0204

[i]ngenieursbureau Utrecht

Literatuurstudie naar verliesprocessen en afstromingspercentages in stedelijke gebieden

Eindrapport

IBU - Ingenieursbureau Utrecht
Postadres: Postbus 8375, 3503 RJ Utrecht
Bezoekadres: Ravellaan 96, Utrecht
Telefoon: 030 - 286 43 23
Fax: 030 - 286 43 48

Documentnummer: 400226.1
Projectnummer: 400226
Datum: augustus 2000
Auteur(s): M.B.M.M.P. de Burger

In opdracht van:
Stichting Rioned
Postbus 133
6710 BC Ede

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING

1 INLEIDING 1

2 AFSTROMINGSPROCESSEN 3

3 VERLIESPROCESSEN 5
3.1 Interceptie 5
3.2 Bevochtiging, Plasvorming en Oppervlakteberging 6
3.2.1 Bevochtiging 6
3.2.2 Plasvorming 8
3.2.3 Oppervlakteberging 10
3.3 Infiltratie 13
3.3.1 Infiltratie in onverhard oppervlak 13
3.3.2 Infiltratie in verhard oppervlak 15
3.4 Verdamping 18
3.4.1 Verdamping vanaf onverharde oppervlakken . . . 19
3.4.2 Verdamping vanaf verharde oppervlakken 22

4 AFSTROMINGSCOËFFICIËNTEN 25
4.1 Inleiding 25
4.2 Onderzoeksresultaten 27
4.2.1 Afstromingscoëfficiënt C_e 28
4.2.2 Afstromingscoëfficiënt C_t 33
4.2.3 Afstromingscoëfficiënt C_v 38

5 DE VERLIESPROCESSEN IN DE LEIDRAAD RIOLERING 49

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN 51

7 LITERATUURLIJST 55
7.1 Directe Verwijzingen 55
7.2 Indirecte Verwijzingen 58

BIJLAGE 1 INTERCEPTIEVERLIES VOLGENS HORTON 63

BIJLAGE 2 BESCHRIJVING INFILTRATIE 65

BIJLAGE 3 MEETLOKATIES VAN ONDERZOEK IN LELYSTAD 69

BIJLAGE 4 ONDERZOEKEN IN LOENEN EN OOSTERHOUT 73

SAMENVATTING

Stichting RIONED heeft Ingenieursbureau Utrecht opdracht gegeven voor het uitvoeren van een literatuurstudie naar verliesprocessen en de afstromingspercentages in stedelijke gebieden. Op deze literatuurstudie zal een voorstel voor het opzetten van eventuele aanvullende praktijkonderzoek en -metingen gebaseerd worden.

Inzicht in de verliesprocessen en de afstromingspercentages is van belang voor het berekenen van rioolstelsels en voor het dimensionering van infiltratiesystemen.

Vanaf het moment dat de neerslag gevallen is, totdat de neerslag het riool bereikt, vindt er een aantal afstromingsprocessen plaats. Deze afstromingsprocessen bestaan uit verliesprocessen en vertragingsprocessen. Alleen het verliesproces is bepalend voor het afstromingspercentage en bestaat uit interceptie, bevochtiging, plasvorming, verdamping en infiltratie.

In de literatuur wordt het interceptieverlies meestal samengenomen met het bevochtigingverlies. Het bevochtigingverlies beïnvloedt het eerste gedeelte van de neerslaggebeurtenis en is afhankelijk van het oppervlaktetype en de helling. Het bevochtigingverlies zal voor het stedelijk gebied over het algemeen onder de 2,0 mm liggen.
Plasvorming is afhankelijk van locale factoren zoals de aard en de helling van het oppervlak. Het verlies van neerslag door plasvorming zal tussen 0,2 en 6 mm liggen en bij een toenemende helling wordt het verlies door plasvorming minder. In de literatuur wordt niet altijd een onderscheid gemaakt tussen plasvorming en bevochtiging. Deze twee verliestermen worden samen vaak oppervlakteberging genoemd.
Het verlies door de oppervlakteberging in een stedelijk gebied ligt tussen de 0,2 en 15 mm.
Infiltratie van neerslag kan in open verhard en onverhard oppervlak plaatsvinden; in gesloten verhard oppervlak vindt geen infiltratie plaats. Het infiltratieverlies begint nadat het oppervlak bevochtigd is en voordat plasvorming optreedt. Infiltratie in onverharde oppervlakken kan bijvoorbeeld worden beschreven met de vergelijking van Horton, Green-Ampt en Kostiakov. Het infiltratieverlies in open verhard oppervlak vindt vooral plaats via de voegen en de open ruimten tussen de elementen van de verharding. Het verlies kan beschreven worden met de formule van Hillel en Gardner die gebaseerd is op de formule van Green-Ampt. Het infiltratieverlies van neerslag in open verharde oppervlakken bedraagt normaal 5-10 mm/uur. Het kan echter oplopen tot ver boven 200 mm/uur afhankelijk van het type bestrating.
De neerslag verdampt van bevochtigde oppervlakken, uit plassen en tijdens het afstromen. Verdamping van een onverhard begroeid oppervlak kan beschreven worden met de som van de verdamping van het interceptiewater, de verdamping van de bodem en de transpiratie via

de huidmondjes. De verdamping van verharde oppervlakken kan beschreven worden met de vergelijking van Penman.

De afstromingscoëfficiënt van een oppervlak is de verhouding tussen de gevallen neerslag en de hoeveelheid die via de regenwaterafvoer is afgestroomd. Het oppervlak waar de afstromingscoëfficiënt aan gerelateerd is kan verschillen.
De afstromingscoëfficiënt kan gerelateerd zijn aan:
- het verhard oppervlak (C_v);
- een totaal gebied bestaande uit verharde en onverharde oppervlakken (C_t);
- een oppervlak bestaande uit één oppervlaktetype (C_e).

Voor C_t wordt in verschillende onderzoeksresultaten onderscheidt gemaakt naar de omschrijving van de bebouwing zoals dicht bebouwd, stadscentrum, weids bebouwd enz.
De waarde van C_t liggen allemaal onder de 1. Hoe dichter de bebouwing (hoe meer verharding) des te hoger de C_t waarde ligt. Onderzoeken uitgevoerd in Nederland relateren de afstromingscoëfficiënten over het algemeen op het verharde oppervlak. Er wordt dan vanuit gegaan dat van het onverharde oppervlak geen afstroming plaatsvindt. De C_v waarde kan groter dan 1 worden omdat afstroming van onverharde oppervlakken via het verhard oppervlak in de praktijk soms wel mogelijk is.
De C_e waarde zijn gespecificeerd naar het soort oppervlak. Met de C_e waarden van verschillende oppervlakken kan de afstromingscoëfficiënt van een geheel gebied worden berekend.

Het heeft de voorkeur om zoveel mogelijk afstromingscoëfficiënten te verzamelen van afzonderlijke elementen. Met behulp van deze gegevens kan dan voor een willekeurig terrein een inschatting van de afstromingscoëfficiënt van dat terrein worden gemaakt.

1 INLEIDING

In opdracht van Stichting RIONED voert Ingenieursbureau Utrecht een studie uit naar afstromingspercentages van verschillende typen (on)verhard oppervlak in stedelijk gebied.
De eerste fase van het onderzoek bestaat uit twee gedeelten:
1) de voorliggende literatuurstudie naar de verschillende verliesprocessen en afstromingspercentages. Dit voor verschillende typen oppervlak en typen afstroming.
2) voorstel voor een opzet voor eventuele aanvullende praktijkonderzoeken en -metingen. Dit voorstel wordt gebaseerd op de resultaten van het literatuuronderzoek.
Wanneer aanvullend onderzoek wenselijk blijkt, wordt in de tweede fase het praktijkonderzoek uitgevoerd.
Op vertragingsprocessen wordt in deze studie niet ingegaan,

In dit rapport worden de verschillende verliesprocessen en afstromingspercentages gekwantificeerd. Hierbij wordt gebruik gemaakt van verschillende nationale en internationale bronnen. Op basis van de gevonden resultaten wordt aangegeven op welke terreinen in welke mate (praktische) kennis ontbreekt en van welke oppervlakken het wenselijk is om daar uitgebreider praktijkonderzoek naar uit te voeren.

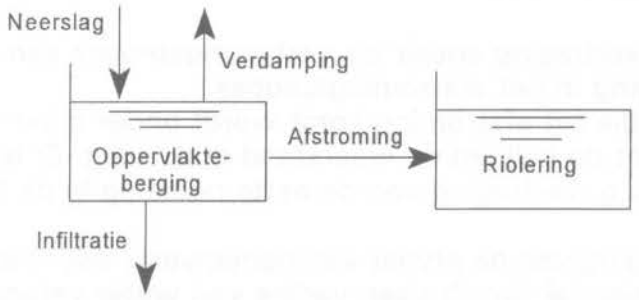
Inzicht in afstromingspercentages en de verliesprocessen is van belang voor onder meer berekeningen aan rioolstelsels, zoals de bepaling van de dimensies van leidingen en de berekening van overstortvolumes. Ook is dit percentage van belang bij de dimensionering van andere ontwateringssystemen zoals van een infiltratievoorziening om na te kunnen gaan wat het effect van deze systemen is.

In deze literatuurstudie wordt onderscheid gemaakt in de volgende afvoerende oppervlaktetypen:
- gesloten verhard oppervlak (b.v. asfaltverharding);
- dakoppervlak;
- open verhard oppervlak (b.v. elementenverharding, klinkers, tegels);
- onverhard oppervlak.

2 AFSTROMINGSPROCESSEN

Voordat de neerslag het rioolstelsel bereikt, vinden er afstromingsprocessen plaats. Deze processen kunnen verdeeld worden in verlies- en vertragingsprocessen.

Neerslag wordt, nadat een deel via interceptie verdwijnt, geborgen op en aan het oppervlak. Vandaar uit vindt verdamping en infiltratie plaats, de rest komt vertraagd tot afstroming naar het rioolstelsel. In onderstaande figuur 2.1 wordt dit schematisch weergegeven.



Figuur 2.1: Neerslag-inloopmodel. Naar: Leidraad Riolering, C-2100 (Ministerie van VROM en Stichting RIONED, 1992)

Het effect van deze processen wordt bepaald door de aard van het afvoerend oppervlak (NWRW, 1989a), de actuele regenval en de voorafgaande gebeurtenis (hydrologische geschiedenis) (Gustafsson et al., 1991).

Verliesprocessen die een rol spelen bij de afstroming van neerslag zijn:

Interceptie: Neerslag wordt afgevangen voordat deze het oppervlak bereikt, bijvoorbeeld door bomen en auto's.

Bevochtiging: Het oppervlak wordt nat doordat water wordt gebonden aan het oppervlak. Het gebonden water komt niet meer tot afstroming. Het bevochtigde oppervlak droogt alleen op door verdamping.

Plasvorming: Door oneffenheden op straat kan water geborgen worden op het oppervlak. Dit water komt niet tot nauwelijks tot afstroming. Plassen op ondoorlatende ondergrond verdwijnen hoofdzakelijk via verdamping. Plassen op onverharde oppervlakken verdwijnen vooral door infiltratie. Ook door mechanische invloeden (b.v. auto's die door plassen rijden) verdwijnen plassen. Met name de helling van het oppervlak en de toestand van de bestrating zijn van invloed op de plasvorming.

Oppervlakteberging: Dit is de som van bevochtiging en plasvorming.

Verdamping: Verdamping zorgt voor het opdrogen van bevochtigde oppervlakken. Ook het afstromende water kan verdampen. Verdamping van de neerslag voordat de neerslag tot afstroming komt, speelt in het neerslagverlies proces meestal een ondergeschikte rol.

Infiltratie: Infiltratie van water in de bodem treed vooral op via het onverhard oppervlak en elementenverharding. De mate van infiltratie wordt voornamelijk bepaald door de aard van het oppervlak, het vochtgehalte van de bodem en de toestand van de voegen bij elementenverharding. Bij onverhard oppervlak is ook de aard van de begroeiing en de grondsoort van belang.

Vertragingsprocessen:

Afstromingsvertraging speelt als vertragingsproces een belangrijke rol in de vertraging in het afstromingsproces.
De neerslag die tot afstroming komt wordt onder meer vertraagd door de afstand tot de kolk en de weerstand onderweg. Er is sprake van omvorming c.q. vertraging van de netto neerslag in de tijd.

Bij de vertraging van de afvoer van hemelwater door het contact met het grondoppervlak wordt geen verlies van water verondersteld.
Dit is niet geheel onjuist omdat immers bij een traag afstromingsproces er meer afstromend water kan verdampen. Dit effect is echter minimaal.

Deze studie gaat alleen in op verliesprocessen. Op vertragingsprocessen zal dan ook niet nader worden ingegaan.

3 VERLIESPROCESSEN

In dit hoofdstuk worden de volgende verliesprocessen besproken:
- Interceptie;
- Bevochtiging;
- Plasvorming;
- Oppervlakteberging;
- Infiltratie;
- Verdamping.

3.1 Interceptie

Voordat de neerslag het bodemoppervlak bereikt, wordt een deel onderschept (interceptie) door bijvoorbeeld planten, struiken, bomen en auto's. Er wordt verondersteld dat de interceptie vergelijkbaar is met een bepaalde hoeveelheid berging die vanaf het begin van de neerslag direct en volledig wordt benut.

De hoeveelheid interceptie hangt af van de neerslaghoeveelheid, de hoogte van het gewas en een bedekkingsgraad, aldus berekeningen en metingen van Horton (s.a.). Hij hanteert hierbij de volgende relatie (formule 1):

$$I_i = a + b.P^d.A_c \qquad (1)$$

waarin: I_i = interceptie [mm]
a, b en d = constanten [-], soms [m^{-1}] bij afhankelijkheid van de gewashoogte [m]
P = neerslaghoeveelheid [mm]
A_c = bodembedekkingsgraad [-]

Kibler (1982) geeft bij de formule van Horton waarden voor de verschillende constanten. Omdat deze waarden niet voor stedelijke gebieden relevant zijn, zijn deze niet hier maar in bijlage 1 gegeven.

In het Cultuurtechnisch Vademecum (Cultuurtechnische vereniging, 1988) wordt gesproken van een maximale hoeveelheid water die door een gewas kan worden vastgehouden. Dit is de I_m-waarde. Voor gras wordt een I_m-waarde van 0,5 mm gehanteerd, voor loofbos 1,5 mm en voor naaldbos 2,0 mm.

In stedelijke gebieden treden interceptieverliezen o.a. op door bomen, struiken, geparkeerde auto's en gebruik van regentonnen. De interceptie door auto's hangt af van het aantal geparkeerde auto's en daaraan gekoppeld het moment van de dag en van de week (Van de Ven, 1989).

Volgens WPCF (1969) is de interceptie voor stedelijke rioleringsgebieden te verwaarlozen voor de ontwerpberekening. Meestal wordt interceptie samen genomen met het bevochtigingsverlies.

3.2 Bevochtiging, Plasvorming en Oppervlakteberging

In de onderstaande paragrafen wordt onderscheid gemaakt in bevochtiging, plasvorming en oppervlakteberging.

3.2.1 Bevochtiging

Volgens Van de Ven (1989) beïnvloedt bevochtiging de afvoer in de eerste 5 tot 10 minuten van de afstromingsgebeurtenis. Over het algemeen zijn de plassen op betonklinkers gevuld vooraleer de volledige bevochtiging heeft plaatsgevonden.

Pecher (1969), Van Dam en Schotkamp (1983), Van de Ven (1986) en Geiger en Dreiseitl (1995) hebben uit de literatuur verschillende waarden voor het bevochtigingsverlies afgeleid. Deze zijn gegeven in tabel 3.1. De gegevens van Van Dam en Schotkamp hebben betrekking op één parkeerplaats, waarvan de bestrating circa 14 jaar oud was.

oppervlakte	*bevochtigingsverlies [mm]*				
	Pieper (1938) [3]	Van Braun (1959) [3]	ATV-Regelwerk (1977) [1][2]	Van Dam en Schotkamp (1983)	Van de Ven (1986) [4]
1% < helling < 10%			0,5		
Gesloten verhard oppervlak		0,2-0,5			
asfalt met split	0,52				
glad asfalt	0,18				
asfalt					0,07
plat dak					0,5
hellend vlak					0,1
Open verhard oppervlak					
cementbeton (ruw)	0,55				
cementbeton	0,35				
betontegels, -klinkers				0,5 (0-10 min.)	
klinkers + tegels					0,7
koperslakkeien				0,7 (0-5min.) 0,85(0-15 min)	
onverhard oppervlak		0,2-2,0			
gras					1,0
struiken					1,5
overig onverhard					0,0

1): Duitse standaardwaarden 2): volgens Geiger en Dreiseitl (1995) 3): volgens Pecher (1969)
4): volgens NWRW (1989a)

Tabel 3.1: bevochtigingsverliezen voor verschillende soorten oppervlak, volgens Pieper (1938), Van Braun (1959), ATV-Regelwerk (1977), Van Dam en Schotkamp (1983) en Van de Ven (1986). Van Dam en Schotkamp geven waarden afhankelijk van het tijdstip vanaf de aanvang van de bui.

Conclusie bevochtigingsverlies

In vijf literatuurbronnen zijn gegevens gevonden voor het bevochtigingsverlies.
Voor gesloten verharde oppervlakken ligt de bevochtiging tussen 0,07 en 0,52 mm. Voor open verhard ligt het tussen 0,35 en 0,85 mm en voor onverharde oppervlakken ligt het tussen 0,0 en 2,0 mm.

Het is aannemelijk dat het bevochtigingsverlies voor gesloten verhard oppervlak kleiner is dan voor open verhard oppervlak en dat die weer kleiner is dan voor onverhard oppervlak. Dit blijkt niet geheel uit de

literatuurgegevens. Er bestaat dan ook twijfel over de juistheid van de ondergrens van 0,0 mm voor onverhard oppervlak.

In de literatuur wordt het bevochtigingsverlies van open verhard en onverharde oppervlakken niet aan de helling gerelateerd. Voor gesloten verhard wordt alleen het dakoppervlak aan de helling gerelateerd.

3.2.2 Plasvorming

De plasvorming op verharde en onverharde oppervlakken hangt sterk af van lokale factoren en de aard van het oppervlak.
Water dat door plasvorming geborgen wordt, zal niet tot nauwelijks tot afstroming komen. Het water verdampt hoofdzakelijk.

Voor modellering van de afvoer suggereert Linsley (1975) dat het totaal van het volume V_d dat geborgen wordt in plassen, beschreven kan worden met vergelijking 2:

$$\Delta V_d = e^{-P_e/S_d} \Delta P_e \qquad (2)$$

waarin: V_d = hoeveelheid geborgen in plassen [mm]
P_e = de afgevoerde neerslag, of neerslag minus de verdamping, interceptie en infiltratie [mm]
S_d = Totaal beschikbare berging in plassen [mm]

Hicks (1944) suggereert voor verschillende grondsoorten een maximale plasvormingsdiepte van 5,1 mm voor zand, 3,8 mm voor leem en 2,6 mm voor kleigrond.

In de onderstaande tabel 3.2 zijn verschillende literatuurgegevens verzameld.

type oppervlak	*plasvorming [mm]*					
	Pecher (1969)	Pfeiff (1971) [1]	Linsley (1975) [5]	ATV-Regelwerk (1977) [4][7]	Van de Ven (1986) [6]	Van de Ven (1992)
helling < 1%				2,0		
helling 1-4 %				1,5		
helling 4-10%				1,0		
helling > 10%				0,5		
hellend vlak					0,0	
Gesloten verhard oppervlak						
asfalt					0,25	
zeer glad, vlak	0,2-0,4					
glad, vlak	0,5-0,7					
plat dak					2,0	4,0
Open verhard oppervlak			1,60			
normaal verhard terrein						0,5-1,5
normaal verhard terrein, hoofdweg						2,0 [2]
klinkers + tegels					0,9	
Onverharde oppervlakken		formule[3]	6,35			
gras					2,5	
struiken					2,5	
kale grond	0,6-2,5					
begroeide gronden	2,5-4,0					
overig onverhard					2,5	

1): volgens Van de Ven (1992)
2): mogelijk door spoorvorming
3): volgens de formule 0,645 / (I+0,084), waarin I=bodemhelling
4): Duitse standaardwaarden
5): volgens Kibler (1982)
6): Onderzoek in Lelystad
7): volgens Geiger en Dreiseitl (1995)

Tabel 3.2: Hoeveelheid plasvorming voor verschillende typen oppervlak volgens Pecher (1969), Pfeiff (1971), Linsley (1975), ATV-Regelwerk (1977), Van de Ven (1986) en Van de Ven (1992).

Conclusie plasvormingsverlies

In zes literatuurbronnen zijn gegevens gevonden voor het plasvormingsverlies.
Voor gesloten verharde oppervlakken ligt de plasvorming tussen 0,2 en 4,0 mm. Voor open verhard ligt het tussen 0,5 en 2,0 mm en voor onverharde oppervlakken ligt dit tussen 0,6 en 6,35 mm.

De maximum waarde van gesloten verhard is groter dan de maximum waarde van open verhard. Dit lijkt onlogische omdat open verharding normaliter uit elementen bestaat waardoor er een grotere kans op onderlinge verzakking bestaat. De kans op plasvorming neemt dan toe. Onverhard terrein heeft de grootste plasberging omdat deze terreinen niet per definitie onder verhang worden gelegd.
De plasberging neemt af met toenemende helling tot 0,0 mm.

3.2.3 Oppervlakteberging

Oppervlakteberging is zoals eerder aangegeven, de som van bevochtiging en plasvorming.

In de onderstaande tabel 3.3 wordt een overzicht gegeven van verschillende waarden voor de oppervlakteberging op basis van een aantal literatuurbronnen.

oppervlak (*I = helling*)	*oppervlakteberging [mm]*									
	Pieper (1938)[5]			Kidd (1978)	Kibler (1982)	NWRW (1989a)	WPCF (1969)[4][6]	Martz (1995)	Falk en Niemezynowicz (1979)[7]	Wallingford-procedure (1981)[7][8]
	1%[1]	5%[1]	9%[1]	formule[2]						
helling< 2%										0,64
2%≤ helling≤ 3,5%										0,44
helling >3,5%										0,36
verschillende soorten materialen 1%<I<4%				0,1 - 1,5					0,13 - 1,05	
Gesloten verhard oppervlak					1,3-3,8 2,6[5]					
asfalt met split	0,68	0,50	0,50							
glad asfalt	0,32	0,19	0,18							
gesloten verhard, I<1%				0,8-1,7		0,7				
gesloten verhard, 1%<I<3%				0,45-0,8						
hellend, I>1%						0,2				
wegen en daken, vlak							1,59			
dakoppervlak, I<1%					2,6 [5]-7,6	2,5				
dakoppervlak, I>1%					1,3 [5]-2,6	0,2				0,4
Open verhard oppervlak										
kleinplaveisel	0,90	0,45	0,41							
ruw cementbeton	0,74	0,55	0,55							
middel ruw cementbeton	0,43	0,35	0,35							
vlak, I<1%						1,5				
hellend, I<1%						0,8				
hellend terrein							gering			
Onverhard Oppervlak								0,5- 1,2[3]		
groenstroken					5,1-15,2 7,6 [5]					
gazon					5,1-12,7 7,7 [5]					
onverhard, vlak							6,35			
vlak, I<1%						3,0				
hellend, I>1%						1,5				

1):Helling zie ook hoofdtekst (ad1) 2): zie hoofdtekst (ad2) en formule 3 en 4 3): afhankelijk van de helling
4): volgens zgn. Chicago Method 5): aanbevolen waarde 6) volgens Comm Riol. en Waterverontr. (1972)
7): volgens Van de Ven (1989) 8): Working Party on the Hydraulic Design of Storm Sewers (1981)

Tabel 3.3: Oppervlakteberging voor verschillende typen oppervlak volgens Pieper (1938), Kidd (1978), Kibler (1982), NWRW (1989a), WPCF (1969) Martz (1995), Falk en Niemezynowicz (1979) en Wallingfordprocedure (1981).

Pieper (1938) vermeldt dat plasvorming een belangrijke invloed heeft op de afstroming. Hij geeft aan dat plasvorming ook optreedt bij hellend terrein. Pieper maakte geen onderscheid in verlies door adhesie, verzakkingen en sec door plasvorming. Bij geringe helling zijn er plassen, bij grotere hellingen zijn de plassen leeg en is alleen bevochtiging van belang (Commissie Riolering en Waterverontreiniging, 1972).

Kidd (1978) beschrijft op basis van metingen in 19 gebieden in Nederland, Zweden, Engeland en Australië aan open en gesloten verhard oppervlak het verband tussen oppervlakteberging en terreinhelling. Zie formule 3.

$$B_o = 0{,}77 . I_t^{-0{,}49} \qquad (3)$$

waarin: B_o = oppervlakteberging [mm]
I_t = terreinhelling [%]

De correlatiecoëfficiënt tussen B_0 en I_t was 0,85. De waarden waartussen de oppervlakteberging normaliter varieert zijn gegeven in tabel 3.3.

Een vergelijkbare relatie is in Hydroworks opgenomen voor ontwerpberekeningen voor riolering (Working Party on the Hydraulic Design of Storm Sewers, 1981); zie formule 4.

$$B_o = 0{,}71 . I_t^{-0{,}48} \qquad (4)$$

Een andere formule voor de oppervlakteberging is die van Lisley-Kohler-Paulhus (formule 5) (Artina en Marinelli, 1991).

$$s(t) = (p_n(t) - f(t)) . e^{\frac{I_e(t) - F_e(t)}{S_d}} \qquad (5)$$

waarin: $s(t)$ = oppervlaktebergingsintensiteit op tijdstip t [mm/uur]
$p_n(t)$ = neerslagintensiteit op tijdstip t [mm/uur]
$f(t)$ = infiltratie op tijdstip t (zie formule 6) [mm/uur]
$I_e(t)$ = totale hoeveelheid neerslag t/m tijdstip t [mm]
$F_e(t)$ = totale hoeveelheid infiltratie t/m tijdstip t [mm]
S_d = totale beschikbare oppervlakteberging [mm]

Conclusie oppervlakteberging

In zeven literatuurbronnen zijn gegevens gevonden voor de oppervlakteberging.

Voor gesloten verharde oppervlakken ligt de oppervlakteberging tussen 0,18 en 7,6 mm. Voor open verhard ligt het tussen 0,35 en 1,5 mm en voor onverharde oppervlakken ligt dit tussen 1,5 en 15,2 mm.

Het is logisch te veronderstellen dat de oppervlakteberging voor open verhard oppervlak groter is dan voor gesloten verhard oppervlak. De maximumwaarde van de oppervlakteberging voor open verhard oppervlak lijkt dan ook met 1,5 mm te laag gezien de maximumwaarden in de overige categorieen.

Alleen voor oppervlaktetypen wordt een verband tussen oppervlakteberging en helling gegeven. Dus niet voor afzonderlijke elementen.

3.3 Infiltratie

Infiltratie start direct vanaf het begin van de neerslaggebeurtenis. Bij gesloten verharde oppervlakken (zoals asfalt) is de infiltratie vrijwel nihil bij open verharde oppervlakken (zoals klinkers) kunnen aanzienlijke hoeveelheden infiltreren (Van de Ven, 1989).

Het verschil in infiltratie tussen onverharde en verharde oppervlakken blijkt uit de literatuurbronnen groot te zijn. Daarom worden beide onderdelen apart besproken.

3.3.1 Infiltratie in onverhard oppervlak

De spreiding in de literatuurwaarden voor infiltratie in onverhard terrein is zeer groot. Dit hangt samen met het verschil in de gebruiksvorm/aard van het onverharde oppervlak en met de grondsoort van de bodem (NWRW, 1989a).
De infiltratiecapactiteit van de bodem is ook afhankelijk van de doorlatendheid en het vochtgehalte.

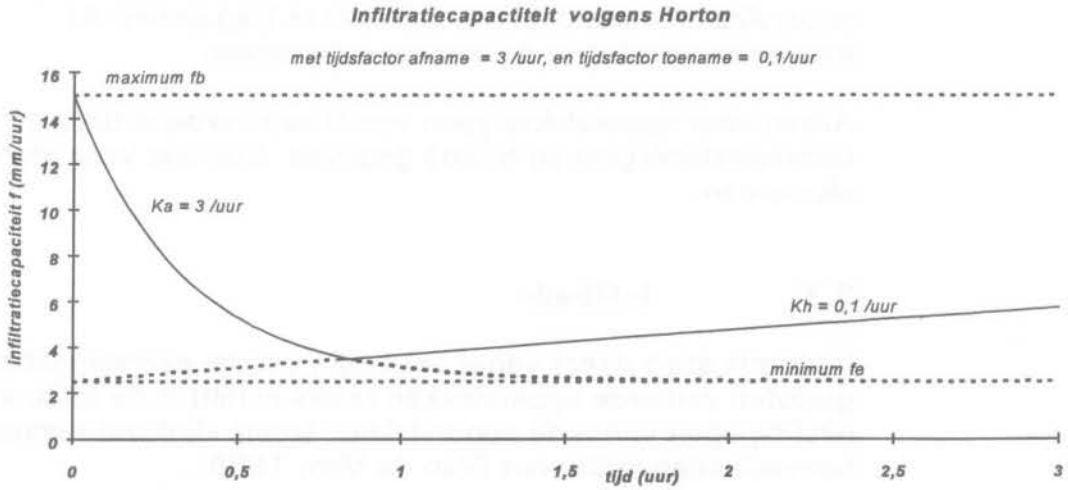
Horton (1940) beschreef de *afname* van de infiltratiecapaciteit met formule 6 en het *herstel* met formule 7.

$$f_t = f_e + (f_b - f_e).e^{-k_a.t} \qquad (6)$$

$$f_t = f_b + (f_b - f_e).e^{-k_h.t} \qquad (7)$$

waarin: f_t = infiltratiecapaciteit op tijdstip t [mm/uur]
f_e = minimale infiltratiecapaciteit [mm/uur]
f_b = maximale infiltratiecapaciteit (t=0) [mm/uur]
t = tijd sinds begin infiltratie [uur]
k_a = tijdsfactor afname infiltratiecapaciteit [uur^{-1}]
k_h = tijdsfactor herstel infiltratiecapaciteit [uur^{-1}]

De Leidraad Riolering (Ministerie van VROM en Stichting RIONED, 1992) stelt voor een waarde voor k_a van 3 uur^{-1} en voor k_h van 0,1 uur^{-1} te hanteren. Deze waarden zijn afgeleid uit Huber et al. (1984). Het verloop van de infiltratiecapaciteit bij deze k-waarden en veronderstelde minimum en maximumwaarden is gegeven in figuur 3.1.



Figuur 3.1: Verloop infiltratiecapaciteit zoals voorgesteld in de Leidraad Riolering.

De constanten k_a en k_h zijn vooral afhankelijk van de grondsoort, vegetatie en bodemdichtheid. f_b en f_e hangen af van bodemsoort, vochtgehalte, bodemdichtheid en bodembedekking (Koopmans et al., 1993).

De minimum infiltratiecapaciteiten (f_e) kunnen sterk van elkaar verschillen. Voor gras ligt deze waarde tussen 10 en 500 mm/uur. Voor kale en schaars begroeide grond worden waarden tussen 10 en 100 mm/uur gemeten (Ando et al., 1984). Als de grond belast wordt dan ligt f_b en f_e aanmerkelijk lager. Dit blijkt ook uit de metingen in Lelystad (NWRW, 1989a). Hier zijn maximale infiltratiecapaciteiten (f_b) gemeten gelegen tussen 30 en 600 mm/uur (De Roo, 1982).

Relevant in het kader van deze studie is:
- zandgronden hebben meestal een hoge infiltratiesnelheid;
- begroeiing bevordert de stabiliteit van de bodemstructuur en daardoor de infiltratiecapaciteit (Koopmans et al., 1993).

Van de Ven (1992) voegt toe dat wanneer de K-waarde in de vergelijking van Horton op 10 tot 30 minuten wordt geschat, het blijkt dat in de Nederlandse situatie de neerslagintensiteit de infiltratiecapaciteit kan overtreffen. Dit is bijvoorbeeld het geval in de winterperiode bij een bevroren ondergrond. Afstroming vanaf onverharde oppervlakken is dan mogelijk.

Een andere formule om de infiltratiesnelheid te beschrijven is die van Green-Ampt (s.a.) (formule 8) waarin onderscheid is gemaakt in de verzadigde en onverzadigde zone:

$$f = K \frac{H_0 + H_c + L}{L} = (\theta_v - \theta_0) \frac{dL}{dt} \qquad (8)$$

waarin:
- f = infiltratie-intensiteit [mm/uur]
- K = doorlaatvermogen van de verzadigde zone [mm/uur]
- H_0 = dikte waterschijf [mm]
- H_c = zuigspanning van de onverzadigde zone [mm]
- L = dikte bevochtigde (en verzadigde) zone [mm]
- θ_v = vochtgehalte in verzadigde zone [-]
- θ_o = vochtgehalte in onverzadigde zone [-]
- t = tijd sinds begin infiltratie [uur]

Wanneer deze vergelijking numeriek samen met de continuiteitsvergelijking wordt opgelost, wordt het verloop van f en I bepaald.

De vergelijking van Kostiakov (s.a.) (formule 9) en de vergelijking van Philip (1957) (formule 10) geven de cumulatieve infiltratie.

$$I_{cum} = \sqrt{2.K.H_c.(\theta_v - \theta_0)} \; . \; \sqrt{t} \qquad (9)$$

$$I_{cum} = \sqrt{2.K.H_c.(\theta_v - \theta_0)} \; . \; \sqrt{t} + \frac{2}{3} K.t \qquad (10)$$

waarin: I_{cum} = cumulatieve infiltratie [mm]:

$$I_{cum} = \int_0^t f dt$$

Daarnaast bestaan andere formules om infiltratie te beschrijven. Eén hiervan, de formule van Grandjean en Zech, is beschreven in bijlage 2.

3.3.2 Infiltratie in verhard oppervlak

Infiltratie in open verhard oppervlak

De infiltratie van water vanaf verharde oppervlakken vindt vooral plaats via voegen en open ruimten tussen de verhardingselementen. Met name de aard van het oppervlak en het vochtgehalte van de bodem zijn bepalend voor de infiltratiecapaciteit. Ook andere factoren zijn van belang. De doorlatendheid van elementenverhardingen is bijvoorbeeld afhankelijk van de toestand van de voegen. Het infiltratieverlies is

afhankelijk van de mate waarin de voegen tussen de elementen zijn vervuild, van de doorlatendheid en in mindere mate van het vochtgehalte van de ondergrond. Omdat elementen verharding in het algemeen worden aangelegd op een redelijk tot goed ontwaterd zandbed is de doorlatendheid in het algemeen groot en het vochtgehalte na een droogweerperiode van enkele dagen redelijk constant. Tegel- en klinkerverhardingen hebben vaak een aanzienlijke doorlatendheid.
Oudere verhardingen zijn over het algemeen vuiler en hebben daardoor een lagere infiltratiesnelheid. De bevestiging is volgens Van de Ven (1989) te vinden in tabel 3.4; Bebelaar en Bakker (1981) deden ook metingen aan jongere verharding en vonden veel hogere medianen en maxima voor de infiltratie-intensiteit.
De gegevens van Bebelaar en Bakker hebben betrekking op een groot aantal experimenten op bestratingen van diverse leeftijden (NWRW, 1989a).

De infiltratie kan het best worden beschreven met de formule van Hillel en Gardner voor infiltratie in een bodem met een korst; de formule voor de "korte duur" (4-6 uur) (formule 11)

$$I_{cum} = \sqrt{2.K.H_c.(\theta_v - \theta_0).t + (K.R_b.(\theta_v - \theta_0))^2} - K.R_b.(\theta_v - \theta_0) \qquad (11)$$

waarin: R_b = weerstand van de korst [uur]
zie formule 8 (Green-Ampt) voor een toelichting op de overige grootheden.

Deze formule is gebaseerd op de vergelijking van Green en Ampt. De Horton-vergelijking blijkt eveneens in staat om het gemeten infiltratieverloop redelijk goed weer te geven (Van de Ven, 1992).

type bestrating (maten in centimeters)	*infiltratiecapaciteit [mm/uur]*		*aantal experimenten*
	spreiding	*mediaan*	
Van Dam en Schotkamp, 1983			
betonklinkers (20x10x7)	7-24	14	6
klinkers (kopperslakeien) (20x20x8)	6-15	9	9
trottoirtegels (50x50x6)	7-16	10	4
Bebelaar en Bakker, 1981			
betonklinkers (22x11x8)	10-353	32	21
betonklinkers (22x9x6,5)	8-300	34	13
trottoirtegels (30x30x4)	1-254	16	15
graskeien (30% voeg) (20x20x10)	84 - 1300	320	4
Van Bakel et al., 1985 [1]		*gemiddelde*	
betonklinkers		27 [2]	
straatklinkers		14 [2]	
trottoirtegels		16 [3]	
poreuze trottoirtegels		0,3-1,4 [4]	
Van de Ven, 1986 [5]			
open verhard oppervlak		8 mm in eerste uur	
NWRW, 1989			
open verhard oppervlak	2 - 10		
onverhard oppervlak	10 - 30		

1): gebaseerd op Bebelaar en Bakker (1981) en Verhaegh (1979)
2): volgens dubbele-ring-methode
3): volgens enkele-ring-methode
4): waterdoorlatendheid van tegels zelf
5): voor 10 beschouwde buien in Lelystad

Tabel 3.4: Infiltratiecapaciteit voor verschillende typen bestratingen. Volgens Van Dam en Schotkamp (1983), Bebelaar en Bakker (1981), Van Bakel et al. (1985), Van de Ven (1986) en NWRW (1989).

Infiltratie in gesloten verhard oppervlak

Asfalt is over het algemeen ondoorlatend. De mediaan van de infiltratiecapaciteit van asfalt is 0 mm/uur volgens van Dam en Schotkamp (1983), Bebelaar en Bakker (1981), Van Bakel et al. (1985) en Van de Ven (1989). Wel kan soms door scheuren regenwater weg lekken.

Conclusie infiltratieverlies

Infiltratie van water in onverharde oppervlakken varieert sterk en is afhankelijk van lokale situaties zoals grondsoort, vegetatie, bodemdichtheid, vochtgehalte, ondergrond e.d.
De infiltratie vanaf verharde oppervlakken hangt af van verhardingsmateriaal, leeftijd en de mate van dichtslibbing van de voegen. Open verhardingen (zoals klinkerverhardingen) infiltreren goed, dit in tegenstelling tot wat vaak wordt aangenomen. Waarden hiervan liggen tussen 14 en 35 millimeter per uur. In het NWRW-inloopmodel worden lagere waarden gehanteerd. Gesloten verharde oppervlakken infiltreren niet tot nauwelijks.

3.4 Verdamping

Neerslag kan verdampen uit plassen, vanaf bevochtigde oppervlakken en tijdens het afstromen.
De verdamping van neerslag voordat het de grond bereikt is in het kader van dit onderzoek niet van belang. Immers, de afgestroomde hoeveelheid neerslag wordt vergeleken met de hoeveelheid neerslag die daadwerkelijk op het oppervlak terecht is gekomen. Dit laatste wordt met een regenmeter bepaald.

Bij verdamping in stedelijk gebied vindt vooral evapotranspiratie van onverhard oppervlak en evaporatie van verhard oppervlak plaats (Van de Ven, 1992). Evapotranspiratie is de totale verdampingsflux (de massa water die per eenheid van bodem- of wateroppervlak per tijdseenheid verdampt) van een begroeid oppervlak ($E = E_i + E_s + E_t$). Evaporatie is de verdampingsflux van het interceptiewater en vanuit de bodem ($E_i + E_s$). Zie formule 14 voor een toelichting op de genoemde grootheden.

De verdampte hoeveelheden zijn beperkt van omvang, vergeleken met de neerslag van zware maatgevende buien en met de hiervoor behandelde verliezen. Het verdampingsverlies wordt daarom vaak verwaarloosd.
Verdamping speelt vooral een rol doordat het de lediging van de berging in een plas kan beïnvloeden. In de zomer kan in plassen meer worden geborgen dan in de winter omdat in de winter de verdamping zeer traag verloopt (NWRW, 1989a).

Bij daken is het soort dak (schuin of plat) en het type dakbedekking van invloed op de mate van verdamping (Bader et al., 1995).

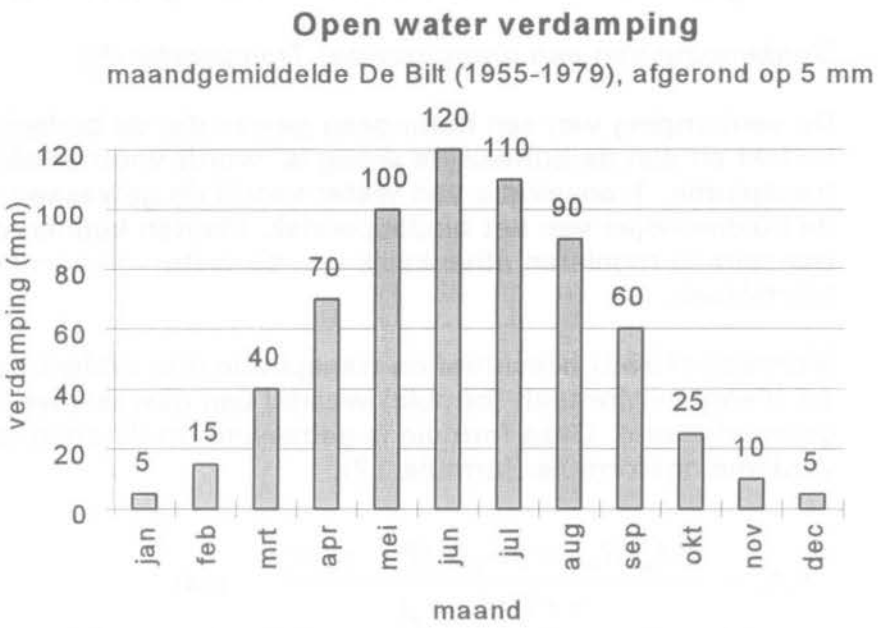
De verdamping van *open water* kan worden beschreven met de formule van Penman (1948) (formule 12) (Koopmans et al., 1993).

$$\lambda . E_{Pen} = \frac{s(R_n - G) + \gamma (e_s(T_a) - e_a).f(u)}{s + \gamma} \qquad (12)$$

waarin: λ = verdampingswaarde van water ($2{,}45.10^6$ J.kg^{-1} bij 20°C) [J/kg]
E_{pen} = open waterverdamping [kg/m^2.s]
R_n = netto straling voor wateroppervlak [W/m^2]
G = verandering per seconde van hoeveelheid warmte per m^2 in water opgeslagen [W/m^2]
s = helling van de verzadigde dampspanningscurve ($de_s(T)/dT$) [mbar/K]
γ = psychrometrische constante (≈0,66 mbar/K op zeeniveau) [mbar/K]
e_a = dampspanning van de lucht bij temperatuur T_a (°C) op 2 m hoogte [mbar]
e_s = verzadigingsdampspanning van de lucht bij temperatuur T_a [mbar]
f(u) = een empirische windsnelheidsfunctie:
f(u) = 3,7 + 4,0.u [W/m^2.mbar]
waarin: u = windsnelheid op 2 m hoogte [m/s]

Bij ondiepe wateren (dus ook bij plassen) is de warmteopslag (G) verwaarloosbaar (Van de Ven, 1992).

De maandgemiddelde verdamping in De Bilt voor de periode 1955-1979 is gegeven in figuur 3.2.



Figuur 3.2: Maandgemiddelde openwaterverdamping in De Bilt over de periode 1955-1979 (NWRW, 1989a)

3.4.1 Verdamping vanaf onverharde oppervlakken

De verdamping van het landoppervlak verschilt van die van open water. Factoren als bodemvocht en begroeiing zijn van belang.

Verdamping vindt plaats:
- via de plant (water via wortels opgenomen door de plant en afgegeven aan de atmosfeer via de huidmondjes) (transpiratie E_t);
- vanaf het bodemoppervlak (E_s);
- vanaf bladoppervlak (interceptieverdamping E_i).

Het totaal van deze onderdelen vormt de evapotranspiratie van een begroeid oppervlak (vergelijking 13):

$$E = E_t + E_s + E_i \qquad (13)$$

waarin: E = evapotranspiratie [kg/m^2.s]
E_t = transpiratie [kg/m^2.s]
E_s = verdamping bodemoppervlak [kg/m^2.s]
E_i = interceptieverdamping [kg/m^2.s]

Als onder de heersende meteorologische omstandigheden voldoende water aanwezig is voor evapotranspiratie, treedt de maximale verdamping op. Dan is zowel het bladoppervlak als de bodem vochtig. Indien de verdamping berekend wordt voor een droog gewasoppervlak dan is de interceptieverdamping $E_i = 0$.

Bij de toepassing van vergelijking 13 moet opgelet worden dat de netto stralingsterm (zie hieronder) niet 3 keer meegenomen wordt.

Verdamping van een droog gewas; Transpiratie (E_t)

De verdamping van een homogeen gewas dat de bodem volledig bedekt en aan de buitenzijde droog is, wordt voornamelijk bepaald door transpiratie. Transpiratie van water vanuit de gewassen vindt plaats via de huidmondjes van het bladoppervlak. Planten kunnen de hoeveelheid transpiratie reguleren afhankelijk van de watervoorziening in de wortelzone.

Monteith (1965) beschreef de transpiratie met onderstaande formule 14 (Penman-Monteith-formule) waarbij een gewasweerstand wordt geïntroduceerd. Deze formule is gebaseerd op de open water verdampingsformule (formule 12).

$$\lambda . E_t = \frac{s(R_n - H_{bod}) + \rho . c_p (e_s(T_a) - e_a)/r_a}{s + \gamma(1 + r_c/r_a)} \qquad (14)$$

waarin: E_t = transpiratieverdamping [kg/m^2.s]
c_p = soortelijke warmte van lucht bij constante druk (1005 J/kg.K) [J/kg.K]
ρ = dichtheid van lucht (1,2 kg/m3 bij 15°C en 1000 mbar) [kg/m3]
r_a = aërodynamisch weerstand van de luchtlaag tussen grond en 2 meter voor warmte en waterdamp [s/m]

H_{bod} = bodemwarmtestroom dichtheid (G in formule 12) [W/m^2]
r_c = gewasweerstand [s/m]

Voor gras is r_c 60 s/m (bij voldoende vocht in de bodem) (De Bruin en Holtslag, 1982; Stricker, 1981). Bij uitdroging kan dit oplopen tot 300 s/m (Cultuurtechnische vereniging, 1988).

Verdamping van kale grond, (E_s)

Voor kale grond geldt dat, bij uitdroging van het bovenste laagje, het capillair geleidingsvermogen sterk afneemt. Hierdoor wordt de watertoevoer van onderaf belemmerd, waardoor de verdamping afneemt. Van belang hierbij is de bodemsoort en de gehanteerde bodembewerkingsmethode. Ook de grondwaterstand en de weersgesteldheid zijn van belang (Cultuurtechnische vereniging, 1988).

Menenti (1984) geeft een model voor de verdamping van kale grond. Als vuistregel geldt dat natte, kale grond ongeveer 0,7 E_o^{MOW} verdampt. E_o^{MOW} [mm] is gelijk aan de open waterverdamping vermeld in de Maandoverzichten van het Weer van het KNMI (MOW). De berekening is op basis van een variant op de Penmanformule. Kale grond droogt na neerslag vrij snel uit zodat de duur dat de grond nat is, betrekkelijk kort is. Zelfs in natte perioden geldt dit. (Cultuurtechnische vereniging, 1988).

Verdamping van een nat oppervlak; Interceptie (E_i)

De verdamping van een nat (land)oppervlak wordt op dezelfde wijze berekend als de verdamping van open water. Hierbij zijn de windfunctie (f(u)), de nettostraling (R_n) en de warmteopslagterm (G) aangepast (formule 15).

$$\lambda . E_i = \frac{s(R_n - H_{bod}) + \rho . c_p (e_s(T_a) - e_a)/r_a}{s + \gamma} \qquad (15)$$

waarin: E_i = interceptieverdamping [kg/m^2.s]

De aërodynamisch weerstand hangt af van de windsnelheid, de stabiliteit van de lucht en de ruwheid van het aardoppervlak. Voor gras bijvoorbeeld is r_a ongeveer 40 tot 50 s/m. Voor een volgroeid naaldbos 10 s/m (Cultuurtechnische vereniging, 1988).

Overigens is de hoeveelheid interceptieverdamping maximaal gelijk aan de totale interceptie.

3.4.2 Verdamping vanaf verharde oppervlakken

Over verdamping vanaf verharde oppervlakken is weinig bekend. Een warme ondergrond straalt snel warmte uit. Deze warmtestroom kan een rol van betekenis spelen voor het verdampingsproces. Dit rechtvaardigt het toepassen van een gemodificeerde Penman-vergelijking met naast de netto stralingsterm ook nog een term voor de toevoer van bodemwarmte (Van de Ven, 1989). Van de Ven (1992) baseert zijn formule (16) op de Penman-vergelijking. Deze vergelijking is herschreven om aan te sluiten op de eerder besproken Penman-formules 12, 14 en 15.

$$\lambda . E_v = \frac{A(R_n + H_s) + B(e_s(T_a) - e_a)}{1 + A} \qquad (16)$$

waarin: E_v = verdamping verhard oppervlak [kg/m^2.s]
A = constante [-]
H_s = warmtestroom vanuit de verharding [W/m^2]
B = factor voor de windeffecten [W/m^2.mbar]

Van de Ven berekende de volgende waarden die kunnen optreden bij een onweersbui op een zonnige zomerdag (tabel 3.5):

tijd [minuten]	*cumulatieve verdamping [mm]*
1	0,06
5	0,27
15	0,46
30	0,69
60	1,0
120	1,4

Tabel 3.5: Berekende verdamping voor een asfaltlaag met een initiële temperatuur van 55°C aan het oppervlak en 40°C dieper in het asfalt, een temperatuur van 20°C van het afstromende water en een nettostraling van 75 W/m^2

Met behulp van de energiebalans berekende Pfeiff (1971) voor de extra evaporatie van daken veroorzaakt door de opgeslagen warmte in dakpannen, een waarde van 0,3 mm.
Verder leidde hij middels een grove benadering af, dat het verdampingsverlies per bui tussen 0,1 en 3,0 mm ligt.

Wanneer zomerse condities ontbreken (weinig warmte in de verharding opgeslagen) en we er van uitgaan dat de ondergrond in energetische zin inert is, kan de verdamping van verhard oppervlak op een zelfde manier worden bepaald als de verdamping van een nat gewas (formule 15) (Van de Ven, 1992). De kleur van de verharding is mede van invloed op de verdamping en dus op de afstroming (Wilson,1989).

Martz (1995) geeft verdampingswaarden op van 0,14 tot 0,50 mm/uur voor vlakke verharde terreinen.

WPCF (1969) meldt dat de verdamping vanaf het verhard oppervlak in gerioleerde gebieden verwaarloosbaar klein is, voor zover het om ontwerpberekeningen gaat.

Conclusie verdamping

Verdamping is per bui moeilijk kwantificeerbaar en heeft bovendien een klein aandeel in de totale neerslagverliezen. Waarden tot 1,4 mm in twee uur tijd zijn slechts in zeer verdampingsgunstige situaties denkbaar. Meestal wordt verdamping verwaarloosd.

4 AFSTROMINGSCOËFFICIËNTEN

4.1 Inleiding

De afstromingscoëfficiënt (ofwel afstromingspercentage/100%) is de verhouding tussen de hoeveelheid water die via de regenwaterafvoer afstroomt en de gevallen neerslag. Beide termen hebben betrekking op hetzelfde oppervlak. De coëfficiënt wordt hier aangeduid met de grootheid C_t (zie formule 17).

$$C_t = \frac{V}{P(A_v) + P(A_o)} \qquad (17)$$

waarin: V = afgestroomde volume [m^3]
P = neerslag hoeveelheid [m]
A_v = oppervlakte verhard oppervlak [m^2]
A_o = oppervlakte onverhard oppervlak [m^2]

Afhankelijk van het totale verlies (w.o. bevochtiging, plasvorming, infiltratie, verdamping) ligt de coëfficiënt tussen 0 en 1,0. In sommige gevallen ligt de coëfficiënt boven 1,0. In dat geval kan sprake zijn van nalevering vanuit de ondergrond (b.v. kwel), of van een afvoer vanuit een gebied dat buiten de gestelde systeemgrenzen ligt. Er kan ook sprake zijn van meetfouten.

In de literatuur wordt ook vaak een andere definitie voor de afstromingscoëfficiënt gebruikt. Zo wordt soms de afstroming gerelateerd aan het oppervlak van het verharde gedeelte binnen een afstromingsgebied. Deze afstromingscoëfficiënt is de verhouding tussen de hoeveelheid die via de regenwaterafvoer van het verhard oppervlak afgestroomd en de gevallen neerslag op het verhard oppervlak. Omdat afstroming van onverhard gebied via het verhard oppervlak naar het meetpunt mogelijk is, kan de coëfficiënt groter dan 1 zijn.
Deze coëfficiënt wordt hier met C_v aangeduid (zie formule 18).

$$C_v = \frac{V}{P(A_v)} \qquad (18)$$

De verhouding tussen C_v en C_t wordt weergegeven in formule 19.

$$C_t = C_v \frac{A_v}{A_v + A_o} \qquad (19)$$

Hieruit blijkt dat C_t altijd kleiner of gelijk is aan C_v. 1

In deze studie wordt de afstromingscoëfficiënt van een oppervlak bestaande uit één component (b.v dakpannen, klinkers) niet bij C_t of C_v ingedeeld maar bij C_e. C_e is de verhouding tussen de gevallen neerslag op het element en de hoeveelheid die via het regenwater van het element is afgestroomd. Omdat hier over een afzonderlijk element wordt gesproken kan de coëfficiënt nooit groter dan 1 zijn. Deze coëfficiënt wordt aangeduid met C_e (zie formule (20)).

$$C_e = \frac{V}{P(A_e)} \qquad (20)$$

waarin: V = afgestroomde volume [m^3]
A_e = oppervlakte van element [m^2]

De afstromingscoëfficiënt wordt ook wel eens gedefinieerd als de verhouding tussen afvoerintensiteit en neerslagintensiteit. In deze studie wordt niet ingegaan op deze variant omdat die slechts in beperkte mate is gerelateerd aan de neerslagverliezen.

Om een betrouwbaar beeld te verkrijgen van de afstromingscoëfficiënt moeten de systeemgrenzen goed worden afgebakend en moeten de "vervuilende fluxen" (positief of negatief) worden gekwantificeerd zodat de afgestroomde hoeveelheid gecorrigeerd kan worden. Tot die vervuilende fluxen behoort bijvoorbeeld drainagewater wat op het riool loost, lekwater dat het rioolstelsel binnentreedt. en kwel naar onverhard oppervlak.

Per bui heeft de afstromingscoëfficiënt een andere waarde afhankelijk van de neerslagsituatie en de verliezen. De neerslagsituatie wordt onder andere bepaald door neerslaghoeveelheid, neerslagduur en neerslagintensiteit. De verliezen hangen sterk af van de gebiedseigenschappen.

Tijdsonafhankelijke gebiedseigenschappen zijn:
- verhardingspercentage;
- soort en type (on)verharding;
- ligging (o.a. helling, ruwheid, oneffenheden) van de verharding;
- ligging van de verharding ten opzichte van het onverharde terrein;
- begroeiing van het onverharde terrein.

Tijdsafhankelijke eigenschappen zijn:

- vullingsgraad van de initiële berging;
- vochtgehalte van de ondergrond en het oppervlak van de (on)verharding;
- temperatuur van de verharding;
- gemiddelde weersgesteldheid in het recente verleden;
- jaargetijde;
- effect van wind en verkeer;
- het dichtslibben van aangrenzende onverharde oppervlakken (bij C_v-metingen).

(Ingenieursbureau Utrecht, 1997; Van Bakel, 1995; Martz, 1995; Van de Ven, 1992; Maksimović, 1991; NWRW, 1986a)

Al deze factoren zijn van invloed op de afstromingscoëfficiënt; de tijdsonafhankelijke factoren hebben meer een systematisch effect en de tijdsafhankelijke factoren meer een willekeurige effect.

Gedegen studies naar het neerslag-inloopproces, gebaseerd op metingen, hebben plaatsgevonden in Duitsland (Pecher, 1969; Pfeiff, 1971), Denemarken (Jacobsen, 1980; Johansen, 1985), Zweden (Arnell, 1982), Finland (Melanen en Laukkanen, 1981) , Engeland (Kidd, 1978; Working Party on the Hydraulic Design of Storm Sewers, 1981) en Nederland (Van de Ven 1989).
Metingen aan de rioolinloop zijn behalve in Lelystad ook verricht in 9 kleine meetgebieden in Zweden en 15 meetgebieden in vier plaatsen in Engeland. De metingen in beide landen betroffen allen de inloop van één straatkolk. Het oppervlak van de meetgebieden liep uiteen van 78 tot 450 m^2 verhard oppervlak. De studies in Finland zijn gebruikt voor een analyse van de afstromingscoëfficiënten met behulp van regressiemodellen (Van de Ven, 1989).

4.2 Onderzoeksresultaten

De bijdrage van het onverharde oppervlak aan de afstroming is in het algemeen gering. Het aandeel is te verwaarlozen bij buien met een geringe neerslaghoeveelheid als het initiële infiltratiepotentiaal niet wordt overtroffen. Bij gemiddelde neerslaghoeveelheden en zware regens is de bijdrage vanaf onverhard terrein significant, zelfs bij een lage vochtigheidsgraad van de ondergrond. Slechts bij zeer goed doorlatende ondergronden is dit niet het geval (zand en gravel). Bodems met een slechte doorlatendheid hebben een hoog afstromingspercentage. (Maksimović, 1991).

Asfalt draag in belangrijke mate bij aan de omvang van de afvoer en aan de snelle respons van het gebied op de neerslag (Van de Ven, 1989).

De onderzoeksresultaten zijn in de onderstaande paragrafen ingedeeld naar C_e, C_t, en C_v.

4.2.1 Afstromingscoëfficiënt C_e

De volgende onderzoeken worden in deze paragraaf besproken:
- Stuurgroep Experimentele Volkshuisvesting (1996);
- Geiger en Dreiseitl (1995);
- Martz (1995);
- Gommans (1994);
- Walter (1993);
- Kibler(1982);
- Commissie voor riolering en Waterverontreiniging (1972).

Onderzoek SEV (Stuurgroep Experimentele Volkshuisvesting)

De SEV (1996) heeft een afstromingscoëfficiënt voor een aantal verschillende type daken gegeven. Deze zijn gegeven in onderstaande tabel 4.1.

dakoppervlak	*afstromingscoëfficiënt* C_e [-]
geglazuurde dakpannen	0,95
zadeldak met keramische pannen op betonpannen	0,9
platdak zonder grind	0,7-0,8
platdak met grind	0,6
vegetatiedak	0,2

Tabel 4.1: Afstromingscoëfficiënt C_e voor verschillende type dakoppervlak (SEV, 1996).

De grootste afstroming kennen gladde oppervlakken (minder verdamping) en zijn hard (weinig vochtabsorptie). Voorbeeldmaterialen zijn leisteen, EPDM-folie, geglazuurde dakpannen en metalen daken. Materialen met een "open" structuur en een ruw oppervlak (gras, kiezel) leiden tot de minste afstroming (Bader et al., 1995).

Onderzoek Geiger en Dreiseitl

Geiger en Dreiseitl (1995) geven ten behoeve van rioleringsontwerpberekeningen de in tabel 4.2 gegeven C_e-waarden ATV (1982). Gesloten verharde oppervlakken hebben de hoogste coëfficiënt, parken de laagste.

oppervlakte type	*afstromingscoëfficiënt C_e [-]*
houtelementen, platte daken	0,50 - 0,70
asfaltwegen en -voetpaden	0,85 - 0,90
klinkers	0,75 - 0,85
open klinkers	0,25 - 0,60
steenslag-straten en kleinplaveisel	0,25 - 0,60
grindweg	0,15 - 0,30
niet aangesloten verharding, stations	0,10 - 0,20
parken en tuinen	0,05 - 0,10

Tabel 4.2: Afstromingscoëfficiënten (C_e) voor verschillende typen verharding en bebouwing (Geiger en Dreiseitl (1995) volgens ATV (1982)).

Onderzoek Martz

Martz (1995) heeft onderzoek verricht naar de afstroming van verschillende oppervlaktetypen. De resultaten van de afstromingscoëfficiënt C_e zijn gegeven in tabel 4.3.
Daken kennen de hoogste afstroming, parken de laagste.

oppervlakte type	*afstromingscoëfficiënt C_e [-]*
daken	0,85 - 0,95
aangesloten straten en pleinen	0,8 - 0,9
niet aangesloten straten en pleinen	0,1 - 0,3
parken en sportparken	0,0 - 0,1

Tabel 4.3: Afstromingscoëfficiënten (C_e) voor verschillende typen verharding (Martz, 1995).

Onderzoek Gommans

Volgens Kilian et al. (1996) hanteert Gommans (1994) de volgende coëfficiënten voor verschillende type daken (tabel 4.4):

type dak	*afstromingscoëfficiënt C_e [-]*
harde daken	0,75
grinddaken	0,60
grasdaken	0,45

Tabel 4.4: Afstromingscoëfficiënt C_e voor verschillende type dakoppervlak (Gommans, 1994).

Gommans maakt geen verschil tussen een schuin en een plat dak. Hij geeft voor een grasdak de laagste afstromingscoëfficiënt.

Onderzoek Walter

In de onderstaande tabel 4.5 staan voor een aantal verschillende typen daken de afstromingscoëfficiënt uit Kilian et al. (1996) volgens Walter (1993) vermeld.

type dak	*afstromingscoëfficiënt C_e [-]*
plat dak met kiezel	0,60
plat dak met bitumen	0,70
plat dak met beplanting (gras)	0,20
schuin dak met (beton)pannen	0,75
schuin dak met bitumen	0,80
schuin dak met beplanting (gras)	0,25

Tabel 4.5: Afstromingscoëfficiënt C_e voor verschillende type dakoppervlak (Walter, 1993).

De laagste ontwerpcoëfficiënt wordt door Walter geven voor platte grasdaken en de hoogste waarden voor schuine daken.

Onderzoek Kibler

Kibler (1982) heeft onderzoek gedaan naar de afstromingscoëfficiënt van verschillende elementen. De resultaten zijn gegeven in onderstaande tabel 4.6.

elementenomschrijving	*afstromingscoëfficiënt C_e [-]*
Parken, kerkhoven	0,10-0,25
speelweiden	0,20-0,35
spoorwegemplacement	0,20-0,40
braakliggend terrein	0,10-0,30
Straten	
asfalt	0,70-0,95
beton	0,80-0,95
klinkers	0,70-0,85
Trottoir, oprit	0,75-0,85
Daken	0,75-0,95
Gazon; zanderige grond	
vlak 2%	0,05-0,10
hellend 2-7%	0,10-0,15
hellend 7%	0,15-0,20
Gazon; zware grond	
vlak 2%	0,13-0,17
hellend 2-7%	0,18-0,22
hellend 7%	0,25-0,35

Tabel 4.6: Karakteristieke C_e-waarden bij een herhalingstijden van 5-10 jaar (Kibler, 1982). De waarden zijn gebaseerd op WPCF (1969) en Viessman et al. (1977).

De hoogste coëfficiënt is voor gesloten verharde oppervlakken, de laagste voor vlakke onverharde oppervlakken.

Onderzoek Commissie voor Riolering en Waterverontreiniging

De Commissie Riolering en Waterverontreiniging (1972) geeft de volgende waarden voor de afstromingscoëfficiënt C_e (tabel 4.7):

type oppervlak	*afstromingscoëfficiënt C_e [-]*
asfalt en beton	0,80 - 0,95
klinkers	0,40 - 0,85
plaveisel	0,40 - 0,50
steenslag	0,30 - 0,50
daken	0,75 - 0,95

Tabel 4.7: Afstromingscoëfficiënt (C_e) voor verschillende oppervlakken (Commissie Riolering en Waterverontreiniging, 1972)

Deze tabel is een samenvatting van meerdere gegevens die in het betreffende artikel zijn genoemd. Hieronder worden de verschillende onderdelen apart besproken.

In tabel 4.8 is voor verschillende oppervlaktetypen de bijbehorende afstromingscoëfficiënt gegeven zoals deze in 1972 uit verschillende bronnen zijn afgeleid. Een verdere beschrijving van deze bronnen wordt in het artikel niet genoemd. De hogere cijfers worden aangehouden voor ontwerpberekingen voor sterk hellende terreinen, de lagere waarden voor de vlakke gebieden. (Commissie Riolering en Waterverontreiniging, 1972)

	afstromingscoëfficiënt C_e [-]			
oppervlak	*v.d. Akker (s.a.)*	*Koch (s.a.)*	*Demidow (s.a.)*	*WPCF (1969)* [1)]
wegdek				
asfalt	0,80-0,90	0,9	0,85-0,90	0,70-0,95
beton				0,80-0,95
klinker	0,40-0,70	0,6	0,80-0,85	0,70-0,85
klein-plaveisel			0,40-0,50	
steenslag	0,30-0,50	0,35		
grind	0,10-0,30	0,2	0,14-0,30	
sintels: inrijwegen				0,75-0,85
voetpaden, daken	0,85-0,95	0,9	0,90-0,95	0,75-0,95
onverharde vlakken			0,10-0,30	
plantsoen	0,05-0,15		0,05-0,25	
park/grasperk				
zanderig				
helling $<2\%$				0,05-0,10
helling 2-7%				0,10-0,15
helling $>7\%$				0,15-0,20
zware grond				
helling $<2\%$				0,13-0,17
helling 2-7%				0,18-0,22
helling $>7\%$	0,00-0,10	0,05		0,25-0,35
1): toepasbaar voor buien met een herhalingstijd van 1 tot 5 jaar				

Tabel 4.8: Afstromingscoëfficiënten (C_e) voor verschillende typen oppervlak volgens v.d. Akker (s.a.), Koch (s.a.), Demidow (s.a.) en WPCF (1969).

De afstroming van zanderige grond is kleiner dan voor zware grond. Dit is te lochisch omdat in zanderige grond meer neerslag kan infiltreren dan in zware grond.

Conclusie C_e

De literatuurbronnen geven de volgende afstromingscoëfficiënten voor daken:
- Dak algemeen: 0,75 – 0,95 (waarschijnlijk schuine daken)
- Grasdak: 0,20 – 0,45
- Plat dak met kiezels: 0,60
- Platte harde daken: 0,70 – 0,80
- Schuine daken: 0,70 – 0,90

(Sport)parken, kerkhoven, speelweiden, gazons, braakliggende terreinen en spoorwegemplacementen hebben een afstromingscoëfficiënt tussen 0,0 en 0,40.

Eén literatuurbron relateert afstroming aan helling. Dit is echter alleen gebeurd voor zware en zanderige grond. Een grotere helling geeft een hogere afstroming. Zwaardere grond geeft een hogere afstroming.

Coëfficiënten voor verschillende soorten rijbanen:
- Asfalt en beton: 0,70 – 0,95
- Gesloten klinkers, trottoir en oprit: 0,70 – 0,85*
- Open klinkers, steenslag en plaveisel: 0,25 – 0,60
- Grindwegen: 0,15 – 0,30

*In het onderzoek van Commissie voor Riolering en Waterhuishouding wordt voor klinkers als ondergrens 0,40 gegeven. Deze grens is waarschijnlijk voor open klinkers bedoeld en is daarom in deze studie bij die van open klinkers verwerkt.

4.2.2 Afstromingscoëfficiënt C_t

De volgende onderzoeken worden in deze paragraaf besproken:
- Martz (1995);
- Bufill en Boyd (1992);
- Ellis en Revitt (1991);
- Maksimović en Radojković (1986);
- Kibler (1982);
- Metropolitan Washington Council of Governments (1980);
- Commissie voor Riolering en Waterverontreiniging (1972).

Onderzoek Martz

Martz (1995) geeft aan dat de coëfficiënt C_t altijd kleiner of gelijk is aan 1, tenzij sprake is van zware neerslag of dooiende sneeuw. Gezien de definitie van C_t bevalt dit laatste te betwijfelen.

De waarde van de coëfficiënt is sterk afhankelijk van lokale omstandigheden. Grondig onderzoek van een lokatie is dan ook van belang om een coëfficiënt te kunnen afleiden.
Richtlijnen voor de afstromingscoëfficiënt staan in tabel 4.9 (Martz, 1995).

gebiedsomschrijving	*afstromingscoëfficiënt C_t [-]*
zeer dicht bebouwd, hoogbouw	0,7 - 0,9
dicht bebouwd	0,5 - 0,7
open bebouwd	0,3 - 0,5
weids bebouwd	0,2 - 0,4
onbebouwd, groenstroken, sportvelden	0,1
onbebouwd, bos	0,05

Tabel 4.9: Richtlijnen voor ontwerpberekingen voor de afstromingscoëfficiënten C_t (Martz, 1995).

Wanneer in een gebied meerdere typen voorkomen kan gerekend worden met het gewogen gemiddelde. De weegfactor is evenredig met de grootte van het oppervlak van het subtype (Martz, 1995) (Geiger en Dreiseitl, 1995). Martz (1995) geeft aan dat wanneer het grote oppervlakken betreft, het beter is om het gebied in 4 groepen te verdelen afhankelijk van de helling. Voor verschillende verhardingspercentages en neerslaghoeveelheden kunnen dan de waarden uit ATV-Regelwerk (1977) worden gehanteerd. Deze waarden zijn opgenomen in tabel 4.10.

verhardings-percentage	afstromingscoëfficiënt C_t [-]							
	helling < 1%		helling 1-4%		helling 4-10%		helling >10%	
	9,0 [1]	11,7	9,0	11,7	9,0	11,7	9,0	11,7
0 [2]	0,00	0,00	0,10	0,15	0,15	0,20	0,20	0,30
10	0,09	0,09	0,18	0,23	0,23	0,28	0,28	0,37
20	0,18	0,18	0,27	0,31	0,31	0,35	0,35	0,43
30	0,28	0,28	0,35	0,39	0,39	0,42	0,42	0,50
40	0,37	0,37	0,44	0,47	0,47	0,50	0,50	0,56
50	0,46	0,46	0,52	0,55	0,55	0,58	0,58	0,63
60	0,55	0,55	0,60	0,63	0,62	0,65	0,65	0,70
70	0,64	0,64	0,68	0,71	0,70	0,72	0,72	0,76
80	0,74	0,74	0,77	0,79	0,78	0,80	0,80	0,83
90	0,83	0,83	0,86	0,87	0,86	0,88	0,88	0,89
100	0,92	0,92	0,94	0,95	0,94	0,95	0,95	0,96

1): totale neerslaghoeveelheid [mm] in eerste 15 minuten

2): percentage van het oppervlak dat gekoppeld is aan het afstromingsoppervlak [%]

Tabel 4.10: Afstromingscoëfficiënten (C_t) afhankelijk van helling, het verhardingspercentage en neerslaghoeveelheid, ten bate van ontwerpberekeningen (ATV-Regelwerk, 1977).

Onderzoek Bufill en Boyd

In een Australisch onderzoek is voor verschillende onverharde stedelijke lokaties de afstromingscoëfficiënt bepaald (C_t). Van de 13 onderzoekslokaties lagen er 9 in Australië, 2 in Canada, 1 in Denemarken en 1 in de Verenigde Staten (Bufill en Boyd, 1992). In onderstaande tabel 4.11 is voor verschillende hellingscategorieën de minimum, maximum en gemiddelde waarde gegeven.

helling onverhard oppervlak	afstromingscoëfficiënt C_t [-]			aantal lokaties
[%]	gemiddeld	minimum	maximum	[-]
0-1	0,25	0,07	0,35	3
1-5	0,18	0,07	0,29	6
5-10	0,23	0,15	0,31	4

Tabel 4.11: Mediaan afstromingscoëfficiënten (C_t) voor onverharde gebieden in stedelijke omgeving (Bufill en Boyd, 1992).

Onderzoek Ellis en Revitt

De hierboven aangegeven lage afstromingscoëfficiënten worden bevestigd door een ander buitenlands onderzoek. Bij snelwegen lag de afstromingscoëfficiënt (C_t) tussen 0,17 tot 0,63 (Ellis en Revitt, 1991).

Onderzoek Maksimović

In Belgrado (Joegoslavië) is midden jaren '80 in een sterk heuvelachtig terrein (hellingen tot 12%) de afstroming gemeten. Voor een woongebied van 25,5 ha met een verhardingspercentage van 38%, waarvan 52% als ondoorlatend wordt verondersteld (dus ongeveer 20% van het bruto-oppervlak), is een gemiddelde afstromingscoëfficiënt (C_t) van 21% bepaald (Maksimović en Radojković, 1986). Wanneer enkel wordt gekeken naar het verharde oppervlak dan is de afstromingscoëfficiënt (C_v) 0,6.

Onderzoek Kibler

Kibler (1982) geeft afstromingscoëfficiënten voor toepassingen in ontwerpberekeningen voor de riolering. Zijn methode wordt vanaf de1 eeuwwisseling toegepast. Zie formule 21 en de bijbehorende coëfficiënten in tabel 4.12.

$$Q_T = C \cdot i_T \cdot A \qquad (21)$$

waarin: Q_T = maximaal debiet bij herhalingstijd T [m^3/s]
C = afstromingscoëfficiënt afhankelijk van het oppervlaktetype [-]
i_T = ontwerp bui met een herhalingstijd T [m/s]
A = aangesloten oppervlak [m^2]

Uitgangspunten zijn:
- Bij constante neerslagintensiteit treedt het maximale debiet op wanneer het gehele aangesloten oppervlak bovenstrooms bijdraagt aan de afstroming;
- De herhalingstijd van de afstromingsgebeurtenis is gelijk aan de herhalingstijd van de ontwerpbui;
- De neerslagintensiteit is constant over de buiduur en gelijk verdeeld over het afstromingsgebied;
- De afstromingscoëfficiënt is constant binnen een afstroomgebeurtenis.
- Wanneer een terrein uit meerdere oppervlaktetypen bestaat, wordt als afstromingscoëfficiënt het gewogen gemiddelde gebruikt. De weegfactor is evenredig met de grootte van het oppervlak.

gebiedsomschrijving	*afstromingscoëfficiënt C_t [-]*
Zakencentra	
stadscentrum	0,70-0,95
buurtcentrum	0,50-0,70
Woonwijken	
vrijstaande woningen	0,30-0,50
geschakelde woningen	0,40-0,60
woonblokken	0,60-0,75
Buitenwijken (suburbaan)	0,25-0,40
Bungalowparken	0,50-0,70
Industriegebieden	
licht geïndustrialiseerd	0,50-0,80
sterk geïndustrialiseerd	0,60-0,90

Tabel 4.12: Karakteristieke waarden van C_t voor ontwerpen bij herhalingstijden van 5-10 jaar (Kibler, 1982). De waarden zijn gebaseerd op WPCF (1969) en Viessman et al. (1977).

Onderzoek Metropolitan Washington Council of Government

Onderzoek door The Metropolitan Washington Council of Governments (MWCOG) in de jaren '80 resulteerde in de volgende formule 23, geldig voor urbane en suburbane gebieden.
De formule is gebaseerd op onderzoek op 44 kleine lokaties over de gehele Verenigde Staten van Amerika. Met behulp van lineaire regressie (regressiecoefficient $r^2 = 0,71$) is de formule opgesteld.

$$C_t = 0,05 + 0,009 \cdot I \qquad (22)$$

waarin: C_t = afstromingscoëfficiënt [-]
I = percentage verhard oppervlak [%]
de factor 0,009 heeft als eenheid $\%^{-1}$

Volgens de formule ligt de afstromingscoëfficiënt tussen 0,05 en 0,95.

Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat buien tot 5 mm niet tot afstroming leiden. (Frost, 1998).

Onderzoek Commissie voor Riolering en Waterverontreiniging

Afstromingscoëfficiënten kunnen gerelateerd worden aan de dichtheid van de bebouwing. Immhoff (s.a.) vermeldt de in tabel 4.13 genoemde gegevens welke aan Hütte (s.a.) zijn ontleend (Commissie Riolering en Waterverontreiniging, 1972). Het is niet duidelijk of deze cijfers zijn gebaseerd op metingen.

aard van de bebouwing	*afstromingscoëfficiënt C_t [-]*
zeer dicht	0,7-0,9
gesloten	0,5-0,7
open	0,3-0,5
buitenwijken met veel tuinen	0,2-0,3
onbebouwd (sportterreinen)	0,1-0,2
parken	0,0-0,1

Tabel 4.13: Afstromingscoëfficiënten (C_t) voor verschillende bebouwingsaarden (Immhoff, s.a.).

Conclusie C_t

Er zij geen Nederlandse onderzoeken bekend naar C_t-waarden.
De afstromingscoëfficiënt neemt toe bij toenemende bebouwingsgraad.

Hieronder staan voor een aantal bebouwingstypen de afstromingscoëfficiënten (C_t) die in de literatuur zijn gevonden:
Onbebouwd: 0,05 – 0,20
Suburbaan: 0,20 – 0,50
Woonwijk: 0,30 – 0,75
Dichtbebouwd: 0,50 – 0,70

Opvallende is de brede range voor het type woonwijk.
Afhankelijkheid met de helling wordt alleen door Bufill en Boyd gegeven.

4.2.3 Afstromingscoëfficiënt C_v

De volgende onderzoeken worden in deze paragraaf besproken:
- Van Dijk (1998);
- Gemeente Vlist (Heidemij, 1998);
- Ingenieursbureau Utrecht (1997);
- Lelystad (Van de Ven,1989);
- NWRW (1988 en 1989b);
- Riza/Rijkswaterstaat;
- Commissie voor Riolering en Waterverontreiniging (1972).

Onderzoek Van Dijk

Van Dijk (1998) heeft onderzoek gedaan naar een helofytenfilter met bezinkbassin als randvoorziening bij een gescheiden stelsel. Dit onderzoek wordt uitgevoerd op een doodlopend stuk van de Erasmusgracht nabij de Joos Banckersweg. Op de Erasmusgracht zijn diverse uitlaten van het regenwaterriool aangesloten. Het regenwaterriool verzorgt de afwatering van de woonwijken en verkeerswegen in het achterliggend gebied. Om de grootte van het

achterliggende gebied te beperken is voor het onderzoek een deel van de regenwaterafvoer afgesloten.

Kenmerken van het achterliggend gebied:
- oppervlakte totaal: 2,73 ha
- op de riolering aangesloten: 1,84 ha (78%)

Bij het ontwerp van het helofytenfilter is aangenomen dat 60% van de neerslag via het regenwaterriool afgevoerd wordt.

De afstromingscoëfficiënten zijn per maand bepaald en gegeven in tabel 4.14.

	afstromingscoëfficiënt C_v [-]	
	1996	1997
januari	0,13	-
februari	0,36	0,43
maart	0,03	0,14
april	0,22	0,20
mei	0,28	0,24
juni	0,26	0,14
juli	0,28	0,89
augustus	0,23	0,17
september	0,27	0,16
oktober	0,40	0,35
november	0,60	0,24
december	0,50	0,44

Tabel 4.14: Afstromingscoëfficiënten (C_v) per maand bij onderzoek in Amsterdam

In het helofytenproject bij de Erasmusgracht in Amsterdam, varieerde de afstromingscoëfficiënt van 0,03 tot 0,89 (Van Dijk, 1998). Er is geen duidelijke seizoenfluctuatie in de coëfficiënt te zien. De gemiddelde waarde van de coëfficiënt was in 1996 en in 1997 0,30.

Onderzoek gemeente Vlist (Heidemij)

Ter bepaling van de afstromingscoëfficiënt is het rioleringssysteem van de gemeente Vlist geschematiseerd tot een rioleringsmodel, waarbij de gemeten neerslag en het geregistreerde gemaaldebiet als in- en output op het systeem zijn gezet. Als kalibratieparameter is de afstromingscoëfficiënt gehanteerd, zodanig dat het geregistreerde waterstandsverloop nagenoeg overeenkomt met het gesimuleerde verloop. Ter vergelijking is het default NWRW-inloopmodel als inloopmodel toegepast om te bezien in hoeverre het default-model tot

een over-/onderschatting leidt. Uit deze analyse blijkt de afstromingscoëfficiënt te variëren tussen gemiddeld 0,35 en 0,70. Het percentage gesloten verhard oppervlak (hellende daken) bedraagt ca. 35% van het totaal verhard oppervlak. Dit betekent dat voor een groot aantal buien de neerslag op open verharding en vlakke daken niet tot afstroming komt. (De auteur gaat blijkbaar uit van de veronderstelling dat de afstroming van gesloten verhard oppervlak zeer hoog is) Tenslotte wordt aangegeven dat het default NWRW-inloopmodel voor elke situatie leidt tot een overschattig van de inloop (Moens, 1998).

Onderzoek Ingenieursbureau Utrecht

Het Ingenieursbureau Utrecht (IBU) heeft onderzoek naar afstroming verricht op 3 lokaties in een vlakke, stedelijke omgeving. Het bleek dat bij buien tot 4 mm nauwelijks afstroming plaatsvindt. Dit trad ook op bij buien met een zeer lage intensiteit (Ingenieursbureau Utrecht, 1997).

Opvallend was dat de grootste afstromingscoëfficiënten niet optraden bij de hoogste neerslaghoeveelheden. Coëfficiënten boven 0,40 worden slechts waargenomen bij neerslaghoeveelheden tot 10 mm, op enkele uitzonderingen na. De hoogste coëfficiënten kwamen voor in het voor- en najaar.

In het onderzoek zijn C_v waarden bepaald. De gemiddeld grootste afstromingscoëfficiënt is waargenomen op een geasfalteerde doorgaande weg; 0,26. Het maximum was 0,56 bij 5,8 mm neerslag. In beide woonwijken (bestraat met beton-klinker-keien) is het gemiddelde 0,21 (max. 0,61 bij 6 mm neerslag) en 0,15 (max. 0,63 bij 23 mm neerslag). Het verschil tussen beide lokaties is waarschijnlijk het gevolg van een verschil in de mate van plasvorming (Ingenieursbureau Utrecht, 1997).

Een probleem in het onderzoek was dat het in de praktijk moeilijk was om per bui de bijbehorende afstroming te bepalen. Door vertragingen in de afvoer is de afvoer van buien die relatief kort na elkaar optraden als het ware "vermengd" (Ingenieursbureau Utrecht, 1997).

Onderzoek Lelystad

ALGEMEEN

In Lelystad is door Van de Ven een onderzoek uitgevoerd naar de relatie tussen de neerslag en afvoer in een stedelijk gebied. Op drie lokaties zijn langdurig de neerslag en afvoer gemeten en zijn afstromingscoëfficiënten bepaald.

De 3 meetlokaties zijn:
- woonwijk Pampus-Blokkerhoek;
- parkeerterrein Noorderwagenplein;

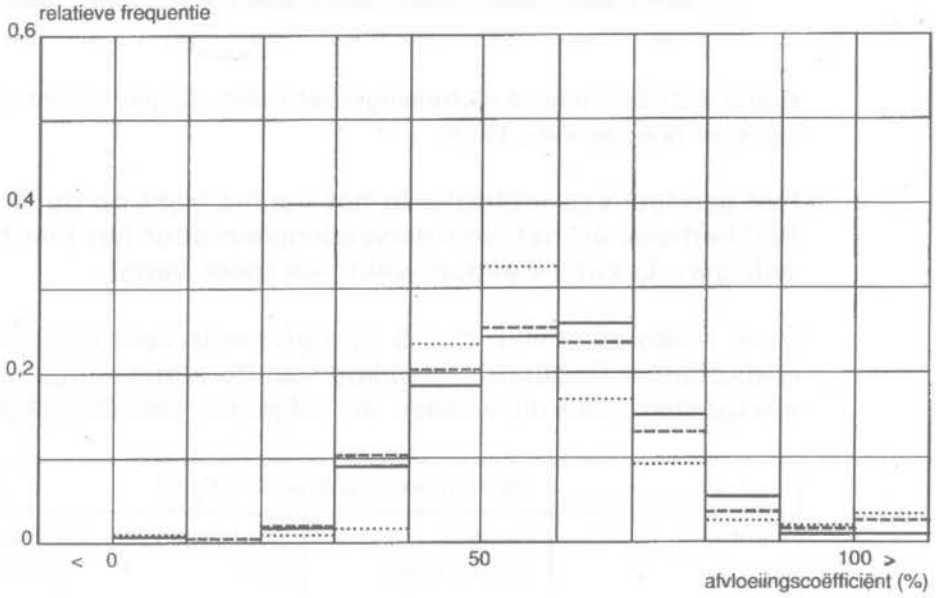
- woonwijk Bastion.

De karakteristieken van de meetlokaties zijn gegeven in bijlage 3.

RESULTATEN

Gemiddeld over de meetperiode van september 1968 tot en met december 1984 is ca. 750 mm neerslag per jaar gevallen. 10% van de neerslag leverde geen afvoer. De afstromingscoëfficiënt (C_t) loopt uiteen van 50-55% in het voorjaar tot 60-70% in het najaar en de winter.

In onderstaande figuur 4.1 is de relatieve frequentie gegeven van de afstromingcoëfficiënt. De gemiddelde waarde in Pampus-Blokkerhoek was 0,59, in Noorderwagenplein 0,60 en in Bastion 0,63.



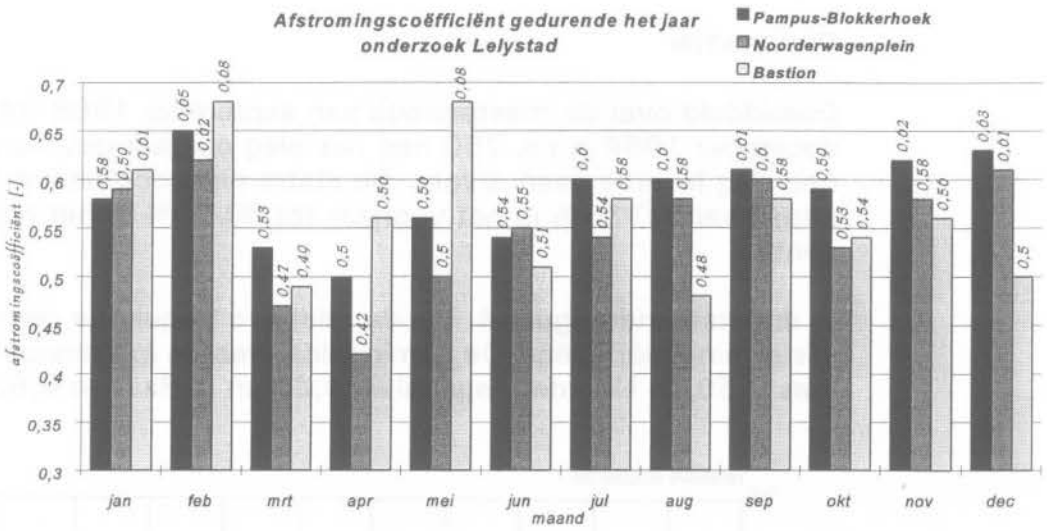
	Pampus-Blokkerhoek	Noorderwa-genplein	Bastion
gemiddelde	58,9	59,5	62,7
standaardafwijking	26,6	46,5	35,6
scheefheid	14,1	21,0	6,41
kurtosis	314	550	50,5

——— Pampus-Blokkerhoek
– – – – – Noorderwagenplein
..... Bastion

Figuur 4.1: Relatieve frequentie van de gemeten afstromingscoëfficiënt (C_v) voor de drie lokaties in Lelystad

De metingen in Lelystad tonen een gering seizoenseffect aan voor de afstromingscoëfficiënt. In het voorjaar (maart tot en met mei) ligt de factor zowel voor Pampus-Blokkerhoek als voor het Noorderwagenplein circa 6 tot 8% lager dan in het najaar. Een grote seizoensinvloed zoals door Vat (1985) in Loenen is gevonden, is in de meetgebieden in Lelystad niet aangetroffen. Dit kan worden verklaard door de toevoer vanaf onverhard terrein naar de riolering in Loenen (Van de Ven, 1989) Zie voor de resultaten van Loenen tabel 4.17.

In figuur 4.2 is de coëfficiënt per maand uitgezet voor de drie meetlokaties.



Figuur 4.2: Gemiddelde afstromingscoëfficiënt (C_v) per maand op drie lokaties in Lelystad (Van de Ven, 1989)

Het aandeel van infiltratie in het verlies blijkt op de lokaties Pampus-Blokkerhoek en het Noorderwagenplein door het jaar heen niet veel te wijzigen. Lokatie Bastion wijkt hier meer vanaf.

Voor buien met meer dan 5 mm afvoer is voor het gehele jaar de cumulatieve frequentieverdeling van de afstromingscoëfficiënten vastgesteld. Hieruit werden de volgende waarden afgeleid (tabel 4.15).

	afstromingscoëfficiënten C_v [-]		
centiel	Pampus-Blokkerhoek (woonwijk)	Noorderwagen-plein (parkeerterrein)	Bastion (woonwijk)
0,10	0,55	0,52	0,51
0,50	0,68	0,68	0,65
0,90	0,82	0,86	0,76

Tabel 4.15: Cumulatieve frequentieverdeling afstromingscoëfficiënten (C_v) voor drie lokaties in Lelystad voor buien met meer dan 5 mm. (Van de Ven, 1989)

De waarden ontlopen elkaar nauwelijks, ondanks de toch aanzienlijke verschillen in inrichting tussen de gebieden. Omdat de infiltratieverliezen in het Bastion overheersen is de spreiding van de gevonden afstromingscoëfficiënten geringer dan bijvoorbeeld bij Pampus-Blokkerhoek, waar het initiële verlies meer bepalend is. Ondanks de grotere woningdichtheid, het hogere verhardingspercentage en de hellende daken in het meetgebied Bastion zijn de afstromingscoëfficiënten niet systematisch hoger dan in Pampus-Blokkerhoek. Voor buien met een afvoersom groter dan 5 mm

zijn de coëfficiënten voor Pampus-Blokkerhoek zelfs hoger dan voor het Bastion. Dit resultaat is verklaarbaar doordat het infiltratieverlies in het Bastion de initiële verliezen veelal overtreft (Van de Ven, 1989).

Bij grotere buien neemt de afstromingscoëfficiënt toe, omdat de invloed van het initiële verlies dan afneemt. (Van de Ven, 1989).

REFERENTIE AAN ANDERE ONDERZOEKEN

Pecher (1969) vond in het meetgebied Pullach (met ca. 32% verhard gebied, waarvan 13,5% daken) lagere waarden voor C_v dan de hier vermelde meetwaarden uit Lelystad (Van de Ven, 1989).

Onderzoek NWRW

De NWRW (1988 en 1989b) heeft in het kader van metingen omtrent de vuiluitworp van rioolstelsels op oppervlaktewater, onderzoeken uitgevoerd. In dit onderzoek zijn onder meer afstromingscoëfficiënten (C_v) bepaald.

Op zes lokaties zijn metingen verricht. Het betreft:
- Loenen: een niet-intensief bebouwd woongebied in een landelijke omgeving in licht-hellend terrein. Meetperiode: 1981-1984;
- Oosterhout: destijds recent ontwikkeld woongebied met voornamelijk laagbouw en enige hoogbouw in een niet-industriële omgeving. Meetperiode: 1982-1986;
- Kerkrade: een woongebied met laagbouw, gekenmerkt door grote hoogteverschillen. Meetperiode: 1982-1986;
- Bodegraven: een wat oudere stadswijk met voornamelijk laagbouw die bestaat uit woningen, winkels en enkele bedrijven. Meetperiode: 1982-1986;
- Heerhugowaard: een woongebied met laagbouw van recente datum in een niet-industriële omgeving. Meetperiode: 1982-1985;
- Amsterdam-Holendrecht: een destijds moderne stedelijke woonwijk met hoogbouw in een omgeving met intensief autoverkeer. Meetperiode: 1984-1985.

Enkele karakteristieken voor de lokaties zijn gegeven in tabel 4.16.

karakteristiek	Loenen	Oosterhout	Bodegraven	Kerkrade	Heerhugo-waard	Amsterdam-Holendrecht
Bruto oppervlak [ha]	56,5	22,5	48,0	140,0	12,5	8,6
Verhard oppervlak [ha]	15,8	11,6	22,0	60,0	6,8	4,2
Aantal woningen [-]	592	696	1112	2938	522	452
- vrijstaand	80%	3%				
- rijen	20%	80%				
- flats		20%				
verharding ontsluitingswegen	asfalt	asfalt	asfalt/-klinkers	asfalt/-klinkers	asfalt	klinkers
verharding overige wegen en parkeerplaatsen	asfalt/-klinkers	klinkers	asfalt/-klinkers	asfalt/-klinkers	klinkers	klinkers

Tabel 4.16: Karakteristieken voor de meetlokaties uit het NWRW-onderzoek (NWRW, 1988 en 1989b).

In het praktijkonderzoek is ondermeer de neerslag ter plaatse en de rioolwaterstand ter plaatse van een overstort gemeten. De afstromingscoëfficiënt is bepaald op basis van de gevallen neerslag, het bergingsverschil in het riool, de afvoercapaciteit, het aangesloten verhard oppervlak en het overstortvolume.

In het niet-vlakke Loenen en Kerkrade is relatief het meeste water tot afstroming gekomen. Dit werd waarschijnlijk veroorzaakt door de afstroming van neerslag vanaf het onverharde oppervlak. Uit het onderzoek blijkt dat niet alle neerslag, die viel op het verharde oppervlak, in de riolering stroomde.

De afstromingscoëfficiënten C_v voor de verschillende lokaties zijn gegeven in tabel 4.17. De hellende vlakken hebben de grootste coëfficiënten.

	afstromingscoëfficiënt C_v [-]		
lokatie	minimum	maximum	gewogen gem.
Loenen	0,7	1,8	
Oosterhout	0,5	1,6	
Bodegraven	0,5	1,2	
Kerkrade	0,4	3,0	
Heerhugowaard	0,5	1,8	1,3
Amsterdam-Hol.	0,2	1,4	0,6

Tabel 4.17: Afstromingscoëfficiënten (C_v) NWRW-onderzoeken

Coëfficiënten met een hoge waarde (tegen en boven 1,0) worden verklaard door afwatering van onverhard oppervlak naar de riolering

heeft plaatsgevonden. Met name in de hellende gebieden kan dit een zeer belangrijke bijdrage leveren. In een aantal gebieden waren drains onder het onverharde oppervlak aangesloten op de riolering. Ook wordt aangegeven dat de grootte van het verhard oppervlak mogelijk verkeerd is ingeschat. Lokale neerslagverschillen en meetfouten kunnen eveneens een verkeerd beeld geven.

De lage coëfficiënten (rond 0,5) hebben betrekking op buien van geringe omvang, waarbij de invloed van neerslagverliezen door infiltratie en oppervlakte-retentie relatief groot is.

Uit de NWRW onderzoeken volgt geen eenduidige relatie tussen de neerslaghoogte en de afstromingscoëfficiënt. Dit is overeenkomstig met de bevindingen van Ingenieursbureau Utrecht (1997).

Wanneer de afstromingscoëfficiënten per maand worden geclusterd en grafisch worden uitgezet, valt voor de lokatie Loenen (en in mindere mate voor Oosterhout en Bodegraven) op dat in de zomermaanden de laagste waarden worden gevonden. Er lijkt sprake van een seizoensafhankelijkheid. Dit wordt verklaard uit de verschillen in de condities van het verharde/onverharde oppervlak tussen de zomer en de winter. Enkele grafische presentaties van de afstromingscoëfficiënten in Loenen en Oosterhout zijn te vinden in bijlage 4. (NWRW 1986b) (NWRW, 1988) (NWRW, 1989b).

De NWRW (1989c) heeft in de jaren '80 het onderzoek "De kwaliteit van afstromend regenwater: Praktijkonderzoek in Nederland" uitgevoerd. Uit de onderzoeksresultaten kwam naar voren dat ongeveer de eerste 3 mm van een bui niet of nauwelijks tot afstroming naar het riool komt. Het verdampt, infiltreert of wordt in plassen geborgen.

In NWRW (1986a) wordt het verschil in afstroming tussen vlakke en hellende gebieden als volgt aangegeven. In vlakke gebieden is volgens Gameson en Davidson (1963) een afstromingscoëfficiënt van 0,75 gerechtvaardigd en bij sterk hellende gebieden kunnen waarden boven 1,0 voorkomen, aldus Watkins (1963).

Onderzoek RIZA/Rijkswaterstaat

Op twee lokaties langs snelwegen (A7 en A9) in Nederland heeft het RIZA metingen verricht naar het afstromende hemelwater. Hierbij is onder andere de neerslaghoeveelheid per bui gemeten en het tot afstroming gekomen gedeelte van de neerslag.
De lokatie langs de A7 heeft een wegdek met dicht asfalt beton (DAB). Het wegdek langs de A9 is met zeer open asfalt beton (ZOAB) afgewerkt. Beide bemonsterde wegen zijn "standaard" vierstrookssnelwegen met een verzinkte geleiderail in de middenberm.

Bij de DAB-lokatie lag de afstromingscoëfficiënt bij 3 van de 6 metingen boven 1,0 met een maximum van 1,23. Als mogelijke

verklaring voor de waarden groter dan 1,0 is aangegeven dat de meetlokatie op het laagste punt tussen 2 viaducten lag. Daardoor is mogelijk een te groot wegoppervlak bemonsterd (dus de systeemgrenzen zijn foutief gesteld). De laagst gemeten waarde was 0,61 en het gemiddelde 0,96 (Berbee et al., 1996).
Er traden binnen een afstromingsgebeurtenis nauwelijks lokale verschillen in afstroming op.
Tijdens eerdere onderzoeken van Rijkswaterstaat op dicht asfaltbeton zijn afstromingscoëfficiënten gemeten van rond de 0,75 (Rijkswaterstaat, 1988, 1989, 1991, 1992a en 1992b).

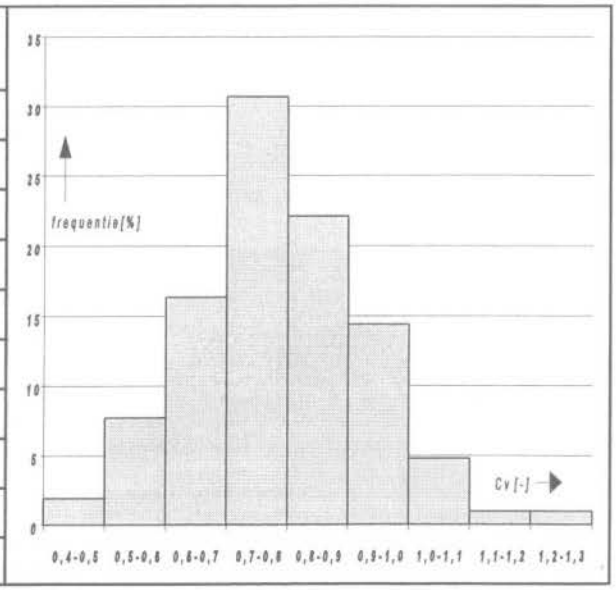
De afstromingscoëfficiënt van de Zoab-lokatie varieerde van 0,05 tot 0,56. Het gemiddelde over de 6 metingen was 0,24.
Tijdens eerdere onderzoeken van Rijkswaterstaat/DWW op dezelfde lokatie was de coëfficiënt 0,15 (Rijkswaterstaat, 1994a en 1994b). Zoab heeft een groot effectief verdampingsoppervlak, waardoor veel wegwater kan verdampen en de coëfficiënten laag zijn. Bandenslijpsel, zand en andere verontreinigingen hopen zich met name op in de vluchtstrook en deze barrière voorkomt gedeeltelijk een vrije afstroming van water naar de zijkant van de weg. In het onderzoek is het water aan de rand van de weg verzameld. Dit kan eveneens de lage coëfficiënt verklaren.

Binnen een gemeten afstroomgebeurtenis zijn grote lokale verschillen opgetreden in tegenstelling tot de DAB-lokatie. Een mogelijke verklaring was dat er verschillen waren in de doorlatendheid van het Zoab (Berbee et al., 1996).

Onderzoek Commissie voor Riolering en Waterhuishouding

In Engeland zijn door de Road Research Laboratory aan 12 rioleringsobjecten metingen verricht. Er zijn 286 metingen verricht waarbij de afstromingscoëfficiënt (C_v) is bepaald. Op basis hiervan is een frequentieverdeling gemaakt. Deze is gegeven in tabel 4.18. De aard van het verhard oppervlak is niet vermeld (Commissie Riolering en Waterverontreiniging, 1972).

afstromingsco-efficiënt C_v [-]	*frequentie [%]*
0,41-0,50	1,9
0,51-0,60	7,7
0,61-0,70	16,4
0,71-0,80	30,7
0,81-0,90	22,1
0,91-1,00	14,4
1,01-1,10	4,8
1,11-1,20	1,0
1,21-1,30	1,0
totaal	100%



Tabel 4.18: Frequentieverdeling afstromingscoëfficiënt (C_v). Onderzoek in Engeland. (Commissie Riolering en Waterverontreiniging, 1972).

Door Gameson en Davidson (1963) werden metingen verricht aan drie gebieden in Engeland gedurende een periode van 2 tot 3 jaar. De gemiddelde afstromingscoëfficiënten (C_v) was 0,74 - 0,77. Gameson stelde een verschil vast tussen zomer en winter; 0,73 in mei t/m oktober en 0,81 van november t/m april. Wanneer een regenbui vooraf werd gegaan door een droge periode van 24 uur of langer, resulteerde dit in een lagere coëfficiënt.
De invloed van de maximum regenintensiteit op de C_v waarde was niet in alle gevallen duidelijk. Boven 7,2 mm/uur gedurende 23 minuten werd in twee gebieden een verlaging van de coëfficiënt vastgesteld bij toenemende intensiteit, terwijl bij het derde gebied een aanmerkelijke verhoging werd gevonden. (Commissie Riolering en Waterverontreiniging, 1972).

Conclusie C_v

De C_v waarde wordt gegeven van verschillende stedelijke gebieden. Per gebied is de inrichting anders waardoor de verschillende gebieden andere afstromingscoëfficiënten hebben en vergelijken moeilijk is.

Het gemiddelde afstromingspercentage komt vaak niet boven de 0,65. In sommige gevallen zijn waarden boven 1,0 waargenomen.

Er zijn geen onderzoeken bekend waar de afstromingscoëfficiënt is gerelateerd aan de helling.

5 DE VERLIESPROCESSEN IN DE LEIDRAAD RIOLERING

Inleiding

Voor rioleringsberekeningen in Nederland voor vaak het inloopmodel van de Leidraad Riolering (Ministerie van VROM en Stichting RIONED, 1992) gebruikt. Dit model en de default-parameters zijn gebaseerd op het onderzoek zoals beschreven in het NWRW rapport 4.3 (1989a). Dit model beschrijft de vervorming in de tijd van het verloop van de neerslag die valt op het afvoerend oppervlak, naar de inloop van het rioolstelsel.

Voor de verdamping is in het model uitgegaan van maandcijfers van het KNMI volgens Penman (zie paragraaf 3.4).
Voor de beschrijving van het verloop van het infiltratieproces wordt uitgegaan van de benadering volgens Horton (zie formules 6 en 7 in paragraaf 3.3.1).

In het inloopmodel wordt onderscheid gemaakt in 4 oppervlaktetypen en 3 afstromingstypen:

De 4 oppervlaktetypen:
- gesloten verhard oppervlak;
- open verhard;
- dakoppervlak;
- onverhard oppervlak.

De 3 afstromingstypen:
- hellend oppervlak (helling > 4%);
- vlak oppervlak;
- vlak uitgestrekt oppervlak (afstand tot lozingspunt >100 m).

De defaultwaarden voor de parameters zijn gegeven in tabel 5.1. Bij de vaststelling van de parameters zijn "veilige" waarden gehanteerd om onderschatting van de inloop te voorkomen. Met name voor de infiltratieparameters is daarom afgeweken van de literatuurwaarden.

Typen opper-vlak	Typen afstro-ming	oppervlak-teberging (mm)	infiltratiecapaciteit (mm/uur)		tijdfactoren (uur^{-1})	
			max. (f_b)	min. (f_e)	max. (k_a)	min. (k_h)
gesloten verhard	hellend vlak vlak uitgestr.	0,0 0,5 1,0				
open verhard	hellend vlak vlak uitgestr.	0,0 0,5 1,0	2,0 2,0 2,0	0,5 0,5 0,5	3,0 3,0 3,0	0,1 0,1 0,1
dak	hellend vlak vlak uitgestr.	0,0 2,0 4,0				
onver-hard	hellend vlak vlak uitgestr.	2,0 4,0 6,0	5,0 5,0 5,0	1,0 1,0 1,0	3,0 3,0 3,0	0,1 0,1 0,1

Tabel 5.1: Default inloopparameters in Leidraad Riolering.

Voor hellende verharde (dak) oppervlakken, is uitgegaan van een oppervlakteberging van 0 mm. Voor vlak dakoppervlak en onverhard oppervlak worden relatief grote waarden gehanteerd.

De infiltratiecapaciteit voor zowel open verhard oppervlak als voor onverhard oppervlak wijken af van de literatuurwaarden in het NWRW 4.3 rapport. Met name de minimum infiltratiecapaciteit in open verhard oppervlak heeft een grote invloed op de totale inloop in het rioolstelsel over een langere periode. De minimum infiltratiecapaciteit in open verharding is gesteld op minder dan 10% van de gemiddelde literatuurwaarden.

De bepaling van de neerslagverliezen in infiltreerbare oppervlakken dient gepaard te gaan met een nauwkeurigheid en volledige inventarisatie van het afvoerend oppervlak, dit om onderschatting van de inloop in het rioolstelsel te voorkomen. Alle oppervlakken waarvan afstroming van neerslag naar het rioolstelsel kan plaatsvinden, zoals opritten en tuinverharding, dienen dus te worden meegerekend.

Onverhard oppervlak wordt feitelijk alleen geïnventariseerd indien afstroming van dat oppervlak naar de riolering wordt verwacht. Daarbij gaat het vaak om minder goed doorlatende grond. In gebieden met zeer slecht doorlatende ondergrond verdient het de aanbeveling om onverhard oppervlak te beschouwen als open verhard oppervlak.

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Bij de afstroming van neerslag treden verliesprocessen op. Deze zijn te onderscheiden in interceptie, bevochtiging en plasvorming, infiltratie en verdamping.

In stedelijke gebieden wordt de *interceptie* meestal verwaarloosd.

Het verlies door *bevochtiging* is over het algemeen gering. Voor gesloten verharde oppervlakken is dit ongeveer 0,1 tot 0,9 mm. Voor open verhard is dit ongeveer 0,4 tot 0,6 mm en voor onverharde oppervlakken 0,0 tot 2,0 mm.

Verlies door *plasvorming* kon niet eenduidig in beeld worden gebracht. Waarden variëren tussen 0,2 en 2,0 mm voor vlakke gesloten verharde oppervlakken, tot 4 mm bij platte daken. De plasvorming bij open verharde oppervlakken ligt tussen 0,5 en 2,0 mm. Bij sterk hellende vlakken loopt plasvorming terug naar 0 mm. Voor onverharde oppervlakken is de plasvorming groter; bij begroeide grond ligt dit tussen 2,5 en 6,5 mm en voor kale grond tussen 0,6 tot 2,5 mm.
In de literatuur zijn weinig gegevens bekend voor bevochtiging en plasvorming.

De som van bevochtiging en plasvorming is *oppervlakteberging*. In de bestudeerde literatuur staan waarden voor bevochtiging en/of plasvorming en oppervlakteberging.
De gevonden waarden voor bevochtiging en plasvorming zijn bij elkaar opgeteld en samen genomen met de waarden voor oppervlakteberging. Voor gesloten verharde oppervlakken ligt de oppervlakteberging tussen 0,20 en 7,6 mm. Voor open verharde oppervlakken ligt dit tussen 0,35 en 2,5 mm en voor onverharde oppervlakken tussen 0,6 en 15 mm.

Infiltratie van water in onverharde oppervlakken varieert sterk en is afhankelijk van lokale factoren zoals grondsoort, vegetatie, bodemdichtheid, vochtgehalte, ondergrond e.d. De infiltratie vanaf verharde oppervlakken hangt af van verhardingsmateriaal, leeftijd en de mate van dichtslibbing van de voegen. Open verhardingen (zoals klinkerverhardingen) infiltreren goed, dit in tegenstelling tot wat vaak wordt aangenomen. Waarden hiervan liggen tussen 14 en 35 millimeter per uur. In het NWRW-inloopmodel worden lagere waarden gehanteerd.

Verdamping is per bui moeilijk kwantificeerbaar en heeft bovendien een klein aandeel in de totale neerslagverliezen. Waarden tot 1,4 mm in twee uur tijd zijn enkel in zeer verdampingsgunstige situaties denkbaar. Meestal wordt verdamping verwaarloosd of wordt de open waterverdamping over een beperkte periode ingevoerd.

De waarden die in de literatuur gevonden zijn voor plasvorming, bevochtiging, oppervlakteberging, infiltratie en verdamping worden gegeven voor een oppervlaktetype of voor een helling. Een combinatie van oppervlaktetype en helling wordt zelden gegeven.

Met behulp van afstromingscoëfficiënten is het verband beschreven tussen gevallen neerslag en het gedeelte daarvan dat tot afstroming is gekomen. In deze literatuurstudie worden drie verschilllende coëfficiënten aangegeven; gerelateerd aan de neerslag die op het verhard oppervlak is gevallen (C_v), die op het totale oppervlak is gevallen (C_t) en die op één bepaald type oppervlak is gevallen (C_e). Wanneer de afstromingsgebieden goed zijn afgebakend, kunnen C_t en C_e waarden maximaal 1 zijn, terwijl C_v waarden hoger dan 1 kunnen zijn.

De afstromingscoëfficiënten zijn ondermeer afhankelijk van verhardingspercentage, soort en type (on)verharding, helling, vullingsgraad van de initiële berging, jaargetijde en mate van dichtslibbing.
In de literatuur zijn uiteenlopende coëfficiënten te vinden. Dit wordt deels veroorzaakt door de grote diversiteit van de onderzoekslokaties.

Het is zeer moeilijk om op basis van de gevonden percentages, algemene uitspraken te doen over de afstroming van verschillende oppervlaktetypen.

De gemiddelde afstromingcoëfficiënt van C_v ligt meestal onder 0,65. C_t en C_v zijn heel moeilijk onderling te vergelijken aangezien de C_t waarde in de literatuur bepaald zijn voor een type bebouwing en de C_v waarde voor een bepaald deel van een stad.

Het heeft de voorkeur om zoveel mogelijk afstromingscoëfficiënten te verzamelen van afzonderlijke elementen. Met behulp van deze gegevens kan dan voor een willekeurig terrein een inschatting van de afstromingscoëfficiënt van dat terrein worden gemaakt.

De volgende afstromingscoëfficiënten C_e kunnen als indicatie worden gebruikt voor de afstromingscoëfficiënten van:

- Dak algemeen: 0,75 – 0,95
- Grasdak: 0,20 – 0,45
- Plat dak met kiezels: 0,60
- Plat, hard daken: 0,70 – 0,80
- Schuin dak: 0,70 – 0,90
- (Sport)park, kerkhof, speelweide, gazon, spoorwegemplacement, braakliggend terrein 0,00 – 0,40
- Asfalt en betonnen rijbanen: 0,70 – 0,95
- Gesloten klinkers, trottoir en oprit: 0,70 – 0,85
- Open klinkers, steenslag en plaveisel: 0,25 – 0,60
- Grindwegen: 0,15 – 0,30

De afstroming van onverhard oppervlak is gering. Het draagt slechts in zeer geringe mate bij aan de totale afstroming van een gebied op het riool.

De afstromingspercentages liggen in het algemeen ruim beneden 100% Bij ontwerpberekeningen worden in het algemeen hogere waarden gebruikt.
Het goed inzichtelijk krijgen van de afstromingspercentages voor verschillende oppervlakte- en afstromingstypen is dan ook van belang voor inloop- en rioleringsmodellen en voor de dimensionering van rand- en infiltratievoorzieningen.

7 LITERATUURLIJST

Deze literatuurlijst bestaat uit directe (zie paragraaf 7.1) en indirecte (zie paragraaf 7.2) verwijzingen van aangehaalde literatuur.

7.1 Directe Verwijzingen

Deze literatuurlijst bestaat uit directe verwijzingen van aangehaalde literatuur

Artina, S. en A. Marinelli, 1991, A linear reservoir model set up within the experimental studies on the "Fossolo" urban catchment in Bologna, In: Maksimović, Č., 1991, *New Technologies in Urban Drainage; UDT '91.*, p. 153-161, Elsevier, London. ISBN 1-85166-650-8.

Bakel, P.J.T. van, A.J. de Braal, G.D. Gelgof, D.J. Marsman, L.M. Remesal van Merode en J. Luijendijk, 1995, *Verstedelijking en verdroging*, Nationaal onderzoeksprogramma Verdroging, NOV Rapport 4-1. ISBN 90-369-4582-8.

Berbee, R.P.M., G.B.J. Rijs en M.W. de Brouwer, 1996, *Behandeling afstromend wegwater van snelwegen*, RIZA Nota nr. 96.017, Lelystad. pp.110. ISBN 90-3694-548-8.

Bebelaar, J.P. en J.W. Bakker, 1981, *infiltratie van regenwater door verschillende wegdekken i.v.m. de watervoorziening van straatbomen*, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, nota 1247.

Bufill, M.C. en M.J. Boyd, 1992, A simple flood hydrograph model for urban catchments. In: *International symposium on Urban Stormwater Management Sydney 4-7 February 1992*, p. 98-103.

Commissie Riolering en Waterverontreiniging, 1972. Rapport van de commissie riolering en waterverontreiniging van de afdeling voor gezondheidstechniek van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, In: *H2O jrg. 5, 1972, nr. 10, p. 199-214 (deel 1) en nr. 12, p. 240-260 (deel 2).*

Cultuurtechnische vereniging, 1988, *Cultuurtechnisch Vademecum*, Utrecht. pp.1085. ISBN 90-9002366-6.

Dam, C.H. van, en J. Schotkamp, 1983, *Infiltratie in bestratingen*, RIJP-rapport 1983-38 Abw, Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, Lelystad.

Frost, W.H., 1998. Water Resources Planner, Arlington County, VA DPW *Persoonlijke mededeling* via E-mail d.d. 25-08-1998 en 08-09-1998.

Geiger, W.F. en H. Dreiseitl, 1995, *Neue Wege für das Regenwasser: Handbuch zum Rückhalt und zur Versickerung von Regenwasser in Baugebieten*, Hrsg. Emschergenossenschaft, Essen und Internationale Bauausstellung Emscher Park GmbH, Gelsenkirchen. pp. 293. ISBN 3-486-26259-9.

Grandjean, I. en Y. Zech, 1991, Rainfall-runoff modelling of partly urbanized watersheds; use of digital terrain models. In: Maksimović, Č., 1991, *New Technologies in Urban Drainage; UDT '91.*, p. 365-372, Elsevier, London. ISBN 1-85166-650-8.

Gustafsson, L.G., S. Lindberg en R. Olsson, 1991. Modelling of the indirect component in urban areas, In: *New Technologies in urban drainage, UDT '91*. p. 127-133. Elsevier Science Publishers, London. ISBN 1-85166-650-8.

Huber, W.C., J.P. Heaney, S.J. Nix, R.E. Dickinson, D.J. Polman, 1984, *Storm Water Management Model, User's manual*, University of Florida, Department of Environmental Engineering Sciences, Gainesville, Florida, USA.

Ingenieursbureau Utrecht, 1997, *Nieuwe stad, schoon water; het watersysteem van Leidsche Rijn; deelrapport 2; Kwaliteit afstromend hemelwater en de mogelijkheid tot afkoppelen in de VINEX-locatie Leidsche Rijn*, M.B.M.M.P. de Burger, dossier nr. 970601. pp. 99. I.o.v. Projectgroep Waterhuishouding Leidsche Rijn.

Kibler, D. F. (ed.), 1982, Urban Stormwater Hydrology, In: *Water Resources Monograph 7*, American Geophysical Union, Washington D.C. ISBN 0-87590-308-0.

Kilian, R.M., R.M.M. van der Loos en C.H. Thuijls, 1996, *Voor nu en later altijd water; gebruik van regenwater en hergebruik van gezuiverd afvalwater in het huishouden door toepassingen van kleinschalige technologieën*, Coördinatiepunt Projectonderwijs LU Wageningen, Wageningen. nr. 06604403.

Koopmans, R.W.R., J.N.M. Stricker en P.M.M. Warmerdam, 1993, *Inleiding hydrologie*, Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit Wageningen. Collegedictaat nr. 06142604.

Maksimović, Č., 1991, Hypothetical catchment - an educational tool for training in sensitivity analysis of rainfall runoff models. In: Maksimović, Č., 1991, *New Technologies in Urban Drainage; UDT '91.*, p. 421-430, Elsevier, London. ISBN 1-85166-650-8.

Martz, G., 1995, *Siedlungswasserbau; Teil 2 Kanalisation*, 4e druk, Werner-Ingenieur-Texte 18, Werner-Verlag GmbH, Düsseldorf. pp. 284. ISBN 3-8041-2756-8.

Moens, M., 1998, *Meten vuilemissie rioolstelsel Stolwijk, Gemeente Vlist.* Onderzoek in opdracht van de Stichting RIONED. Internet: http://www.rioned.org/moens.html

Ministerie van VROM en Stichting RIONED, 1992. *Leidraad Riolering*. Hoofdwerk december 1992. Aanvullingen verschenen tenminste t/m november 1999. ISBN 90-6501-6368.

NWRW, 1986a, *Verhard oppervlak en watervervuiling, rapport 7.1*, S.A. Oldenkamp, A.L.B.M. van Campen, F.G. Szücs, J.A. Woelders, Ministerie van VROM, werkgroep NWRW, Staatsuitgeverij/DOP, 's-Gravenhage. pp. 128. ISBN 90-346-0872-7.

NWRW, 1986b, *Rioleringsmodellen theorie en praktijk, rapport* 4.2, J. Timmer, K. Bakker en J.W. Leunk, Ministerie van VROM, werkgroep NWRW, Staatsuitgeverij/DOP, 's-Gravenhage. pp. 80. ISBN 90-346-0873-5.

NWRW, 1988, *De vuiluitworp van gescheiden rioolstelsels, rapport 5.3*, K. Bakker, J.L. Timmer en L.D.M. Wensveen, Ministerie van VROM, werkgroep NWRW, Staatsuitgeverij/DOP, 's-Gravenhage. pp. 60. ISBN 90-346-2100-6.

NWRW, 1989a, *Neerslag, inloop, overstortmodel; Beschrijving en analyse, rapport 4.3*, A.G. van den Herik, H. van Luytelaar, Ministerie van VROM, werkgroep NWRW, Staatsuitgeverij/DOP, 's-Gravenhage. pp. 82. ISBN 90-346-2098-0.

NWRW, 1989b, *De vuiluitworp van gemengde rioolstelsels, rapport 5.2*, K. Bakker, J.L. Timmer en L.D.M. Wensveen, Ministerie van VROM, werkgroep NWRW, Staatsuitgeverij/DOP, 's-Gravenhage. pp. 124. ISBN 90-346-2099-9.

NWRW,1989c, *De kwaliteit van afstromend regenwater. Praktijk onderzoek in Nederland, rapport 7.2.1*, S.A.Oldenkamp en A.L.B.M. van Campen, Ministerie van VROM, werkgroep NWRW, Staatsuitgeverij/DOP, 's-Gravenhage. pp.124. ISBN 90-346-2103-0.

Pecher, R., 1969, *der Abflußbeiwert und seine Abhängigkeit von der Regendauer*, Eigenverlag des Inst. für Wasserwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen der TH München, München.

SEV, 1996, Stuurgroep Experimenten volkshuisvesting, *Geld als water, Handleiding voor ontwerp en gebruik van hemelwaterinstallaties*, Rotterdam.

Ven, F.H.M. van de, 1989, *Van neerslag tot rioolinloop in vlak gebied, van Zee tot Land* 57, Rijkswaterstaat, Directie Flevoland, Lelystad. pp.366. ISBN 90-369-1060-9.

Ven, F.H.M. van de, 1992, *Waterbeheersing Stedelijke gebieden*, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft. pp.342. Collegedictaat nr. 710413.

Working Party on the Hydraulic Design of Storm Sewers, 1981, *Design and analysis of urban storm drainage*; The Wallingford Procedure. Volume 1, Principles, methods and practice. Dept. of Environmental, National Water Council, Standing Technical Committee Report No. 28, London.

7.2 Indirecte Verwijzingen

Deze literatuurlijst bestaat uit indirecte verwijzingen van aangehaalde literatuur.

Akker, v.d., s.a., zonder verwijzing aangehaald in Commissie Riolering en Waterhuishouding, 1972.

Ando, Y., Y. Takahasi en M.F. Kuan, 1984, Relation between land use and infiltration rate in urban areas. In: P. Balmèr, P.A. Malmqvist, A. Sjoberg, 1984, *Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Urban Storm Drainage*, Chalmers University of Technology, Goteborg.

Arnell, V., 1982. *Rainfall data for the design of sewer pipe systems*, report series A:8, Dept. of Hydraulics, Chalmers University of Technology, Göteborg.

ATV, 1982, *Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik, Band I,3.* Überarbeite Auflage, Verlag Ernst und Sohn.

ATV-Regelwerk, 1977, Richtlinien für die hydraulische Bemessung von Schmutz-, Regen- und Mischwasserkanälen, In: *Arbeitsblatt A 118*, St. Augustin.

Bader,T., P. Bleuzé en R. ter Ellen,1995, *Handboek water in en om gebouwen; mogelijkheid voor een bewuste omgang met water*. Bureau Opmaat, Delft.

Batardy, J., 1974, *Mise en oeuvre d'un modèle de ruissellement sur micro-ordinateur*, Internal report, Faculty of agricultural Sciences, Catholic University of Louvain.

Bruin, H.A.R. de en A.A.M. Holtslag, 1982, A simple parameterisation of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime compared with the Penman-Monteith concept, In: *J. Applied Meteorol. 11*: p. 1610-1621.

Demidow, s.a., zonder verwijzing aangehaald in Commissie Riolering en Waterhuishouding, 1972.

Dijk, J.W. van, 1998, *Onderzoek naar de toepasbaarheid van een helofytenfilter met bezinkbassin als randvoorziening bij een gescheiden stelsel*, Dienst Waterbeheer en Riolering, sector Waterbeheer Amsterdam, afdeling planvorming en onderzoek. Voorlopige meetgegevens september 1998.

Ellis, J.B., D.M. Revitt, 1991, *Drainage from roads: control and treatment of highway runoff*, report NRA 43804/MID.012, Londen, pp. 48.

Falk, J. en J. Niemezynowicz, 1979, Waterbudget for the city of Lund, In: Ben Chie Yen (ed), *Proceedings of the Second International Conference on Urban Storm Drainage*, Volume II, Dept. of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, USA.

Gameson, A.L.H. en R.N. Davidson, 1963, *Storm-water investigations at Northampton*, J. Inst. Purification. pp. 105-130.

Gommans, L., 1994. *Werkboek Ecodesign; Tools voor de woningbouw*, 3e druk, Studiegroep Stadsontwerp en Milieu, Faculteit Bouwkunde, TU Delft, Delft.

Hicks,W.L., 1944, *A method of computing urban runoff*. Trans. Am. Soc.Civ.Eng., 109,p. 1217-1253.

Horton, s.a., zonder verwijzing aangehaald in Van de Ven, 1992.

Horton, R.E., 1940, An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity, In: *Proceedings Soil Science of America, vol. 5, 1940.*

Hütte, s.a., zonder verwijzing aangehaald in Commissie Riolering en Waterhuishouding, 1972.

Jacobsen, P., 1980, *urban surface runoff simulation* , Vol I-II, Ph.D. Thesis Technical University of Denmark, Lyngby.

Johansen, N.B., 1985, *Discharge to recieving waters from sewer systems during rain*, Ph.D. Thesis Dept. of Environmental Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby.

Koch, s.a., zonder verwijzing aangehaald in Commissie Riolering en Waterhuishouding, 1972.

Kidd, C.H.R., 1978, *Rainfall-runoff processes over urban surfaces*, Proceedings of an Int. Workshop, report no. 53, Institute of Hydrology, Wallingsord, Oxon, Engeland.

Kostiakov, s.a., zonder verwijzing aangehaald in Van de Ven, 1992.

Linsley, R.K., M.A. Kohler en L.H. Paulhus, 1975, *Hydrology for Engineers*, Mc Graw Hill, New York.

Maksimović, Č. en M.Radojković, 1986, *Urban drainage catchments*, selected worldwide Rainfall-Runoff Data from Experimental Catchment, Faculty of Civil Engineering University of Belgrade, Yugoslavia, ISBN 0-08-034086-5.

Melanen, M. en R. Laukkanen, 1981, *Quantity of storm runoff water in urban areas*, Publications of the Water Research Institute no. 42. National Board of Waters, Helsinki, Finland.

Menenti, M., 1984, *Physical aspects and determination of evaporation in deserts applying remote sensing techniques*, Thesis University of Wageningen, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.

Monteith, J.L., 1965, *Evaporation and environment*, Symp. Soc. Exp. Biol. XIX: p. 205-234.

Penman, H.L., 1948, *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*, Series A 193: p. 120-145. Proc. Roy. Soc., London.

Pieper, K., 1938, *Regenabfluß von straßenflächen*, dissertation TH Dresden.

Pfeiff, S., 1971, *Meteorologische, Topografische und Bautechnische Einflüsse auf den Regenabfluss in Kanalisationsnetzen. Wasser und Abwasser im Forschung und Praxis.* 3 Erich Schmidt Verlag. Bielefeld. ISBN 3-503-00926-4.

Philip, J., 1957, *The theory of infiltration*, 83, p. 345-357 en 84, p. 329-339.

Rijkswaterstaat, 1988, *Handleiding Wegenbouw - Ontwerp Hemelwaterafvoer*, Dienst Weg en Waterbouwkunde.

Rijkswaterstaat, 1989, *Meting van massastromen van zware metalen en PAK door natte en droge verwaaiing van een snelweg, lokatie Velzen*, Dienst Weg en Waterbouwkunde, M.P. Keuken e.a., rapportnr. MI-OW-89-66.

Rijkswaterstaat, 1991, *Meting van massastromen van zware metalen door run-off, natte en droge verwaaiing van een snelweg naar de berm*, Dienst Weg en Waterbouwkunde, G.P. Wyers e.a., rapportnr. MI-OW-91-45.

Rijkswaterstaat, 1992a, *Meting massastromen van zware metalen van de weg naar de directe omgeving (III), lokatie Krabbendijke*, Dienst Weg en Waterbouwkunde, G.P. Wyers e.a., rapportnr. W-DWW-92-712.

Rijkswaterstaat, 1992b, *Meting massastromen van polycyclische aromatische koolwaterstoffen naar de directe omgeving van de weg (III), lokatie Krabbendijke*, Dienst Weg en Waterbouwkunde, J.W.M. Wegener e.a., rapportnr. W-DWW-92-713.

Rijkswaterstaat, 1994a, *Meting van massastromen van zware metalen van een weg naar de directe omgeving (V), lokatie Spaarnwoude*, Dienst Weg en Waterbouwkunde, G.P. Wyers e.a., rapport nr. W-DWW-94-721.

Rijkswaterstaat, 1994b, *Meting van massastromen van PAK van de weg naar de directe omgeving lokatie Spaarnwoude*, Dienst Weg en Waterbouwkunde, J.W.M. Wegener e.a., rapportnr. W-DWW-94-722.

Roo, H. de, 1982, *Richtlijnen voor veldwerkzaamheden bij de afdeling Waterhuishouding*, RIJP-rapport 1982-10 Abw, Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, Lelystad.

Stricker, J.N.M., 1981, *Methods of estimating evaporation from meteorological data and their applicability in hydrology*, Verslagen en Mededelingen 28: p. 25-27. Commissie Hydrologisch. Onderzoek TNO Den Haag.

Vat, D., 1985, *Pollution emission from combined sewer systems; a full scale investigation programma*, TNO/CHO Proceedings of Technical meeting 42, no. 33, Water in urban areas, Lelystad.

Ven, F.H.M. van de, 1986, *Van neerslag tot rioolinloop, van Zee tot Land.* Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, Lelystad.

Viessman, W., J.W. Knapp, G.L. Lewis, en T.E. Harbaugh, 1977, *Introduction to Hydrology*, 2nd ed., IEP Publishers, New York.

Walter, K., 1993, Regenwassernutzanlagen und ihre Berechnung, Teil 1, *IKZ-Haustechnik*, jrg 48, nr.13. P. 44-48.

Watkins, L.H., 1963, *Research on surface-water drainage*, Proceedings of the institution of civ. eng., paper nr. 6638.

Wilson, E.M., 1989, *Engineering Hydrology*, Mac Millan, London, 4e editie, pp. 348, ISBN 0-333-51717-2.

BIJLAGE 1 INTERCEPTIEVERLIES VOLGENS HORTON

In deze bijlage worden voor de interceptieformule van Horton (zie paragraaf 3.1) de bijbehorende parameterwaarden gegeven (Kibler,1982).

Interceptieformule van Horton (gelijk aan formule 1):

$$I_i = a + b \cdot P^{\,d} \cdot A_c \qquad (23)$$

waarin: I_i = interceptie [inch]
a, b en d = constanten [-], soms [voet^{-1}], bij afhankelijkheid van de gewashoogte [voet].
P = neerslaghoeveelheid [inch]
A_c = bodembedekkingsgraad [-]

Waarden van de constanten volgens Kibler (1982):

Gewas	a [inch]	b [-]	d [-]	A_c [-]
Boomgaard	0,04	0,18	1,0	1,0
Es (in bos)	0,02	0,18	1,0	1,0
Beuk (in bos)	0,04	0,18	1,0	1,0
Eik (in bos)	0,05	0,18	1,0	1,0
Esdoorn (in bos)	0,04	0,18	1,0	1,0
Wilg (in bos)	0,02	0,40	1,0	1,0
Dennenbos	0,05	0,20	0,5	1,0

Tabel 1: Waarden van de constanten voor de interceptieformule (Kibler ,1982).

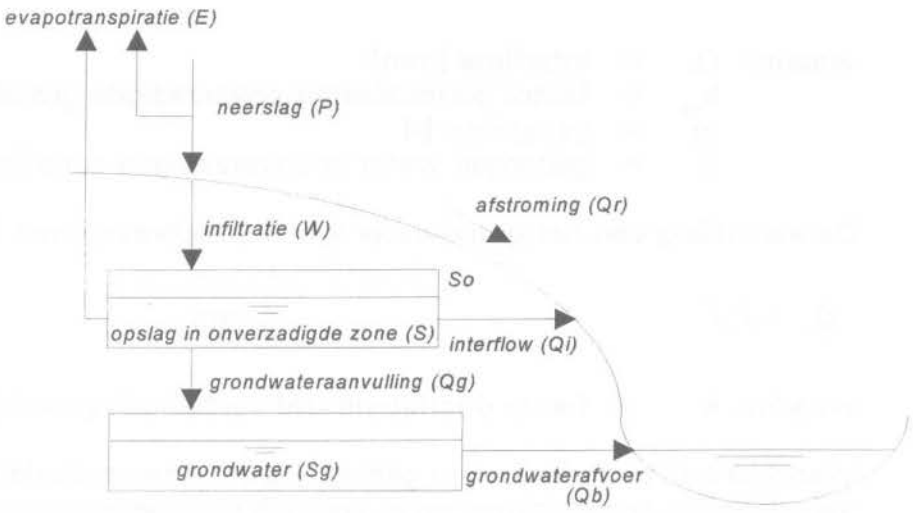
BIJLAGE 2 BESCHRIJVING INFILTRATIE

In deze bijlage wordt naast de in paragraaf 3.3 beschreven berekeningsmethode de methode van Grandjean en Zech gepresenteerd. Deze methode beschrijft de infiltratie van hemelwater en de afstroming van grondwater.

Grandjean en Zech, 1991

Het afstromingsmodel uitgewerkt door Grandjean en Zech is primair bedoeld voor onverharde terreinen met her en der bebouwing. Wanneer het aandeel verhard terrein groter wordt, moet het model worden aangepast.

Het afstromingsmodel is gebaseerd op de hydrologische cyclus, zoals aangegeven in figuur 1.



Figuur 1: Weergave model

Van de gevallen neerslag verdampt een gedeelte (evt. na interceptie), een gedeelte infiltreert in de grond en een gedeelte stroomt af. Wanneer de neerslag de potentiële evapotranspiratie overschrijdt, is er infiltratie en afstroming. In de andere gevallen kan de infiltratie gedurende een bepaalde tijdstap worden beschreven met de volgende semi-empirische functie (formule 24).

$$W = C\{1 - \exp(-(1 - \frac{\theta}{q}).\frac{P - ETP}{C})\} \qquad (24)$$

waarin: W = infiltratie [mm]
C = beschikbare berging in de bodem (verschil tussen maximaal beschikbaar (So) en in gebruik (S) [mm])
θ = bodemvochtigheid [-]
q = constante (moet gecalibreerd worden) [-]
P = neerslagvolume [mm]
ETP = potentiële evapotranspiratie [mm]

Deze formule is gebaseerd op de Horton-vergelijking (Linsey et al., 1975) aangepast door Batardy (1974).

In het model is een reservoir waarin water in de onverzadigde zone kan worden geborgen. Vanuit dit reservoir wordt het grondwater aangevuld, vindt evaporatie plaats en stroomt het naar het oppervlak (interflow).

De interflow wordt beschreven met de onderstaande formule 25.

$$Q_i = k_{ns}.\theta^m.S \qquad (25)$$

waarin: Q_i = interflow [mm]
k_{ns} = factor permeabiliteit onverzadigde grond [-]
m = constante [-]
S = geborgen water in onverzadigde zone [mm]

De aanvulling van het grondwater wordt beschreven met formule 26.

$$Q_g = k.S \qquad (26)$$

waarin: k = factor doorlatendheid verzadigde grond [-]

Wanneer het te onderzoeken gebied wordt onderverdeeld in verschillende compartimenten is voor elk compartiment de evaporatie (E), infiltratie (W), opslag onverzadigde zone (S), interflow (Q_i) en de afstroming (Q_r) te bepalen.
De grondwateropslag daarentegen is niet als lokaal te beschouwen maar als een reservoir voor het gehele gebied.
De grondwaterafvoer is als volgt te beschrijven (formule 27):

$$Q_b = S_g(1 - \exp(-\alpha.\Delta t)) \qquad (27)$$

waarin: Q_b = grondwaterafvoer [mm]
S_g = geborgen water in grondwater [mm]
α = afnamecoëfficiënt
Δt = tijdstap

De stroming van het ene naar het andere compartiment wordt vervolgens bepaald, afhankelijk van verhang (S_L) en stroomsnelheid (V_w) waarbij deze laatste weer afhankelijk is van bodemtype. De stroomsnelheid is te beschrijven met de volgende semi-empirische formule 28.

$$\begin{aligned} V_w &= a_{1,i} + b_{1,i} . s_l \quad && voor\ s_l < s_{lim} \\ V_w &= a_{2,i} + b_{2,i} . s_2 \quad && voor\ s_l > s_{lim} \end{aligned} \qquad (28)$$

waarin: V_w = stroomsnelheid [m/s]
S_L = verhang [-]
s_{lim} = grenswaarde verhang [-]
$a_{1,i}$, $a_{2,1}$, $b_{1,i}$ en $b_{2,i}$ = factoren voor bodemsoort i, zie tabel 1 [m/s]

vegetatie	a_1 *[m/s]*	b_1 *[m/s]*	a_2 *[m/s]*	b_2 *[m/s]*	s_{lim} *[-]*
1 = bos	0,012	0,024	0,028	0,016	0,020
2 = gewas	0,012	0,024	0,028	0,016	0,020
3 = gras	0,012	0,024	0,028	0,016	0,020
4 = huizen	0,130	0,018	0,130	0,018	0,020
5 = weg	0,130	0,018	0,130	0,018	0,020

Tabel 1: Voorbeeld van oppervlakte stroomsnelheden voor verschillende bodembedekkingen

Het model moet worden aangepast wanneer bebouwing op grotere schaal (b.v. stedelijk gebied) moet worden doorgerekend. Bijvoorbeeld moet voorkomen worden dat stroming dwars door de bouwblokken optreedt. Dit is mogelijk door de bebouwing te verheffen ten opzichte van de onverharde oppervlakken. Ook moet een aanpassing worden gemaakt ter integratie van het rioolstelsel.

(Grandjean en Zech, 1991)

BIJLAGE 3 MEETLOKATIES VAN ONDERZOEK IN LELYSTAD

In deze bijlage worden de meetlokaties van het afstromingsonderzoek in Lelystad toegelicht.

MEETLOKATIES

De drie meetlokaties zijn:
- woonwijk Pampus-Blokkerhoek. Het meetgebied is 2,0 ha groot. De meetperiode liep van maart 1969 t/m december 1984. Het bestaat uit 2 hofjes gescheiden door een wijkweg. De hofjes zijn omringd door woonblokken met platte daken.
  In tabel 1 is de bodembedekking van het meetgebied gegeven.

type bodembedekking	*oppervlak [m²]*			*procent [%]*
Onverhard			9.400	47
ondergrond		9.400		
- gras	4.800			24
- bomen en struiken	3.600			18
- tuin, divers	1.000			5
Verhard			10.600	53
riolering		8.200		
- daken	2.660			13
- asfalt	3.340			17
- tegels en klinkers	2.200			11
ondergrond		2.400		
- tegels en klinkers	2.400			12
TOTAAL			20.000	100

Tabel 1: Bodembedekking in de woonwijk Pampus-Blokkerhoek. Van de Ven (1989).

- parkeerterrein Noorderwagenplein. De grootte van het meetgebied was 8.500 m² tot 1972 en 7.600 m² na 1972. De meetperiode liep van maart 1969 t/m december 1984. Het grootste gedeelte van het terrein is verhard en ingericht als parkeerplaats. De bodembedekking in het meetgebied is gegeven in tabel 2.

type bodembedekking	*oppervlak voor maart 1972*			*oppervlak na maart 1972*		
	[m^2]	[m^2]	[%]	[m^2]	[m^2]	[%]
Onverhard		670	8		565	7
afwaterend op ondergrond						
- gras en plantgaten	670		8	565		7
Verhard		7.83	92		7.035	93
afwaterend op riool						
- asfalt	3.050		36	3.160		42
- klinkers/kopperslakkeien	3.080		36	2.175		29
- tegels	1.700		20	1.700		22
TOTAAL		8.500	100		7.600	100

Tabel 2: Bodembedekking parkeerterrein Noorderwagenplein (Van de Ven, 1989)

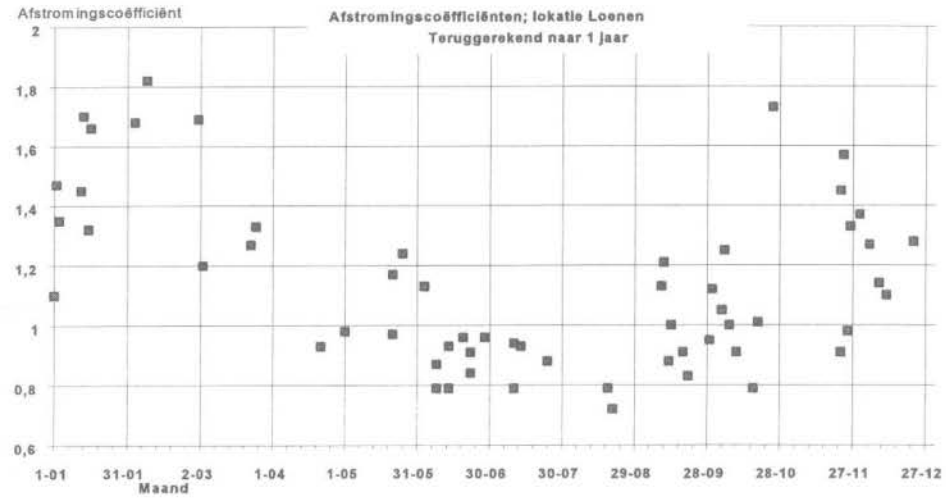
- woonwijk Bastion. De grootte van het gebied is 4,5 ha. De meetperiode was van juli 1982 t/m december 1984. Het gebied heeft een veel hoger verhardingspercentage en een hogere woningdichtheid dan de woonwijk Pampus-Blokkerhoek. De woonblokken hebben hellende daken (25% hellingshoek) van asbestcementen platen. In tabel 3 is de bodembedekking van het meetgebied gegeven.

type bodembedekking	*oppervlak [m^2]*			*procent [%]*
Onverhard			15.280	34
ondergrond		12.760		
- gras	2.060			5
- struiken	8.660			19
- bomen	130			0,3
- paden	1.910			4
gracht en ondergrond		2.060		
- struiken	2.060			5
r.w.a. en ondergrond		460		
- struiken	460			1
Verhard			29.620	66
riolering		29.220		
- daken	12.690			28
- bruggen, transen	1.350			3
- straattegels (0,3x0,3m)	7.770			17
- klinkers	6.410			1
- natuursteen	240			1
- open klinkers	190			0,4
- asfalt	60			0,1
- beton	50			0,1
ondergrond		400		
- daken	400			1
TOTAAL			44.900	100

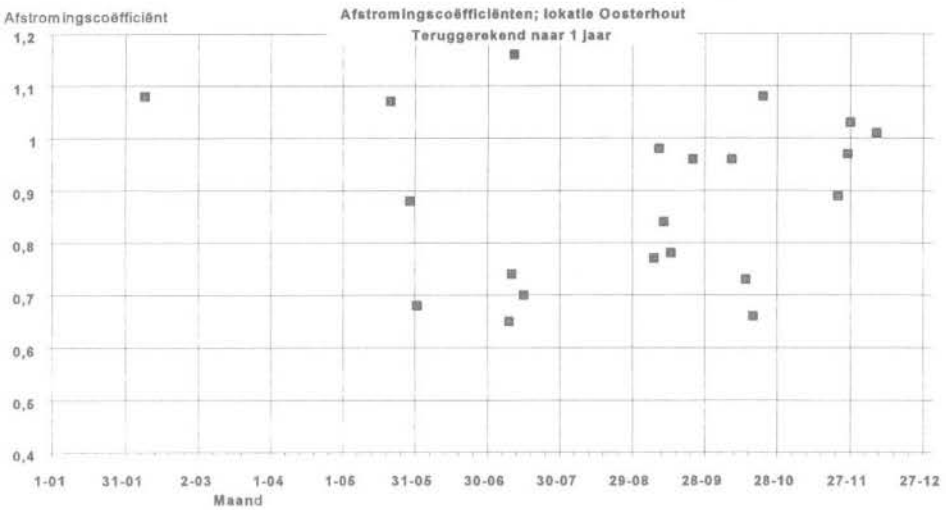
Tabel 3: Bodembedekking woonwijk Bastion (Van de Ven 1989)

BIJLAGE 4 ONDERZOEKEN IN LOENEN EN OOSTERHOUT

In deze bijlage worden de afstromingscoëfficiënten die zijn bepaald in de onderzoeken in Loenen en Oosterhout grafisch gepresenteerd. De gegevens zijn gegroepeerd per maand. NWRW (1986b).
Het onderzoek in Oosterhout was destijds nog niet geheel afgerond. Aanvullende metingen (hier niet verwerkt) gaven aan dat er, in tegenstelling tot de hier gepresenteerde grafische weergave, enige mate sprake is van seizoensafhankelijkheid.



Figuur 1: Afstromingscoëfficiënt C_v in Loenen, gegroepeerd per maand. Meetperiode: 1981 t/m 1984



Figuur 2: Afstromingscoëfficiënt C_v in Oosterhout, gegroepeerd per maand. Gegevens verwerkt tot en met 1984.