

KANDIDATSPECIALE

Master thesis

Andreas Løvgaard

Modellering af overfladeafstrømning fra grønne arealer

Modelling of surface runoff from green areas



Juni 2016



AALBORG UNIVERSITET

STUDENTERRAPPORT

Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet

Institut for Byggeri & Anlæg

<http://www.byggeri.aau.dk/>

Titel:

Modellering af overfladeafstrømning fra grønne arealer

Periode:

1. februar – 7. juni 2016

Forfatter(e):

Andreas Løvgaard

Vejleder(e):

Søren Thorndahl

Jesper Ellerbæk Nielsen

Oplagstal: 3

Sidetæl: 65 ekskl. bilag

Sidetæl, bilag: 58 ekskl. elektronisk

Afleveringsdato:

7. juni 2016

Synopsis:

Kraftigere regnhændelser, pga. klimaforandringer, sætter større krav til afløbssystemer. Det skyldes, at der opstår en øget overfladeafstrømning. Nærværende afgangprojekt sætter fokus på overfladeafstrømningen fra grønne arealer i byområder. På grønne arealer er det ikke alt regnvandet, der vil infiltrere på overfladen. Det resterende overfladevand vil være et potentielt afstrømningsbidrag til afløbssystemet. Infiltrationsevnen og dermed afstrømningsbidraget er blevet undersøgt for tre forskellige jordtyper ved brug af to infiltrationsmodeller: Horton og Green & Ampt. Begge modeller viser et entydigt billede af overfladeafstrømningen: Jo mere kompakt jordtypen er, desto større overfladeafstrømning dannes. Overfladeafstrømningens betydning fra grønne arealer er blevet overført til Lysstrup, nord for Århus, som er en del af et større klimatilpasningsprojekt. Her er det undersøgt om det ekstra afstrømningsbidrag fra grønne arealer, vil forårsage kapacitetsproblemer i afløbssystemet. Det er vurderet at kapacitetsproblemerne i afløbssystemet er størst ved de grønne arealer, mens en mindre del er påvirket ved de befæstede arealer.

English summary

Heavier rain events, as a result of climate changes, puts greater demands in drainage systems. This is caused by the increased amount of surface runoff. This master thesis deals with the surface runoff from green areas in urban surroundings. In green areas, it will not be all of the water from a rain event that will infiltrate at the surface. The residual amount of rain will be the additional runoff amount that goes into the drainage system. Thus, the rainfall-runoff process has been investigated for three different soil types by using two infiltration models: Horton and Green & Ampt. Both models shows an unambiguously depiction of the surface runoff: The more compact the soil type, the more runoff is produced.

The significance of surface runoff from green areas has been applied to Lystrup, north from the city of Aarhus. The city of Lystrup is a part of a larger climate adaptation project. Here, it is investigated whether the extra surface water amount from green areas will cause capacity problems in the drainage system. Capacity problems in the drainage system has the largest influence in the green areas, while a smaller amount is affected in the impervious areas.

Forord

Dette afgangsprøjeft er skrevet i foråret 2016. Prøjeftet sætter fokus på det evt. forkomne bidrag til afløbssystemet fra grønne områder, der normalt anses for at være af mindre betydning. Rapportens indhold kunne ikke have været foruden hjælp fra de to tilknyttede vejledere, Søren Thorndahl og Jesper Ellerbæk Nielsen. Der rettes en stor tak til disse personer, der har afsat meget tid på møder og dermed fået prøjeftet i den rigtige retning.

Læsevejledning

Rapporten omfatter 3 hovedkapitler. Kapitel 1 beskriver udelukkende teorien og fysikken bag infiltrationsprocessen med dertilhørende parametre. Kapitel 2 beskriver betydningen af infiltrationen ift. overfladeafstrømning. Det sidste kapitel, beskriver implementeringen af de to forrige kapitler, til Lystrup. Derudover omfatter rapporten 3 yderligere kapitler, som er indledning, problemanalyse og konklusion.

Gennem rapporten, vil parametre og andre størrelser blive gengivet i SI-enheder. Det gælder hovedsageligt længdeenheder, der som udgangspunkt vil blive vist i meter [m]. Længdeenheder vil blive forsøgt at kunne relateres til andre størrelsesordener ved at blive skaleret. Følgende skema viser eksempler på anvendte enheder og skaleringer.

Enhed	Skaleret enhed
m	m
10 ⁻² m	cm
10 ⁻³ m	mm
10 ⁻⁶ m	µm

Bagerst i rapporten findes en litteraturliste med samtlige referencer, der er brugt gennem rapporten.

En ekstern er vedlagt dette prøjeft. Derfor skal det bemærkes, at blå referencer gennem rapporten, er henvisninger til bilagsrapporten. Der vil blive refereret til bilagsrapporten ved brug af marginnoter. Det elektroniske bilagsmateriale kan findes på en USB-pen, bagerst i bilagsrapporten.

Layout

Rapporten er skrevet med Palatino skrifttype og 11 pt i skriftstørrelse.

Rapporten er inddelt i kapitler med dertilhørende underkapitler. Flydende objekter, såsom figurer, tabeller og evt. ligninger, vil blive tilnævnt det enkelte kapitelnummer samt nummeret på det flydende objekt i kapitlet. Det er tilstræbt at figurer og tabeller vil blive sat ind der hvor der er plads til dem. Det vil sige, at figurer eller tabeller bliver skubbet til næste side og evt. erstattet af teksten, der principielt kommer efter figuren.

Sidehovedet vil vise kapitel og afsnit for hhv. lige og ulige sidenumre.

Programmer

Selve rapporten er udført i L^AT_EX.

Grafer og plots, der vises i rapporten er udført i MATLAB.

Kortudsnit er lavet med ArcMAP. Dertilhørende baggrundskort er hentet fra Geodatastyrelsen/Kortforsyningen.

MIKE URBAN er blevet benyttet til at udføre afløbstekniske beregninger. Modellen, der er benyttet, er lavet af Orbicon.

Aalborg, 6. juni 2016



Andreas Løvgaard

Indhold

Indledning	1
Problemanalyse	3
Problemformulering	3
Projektafgrænsning	4
Hydrologiske processer	4
Valg af infiltrationsmodel	4
Definition af jordtyper	4
1 Infiltrationens tidsforløb	5
1.1 Infiltrationsmodel	6
1.1.1 Horton	7
1.1.2 Green & Ampt	10
1.2 Sammenligning af infiltrationsmodeller	16
1.2.1 Sammenligning af oprindelig infiltrationsmodel	16
1.2.2 Sammenligning af infiltrationsmodel for konstant regnintensitet .	18
1.2.3 Sammenligning af regnhændelse med varierende regnintensitet samt gendannelse	20
1.3 Startbetingelser for infiltrationsforløbet	23
1.3.1 Overskridelse af infiltrationskapaciteten	26
1.4 Vurdering af infiltrationsmodel	27
2 Infiltrationens betydning for overfladeafstrømning	29
2.1 Opgørelse af infiltreret og afstrømet volumen	29
2.2 Parametrenes indflydelse på afstrømningsvolumen	32
2.2.1 Hortons parametre	32
2.2.2 Green & Ampts parametre	35
2.3 Karakterisering af regnhændelser	38
2.3.1 Relativ afstrømning ift. gentagelsesperiode	39
2.3.2 Relativ afstrømning ift. middelintensiteter	40
2.4 Vurdering af infiltrationens betydning for afstrømning	42
3 Afstrømning fra grønne arealer i Lystrup	43
3.1 Metodebeskrivelse	44
3.1.1 Afløbsmodel for Lystrup	44
3.1.2 Antagelser og forudsætninger	46
3.1.3 Afstrømningsbidrag fra grønne områder	47

3.2	Opstuvning til kritisk kote	50
3.2.1	Referencetilstand	50
3.2.2	Afstrømningsbidrag fra grønne arealer	51
3.3	Vurdering af metode	57
	Konklusion	59
	Perspektivering	61
	Litteratur	65

Indledning

Det er blevet forudsagt af IPCC [2014] (Intergovernmental Panel on Climate Change), at det globale klima vil ændre sig dramatisk over de næste 100 år. Det betyder bl.a. at der vil komme færre, men kraftigere regnhændelser [SVK, 2008]. Kraftigere regnhændelser, som følge af de globale klimaforandringer, sætter krav til de fremtidige afløbssystemer [Winther et al., 2011]. De kraftigere regnhændelser kan føre til øget risiko for oversvømmelse på overflader, ganske enkelt fordi at afløbssystemets kapacitet ikke er tilstrækkelig [Butler og Davies, 2004; Winther et al., 2011].

Oversvømmelse af veje og fortove samt andre befæstede arealer er ikke den eneste risiko der skal overvejes. I almen praksis, anses ubefæstede arealer at udgøre en forsvindende lille del af afstrømningen under en regnhændelse og medtages derfor oftest ikke [DHI, 2015]. De fremtidige regnhændelser, med større intensiteter, øger risikoen for, at der kan forekomme afstrømning fra grønne arealer, hvor regnvandet ikke når at infiltrere. Hvor hurtigt vandet infiltrerer afhænger af jordtypen, vegetationen på overfladen samt hvor mættet jorden i forvejen er. Med store regnintensiteter, kan jorden blive så overmættet, at nedsivning af regnvand umuliggøres, hvilket øger risikoen for opstuvning af regnvand på overfladen. [Govindaraju et al., 2012]

Overfladevandet fra grønne arealer vil om muligt afvande til nærliggende afløbssystemer, hvor der ikke nødvendigvis er taget højde for denne ekstra regnvolumen. Det vil betyde, at de gældende funktionskrav, som afløbssystemet er designet efter, evt. skal revurderes ift. øget kapacitet, såfremt denne ekstra volumen øger antallet af oversvømmelser. [DHI, 2015]

Denne rapport sætter fokus på overfladeafstrømning fra grønne arealer, der måske i fremtiden kan bidrage med et uventet og stort afstrømningsvolumen til afløbssystemet. For højerpermeable overflader, vil overfladevandet udgøre en mindre risiko, da regnvandet kan nå at infiltrere. Men med højere regnintensiteter kan der også forekomme overfladeafstrømning fra disse overflader. Da alle grønne arealer ikke har en højerpermeabel overflade, er afstrømningsbidraget endnu større ved højere regnintensiteter. Derfor er der en god grund til at undersøge hvor stor afstrømningen er fra disse arealer. Endnu vigtigere er det at få belyst om afstrømningsbidraget giver et potentielt kapacitetsproblem, der gør, at afløbssystemets funktionskrav er utilstrækkeligt.

Lystrup, nord for Århus, blev den 26. august 2012, udsat for en ekstrem regnhændelse. Ekstremhændelsen resulterede i mange oversvømmede boliger i hele byen. Byen blev efterfølgende en lokalitet for tilpasning ift. skybrud. Denne rapport tager udgangspunkt i denne by, som det primære case-område. [Århus Kommune, 2014]

Problemanalyse

Grundet den øgede fokus på klimaforandringer, som har ekstreme regnhændelser til følge, er formålet med dette afgangsprøje at undersøge hvor stor en betydning overfladeafstrømningen fra grønne arealer har, og om afstrømningsbidraget udgør en risiko for det nærliggende afløbssystem.

Hertil er teorien for de hydrologiske processer blevet nærstuderet, for at kunne vurdere hvor meget af overfladevandet, der går tabt, før det afstrømmer til afløbssystemet. Da de hydrologiske processer er styret af de fysiske omstændigheder, er overfladeafstrømningen blevet sammenlignet for forskellige scenarier, f.eks. valget af overfladetyper.

Den omtalte teori er omsat til modelberegninger. Disse modelberegninger er implementeret til et case-område. Case-området er i dette tilfælde Lystrup, der ligger nord for Århus. I projektet er der primært blive anvendt litteraturværdier.

Problemformulering

Den overordnede problemstilling for dette projekt er, at opgøre størrelsen af overfladeafstrømningen fra grønne arealer. Dette overordnede mål er baseret på, at der er anvendt litteraturværdier for specificerede jordtyper.

Derudover er der undersøgt følgende problemstillinger:

- Ved undersøgelse af størrelsen på overfladeafstrømningen, er der undersøgt hvor stor en del af regnvandet, der går tabt til hydrologiske processer ud fra specifikke jordtyper, angivet i projektafgrænsningen.
- Ud fra de hydrologiske processer, er der anvendt hydrologiske modeller, specificeret i projektafgrænsningen. Med de hydrologiske modeller, er der undersøgt hvilke modeller, der egner sig bedst til den overordnede problemstilling.
- Regnhændelser analyseres ift. hvilke regntyper, der danner overfladeafstrømning ud fra de valgte jordtyper. Disse regntyper er beskrevet ift. relativ afstrømning, dvs. hvor stor en mængde af regnvolumen, der afstrømmer på overfladen.
- For case-området i Lystrup er der gjort følgende:
 - De udvalgte hydrologiske processer samt dertilhørende lokale jordfysiske parametre anvendes til at beskrive overfladeafstrømningen.
 - Der er undersøgt om overfladeafstrømningen vil udgøre kapacitetsproblemer ved at tage højde for de hydrologiske tab. Dette er gjort ved at vurdere gentagelsesperioden for kritisk kote i afløbssystemet.

Projektafgrænsning

Hydrologiske processer

Der fokuseres udelukkende på infiltration, som den eneste hydrologiske proces. Denne proces anses for at være det største hydrologiske tab ift. størrelsen af overfladeafstrømning.

Valg af infiltrationsmodel

Der vælges at tage udgangspunkt i to infiltrationsmodeller, som er hhv. Horton og Green & Ampt infiltrationsmodel.

Formålet med to infiltrationsmodeller er, at finde ud af hvorvidt de mere praktiske modeller, som Horton, giver et acceptabelt resultat, eller om der skal anvendes en mere fysisk-baseret model som Green & Ampt [US-EPA, 1998].

Definition af jordtyper

Ved undersøgelse af infiltrationen, fokuseres der på valgte jordtyper som er sand, silt og ler. For de parametre, der bliver præsenteret i de to infiltrationsmodeller, er der estimeret standardværdier, som er anvendt i modellerne. Foruden standardværdier er der inkluderet det interval, som den enkelte parameter kan ændre sig inden for.

For alle parameterværdier, er der taget udgangspunkt i de jordtyper angivet i tabel 1.

Tabel 1: Jordtyper, der vil blive fokuseret på.

Jordtype	Engelsk betegnelse	Kornstørrelse [mm] ^a
Sand	Sandy	0,02 – 2
Silt/sandblandet ler	Silt loam/sandy loam	0,002 – 0,02
Ler	Clay	< 0,002

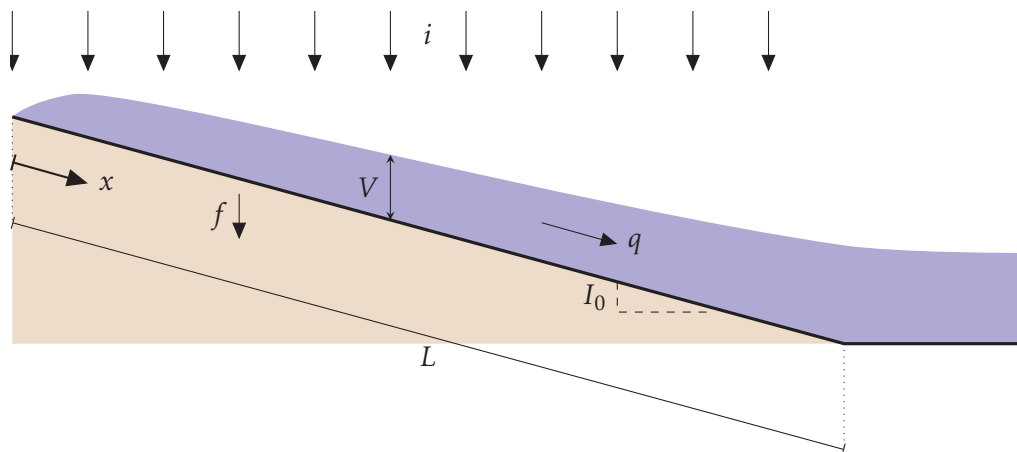
^a Estimat fra Hansen [1976]

Jordtyper har forskellige betegnelser, både nationalt og internationalt. Ovennævnte betegnelser er gjort i forhold til beskrivelserne, foretaget af Hansen [1976]. Jordarten silt er en mellemklasse mellem sand og ler [Loll og Møldrup, 2000]. Disse mellemklasser betegnes ofte, som de er blandet med den anden jordtype, såsom 'sandblandet ler' eller 'lerblandet sand'. Såfremt litteraturværdier for silt ikke har været tilgængeligt, er der anvendt værdier for sandblandet ler.

Infiltrationens tidsforløb

Overfladeafstrømning er af vigtig betydning i flere ingeniørmæssige sammenhænge, bl.a. ift. vandbalancen, forudsigelse af oversvømmelse, stoftransport til recipienter m.fl. [Singh og Bhallamudi, 1998]. I den sammenhæng indgår de hydrologiske processer, der forekommer på permeable overflader. En af de hydrologiske processer er infiltrationen, hvis størrelse afhænger af jordens evne til at optage vand. [Liang og Xie, 2001].

Når regnen falder på permeable overflader vil det som udgangspunkt nedsive i jorden. Hvor hurtigt regnen nedsiver afhænger af flere faktorer, bl.a. jordtypen, vegetationen og hvor tør eller våd jorden er [Hino et al., 1987; Liang og Xie, 2001]. Sidstnævnte faktor er afgørende for hvor meget regn, der kan blive ved med at infiltrere fra overfladen. Jo mere vandmættet jorden bliver under en regnhændelse, desto mindre vand kan infiltrere. Dermed øges risikoen for overfladeafstrømning. Figur 1.1 viser princippet med overfladeafstrømning, med infiltration som den eneste hydrologiske proces. [Tarboton, 2003; Govindaraju et al., 2012]



Figur 1.1: Størrelsen af overfladestrømningen, q , og dermed afstrømningsvolumen, V , på overfladen, bliver styret af hydrologiske processer, som er regnintensiteten, i , og infiltrationen, f .

Som vist på figur 1.1 på forrige side, er størrelsen af en eventuel overfladeafstrømning samt afstrømningsvolumen, afhængig af regnintensiteten og infiltrationen. Det kan udtrykkes med følgende ligning.

$$q = \frac{dV}{dt} = i - f \quad (1.1)$$

hvor

q	Overfladeafstrømning	$[\text{m s}^{-1}]$
V	Afstrømningsvolumen	$[\text{m}]$
i	Regnintensitet	$[\text{m s}^{-1}]$
f	Aktuel infiltrationskapacitet	$[\text{m s}^{-1}]$

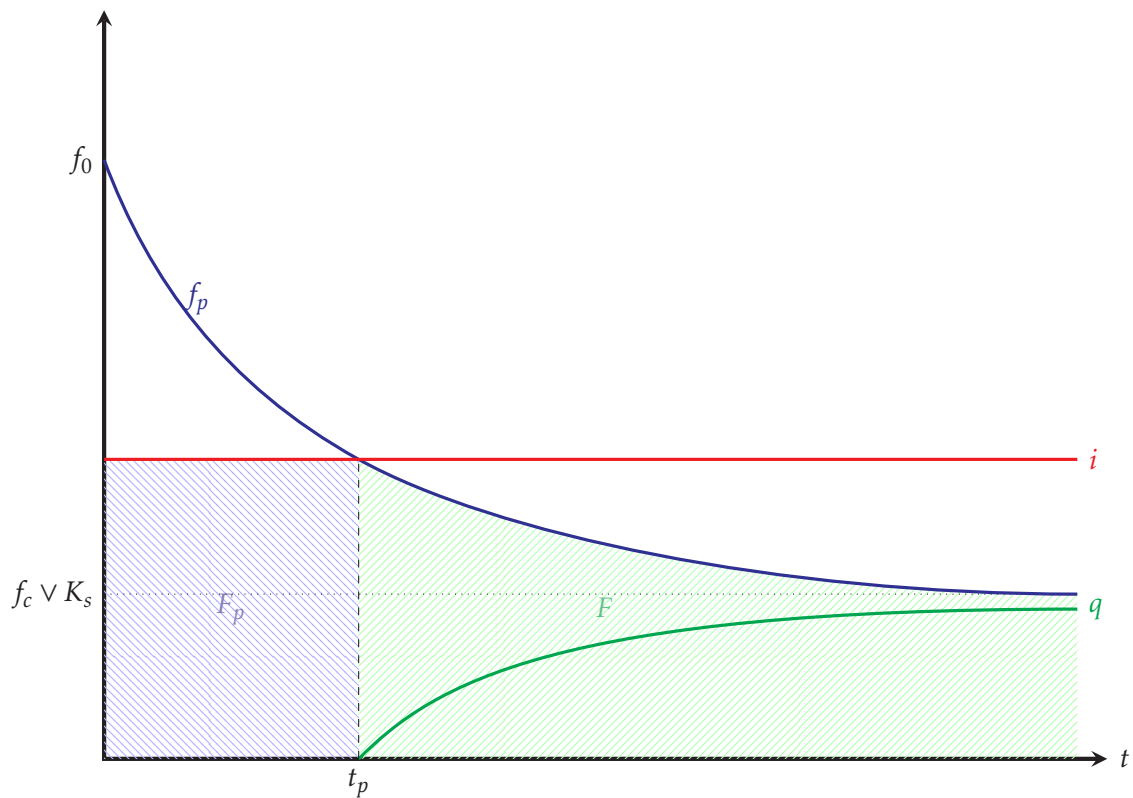
Til bestemmelse af infiltrationskapaciteten for en jordtype er der blevet udviklet talrige infiltrationsmodeller. Nogen er mere nøjagtige end andre, men fælles for dem er, at de kan give et rimeligt og hurtigt estimat af processen. Nogle modeller er fysisk-baserede, dvs. de afhænger af massebevarelse og Darcy's lov, mens andre er semi-empiriske eller direkte empiriske. Selvom der er mange modeltyper, er det ikke altid entydigt hvilken model der er den mest velegnede. [US-EPA, 1998; Mishra et al., 2003]

Dette kapitel beskriver den hydrologiske proces, infiltration, og dets tidsforløb. Infiltrationens størrelse afhænger af jordfysiske parametre, som er vidt forskellige alt efter hvilken infiltrationsmodel der anvendes. De relevante jordfysiske parametre er gennemgået i forbindelse med beskrivelsen af de valgte infiltrationsmodeller. Dernæst er de valgte infiltrationsmodeller blevet sammenlignet, både ift. jordtypen, men også ift. en konstant såvel som en varierende regnintensitet. Det sidste afsnit i kapitlet omhandler bestemmelsen af startværdier for infiltrationsforløbet i de valgte modeller. For startværdierne behøver ikke nødvendigvis være en valgt værdi, men kan blive estimeret.

1.1 Infiltrationsmodel

Det er valgt at nærstudere to infiltrationsmodeller. Den semi-empiriske Horton-model og den mere fysisk-baserede Green & Ampt model. Begge modeller er blevet modificeret op til flere gange [Mishra et al., 2003]. For begge modeller kan infiltrationens tidsforløb relateres til figur 1.2 på næste side.

Som vist på figur 1.2 vil den potentielle infiltration, f_p , fortsætte med at falde. På et tidspunkt, t_p , vil infiltrationskapaciteten blive mindre end regnintensiteten, i , hvormed overfladeafstrømning, q , vil finde sted. For begge infiltrationsmodeller gælder der, at den aktuelle infiltrationskapacitet vil være lig med regnintensiteten ($f = i$), så længe regnintensiteten er mindre end jordens infiltrationskapacitet ($f_p > i$). Så snart den potentielle infiltrationskapacitet bliver mindre end regnintensiteten ($f_p \leq i$), vil der forekomme overfladeafstrømning. Da vil jorden ikke kunne tage al nedbøren, hvorfor den aktuelle infiltrationskapacitet vil være lig med den potentielle infiltrationskapacitet ($f = f_p$). [Akan, 1985, 1992].



Figur 1.2: 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 .

1.1.1 Horton

Hortons infiltrationsmodel er en af de mest brugte, 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, 1992]. [Ward et al., 2015]

$$f_p(t) = f_c + (f_0 - f_c) e^{-k t} \quad (1.2)$$

hvor

f_p	Potentiel infiltrationskapacitet	$[\text{m s}^{-1}]$
f_c	Endelige infiltrationskapacitet	$[\text{m s}^{-1}]$
f_0	Initial infiltrationskapacitet	$[\text{m s}^{-1}]$
k	Henfaldskonstant	$[\text{s}^{-1}]$

Der henvises til figur A.1 i bilag A.1 for en beregningsmetode til Hortons model. Bilag A.5.1 præsenterer den matematiske tilgang bag modellen.

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, K_s [Rossman og Huber, 2016]. 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 .

Infiltrationens tidsforløb under varierende regnintensitet

Hortons 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 (1.2) [Akan, 1992; Musy et al., 2014]. En udvidelse til den modificerede udgave af Hortons infiltrationsmodel, tager højde for hvor hurtigt jorden bliver drænet, afhængig af regnintensiteten. Medtages drænraten, kan den modificerede Horton-model udtrykkes ved [Aron, 1992; Shao og Baumgartl, 2016]:

$$f_p(F_e) = f_0 + d(t) - k F_e(t) \quad (1.3)$$

hvor $d(t)$ er drænraten [m s^{-1}], udtrykt ved [Aron, 1992; Shao og Baumgartl, 2016]:

$$d(t) = \frac{f_c}{f_0} k F_e(t) \quad (1.4)$$

Der gælder stadigvæk de samme antagelser som for den oprindelige model, $f = i$ for $f_p > i$. Den akkumulerede regnmængde er afhængig af den aktuelle infiltrationskapacitet samt drænraten [Shao og Baumgartl, 2016]:

$$\frac{dF_e}{dt} = f - d \quad (1.5)$$

Parameterværdier

De parametre, som indgår i Hortons model er den initiale infiltrationskapacitet, f_0 , endelige infiltrationskapacitet, f_c , samt henfaldskonstant, k . Selvom Hortons infiltrationsmodel er velkendt, er dets parametre mere vanskelig at estimere [Rossman og Huber, 2016].

Infiltrationskapaciteten er afhængig af jordtypen. Lerede jordtyper infiltrerer langsommere end sandede jordtyper. Den initiale infiltrationskapacitet er defineret som den kapacitet jorden kan rumme umiddelbart før en regnhændelse. Jorden er ikke nødvendigvis tør, men kan stadigvæk være fugtig. Derfor er f_0 også afhængig af jordens vandindhold. Hvorvidt der er vegetation eller ej samtidig, udgør også en betydning for størrelsen af infiltrationskapaciteten. Med vegetation dannes der små porerum til beplantningen, hvorfor infiltrationskapaciteten bliver større. [Rossman og Huber, 2016]

Med tiden, vil infiltrationskapaciteten nærme sig en endelig værdi, f_c , der i mange tilfælde kan relateres til den mættede hydrauliske ledningsevne, K_s . Derfor kan den mættede hydrauliske ledningsevne være et udemærket estimat for den endelige infiltrationskapacitet, hvis der ikke er målinger [Rossman og Huber, 2016]. Værdier for f_c , som er tæt på værdien af f_0 for den enkelte jordtype vil være usandsynligt. Det vil svare lidt til at jorden vedligeholder infiltrationskapaciteten under en regnhændelse.

Værdier for henfaldskonstanten har et bredt interval på $0,67 - 120 \text{ h}^{-1}$ ($0,186 - 33,3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$). Konstanten er, ligesom f_0 , afhængig af vegetation og jordens vandindhold. Infiltrationskapaciteten nedbrydes hurtigere desto fugtigere jorden er til at begynde med. Ligeledes vil det gå langsommere, hvis der er vegetation, idet der er små porerum til stede. Derfor er k -værdien for ler større, sammenlignet med sand. Det angivne interval for k er uklart ift. hvilken jordtype der er tale om. [Rossman og Huber, 2016]

Følgende antagelser er gjort i forbindelse med valg af parameterverdier for Hortons:

- Den endelige infiltrationskapacitet er lig med den mættede hydrauliske ledningsevne, $f_c = K_s$, såfremt der ikke er angivet andet. Dog skal værdien ligge indenfor intervallet. Antagelse fra Rossman og Huber [2016], hvis ingen felt-data er tilgængelig.
- Henfaldskonstantens værdier er givet ift. et interval angivet i Rossman og Huber [2016] på $2 - 5 \text{ h}^{-1}$ ($0,56 - 1,39 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$), hvor den laveste svarer til sand og den højeste svarer til ler. Intervalværdierne for hver jordtype er delt op i det angivne interval med middelværdien som standardværdi.

De estimerede parameterverdier er vist i tabel 1.1.

Tabel 1.1: Estimerede parameterverdier for Hortons infiltrationsmodel.

Parameter	Standardværdi	Interval
Initial infiltrationskapacitet, f_0 [10^{-6} m s^{-1}]		
Sand	35,3	11,8 – 70,6
Silt	21,2	7,06 – 42,3
Ler	7,06	2,35 – 14,1
Endelig infiltrationskapacitet, f_c [10^{-6} m s^{-1}]		
Sand	2,635 ^a	2,11 – 3,16
Silt	1,81	0,092 – 2,11
Ler	0,306	0,007 – 1,28
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

Intervallet for f_0 spænder fra en jord uden vegetation og hvor der i forvejen er fugtigt til en tør jord med tæt vegetation.

Standardværdien er for en tør jord med minimal vegetation.

^a Værdi vil nærme sig f_0 , hvilket er usandsynligt. Derfor er der i stedet taget en middelværdi mellem nedre og øvre værdi.

1.1.2 Green & Ampt

Den anden model, som beskriver infiltrationens tidsforløb, er Green & Ampt modellen, som er baseret på Richards ligning [Kale og Sahoo, 2011]. Denne model inkluderer parametre, som er mere fysisk nøjagtige [Morel-Seytoux og Khanji, 1974]. Den potentielle infiltrationskapacitet som funktion af tiden er givet ved [Mein og Larson, 1973; Akan, 1985; Almedeij og Esen, 2014; Musy et al., 2014]:

$$f_p(t) = K_s \left(1 + \frac{\psi}{Z_f} \right) \quad (1.6)$$

hvor

f_p	Potentiel infiltrationskapacitet	$[\text{m s}^{-1}]$
K_s	Mættet hydraulisk ledningsevne	$[\text{m s}^{-1}]$
ψ	Trykpotentiale ved vådfronten	$[\text{m}]$
Z_f	Afstand til vådfront	$[\text{m}]$

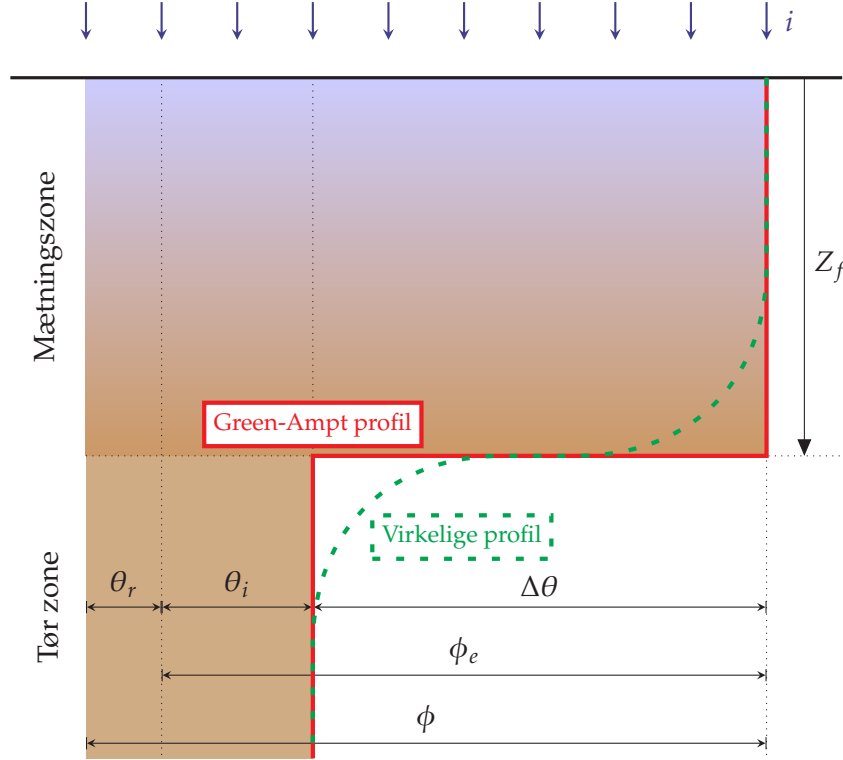
Trykpotentialet eller *soil-water potential*, ψ , er afhængig af det aktuelle vandindhold ved vådfronten, der enten kan være markvandskapaciteten, θ_{fc} , eller visnegrænsen, θ_{wp} , afhængig af de aktuelle forhold [Tarboton, 2003]. Denne parameter er vanskelig at måle. Dog er der blevet lavet omtrentlige værdier fra bl.a. Clapp og Hornberger [1978] og Rawls et al. [1983], som har udført forsøg på flere jordtyper. [Rossman og Huber, 2016]

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 med formel (1.7) og visualiseres med figur 1.3 på næste side [Kale og Sahoo, 2011; Walter, 2011].

$$F_e = Z_f (\phi - \theta_i) = Z_f \Delta\theta \quad (1.7)$$

hvor

F_e	Akkumulerede regnmængde	$[\text{m}]$
ϕ	Total porøsitet	$[\text{m}^3 \text{m}^{-3}]$
θ_i	Initialt vandindhold	$[\text{m}^3 \text{m}^{-3}]$
$\Delta\theta$	Mætningsforskel mellem total porøsitet og initialt vandindhold	$[\text{m}^3 \text{m}^{-3}]$



Figur 1.3: 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. Efter [Kale og Sahoo \[2011\]](#).

Den akkumulerede regnmængde er ligesom i Horton, den integrerede af infiltrationskapaciteten, dvs. $f_p = \frac{dF_e}{dt}$. Integreres formel (1.6), fås udtrykket for F_e , som kan løses numerisk for at få en stabil værdi.

$$F_e(t) = K_s t + \psi \Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F_e(t)}{\psi \Delta\theta}\right) \quad (1.8)$$

Formel (1.6) og (1.8) beskriver infiltrationen uafhængig af regnintensiteten. Den akkumulerede regnmængde, F_e , regnes udelukkende på baggrund af de jordfysiske data. [Mein og Larson \[1973\]](#) modificerede Green & Ampt modellen for en konstant regnintensitet, hvormed regnen fik en indflydelse på infiltrationen. Den modificerede model fra [Mein og Larson \[1973\]](#) forudsætter at at tiden indtil der sker afstrømning, t_p , er kendt, hvormed den akkumulerede regnmængde før og efter t_p kan beregnes ved [\[Tarboton, 2003; Almedeij og Esen, 2014\]](#):

$$F_e(t) = i t \quad \text{for } t < t_p \text{ eller } f_p > i \quad (1.9)$$

$$F_e(t) = K_s (t - t_p) + F_p + \psi \Delta\theta \ln\left(\frac{\psi \Delta\theta + F_e(t)}{\psi \Delta\theta + F_p}\right) \quad \text{for } t \geq t_p \text{ eller } f_p \leq i \quad (1.10)$$

Infiltrationens tidsforløb under varierende regnintensitet

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 (1.5). 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 og Baumgartl \[2016\]](#):

$$d(t) = 0 \quad \text{for } \theta < \theta_{fc} \quad (1.11)$$

$$d(t) = D \left(\theta - \theta_{fc} \right) \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{t_d}} \right) \quad \text{for } \theta \geq \theta_{fc} \quad (1.12)$$

hvor

D	Dybden af kontrolzone	[m]
θ	Jordens vandindhold	[m ³ m ⁻³]
θ_{fc}	Jordens vandindhold ved markvandskapacitet	[m ³ m ⁻³]
Δt	Tidsskridt	[s]
t_d	Dræntid	[s]

Dybden af kontrolzonen er den dybde, som bliver drænet. Da størrelsen af denne dybde er uklar i artiklen fra [Shao og Baumgartl \[2016\]](#) er det valgt at relatere denne dybde til dybden af den øvre zone, L_u , beskrevet af [Rossman og 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:

$$L_u = D = c_L \sqrt{K_s} \quad (1.13)$$

hvor c_L er en konstant, lig med $38,25 \text{ m}^{\frac{1}{2}} \text{ s}^{\frac{1}{2}}$.

Dræntiden 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 og Baumgartl \[2016\]](#) og udtrykt ved:

$$K_A = K_s \left(\frac{\theta}{\phi} \right)^{-\frac{2,655}{\log\left(\frac{\theta_{fc}}{\phi}\right)}} \quad (1.14)$$

$$t_d = \frac{\theta - \theta_{fc}}{K_A} \phi D \quad (1.15)$$

Parameterværdier

Parametrene i Green & Ampts infiltrationsmodel er den mættede hydrauliske ledningsevne, K_s , trykpotentiale ved vådfrenten, ψ , porøsitet, ϕ , og initialt vandindhold, θ_i . Modsat Hortons infiltrationsparametre er der lidt flere parametre for Green & Ampt. Til gengæld er det nemmere at finde repræsentative værdier, idet denne model har flere målbare parametre.

Tabelværdier fra Clapp og Hornberger [1978] og Rawls et al. [1983] er blevet udført på mange jordforsøg og kan regnes for at være repræsentative i de fleste tilfælde. Disse tabelværdier inkluderer den mættede hydrauliske ledningsevne, K_s , trykpotentialet ved vådfrenten, ψ , det mættede vandindhold, θ_s , total porøsitet, ϕ , effektiv porøsitet, ϕ_e , samt Campbells parameter, b .

Trykpotentialet ved vådfrenten, ψ , er, som nævnt, en vanskelig parameter at måle. Som udgangspunkt er der mere trykpotentiale i jordtyper med små partikler, da kornene ligger tættere og dermed kan suge vandet til sig. De mest repræsentative værdier kommer fra Rawls et al. [1983], som er baseret på flere målinger ud fra forskellige jordtyper. Ydermere er der foretaget empiriske udtryk for denne parameter, vist i tabel 1.2.

Tabel 1.2: Empiriske udtryk til bestemmelse af trykpotentialet ved vådfrenten, ψ .

Publicist	Formeludtryk	Variabler/konstanter
Campbell [1974] ^a	$\psi = \psi_a \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b}$	ψ_a : Trykpotentiale ved luftindtrængen [m] θ : Aktuelle vandindhold ^b [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$] θ_s : Mættet vandindhold [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]
Clapp og Hornberger [1978]	$\psi = \frac{2b+3}{b+3} \psi_a$	b : Campbell parameter (<i>pore-size distribution index</i>) [-]
Rawls et al. [1983]	$\psi = \frac{2b+3}{b+2} \left(\frac{\psi_a}{2} \right)$	
Rawls et al. [1993] ^c	$\psi = \frac{2b+3}{2b+6} \psi_a$	
Ogden og Saghafian [1997]	$\psi = \frac{3b+2}{3b+1} \psi_a$	

^a Citeret i Loll og Møldrup [2000].

^b Kan enten være vandindholdet ved markvandskapacitet, θ_{fc} , eller visnegrænsen, θ_{wp} [Tarboton, 2003].

^c Citeret i Tarboton [2003].

Fælles for alle udtrykkene i tabel 1.2 er at trykpotentialet ved luftindtrængen, ψ_a , samt Campbells parameter, b , indgår. Gennemsnitsestimater for ψ_a af Clapp og Hornberger [1978] og Rawls et al. [1982]¹ kan anvendes, hvormed der udregnes forskellige værdier af ψ baseret på formeludtrykkene i tabellen.

Ligeledes er der estimater for b , men kan også bestemmes ud fra lerfraktionen, givet ved det empiriske udtryk [Hansen, 1976]:

$$b = 13,6 CF + 3,5 \quad (1.16)$$

hvor CF er lerfraktionen i enheden $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Typiske værdier for b er i størrelsesorden 1 – 5 for sandede jordarter, 4 – 14 for siltede jordarter og 10 – 20 for lerede jordarter [Loll og Møldrup, 2000].

¹Citeret i Ogden og Saghafian [1997]

Følgende antagelser er blevet foretaget i forbindelse med at estimere parameterværdierne ved brug af Green & Ampts infiltrationsmodel:

- Parameterværdierne fra Rawls et al. [1983] repræsenterer standardværdierne som udgangspunkt, medmindre andet er angivet. Det skyldes at disse værdier er udført på flere jordprøver end Clapp og Hornberger [1978] og dermed antages at være bedre egnet.
- Total porøsitet er lig med det mættede vandindhold, $\phi = \theta_s$. Forskellen mellem de to værdier er af størrelsesorden $0 - 0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ [Loll og Møldrup, 2000].
- Det initiale vandindhold, givet i formel (1.7) er lig med vandindholdet ved markvandskapacitet, $\theta_i = \theta_{fc}$.
- Intervallet for trykpotentialet ved vådfronten, ψ , er bestemt ved at bruge formlerne i tabel 1.2. Dermed fås forskellige værdier ved at kombinere Campbells parameter, b , og trykpotentialet ved luftindtrængen, ψ_a . Den laveste af de udregnede værdier er minimumsværdien, mens den højeste er maksimalværdien.
 - Udregning af Campbells parameter, b , er bl.a. baseret på gennemsnitsværdier fra Clapp og Hornberger [1978]. Desuden er der gjort brug af lerfraktionen for jordtyper fra bl.a. Hansen [1976]; Clapp og Hornberger [1978]; Saxton og Rawls [2006]; Rossman og Huber [2016], hvormed formel (1.16) kan anvendes.
 - Gennemsnitsværdier fra Clapp og Hornberger [1978] anvendes for trykpotentialet ved luftindtrængen, ψ_a .

Tabel 1.3 på næste side viser standardværdierne samt intervallet for de parametre, til udregning af infiltrationen ved brug af Green & Ampt.

Den mættede hydrauliske ledningsevne repræsenterer værdier fra flere forskellige referencer og kan derfor indeholde flere usikkerheder. Den øvre værdi for sand repræsenterer meget grovt sand, der ifølge USDA klassificeres for værdier over $141 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$.

Tabel 1.3: Parametre til brug af Green & Ampt infiltrationsmodel.

Parameter	Standardværdi ^a	Interval ^b		
Mættet hydraulisk ledningsevne, K_s [10^{-6} m s^{-1}]				
Sand	32,7	8	–	229
Silt	1,81	0,0917	–	7,2
Ler	0,306 ^c	0,0071	–	1,28
Trykpotentiale ved vådfrenten, ψ [10^{-2} m]				
Sand	4,95	2,07	–	19,1
Silt	16,68	7,21	–	131,6
Ler	31,63	19,36	–	72,94
Total porøsitet, ϕ [$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$]				
Sand	0,437	0,368	–	0,54
Silt	0,501	0,453	–	0,533
Ler	0,475	0,335	–	0,5
Vandindhold ved markvandskapacitet, θ_{fc} [$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$]				
Sand	0,062	0,016	–	0,25
Silt	0,284	0,193	–	0,36
Ler	0,33 ^d	0,115	–	0,42

^a Som udgangspunkt fra repræsentative værdier fra [Rawls et al. \[1983\]](#).

^b Alle intervalværdier er baseret på litteraturværdier, indhentet fra bl.a. [Hansen \[1976\]](#); [Clapp og Hornberger \[1978\]](#); [Rawls et al. \[1983\]](#); [Ogden og Saghafian \[1997\]](#); [Rossman og Huber \[2016\]](#)

^c Baseret på værdi fra [Saxton og Rawls \[2006\]](#).

^d Baseret på værdi fra US Army Corps, citeret i [Rossman og Huber \[2016\]](#).

1.2 Sammenligning af infiltrationsmodeller

Det ønskes at sammenligne de to valgte infiltrationsmodeller for at kunne vurdere om de giver det samme billede af infiltrationen, således at det kan vurderes om parameterverdierne er acceptable. Idet at Hortons infiltrationsmodel er bestemt med empiriske konstanter, vurderes det i første omgang at Green & Ampt er mere repræsentative, da denne infiltrationsmodel er bestemt med flere fysiske parametre.

For sammenligningen ved en konstant og varierende regnintensitet, tages der udgangspunkt i Viby-regnserien, hvor regnintensiteter er målt i 37 år. Tabel 1.4 viser intervallet samt standardværdien for regnintensitet, som er anvendt ved en konstant regnintensitet. Regnintensiteterne svarer til en 10-minutters middelintensitet.

For varierende regnintensitet, er der taget udgangspunkt i en ekstremhændelse, hvis gentagelsesperiode er på 37 år ift. regnvolumen. Denne hændelse er også specificeret i tabel 1.4.

Tabel 1.4: Anvendte regnintensiteter og regnhændelser ved sammenligning af infiltrationsmodeller.

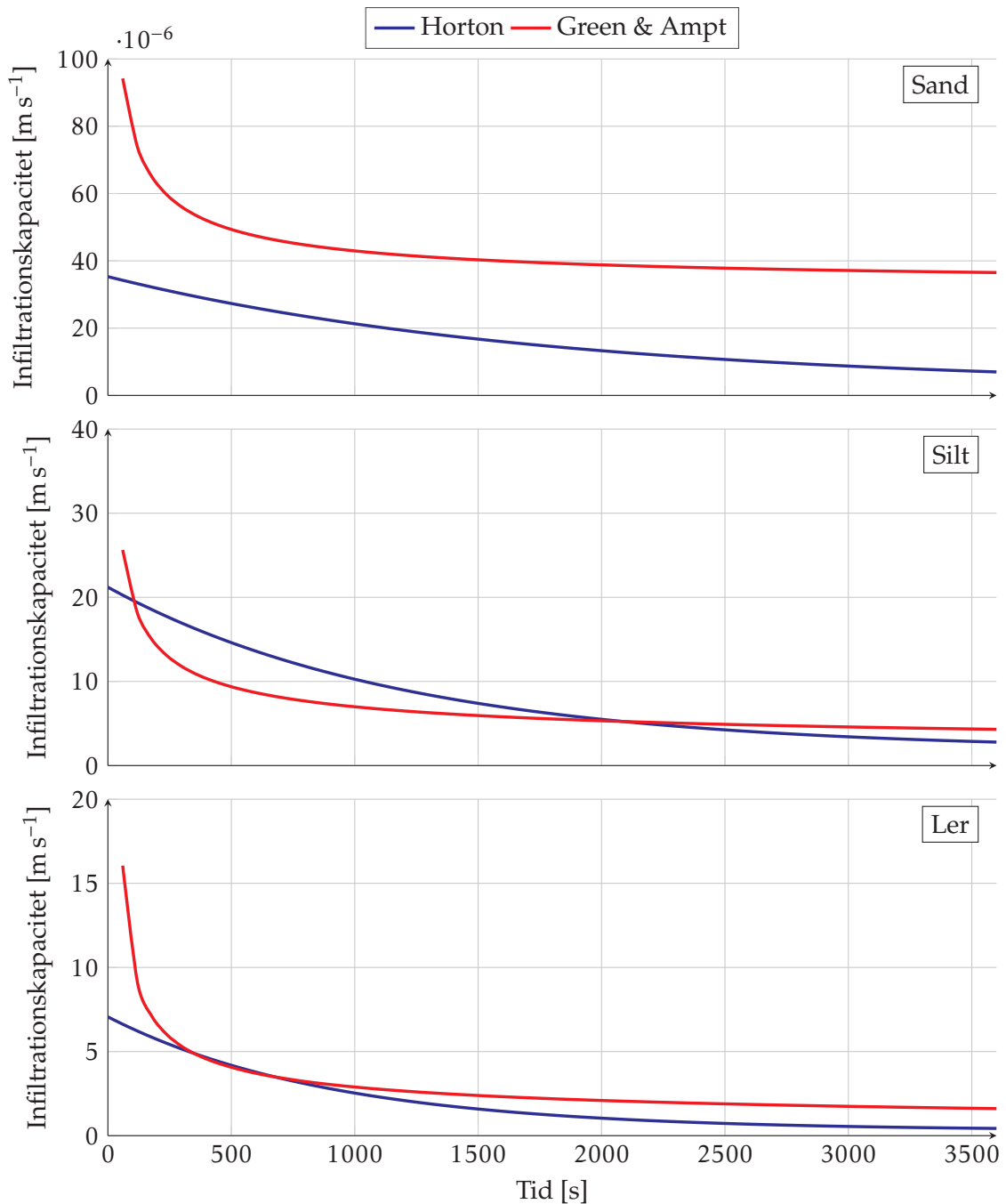
Konstant regnintensitet			
	Standardværdi		Interval
Gentagelsesperiode [år]	5		1 – 37
Regnintensitet [10^{-6} m s^{-1}] ^a	17		10,13 – 24,33
Varierende regnintensitet			
Periode	Varighed [h]	Regnvolumen [10^{-3} m]	Maks. regnintensitet [10^{-6} m s^{-1}]
13. juli 2014 kl. 15:34 – 14. juli 2014 kl. 7:54	16,33	55,6	16,67

^a Værdier svarer til en 10-minutters middelintensitet.

1.2.1 Sammenligning af oprindelig infiltrationsmodel

I første omgang er de oprindelige modeller blevet sammenlignet. Det er formel (1.2) for Horton og formel (1.6) samt (1.8) for Green & Ampt. Infiltrationskapaciteten er altså alene afhængig af de jordfysiske parametre og uafhængig af regnintensiteten. Den tidslige horisont er på 1 time med et tidsskridt på 1 minut. Sammenligningen af de to modeller med de valgte standardværdier fra tabel 1.1 og 1.3, er vist på figur 1.4 på næste side.

Som vist på figur 1.4, har Green & Ampt stor initial gradient, som med tiden bliver mindre end gradienten for Hortons. Hortons infiltrationskapacitet falder mere jævnt, hvilket er styret af henfaldskonstanten, k .



Figur 1.4: Sammenligning af Horton og Green & Ampt infiltrationsmodeller for de tre jordtyper.

Hvad der også skal bemærkes er den tydelige lighed mellem den endelige infiltrationskapacitet, f_c , i Horton og den hydrauliske ledningsevne, K_s , i Green & Ampt. Infiltrationskapaciteten vil falde til dets endelige værdi, som er enten f_c eller K_s . For sand, var f_c ikke lig med K_s , som den var for silt og ler. Det skyldes, at den så vil nærme sig værdien for den initiale infiltrationskapacitet, f_0 , i Horton. Dog skal den initiale infiltrationskapacitet, f_0 , for sand være langt større for at kunne starte ved det samme udgangspunkt som Green & Ampt. For silt og ler, skal f_0 også være større ved sammenligning.

Da infiltrationsforløbet for sand viser den største forskel mellem de to infiltrationsmodeller, er der i bilag A.3 fremvist en metode til hvordan Horton-parametrene kan tilpasses ud fra infiltrationsforløbet for Green & Ampt.

Infiltrationsforløbet stemmer mere overens for silt og ler sammenlignet med sand, hvor Hortons model er meget lavere ift. Green & Ampt. Det skyldes udelukkende valget af parameterværdierne, da den mættede hydrauliske ledningsevne, K_s , i Green & Ampt er meget højere end den endelige infiltrationskapacitet, f_c , i Horton.

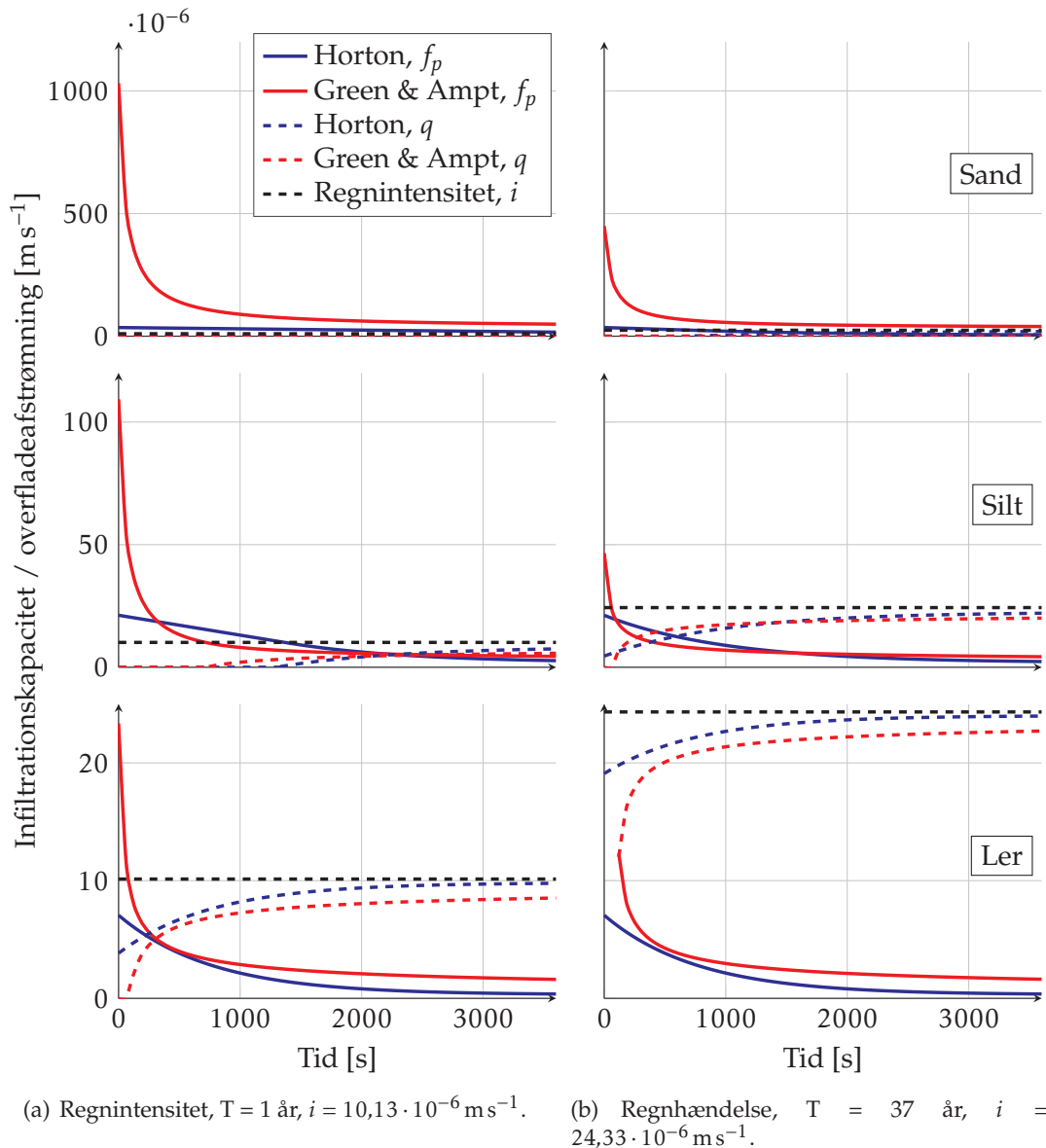
1.2.2 Sammenligning af infiltrationsmodel for konstant regnintensitet

For sammenligning ved en konstant regnintensitet, gælder formel (1.3) samt (1.5) for Horton og formel (1.6), (1.9) samt (1.10) for Green & Ampt. Herved bliver den potentielle infiltrationskapacitet afhængig af regnintensiteten. Og bliver den potentielle infiltrationskapacitet lavere end regnintensiteten, vil der forekomme overfladeafstrømning. Sammenligning af den potentielle infiltrationskapacitet, f_p , samt afstrømning, q , ved brug af de valgte infiltrationsmodeller er vist på figur 1.5 på modstående side. Sammenligningen viser to forskellige regnintensiteter, svarende til en gentagelsesperiode på hhv. 1 og 37 år, vist i tabel 1.4. Regnintensiteten for begge gentagelsesperioder svarer til en 10-minutters middelintensitet, som her er antaget til være konstant i en time.

Som vist på figur 1.5, ændrer den modificerede Horton-model sig ikke nævneværdigt for begge gentagelsesperioder ift. den oprindelige Horton-model. Derimod er der meget forskel på den modificerede Green & Ampt-model ift. den oprindelige. For både Horton og Green & Ampt gælder der, at infiltrationskapaciteten falder hurtigere, desto højere regnintensiteten er. Det er også tilfældet her og tydeligt gengivet for Green & Ampt. For Green & Ampt vil infiltrationskapaciteten have et højere udgangspunkt, desto lavere regnintensiteten er. Det er besynderligt, da jordens infiltrationskapacitet umiddelbart altid vil have det samme udgangspunkt, uanset størrelsen af regnintensiteten. Hvor hurtigt jorden derefter mister kapaciteten, er netop styret af regnintensiteten samt de jordfysiske parametre. Men for Horton er udgangspunktet defineret med den initiale infiltrationskapacitet, f_0 . I Green & Ampt er der ikke en lignende parameter, der bestemmer udgangspunktet, som f_0 gør. Det gør, at infiltrationskapaciteten i Green & Ampt kan blive overestimeret.

Så snart den mættede hydrauliske ledningsevne, K_s , bliver mindre end regnintensiteten, er det som om at der stabiliseres et udgangspunkt af infiltrationskapaciteten ved brug af Green & Ampt. Det er tydeligt gengivet på figur 1.5(b), hvor regnintensiteten er på $24,33 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$. For alle jordtyper, er udgangspunktet for infiltrationskapaciteten ved brug af Green & Ampt langt lavere ved en højere regnintensitet ift. en lavere regnintensitet.

For sand er der ikke afstrømning for både Horton og Green & Ampt ved en et-årig gentagelsesperiode. Det skyldes udelukkende den lavere regnintensitet ift. den initiale infiltrationskapacitet, f_0 , i Horton og den mættede hydrauliske ledningsevne, K_s , i Green & Ampt. Jo højere regnintensiteten er, desto mere vil overfladeafstrømning blive fremskyndet. Selvom det ikke kan observeres på figur 1.5(a), vil infiltrationskapaciteten med tiden blive lavere end regnintensiteten for sand ved brug af Hortons infiltrationsmodel. Hermed vil der forekomme overfladeafstrømning, fordi den endelige infiltrationskapacitet, f_c , er lavere end regnintensiteten.



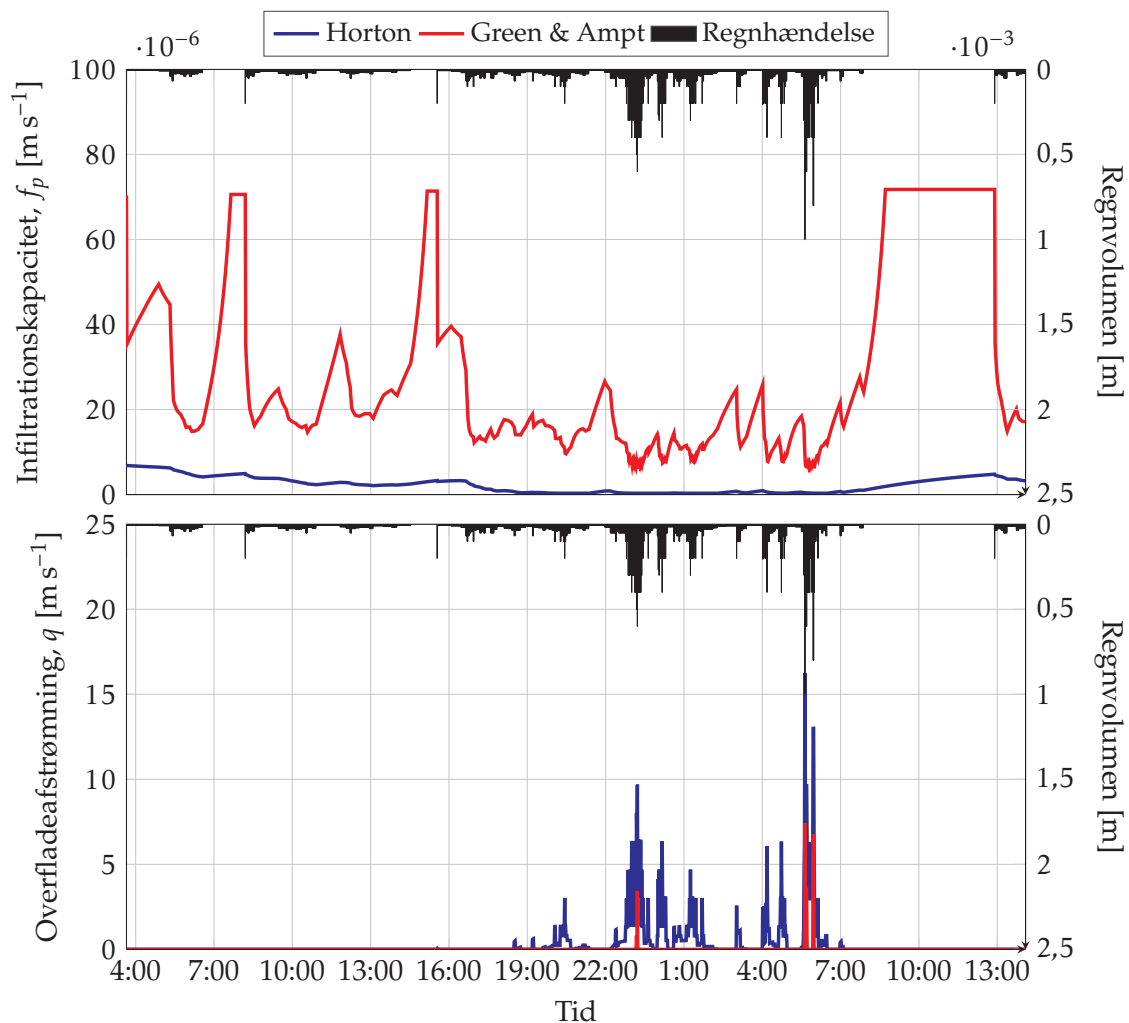
Figur 1.5: Sammenligning af potentiel infiltration, f_p , og afstrømning, q , ved brug af de to infiltrationsmodeller for en konstant 10-minutters regnintensitet.

Som figur 1.5(a) viser for silt, betyder den hurtigt-faldende infiltrationskapacitet ved brug af Green & Ampt, at overfladeafstrømningen opstår hurtigere end ved brug af Horton, på trods af, at udgangspunktet for infiltrationskapaciteten i Green & Ampt er langt højere. For selvom infiltrationskapaciteten for Green & Ampt givetvis overestimeres i starten, afhængig af regnintensiteten, flader den efterhånden ud og bliver mere konstant end Hortons. Dermed vil overfladeafstrømningen blive omtrentligt det samme og ske på omkring samme tidspunkt i begge modellers tilfælde. Den primære årsag til at infiltrationsforløbet, ved brug af de to infiltrationsmodeller, med tiden er stort set identiske er pga. den store lighed mellem den endelige infiltrationskapacitet, f_c , i Horton, og den hydrauliske ledningsevne, K_s , i Green & Ampt.

1.2.3 Sammenligning af regnhændelse med varierende regnintensitet samt gendannelse

Det er relevant at undersøge hvordan infiltrationskapaciteten forløber under en regnhændelse med varierende regnintensitet. Særligt i de tilfælde hvor regnen ophører, som dermed gør at jorden gendanner kapaciteten. De modificerede infiltrationsmodeller anvendes i dette tilfælde, som er formel (1.3) samt (1.5) for Horton, og formel (1.6) samt (1.9) og (1.10) for Green & Ampt.

Der tages udgangspunkt i ekstremhændelsen, hvis periode er vist i tabel 1.4 på side 16. I denne periode faldt der 55,6 mm regn. Før denne ekstremhændelse var der en række mindre hændelser, hvor der samlet faldt omkring 10 mm. Disse mindre hændelser er også medtaget i denne undersøgelse. Før de omtalte hændelser fandt sted, havde der ikke regnet siden d. 7. juli, som var en lille regnhændelse med en volumen på mindre end 1 mm. Derfor kan det antages, at jorden er forholdsvis tør med en infiltrationskapacitet, der ikke er faldet. Figur 1.6 viser hændelsens forløb d. 13.-14. juli for jordtypen ler for både infiltrationskapaciteten, f_p , og overfladeafstrømningen, q .



Figur 1.6: Infiltrationens tidsforløb med varierende regnintensitet. Forløbet tager udgangspunkt i en ekstrem regnhændelse, der fandt sted d. 13.-14. juli 2014.

Som vist på figur 1.6 er infiltrationskapaciteten meget forskellig for de to modeller. Green & Ampt er meget svingende, mens Horton er mere jævn. Specielt er Green & Ampt meget svingende under ekstremhændelsen, der finder sted fra omkring kl. 16:00 d. 13. juli til ca. kl. 8:00 d. 14. juli. Svingningerne skyldes den varierende regn, hvor infiltrationskapaciteten for Green & Ampt endda kan gendannes ved lave regnintensiteter. Dette gør sig i mindre grad gældende med infiltrationskapaciteten for Horton.

Den lavere overfladeafstrømning for Green & Ampt er et resultat af den høje infiltrationskapacitet. Det modsatte gør sig gældende for Horton.

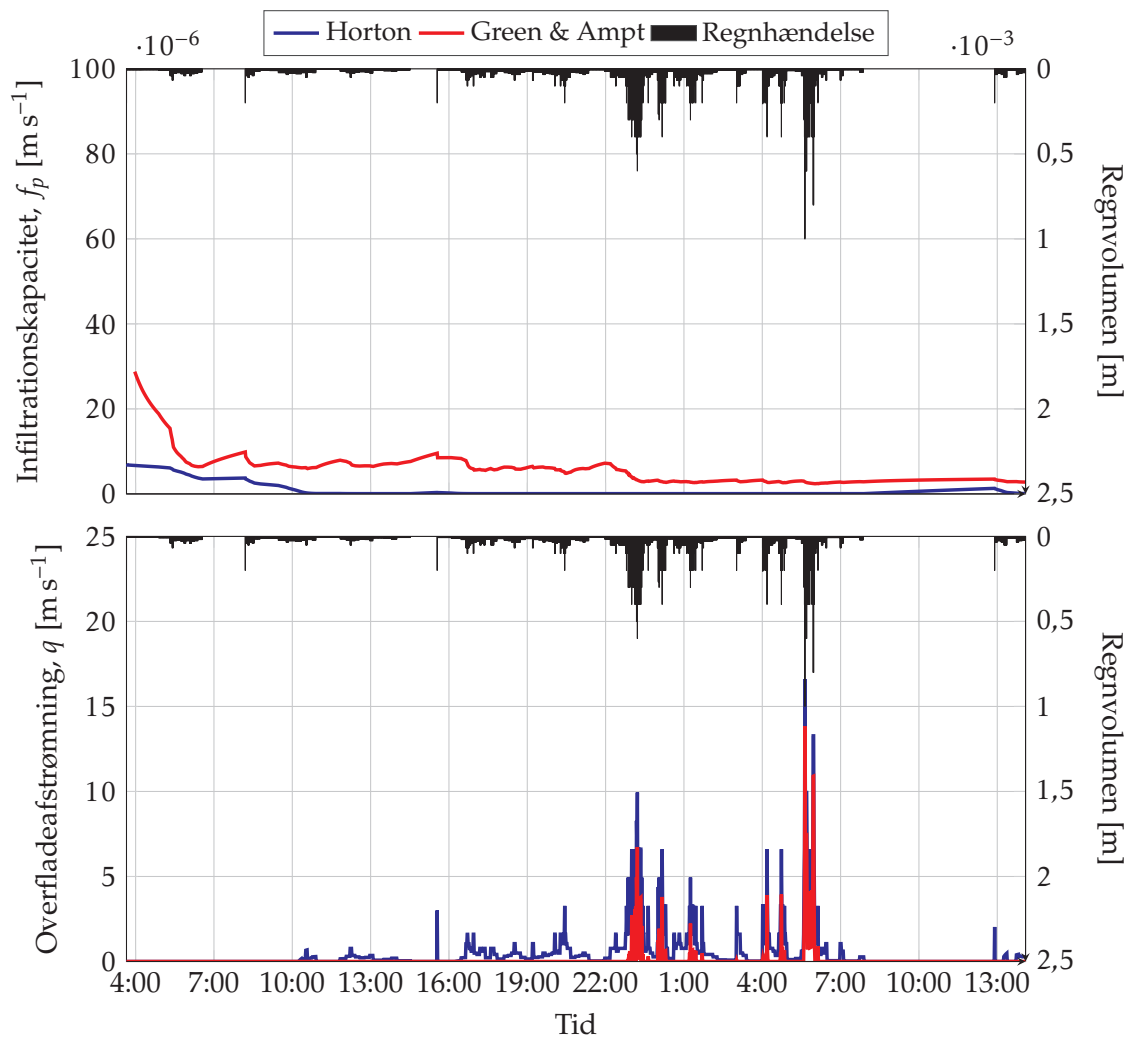
Gendannelsesprocessen af infiltrationskapaciteten er styret af hvor hurtigt jorden dræner og er dermed afhængig af de jordfysiske parametre, beskrevet tidligere for de to modeller. Begge modeller gendanner sig ved små regnintensiteter. Hortons model er langsommere til at gendanne sig ift. Green & Ampt, både under regn og tørvejr. I de tre tørperioder der finder sted, hhv. ca. kl. 6 og 15 d. 13. juli samt ca. kl. 8 d. 14. juli, stiger Hortons model meget lidt ift. Green & Ampt, der nærmest er gendannet inden for en time. Hortons model når næsten at blive fuldt gendannet før en ny regnhændelse finder sted.

Taget den normale dræntid i betragtning, som er ca. 2-3 dage ifølge [Brouwer \[1985\]](#), må det vurderes at Hortons model er den mest repræsentative ift. gendannelsesprocessen. Dermed betyder det ikke, at Green & Ampt ikke kan bruges. I artiklen, publiceret af [Shao og Baumgartl \[2016\]](#), blev det fremvist at den modificerede Horton-model blev overestimeret, sammenlignet med de andre undersøgte infiltrationsmodeller, som er Green & Ampt og Holtan. For at imødekomme dette problem med overestimation, blev der introduceret en reduktionskoefficient, β , til beskrivelse af drænraten, $d(t)$. Denne reduktionskoefficient varierer mellem 0 og 1, hvor der i artiklen blev valgt den mest optimale værdi på 0,2. Denne værdi er efterfølgende tilføjet til Horton-modellen. Således vil en reduktionskoefficient blive tilføjet til beskrivelse af drænraten i formel (1.4).

Det er drænraten, der får infiltrationskapaciteten i Green & Ampt til at gendannes hurtigere end Horton. Baseret på sammenligningen for en konstant regnintensitet i forrige afsnit er det vurderet, at Green & Ampt også bliver overestimeret i dette tilfælde. Derfor tilføjes reduktionskoefficienten, β , til beskrivelse af drænraten, $d(t)$, også i Green & Ampt. Forløbet af infiltrationskapaciteten i Green & Ampt vil dermed blive mere jævn under gendannelsesprocessen. Reduktionskoefficienten for Green-Ampt er blevet tilpasset en værdi, således infiltrationskapaciteten for Green & Ampt stemmer mere overens med infiltrationskapaciteten for Horton. Kalibreringsprocessen tager udgangspunkt i gradientens størrelse under tørperioder, ved at holde infiltrationskapaciteten for Green & Ampt op imod Horton. Nærmer gradienten af infiltrationskapaciteten for Green & Ampt sig en størrelse, der svarer til Horton, opnås en værdi af reduktionskoefficienten, β , for Green Ampt. Til kalibreringsprocessen, er der allerede tilføjet en reduktionskoefficient for Hortons model, på $\beta = 0,2$. Kalibreringsprocessen er udført for jordtypen ler ved de 20 største hændelser, baseret på volumen. Således er der tilpasset en reduktionskoefficient på $\beta = 0,05$ for Green & Ampt, til beskrivelse af drænraten i formel (1.12).

Kalibreringsprocessen af reduktionskoefficienten, β , er fremvist i bilag A.4 med dertilhørende elektroniske bilag D.2.3. Desuden er resultaterne for sand og silt med og uden reduktionskoefficient vist sidst i bilaget med dertilhørende elektroniske bilag D.2.2.

Ved at tilføje reduktionskoefficienten for begge modeller, opnås resultatet vist på figur 1.7.



Figur 1.7: Infiltrationens tidsforløb under selv samme hændelse, som vist på figur 1.6 på side 20. Infiltrationen er nu blevet justeret med en reduktionsfaktor i begge modeller, således at infiltrationskapaciteten bliver mindre overestimeret.

Figur 1.7 indikerer, at infiltrationsforløbet ved brug af de to modeller, stemmer bedre overens ved tilføjelse af reduktionskoefficienten. Green & Ampt vil stadigvæk blive overestimeret lidt i starten, hvor Horton har den initiale infiltrationskapacitet som udgangspunkt. Desuden er det tydeligt, at den mættede hydrauliske ledningsevne, K_s , er den styrende parameter i Green & Ampt, da infiltrationskapaciteten altid forbliver over denne værdi, som i dette tilfælde er på $0,306 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ for ler. Selv ved den største regnintensitet omkring kl. 6 d. 14. juli, falder infiltrationskapaciteten ikke meget længere ned end den i forvejen er. Der er også kommet mere overfladeafstrømning for Green & Ampt, der dog ikke helt matcher overfladeafstrømningen for Horton. Det er igen et resultat af, at infiltrationskapaciteten for Green & Ampt er en smule højere end Hortons.

Gendannelsen af infiltrationskapaciteten for begge modeller stiger mere ensartet, sammenlignet i tilfældet uden reduktionskoefficient. Green & Ampt stiger dog stadig lidt ved lavere regnintensiteter, mens en ubetydelig effekt kan observeres for Horton. Denne metode, ved at få gendannelsen for Green & Ampt til at ligne gendannelsen for Horton mere, er muligvis en grov antagelse. Ikke desto mindre, vil gendannelsensprocessen nu svare bedre til det givne estimat ift. hvor hurtigt jorden dræner [Brouwer, 1985]. Sidst i bilag A.4 er resultaterne fremvist for sand og silt med og uden reduktionskoefficient. Der er især en tydelig overestimering for sand ved brug af Green & Ampt, hvor der for det meste af tiden er en faktor 10 til forskel, med eller uden reduktionskoefficient.

Massebalancen for de to infiltrationsmodeller, med og uden reduktion, er vist i tabel 1.5 for hele hændelsen.

Tabel 1.5: Massebalancer ved brug af Horton og Green & Ampt. En større afstrømningsvolumen kan observeres ved brug af reduktionskoefficient, β .

Jordtype	Uden reduktion		Med reduktion	
	Infiltration	Afstrømning	Infiltration	Afstrømning
<i>Horton</i>				
Sand	66,94	0	64,35	2,59
Silt	65,58	1,356	41,80	25,13
Ler	30,11	36,83	12,11	54,83
<i>Green & Ampt</i>				
Sand	66,94	0	66,94	0
Silt	66,94	0	66,04	0,895
Ler	64,64	2,30	55,54	11,4

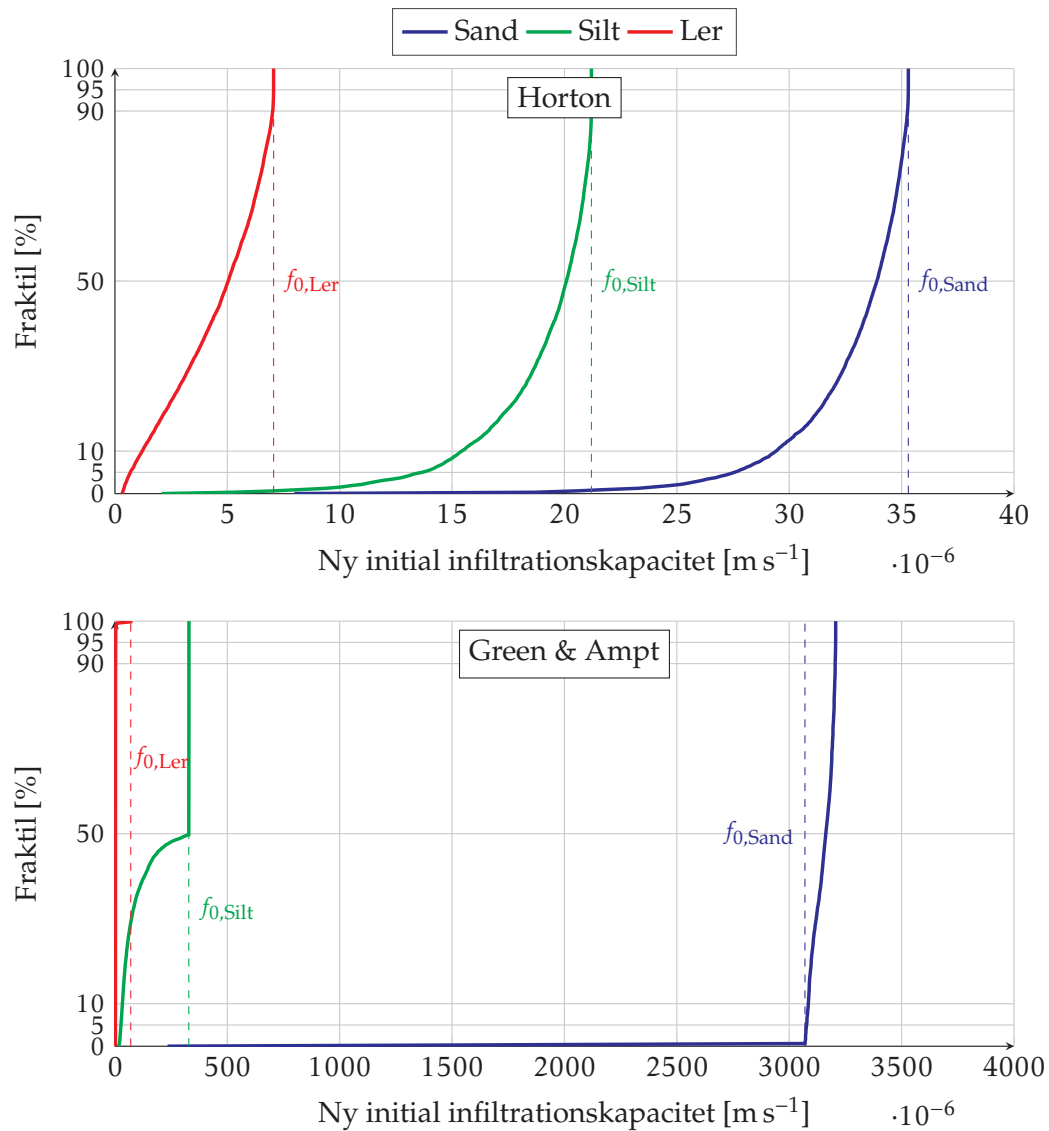
Alle værdier er i enheden 10^{-3} m.

Regnvolumen, der er faldet under hændelsen, er på $66,94 \cdot 10^{-3}$ m.

Som det også fremgår af figurerne, er den lavere infiltrationskapacitet for Horton årsag til at en langt større del giver anledning til afstrømning, vist i tabel 1.5, sammenlignet med Green & Ampt. For Green & Ampt er forskellen mindre, hvilket generelt skyldes, at infiltrationskapaciteten for alle jordtyper er lidt højere end ved Horton.

1.3 Startbetingelser for infiltrationsforløbet

For de to infiltrationsmodeller, starter infiltrationen som regel fra et udgangspunkt. Dvs. at i begyndelsen, er jorden antaget at være fuldstændig tør. I Hortons infiltrationsmodel, defineres dette udgangspunkt, med parameteren f_0 . Selvom der ikke er noget udgangspunkt i Green & Ampt, vil den potentielle infiltrationskapacitet alligevel have et udgangspunkt, selvom dette kan blive stort.



Figur 1.9: Empirisk fordeling af den initiale infiltrationskapacitet for sand, silt og ler. Fordelingen er ift. standardværdierne, angivet i tabel 1.1 for Horton og 1.3 for Green & Ampt.

Ligeledes vil en initial værdi af infiltrationskapaciteten være ubetydelig for ler ved brug af Green & Ampt. Men for ler er overestimering ikke en problematik. Tværtimod vil infiltrationskapaciteten aldrig blive gendannet til den initiale værdi. Derfor er det meningsløst at fastsætte denne parameter i lerets tilfælde, da infiltrationskapaciteten i mindst 99% af hændelserne ikke vil opnå den initiale værdi.

Jordtypen silt er den eneste jordtype, hvor det vil give mening at fastsætte en initial værdi på baggrund af den første værdi af regnintensiteten. Ved halvdelen af regnhændelserne, vil infiltrationskapaciteten gendannes til den initiale værdi, mens den anden halvdel ikke formår at gøre det.

1.3.1 Overskridelse af infiltrationskapaciteten

I en enkelt regnhændelse, kan infiltrationskapaciteten blive overskredet flere gange, vist på figur 1.8 på side 24. Tabel 1.6 viser den procentvise andel af antal overskridelser for Viby regnserien, hvor regnintensiteten er større end infiltrationskapaciteten.

Tabel 1.6: Procentandel af overskridelser ift. Viby regnseriens totale længde, fordelt på jordtype og infiltrationsmodel.

Jordtype	Horton			Green & Ampt		
	Standardværdi ^a	Min ^a	Maks ^a	Standardværdi ^b	Min ^b	Maks ^b
Sand	0,01	0,60	0	0	0,01	0
Silt	0,56	45	0,06	0,05	12,41	0
Ler	28,22	92,74	4,13	2,91	34,70	0,15

Værdierne angiver den procentvise andel [%] af overskridelser. Regnserien for Viby har målte regnintensiteter for 734 661 min. Eksempelvis vil infiltrationskapaciteten, ved minimumsværdien for ler, ved brug af Hortons infiltrationsmodel, overskride 330 619 min, hvormed den procentvise andel vil være på 45%.

^a Repræsenterer antallet, svarende til parameterværdierne, angivet i tabel 1.1.

^b Repræsenterer antallet, svarende til parameterværdierne, angivet i tabel 1.3.

Som vist i tabel 1.6, er der for nogle værdier, ikke observeret overskridelser af infiltrationskapaciteten. Det sker for maks-værdien i Hortons tilfælde, og for både standard- og maks-værdien i Green & Ampts tilfælde. I Hortons tilfælde, skyldes det, at værdierne for initiale og endelige infiltrationskapacitet, f_0 og f_c , har en højere værdi, hvormed der skal en regnintensitet til for at kunne overskride disse værdier. I Green & Ampts tilfælde, skyldes det den mættede hydrauliske ledningsevne, K_s , som er den dominerende parameter ift. hvor infiltrationskapaciteten har minimumsgrænsen. En lavere værdi af denne parameter, vil øge risikoen for, at regnintensiteten overskrider infiltrationskapaciteten. Ved en værdi der er langt højere end regnintensiteten, vil selv den kraftigste regn have svært ved at danne overfladeafstrømning.

1.4 Vurdering af infiltrationsmodel

Gennem dette kapitel er der blevet introduceret to forskellige infiltrationsmodeller, Horton og Green & Ampt. Horton er mere empirisk præget, hvor Green & Ampt er styret på fysiske parametre. Begge har sine fordele og ulemper. Fordelen ved Horton er de relative simple parametre, som kort fortæller om hvor infiltrationen starter (f_0) og slutter (f_c), samtidig hvor hurtigt det skal gå (k). Dermed er ulempen så, at en matematisk bestemmelse af disse parametre ikke er helt ligetil. Samtidig er der et mindre bredt udvalg af litteraturværdier.

Fordelen ved Green & Ampt er den simple tilgang til udregning af infiltrationskapaciteten, så længe jordfysiske data er tilgængeligt. Det er bare ikke altid, at de er tilgængelige. Til gengæld er der et bredere udvalg af litteraturværdier, da parametrene i Green & Ampt kan anvendes til andre formål end til beregning af infiltrationen. For ud fra infiltrationsforløbet for Green & Ampt, kan der bestemmes parametre for Hortons infiltrationsmodel, f.eks. vha. kurvetilpasningsværktøj. Dog skal de generede parametre vurderes, idet Green & Ampt kan blive overestimeret i starten. Dermed kan fås en for høj og usandsynlig værdi af den initiale infiltrationskapacitet, f_0 , i Hortons model.

På trods af de initiale usikkerheder for Green & Ampt i starten, bliver forløbet omtrent det samme som tiden går, såfremt at f_c og K_s ligner hinanden. Dermed bliver størrelsen af afstrømningsbidraget også det samme for en regnhændelse med konstant regnintensitet, jf. afsnit 1.2.2.

Under en regnhændelse med varierende regnintensitet, har Green & Ampt igen en tendens til at blive overestimeret, hvor det i mindre grad var tilfældet med Horton. Ved at tilføje en reduktionskoefficient til Green & Ampt infiltrationsmodellen blev infiltrationsforløbet mindre overestimeret. Gendannelsesprocessen blev også mere repræsentativ ift. tiden det tager at dræne en mættet jord [Brouwer, 1985]. Reduktionskoefficienten vurderes at være en acceptabel løsning. Dette er på trods af, at fremgangsmåden for at bestemme størrelsen af reduktionskoefficienten til Green & Ampt er baseret på grove antagelser og ikke rigtig valideret. Den eneste valideringsmetode var efterfølgende at sammenligne infiltrationskapaciteten for Green & Ampt med infiltrationskapaciteten for Horton, der efterfølgende ligner mere hinanden.

Selvom overestimeringen er mest kraftig for de mere permeable jordtyper i Green & Ampt, vil det ikke have nogen betydning, hvis der også vælges en initial værdi for Green & Ampt, som der gøres i Horton med f_0 . En initial værdi vil have langt større betydning i Hortons infiltrationsmodel, idet alle tre jordtyper tegner et ensartet billede. For alle tre jordtyper, vil infiltrationskapaciteten gendannes mod den initiale værdi.

På baggrund af de to infiltrationsmodeller, præsenteret i dette kapitel, er det vurderet at Horton gengiver det mest sandfærdige billede af infiltrationskapaciteten. Dette er selvfølgelig forbeholdt, hvis der ønskes at estimere infiltrationskapaciteten. Dog er overfladeafstrømningen af større betydning i dette tilfælde, hvorfor det næste kapitel belyser hvad infiltrationen betyder for overfladeafstrømningen.

Infiltrationens betydning for overfladeafstrømning

På baggrund af det foregående kapitel, er der i dette kapitel undersøgt hvilken betydning infiltrationen har for overfladeafstrømning ift. hvilken infiltrationsmodel, der anvendes. Dette er bl.a. blive gjort ved at opgøre hvor meget af regnvandet, der infiltrerer og hvor meget der afstrømmer ud fra jordtype og infiltrationsmodel. Derudover er der undersøgt hvad hver enkelt parameter i de to infiltrationsmodeller har af indflydelse på afstrømningsvolumen. Endeligt er regnhændelser blive karakteriseret ift. hvor meget af regnvandet, der afstrømmer. Da det ikke er alle hændelser, der danner afstrømning, hvilket også er afhængig af jordtypen og infiltrationsmodellen, kan der dannes et overblik over hvor meget af regnvandet, der afstrømmer som funktion af en given parameter, såsom gentagelsesperiode og regnvarighed.

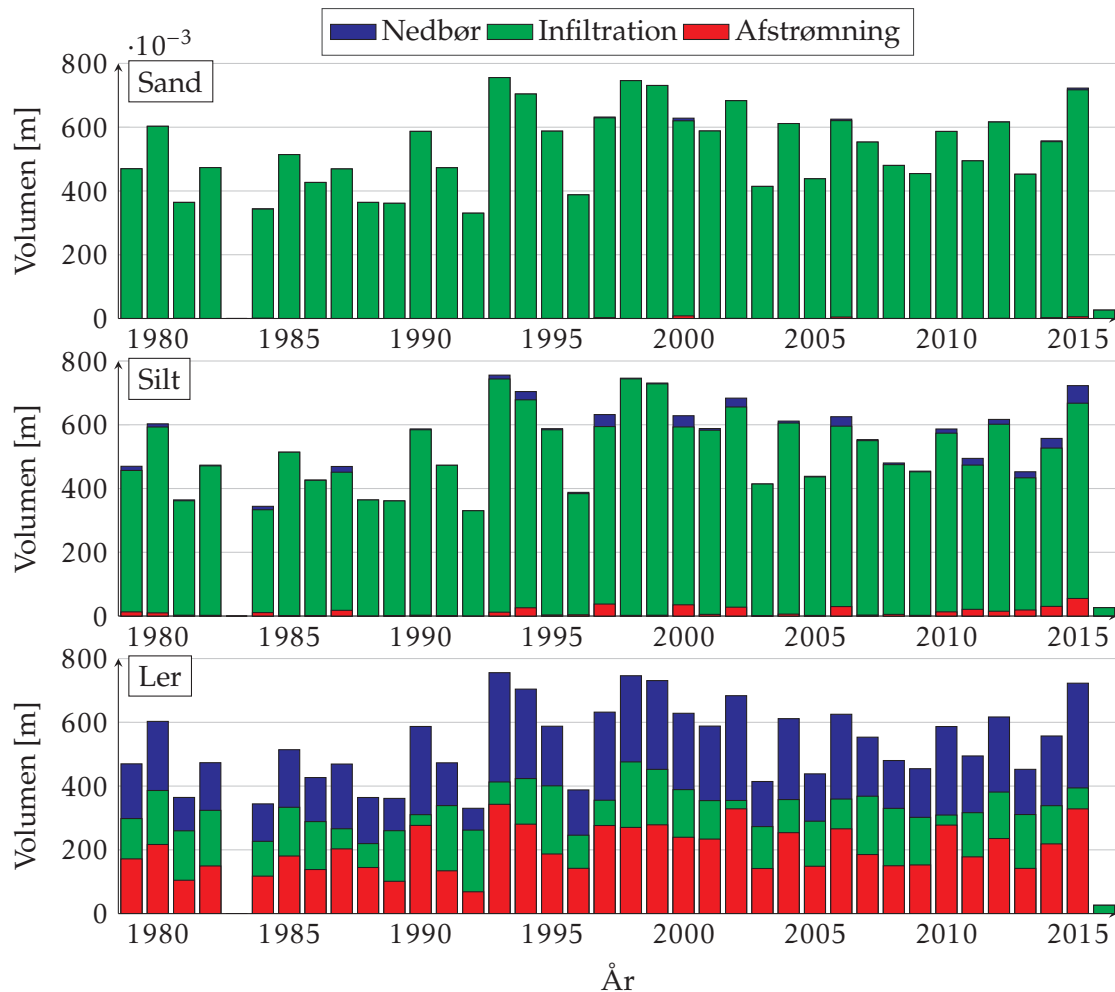
2.1 Opgørelse af infiltreret og afstrømmet volumen

En massebalance giver et godt overblik over hvor meget af den årlige nedbør, der infiltrerer og hvor meget der afstrømmer. Disse massebalancer kan udfærdiges ved hjælp af de anvendte infiltrationsmodeller. Massebalancen kan derfor opstilles på følgende form:

$$\text{Nedbør} = \text{Infiltration} + \text{Afstrømning}$$

For Viby regnserien, kan massebalancen opstilles gennem årene fra 1979 til 2016. Disse massebalancer er, for de tre jordtypers standardværdier, vist på figur 2.1 på den følgende side og 2.2 på side 31 ved brug af hhv. Horton og Green & Ampt.

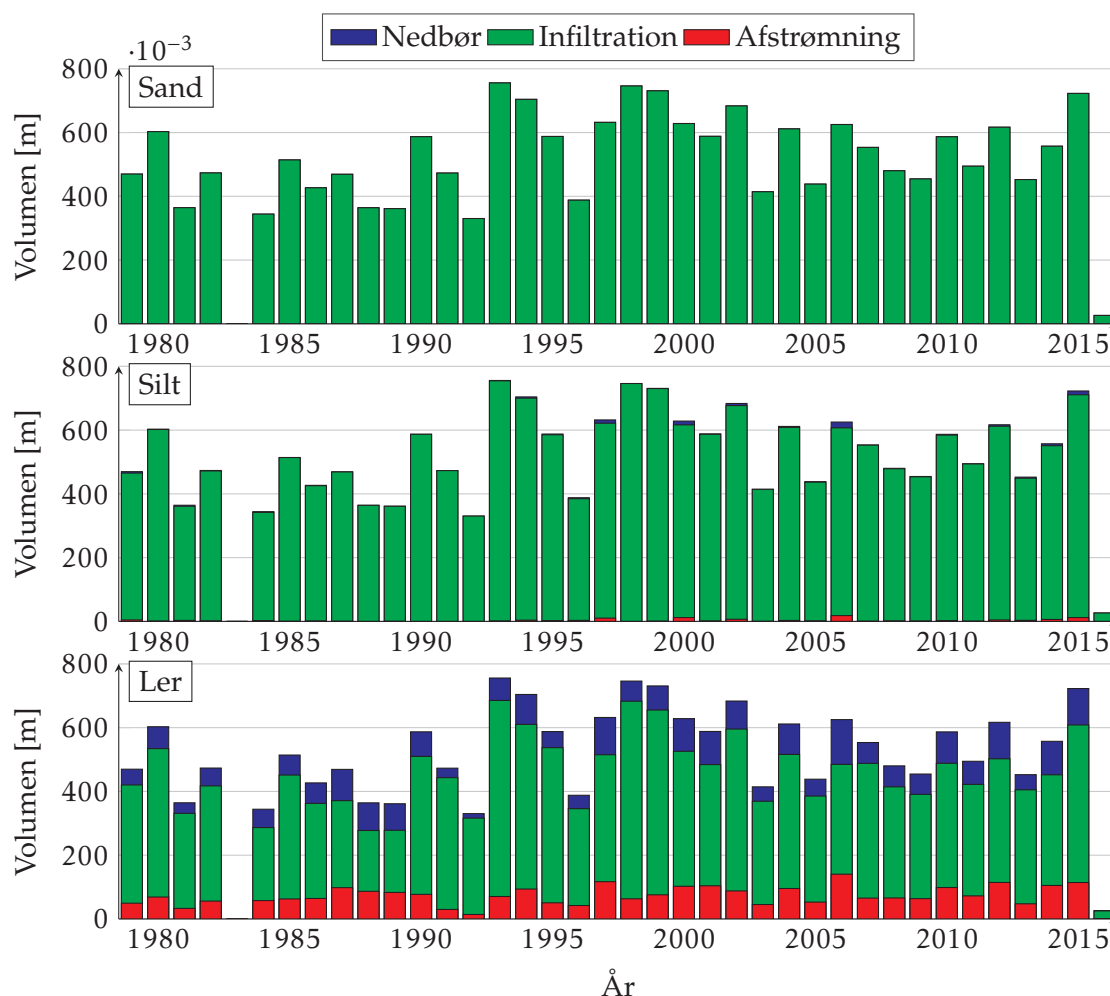
*Massebalancerne
kan gengives i det
elektroniske bilag
[D.3.1.](#)*



Figur 2.1: Fordelingen af regnvolumen fra 1979-2016 ved brug af Hortons infiltrationsmodel med de tre jordtypers standardværdier. 1992 var året med mindst nedbør, hvor der faldt 330 mm. Ud af dem, infiltrerede 262 mm for ler, mens hele mængden infiltrerede for sand og silt. Resten af regnmængden er et afstrømningsvolumen med en værdi på 68 mm for ler og ingenting for sand eller silt.

For jordtypen sand sker der ikke meget afstrømning i løbet af året ved brug af begge infiltrationsmodeller. Ved brug af Green & Ampt er infiltrationskapaciteten lidt højere end Horton for silt, hvorfor der er mere, der infiltrerer ved brug af Green & Ampt. Tabel 2.1 på modstående side viser en samlet oversigt over den gennemsnitlige mængde, der nedsiver og afstrømmer ud af nedbøren, fordelt på jordtype og infiltrationsmodel.

Den gennemsnitlige årlige nedbør fra 1961-1990 er ifølge [Klimatilpasning \[2015\]](#) mellem 650-700 mm for området, hvor Viby er placeret. Sammenlignes dette med nedbøren i tabel 2.1 er der en væsentlig forskel på over 100 mm. På trods af dette, afspejler gennemsnitsværdierne for infiltration og afstrømning hvad figur 2.1 og 2.2 viser. Jo mere lavpermeabelt, desto mere regnvand vil infiltrere. Mere regnvand vil infiltrere ved brug af Green & Ampt, idet infiltrationskapaciteten er højere. Ved brug af både Horton og Green & Ampt er det vist, at der ikke vil være den store risiko for afstrømning for sand.



Figur 2.2: Fordelingen af regnvolumen fra 1979-2016 ved brug af Green & Ampts infiltrationsmodel med de tre jordtypers standardværdier. 1992 var året med mindst nedbør, hvor der faldt 330 mm. Ud af dem, infiltrerede 316 mm for ler, mens hele mængden infiltrerede for sand og silt. Resten af regnmængden er et afstrømningsvolumen med en værdi på 14 mm for ler og ingenting for sand eller silt.

Tabel 2.1: Middelværdier af infiltration og afstrømning gennem årene fra 1979-2016, målt i Viby regnserien.

Jordtype	Nedbør	Horton		Green & Ampt	
		Infiltration	Afstrømning	Infiltration	Afstrømning
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

Alle værdier er i enheden 10^{-3} m

Middelværdierne er eksklusiv årene 1983 og 2016 pga. der ikke er målt tilstrækkelig nedbør i disse år.

2.2 Parametrenes indflydelse på afstrømningsvolumen

Dette afsnit beskriver hvilke parametre der er de mest sensitive ift. en ændring af resultatet for afstrømningsvolumen, V , beskrevet med formel (1.1). Den relative sensitivitet for en parameter, PAR , ved at ændre den indenfor intervallet, er givet ved [McCuen, 1973; Hoyos og Cavalcante, 2015]:

$$S_r = \frac{\overline{PAR} \Delta VAR}{VAR \Delta PAR} \quad (2.1)$$

hvor

S_r	Relativ sensitivitet
$\overline{PAR}$	Standardværdi for parameter
VAR	Afhængige variabel med standardværdi for parameter
ΔVAR	Variabelændring
ΔPAR	Parameterændring

Der er anvendt de parametre, der beskriver infiltrationsprocessen med enten Horton eller Green & Ampt. Der dertilhørende standard- og intervalværdier er vist i hhv. tabel 1.1 for Horton og tabel 1.3 for Green & Ampt. Standardværdierne repræsenterer PAR , mens resultatet ved brug af standardværdierne er VAR . Ændringen af parametrene (ΔPAR) sker ift. den nedre eller øvre værdi ved intervalværdierne. Det vil resultere en ændring i resultatet (ΔVAR).

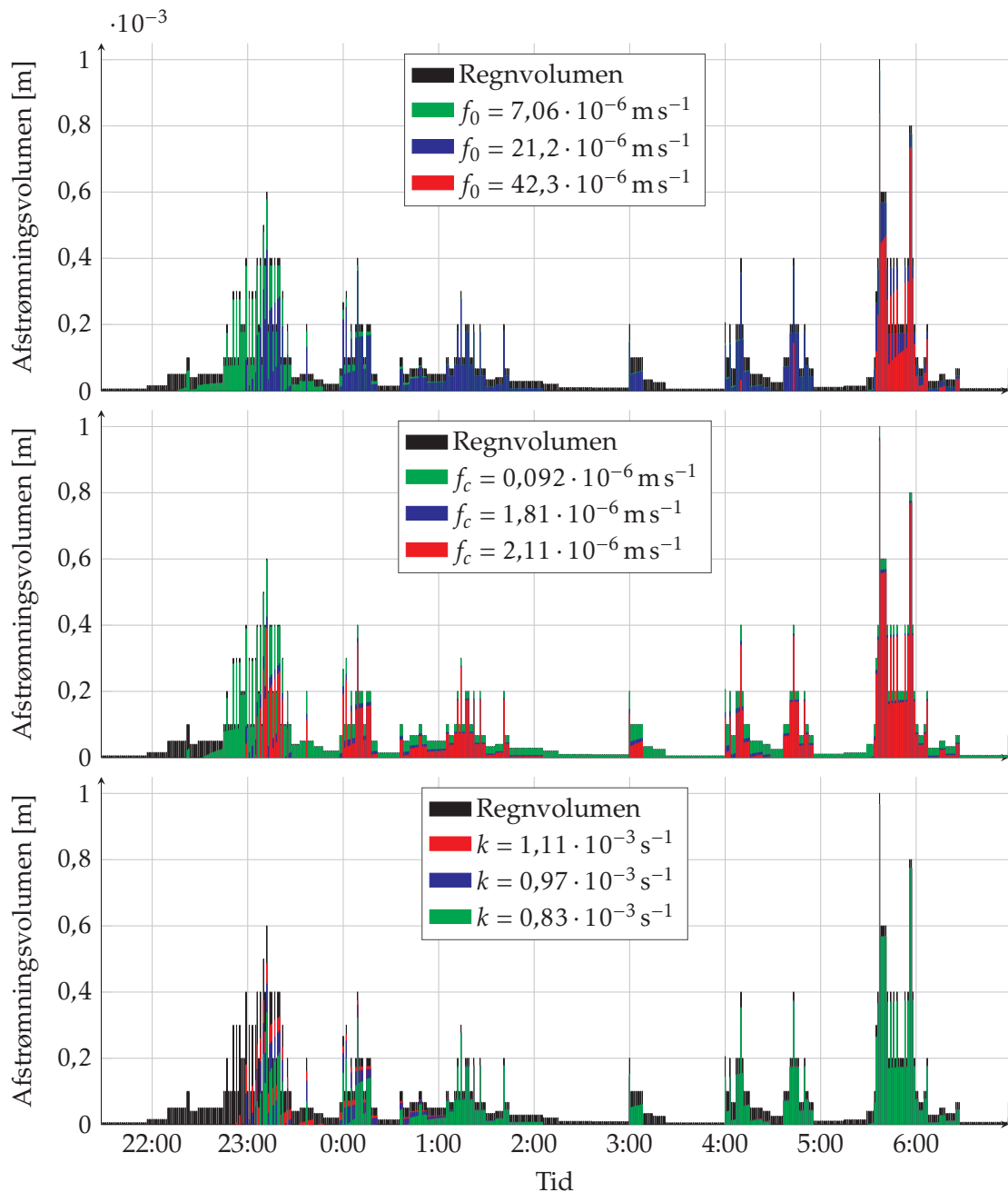
Til beskrivelse af parametrenes sensitivitet, er der taget udgangspunkt i en periode, hvor en ekstremhændelse fandt sted d. 13.-14. juli 2014, vist i tabel 1.4 på side 16. Det er den samme periode, som beskrevet i afsnit 1.2.3 og hvor infiltrationskapaciteten for de to modeller kan relateres til det følgende. Der er medtaget to foregående regnhændelser før selve ekstremhændelsen samt en regnhændelse efter ekstremhændelsen.

For den valgte periode, bliver sensitiviteten for en parameter udført ift. den summerede afstrømningsvolumen for hele hændelsen. Dermed er variabelændringen, VAR , i formel (2.1) ikke afstrømningsvolumen til hvert tidspunkt, men den summerede afstrømningsvolumen for hele perioden.

For de to infiltrationsmodeller, er gendannelsesprocessen medtaget, hvilket gør at afstrømningsvolumen er mere nøjagtig.

2.2.1 Hortons parametre

Sensitivitetsanalysen for Horton er udført for de tre parametre, f_0 , f_c og k med dertilhørende standardværdier og intervaller, angivet i tabel 1.1 på side 9. Figur 2.3 på næste side viser resultatet af en ændret afstrømningsvolumen, som følge af parameterændring for silt. Figuren viser et forløb under ekstremhændelsen, hvor store regnintensiteter fandt sted, og hvor tidspunkter med mindre regnintensiteter er udeladt i figuren. Dog er den relative sensitivitet udregnet for hele perioden og ikke blot den viste ekstremhændelse.



Figur 2.3: Variabelændring af afstrømningsvolumen ved ændring af Hortons parametre for silt.

Som vist på figur 2.3 er parameterværdien, der giver anledning til størst afstrømning, vist først i signaturforklaringen. Dermed er parameterværdien, markeret med blå, standardparameteren. Parameterværdien markeret med grøn og rød er hhv. den nedre og øvre værdi af parameterintervallet.

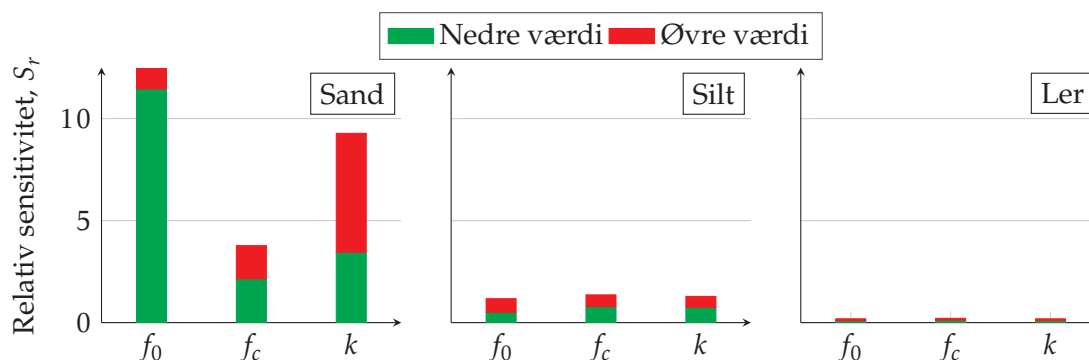
En lavere værdi af den initiale såvel som den endelige infiltrationskapacitet, f_0 og f_c , vil forårsage en større afstrømning end de højere værdier. Det skyldes udelukkende at regnintensiteten i perioder kan blive større end disse parametre, hvorfor højere værdier er fordelagtigt for at undgå overfladeafstrømning. Ved store regnintensiteter, , såsom fra kl. ca. 5.30-6.30, vil afstrømningsvolumen være næsten lige så stort for alle parameterværdier.

Det omvendte gælder for henfaldskonstanten, k , der vil forårsage større afstrømning ved højere værdier. Det skyldes udelukkende, at henfaldskonstanten bestemmer hvor hurtigt infiltrationskapaciteten nedbrydes. Jo højere denne værdi er, desto hurtigere går det.

En anden nævneværdig er, at de tre parametre er styret af infiltrationskapacitetens størrelse til den enkelte tid. Hændelsen omkring kl. 23 d. 13. juli tegner et andet mønster end hændelsen den følgende morgen omkring kl. 5.30 d. 14. juli. Det skyldes at infiltrationskapaciteten er højere om aftenen sammenlignet med om morgenen, da der i nattetimerne er faldet regn. Her har infiltrationskapaciteten ikke nået at blive gendannet, hvorefter en regnhændelse nedbryder kapaciteten igen. Derfor må ændring af en parameter mellem intervallet have størst indflydelse om aftenen hvor infiltrationskapaciteten er på det højeste. Ændring af en parameter om morgenen har en mindre indflydelse, idet afstrømningsvolumen stort set ikke ændres.

En lavere værdi af den initiale infiltrationskapacitet, f_0 , vil fremskynde overfladeafstrømning om aftenen sammenlignet med en høj værdi, der først viser en indflydelse den følgende morgen. Det samme billede viser sig for den endelige infiltrationskapacitet, f_c . Omvendt er det henfaldskonstanten, k , der med en højere værdi fremskynder overfladeafstrømning om aftenen, hvor den lave værdi først har indflydelse om morgenen.

Figur 2.4 viser den relative sensitivitet for de tre jordtyper ift. valget af nedre og øvre værdi indenfor parameterintervallet.



Figur 2.4: Relative sensitivitet for Hortons parametre ift. nedre og øvre værdi.

Eftersom sand er den mest permeable jordtype, vil den summerede relative sensitivitet være størst for alle parameterændringer ved denne jordtype. Den initiale infiltrationskapacitet, f_0 , bestemmer udgangspunktet. Ved at ændre til en lavere værdi, vil overfladeafstrømning fremskyndes og afstrømningsvolumen forøges. Så snart infiltrationskapaciteten overskrideres, vil f_0 ikke være nær så betydningsfuld. Efter regnintensiteten har overskredet infiltrationskapaciteten, vil det være den endelige infiltrationskapacitet, f_c , som vil blive mest betydningsfuld, da f_c er slutværdien. Efter infiltrationskapaciteten er overskredet af regnintensiteten, er f_c med til at bestemme afstrømningsvolumen i sidste ende. For jo højere værdi af f_c , desto mindre afstrømningsvolumen. For sand er en høj værdi af henfaldskonstanten mest betydningsfuld, da dette fremskynder overfladeafstrømning, sammenlignet med en lavere værdi.

For silt vil parameterændringen have en meget mindre betydning ift. sand, og ved ler er betydningen forsvindende lille. For silt er indflydelsen blandt parametrene næsten ens, hvilket også er indikeret med figur 2.3. Ændring til den øvre eller nedre værdi af parameterintervallet, angivet med farverne, er næsten vist lige mange gange. Ændring til den øvre værdi af f_0 er mest betydningsfuld for silt sammenlignet med sand. Det skyldes, at en øvre værdi for silt vil forsinke tiden før overfladeafstrømning vil forekomme, sammenlignet med en nedre værdi for sand, der vil fremskynde overfladeafstrømning.

For ler, har parametrene en meget lille indflydelse på overfladeafstrømningen, hvorfor en parameterændring ikke vil ændre meget på størrelsen af afstrømningsvolumen.

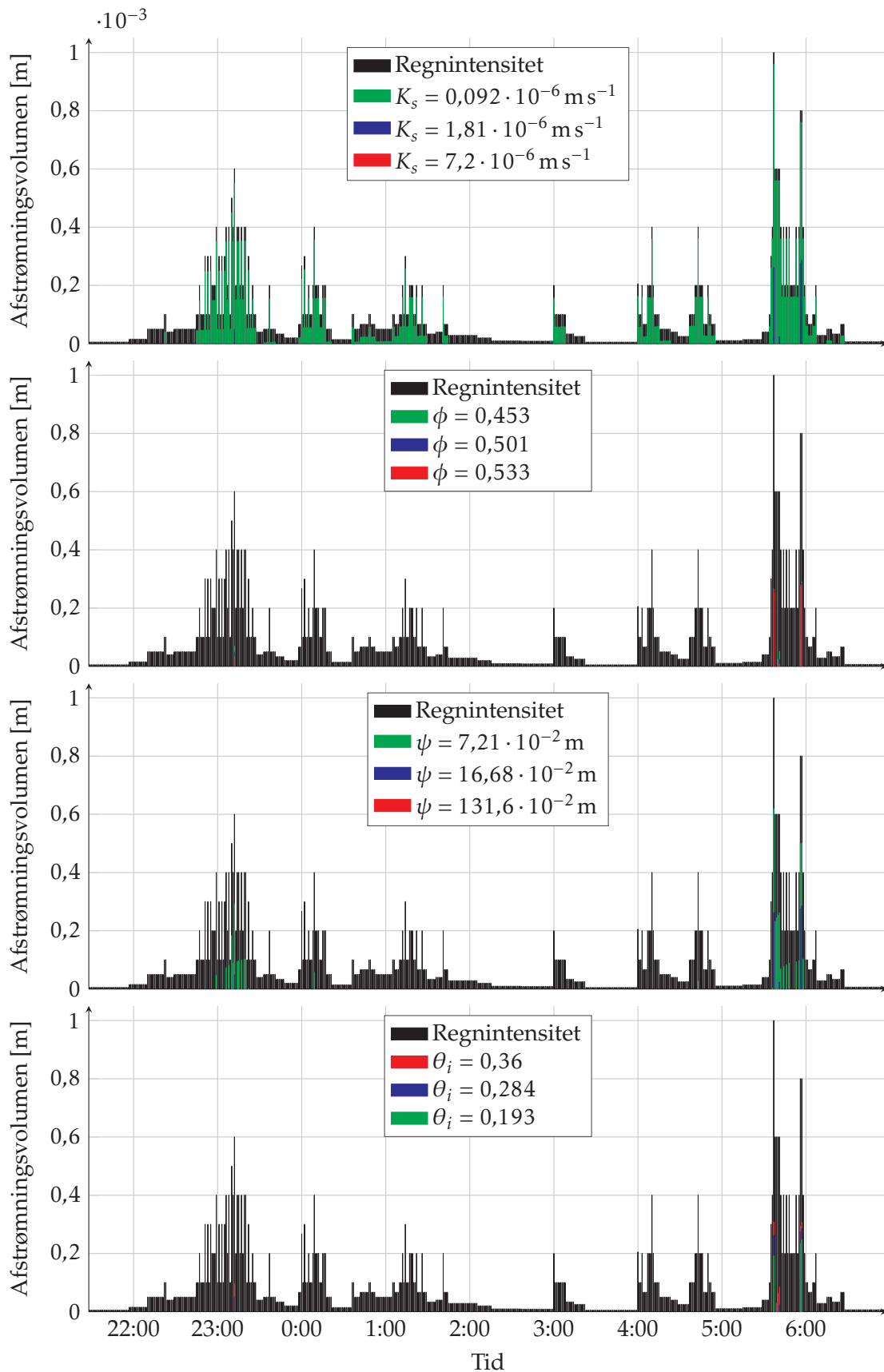
2.2.2 Green & Ampts parametre

Der er fire parametre, der er analyseret i sensitivitetsanalysen ved brug af Green & Ampt. De fire parametre er den mættede hydrauliske ledningsevne, K_s , porøsiteten, ϕ , trykpotentiale ved vådfronten, ψ , samt det initiale vandindhold, θ_i . De dertilhørende standard- og intervalværdier er angivet i tabel 1.3 på side 15. Figur 2.5 på den følgende side viser resultatet for silt, som følge af parameterændringer. Figuren viser den samme ekstremhændelse, som Horton. Og ligesom Horton, er den værdi, der giver anledning til størst afstrømningsvolumen, angivet først i signaturforklaringen.

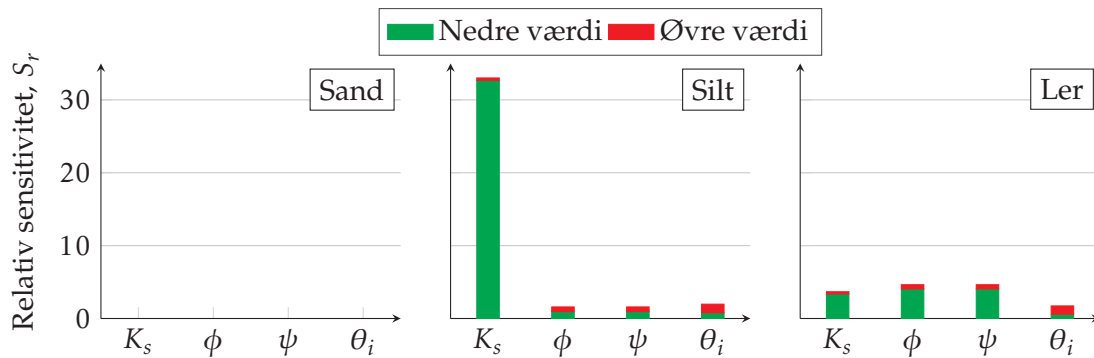
For resultatet for sand og ler, henvises til bilag A.2. Det elektroniske bilag D.3.2 gengiver resultaterne for sensitiviteten af Green & Ampts parametre.

Det er tydeligt at den mættede hydrauliske ledningsevne, K_s , er den styrende parameter ved brug af Green & Ampt. Som vist på figur 2.5, er K_s den eneste parameter, hvor en stor ændring kan observeres i afstrømningsvolumen. Ændringen til den laveste værdi af K_s , frem for den højeste, indikerer at denne parameter er den mest følsomme. For med standardværdien af K_s , vil en ændring af de andre parametre imellem intervallet ikke have den store betydning. Og hvis standardværdien for K_s slet ikke producerede et afstrømningsvolumen over perioden, ville der heller ikke være en afstrømningsvolumen ved ændring af de andre parametre. For K_s angiver hvor infiltrationskapaciteten slutter, ligesom f_c i Horton. Er regnintensiteten lavere end K_s , vil der ikke forekomme afstrømning.

Ligesom med Hortons parametre, er Green & Ampts parametre også styret af infiltrationskapacitetens størrelse til den enkelte tid. Det kan bedre observeres for ler, vist på figur A.6 i bilag A.2, men også en anelse for silt. Ved hændelsen omkring kl. 23 er der ikke faldet nær så meget regn, som ved hændelsen omkring kl. 5.30 den følgende morgen. Det indikerer en større infiltrationskapacitet om aftenen og dermed en mindre afstrømning ift. parametrene. Infiltrationskapaciteten har ikke nået at gendanne sig om morgenen, hvormed et større afstrømningsvolumen vil forekomme. Den relative sensitivitet for de fire parametre er vist på figur 2.6 på side 37.



Figur 2.5: Resultatændring af afstrømningsvolumen ved ændring af parametre for silt.



Figur 2.6: Relative sensitivitet ved ændring af Green & Ampts jordfysiske parametre.

Hvor Hortons parametre var meget sensitive for sand, er der ingen sensitivitet at observere for Green & Ampt ved sand. Det er mærkværdigt idet at den maksimale regnintensitet på ca. $17 \mu\text{s}^{-1}$ overstiger den mindste værdi af K_s , som er på $8 \mu\text{s}^{-1}$. Men for at der overhovedet kan dannes en værdi af den relative sensitivitet, kræves det, at VAR i formel (2.1) er større end 0. Med andre ord skal afstrømningsvolumen være større end 0 ved brug af standardparametrene. Og som vist med silt, er K_s den eneste parameter, der kan styre hvornår dette sker. Dvs. at standardværdien for K_s ved sand, skal have en værdi, der er af ca. samme størrelse som regnintensiteten. Standardværdien af K_s for silt er på $1,81 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$, sammenlignet med sand, hvor den er på $32,7 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$. Værdien for sand er ca. dobbelt så stor som regnintensiteten, hvormed der ikke vil forekomme overfladeafstrømning i denne regnhændelse. Og de andre parametre vil ikke kunne gøre en forskel.

Det er værd at bemærke sensitivitetsforskellen på silt og ler. For silt er den mættede hydrauliske ledningsevne, K_s , en dominerende parameter ved ændringen til den nedre værdi, sammenlignet med de andre parametre. For ler er den af mindre betydning. Det indikerer, at så snart infiltrationskapaciteten overskrides, er størrelsen af afstrømningsvolumen også styret af de andre parametre. De øvrige parametre fungerer ligesom henfaldskonstanten, k , i Hortons model. De er bestemmende for hvor hurtigt infiltrationskapaciteten nedbrydes til den endelige værdi, K_s . En lav porøsitet, ϕ , eller højt initialt vandindhold, θ_i , vil fremskynde overfladeafstrømning. Det skyldes at jorden enten ikke kan optage alt regnvandet eller fordi jorden i forvejen er mættet. På samme måde er et lavt trykpotentiale, ψ , ensbetydende med at jorden ikke har nok dybde at suge vand på, hvilket fremskynder overfladeafstrømning. Men i sidste ende er det jordens evne til at lede vand, givet ved K_s , som er den mest betydningsfulde af de fire parametre. Er regnintensiteten større end denne parameter, er jorden hurtigere til at nedbryde infiltrationskapaciteten.

2.3 Karakterisering af regnhændelser

Det er ideelt at kunne identificere typen af regn, der forårsager overfladeafstrømning. Betragtes figur 1.8 på side 24 vil infiltrationskapaciteten falde efter en tørvejrperiode. Det danner en fornyet risiko for overfladeafstrømning, afhængig af regnintensiteten og regnvarigheden. Jo mere lavpermeabelt jorden er, desto mere vil det fremskynde overfladeafstrømning. I den forbindelse er regntyper, der kan danne overfladeafstrømning, blevet karakteriseret. Dette gøres for de valgte jordtyper. Jordtypernes parametre er vist i tabel 1.1 for Horton og tabel 1.3 for Green & Ampt, hvor der tages udgangspunkt i standardværdien. Endvidere tages der udgangspunkt i Viby regnserien.

Regnhændelser kan karakteriseres på flere måder ift. overfladeafstrømning. I dette tilfælde er det valgt at karakterisere den relative afstrømning ift. andre parametre for hver regnhændelse. Disse andre parametre kan være gentagelsesperiode, regnintensitet, regnvarighed osv. Den relative afstrømning er beskrevet som den mængde af regnvandet, der reelt afstrømmer, givet ved:

$$\text{Relativ afstrømning [\%]} = \frac{\text{Afstrømning [m]}}{\text{Regnvolumen [m]}}$$

Ikke alle regnhændelser forårsager afstrømning, afhængig af jordtype og infiltrationsmodel. Antallet af hændelser, som forårsager overfladeafstrømning vil være betydelig mindre end antallet af overskridelser, beskrevet i afsnit 1.3.1. Antallet af hændelser bliver opmålt på hvor infiltrationskapaciteten overskrides den første gang i en hændelse. Yderligere overskridelser i en hændelse vil ikke tælle som en ekstra hændelse. Antallet af hændelser, der finder sted ift. parameterværdierne, angivet for de tre jordtyper, er vist i tabel 2.2 for Viby regnserien.

Tabel 2.2: Antal hændelser i Viby regnserien, fordelt på jordtype og infiltrationsmodel, som forårsager overfladeafstrømning.

Jordtype	Horton			Green & Ampt		
	Standardværdi ^a	Min ^a	Maks ^a	Standardværdi ^b	Min ^b	Maks ^b
Sand	19	428	1	0	38	0
Silt	192	5419	24	102	6377	0
Ler	3674	7074	702	6828	7074	376

^a Repræsenterer antallet, svarende til parameterværdierne, angivet i tabel 1.1.

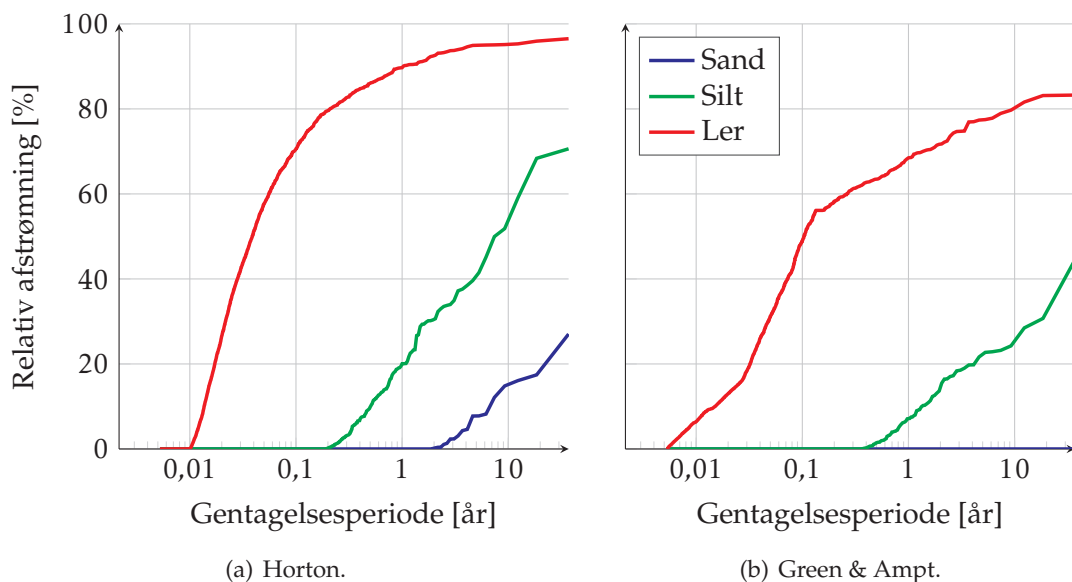
^b Repræsenterer antallet, svarende til parameterværdierne, angivet i tabel 1.3.

Det vælges at medtage alle regnhændelser, på trods af, at der kun er et specifikt antal hændelser, der forårsager afstrømning, vist i tabel 2.2. Dette er gjort for at kunne give et bedre estimat af de valgte parametre. De to følgende afsnit beskriver regnhændelserne ift. relativ afstrømning for gentagelsesperiode og middelintensitet for en given varighed. Selvom der kunne inkluderes flere parametre, der karakteriserede regnhændelserne er disse udelukket pga. en dårligere korrelation.

2.3.1 Relativ afstrømning ift. gentagelsesperiode

Hver enkelt regnhændelse forekommer med en estimeret gentagelsesperiode. Den regnhændelse, der bidrager med den største volumen, vil få den højeste gentagelsesperiode, dvs. 37 år, som er det Viby regnserien er målt over. Det samme gælder for regnintensiteten og regnvarigheden. Den hændelse, der gengiver den højeste middelintensitet over en given varighed vil få den højeste gentagelsesperiode. Og den højeste gentagelsesperiode vil gælde for den længste regnvarighed. Gentagelsesperioden er rangeret fra højest mod lavest for alle hændelser, hvilket også gælder de tre nævnte parametre.

I dette afsnit er gentagelsesperioden bestemt for den relative afstrømning ud fra jordtype og infiltrationsmodel. Gentagelsesperioden for relativ afstrømning kan bestemmes på nøjagtig samme måde som med regnvolumen. Den hændelse, der bidrager med den største relative afstrømning vil få den højeste gentagelsesperiode. Dermed kan gentagelsesperiode og regnhændelserne rangeres. Det giver resultatet, som vist på figur 2.7, hvor gentagelsesperioden er estimeret for den relative afstrømning.



Figur 2.7: Relativ afstrømning ift. gentagelsesperiode for regnhændelser, fordelt på jordtype og infiltrationsmodel.

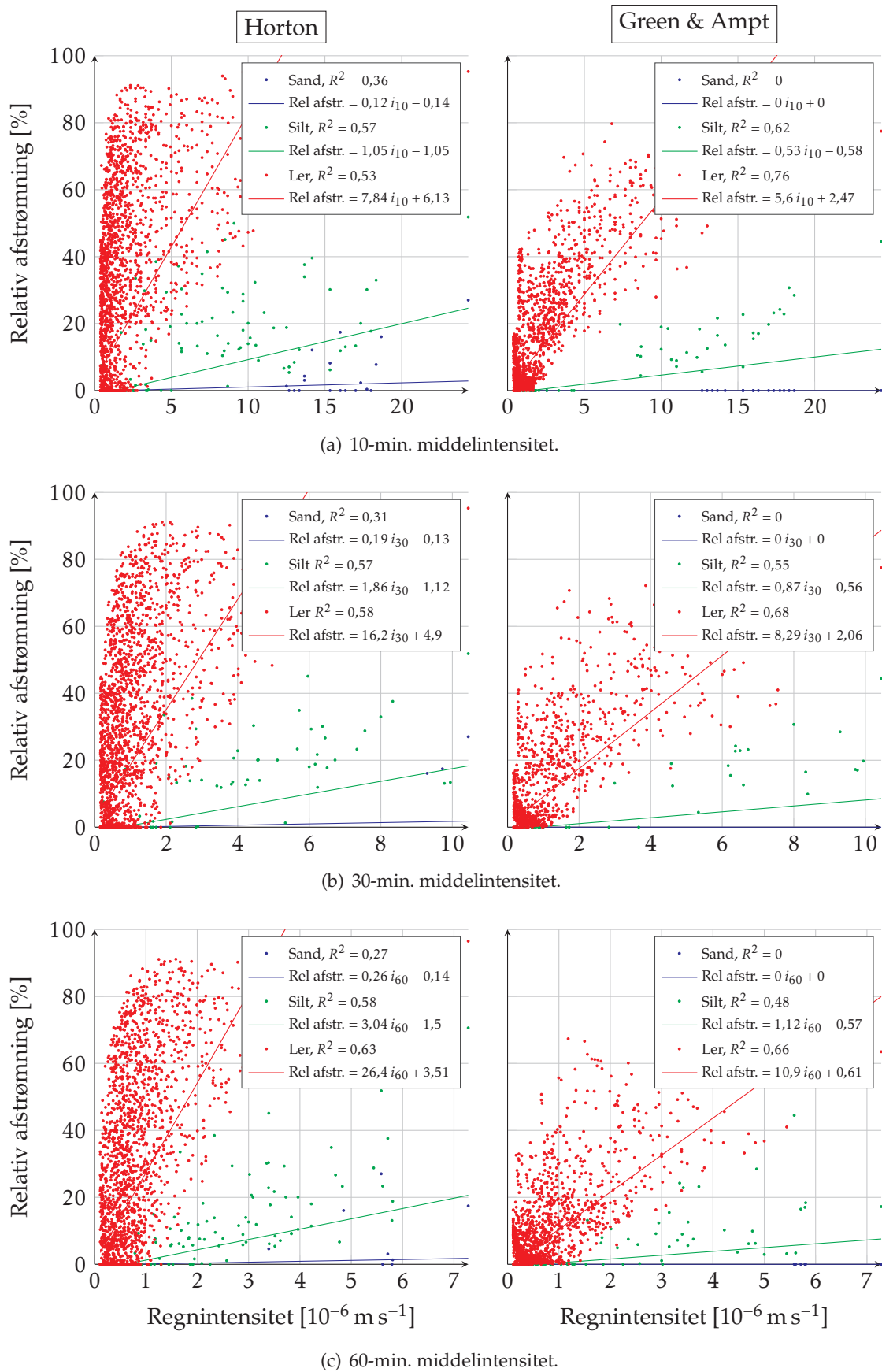
Figur 2.7 viser hvor stor en relativ afstrømning er for en given gentagelsesperiode. En højere relativ afstrømning med en lavere gentagelsesperiode vil forekomme for de mere impermeable jordtyper, mens det modsatte vil være tilfældet med permeable jordtyper. Dette er selvfølgelig fastsat på baggrund af de hændelser, som forårsager afstrømning, vist i tabel 2.2. For sand, ved brug af Green & Ampt, er der ikke estimeret en relativ afstrømning, da der ikke er regnhændelser, der forårsager afstrømning.

2.3.2 Relativ afstrømning ift. middelintensiteter

Ligesom gentagelsesperiode, har hver enkelt regnhændelse også en maksimal middelintensitet ift. en given varighed. Middelintensiteter ift. en varighed, der er længere end selve regnhændelsen er ikke muligt. Figur 2.8 på næste side viser sammenhængen mellem den relative afstrømning ift. en given middelintensitet. De hændelser, der ikke har en regnintensitet for den givne varighed, er ikke medtaget.

Selvom relationen mellem relativ afstrømning og regnintensiteten ikke er den bedste, viser figur 2.8 det samme mønster for hver jordtype og infiltrationsmodel, uanset hvilken størrelse middelintensiteten har. Jo mere højermeabel jorden er, desto mere er der påkrævet for at en regnintensitet kan fremskynde overfladeafstrømning. Her er det tydeligt, at en meget lavere regnintensitet er påkrævet for at fremskynde overfladeafstrømning for ler.

Der er en mærkværdig forskel for jordtypen ler, mellem de to infiltrationsmodeller. Som figur 2.8(a) viser, kan regnintensiteter mellem $0 - 5 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ danne op til 90% relativ afstrømning ved brug af Horton, mens det kun er 60% ved brug af Green & Ampt. Det skyldes, at infiltrationskapaciteten ved brug af Horton er lavere end ved brug af Green & Ampt for ler. På grund af en lavere infiltrationskapacitet ved brug af Horton, dannes en dårligere relation mellem relativ afstrømning og regnintensiteten.



Figur 2.8: Sammenhæng mellem relativ afstrømning og en given middelintensitet, fordelt på jordtype og infiltrationsmodel.

2.4 Vurdering af infiltrationens betydning for afstrømning

De gengivne massebalancer for hvert fra 1979-2016 afspejler infiltrationskapaciteten ved brug af de to modeller. For generelt er infiltrationskapaciteten ved brug af Horton lavere end Green & Ampt for hver enkelt jordtype. Det medfører, at der er et større afstrømningsbidrag ved brug af Hortons infiltrationsmodel, sammenlignet med Green & Ampt.

På baggrund af sensitivitetsanalysen er det vurderet at de to modeller er hinandens modsætning. Hortons model er bedst at anvende for de impermeable jordtyper, mens Green & Ampts model er bedst for de permeable jordtyper. Dette er baseret på at der kan skrues på det minimale antal parametre pga. den minimale parameterindflydelse ift. en ændring af afstrømningsvolumen. For ler, er det næsten ubetydeligt ift. afstrømningsvolumen hvis den ene eller anden parameter ændres i Hortons model. Jo højere mættet hydraulisk ledningsevne, K_s , vil reducere de andre parametres betydning i Green & Ampt. Det skyldes at en større værdi af K_s vil gøre, at regnintensiteten også skal være større for at kunne overskride K_s . Derfor vil Green & Ampt også være bedst at anvende for de impermeable jordtyper, hvis det ønskes at vurdere effekten af de andre parametre. Men det kan kun ske i de tilfælde hvor K_s er mindre end regnintensiteten. Først derefter vil de andre parametre i Green & Ampts model få en betydning der er K_s ligeværdig. Dette er illustreret for ler på figur 2.6, hvor de andre parametre er næsten ligeså betydningsfulde som K_s .

Derimod vil det modsatte være gældende for Horton, hvis der ønskes at vurdere parametrenes betydning ift. ændring af afstrømningsvolumen. Horton vil i disse tilfælde være bedst for de impermeable jordtyper, hvor alle parametre vil få en større indflydelse.

Ift. karakterisering af regnhændelser, er der en korrelation mellem relativ afstrømning og to valgte parametre. De viste parametre fortæller noget om størrelsen på gentagelsesperioden såvel som regnintensiteten ift. hvor meget af regnvandet, der afstrømmer. Således er det entydigt, at for de mere lavpermeable jordtyper, kræves en lavere værdi ift. den enkelte parameter for at danne mere overfladeafstrømning.

Afstømning fra grønne arealer i Lystrup

Betydningen af det ekstra afstrømningsbidrag fra grønne arealer til afløbssystemet, vil blive belyst i dette kapitel. Dette vil blive gjort ved at fokusere på et specifikt område, som i dette tilfælde er Lystrup, nord for Århus, vist på figur 3.1. Der undersøges om afstrømningsbidraget fra de grønne arealer rundt omkring i Lystrup, vil give kapacitetsproblemer i afløbssystemet. Størrelsen af afstrømningsbidraget vil være forskellig, afhængig af hvor meget af overfladevandet, der infiltrerer. Derfor anvendes de to infiltrationsmodeller, Horton og Green & Ampt, til at beskrive dette bidrag.



Figur 3.1: Lystrups placering ift. Århus. Strømningsmønsteret for ekstremhændelsen d. 26. august 2012 var fra nord mod syd. Det er ca. den samme retning, som vandløbet Ellebæk har i den vestlige del af Lystrup.

Lystrup har været udsat for en massiv ekstremhændelse, der fandt sted d. 26. august 2012, hvor flere dele af byen blev oversvømmet. Strømningsmønstret for oversvømmelserne indikerede en retning, som var fra nord mod syd. På baggrund af den omtalte ekstremhændelse, har Aarhus Vand A/S og Aarhus Kommune udarbejdet tiltag til klimatilpasning, der går ud på at håndtere regnvand i Lystrup. For selvom stort set hele afløbssystemet i Lystrup er separatkloakeret og dimensioneret til et serviceniveau på 10 år, har det ikke været nok til at kunne håndtere de store vandmasser. Disse tiltag vil dermed kunne håndtere regnhændelser, svarende til en gentagelsesperiode på 100 år. Selve serviceniveauet for afløbssystemet vil ikke blive ændret, hvormed opstuvning til terræn, stadig vil forekomme. I stedet vil det opstuvende vand blive håndteret smart på overfladen, hvorved skadevoldende effekter minimeres. Det er målet, at de erfaringer, der dannes omkring Lystrup, skal kunne viderebringes til andre dele af kommunen. [Aarhus Kommune, 2014]

I dette kapitel er der undersøgt om afstrømningsbidraget fra de grønne arealer omkring Lystrup er en kilde til kapacitetsproblemer. I givet fald, vil det betyde, at risikoen for overfladeafstrømning fra grønne arealer, måske skal implementeres i de gældende designkrav for afløbssystemer i fremtiden. Dette skal gøres på baggrund af det foregående, dvs. hvor der er taget højde for infiltrationen, som den dominerende hydrologiske proces.

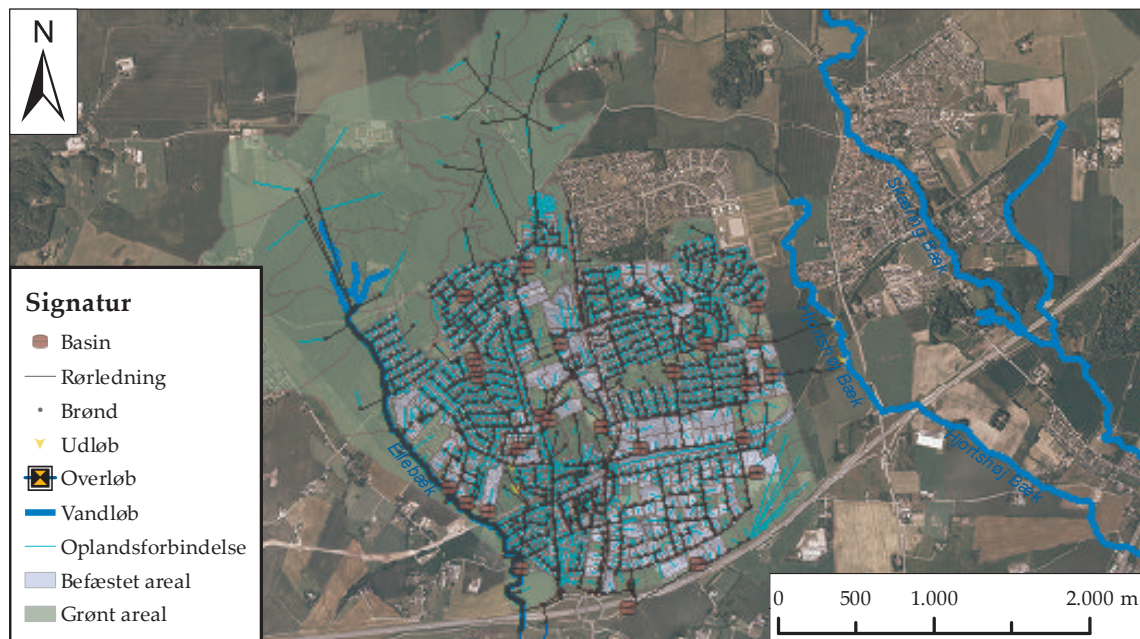
3.1 Metodebeskrivelse

Metoden til at opgøre om, der er kapacitetsproblemer, som følge af et ekstra bidrag fra de grønne arealer, er ud fra opstuvning til kritisk kote. Det ekstra afstrømningsbidrag fra de grønne arealer er implementeret ved hjælp af de anvendte infiltrationsmodeller, beskrevet i tidligere kapitler. Implementeringen af det ekstra afstrømningsbidrag kan dog gøres på flere måder. Afsnit 3.1.3 beskriver de anvendte metoder, som efterfølgende er anvendt i Lystrups afløbssystem, beskrevet i det følgende.

3.1.1 Afløbsmodel for Lystrup

For området omkring Lystrup, har Orbicon lavet en numerisk model til beskrivelse af afløbssystemet. Denne model er udviklet i programmet MIKE URBAN med delpakken MOUSE (Modelling of Urban Sewers). Denne afløbsmodel er dog inklusiv alle de tiltag, der er foretaget efter ekstremhændelsen i august 2012. Dermed er der også taget ekstra højde for de grønne arealers beliggenhed, vist på figur 3.2 på næste side, der udgør omfanget af Lystrups afløbssystem.

Det skal bemærkes, at for nogle af brøndene, der befinder sig i de grønne arealer, ikke nødvendigvis kun modtager et afstrømningsbidrag fra disse arealer. De kan også modtage et bidrag fra befæstede arealer. Det er såvidt forsøgt at afbilde på figur 3.2, markeret lidt utydeligt med *Oplandsforbindelser*, der angiver hvilke oplande de enkelte brønde modtager et afstrømningsbidrag fra. De tekniske samt fysiske data for afløbsmodellen, er vist i tabel 3.1 på modstående side, fordelt på de to oplandstyper.



Figur 3.2: Lystrups afløbssystem med brønde, rørledninger, oplandsarealer mm.

Tabel 3.1: Tekniske og fysiske data for afløbsmodellen, lavet i MIKE URBAN.
Data er fordelt på oplandstype.

	Befæstede arealer	Grønne arealer	Total
Totalt oplandsareal [ha]	356	516	872
<i>Antal</i>			
oplande	3013	234	3247
brønde ^a	1394	130	1524
rørledninger			2215
udløb			5
bassiner			25
overløb			18
<i>Hydrologiske parametre^b</i>			
Befæstelsesgrad, α [%]	Varierende	80	
Initialtab, R_0 [10^{-3} m]	0,6	20	
Hydrologisk reduktionsfaktor, φ [-]	0,90	0,90–1	
Koncentrationstid, t_c [min]	7	7–100	

^a Antal af brønde er eksklusiv de brønde, som eksisterer langs vandløbet Ellebæk. Se afsnit 3.1.2 for nærmere forklaring.

^b Parametre, der anvendes til en tid-areal overflademodel.

Som det fremgår af tabel 3.1 udgør de grønne arealer et større areal sammenlignet med de befæstede. Det skyldes hovedsageligt, at der er en større andel befæstede arealer i den nordlige del, der kan give anledning til afstrømning.

Afløbsmodellen, lavet af Orbicon, er detaljeret udført ift. oplande, brønde og ledningsføringer. Derfor vil der ikke blive ændret på de fysiske størrelser af disse. Ligeledes vil der heller ikke blive ændret på de befæstede arealers opbygning mht. befæstelsesgrader, initialtab, hydrologisk reduktionsfaktor samt koncentrationstid. Derimod vil de grønne arealer blive ændret ift. hydrologiske parametre. Omfanget af ændringen, afhænger af hvilken metode, der benyttes til at medtage afstrømningsbidraget.

3.1.2 Antagelser og forudsætninger

Følgende antagelser og forudsætninger er gjort i forbindelse med vurderingen af risikoen for opstuvning til kritisk kote:

- Der har været feltforsøg omkring Lystrup, foretaget af Papacharalampos og Iordăchescu [2016]. Ifølge Papacharalampos og Iordăchescu [2016], kan jorden karakteriseres som en siltet lerjord. Derfor vil jordtypen sand blive udelukket ift. at vurdere risikoen for opstuvning. Desuden er det vist tidligere, at en sandet jord, stort set ikke bidrager med et afstrømningsvolumen.
- Ved anvendelse af de to infiltrationsmodeller, Horton og Green & Ampt, vil der kun blive vurderet for opstuvningen ved de givne standardværdier, vist i hhv. tabel 1.1 og 1.3.
- I afløbsmodellen er der indsat brønde langs vandløbet Ellebæk af Orbicon, vist på figur 3.2. Dette er gjort af hensyn til at indikere, at der er et vandløb i dette område. De har ikke en anden afløbsteknisk funktion, hvorfor disse brønde vil blive udelukket i vurderingen.
- Til at modellere afstrømningen på overfladen, anvendes en tid-areal model. Der er ikke ændret på valget af strømningsmodellen i rørledninger, som er en dynamisk bølgemodel.
- I vurderingen af opstuvning til kritisk kote, er kritisk kote defineret som terrænkoten for brøndene.
- Der tages udgangspunkt i Viby regnserien, hvor regnintensiteter er målt igennem 37 år fra 1979-2016. Ud fra regnserien er vurderingen baseret på de 136 største regnhændelser, der har været kritiske for afløbssystemet.

3.1.3 Afstrømningsbidrag fra grønne områder

For at tage højde for afstrømningsbidraget fra de grønne arealer, anvendes to metoder. Begge metoder er baseret på, at der bliver taget højde for infiltrationen, som det eneste hydrologiske tab. Formel (3.1) og (3.2) kan relateres til begge metoder i forhold til parameterbestemmelse [Winther et al., 2011].

$$\beta = \varphi \alpha \quad (3.1)$$

$$V = \beta A (R - R_0) \quad (3.2)$$

hvor

β	Afløbskoefficient	[–]
φ	Hydrologisk reduktionsfaktor	[–]
α	Befæstelsesgrad	[–]
V	Afstrømningsvolumen	[m]
A	Oplandsareal	[ha]
R	Regnvolumen	[m]
R_0	Initialtab	[m]

Afløbskoefficienten er parameteren, der afgør hvor meget af overfladevandet, der bidrager til afløbssystemet. Produktet af denne parameter, givet ved den hydrologiske reduktionsfaktor og befæstelsesgrad, er mere vigtige. Den hydrologiske reduktionsfaktor er bestemmende for hvor meget af overfladevandet, der infiltrerer og befæstelsesgraden afgør hvor stor en procentdel af selve overfladen, der kan karakteriseres som befæstet.

Den mest vigtige parameter i formel (3.2) er initialtabet, R_0 . Denne størrelse er den volumen, der initialt ikke bidrager til afløbssystemet. Er regnvolumen mindre end denne volumen, vil der ikke være et afstrømningsbidrag fra afløbssystemet fra oplandsarealerne.

Det skal bemærkes at formel (3.1) og (3.2) almindeligvis anvendes for et oplandsareal, hvor der er foretaget målinger [Winther et al., 2011]. I dette tilfælde er alle oplande i Lystrup betraget med de samme karakteristika, dvs. enten som en siltet eller leret overflade. I de to metoder, er der kun redegjort for den hydrologiske reduktionsfaktor, befæstelsesgrad samt initialtabet, givet i de to formler. Anvendelse af andre fysiske størrelser i de to formler, afhænger af hvilken metode, der anvendes, beskrevet i de tre følgende afsnit.

Orbicons model

Afløbsmodellen er lavet af Orbicon, som har fastsat nogle hydrologiske parametre, vist i tabel 3.1 for de grønne arealer. Valget af disse parameterværdier er ikke forudbestemt for nogen specifik jordtype eller overfladebelægning. Det vælges at medtage denne model for at kunne sammenligne med referencesituationen samt de følgende beskrevne metoder.

Der ændres altså ikke på de hydrologiske parametre for hvert oplandsareal, som er fastlagt af Orbicon. Den samme regnserie anvendes for alle oplandsarealer, jf. tabel 3.1.

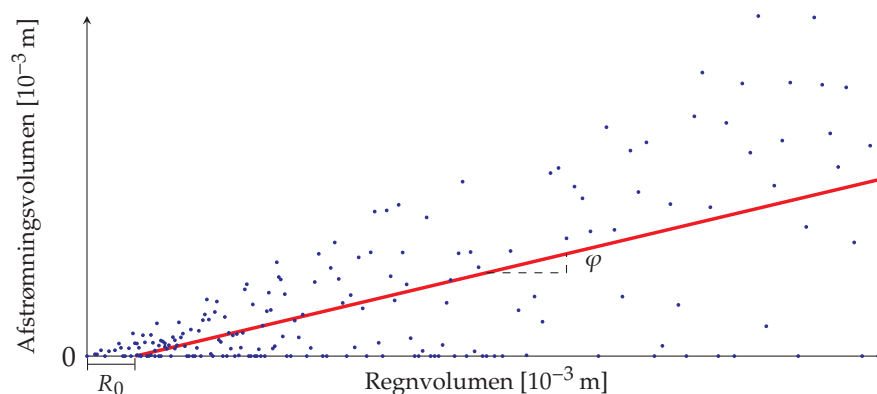
Metode 1: Modifieret regnhændelse

For den første metode, tages der udgangspunkt i en modificeret regnserie. Den modificerede regnserie tilknyttes de grønne arealer, hvor der kan forekomme infiltration. Den modificerede regnserie kan beskrives med q i formel (1.1) på side 6, dvs. hvor der er taget højde for infiltrationen ved hjælp af de anvendte infiltrationsmodeller. Dermed vil de grønne arealer svare til en impermeabel overflade.

De hydrologiske parametre, angivet i tabel 3.1, vil dermed blive ændret. Således vil befæstelsesgraden for de grønne arealer være på 100%, den hydrologiske reduktionsfaktor vil være lig med 1 og intet initialtab vil forekomme. Koncentrationstiden vil være på en standardværdi for overflademodellen, på 7 min.

Metode 2: Hydrologisk reduktionsfaktor og initialtab

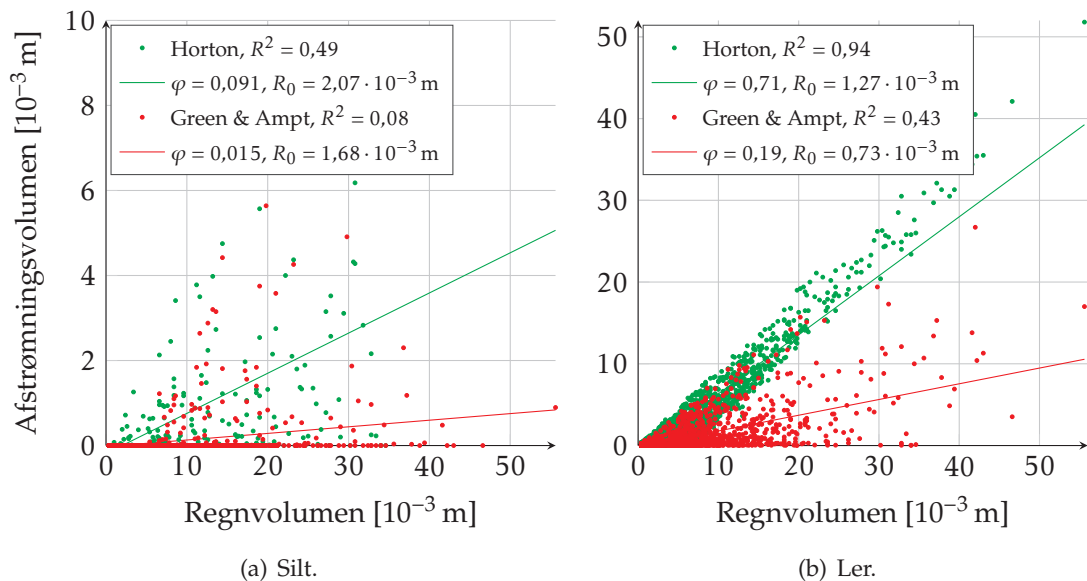
For den anden metode, fastsættes en hydrologisk reduktionsfaktor samt et initialtab for de grønne arealer. Til bestemmelse af disse to parametre, anvendes sammenhængen mellem regndybde og afstrømningsdybde, illustreret på figur 3.3.



Figur 3.3: Principskitse, hvor den hydrologiske reduktionsfaktor, φ , samt initialtab, R_0 , kan bestemmes ved lineær regression. De blå punkter er fiktive målinger af regndybde og afstrømning. Ud fra målinger udføres lineær regression, som er den røde linje. Her er hældningen den hydrologiske reduktionsfaktor og skæringen med den vandrette akse udgør initialtabet.

Ved at fastlægge disse parametre, gør det muligt at anvende den samme regnserie for de grønne arealer, som er tilkøbt de befæstede arealer. Det skyldes, at der tages højde for infiltrationen ved hver enkelt regnhændelse, hvormed det resterende overfladevand er afstrømningsvolumen. For nogle af regnhændelserne dannes der ikke et afstrømningsvolumen. Ved at medtage disse regnhændelser, vil det resultere i en mindre værdi af afstrømningsvolumen. Det skyldes, at den hydrologiske reduktionsfaktor bliver mindre og initialtabet bliver større. Ved brug af denne metode, anvendes altså en middelværdi for de to parametre, som gælder for alle grønne arealer. Figur 3.4 viser relationen mellem regn- og afstrømningsvolumen. Her er de hydrologiske parametre bestemt, afhængig af jordtype og infiltrationsmodel.

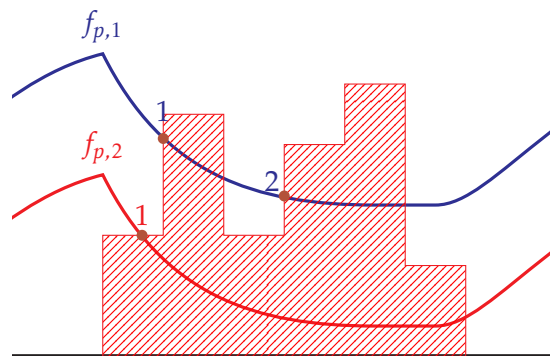
Det elektroniske bilag D.4.2 gengiver parameterværdierne for den hydrologiske reduktionsfaktor og initialtab.



Figur 3.4: Regnvolumen og beregnet afstrømningsvolumen ved hjælp af de anvendte infiltrationsmodeller. Ved denne sammenhæng, er de to parametre blevet bestemt med de viste værdier.

For silt er der mange hændelser, hvor der ikke sker afstrømning. Det gør at variationen af hændelser, der giver afstrømning, bliver mere spredt. For ler, er det stort set alle hændelser, der kan give anledning til afstrømning, hvormed en bedre korrelation vil forekomme. Infiltrationskapaciteten for Green & Ampt er generelt højere end Hortons, hvilket gælder for både silt og ler. En lav infiltrationskapacitet, såsom ler, ved brug af Horton, er næsten altid overskredet sammenlignet med den højere infiltrationskapacitet for ler ved brug af Green & Ampt. Infiltrationskapaciteten for silt kan dog blive overskredet på forskellige tidspunkter. Dette kan endda også ske i løbet af en enkelt regnhændelse. Dette er illustreret med figur 3.5 på den følgende side.

Som vist på figur 3.5 er der ujævne mellemrum for kurven $f_{p,1}$, hvor infiltrationskapaciteten bliver overskredet. Det gør at regnvolumen i tidspunktet forinden ikke medtages til beregningen af afstrømningsvolumen for den enkelte regnhændelse. Det resulterer i at afstrømningsvolumen bliver en ustabil størrelse, hvormed relationen ift. regnvolumen vil variere mere. Dette er dog mest aktuelt ved at sammenligne jordtypen silt ved brug af de to infiltrationsmodeller. For ved silt er infiltrationskapaciteten en del højere end ved ler, hvormed der er mindre risiko for overskridelse. De færre hændelser, hvor det sker, vil have forskellig regn- og afstrømningsvolumen, hvormed sammenhængen bliver mere spredt.



Figur 3.5: Infiltrationskapaciteten overskrides når regnintensiteten (rødt skraverede) bliver større end infiltrationskapaciteten. Den mere højerpermeable jordtype, angivet som $f_{p,1}$ kan have flere overskridelser end den mere lavpermeable jordtype, $f_{p,2}$. De angivne tal er antallet af overskridelser for den enkelte regnhændelse.

Ved brug af metode 2 er de hydrologiske parametre fastsat ud fra figur 3.4. Befæstelsesgraden samt koncentrationstiden vil ligesom metode 1, være på hhv. 100% og 7 min.

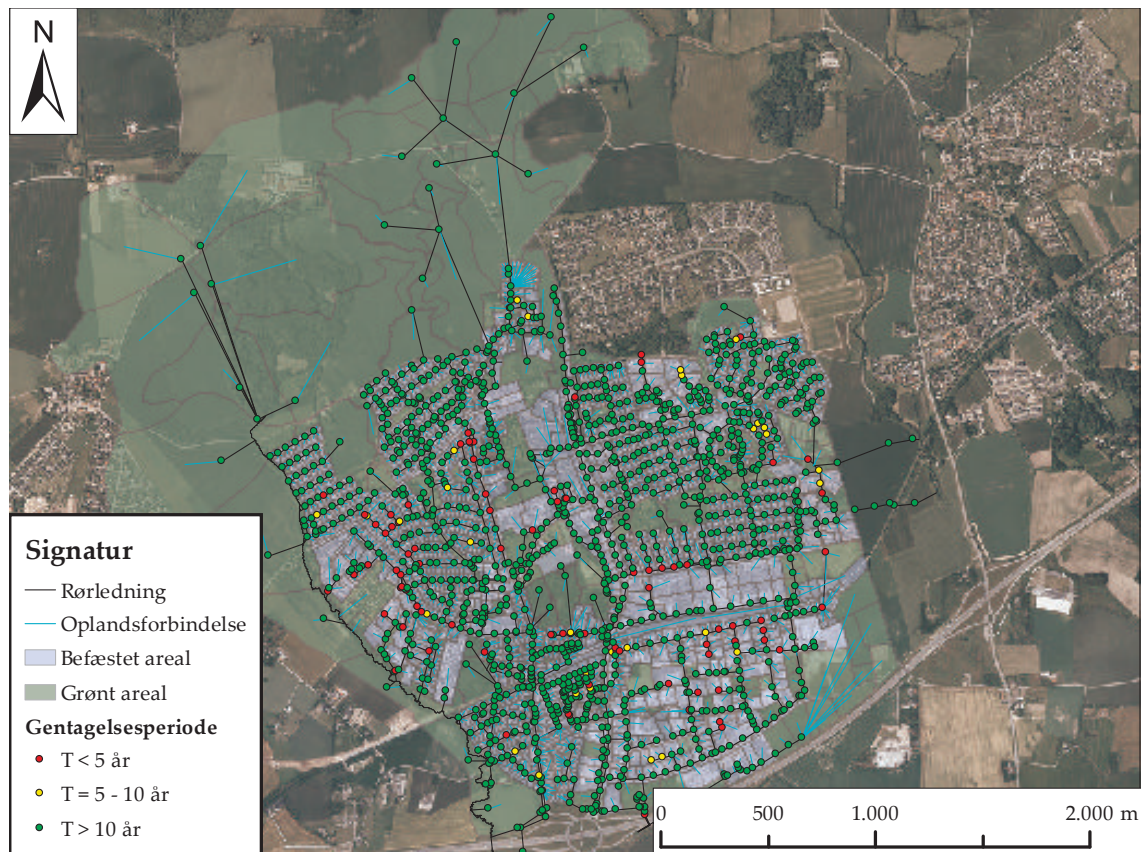
3.2 Opstuvning til kritisk kote

Ifølge de gældende designkriterer må regnvandet ikke opstuve til den kritiske kote oftere end hvad der svarer til en gentagelsesperiode på minimum 5 år for separatsystemer [SVK, 2005]. Den kritiske kote er for Lystrups afløbssystem defineret som terrænniveau. Hermed er der undersøgt om de grønne arealer forringer afløbssystemets serviceniveau for derved at gøre gentagelsesperioden ved opstuvning endnu lavere.

For denne undersøgelse er der i første omgang gjort rede for referencetilstanden. Referencetilstanden tager udgangspunkt i at bestemme opstuvningen, udelukkende fra befæstede arealer. Efterfølgende er opstuvningen blevet bestemt, ved at medtage bidraget fra de grønne arealer ud fra Orbicons model samt de to beskrevne metoder. På den måde kan der vurderes hvor stor en risiko de befæstede arealer har på afløbssystemet i Lystrup.

3.2.1 Referencetilstand

I referencetilstanden, er der ikke medtaget afstrømningsbidrag fra de grønne arealer, hvormed gentagelsesperioden for brøndene i de grønne arealer angiveligt må svare til regnseriens længde. Gentagelsesperioden for opstuvningen til kritisk kote er vist på figur 3.6 på næste side for alle brøndene ved referencetilstanden.

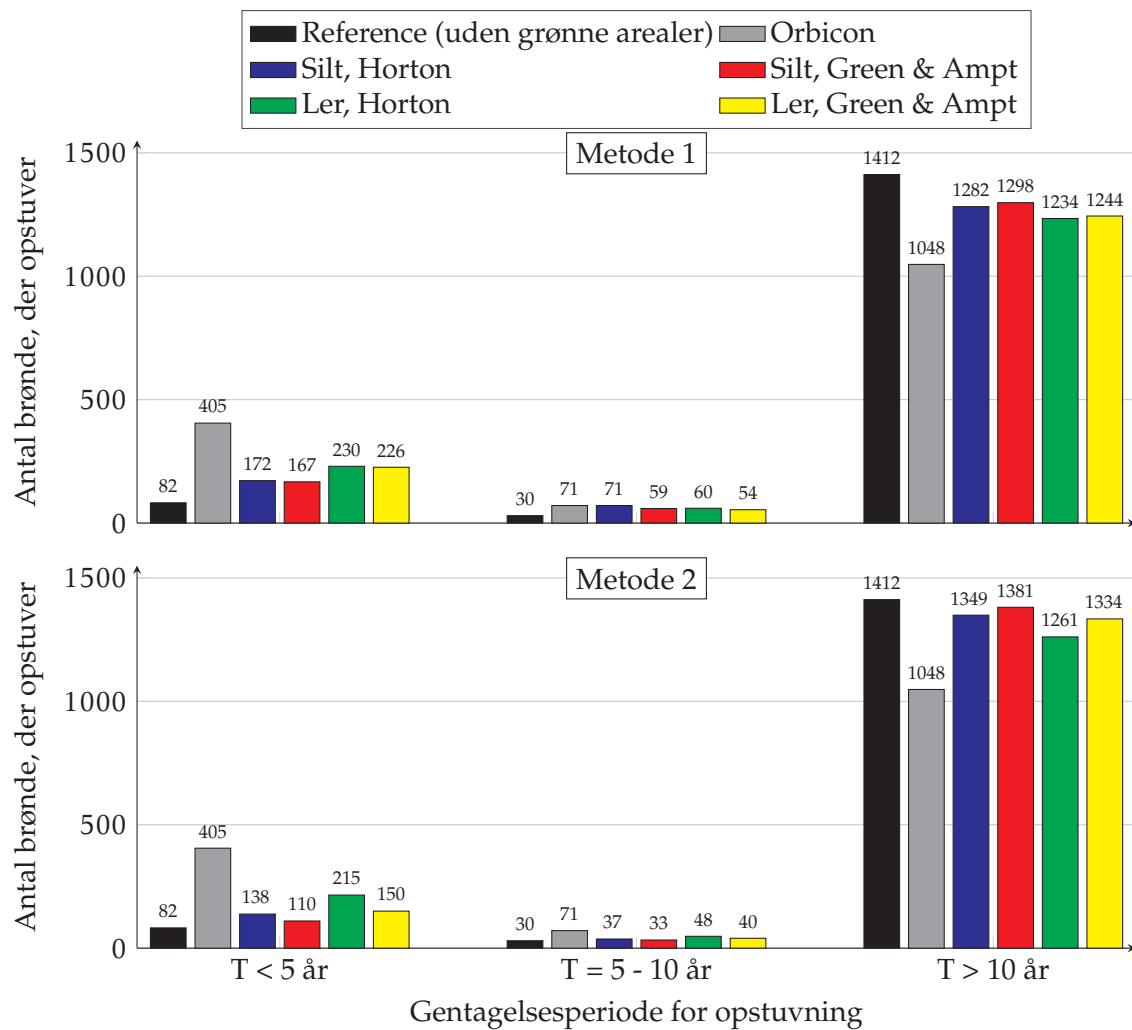


Figur 3.6: Gentagelsesperiode for opstuvning til kritisk kote ved den eksisterende situation. I dette tilfælde er de grønne arealer ikke taget med. Der vurderes udelukkende for de befæstede arealer.

Som vist på figur 3.6 er der ikke mange steder, hvor gentagelsesperioden for opstuvning er kritisk. Dette er i tilfældet, hvor der ikke kommer bidrag fra de grønne arealer, der i almen praksis anses som en lille del af det samlede bidrag [DHI, 2015]. Langt størstedelen af brøndene har en gentagelsesperiode større end 10 år, hvilket er den kritiske grænse for et fællessystem [SVK, 2005].

3.2.2 Afstrømningsbidrag fra grønne arealer

Ved medtagelse af de grønne arealer, vil gentagelsesperioden for opstuvning muligvis ændres i nogle af brøndene. Det kan evalueres ud fra de anvendte metoder. Ændringen ved brug af de anvendte metoder er vist på figur 3.7 på den følgende side sammen med Orbicons model. For Orbicons model skelnes der ikke mellem jordtype eller infiltrationsmodel, hvorfor antallet forbliver det samme ved sammenligning af de to metoder.



Figur 3.7: Gentagelsesperioden for antal brønde, der opstøver til kritisk kote, fordelt på jordtype og infiltrationsmodel ved brug af begge metoder. Der sammenlignes endvidere med referencetilstanden og Orbicons metodevalg, som forbliver de samme ved begge metoder.

Der er en tydelig forskel ved referencetilstanden og Orbicons model. Ved at medtage de grønne arealer, som udgør 130 brønde (jf. tabel 3.1), vil der stadig være en del brønde i de befæstede arealer, som har ændret gentagelsesperioden for opstuvning til mindre end 5 år. For i og med, at der ikke kommer et afstrømningsbidrag fra grønne arealer ved referencetilstanden, må brøndene i de grønne arealer have en gentagelsesperiode for opstuvning på over 10 år. Dermed er der flere brønde ved Orbicons model, som har fået en lavere gentagelsesperiode ved opstuvning ved at medtage bidraget fra de grønne arealer. Da der kun er 130 brønde i de grønne arealer, er det tydeligt, at brønde i de befæstede arealer også har fået en lavere gentagelsesperiode end 5 år.

Ved brug af de to beskrevne metoder, er antallet af brønde, der er skiftet til en lavere gentagelsesperiode, omtrentligt det samme med en minimal forskel. For begge metoder er forskellen mellem jordtype tydelig. For de mere permeable overflader, som silt, er antallet af brønde med en gentagelsesperiode større end 10 år, væsentligt højere sammenlignet med jordtypen ler. For metode 1, skyldes det, at der er perioder i den modificerede regnserie, hvor der ikke er regnintensiteter for silt, sammenlignet med ler. Og grunden til det er, at silt har en højere infiltrationskapacitet. Ved brug af metode 2, er årsagen at der er en mindre hydrologisk reduktionsfaktor samt et større initialtab for silt sammenlignet med silt. Igen er årsagen, at silt har en større infiltrationskapacitet, hvormed der ikke dannes et afstrømningsvolumen for nogle regnhændelser. Det påvirker størrelserne af parametrene, som vist med sammenhængen på figur 3.4.

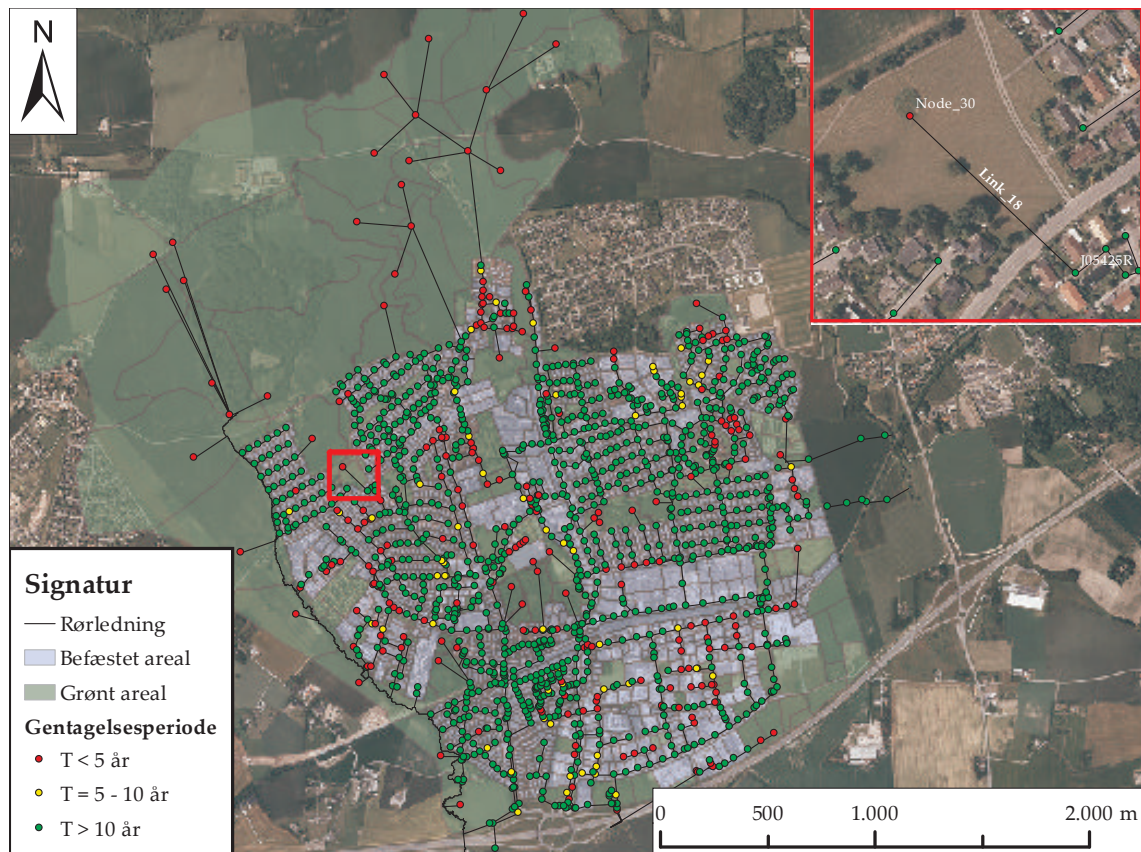
Den mest mærkværdige forskel er dog mellem Orbicons model og de to metoder. For begge anvendte metoder er antallet af brønde med en gentagelsesperiode for opstuvning på over 10 år langt større end Orbicons model. For selvom der er et stort initialtab i Orbicons model på 20 mm, er det begrænset hvor meget de andre parametre tager højde for hydrologiske tab. Så snart initialtabet er overskredet, vil afstrømningsbidraget til afløbssystemet fra grønne arealer være mellem 72-80% (med $\alpha = 80\%$, $\varphi = 0,9 - 1$, jf. tabel 3.1) af det samlede regnvolumen.

Ved gentagelsesperioden større end 10 år, er Orbicons model meget lavere end ler for både Horton og Green & Ampt. Dette gør sig gældende i sammenligningen ved begge metoder. Dermed må det antages at Orbicons model repræsenterer en overflade der er mere impermeabel end ler.

Da ændringen i antallet af opstuvende brønde er ca. det samme for de to anvendte metoder, er det interessant at kunne identificere hvilke brønde det er i Lystrup. Figur 3.8 på næste side viser oversigten over opstuede brønde i Lystrup for jordtypen ler, ved brug af Hortons infiltrationsmodel ud fra den første metode.

Størstedelen af de brønde, der er ændret til en lavere gentagelsesperiode for opstuvning, er dem, der befinder sig i de grønne arealer. Der er knap så mange brønde i de befæstede arealer, der har ændret sig til at opstuve mindre end en gentagelsesperiode på 5 år. Som vist er der mange brønde nedstrøms et grønt areal, hvor gentagelsesperioden er over 10 år. Det er illustreret med det røde markerede udsnit. Her er brønd *Node₃₀* placeret i et grønt areal, mens brønd *J05425R* er placeret i et befæstet areal. Figur 3.9 på side 55 viser vandspejlskoten ift. kritiske kote for de to brønde under ekstremhændelsen d. 26. august 2012.

Figur 3.9 er et eksempel på, at der ikke opstår problemer nedstrøms i afløbssystemet og de gældende funktionskrav er tilstrækkelige. Brønd *Node₃₀* er oversvømmet og afvander til afløbssystemet lidt efter lidt. Selvom der er meget vand på overfladen ved brønd *Node₃₀*, påvirker afvandingen ikke resten af afløbssystemet nedstrøms ved at brøndene opstiger til kritisk kote. Dermed vil afløbssystemet stadig fungere optimalt. Derimod vil det være et større problem på de grønne arealer, hvor vandet ikke kan afvande hurtigt nok til afløbssystemet. Vandmængden, der bidrager til afløbssystemet fra et opland, kan aflæses på afløbshydrografer. Afløbshydrografen for opland 38, som brønd *Node₃₀* afvander til, er vist på figur 3.10 på side 55.



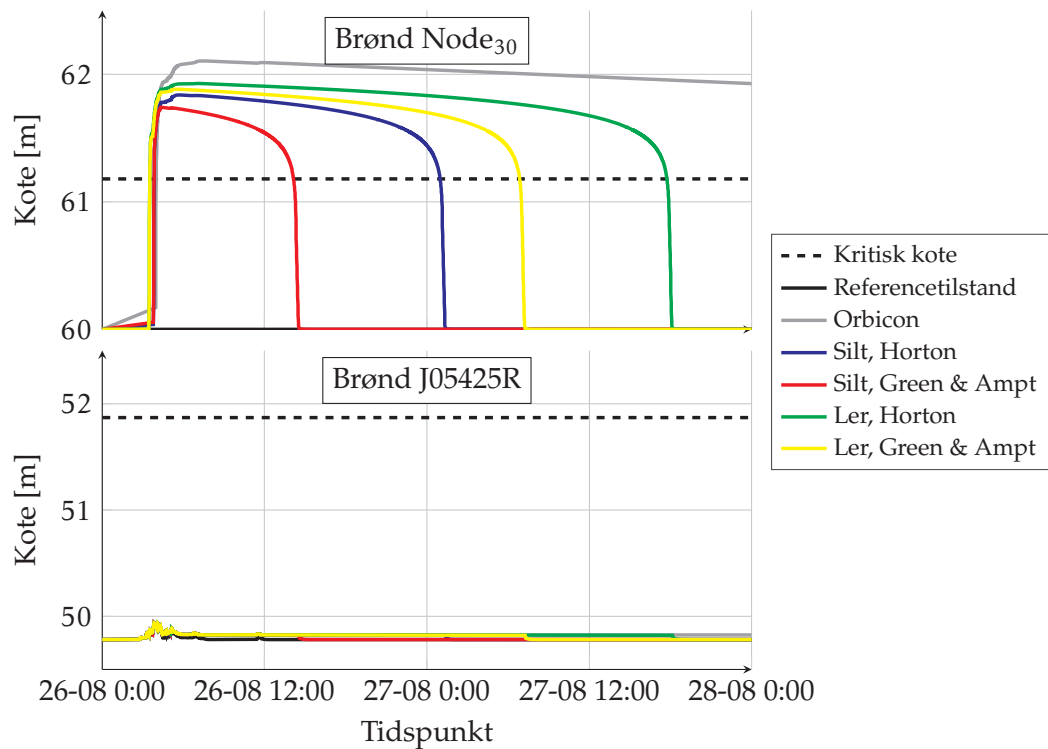
Figur 3.8: For den modificerede regnserie for ler, ved brug af Hortons infiltrationsmodel, er gentagelsesperioden for opstuvning ændret fra at være over 10 år til mindre end 5 år. Dette er mest aktuelt for brøndene, der befinder sig i de grønne arealer.

Sammenhængen mellem figur 3.9 og 3.10 er tydelig ift. afvanding af brønd *Node₃₀*. De højeste vandføringer og vandstandsmålinger er mellem kl. 3 og 6 om morgenen d. 26. august. Dog vil brønden stadig være oversvømmet, selvom der ikke kommer mere vand omkring 8-tiden. I de tilfælde hvor brøndene i oplandene er oversvømmet pga. store vandmængder, er der en risiko for, at omkringliggende arealer bliver efterladt oversvømmede. Som nævnt tidligere, vil dette vand blive håndteret smart på overfladen, ifølge Aarhus Kommune [2014].

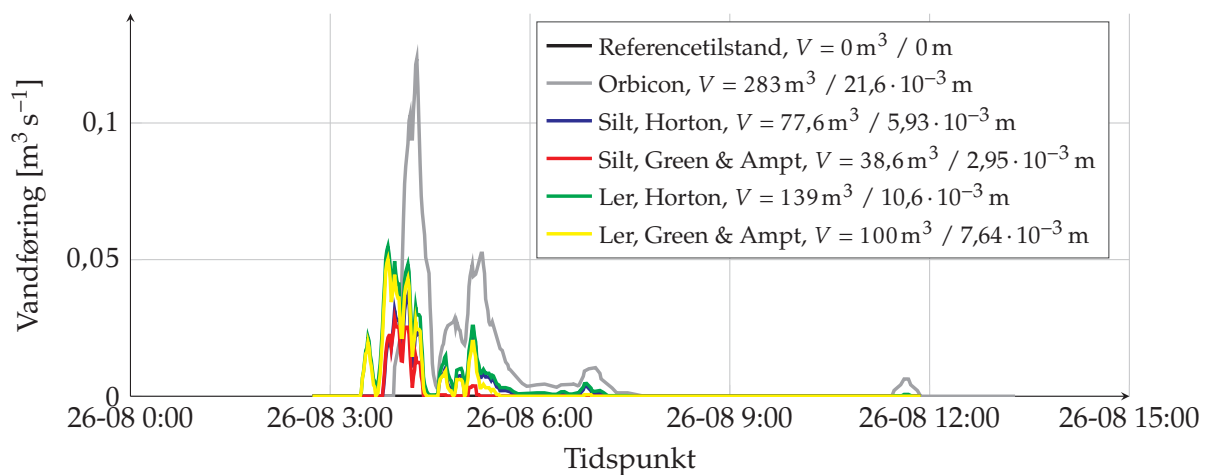
Afløbssystemet fungerer optimalt nedstrøms, illustreret med eksemplet på figur 3.9. Derfor er det ideelt at opgøre hvor mange brønde i den befæstede del af afløbssystemet, som har ændret sig til en gentagelsesperiode lavere end 5 år ift. det eksisterende. Figur 3.11 på side 56 viser de brønde i den befæstede del, hvor gentagelsesperioden er ændret til at være lavere end 5 år, som følge af afstrømning fra grønne arealer.

Det skal bemærkes, at figur 3.11 blot er en oversigt over hvor i afløbssystemet det kan være kritisk ift. opstuvning. Figuren fortæller ikke noget om hvilken jordtype eller infiltrationsmodel, der forårsager det. Derfor viser figur 3.12 på side 56 en oversigt over antallet af brønde i den befæstede del, hvis gentagelsesperiode er blevet lavere ift. eksisterende, fordelt på jordtype og infiltrationsmodel ved brug af begge metoder samt Orbicons model.

Bilag C.2 viser hvilke brønde i Lystrup, der har skiftet fra en gentagelsesperiode på over 10 år til under 5 år, afhængig af metode, jordtype og infiltrationsmodel.



Figur 3.9: Vandspejlskoten ift. den kritiske kote for de brønde, vist i udsnittet på figur 3.8. Brønd $Node_{30}$ er helt oversvømmet alt imens vandspejlskoten nedstrøms i brønd $J05425R$ er ubetydelig lille.

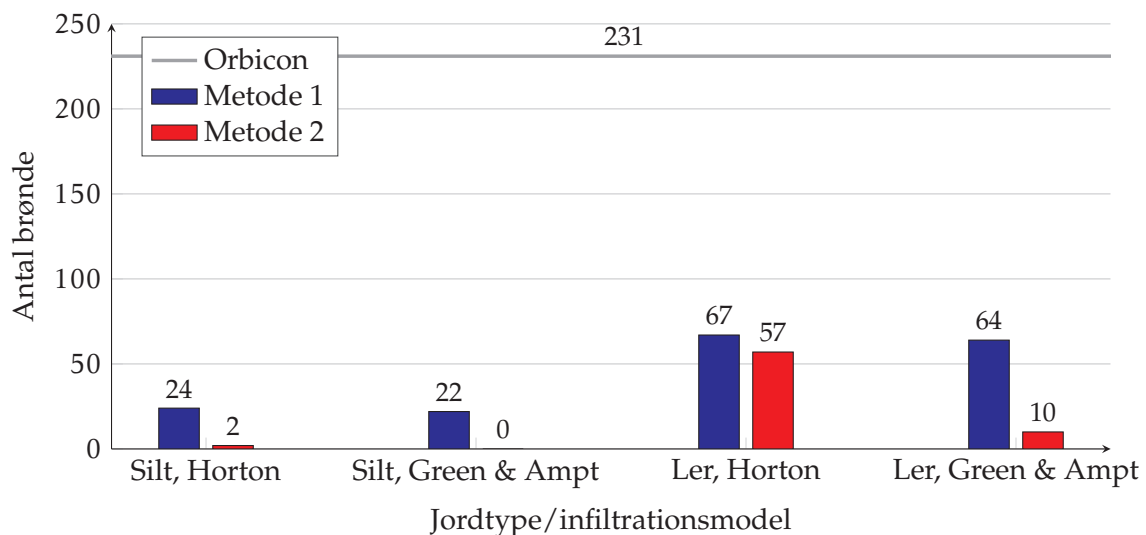


Figur 3.10: Afløbshydrograf for opland 38, hvor brønd $Node_{30}$ er placeret og som den eneste brønd, der afvandes til. Oplandet har et samlet areal på 1,308 ha.

Figur 3.12 viser en markant forskel, afhængig af metoden. Orbicons model vurderes at være worst-case scenariet, hvor der stort set ikke er et hydrologisk tab. Ved anvendelse af de to metoder, er antallet af brønde i den befæstede del langt lavere for den anden metode. En årsag kunne være, at der for metode 1 er fastlagt en hydrologisk reduktionsfaktor på 1 og intet initialtab. Med den modificerede regnserie, som givetvis kan have store regnintensiteter, vil alt dette regnvand bidrage til afløbssystemet. For i metode 2, er disse to parametre fastlagt.



Figur 3.11: Gentagelsesperiode lavere end 5 år for de brønde, der befinder sig i den befæstede del. Det sker som følge af overfladeafstrømning fra grønne arealer og er derfor uafhængig af jordtype og infiltrationsmodel.



Figur 3.12: Antal brønde i de befæstede arealer, fordelt på jordtype og infiltrationsmodel, hvis gentagelsesperiode for opstuvning er faldet fra at være over 10 år til lavere end 5 år.

3.3 Vurdering af metode

Det er vurderet at metode 1 er den bedste metode at anvende, på trods af at der kan forekomme store regnintensiteter i den modificerede regnserie. Det kan bl.a. forklares ud fra metode 2, ved at sammenligne figur 3.4 og 3.12. Figur 3.4 viser sammenhængen mellem regnvolumen og afstrømningsvolumen. For silt er sammenhængen ikke særlig god, mens sammenhængen for ler er bedre. En god relation mellem regnvolumen og afstrømningsvolumen, betyder at gennemsnitsværdien for den hydrologiske reduktionsfaktor og initialtab bliver mere repræsentabel for hver af regnhændelserne. Den bedste sammenhæng er for ler, ved brug af Hortons infiltrationsmodel. For netop ler ved brug af Hortons infiltrationsmodel, viser figur 3.12 at antallet af brønde er ca. det samme ved brug af begge metoder. Metode 1 vil dog angive det rigtige antal. Men metode 2 er tæt på det samme antal, netop pga. den gode sammenhæng mellem regnvolumen og afstrømningsvolumen. Det må betyde, at jo bedre denne sammenhæng er, jo bedre vil antallet af brønde, der opstøver, for metode 2 passe med metode 1. Dermed gør det metode 1 til den rigtige, baseret på den gode sammenhæng i metode 2.

Metode 1 er altså bedst at anvende uanset hvad, pga. den angiver det rigtige antal. Metode 2 er dog nemmest at anvende. Dette er tilfældet med ler, ved brug af Hortons infiltrationsmodel. Kravet er blot, at sammenhængen mellem regnvolumen og afstrømningsvolumen skal være god. Hvor god denne sammenhæng skal være, er uvist. Sammenhængen for silt ved brug af Horton og ler ved brug af Green & Ampt viser ca. den samme relation på hhv. $R^2 = 0,49$ og $R^2 = 0,43$. Antallet af brønde for de to nævnte ved brug af metode 2 er langt mindre end metode 1. Derfor skal relationen være betydeligt højere.

Anvendelse af metode 2 kan også relateres til jordtypen. Uanset infiltrationsmodel er sammenhængen generelt bedre for ler end ved silt, hvilket er gengivet på figur 3.4. Det skyldes de jordtypers permeabilitet. Så metode 2 er bedst anvendelig for de mere permeable jordtyper, hvor overfladeafstrømning kan forekomme hyppigere. Det samme gør sig gældende ift. valget af infiltrationsmodel. I dette tilfælde vil metode 2 være bedre egnet for Horton end Green & Ampt. Det er udelukkende fordi at infiltrationskapaciteten for Green & Ampt generelt er placeret højere, hvormed mindre afstrømning vil forekomme. Det giver samtidig en sammenhæng mellem regnvolumen og afstrømningsvolumen for silt.

Konklusion

Gennem denne rapport er der blevet undersøgt hvor meget regnvand, der går tabt ved nedsivning på grønne arealer. Det resterende regnvand vil være et afstrømningsbidrag fra de grønne arealer som kan resultere i et øget bidrag til afløbssystemet. Infiltrationens evne er blevet undersøgt for sand, silt og ler ved brug af Horton og Green & Ampt infiltrationsmodeller. Ved brug af de to infiltrationsmodeller er der anvendt litteraturværdier. Det er vurderet på baggrund af to første kapitler, at infiltrationskapaciteten er styrende ift. hvor stor overfladeafstrømningen bliver. Dermed er parametrene i infiltrationsmodellen styrende for hvordan infiltrationskapaciteten former sig.

Fra sensitivitetsanalysen i afsnit 2.2 er det vist, at parametrenes betydning ift. ændring af afstrømningsvolumen skiftede afhængig af jordtype. Dette gjorde sig gældende for begge modeller. Hvis der ønskes at justere så få parametre som muligt, er Horton bedst at anvende for de lavpermeable jordtyper, mens Green & Ampt er bedst ved de højpermeable jordtyper. Derimod vil det modsatte være tilfældet, hvis der ønskes at vurdere de enkelte parametres indflydelse. Dermed er de hinandens modsætning.

De to infiltrationsmodeller viser omtrentligt den samme massebalance hvert år fra 1979-2016 for de tre jordtyper. Generelt ligger infiltrationskapaciteten for Green & Ampt en anelse højere end Hortons for alle tre jordtyper. Det medfører, at der forekommer mindre afstrømning for Green & Ampt end Hortons. Baseret på dette, er Green & Ampt bedre for de lavpermeable jordtyper, mens Horton er nemmest at anvende for alle slags jordtyper. Dette skyldes at Green & Ampt har en tendens til at blive overestimeret i starten og under gendannelse af infiltrationskapaciteten efter en regnhændelse.

Antallet af regnhændelser med overfladeafstrømning til følge, stiger desto mere lavpermeabel jorden er. Den enkelte regnhændelse ift. relativ afstrømning er blevet beskrevet ift. gentagelsesperiode samt middelintensitet for en given regnvarighed. Sammenhængen mellem relativ afstrømning og gentagelsesperiode viste et entydigt billede. Jo mere lavpermeabel jorden er, desto lavere gentagelsesperiode skal der til for at øge størrelsen på afstrømningen.

Selvom korrelationen mellem den relative afstrømning og middelintensiteten for en given regnvarighed ikke var god, dannede det et ens mønster uanset regnvarighed. Og ligesom relationen ift. gentagelsesperiode er relationen ift. middelintensiteten ikke meget anderledes. Jo mere lavpermeabel, desto lavere intensiteter kan øge den relative afstrømningen.

For Lystrups afløbssystem er infiltrationens betydning implementeret igennem to udvalgte metoder. De udvalgte metoder viste omtrentligt det samme antal brønde, der ville opstuve, fordelt på jordtype og infiltrationsmodel. Dermed kan det konkluderes, at valget af infiltrationsmodel er af mindre betydning ift. statistikken med brønde, der opstuver til terræn. Men ift. størrelsen af afstrømningsvolumen, har valget en større betydning. Den større betydning kan relateres til flere overflader, der oversvømmes, såfremt vandet ikke kan ledes væk.

Den første ud af de to foreslåede metoder er den bedste. Ved brug af denne metode, laves en modificeret regnserie ud fra hver enkelt jordtype og infiltrationsmodel. Denne metode gør, at de hydrologiske parametre ikke behøver at blive bestemt yderligere, idet at der allerede er taget højde for infiltrationen. Dermed kan der estimeres et nøjagtigt antal af brønde, der opstuver til terræn en gang hvert 5. år i den befæstede del af afløbssystemet. Den anden metode angiver omtrentligt det samme antal brønde, der opstuver til terræn, som den første metode, for jordtypen ler, ved brug af Hortons infiltrationsmodel. Det skyldes at sammenhængen mellem regnvolumen og afstrømningsvolumen har en god korrelation. Metode 2 kan anvendes i de situationer hvor korrelationen er god mellem regnvolumen og afstrømningsvolumen.

Det vurderes at designkriteriet for afløbssystemer stadigvæk kan bruges, da antallet af brønde i den befæstede del, der opstuver med en gentagelsesperiode på mindre end 5 år, ikke er nævneværdigt stort. Dette er vurderet på baggrund af de to anvendte metoder, hvor metode 1 viste de fleste antal brønde. Derimod vil Orbicons model svare til et worst-case scenarie, hvor omkring 1/6 af brøndene i den befæstede del opstuver med en gentagelsesperiode på mindre end 5 år.

Perspektivering

Denne sidste del beskriver hvilke emner i rapportens indhold, der kunne være interessant at studere yderligere. Det gøres ved at stille emner op for derefter at forklare eller beskrive det næste skridt, som ikke er blevet redegjort for i denne rapport.

Hydrologiske tab: I denne rapport er der udforsket i hvad infiltrationen betyder for overfladeafstrømningen. Infiltrationen er valgt på baggrund af, at det vurderes at være det største hydrologiske tab. Andre hydrologiske tab, såsom fordampning, anses for at udgøre et minimalt tab for det overskydende overfladevand. I den forbindelse kunne der udforskes i om andre hydrologiske tab gjorde en forskel i forhold til overfladeafstrømningen.

Årstidsvariationer: I forlængelse af andre hydrologiske tab, kunne der undersøges for årstidsvariationer, hvor der evt. skal tages højde for temperatur såvel som nedbør ift. jordtype, infiltrationsmodel, parametre mm. Desuden kan der tages højde for vegetationen, hvor der som udgangspunkt er mere vegetation om sommeren. Årstidsvariationen ift. parametre er ikke noget, der bliver taget højde for i denne rapport. Parametrene bestemmes udelukkende på baggrund af jordtypen. Der er dog udforsket i gendannelsen af infiltrationskapaciteten. Sommetider når infiltrationskapaciteten ikke at komme tilbage til udgangspunktet, dvs. f_{ini} beskrevet i afsnit 1.3. Den initiale startværdi kan evt afgrænses ift. sæsonen. Det samme gælder for de andre parametre, der bestemmer hvor hurtigt jorden mister sin infiltrationskapacitet (f.eks. givet med k i Horton) og hvor den slutter (f_c og K_s).

Lokale parameterværdier: Dette projekt har udelukkende været baseret på litteraturværdier for parametre. Selvom parameterværdierne er nøje valgt, vil det under alle omstændigheder være en fordel hvis der er foretaget lokale målinger. Dermed kan de anvendte litteraturværdier blive valideret på baggrund af målingerne, idet der observeres hvilken jordtype det egentlig er i Lystrup. Brug af måledata er ikke bare for at kunne validere hvilken jordtype der er tale om, men også for at vurdere hvilken af de to anvendte infiltrationsmodeller, der er bedst at anvende. Som tidligere nævnt er det vanskeligt at bestemme Hortons parametre matematisk. Derfor ville lokale infiltrationsmålinger være en fordel for at kunne vurdere om Hortons model giver de ønskede resultater. Da parametrene i Green & Ampt er mere fysisk baseret, kan der laves forsøg til at bestemme disse parametre.

Overflademodel: Der er visse parametre, der ikke er taget højde for i dette projekt. En af dem er terrænhældningen. Det skyldes, at der er anvendt en tid-areal overflademodel, hvorfor der ikke behøves at tage højde for denne parameter. Mere hældning på overfladen, vil øge sandsynligheden for at der er mere overfladevand, som vil afstrømme fra de grønne arealer til de befæstede arealer. Ved en mere vandret overflade kan vandet opstuve i lavningsmagasiner og dermed reducere afstrømningsbidraget. Ved brug af eksempelvis en kinematisk bølgemodel, vil det være muligt at undersøge hvad betydning bl.a. terrænhældningen har for overfladeafstrømningen. Ved brug af den kinematiske bølgemodel i MOUSE, er Hortons infiltrationsmodel implementeret, hvormed det hydrologiske tab bliver medregnet. Ved brug af Green & Ampt kan der i stedet anvendes SWMM (Storm Water Management Model).

Sandsynlighed for afstrømning: I kapitel 2 gives der et bud på hvor meget af overfladevandet, der afstrømmer ud fra en given beskrivelse, såsom gentagelsesperiode. Et skridt videre i denne analyse, ville være at kunne estimere sandsynligheden for afstrømning ud fra en given beskrivelse. Eksempelvis ville det være praktisk at kunne definere hvor stor sandsynligheden for afstrømning ville være for en regnhændelse med en given gentagelsesperiode på 1 år, 2 år, 5 år osv., for alle tre jordtyper. Gentagelsesperioden kunne være ift. den relative afstrømning. Dernæst ville regnhændelsen kunne blive beskrevet yderligere, f.eks. sandsynlighed for mindste regnvarighed, der danner afstrømning, maksimale tørvejrperiode før en regnhændelse med overafstrømning til følge osv.

Worst-case scenarie: I dette projekt, antages worst-case scenariet at være Orbicons model. Dette er baseret på at der er flest brønde, der opstuver til kritisk kote med en gentagelsesperiode på 5 år i den befæstede del. Spørgsmålet er hvad der er defineret som worst-case scenariet. En ide kunne være at vende problemstillingen om. Ved at gøre dette, kunne der eksempelvis undersøges hvad parametrene i Hortons model ville blive, hvis der skulle dannes et afstrømningsvolumen på 10 mm. Eller hvad minimumsværdierne skulle være for bare at danne overfladeafstrømning.

Litteratur

- Aarhus Kommune, september 2014.** Aarhus Kommune. *Tillæg nr. 2 til Spildevandsplan 2013-2016. Håndtering af regnvand fra skybrud på overfladen i Lystrup.* Aarhus Kommune, 2014. URL: <http://www.aarhus.dk/da/borger/natur-og-miljoe/Vand/Oversvoemmelse/Planlaegning-og-Projekter/~media/Dokumenter/Teknik-og-Miljoe/Natur-og-Miljoe/Vand/Spildevand/Spildevandsplan-2013-2016/Tillaeg/Tillaeg-nr--2-til-Spildevandsplan-2013-16---Haandtering-af-skybrud-i-Lystrup.pdf>.
- Akan, september 1992.** Akan, A. Osman. *Horton Infiltration Equation Revisited.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 118(5), 828–830, 1992. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:5(828). URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1992\)118:5\(828\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:5(828)).
- Akan, juli 1985.** Akan, A. Osman. *Similarity Solution of Overland Flow on Pervious Surface.* Journal of Hydraulic Engineering, 111(7), 1057–1067, 1985. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:7(1057). URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1985\)111:7\(1057\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:7(1057)).
- Almedeij og Esen, 2014.** Almedeij, J. og Esen, I. I. *Modified Green-Ampt Infiltration Model for Steady Rainfall.* Journal of Hydrologic Engineering, 19(9), 04014011, 2014. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000944. URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000944](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000944).
- Aron, marts 1992.** Aron, Gert. *Adaptation of Horton and SCS Infiltration Equations to Complex Storms.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 118(2), 275–284, 1992. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:2(275). URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1992\)118:2\(275\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:2(275)).
- Brouwer, 1985.** Brouwer, C. *Chapter 2 - Soil and Water.* Natural Resources Management and Environment Department, 1985. URL: <http://www.fao.org/docrep/r4082e/r4082e03.htm>. Irrigation Water Management: Training Manual No. 1 - Introduction to Irrigation.
- Butler og Davies, 2004.** Butler, David og Davies, John W. *Urban Drainage.* Spon Press, 2. udgave, 2004. ISBN: 978-0-415-30607-2.
- Clapp og Hornberger, 1978.** Clapp, Roger B. og Hornberger, George M. *Empirical equations for some soil hydraulic properties.* Water Resources Research, 14(4), 601–604, 1978. ISSN 1944-7973. doi: 10.1029/WR014i004p00601. URL: <http://dx.doi.org/10.1029/WR014i004p00601>.
- DHI, marts 2015.** DHI. *Storm Water Runoff from Green Urban Areas – Modellers Guideline.* Danish Hydrological Institute, 2015.
- Govindaraju, Rao S., Corradini, Corrado, og Morbidelli, Renato.** *Overland Flow and Surface Runoff,* kapitel 4, side 55–90. Nova Science Publishers, Inc., 2012.
- Hansen, 1976.** Hansen, Lorens. *Jordtyper ved Statens Forsøgsstationer,* 1976. Soil Types in Danish State Experimental Stations.
- Hino, Fujita, og Shutto, 1987.** Hino, Mikio, Fujita, Koichi, og Shutto, Hideharu. *A laboratory experiment on the role of grass for infiltration and runoff processes.* Journal of Hydrology, 90(3), 303 – 325, 1987. ISSN 0022-1694. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90073-4](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(87)90073-4). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169487900734>.
- Hoyos og Cavalcante, 2015.** Hoyos, Estefanía Muñoz og Cavalcante, André Luís Brasil. *Sensitivity Analysis of One-Dimensional Infiltration Models.* The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015.
- IPCC, 2014.** IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report,* 2014. URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/>.

- Kale og Sahoo, november 2011.** Kale, Ravindra V. og Sahoo, Bhabagrahi. *Green-Ampt Infiltration Models for Varied Field Conditions: A Revisit*. Water Resources Management, 25(14), 3505–3536, 2011. ISSN 1573-1650. doi: 10.1007/s11269-011-9868-0. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-011-9868-0>.
- Klimatilpasning, februar 2015.** Klimatilpasning. *Nedbøren i Danmark fra 1874 til i dag*. Klimatilpasning, 2015. URL: <http://www.klimatilpasning.dk/viden-om/klima/klimaaendringeridanmark/aendringer-i-nedboer/nedboeren-i-danmark-fra-1874-til-i-dag.aspx>.
- Liang og Xie, 2001.** Liang, Xu og Xie, Zhenghui. *A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models*. Advances in Water Resources, 24(9), 1173 – 1193, 2001. ISSN 0309-1708. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00032-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00032-X). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030917080100032X>. Nonlinear Propagation of Multi-scale Dynamics Through Hydrologic Subsystems.
- Loll og Møldrup, september 2000.** Loll, Per og Møldrup, Per. *Soil Characterization and Polluted Soil Assessment*. Aalborg University, 2000.
- McCuen, 1973.** McCuen, Richard H. *The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling*. Journal of Hydrology, 18(1), 37 – 53, 1973. ISSN 0022-1694. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(73\)90024-3](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(73)90024-3). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169473900243>.
- Mein og Larson, 1973.** Mein, Russell G. og Larson, Curtis L. *Modeling infiltration during a steady rain*. Water Resources Research, 9(2), 384–394, 1973. ISSN 1944-7973. doi: 10.1029/WR009i002p00384. URL: <http://dx.doi.org/10.1029/WR009i002p00384>.
- Mishra, Tyagi, og Singh, 2003.** Mishra, Surendra Kumar, Tyagi, J. V., og Singh, Vijay P. *Comparison of infiltration models*. Hydrological Processes, 17(13), 2629–2652, 2003. ISSN 1099-1085. doi: 10.1002/hyp.1257. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.1257>.
- Morel-Seytoux og Khanji, 1974.** Morel-Seytoux, H. J. og Khanji, J. *Derivation of an equation of infiltration*. Water Resources Research, 10(4), 795–800, 1974. ISSN 1944-7973. doi: 10.1029/WR010i004p00795. URL: <http://dx.doi.org/10.1029/WR010i004p00795>.
- Musy, Hingray, og Picouet, 2014.** Musy, André, Hingray, Benoit, og Picouet, Cécile. *Hydrology – A Science for Engineers*. CRC Press, 2014. ISBN: 978-1-4665-9059-5.
- Ogden og Saghafian, september 1997.** Ogden, Fred L. og Saghafian, Bahram. *Green and Ampt Infiltration with Redistribution*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 123(5), 386–393, 1997. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:5(386). URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1997\)123:5\(386\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:5(386)).
- Papacharalampos, Konstantinos og Iordăchescu, Lucian. *Monitoring, Characterization, and Design of Urban Soil Hydrological and Climate Functions*. Master's thesis, Aalborg University, june 2016.
- Rawls, Brakensiek, og Miller, 1983.** Rawls, Walter J., Brakensiek, Donald L., og Miller, Norman. *Green-Ampt Infiltration Parameters from Soils Data*. Journal of Hydraulic Engineering, 109(1), 62–70, 1983. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:1(62). URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:1\(62\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:1(62)).
- Rossman og Huber, januar 2016.** Rossman, Lewis A. og Huber, Wayne C. *Storm Water Management Model Reference Manual*, United States Environmental Protection Agency, U.S. Environmental Protection Agency, 26 Martin Luther King Drive, Cincinnati, OH 45268, januar 2016.
- Saxton og Rawls, 2006.** Saxton, K.E. og Rawls, W.J. *Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions*. Soil Science Society of America Journal, 2006.
- Shao og Baumgartl, februar 2016.** Shao, Qi og Baumgartl, Thomas. *Field Evaluation of Three Modified Infiltration Models for the Simulation of Rainfall Sequences*. Soil Science, 181(2), 45–56, 2016. doi: 10.1097/SS.0000000000000136.

- Singh og Bhallamudi, 1998.** Singh, Vivekanand og Bhallamudi, S. Murty. *Conjunctive surface-subsurface modeling of overland flow*. Advances in Water Resources, 21(7), 567 – 579, 1998. ISSN 0309-1708. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708\(97\)00020-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708(97)00020-1). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170897000201>.
- SVK, oktober 2005.** SVK. *Skrift 27: Funktionspraksis for afløbssystemer under regn*, Spildevandskomiteen, oktober 2005. URL: http://ida.dk/sites/prod.ida.dk/files/Skrift27Funktionspraksisforafl%C3%B8bssystemerunderregn.pdf?_ga=1.214546389.39791191.1463329470.
- SVK, august 2008.** SVK. *Skrift 29: Forventede ændringer i ekstremregn som følge af klimaændringer*, Spildevandskomiteen, august 2008. URL: http://ida.dk/sites/prod.ida.dk/files/SVK_Skrift29_final.pdf?_ga=1.148991157.2023758509.1452848828.
- Tarboton, 2003.** Tarboton, David G. *Rainfall-Runoff Processes*. Utah University, 2003.
- US-EPA, februar 1998.** US-EPA. *Estimation of Infiltration rate in the Vadose Zone: Compilation of Simple Mathematical Models*, United States Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, februar 1998.
- USDA.** USDA. *Saturated Hydraulic Conductivity*. United States Department of Agriculture. URL: http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/office/ssr10/tr/?cid=nrcs144p2_074846.
- Walter, M. Todd, 2011.** Walter, M. Todd. Green and Ampt Infiltration. In *BEE 3710 – Physical Hydrology for Ecosystems*. Cornell University, 2011. URL: <http://www.hydrology.bee.cornell.edu/BEE3710Handouts/GreenAmpt11.pdf>.
- Ward, Trimble, Burckhard, og Lyon, 2015.** Ward, Andy D., Trimble, Stanley W., Burckhard, Suzette R., og Lyon, John G. *Environmental Hydrology*. CRC Press, 2015.
- Winther, Linde, Jensen, Mathiasen, og Johansen, 2011.** Winther, Leif, Linde, Jens Jørgen, Jensen, H. Thorkild, Mathiasen, Leo Lund, og Johansen, Niels Bent. *Afløbsteknik*. Polyteknisk Forlag, 6. udgave, 2011. ISBN: 978-87-502-1015-3.