Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Regninput til regnvandsdisponering i Aarhus Vands forsyningsområde

Metoder til beregning af bidrag fra grønne og ubefæstede arealer

Thorndahl, Søren Liedtke; Løvgaard, Andreas

Publication date:
2018

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

Link to publication from Aalborg University

Citation for published version (APA):
Thorndahl, S. L., & Løvgaard, A. (2018). Regninput til regnvandsdisponering i Aarhus Vands forsyningsområde: Metoder til beregning af bidrag fra grønne og ubefæstede arealer. Aalborg: Aalborg Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg. DCE Technical Memorandum, No. 66

General rights
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

? Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
? You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
? You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from vbn.aau.dk on: May 24, 2019

INSTITUT FOR BYGGERI OG ANLÆG
AALBORG UNIVERSITET

Regninput til regnvandsdisponering i Aarhus Vands forsyningsområde

Metoder til beregning af bidrag fra grønne og ubefæstede arealer

Søren Thorndahl
Andreas Løvgaard

ISSN 1901-7278
DCE Technical Memorandum No. 66

Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Sektionen for Vand og Miljø
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Ø

DCE Technical Memorandum No. 66

Regninput til regnvandsdisponering i Aarhus Vands forsyningsområde

Metoder til beregning af bidrag fra grønne og ubefæstede arealer

Søren Thorndahl
Aalborg Universitet
e-mail: st@civil.aau.dk
tlf.: 99 40 84 75

Andreas Løvgaard
NIRAS
e-mail: ald@niras.dk

Januar 2018

© Aalborg Universitet

Videnskabelige publikationer ved Institut for Byggeri og Anlæg

Technical Reports anvendes til endelig afrapportering af forskningsresultater og videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg på Aalborg Universitet. Serien giver mulighed for at fremlægge teori, forsøgsbeskrivelser og resultater i fuldstændig og uforkortet form, hvilket ofte ikke tillades i videnskabelige tidsskrifter.

Technical Memoranda udarbejdes til præliminær udgivelse af videnskabeligt arbejde udført af ansatte ved Institut for Byggeri og Anlæg, hvor det skønnes passende. Dokumenter af denne type kan være ufuldstændige, midlertidige versioner eller dele af et større arbejde. Dette skal holdes in mente, når publikationer i serien refereres.

Contract Reports benyttes til afrapportering af rekvireret videnskabeligt arbejde. Denne type publikationer rummer fortroligt materiale, som kun vil være tilgængeligt for rekvirenten og Institut for Byggeri og Anlæg. Derfor vil Contract Reports sædvanligvis ikke blive udgivet offentligt.

Lecture Notes indeholder undervisningsmaterial udarbejdet af undervisere ansat ved Institut for Byggeri og Anlæg. Dette kan være kursusnoter, lærebøger, opgavekompendier, forsøgsmanualer eller vejledninger til computerprogrammer udviklet ved Institut for Byggeri og Anlæg.

Theses er monografier eller artikelsamlinger publiceret til afrapportering af videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg som led i opnåelsen af en ph.d.- eller doktorgrad. Afhandlingerne er offentligt tilgængelige efter succesfuldt forsvar af den akademiske grad.

Latest News rummer nyheder om det videnskabelige arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg med henblik på at skabe dialog, information og kontakt om igangværende forskning. Dette inkluderer status af forskningsprojekter, udvikling i laboratorier, information om samarbejde og nyeste forskningsresultater.

Udgivet 2018 af
Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Sektionen for Vand og Miljø
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Ø

ISSN 1901-7278
DCE Technical Memorandum No. 66

Forord

Dette tekniske memorandum er udarbejdet at Søren Thorndahl, Aalborg Universitet til brug i den Regnvandsdisponeringsplanlægning som pågår hos Aarhus Vand i efteråret 2017. Arbejdet er udført som en del af udviklingsprojektet *MOGO - Monitering af Overfladeafstrømning fra Grønne Områder* som er finansieret af VTUF (Vandsektorens Teknologiudviklingsfond), Projekt ID: 7831.2015. Desuden har Andreas Løvgaard igennem sit kandidatspeciale som civilingeniør i Vand og Miljø på Aalborg Universitet: *Modellering af overfladeafstrømning fra grønne arealer* bidraget med udvalgte afsnit til notatet. Kandidatspecialet kan hentes her: http://projekter.aau.dk/projekter/da/studentthesis/modellering-af-overfladeafstroemning-fra-groenne-arealer(7c90400b-5a1e-4d7b-a33f-06192cfa75c3).html

Notatet beskriver det præliminære arbejde i forhold til at tage højde for afstrømningen fra grønne og ubefæstede arealer i dimensionering af regnvandssystemer og regnvandsdisponeringsplanlægning til brug i Aarhus Vands forsyningsområde.

Tak til Christoffer Bang Andersen, civilingeniørstuderende i Vand og Miljø ved Aalborg Universitet for bidrag til dataprocessering.

1 Indledning

I den danske dimensioneringspraksis for afløbssystemer har der ikke været tradition for at medtage afstrømningsbidrag fra ubefæstede eller grønne arealer i nævneværdig grad. Dette skyldes formodentligt, at der kun sjældent forekommer regnintensiteter, som overstiger de ubefæstede arealers infiltrationskapacitet og dermed giver anledning til overfladeafstrømning fra ubefæstede arealer. Overfladeafstrømningen fra de ubefæstede arealer kan, hvis ellers arealerne er placeret i nærhed af et afløbssystem og med et fald herimod, give signifikante bidrag, der bør betænkes i dimensioneringssammenhæng. Især er det relevant i klimatilpasningsprojekter hvor den dimensionsgivende regn antager gentagelsesperioder større den almindelige funktionspraksis på 5-10 år for stuvning til kritisk kote (SVK, 2007).

Overfladeafstrømning fra ubefæstede arealer kan beregnes som den mængde af nedbøren der ikke infiltrerer ned gennem jorden dvs.:

Overfladeafstrømning = regnintensitet - infiltration

Der findes flere metoder til beregningsmæssigt at estimere bidrag fra ubefæstede arealer. I dette notat betragtes udelukkende metoder som kan implementeres modelberegning med Mike Urban med overflademodel A (DHI, 2016). I Mike Urban findes også overflademodel B, som vha. Horton-infiltration kan beregne infiltrationen og dermed overfladeafstrømningen. Langt størstedelen af de modeller der anvendes i Danmark er opsat med overflademodel A, og derfor vil et skift til overflademodel B medføre et betydeligt arbejde med at konvertere fra den ene overflademodel til den anden. Desuden er overflademodel B koblet med en kinematisk bølgemodel for transporten af vand på overfladerne. Denne er betydeligt mere avanceret, og dermed også mere kompleks af parametrisere, end overflademodel A, hvor tid-areal metoden anvendes. Således har målet i dette notat været at udvikle en måde hvorpå bidrag af ubefæstede arealer kan kobles på en eksisterende opsætning af et vilkårligt opland i Mike Urban med overflademodel A.

En meget simpel metode til at beregne bidrag fra ubefæstede arealer er at påføre et større initialtab på de ubefæstede arealer end på de befæstede arealer. For eksempel vil et initialtab på de ubefæstede arealer på 10 mm betyde, at der efter 10 mm regn vil komme et bidrag fra de ubefæstede arealer svarende til den befæstelsesgrad der er påført de disse. Denne metode beregner ikke jordmætningen direkte og medtager derfor heller ikke historikken i jordmætningen, dvs. den er uafhængig af hvornår det sidst har regnet. Den vil således ”starte forfra” med et ny initialtab for hver ny regnhændelse. For kontinuert at kunne beregne den aktuelle jordmætning og derfor potentialet for afstrømning fra de ubefæstede arealer er der behov for en mere avanceret metode, der kontinuert beregner jordmætningen. I dette notat er der valgt to metoder, hhv. Horton infiltration og Green & Ampt.

2 Metodebeskrivelse

Følgende afsnit er delvist baseret på kandidatspecialet *Modellering af overfladeafstrømning fra grønne arealer* af Løvgaard (2016).

2.1 Horton-infiltration

Hortons infiltrationsmodel (Horton, 1940, 1939) er en af de mest anvendte infiltrationsudtryk, pga. de få parametre, der styrer infiltrationen. Fordelen ved Hortons model er, udover den simple formel til beskrivelse af infiltrationen, at den giver et godt estimat ud fra målte data. Ulempen derimod er, at modellen ikke har

nogen fysisk betydning, samtidig med at målte data er nødvendig for at kunne kalibrere parametrene. Hortons semi-empiriske formel er givet ved følgende udtryk (Akan, 1993):

$$f_p(t) = f_c + (f_0 - f_c)\, exp(-k\, t) \tag{1}$$

Hvor f_p er den potentielle infiltrationskapacitet, f_c er den endelige infiltrationskapacitet, f_0 er den initiale infiltrationskapacitet og k er en konstant. De tre konstanter, f_c, f_0 og k, er afhængig af den enkelte jord- eller overfladetype. I mange tilfælde kan f_c sammenlignes med den mættede hydrauliske ledningsevne. Værdien for k fortæller noget om hvor hurtigt jorden mister infiltrationskapaciteten. Jo højere en værdi, desto kortere tid går der, før infiltrationskapaciteten er ved sit endelige, f_c.

Hortons oprindelige beskrivelse af den potentielle infiltrationskapacitet tager ikke højde for den akkumulerede infiltration i jorden, dvs. den er uafhængig af regnintensiteten. Den potentielle infiltrationskapacitet beskrives udelukkende på baggrund af de tre jordfysiske parametre.

En modificeret udgave af Horton tager højde for den akkumulerede regnmængde, der er infiltreret. Dette kan være ideelt, hvis regnintensiteten er varierende. Den modificerede Horton-model er en integreret udgave af formel (1), (Akan, 1993). En udvidelse til den modificerede udgave af Hortons infiltrationsmodel, tager højde for hvor hurtigt jorden bliver drænet, afhængigt af regnintensiteten. Medtages drænraten, kan den modificerede Horton-model udtrykkes ved (Aron, 1992; Shao and Baumgartl, 2016):

$$f_p(F_e, t) = f_0 + d(t) - k\, F_e(t) \tag{2}$$

hvor $d(t)$ er drænraten og F_e er den nedsivede mængde til tiden t.

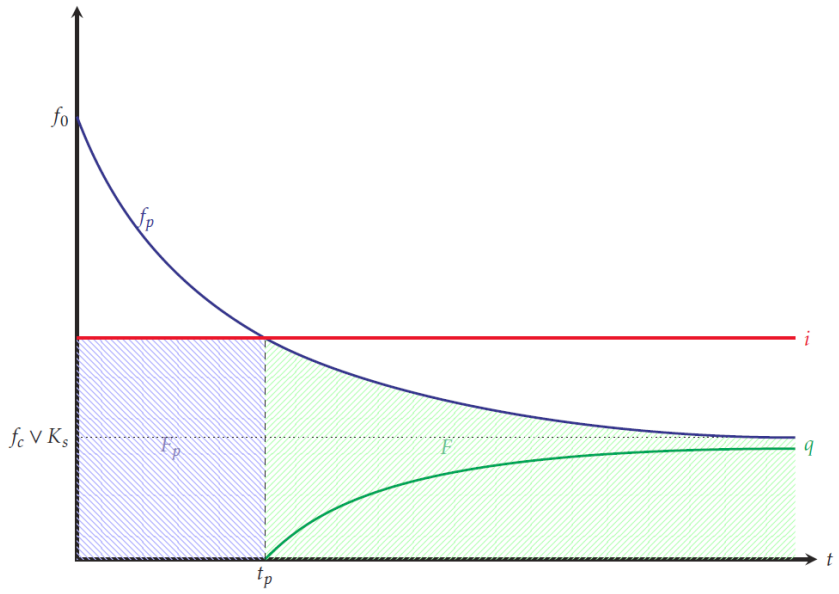
$$d(t) = \frac{f_c}{f_0} k\, F_e(t) \tag{3}$$

Den akkumulerede infiltrationsmængde kan findes som:

$$\frac{dF_e}{dt} = f(t) - d(t) \tag{4}$$

$f = i$ når $f_p > i$ ellers er $f = f_p$

De opstillede udtryk er illustreret i Figur 1



Figur 1 Infiltrationens tidsforløb. Den potentielle infiltration fortsætter med at falde indtil den endelige værdi. Overfladeafstrømning opstår efter en tid, t_p, da infiltrationskapaciteten er blevet lavere end regnintensiteten. Indtil tiden før regnvandet afstrømmer på overfladen, t_p, er der nedsivet en samlet regnmængde, F_p. Efter tiden, t_p vil der have nedsivet den totale mængde, F_e, som er inklusiv F_p. (Løvgaard, 2016).

2.2 Green & Ampt-infiltration

Den anden model, som beskriver infiltrationens tidsforløb, er Green & Ampt modellen, som er baseret på Richards ligning (Kale and Sahoo, 2011). Denne model inkluderer parametre, som er mere fysisk nøjagtige (Morel-Seytoux and Khanji, 1974). Den potentielle infiltrationskapacitet som funktion af tiden er givet ved (Hingray et al., 2015):

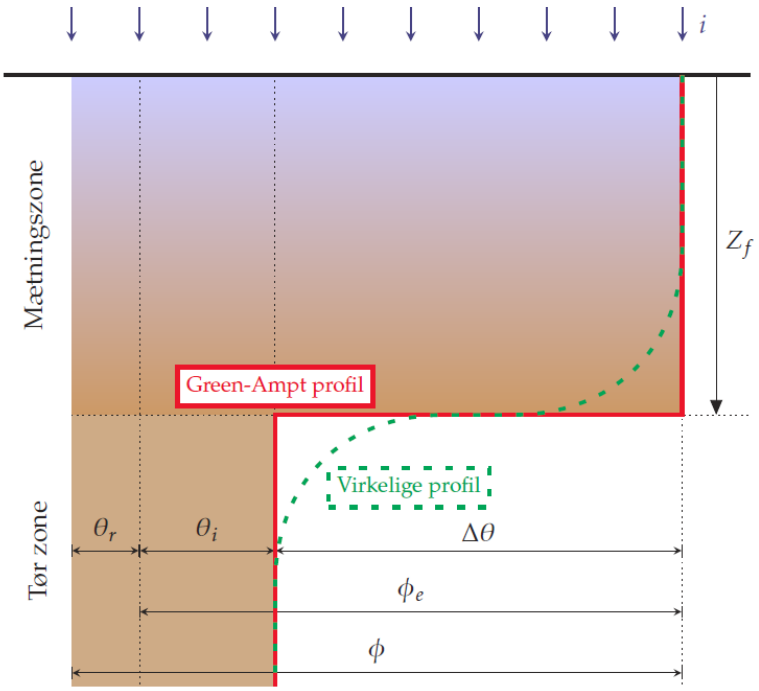
$$f_p(t) = K_s\left(1 + \frac{\psi}{Z_f}\right) \tag{5}$$

Hvor f_p er den potentielle infiltrationskapacitet, K_s er den mættede hydrauliske ledningsevne, ψ er trykpotentialet ved vådfronten og Z_f er afstanden til vådfronten. Trykpotentialet eller soil-water potential, ψ, er afhængig af det aktuelle vandindhold ved vådfronten, der enten kan være markvandskapaciteten θ_{fc} eller visnegrænsen θ_{wp}.

Afstanden til vådfronten, Z_f, er bestemt af jo mere regn der falder på overfladen som funktion af tiden, desto større bliver afstanden nedad i jorden fra overfladen. Denne afstand kan beskrives som:

$$F_e = Z_f(\varphi - \theta_i) = Z_f \Delta\theta \tag{6}$$

Hvor F_e er den totale infiltrerede volumen, φ er den totale porøsitet θ_i er det initiale vandindhold og $\Delta\theta$ er mætningsforskellen mellem total porøsitet og initialt vandindhold. Dette er illustreret på Figur 2.



Figur 2 Vådfronten der bevæger sig længere ned i jorden som funktion af tiden. Jorden er i forvejen en smule mættet (θ_i) og bliver efterhånden fuldt mættet, φ, ved den nedadgående vådfront. Det resterende vandindhold, θ_r, er det vandindhold der er til stede i de mindste porer. Forskellen mellem total porøsitet og resterende vandindhold udgør den effektive porøsitet. (Løvgaard, 2016)

Den akkumulerede regnmængde er ligesom i Horton, den integrerede af infiltrationskapacitet, dvs. $f_p = \frac{dF_e}{dt}$. Integreres formel 5 fås udtrykket for Fe, som kan løses numerisk.

$$F_e(t) = K_s\, t + \psi\, \Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F_e(t)}{\psi\, \Delta\theta}\right) \qquad (7)$$

Formel 5 og 7 beskriver infiltrationen uafhængig af regnintensiteten. Den akkumulerede infiltrationsmængde, Fe, regnes udelukkende på baggrund af de jordfysiske data. Mein and Larson (1973) modificerede Green & Ampt -modellen for en konstant regnintensitet, hvormed regnen fik en indflydelse på infiltrationen. Den modificerede model fra (Mein and Larson, 1973) forudsætter at tiden indtil der sker afstrømning, t_p, er kendt, hvormed den akkumulerede infiltrationsmængde før og efter t_p kan beregnes ved (Almedeij and Esen, 2014; Tarboton, 1982):

$$F_e(t) = i\, t \qquad \text{for } t < t_p \text{ eller } f_p > i \qquad (8)$$

$$F_e(t) = K_s(t - t_p) + F_p + \psi\, \Delta\theta \ln\left(\frac{\psi\, \Delta\theta + F_e(t)}{\psi\, \Delta\theta + F_p}\right) \qquad \text{for } t \geq t_p \text{ eller } f_p \leq i \qquad (9)$$

For den varierende regnintensitet, fungerer Green & Ampt på samme måde som ved Horton med få undtagelser. Den akkumulerede regnmængde bestemmes på samme måde som med Horton, ved brug af formel 4. Drænraten bliver bare bestemt anderledes end ved brug af Hortons model. Da Green & Ampt er baseret på fysiske parametre, er drænraten derfor afhængig af jordens vandindhold, θ, der også er tidsafhængig. Drænraten i Green & Ampt kan bestemmes ved følgende udtryk, der er beskrevet i artiklen af (Shao and Baumgartl, 2016):

$$d(t) = 0 \qquad \text{for } \theta < \theta_{fc} \tag{10}$$

$$d(t) = D(\theta - \theta_{fc})\left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{t_d}\right)\right) \qquad \text{for } \theta \geq \theta_{fc} \tag{11}$$

Hvor D er dybden af kontrolzonen, θ er jordens vandindhold, θ_{fc} er jordens vandindhold ved markkapacitet, Δt er tidsskridtet og t_d er dræntiden.

Dybden af kontrolzonen er den dybde, som bliver drænet. Da størrelsen af denne dybde er uklar i artiklen fra Shao and Baumgartl (2016) er det valgt at relatere denne dybde til dybden af den øvre zone, L_u, beskrevet af Rossman and Huber (2016). Dybden i den øvre zone er afhængig af den mættede hydrauliske ledningsevne, K_s. Denne parameter er empirisk bestemt og er givet ved:

$$L_u = D = c_L\sqrt{K_s} \tag{12}$$

Hvor c_L er n konstant givet ved $c_L = 38.25\ m^{1/2}s^{1/2}$.

Dræntiden, t_d, er den tid det tager at dræne kontrolzonen, D. Denne er bestemt ved en justeret hydraulisk ledningsevne, K_A, hvorefter en værdi af dræntiden, t_d, kan udregnes. Udtrykkene for de to størrelser er beskrevet af Shao and Baumgartl (2016) og udtrykt ved:

$$K_A = K_s\left(\frac{\theta}{\varphi}\right)^{-\frac{2.655}{\log\left(\frac{\theta_{fc}}{\varphi}\right)}} \tag{13}$$

$$t_d = \frac{\theta - \theta_{fc}}{K_A}\varphi\, D \tag{14}$$

3 Parameterisering

I dette notat er der udvalgt tre standardjordtyper til at repræsentere variabiliteten i infiltration og overfladeafstrømning. Således er der udvalgt gennemsnitlige parametre for hhv. sandjord, siltjord samt lerjord. Det er vigtigt her at understrege at de tre jordtyper er baseret på litteraturværdier, og at der kan være meget stor variabilitet i jordparametrene. Der opfordres derfor at til at der så vidt muligt gennemføres lokale undersøgelser af jordparametrene før afstrømningsbidrag fra ubefæstede arealer beregnes.

Der henvises til Løvgaard (2016) for yderligere specifikationer vedr. de valgte standardparametre samt begrundelse herfor.

I Tabel 1 findes standardparametre til brug ved Horton-infiltration.

Tabel 1 Parametre anvendt i Horton-modellen

	Standardværdi	Interval min.	Interval maks.
Initial infiltrationskapacitet, f_0 (10^{-6} m/s)			
Sand	35.3	11.8	70.6
Silt	21.2	7.1	42.3
Ler	7.1	2.4	14.1
Endelig infiltrationskapacitet f_c (10^{-6} m/s)			
Sand	2.6	2.1	3.2
Silt	1.8	0.1	2.1
Ler	0.3	0.01	1.2
Henfaldskonstant, k (10^{-3} s^{-1})			
Sand	0.69	0.56	0.83
Silt	0.97	0.83	1.11
Ler	1.25	1.11	1.39

I Tabel 2 findes standardparametre til brug ved Green & Ampt-infiltration

Tabel 2 Parametre anvendt i Green & Ampt-modellen

	Standardværdi	Interval min.	Interval maks.
Mættet hydrauliske ledningsevne, K_s (10^{-6} m/s)			
Sand	33	8	229
Silt	1.8	0.09	7
Ler	0.3	0.007	1.3
Trykpotentiale ved vådfronten, ψ (10^{-2} m)			
Sand	5.0	2.1	19.1
Silt	16.7	7.2	131.6
Ler	32.6	19.4	73.0
Totalporøsitet, φ (-)			
Sand	0.43	0.37	0.54
Silt	0.50	0.45	0.53
Ler	0.48	0.34	0.50
Vandindhold ved markkapacitet, θ_{fc} (-)			
Sand	0.06	0.02	0.25
Silt	0.28	0.19	0.36
Ler	0.33	0.12	0.42

4 Implementering i MIKE URBAN

Denne implementering er møntet på overflademodel A i Mike Urban og er tænkt som en implementering på en i forvejen opsat model, hvor de befæstede arealer er definerede. Således kobles de befæstede arealer med ét regninput og de ubefæstede arealer med et andet regninput. I regninputtet, der kobles på de ubefæstede arealer er der, ved hjælp af Green & Ampt eller Horton, taget højde for de ubefæstede arealers infiltrationskapaciteter, således at regninputtet indeholder den mængde regn der vil strømme af på overfladen med de givne jordparametre. Regninputtet for de ubefæstede arealer kobles på uden initialtab, da det allerede er indberegnet. Som udgangspunkt anvendes en hydrologisk reduktionsfaktor på 1 på de ubefæstede arealer, dog vil reduktionsfaktoren om nødvendigt kunne anvendes til at justere på bidragene fra de ubefæstede arealer.

Som udgangspunkt kan regninputtet kobles på alle ubefæstede arealer. Dog vil det være fornuftigt at lave en analyse af terrænforholdende på det aktuelle opland, så kun ubefæstede deloplande, der har fald mod afløbssystemet medtages. Deloplande med større lavninger der ikke er koblet til afløbssystemet bør derfor ikke medtages.

Hvorledes de ubefæstede arealer bestemmes i modellen kommer an på overflademodellens kompleksitet. I en detaljeret overflademodel hvor fx tagflader, vejflader, mv. er defineret separat, kan de ubefæstede arealer findes ved at optegne, fx grønne områder, haver, mv. direkte i modellen. I mindre detaljerede overflademodeller, hvor hvert delopland er defineret med en gennemsnitlig befæstelsesgrad, φ_{bef} kan man med fordel definere en ubefæstelsesgrad, φ_{ubef}, som kan findes som:

$$\varphi_{ubef} = 1 - \varphi_{bef}$$

Således vil man på hver brønd/beregningsknude kunne koble både et befæstet og ubefæstet areal med det samme totale areal.

Der kan anvendes tre forskellige regninputs som følger de beregningsniveauer der er defineret i spildevandskomiteens Skrift 27 (SVK, 2007):

- *Metode 1 (beregningsniveau 1):* En rationel metode eller en model beregning med en fastsat konstant regnintensitet for en given varighed og en given gentagelsesperiode. Således vil der kunne anvendes én værdi for regnintensiteten for de befæstede arealer og én regn for regnintensitetet på ubefæstede arealer.

- *Metode 2 (beregningsniveau 2):* En dynamisk model med en CDS-regn. Ligeledes vil der her skulle anvendes én CDS-regn med en given gentagelsesperiode for de befæstede arealer og én CDS regn med en given gentagelsesperiode og de ubefæstede arealer.

- *Metode 3 (beregningsniveau 3):* En dynamisk model hvorpå der kobles én historisk regnserie på de befæstede arealer og én på de ubefæstede arealer.

Metode 1 og 2 anvender en statistisk behandling af de simulerede serier for afstrømning på ubefæstede arealer. I den traditionelle regnstatistik midles regnintensitet over forskellige varigheder. Således findes en gentagelsesperiode for en given regnintensitet over en given regnvarighed ved at rangere intensiteterne og ud fra observationsperioden bestemme gentagelsesperioden. Denne tilgang anvendes ligeledes her til at lave statistik på de simulerede serier for afstrømningen på de ubefæstede arealer. I anvendelsen af de statistiske outputs i metode 1 og 2 gøres den vitale antagelse, at gentagelsesperioden for regnen der kobles på de befæstede arealer er den samme som gentagelsesperioden for regnen der kobles på de ubefæstede arealer.

Eksempel: Hvis et system dimensioneres efter en dimensionsgivende regn med 10 minutters maksimale regnintensitet med en gentagelsesperiode på 2 år som kobles på de befæstede arealer, vil man skulle vælge en tilsvarende regnvarighed og gentagelsesperiode for den regn, der kobles på de ubefæstede arealer. Dette er velvidende at den største afstrømning (med en to års gentagelsesperiode) fra de ubefæstede arealer reelt set kunne forekomme på et andet tidspunkt end det tidspunkt hvor den dimensionsgivende regn forekommer, da afstrømningen fra de ubefæstede arealer i høj grad er afhængig af jordmætningen og dermed af regnens forhistorie.

Ved at antage at den største afstrømning fra de befæstede og de ubefæstede arealer forekommer samtidigt er beregningen derfor på den sikre side og vil repræsentere en situation hvor jordmætningen er mest gunstig for overfladeafstrømning samtidig med at den dimensionsgivende regn forekommer.

Anvendes metode 3, hvor der anvendes reelle tidsserier for både regninputtet til de befæstede og ubefsætede arealer, vil tidsserierne være synkroniserede og derfor repræsentere et mere korrekt afstrømningsforløb, på de ubefæstede arealer, der afhænger af regnens forhistorie, jordmætning, afdræning mv.

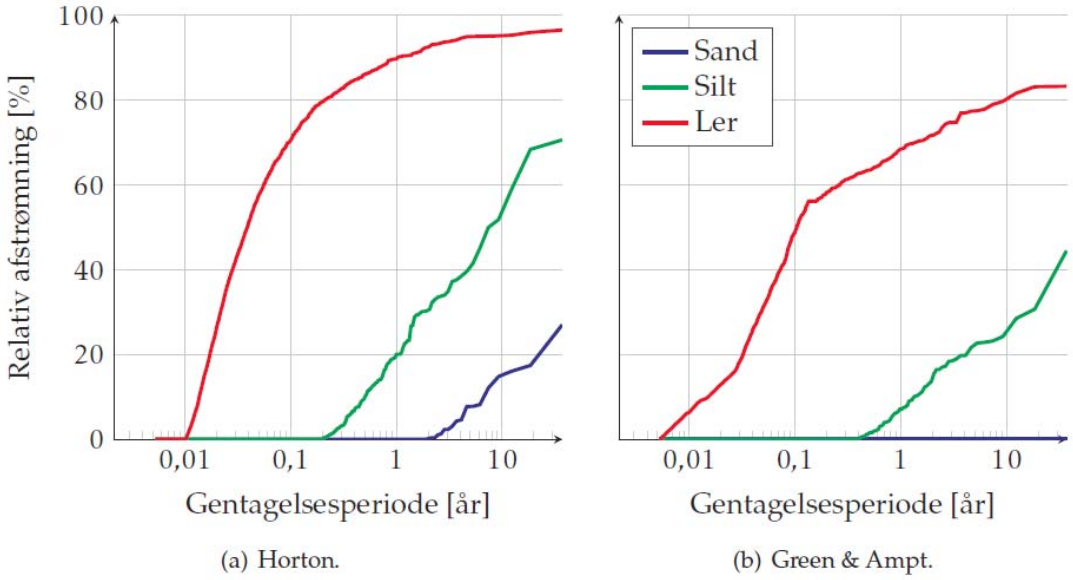
5 Resultater

Tabel 3 opsummerer årlige gennemsnit for nedbør, beregnet infiltration og beregnet overfladeafstrømning med de i ovenstående afsnit valgte jordparametre.

Tabel 3 Middelværdier af infiltration og afstrømning gennem årene fra 1979-2016 , målt i Viby regnserien

Jordtype	Nedbør (mm)	Horton		Green & Ampt	
		Infiltration (mm)	Overflade-afstrømning (mm)	Infiltration (mm)	Overflade-afstrømning (mm)
Sand	534,3	533,5	0,7	534,3	0
Silt	534,3	522,6	11,7	531,2	3,1
Ler	534,3	332,5	201,8	460,1	74,2

I Figur 3 er vist den relative afstrømning defineret som volumenet af overfladeafstrømningen fra et ubefæstet areal som i forhold til regnvolumen pr hændelse. Gentagelsesperioderne er fundet ved at rangere hændelserne over Viby rengseriens længde på 37 år. Som eksempel kan nævnes at der en gang om året (T=1 år) fra ubefæstede lerarealer forekommer hhv. 90 % afstrømning, ved brug af Horton og 70 % afstrømning ved brug af Green & Ampt.



Figur 3 Relativ afstrømning ift. gentagelsesperiode for regnhændelser, fordelt på jordtype og infiltrationsmodel (Løvgaard, 2016).

5.1 Metode 1

Følgende tabeller er fremstillet ved en statistisk analyse på de tidsserier der på baggrund af Viby-regnserien (1979-2017) er genereret i forhold til Horton og Green&Ampt –metoderne og i forhold til de valgte jordparametre.

Tabel 4: Statistik på maksimale intensiteter i *µm/*s på Viby regnserien, 1979-2017 for udvalgte gentagelsesperioder, T, og regnvarigheder.

	Varighed, t_r (min)									
T (år)	**1**	**5**	**10**	**20**	**30**	**60**	**180**	**360**	**720**	**1440**
1	23,33	14,67	10,44	7,06	5,50	3,42	1,67	1,02	0,58	0,31
2	30,00	18,67	13,67	9,17	6,59	4,22	1,94	1,3	0,72	0,38
5	33,33	22,00	16,33	10,33	8,06	5,28	2,42	1,52	0,89	0,46
10	36,67	24,67	18,00	11,5	9,72	5,71	2,58	1,63	1,00	0,50

Tabel 5: Statistik på maksimale intensiteter i *µm/*s på afstrømning fra ubefæstede arealer ved brug af Green & Ampt på jordtypen *ler*

	Varighed, t_r (min)									
T (år)	**1**	**5**	**10**	**20**	**30**	**60**	**180**	**360**	**720**	**1440**
1	21,28	12,11	8,21	5,49	4,09	2,25	0,81	0,40	0,20	0,10
2	27,67	16,02	11,33	7,25	5,20	2,85	0,99	0,49	0,25	0,12
5	31,30	20,11	14,29	8,42	6,22	3,65	1,27	0,64	0,32	0,16
10	34,10	22,07	15,48	9,53	7,84	4,26	1,45	0,72	0,36	0,18

Tabel 6 Statistik på maksimale intensiteter i *µm/*s på afstrømning fra ubefæstede arealer ved brug af Horton på jordtypen *ler*

	Varighed, t_r (min)									
T (år)	**1**	**5**	**10**	**20**	**30**	**60**	**180**	**360**	**720**	**1440**
1	20,78	12,64	9,20	6,11	4,89	2,93	1,48	0,87	0,49	0,25
2	25,95	15,92	11,64	7,48	5,85	3,71	1,78	1,13	0,59	0,30
5	29,94	20,02	14,21	9,50	7,28	4,59	2,25	1,37	0,74	0,37
10	33,27	22,86	16,35	10,23	8,06	5,04	2,42	1,44	0,93	0,47

Tabel 7 Statistik på maksimale intensiteter i *µm/*s på afstrømning fra ubefæstede arealer ved brug af Green & Ampt på jordtypen *silt*

	Varighed, t_r (min)									
T (år)	**1**	**5**	**10**	**20**	**30**	**60**	**180**	**360**	**720**	**1440**
1	6,72	2,74	1,39	0,73	0,48	0,24	0,08	0,04	0,02	0,01
2	11,04	5,07	2,83	1,46	0,97	0,49	0,16	0,08	0,04	0,02
5	19,96	8,61	5,05	2,86	2,01	1,00	0,33	0,17	0,08	0,04
10	22,83	13,44	7,12	3,57	2,64	1,32	0,44	0,22	0,11	0,05

Tabel 8 Statistik på maksimale intensiteter i *µm/*s på afstrømning fra ubefæstede arealer ved brug af Horton på jordtypen *silt*

	Varighed, t_r (min)									
T (år)	**1**	**5**	**10**	**20**	**30**	**60**	**180**	**360**	**720**	**1440**
1	9,55	4,3	2,9	1,96	1,36	0,86	0,29	0,15	0,07	0,04
2	14,45	7,46	4,85	2,84	2,24	1,41	0,64	0,32	0,16	0,08
5	21,74	11,38	7,81	4,56	3,54	2,91	1,04	0,63	0,31	0,16
10	30,36	13,86	7,96	6,57	5,48	3,43	1,34	0,72	0,36	0,18

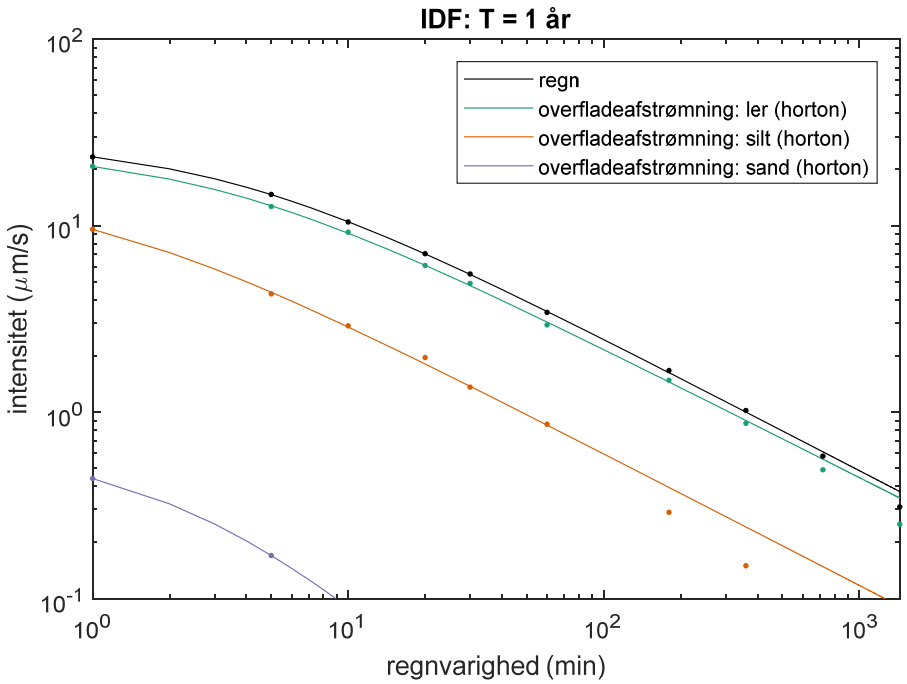
Tabel 9 Statistik på maksimale intensiteter i *μm/*s på afstrømning fra ubefæstede arealer ved brug af Horton på jordtypen *sand*

	Varighed, t_r (min)									
T (år)	**1**	**5**	**10**	**20**	**30**	**60**	**180**	**360**	**720**	**1440**
1	0,44	0,17	0,09	0,04	0,03	0,01	0	0	0	0
2	0,44	0,17	0,09	0,04	0,03	0,01	0	0	0	0
5	8,47	3,47	1,74	0,87	0,58	0,29	0,1	0,05	0,02	0,01
10	18,7	5,53	2,77	2,02	1,42	0,71	0,24	0,12	0,06	0,03

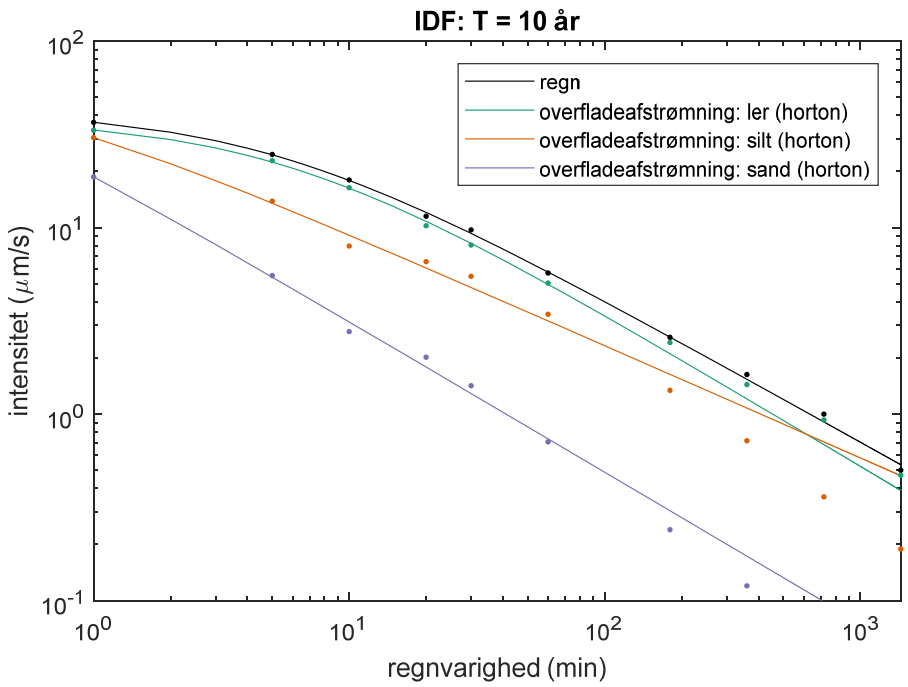
Der forekommer ingen afstrømning fra ubefæstede overflader baseret på jordtypen sand ved brug af Green & Ampt, hvorfor denne ikke er medtaget.

5.2 Metode 2

Ved at fitte en funktion til indholdet fra ovenstående tabeller kan der på tilsvarende vis som i spildevandskomiteens skrift 26, 28 og 30 kunne genereres en CDS-regn for en valgt gentagelsesperiode. I Figur 4 og Figur 5 er vist eksempler på fit for gentagelsesperioderne 1 og 10 år for Viby-regnserien og for afstrømningen fra ubefæstede arealer baseret på Horton infiltration for hver af de tre valgte jordtyper.



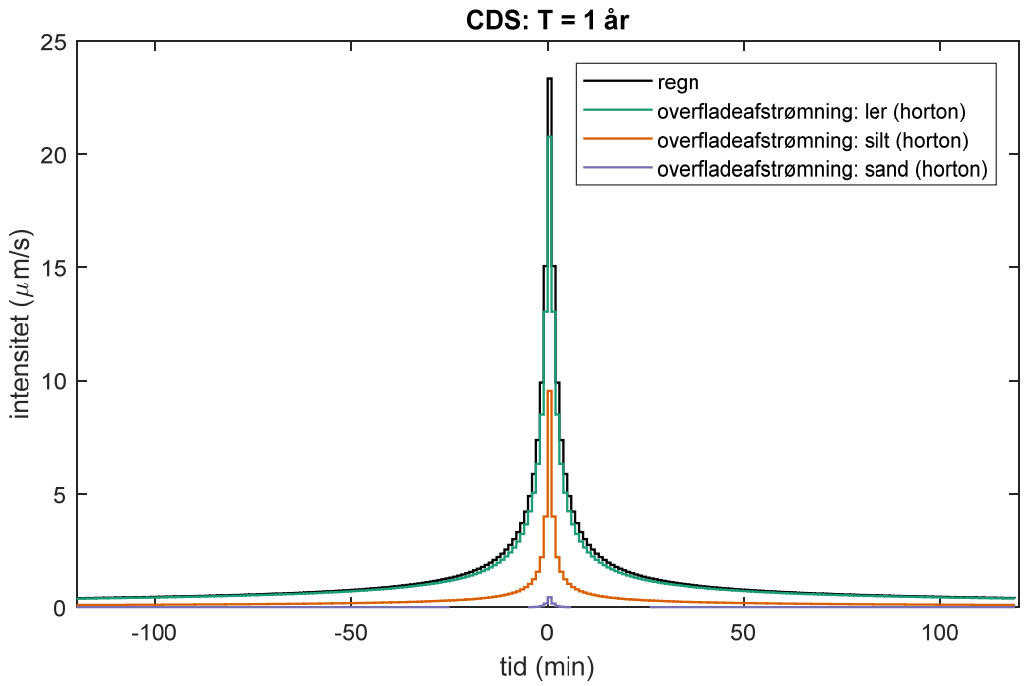
Figur 4 Fittede IDF-kurver baseret på Horton og med gentagelsesperioden 1 år



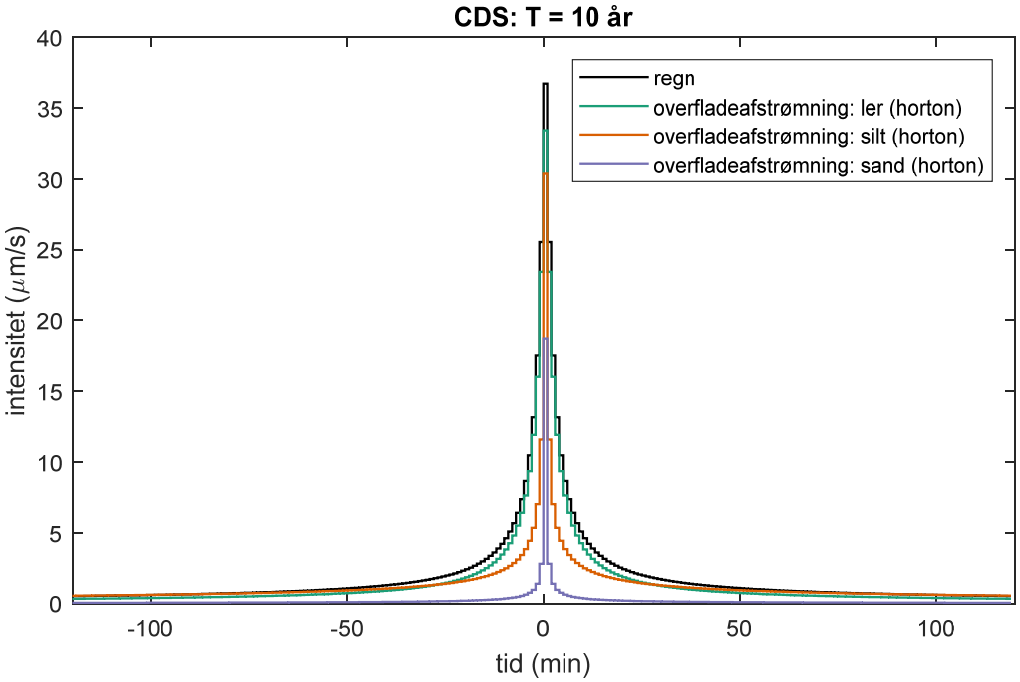
Figur 5 Fittede IDF-kurver baseret på Horton og med gentagelsesperioden 10 år

Ud fra de fittede udtryk for regnformlen, kan der genereres en CDS-regn for hhv. regnen og for afstrømningen på de ubefæstede arealer med hver af de tre jordtyper for gentagelsesperiode på 1 år (Figur 6) og 10 år (Figur 7).

Tilsvarende CDS-regn kan fremstilles ud fra Green & og Ampt beregningerne, men de er ikke vist her.



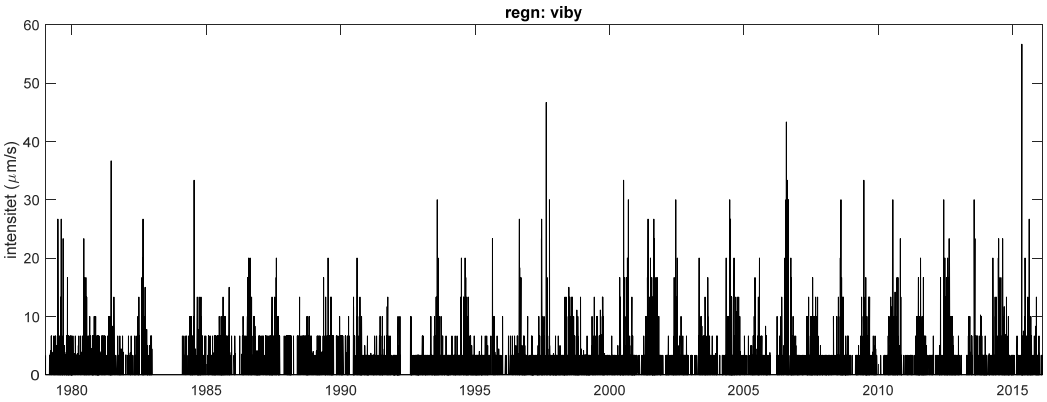
Figur 6. CDS-regn for gentagelsesperioden 1 år for regn og afstrømning fra ubefæstede arealer



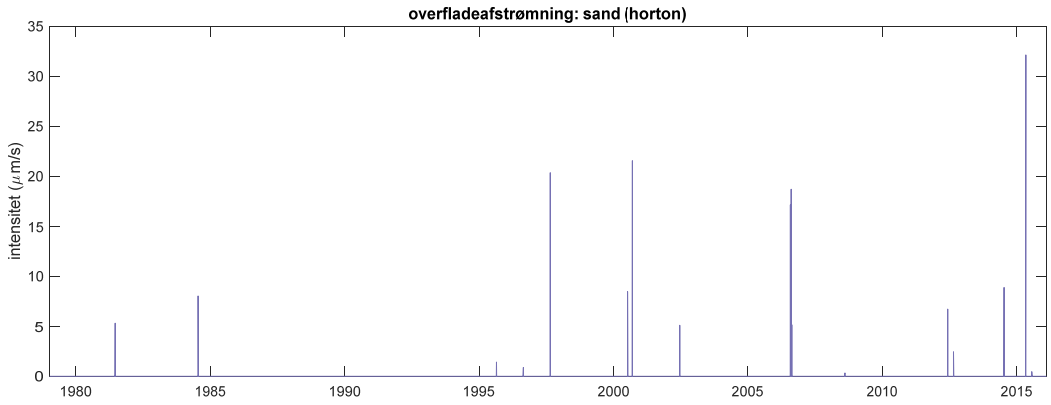
Figur 7 CDS-regn for gentagelsesperioden 10 år for regn og afstrømning fra ubefæstede arealer

5.3 Metode 3

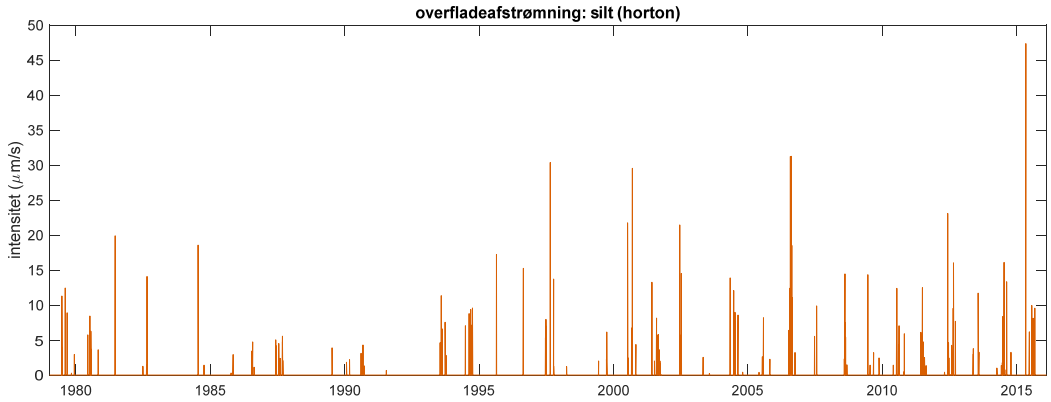
På Figur 8 ses den målte regnserie fra Viby-regnmåleren. Ud fra denne er overfladeafstrømningen fra ubefæstede standardjordtyper beregnet kontinuert i hele regnseriens længde. I modsætning til metode 1 og 2 tager denne metode således højde for historikken i regnbelastningen og afstrømningen fra de ubefæstede overflader derfor være en funktion af hvornår det sidst har regnet og den aktuelle jordmætning. De nedenstående serier (Figur 9 - Figur 14) er grundlaget for den statistiske bearbejdning der er foretaget i metode 1 og 2 og samtidig inputtet til en beregning der følger metode 3.



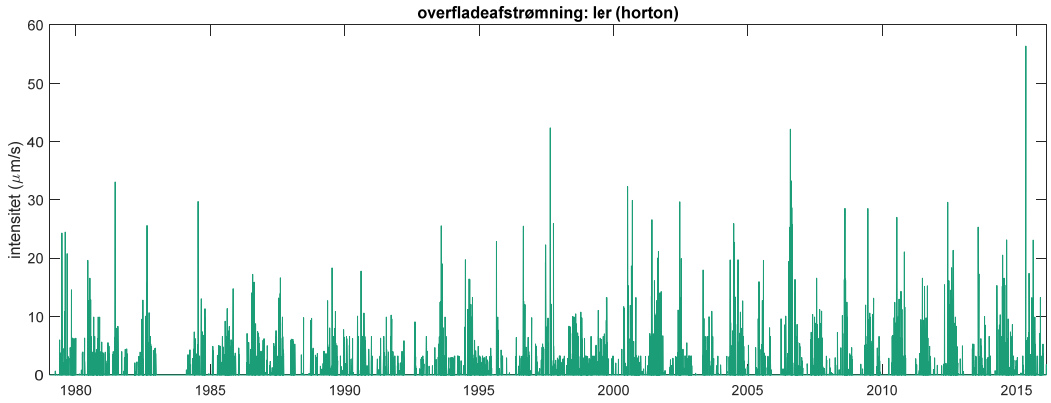
Figur 8 Målt regnserie fra Viby-regnmåleren. Den gennemsnitlige årsnedbør er 520 mm



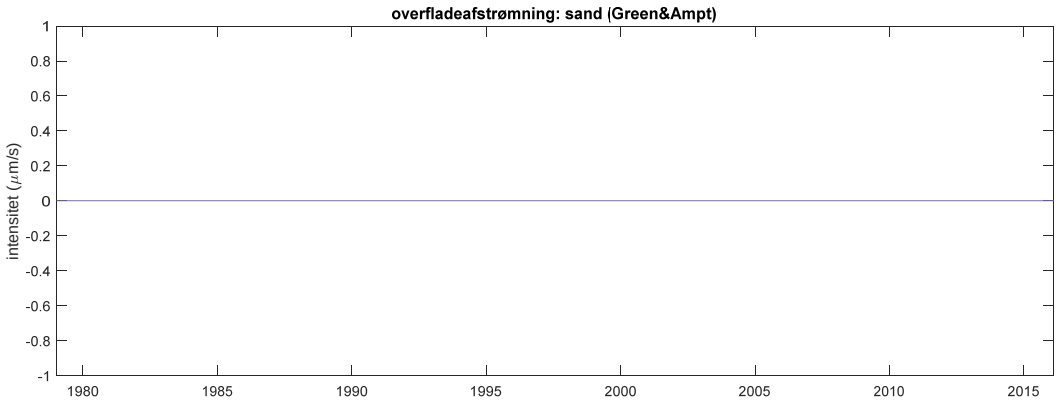
Figur 9 Tidserie for beregnet overfladeafstrømningsbidrag fra ubefæstede sandarealer ved brug af Horton. Den gennemsnitlige årsafstrømning er 1 mm.



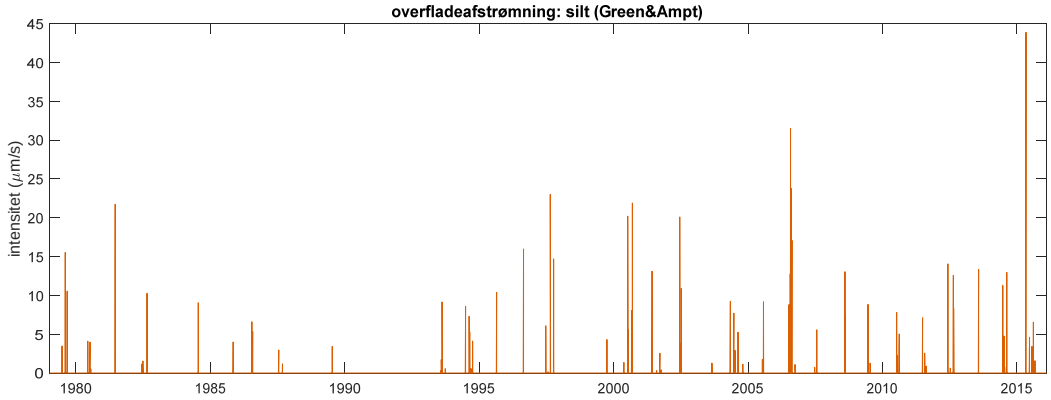
Figur 10 Tidserie for beregnet overfladeafstrømningsbidrag fra ubefæstede siltarealer ved brug af Horton. Den gennemsnitlige årsafstrømning er 11 mm.



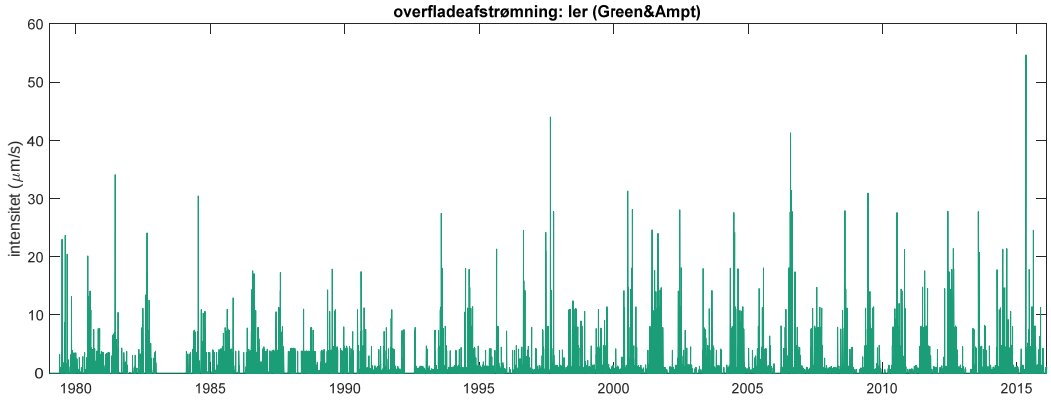
Figur 11 Tidserie for beregnet overfladeafstrømningsbidrag fra ubefæstede lerarealer ved brug af Horton. Den gennemsnitlige årsafstrømning er 196 mm.



Figur 12 Tidserie for beregnet overfladeafstrømningsbidrag fra ubefæstede sandarealer ved brug af Green & Ampt. Den gennemsnitlige årsafstrømning er 0 mm.



Figur 13 Tidserie for beregnet overfladeafstrømningsbidrag fra ubefæstede siltarealer ved brug af Green & Ampt. Den gennemsnitlige årsafstrømning er 3 mm.



Figur 14 Tidserie for beregnet overfladeafstrømningsbidrag fra ubefæstede lerarealer ved brug af Green & Ampt. Den gennemsnitlige årsafstrømning er 72 mm.

6 Konklusion

I dette notat er foreslået metoder til hvordan afstrømning fra ubefæstede arealer i byer kan medtages i dimensionering eller analyse af afløbssystemer. Dels er der angivet to metoder, hhv. Horton og Green & Ampt, til at beregne infiltration ned gennem jorden, således at den resulterende overfladeafstrømning kan bestemmes.

Det kan ikke konkluderes på hvorvidt Horton eller Green & Ampt er bedst til at modellere virkeligheden. I litteraturen vurderes Green & Ampt som en bedre tilnærmelse af infiltrationen på lerede jordtyper end Horton.

Det er vigtigt at præcisere at de værdier der er anvendt for de forskellige jordtyper er valgt ud fra litteraturen og at der kan være signifikante lokale forskellige i jordens karakteristika, som bør medtages i beregning af potentiel overfladeafstrømning fra ubefæstede arealer. Som minimum bør der foretages infiltrationsforsøg, fx med dobbeltring-infiltrometre for at bestemme den aktuelle jords nedsivningsevne.

I forhold til implementeringen af overfladeafstrømning på ubefæstede arealer er der angivet tre forskellige metoder, som læner sig op ad de i Spildevandskomiteens Skrift 27 fastsatte beregningsniveauer. Metode 1 og 2 er en statistisk behandling af simuleret overfladeafstrømning på standardjordtyper. Anvendelse af disse som angivet i notatet skal ses som en ”worst case”, da det forudsættes at jordens største potentiale for overfladeafstrømning, dvs. situationen hvor der er lavest infiltrationskapacitet, optræder samtidigt med den dimensionsgivende regn.

7 Referencer

Akan, O., 1993. Horton infiltration equation revisited. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 118, 828–830. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:5(828)

Almedeij, J., Esen, I.I., 2014. Modified Green-Ampt Infiltration Model for Steady Rainfall. Journal of Hydrologic Engineering 19, 4014011. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000944

Aron, G., 1992. Adaptation of Horton and SCS Infiltration Equations to Complex Storms. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 118, 275–284. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:2(275)

Hingray, B., Musy, A., Picouet, C., 2015. Hydrology : a science for engineers. CRC Press.

Horton, R., 1940. Approach toward a Physical Interpretation of Infiltration-Capacity. Hydrology.Agu.Org 399–417. doi:10.2136/sssaj1941.036159950005000C0075x

Horton, R.E., 1939. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity. Eos, Transactions American Geophysical Union 20, 693–711. doi:10.1029/TR020i004p00693

Kale, R. V., Sahoo, B., 2011. Green-Ampt Infiltration Models for Varied Field Conditions: A Revisit. Water Resources Management 25, 3505–3536. doi:10.1007/s11269-011-9868-0

Løvgaard, A., 2016. Modellering af overfladeafstrømning fra grønne arealer. Kandidatspeciale i Vand og Miljø, Aalborg Universitet. http://projekter.aau.dk/projekter/da/studentthesis/modellering-af-overfladeafstroemning-fra-groenne-arealer(7c90400b-5a1e-4d7b-a33f-06192cfa75c3).html

Mein, R.G., Larson, C.L., 1973. Modeling infiltration during a steady rain. Water Resources Research 9, 384–394. doi:10.1029/WR009i002p00384

Morel Seytoux, H.J., Khanji, J., 1974. Derivation of an equation of infiltration. Water Resources Research 10, 795–800. doi:10.1029/WR010i004p00795

Rossman, L.A., Huber, W.C., 2016. United States Enviromental Protection Agency Storm Water Management Model Reference Manual. United States Environmental Protection Agency, U.S. Environmental Protection Agency, 26 Martin Luther King Drive, Cincinnati, OH 233.

Shao, Q., Baumgartl, T., 2016. Field Evaluation of Three Modified Infiltration Models for the Simulation of Rainfall Sequences. Soil Science 181, 45–56. doi:10.1097/SS.0000000000000136

SVK, 2007. Funktionspraksis for afløbssystemer under regn, skrift nr. 27.

Tarboton, D.G., 1982. Rainfall-Runoff Processes. Linseley 159.

ISSN 1901-7278
DCE Technical Memorandum No. 66