

NN31545.1111

JTA 1111

maart 1979

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

WEERSTAND VOOR GASDIFFUSIE EN WATERDOORLATENDHEID
VAN ENKELE SOORTEN POREUZE TROTTOIRBESTRATINGEN

ing. W.B. Verhaegh

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**



Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-
middelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen
de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onder-
zoek nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking

100235-02

I N H O U D

	Blz.
1. INLEIDING	1
2. MEETMETHODE	1
2.1. Bepaling van de zuurstofdiffusie D_{O_2}	1
2.2. Vochtgehalte van de tegels bij de bepaling van de zuurstofdiffusie	3
2.3. Bepaling van de waterdoorlatendheid	4
3. DE ZUURSTOFDIFFUSIE	4
3.1. Gebruikte formules bij meting	4
3.2. Het zuurstoftransport door wegdekken	5
3.3. Meetresultaten	7
4. DE WATERDOORLATENDHEID	9
4.1. Gebruikte formules bij meting	9
4.2. Het watertransport door wegdekken	11
4.3. Meetresultaten	12
5. CONCLUSIE	12
LITERATUUR	13

1. INLEIDING

Voor de bomen in steden is de luchthuishouding van de grond onder bestratingen van essentieel belang. Bij gebruik van asfalt, maar ook van 'gewone' trottoirtegels kan de ademhaling van de wortels sterk worden belemmerd door een te grote weerstand voor de diffusie van zuurstof door deze dekken.

Van een normale trottoirtegel is de waterdoorlatendheid en ook de gasdoorlatendheid praktisch nul, gas- zowel als watertransport door een dek tegels heeft praktisch alleen plaats door de voegen. Dit kan in meerdere gevallen onvoldoende zijn.

Door enkele fabrikanten zijn daarom poreuze trottoirtegels in de handel gebracht. Aan enkele series van deze poreuze tegels, is de diffusieweerstand voor zuurstof en de waterdoorlatendheid bepaald, zowel aan nieuwe als aan gebruikte exemplaren. Waardoor ook inzicht is verkregen omtrent de invloed van het vuil, wat in de loop van de tijd in de tegels spoelt en een deel van de poriën kan verstoppen.

De metingen zijn verricht aan tegels, beschikbaar gesteld door een betonwarenindustrie te Winterswijk en de gemeente Amsterdam.

2. MEETMETHODE

2.1. B e p a l i n g v a n d e z u u r s t o f d i f f u s i e D_{O_2}

De bepaling van de zuurstofdiffusiecoëfficiënt door trottoirtegels of door grondmonsters in het algemeen, berust op de bepaling van de hoeveelheid zuurstof, die door de tegel of het grondmonster diffundeert, als gevolg van een gasconcentratieverschil boven en onder

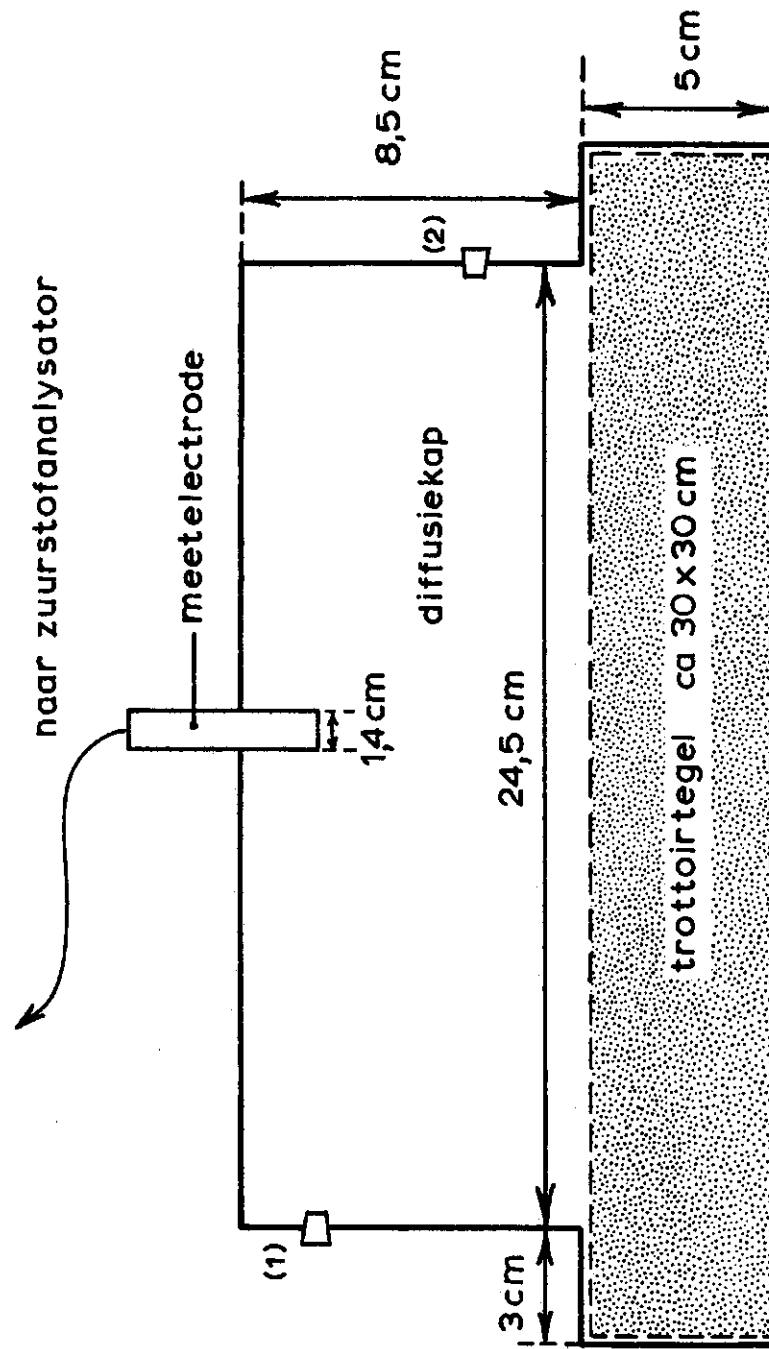


Fig. 1. Diffusiekap voor de meting van de diffusiecoëfficiënt van trottoirtegels. (1) en (2) zijn openingen om de kap te spoelen met zuurstof. Schaal 1 : 2

de tegel of het monster.

Door ons is de niet-stationaire bepalingmethode gebruikt, dit wil zeggen het te handhaven concentratieverschil is niet constant.

De meting gaat als volgt: op de tegel wordt een kap geplaatst (fig.1), waarbij tussen de steunrand van de kap en de tegel afdichtingskit wordt gespoten, zodat tegel en kap luchtdicht met elkaar zijn verbonden. De tegels zijn daarna met de hoeken op ringen geplaatst. De kap is gedurende 4 à 5 minuten gespoeld met 100% zuurstof en afgesloten. De afname van de zuurstofconcentratie in de kap is vervolgens gedurende één tot enkele uren geregistreerd. De registratie is uitgevoerd met een zelfregistrerende milivoltmeter (Ultrakust), die is verbonden met een polarografische zuurstofanalysator (merk: Beckman, oxygen analyser model 777) waarvan de meetelektrode in de kap is bevestigd.

Voor en na de meting is de zuurstofconcentratie van de lucht buiten de meetkap geregistreerd. Er is gemeten in een geconditioneerde ruimte bij een temperatuur van $\approx 20^{\circ}\text{C}$.

2.2. V o c h t g e h a l t e v a n d e t e g e l s b i j d e b e p a l i n g v a n d e z u u r s t o f d i f f u s i e

De diffusiecoëfficiënt voor zuurstof van de tegels is bepaald in 'droge' en vochtige toestand. Wat het vochtgehalte betreft, is de situatie nagebootst van een normaal vochtig trottoir. De tegels zijn eerst goed nat gemaakt en daarna met plastic afgedekt, enige dagen op een zandbed gelegd, met een vochtspanning van -50 mbar, zoals normaal onder een trottoir wordt gemeten. Deze vochtspanning is gecontroleerd met tensiometers in het zand, direct onder de tegels.

Indien de diffusiecoëfficiënt ook van 'drogere' tegels is bepaald, dan houdt dit 'droger' in: dat de vochtige tegels gedurende 3 à 4 dagen water hebben verloren, door verdamping, in de geconditioneerde ruimte en daarna zijn gemeten. Dit als nabootsing van een opgedroogd trottoir, 2 à 3 dagen na regen. Droog wil zeggen, de metingen zijn verricht aan tegels die praktisch geen water meer bevatten.

2.3. B e p a l i n g v a n d e w a t e r d o o r l a t e n d h e i d

Voor de bepaling van de waterdoorlatendheid is dezelfde meetkap als bij de zuurstofdiffusiemeting gebruikt.

Hierbij is ook weer gezorgd voor een goede afdichting tussen de draagvlakken van de tegels en meetkap.

De waterdoorlatendheid is daarna bepaald, door op de tegel een laagje water met een hoogte van 4 à 5 cm te zetten. De waterhoogte is door middel van een mariottensysteem op konstant peil gehouden. De aanvoer van het water vond plaats vanuit een met water gevulde fles met een inhoud van circa 8 liter. De waterafname in deze, vooraf geijkte fles, is daarna iedere 2 uur bij de goed doorlatende of na 8 à 24 uur bij slecht doorlatende tegels afgelezen. Bij zeer poreuze tegels echter reeds na een halve minuut.

3. DE ZUURSTOFDIFFUSIE

3.1. G e b r u i k t e f o r m u l e b i j m e t i n g

De diffusiecoëfficiënt, D_b , is berekend met behulp van de volgende formule (BAKKER en HIDDING, 1967)

$$D_b = \frac{h_m \times h_v}{t} \cdot 2,303 \log \frac{C_{vo}}{C_{vt}} \quad (1)$$

Hierin is:

D_b = diffusiecoëfficiënt van het monster of tegel $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$

h_m = hoogte van het monster = 3,5 à 7,0 cm

h_v = hoogte meetkap = $\frac{\text{inhoud meetkap}}{\text{oppervlakte monster}}$ cm

t = meetduur in seconden tussen aflezing C_{vo} en C_{vt}

C_{vo} en C_{vt} = het verschil tussen de zuurstofconcentratie in de kap en de zuurstofconcentratie in de lucht (C_1) onder het monster (resp. op tijd $t = 0$ en tijd $t = t$)

Bij de diffusiemetingen van de tegels is voor de berekening van de oppervlakte niet 30 x 30 cm aangehouden, maar wegens overlapping rand tegel en diffusiekap (fig. 1) is gekozen voor een effectieve oppervlakte van 28 x 28 cm.

Voor het transport van O_2 door een laag van h_m cm dikte geldt:

$$F = -D_{O_2} \frac{\Delta C}{h_m} = \frac{\Delta C}{W} \quad (2)$$

waarin:

F = zuurstoftransport mgO_2 , per cm^2 per sec.

ΔC = verschil tussen zuurstof concentraties onder en boven het wegdek ($mg O_2 cm^{-3}$ bodemlucht)

$W = \frac{h_m}{D_{O_2}}$ = weerstand van h_m cm wegdek ($sec.cm^{-1}$)

3.2. Het zuurstoftransport door wegdekken

De berekening van deze weerstanden is overgenomen uit ICW nota 872 van J.W. BAKKER.

Uitgaande van volkomen ondoorlatende stenen of trottoirtegels, zal de grootte en de doorlatendheid van de voegen, de weerstand van de weg bepalen.

Stel dat de voegen tussen de straatstenen, respectievelijk trottoirtegels gevuld zijn met schoon zand. De diffusiecoëfficiënt van dit zand is circa $0,3 \epsilon_g^{3,0} cm^2 sec^{-1}$, waarin ϵ_g het luchtgehalte van de grond is (cm^3 lucht/ cm^3 grond). Bij iets vochtig zand is $\epsilon_g = 0,32$, dit geeft $D_{O_2} = 10^{-2} cm^2 sec^{-1}$.

Wanneer een bestrating bijvoorbeeld 0,6 opp.% voeg heeft en de tegel zelf is ondoorlatend, dan is de diffusiecoëfficiënt berekend over het gehele oppervlak:

$$D_{O_2} \text{ van de voegvulling } \times \text{ oppervlaktedeel ingenomen door voegen} = 10^{-2} \times 0,006 cm^2 sec^{-1}.$$

Bij een bestratingsdikte van 5 cm (dit is het geval bij trottoirtegels) wordt de weerstand van het dek

$$\frac{5}{10^{-2} \times 0,006} = 83,330 sec.cm^{-1}$$

Tabel 1 geeft voor enkele wegdekken de op deze wijze berekende transportweerstand, en het met formule 2 berekende maximale zuurstoftransport door dat dek $F_{tr.max}$. Het zuurstoftransport is maximaal bij een zuurstofgehalte in de bodemlucht, onder het wegdek, van nul procent. ΔC is dan $(0,21 - 0,00) \times 1,33 \text{ mg} = 0,27 \text{ mg O}_2 \text{ cm}^{-3}$ lucht (1 cm^3 zuurstof weegt bij 20°C $1,33 \text{ mg}$). Voor het goed functioneren van het wortelstelsel is echter minstens 6 vol.% zuurstof nodig. De zuurstoftoevoer is in dit geval $F_{tr.(6\%)}$ dus $15/21$ van het maximale transport.

Tabel 1. Weerstand van enkele wegdekken W en het zuurstoftransport daardoor bij zuurstofgehalten onder het wegdek van 6 vol.% $F_{tr.6\%}$ en bij 0 vol.%, $F_{tr.max}$

	dikte cm	voeg opp %	W sec cm^{-1}	$F_{tr.max}$ $(10^{-6} \text{ mgO}_2 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1})$	$F_{tr.6\%}$ $(10^{-6} \text{ mgO}_2 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1})$	(1)
warm asfalt	10	0	10^{-6}	<0,2	<0,3	
trottoir tegels	5	0,6	83 330	3,4	2,4	
straatklinkers	10	1,5	66 670	4,2	3,0	
'kinderkopjes'	15	6	25 000	11,2	8,0	
lemig zand 15% lucht	25	100	25 000	11,2	8,0	
zand 32% lucht	25	100	25 000	112,2	80,0	

$$(1) 10^{-6} \text{ mgO}_2 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} = 36 \text{ mgO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ uur}^{-1} = 864 \text{ mgO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$$

Gerekend is met een voeg gevuld met schoon zand. Is de voeg echter gevuld met stof en vuil, dan is onder vochtige omstandigheden de weerstand vele malen hoger. De ademhalingsbehoefte van een matig actief wortelstelsel is circa $100 \text{ mgO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ uur}^{-1}$, of $2,78 \times 10^{-6} \text{ mgO}_2 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$. Een dek van trottoirtegels met een voeg gevuld met schoon zand voldoet hieraan. Is de voeg echter vuil en nat dan zal de zuurstoftoevoer in meerdere gevallen onvoldoende zijn (tabel 1).

3.3. Meetresultaten

In de tabellen 2 t/m 4 zijn de resultaten samengevat van de gemeten diffusieweerstand voor zuurstof, van enkele series nieuwe en/of gebruikte poreuze tegels.

Tabel 2 (1e meetserie) geeft de resultaten van nieuwe tegels en tegels van dezelfde fabrikant, die 3 à 4 jaar in een trottoir hebben gelegen.

Hieruit blijkt:

- a. dat van nieuwe tegels: de weerstand zeer laag is (circa 1000 ten opzichte van 83 000 normaal). Vochtig is de weerstand circa 30% hoger.
- b. dat van gebruikte tegels: droog: de weerstand gelijk is aan de weerstand nieuw. Vochtig: de weerstand 2 à 8 x hoger is dan de weerstand droog.

De 2e meetserie is samengevat in tabel 3. Deze tegels, poreuzer dan serie 1 (poriënvolume (ϵ_t) \approx 0,34, serie 1; $\epsilon_t \approx$ 0,24), zijn 12 jaar als plaveisel op een parkeerplaats gebruikt.

Deze serie is alleen vochtig gemeten. Hierbij is het opvallend, dat bij -40 mbar (is de vochtspanning direct na regen) de weerstand hoog is, doch nog circa 3,5 x lager dan normaal trottoir, maar bij -58 mbar (is de vochtspanning 3 à 4 uur na regen bij drogend weer) is de weerstand weer laag.

De 3e serie, tabel 4, afkomstig uit Amsterdam, is ook 3 à 4 jaar gebruikt als trottoir. Het poriënvolume (ϵ_t) \approx 0,15, is nog lager dan bij de 1e en 2e serie.

Vochtig is de weerstand ongeveer gelijk aan andere vuile vochtige tegels. 'Droger' is de weerstand veel lager dan vochtig.

Opvallend is, dat de weerstanden vochtig en droog, ondanks een lager ϵ_t , zo weinig verschillen van serie 1 en 2.

Samenvattend kan gesteld worden, dat de weerstand droog van zowel nieuw als oud zeer laag is. De weerstand vochtig is veel hoger door verstopping van de poriën door vuil, maar blijft lager dan van niet poreuze exemplaren.

Tabel 2. Weerstand voor gasdiffusie en waterdoorlatendheid van nieuwe en gebruikte poreuze tegels

No.	Type	Gem. dikte in cm	Tegels droog			Tegels vochtig			water-doorlatendheid (K) cm uur ⁻¹
			gewicht	lucht-gehalte ϵ_g %	diffusie weerstand voor zuurstof sec cm ⁻¹	vochtspanning (p) bij diffusiometing m.bar	lucht-gehalte (ϵ_g) vol.%	diffusie weerstand voor zuurstof sec cm ⁻¹	
<u>Nieuw</u>									
1	ondiepe groeven	4,74	8725	24,3	1595	- 43	21,9	1845	241
2	idem	4,74	8634	25,1	675	- 52	22,6	800	456
3	idem	4,85	9031	23,4	890	- 52	20,5	965	218
4	idem	4,85	8928	24,3	1030	- 43	21,8	1028	184
5	diepe groeven	3,78	7261	21,0	1430	- 52	17,2	1735	229
6	idem	3,78	6639	27,7	1090	- 52	23,9	1370	243
<u>Gebruikt</u>									
7	diepe groeven	3,56	6340	25,7	740	- 42	21,9	5440	0,13
8	idem	3,56	6675	21,8	1470	- 52	19,0	1885	-
9	idem	3,89	7106	24,8	635	- 52	21,8	1665	-
10	idem	3,56	-	-	1170	-	-	-	-
11	idem	3,76	7020	23,2	1340	- 43	20,4	9965	0,08
12	idem	3,56	6243	26,8	950	- 42	24,9	8300	0,11
13	idem	3,56	6464	24,2	1155	- 42	20,7	2700	0,06
14	idem	3,56	6213	27,2	1575	- 48	25,3	6720	0,05

Tabel 3. Weerstand voor gasdiffusie en waterdoorlatendheid van gebruikte poreuze tegels 30 x 30 x 3,5

Gebruikte tegels nr	Gewicht ovdroog	Poriënvolume (ϵ_t)	Vochtig			
			luchtgehalte (ϵ) Vol% %	vochtspanning (ψ) bij diffusie-meting m.bar	diffusie-weerstand (w) voor zuurstof sec cm ⁻¹	waterdoorlatendheid (K) cm uur ⁻¹
15	6667	34,1	28,0	- 58	1 000	0,20
16	6571	35,2	28,5	- 58	2 300	0,15
17	6657	34,2	27,7	- 58	1 600	0,18
18	6655	34,2	26,5	- 40	21 000	0,19
19	6490	36,2	29,2	- 40	26 000	-
20	6740	36,6	39,2	- 40	26 000	0,35
21	6885	31,9	24,1	- 40	980	0,22
22	6370	37,0	31,4	- 60	740	0,15

4. DE WATERDOORLATENDHEID

4.1. Gebruikte formules bij meting

Stel: de hoeveelheid water cm³ die per cm² per sec door de tegel stroomt is F.

F wordt gemeten als:

$$F = \frac{\Delta Q}{\Delta t \times opp} \quad (3)$$

ΔQ = hoeveelheid water, cm³, die door de tegel stroomt tussen

$t = t_0$ en $t = t_t$; (Δt) sec

opp = oppervlakte van de tegel (cm²)

Voor waterstroming geldt ook:

$$F = K \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (4)$$

Tabel 4. Weerstand voor gasdiffusie en waterdoorlatendheid van gebruikte tegels te Amsterdam

Vochtig = uitgezakt na regen, vochtspanning ~ 50 m.bar

Droger = na 3 dagen uitdrogen bij 20°C

Tegel nr	Gewicht ovendroog	Dikte van de tegel	Poriën- volume (ϵ_t)	Vochtig		'Droger'		waterdoor- latendheid (K) cm uur ⁻¹
				lucht- gehalte (ϵ) vol.%	diffusie- weerstand voor zuurstof sec cm ⁻¹	lucht- gehalte (ϵ) vol.%	diffusie- weerstand voor zuurstof sec cm ⁻¹	
1	10 956	5,4	16,5	7,7	8 800	10,2	2750	0,14
2	10 398	5,0	14,5	4,8	9 050	7,4	700	0,03
3	10 817	5,2	14,3	5,6	11 900	8,4	3300	0,03
4	10 959	5,35	15,7	5,9	3 400	8,4	3350	0,01
5	11 050	5,4	15,8	7,0	5 250	9,7	2650	0,03
6	10 561	5,0	12,3	2,2	18 000	4,9	3550	0,004+
7	10 412	5,2	21,4	11,9	14 500	-	-	0,002+
8	10 389	4,95	13,6	4,2	6 950	6,5	7000	0,002+

+ met algen begroeide tegels

Voor de tegel vertaald:

K = doorlatendheid (cm sec^{-1})

Δp = potentiaalverschil tussen bovenkant en onderkant tegel (cm)

Δx = afstand boven- en onderkant tegel (cm)

Nemen we aan dat:

p onderkant tegel = 0

p bovenkant tegel = hoogte waterkolom erboven h_w (cm) plus plaats-
hoogte ten opzichte van onderkant: h_m (cm)

dan geldt:

$$F = K \frac{h_w + h_m}{h_m} \quad (4a)$$

Uit (3) en (4a) volgt nu:

$$K \left(\frac{h_w + h_m}{h_m} \right) = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot opp} \quad (5)$$

hieruit volgt:

$$K = \left(\frac{h_m}{h_w + h_m} \right) \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot opp} \quad \text{cm sec}^{-1} \quad (6)$$

4.2. H e t w a t e r t r a n s p o r t d o o r w e g d e k k e n

Nemen we aan, dat het watertransport door een dek straatstenen of trottoirtegels zeer miniem is, dan zal de grootte van de voegen en de samenstelling van het voor de voegen gebruikte materiaal het watertransport van deze wegdekken bepalen.

Stel dat de voegen tussen de trottoirtegels, respectievelijk straatstenen gevuld zijn met schoon grof zand. De verzadigde waterdoorlatendheid (K_o) van dit zand is ca. $10 \text{ m dag}^{-1} = 41,67 \text{ cm uur}^{-1}$.

Heeft de gebruikte bestrating bijvoorbeeld 0,6 opp. % voeg (trottoirtegels) en de tegel zelf is ondoorlatend dan is de waterdoorlatendheid voor het gehele oppervlak $0,006 \times 41,67 = 0,25 \text{ cm uur}^{-1}$.

Door inspoeling van stof en vuil zal de waterdoorlatendheid zeker dalen tot 1 m dag^{-1} , of minder, $< 4,167 \text{ cm uur}^{-1}$. De waterdoorla-

tendheid van een dek trottoirtegels is dan $< 0,025 \text{ cm uur}^{-1}$.

Regent het nu met een intensiteit van $2 \text{ mm uur}^{-1} = 0,2 \text{ cm uur}^{-1}$, dan is het duidelijk dat bij een 'normaal' trottoir met vervuilde voegen het grootste deel van de regen afgevoerd zal worden via de oppervlakte.

4.3. M e e t r e s u l t a t e n

In de tabellen 2 tot en met 4 zijn ook de resultaten van de waterdoorlatendheid (K) weergegeven.

Hieruit blijkt dat van:

1. nieuwe tegels, K bijzonder hoog is (tabel 2);
2. gebruikte tegels, K laag tot zeer laag is ($0,20 - 0,03 \text{ cm uur}^{-1}$).

Er bestaat een verband tussen ϵ_t en K.

	ϵ_t	K (cm uur ⁻¹)	
serie 2	0,34	0,20	
serie 1	0,24	0,10	
serie 3	0,15	0,03	(met algen, K = $0,002 \text{ cm uur}^{-1}$)

Van een normaal dek trottoirtegels $K \approx 0$, bijdrage van de voegen $< 0,025 \text{ cm uur}^{-1}$.

De waterdoorlatendheid van vuile tegels neemt af met het poriënvolume. Daar waar de oppervlakte is volgegroeid met algen is K praktisch 0.

Bij een regenintensiteit van $0,2 \text{ cm uur}^{-1}$, zal dus alleen bij de meest poreuze tegels, het meeste water door de tegel lopen (tabel 3). Bij serie 1 en 3, stroomt 50 respectievelijk 85% van het regenwater weg.

5. CONCLUSIE

Uit de meetgegevens blijkt, dat de gasuitwisseling door deze 'poreuze' tegels, ook na een langdurig gebruik, aanzienlijk hoger blijft dan door een dek normale trottoirtegels.

De mogelijke gasuitwisseling door een dek vuile vochtige poreuze

tegels is zeker 3 x hoger en 3 à 4 uur na regen bij drogend weer, ca 30 x hoger dan een normaal trottoir.

De poreuze tegels zijn dus zeer geschikt om wegdekken aan te leggen, die blijvend voldoende gasdoorlatend zijn.

De waterdoorlatendheid van nieuwe tegels is zeer hoog. Als echter vuil en slib inspoelt, of eventueel algengroei ontstaat, kunnen de tegels weer zo ondoorlatend worden, dat evenals bij een normaal trottoir, het grootste deel van het regenwater weer oppervlakkig afstroomt en niet bijdraagt tot de vochtvoorziening van de bomen.

LITERATUUR

BAKKER, J.W. en A.P. HIDDING, 1967. De invloed van verslemping op zuurstofdiffusie in de grond. Nota ICW 403.

——— The influence of soil structure and air content on gas diffusion in soils. Neth. J. Agric. Sci. 18:37-48. Techn. Bull. ICW 71.

——— Luchthuishouding van bodem en plant. Overzicht processen en kenmerkende grootheden. Nota ICW 610.

——— Toelaatbare doseringen van organische meststoffen onder wegdekken in verband met de luchthuishouding in de grond rond straatbeplanting. Nota ICW 872.

——— en M. UITTENBOOGAARD. Een onderzoek van het bodemmilieu voor straatbomen Groen 30, 10, 1974. Verspreide overdrukken ICW 166.

VERHAEGH, W.B. Handleiding voor het bepalen van de diffusiecoëfficiënt voor zuurstof in grondmonsters (niet gepubliceerd).