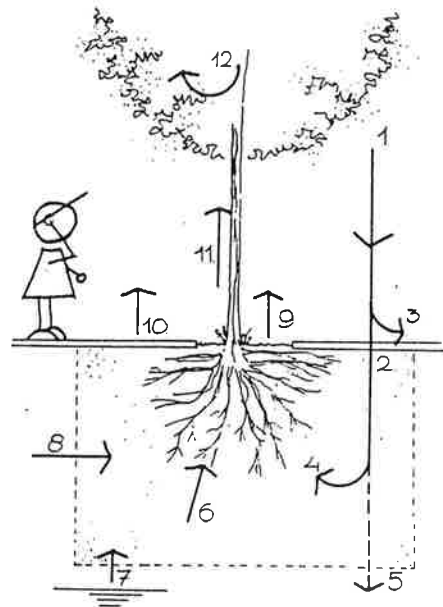


ventilatietegel

graskei

stooftegel

figuur 86. de speciale verhardingselementen voor vocht- en luchtdoorlating laten niet allemaal even veel door (naar: BBK)



- | | |
|----------------------------|--|
| 1: neerslag | - 350 mm in groeiseizoen, 400 mm in winter. totaal 750 mm |
| 2: infiltratie | - zie figuren 83 en 84 |
| 3: afstroming | - $= 1 - (2 + 10)$ |
| 4: toevoeging | - $= 2 - 5$ (in de zomer = 2) |
| 5: uitzakking | - neerslagoverschot, nadat de bodem op veldcapaciteit is |
| 6: vochtvoorraad | - bepalen via vocht karakteristiek of figuur 76 |
| 7: capillaire opstijging | - > 2 mm wanneer $Z < Z_k$ |
| 8: zijdelingse aanvoer | - uit 10 tot 15 cm in zand en 30 tot 50 cm in zavel = betreffende volume x vochtbergend vermogen (fig. 76) |
| 9: verdamping bovenlaag | - verwaarloosbaar klein bij bomen in de verharding |
| 10: verdamping verharding | - 35 mm van 1-5 tot 1-10, 45 mm van 1-10 tot 1-5 (Bebelaar, 1981) |
| 11: verdamping bladeren | - E-act. = 80 % x E-pot = 400 tot 800 mm |
| 12: verdamping interceptie | - geen concrete waarden bekend |

figuur 87. vochtbalans: factoren die de vochtvoorziening van de boom bepalen

veel gevallen zo zijn, dat voor voldoende vocht de nalevering vanuit het grondwater meer moet zijn dan de minimale 2 mm per dag die het indelen bij een grondwaterprofiel uitmaken. Dit omdat een kleiner doorwortelbaar volume meestal ook een kleiner oppervlak betekent waarover de wortels contact kunnen hebben met het grondwater.

hangwaterprofiel

Bij bomen geplant op hangwaterprofielen is een berekening van de vochtbalans zeker nuttig. In een dergelijke berekening wordt eerst de verdamping, dat is de vochtbehoefte, van de boom berekend door de E-act te vermenigvuldigen met de (uiteindelijke) kroonprojectie. Deze behoefte dient te worden gedekt door de infiltratie van de neerslag, de vochtlevering uit de effectieve wortelzone en

uit het randeffect. Met deze berekening is te begroten of het geplande doorwortelbare volume groot genoeg is om het nodige vocht te leveren. In het hoofdstuk over voorbeeldberekeningen (hoofdstuk 10) wordt op deze manier gerekend.

waterkwaliteit

Naast de hoeveelheid water speelt ook de kwaliteit van het water een belangrijke rol bij de vochtvoorziening van de boom. Een bekend voorbeeld is zout. Zout water moet zoveel mogelijk uit de wortelzone worden geweerd.

Daarnaast is het van belang, dat in de winter en het vroege voorjaar meer water door het wegdek boven de wortels kan infiltreren dan door de bodem van de groeiplaats kan worden vastgehouden. Het zout van de gladheidsbestrijding (en eventuele andere overtollige mineralen) spoelt dan uit naar de ondergrond.

Naast de neerslag speelt ook de kwaliteit van het grondwater dat de wortelzone kan bereiken een rol. Dit mag niet verontreinigd zijn. Opstijgend water is arm aan zuurstof. Wanneer het water op natuurlijke wijze opstijgt, is dit geen probleem. Opgepompt water bij bronbemaling kan echter beter niet direct voor het watergeven aan de bomen ter plaatse worden gebruikt, hoe nodig de bomen dit water ook mogen hebben.

Naast zuurstofarm is dit water namelijk erg koud.

Een boombeplanting in de kuststreken van ons land, niet te ver van de kust, kan door wateronttrekking aan het (zoete) grondwater het daaronder zittende zoute grondwater naar de wortelzone trekken.

watergeven jonge boom

Pas geplante bomen kunnen vochtgebrek krijgen omdat hun wortelstelsel door het verplanten is verkleind. In droge perioden zal dan water moeten worden gegeven (figuur 88). Bomen geplant in een goede plantplaats hebben na één à twee groeiseizoenen in het algemeen voldoende nieuwe wortels ontwikkeld om genoeg vocht op te kunnen nemen. Watergeven bij jonge bomen is dus in principe een tijdelijke bezigheid.

periodiek watergeven

Er zullen echter in de toekomst problemen ontstaan wanneer de boom in een te kleine plantplaats staat. Dit is het geval bij een plantmethode waarbij de plantplaats met 1 tot 4 m³ grond is verbeterd en de boom de omringende grond niet kan doorwortelen. Na 10 tot 15 jaar treedt plotseling een groeiremming op. De vochtlevering dekt de behoefte van de steeds groter geworden kroon niet meer en dit uit zich dan vrij "plotseling" tijdens een droge zomer. Als maatregel valt te denken aan periodiek watergeven in droge tijden. Dit moet dan echter worden gezien als een permanente maatregel. Er moet bewust en op de lange termijn voor worden



figuur 88. pas geplante bomen moeten bij droog weer regelmatig water krijgen

gekozen. De boom moet tot in lengte van jaren op de noodzakelijke tijdstippen ook werkelijk water krijgen. In wezen is dit echter een erg kunstmatige benadering, die soms hoge kosten met zich meebrengt.

berekening watergeven

Het watergeven bij bomen in een bestaande situatie kan, met enig rekenwerk, worden afgestemd op de behoefte van de boom. Een aantal zaken moet daarvoor worden bijgehouden:

- de hoeveelheid die de boom per dag verdampt (aan de hand van de E-ref zoals dagelijks doorgegeven via de radio);
- de hoeveelheid effectieve (dus infiltrerende) neerslag (lokaal weerstation of eigen waarneming);
- de eventuele capillaire opstijging.

Daarnaast moet het doorwortelde volume bekend zijn! Met deze gegevens is na te gaan wanneer de boom een tekort aan water krijgt. Figuur 89 geeft een sterk vereenvoudigd rekenvoorbeeld. Hierbij is uitgegaan van een volledig doorworteld plantgat. De wortels betrekken geen water uit de omgeving en de capillaire opstijging vanuit het grondwater bereikt het plantgat niet. Alle gebruikte getallen zijn gefingeerd.

methode watergeven

Watergeven via beluchtungs- of drainagesystemen is weinig zinvol. Dergelijk systemen zijn, om goed te kunnen functioneren, onder de wortelzone aangebracht. Het toegediende water verdwijnt dus naar beneden, buiten het bereik van de boom. Ook het volzetten van verticale beluchtungs-systemen is niet zinvol. Onderzoek heeft aangetoond dat ook bij deze methode het water naar beneden wegzakt, zonder zich in voldoende mate horizontaal in de wortelruimte te verspreiden. Voor de korte periode van water-

geven bij pas geplante bomen loont de investering in een specifiek watergeefstelsel niet. Doorgaans kan worden volstaan met via de oppervlakte watergeven. Bij dit alles is het beter om een flinke hoeveelheid (bijvoorbeeld 100 liter) ineens te geven, dan elke dag een klein beetje. Bij een watergift via het oppervlak moet dan eventueel een grond-walletje worden opgeworpen.

*alternatief voor
watergeven*

Een betere oplossing dan (permanent) periodiek watergeven is het treffen van voorzieningen die het vochtleverend vermogen van de groeiplaats verhogen en/of het doorwortelbare volume vergroten. Belangrijk is

Gegevens: oppervlakte kroonprojectie = 9 m² (Ø = 3,40 m)
plantgatvolume = 4 m³ (2x2x1 m)
watervoorraad per 1 mei = 600 l

DATUM (mei)	E _o (l/m ²)	E _{pot} (l)	E _{act} (%E _{pot})	WATER- VERBRUIK (l)	NEERSLAG (l/m ²)	INFIL- TRATIE (l)	VOORRAAD (l)	% V.D. BEGIN- VOORRAAD	OPMERKINGEN
1	4	54	100	54	0	0	546	91	
2	4	54	100	54	0	0	492	82	
3	4	54	100	54	0	0	438	73	
4	5	68	100	68	0	0	370	62	
5	6	81	100	81	0	0	289	48	
6	6	81	96	78	0	0	211	35	
7	6	81	70	57	10	20	174	29	1)
8	2	27	58	16	6	12	170	28	
9	2	27	56	15	6	12	167	28	
10	2	27	56	15	4	8	160	27	
11	2	27	53	14	6	12	158	26	
12	2	27	53	14	6	12	156	26	
13	3	40	52	21	2	4	139	23	
14	4	54	46	25	0	0	(114) 214	36	2) + 100 l
15	5	68	71	49	0	0	165	28	
16	6	81	55	45	0	0	(120) 220	37	2) + 100 l
17	6	81	73	60	0	0	160	27	
18	6	81	53	43	0	0	(117) 217	36	2) + 100 l
19	2	27	72	20	8	16	213	36	
20	2	27	71	19	6	12	206	34	

E-pot = de potentiële, dat wil zeggen de mogelijke verdamping

E-pot = 1,5 x E-ref x oppervlakte kroonprojectie

E-act = de actuele of werkelijke verdamping

E-act is 100 % van E-pot tot de helft van het beschikbare water is verbruikt.

$$\text{Daarna geldt: } E\text{-act} = \frac{\text{actuele voorraad}}{0,5 \times \text{beginvoorraad}}$$

1) = watergeven gewenst, d.w.z. E-act is 60 % van E-pot

2) = watergeven noodzakelijk, d.w.z. E-act is 40 % van E-pot

namelijk dat schade als gevolg van "plotselinge" droogte wordt voorkomen. Dat betekent dat (langdurige) perioden zonder neerslag moeten kunnen worden overbrugd met behulp van de vochtvoorraad in de groeiplaats. Een grotere "bufferwerking" van de groeiplaats geeft meer "rek" in de watervoorziening. De kosten van groeiplaatsverbetering zijn eenmalig, het positieve effect langdurig. Bij bestaande bomen is het vaak moeilijk voldoende ruimte voor groeiplaatsverbetering te vinden. In de bodem in te brengen middelen worden dan vaak als de oplossing aangedragen. De effecten zijn echter gering en van korte duur. Voor bomen met vochtproblemen is voor de lange termijn een vergroting van de groeiplaats de enige zinvolle oplossing.

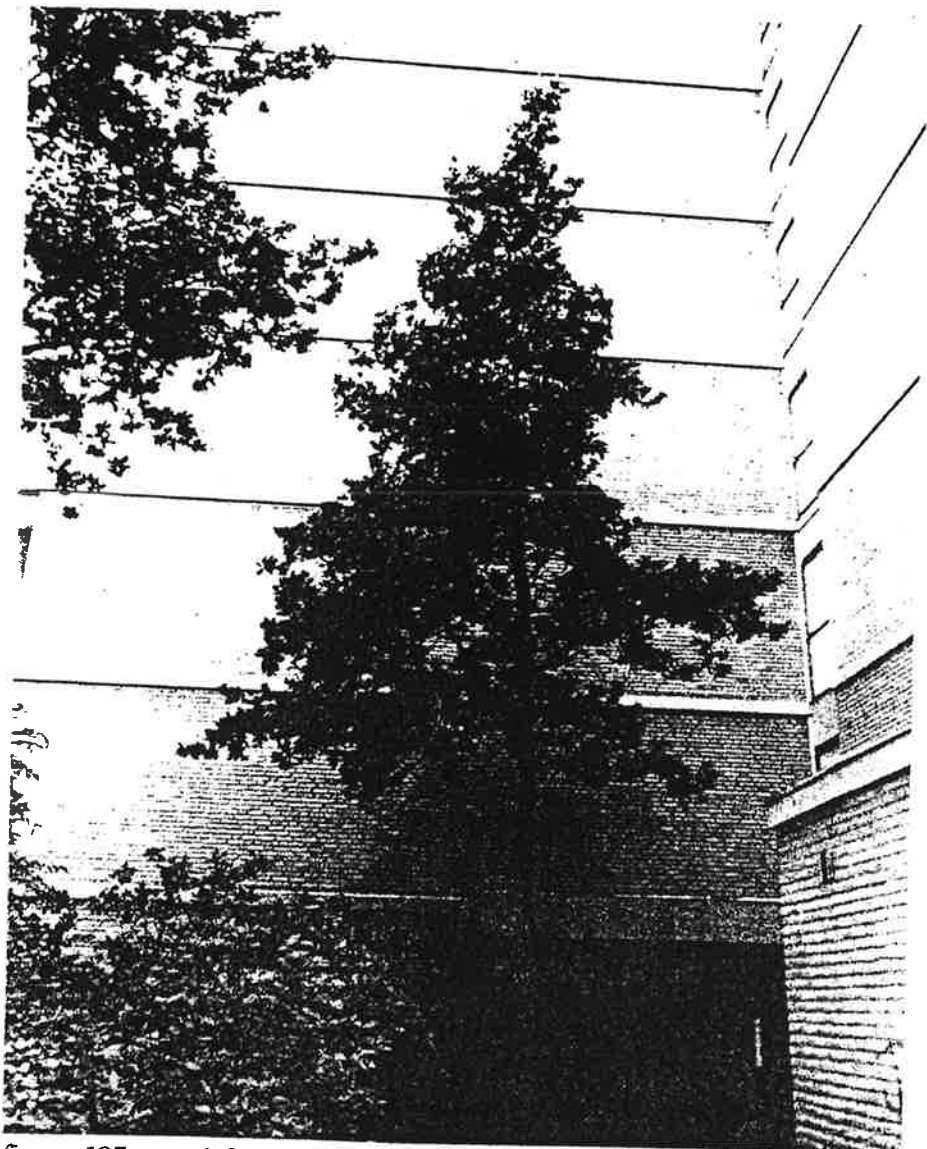
*vochtproblemen
voorkomen*

De meest effectieve aanpak is vochtproblemen te voorkomen. Dit kan door vóór de aanplant de (toekomstige) vochtbehoefte van de boom te bepalen. Het gaat dan om de vochtbehoefte na het bereiken van de volle omvang. Het vochtleverend vermogen van de te ontwerpen plantplaats moet deze behoefte kunnen dekken. De gegevens uit de vochtbalans zijn te vertalen naar de constructie van de plantplaats en/of keuzes in het ontwerp. Vochtproblemen bij bomen zijn zo in bijna alle gevallen te voorkomen.

10 BEREKENING DOORWORTEL- BARE RUIMTE

10.1 INLEIDING

Om te bepalen of een boom op een bepaalde plaats kan staan, is kennis nodig van de eisen die bomen stellen aan hun groeiplaats. Het gaat daarbij vooral om de kwaliteit en de kwantiteit van de groeiruumte. Bovengronds kunnen beperkingen optreden door bebouwingsdichtheid (figuur 197), verkeer of andere beplanting. Ondergronds



figuur 197. groeiplaatskwaliteit omvat naast ondergrondse ook bovengrondse aspecten, zoals voldoende ruimte

is de groeiruimte beperkt door de aanwezigheid van rioleringen, kabels en leidingen en de cunetten van wegen. Door het gebruik van een verharding op verdicht zand kunnen problemen ontstaan bij de vocht-, zuurstof- en mineralenvoorziening.

Bomen in straatprofielen

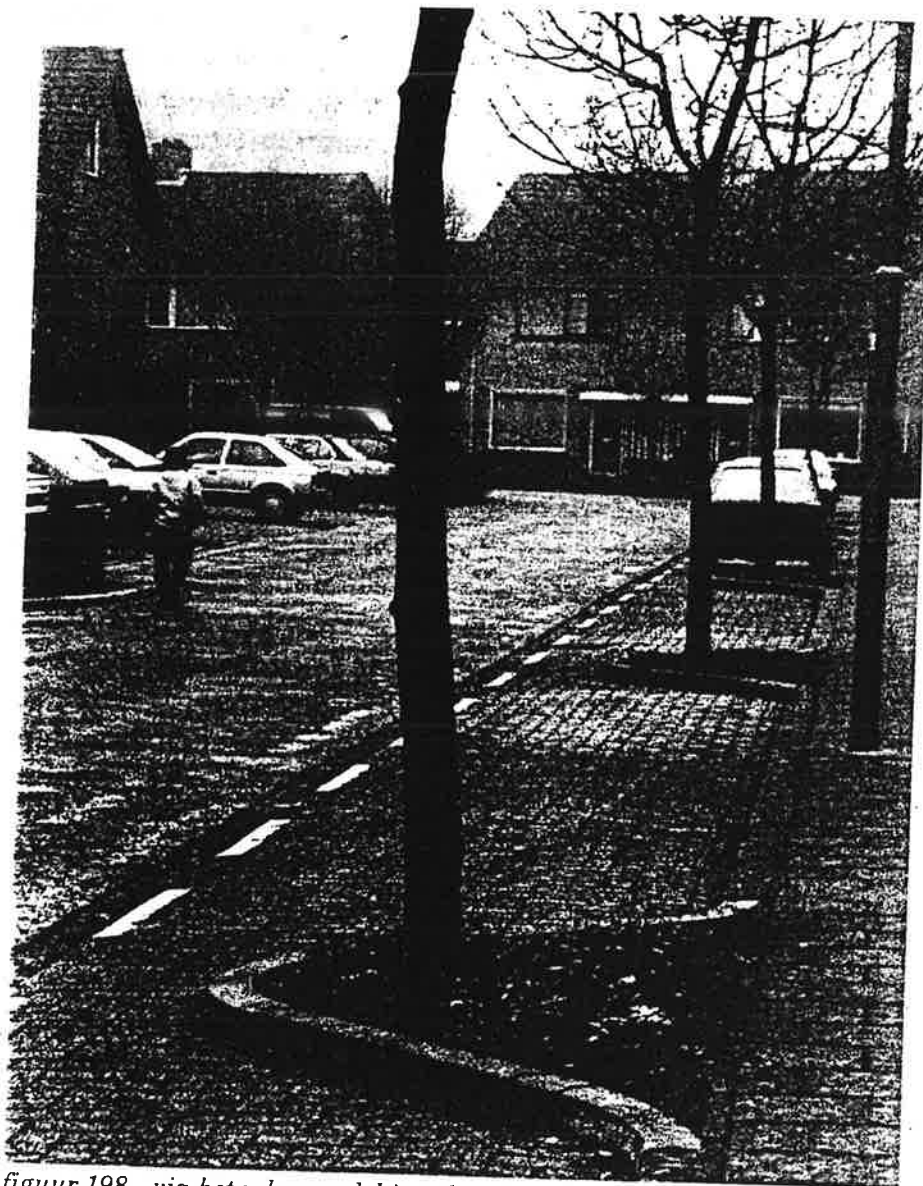
In de praktijk blijkt met name de beschikbare ondergrondse ruimte regelmatig in het nauw te komen, vooral bij bomen in de bestrating. In dit kader heeft de OBIS (studiecommissie Onderzoek Bomen in Stadsmilieu van de VHB) een publikatie uitgegeven met de titel "Bomen in straatprofielen" (OBIS, 1988). In deze publikatie wordt ingegaan op de bepaling van het benodigde doorwortelbare bodemvolume. Hiertoe is een rekenmodel opgezet, waarbij is uitgegaan van bestaande gegevens uit onderzoek en praktijk. Dit model geeft ondersteuning bij het berekenen van de grootte van de ondergrondse groeiplaats tijdens het ontwerp en de voorbereiding van de groeiplaats van de straatboom. Er kan ook mee worden berekend welke boomgroei valt te verwachten bij vastgestelde afmetingen van de groeiplaats. Het is voorts een methode om cijfermatig te kunnen aantonen waarom een boom op een bepaalde plaats, bij handhaving van de omstandigheden, wel of niet de gewenste grootte zal verkrijgen.

In vier voorbeeldsituaties wordt het rekenmodel in verschillende varianten uitgewerkt. Ook de invloed van het verhardingsmateriaal op de ontwikkeling van de boom is zichtbaar gemaakt. De bovengrondse ruimte wordt daarbij beoordeeld in relatie tot de ondergrondse ruimte.

De vier uitgewerkte voorbeelden van bomen in een stedelijke situatie zijn:

1. bomen in de middenberm van een hoofd-ontsluitingsweg;
2. bomen in het trottoir van een buurtontsluitingsstraat;
3. bomen in een woonstraat bij langsparkeren (figuur 198);
4. bomen in de plantstrook op een parkeerterrein.

Aan de hand van de ontwerpgegevens wordt bij ieder voorbeeld eerst berekend welke groeiverwachting de boom heeft bij de standaardoplossing. Indien de berekende grootte kleiner is dan de gewenste grootte, dan wordt berekend hoe de groeiplaats kan worden verbeterd, zodat de boom wel tot de gewenste grootte kan uitgroeien. Iedere situatie wordt afgesloten met enige varianten op de voorgestelde oplossing. Alle voorbeelden zijn berekend voor zowel een situatie met een grond-



figuur 198. via het rekenmodel is te bepalen of deze bomen over voldoende wortelruimte (kunnen) beschikken

waterprofiel als met een hangwaterprofiel. Met behulp van de nodige basisgegevens is het mogelijk de berekeningen om te zetten naar eigen situaties.

Deze basisgegevens en de uitgangspunten worden opgesomd in paragraaf 10.2. De rekenmethode uit "Bomen in straatprofielen" wordt in paragraaf 10.3 uiteengezet. In paragraaf 10.4 wordt één berekening uit de publikatie in een "eigen situatie" vertaald. Er is hier, ter vergelijking, met andere getallen gewerkt. Voor meer voorbeeldberekeningen wordt verwezen naar "Bomen in straatprofielen" (OBIS, 1988).

10.2 BENODIGDE GEGEVENS

Bomen worden volgens een ontwerp geplant. Om aan de groeiplaats te kunnen rekenen is het nodig iets over de situatie ter plekke en de gehanteerde ontwerpcriteria te weten.

*uitgangssituatie
groeiplaatsberekening*

Gegevens over de situatie op de plaats waar de bomen moeten komen betreffen de/het:

- Plantplaats: waar komen de bomen te staan? In de verharding (welk type), in een groenstrook, in onverharde "eilanden" in de verharding?
- Soort weg: wat is de locatie ten opzichte van het verkeer? Wat is de minimale afstand tot de rijbaan; is er een minimale takvrije stamlengte vereist?
- Bebouwing: is er bebouwing in de directe omgeving en hoe hoog is deze? Betreft het een noord-, zuid-, oost- of westgevel?
- Overig groen: is er ander groen in de omgeving?
- Grondslag: in welke grond of grondmengsel komen de bomen te staan?
- Grondwaterstand: betreft het een grondwater-, hangwater- of contactprofiel?
- Kabels/leidingen: waar liggen welk type kabels en leidingen?

Ontwerpcriteria omvatten de:

- keuze van de plantplaats: afstanden tot bebouwing, straatmeubilair, nutsvoorzieningen (ook rioolkolken, inspectieputten en dergelijke), rijdend en/of parkerend verkeer;
- boomsoortkeuze: eerste, tweede of derde grootte;
- plantafstand: gesloten of niet gesloten bomenrij;
- ondergrondse ruimte: bewortelbare ruimte en mogelijkheden voor uitbreiding daarvan;
- plantspiegel: open of afgedekt, waarmee afgedekt;
- boombescherming: noodzaak en wijze waarop: straatmeubilair, verhardingselementen en dergelijke.

*uitgangspunten
groeiplaatsberekening*

Bij de voorbeeldberekeningen wordt uitgegaan van een aantal gegevens:

- de hoeveelheid beschikbaar vocht in de grond (figuur 76 in hoofdstuk 4);
- de infiltratiehoeveelheden voor vocht door bodem- en/of verhardingsoppervlak (figuur 84 in hoofdstuk 4);
- het randeffect van een laag grond rondom de plantplaats ter dikte van 15 cm bij zandgronden en 30 cm bij zavelgronden;



figuur 199. de berekeningen gaan ervan uit dat de boom de soorteigen afmetingen moet kunnen bereiken

- de bereikbare kroonprojectie wordt op een grondwaterprofiel berekend volgens:

$$\text{bereikbare kroonprojectie (m}^2\text{)} = \frac{\text{doorwortelbaar volume (m}^3\text{)}}{\text{benodigd volume per m}^2\text{ kroonprojectie (m}^3\text{)}}$$

het benodigde bodemvolume per m² kroonprojectie =

- 0,75 m³ bij een grond(mengsel) met 3 tot 7 % organische stof;
- 0,5 m³ bij een grond(mengsel) met 7 tot 8 % organische stof;
- op een hangwaterprofiel wordt de bereikbare kroonprojectie berekend volgens:

$$\text{bereikbare kroonprojectie (m}^2\text{)} = \frac{\text{infiltratie (l)+voorraad (l)+randeffect (l)}}{\text{verdamping door kroon (l/m}^2\text{ kroonprojectie)}}$$

- in de berekeningen in de publikatie "Bomen in straatprofielen" wordt uitgegaan van een verdamping van 640 l/m² kroonprojectie per groeiseizoen.

10.3 REKENMETHODE

Een boom heeft voor een goede groei ondergronds behoefte aan:

- zuurstof (wortelademhaling);
- vocht (verdamping, groei en transport door de boom);
- voedingselementen (groei);
- ruimte (verankering).

In de berekening worden de verankering en de zuurstofvoorziening buiten beschouwing gelaten. Alleen bij een extreem smalle vorm van de plantplaats kan de verankering problemen geven. In hoofdstuk 5 van dit deel van het vademecum wordt uitgebreid aandacht besteed aan de zuurstofvoorziening. Verankering en zuurstofvoorziening moeten wel bij de berekeningen in de randvoorwaarden worden meegenomen en, indien nodig, in de conclusies worden verwerkt.

berekeningsgegevens

Voor de berekening zijn de volgende gegevens nodig:

- de afmetingen van het doorwortelbaar volume (plantplaats); lengte, breedte, diepte;
- de samenstelling van de grond binnen het doorwortelbaar volume;
- de samenstelling en verdichting (indringingsweerstand) van de grond rond de groeiruimte;
- het grondwaterregime (hoogte + fluctuaties);
- het type verharding boven het doorwortelbaar volume;
- de gewenste boomsoorten, het gewenste boomtype.

Bij de berekeningen wordt onderscheid gemaakt tussen twee wijzen van vochtlevering. Dit resulteert in twee verschillende berekeningsmethoden. De ene methode wordt toegepast bij groeiplaatsen waar de wortels het grondwater kunnen bereiken (grondwaterprofiel) en dit grondwater voldoende vocht kan aanvoeren. De andere wordt gebruikt bij bodems met een diepere grondwaterstand (hangwaterprofiel), waarbij de wortels geen gebruik kunnen maken van het grondwater en het water vaak de beperkende factor is.

grondwaterprofiel

In bodems met een grondwaterprofiel zal als regel geen vochtgebrek optreden, indien de wortels in het groeiseizoen (mei-oktober) tot circa 10 à 30 cm boven het grondwater kunnen groeien. De berekening wordt gericht op de voedingsbehoefte (met name stikstof). Op basis van ervarings- en onderzoeksgegevens is gebleken dat een boom voldoende heeft aan een grondvolume van $0,75 \text{ m}^3$ grond per m^2 kroonprojectie. Hierbij is uitgegaan van een gemiddelde voedingselementen leverende grond zoals een

lichte klei- of zandgrond met drie tot vijf procent organische stof. Is het gehalte aan organische stof hoger dan zeven procent, dan kan worden volstaan met $0,5 \text{ m}^3 / \text{m}^2$ kroonprojectie.

Dit grondvolume moet in alle gevallen liggen onder een voldoende groot luchtdoorlatend oppervlak, zodat de zuurstofvoorziening niet in gevaar komt.

REKENVOORBEELD GRONDWATERPROFIEL.

Er is een plantplaats (doorwortelbaar volume) ontworpen van 4 m^3 ($2 \times 2 \times 1 \text{ m}$) bij een grondwaterstand van $1,10 \text{ m}$ onder het maaiveld (- mv.).

Dit is voldoende voor een boom met een kroonprojectie van:

$$\frac{4 \text{ m}^3}{0,75 \text{ m}^3 / \text{m}^2} = 5,3 \text{ (m}^2\text{)}$$

Dit komt overeen met een kroondiameter van $2,6 \text{ m}$.

In bovenstaand voorbeeld kan een smalle boom van de derde grootte nog redelijk groeien. In de praktijk is het zeker mogelijk dat de boom een grotere kroonomvang bereikt. De kroon zal dan echter minder dicht zijn (een lagere L.A.I. hebben).

hangwaterprofiel

Bij bodems met een hangwaterprofiel kunnen zowel de hoeveelheden beschikbaar vocht als de voeding beperkend zijn. Het vereiste grondvolume op basis van de voedingsbehoefte is met behulp van dezelfde formule te berekenen als bij een grondwaterprofiel. Bij vergelijking van berekeningen op basis van de vochtvoorziening en elementenvoorziening is gebleken, dat de vochtvoorziening doorgaans de beperkende factor is. Dat betekent dat, wanneer het bodemvolume groot genoeg is voor de benodigde vochtvoorziening, in de regel ook de voorziening met voedingselementen is gewaarborgd. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat eenzelfde type grond wordt gebruikt als in de berekeningen bij het grondwaterprofiel (minimaal drie tot vijf procent organische stof). Is dit het geval, dan worden groeiplaatsen met een hangwaterprofiel alleen getoetst op de vochtvoorziening.

De achtergronden van berekeningen aan de vochtvoorziening worden in hoofdstuk 4 van dit deel van het vademecum behandeld. De daar gegeven informatie wordt hier in de berekeningen toegepast. In afwijking van de gegevens uit hoofdstuk 4 wordt in de publikatie "Bomen in straatprofielen" uitgegaan van een gemiddelde verdamping van 640 l/m^2 kroonprojectie per seizoen.

REKENVOORBEELD HANGWATERPROFIEL

Er wordt uitgegaan van een plantplaats van 2 x 2 m, met een diepte van 1,2 m. Er ligt een klinkerverharding op de plantplaats. Deze klinkers liggen in 0,2 m straatzand.

De plantplaats is gevuld met een grondmengsel van matig fijn zand met 5% organische stof. De laag grondmengsel is 1,0 m dik. De omringende grond is zwaar verdicht (indringingsweerstand > 3 MPa) humusarm dekzand en is niet doorwortelbaar, maar levert wel het zogenaamde randeffect.

De berekening is dan als volgt:

- Vochtvoorraad plantplaats $4 \text{ m}^3 \times 150 \text{ l/m}^3$	600 l
- Infiltratie neerslag: 4 m^2 (oppervlak plantgat) $\times 310 \text{ l/m}^2$ (klinkers b.k.k.)	1240 l
- Randeffect $150 \text{ l/m}^3 \times 1,8 \text{ m}^3$	<u>270 l</u>
Totaal	2110 l

Dit aanbod dekt dus de vochtbehoefte van een boom met een kroonprojectie van:

$$\frac{2110 \text{ l}}{640 \text{ l/m}^2} = 3,3 \text{ m}^2$$

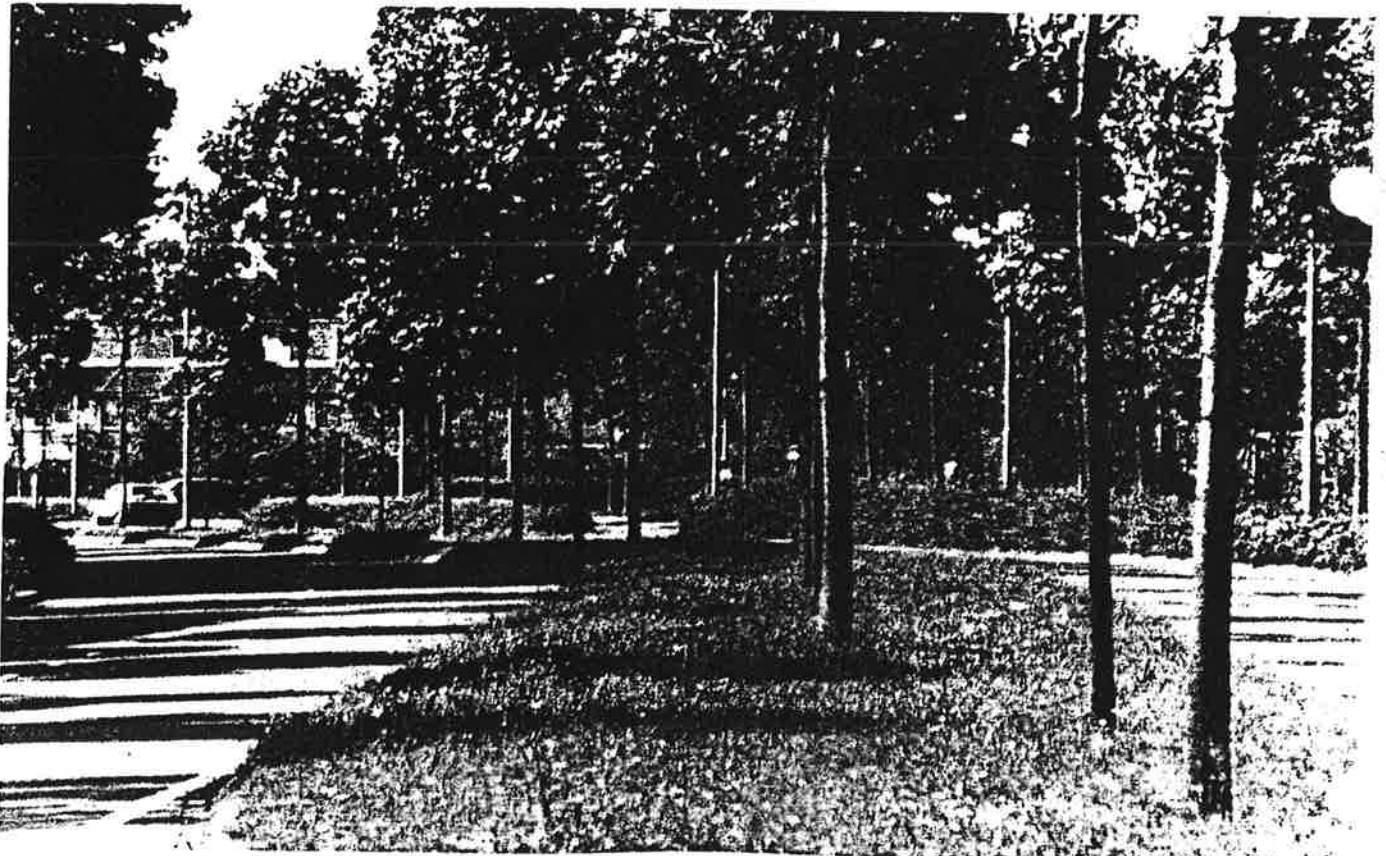
Dit komt overeen met een kroondiameter van ongeveer 2 m. Het is duidelijk dat we in dit geval geen grote boom mogen verwachten.

10.4 GROEIPLAATSBEREKENING

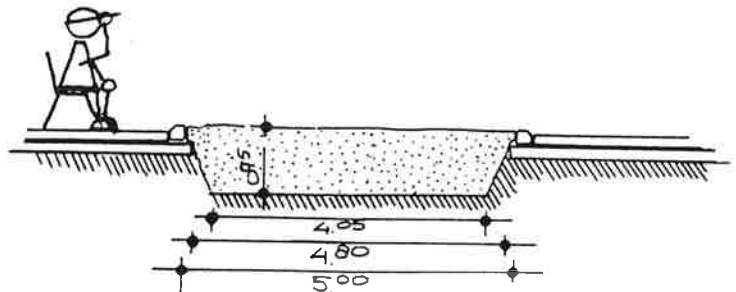
In het boekje "Bomen in straatprofielen" (OBIS, 1988) wordt als eerste voorbeeld een middenberm in een hoofdontsluitingsweg gegeven. Hierna wordt berekening I-3A uit het boekje "vertaald" naar een "eigen" situatie: een vergelijkbare, maar bredere middenberm.

SITUATIE VOOR AANPLANT

- plantplaats : een met gras begroeide middenberm van 5 m breed (figuur 200)
- soort weg : hoofdontsluitingsweg (figuur 201)
Hoogte profielvrije ruimte minimaal 4,6 m, uiteindelijke takvrije stamlengte 7 m.
- bebouwing : geen bebouwing in de directe omgeving
- overig groen : grasbegroeiing op de middenberm
- grondslag : middenberm; los gestort.
humusrijk, matig fijn zand (8% organische stof. rijbaan: sterk verdicht (> 5 MPa) straatzand tot 80 cm - maaiveld ondergrond; verdicht (> 3 MPa) humusarm, matig fijn zand.



figuur 200. verkeersgeleiding door bomen in de middenberm, maar is er genoeg wortelruimte?

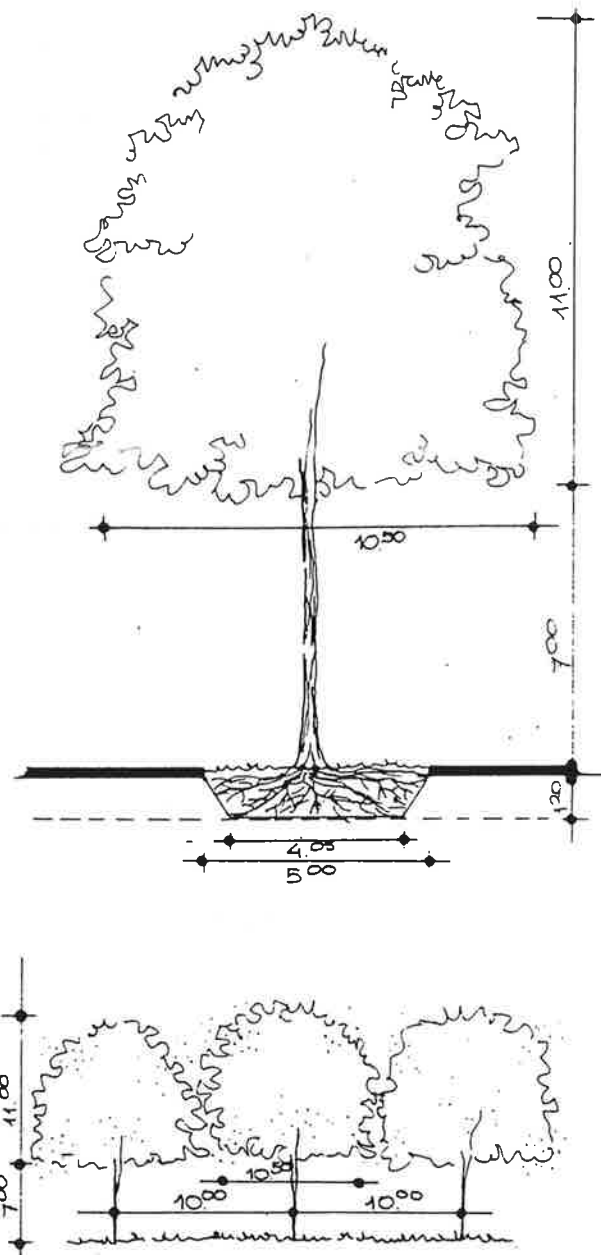


figuur 201. de situatie voor de aanplant: het nodige meet- en rekenwerk is vereist

- grondwaterstand : twee verschillende situaties:
 - 1) grondwaterstand = 1,20 m (dat wil zeggen met grondwaterinvloed);
 - 2) grondwaterstand > 3,00 m (dat wil in dit geval zeggen geen grondwaterinvloed).
- kabels/leidingen : geen kabels of leidingen in de middenberm aanwezig.

ONTWERPCRITERIA

- keuze plantplaats : in het midden van de berm, met een verspringend profiel waar uitvoegstroken in de berm snijden.
- boomsoortkeuze : in verband met de aard van het object en het profiel van de vrije ruimte is alleen een boom van de eerste grootte bruikbaar. Er wordt een gesloten bomenrij gewenst van kronen met een open structuur. De soort moet weinig gevoelig zijn voor wind en strooi- en spatfout. Volgens eisen Verkeer en Groen (SVT, 1986) is bij bomen van de eerste grootte een afstand hart-stam rijbaan > 2,00 m noodzakelijk. In een middenberm van 5 meter breed is dit in principe mogelijk.
- plantafstand : een zodanige afstand dat bij volgroeide bomen de kronen elkaar raken.
- ondergronds : alleen de humusrijke grond in de middenberm is bewortelbaar. Uitbreiding is alleen mogelijk bij wijziging van het wegontwerp.



figuur 202. op een grondwaterprofiel is bij 10 m plantafstand een gesloten bomenrij eerste grootte mogelijk

- plantspiegel : eventueel de eerste drie tot vijf jaar de ruimte rond de stamvoet vrijhouden van gras.
- boombescherming : bij gebleken noodzakelijkheid maaischadepaaltjes aanbrengen.

BEREKENING UITEINDELIJKE BOOMGROOTTE BIJ EEN PLANTAFSTAND VAN 10 M

Gegevens:

- effectieve breedte middenberm = 5 m
- beschikbare lengte middenberm per boom = 10 m

- dikte grondverbetering (doorwortelbaar volume) = 0,95m
- taludhelling wegcunet = 2:1
- org.-stofgehalte doorwortelbaar volume = 8 %
- infiltratie neerslag door oppervlak = 350 l/m²
- vochtleverend vermogen doorw. volume = 200 l/m³

- » grootte doorlatend oppervlak per boom = 5 x 10 m = 50 m²
- » doorwortelbaar volume per strekkende meter middenberm = (5,0 + 4,05)/2 x 0,95 x 1 = 4,3 m³
- » inhoud doorwortelbaar volume per boom = 10 x 4,3 = 43 m³

uitwerking grondwaterprofiel

- doorwortelbaar volume = 43 m³
- benodigde hoeveelheid grond = 0,5 m³/m²
- » mogelijke kroonprojectie: 43,0 m³ : 0,5 m³/m² = 86 m²
- » uiteindelijke kroondoorsnede = 10,5 m

Conclusie:

Bij een plantafstand van 10 m en een organische-stofgehalte van 8% kan met grondwaterinvloed een kroondoorsnede van ongeveer 10,5 m worden bereikt. Bij een ongeveer ronde kroon en een takvrije stamlengte van 7 meter betekent dit een boomhoogte van naar schatting 18 m. Het resultaat is bij een plantafstand van 10 m een gesloten bomenrij (figuur 202).

uitwerking hangwaterprofiel

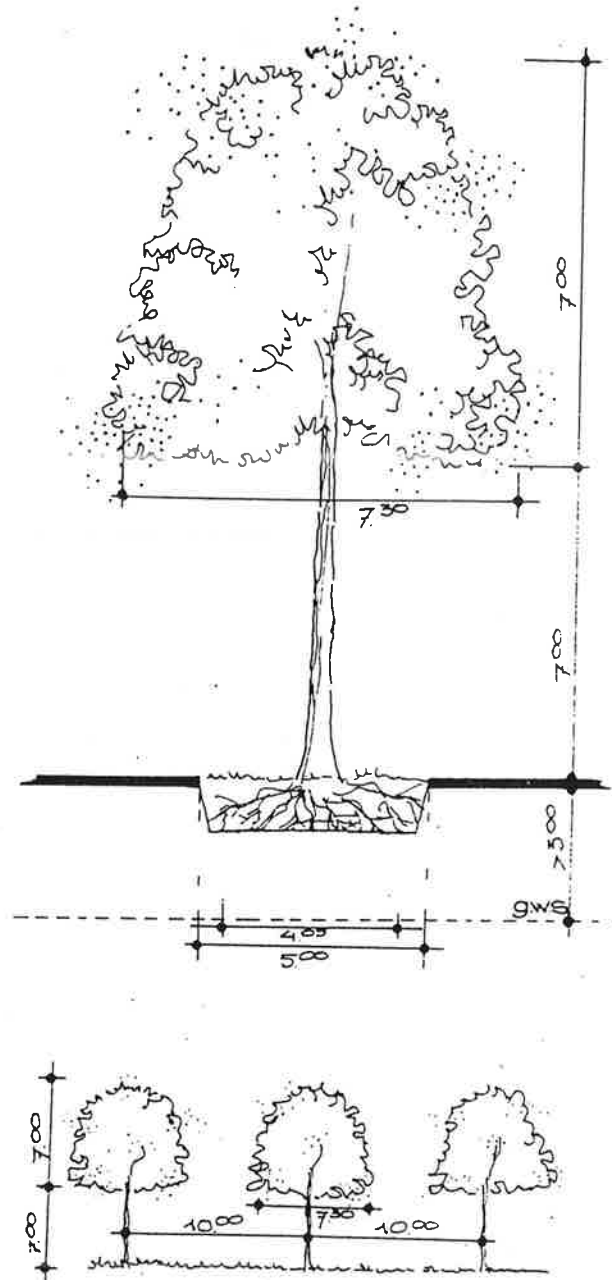
Vochtbehoefte per m² kroonprojectie:

- verdamping kroon = 640 l/m²

Vochtaanbod per boom:

- infiltratie neerslag: 350 l/m² x 50 m² = 17.500 l
- voorraad bodemvocht: 200 l/m³ x 43m³ = 8.600 l
- randeffect (0,15 m): 70 l/m³ x 8,3 m³ = 581 l
- bodemvolume randeffect =

 +
- (2x10x0,75 + 10x4,05) x 0,15 = 8,3 m³
- » beschikbaar bodemvocht = 26.681 l
- » mogelijke kroonprojectie 26.681 l : 640 l/m² = 41,7 m²
- » uiteindelijke kroondoorsnede = 7,3 m



figuur 203. op een hangwaterprofiel ontstaat bij een plantafstand van 10 m een niet-gesloten bomenrij

Conclusie:

Bij een plantafstand van 10 m en een organische-stofgehalte van 8% kan in deze situatie zonder grondwaterinvloed een kroondoorsnede van circa 7,3 m worden bereikt. De bomenrij zal niet-gesloten zijn (figuur 203).