Afstrømning fra Ubefæstede Arealers Påvirkning på Afløbssystemet

Camilla Skipper-Jørgensen

Kandidatspeciale

Vand & Miljø

Juni 2019

Forsidebillede: Opsamlingsrende til afstrømning fra det ubefæstet areal i Lystrup.
Foto: Camilla Skipper.

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Det Ingeniør- og
Naturvidenskabelige Fakultet
Institut for Byggeri og Anlæg
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Øst
www.civil.aau.dk

Titel

Afstrømning fra ubefæstede arealers påvirkning på afløbssystemet

Projekttype

Kandidatspeciale

Projektperiode

September 2018 - juni 2019

Forfatter

Camilla Skipper-Jørgensen

Vejledere

Per Møldrup
Søren Liedtke Thorndahl

Sideantal: 82 ekskl. bilag
Bilag: A - F
Afsluttet: 7. juni 2019

Synopsis:

I dette kandidatspeciale undersøges overfladeafstømning under danske jordforhold, for at vurdere påvirkningen på afløbssystemet. Analysen er opdelt i fem trin inputparametre, afstrømningsmodel, overfladeafstrømning, afløbsmodel og påvirkning på afløbssystem.
I første trin undersøges inputparametrene, hvor der tages udgangspunkt i både danske og amerikanske jordprøver samt jordprøver fra et caseområde placeret i Lystrup. Der tages udgangspunkt i caseområdet i Lystrup, da overfladeafstrømning og jordforhold er registreret.
Anden trin er opstilling af en dynamisk afstrømningsmodel, som beregner infiltrationshastighed i den umættede zone. Afstrømningsmodellen kalibreres op imod registreret afstrømningsdata fra Lystrup, og benyttes til at undersøge overfaldeafstrømning under danske jordforhold, hvilket er tredje trin i analysen. I fjerde trin opsættes afløbsmodellen over caseområdet i Lystrup. Afløbsmodellen modificeres så de ubefæstede arealer inkorporeres, og kan defineres ud fra resultatet af afstrømningsmodellen.
Det femte og sidste trin vurderes påvirkningen af afløssystemet ud fra ændringer af afløbssystemets funktionspraksis ift. en referencemodel, hvor de ubefæstede arealer ikke bidrager til afløbssystemet. Undersøgelsen foretages i MIKE URBAN og viser at overfaldeafstrømning fra ubefæstede arealer har betydning for afløbssystemet.

Abstract

In this Master thesis it's investigated how surface runoff from impervious areas impact the drainage system. The surface runoff is calculated under Danish soil conditions, to evaluate the impact on the drainage system in Denmark. The analysis is divided into five steps: input parameters, runoff model, surface runoff, drainage model and impact on drainage system.

The first step is analysis of the input parameters which include both Danish and American soil samples as well as soil samples from a case area located in Lystrup. The case area in Lystrup is included because the surface drainage and soil conditions are registered here. Which make it possible to compare calculated runoff with measured runoff.

Step number two is to set up a dynamic model out of the data from Lystrup. The dynamic model calculates the infiltration rate in the unsaturated zone to investigated the surface runoff.

The runoff model is calibrated against recorded runoff data from Lystrup and used to investigate surface runoff from Danish soil conditions. This is step number three. Step number four in the analysis is to setup the drainage model for the case area in Lystrup. The drainage model is modified so the impervious areas are incorporate in the model. The impervious area is defined from the result of the runoff model.

The influence of the drain system is step five in the analysis. The influence of the impervious areaas on the drainge system is analysis based on changes in the drainage system's functional practice vs. a reference model where the impervious areas doesn't contribute to the drainage system.

The study has been carried out in MIKE URBAN and shows that surface runoff from impervious areas is importance for the drainage system to make sure it is calculated correct.

Forord

Dette kandidatspeciale er udarbejdet af specialestuderende Camilla Skipper-Jørgensen som afslutning på kandidatuddannelsen i Vand og Miljø på Aalborg Universitet. Rapporten er udarbejdet i perioden september 2018 - juni 2019 og omhandler afstrømning fra ubefæstede arealer og dens påvirkning på afløbssystemet.

Udgangspunktet for projektet er et caseområde beliggende i Lystrup, nord for Aarhus, hvor der i forbindelse med et forskningsprojekt (MOGO) er blevet indsamlet data vedrørende afstrømning og jordforhold. Dataen danner baggrund for kalibrering af modeller, som benyttes i projektet.

Tak
Der rettes en tak til professor Per Møldrup og lektor Søren Thorndahl for konstruktiv og inspirerende vejledning. Derudover takkes Århus Vand for udlevering af afløbsmodel og PhD-studerene Kristoffer Nielsen fra EnviDan for sparring og udlevering af data for caseområdet i Lystrup. Til sidst takkes Alexander Achton-Boel, Peter Muhlig og Christina Skipper for hjælp til gennemlæsning af rapport.

Læsevejledning
I rapporten henvises der til kilder vha. Harvard-metoden, hvor kilder noteres med efternavn og årstal, [Efternavn, år]. En kilde placeret før punktum henviser kun til den pågældende sætning og er kilden placeret efter punktum henvises til det pågældende afsnit. Bagerst i rapporten findes litteraturlisten, hvor kilderne er listet i alfabetisk rækkefølge efter efternavn på førstnævnte forfatter.

Der refereres igennem rapporten til figurer, tabeller og formler. Disse er nummereret efter kapitel og fortløbende nummer. Bagerst i rapporten forefindes bilag, som er refereret med bogstav.

Camilla Skipper-Jørgensen

Indhold

1 Regnvandshåndtering i Danmark **1**
- 1.1 Funktionspraksis . . . 2
- 1.2 Problemformulering . . . 3

2 Processer for jord og afløbssystem **5**
- 2.1 Infiltration . . . 5
- 2.2 Dræning af jorden . . . 11
- 2.3 Overfladeafstrømning . . . 14
- 2.4 Afløbssystem . . . 19

3 Rapportstruktur **21**

4 Inputparametre **23**
- 4.1 Jorddata . . . 24
- 4.2 Regndata . . . 30

5 Afstrømningsmodel **35**
- 5.1 Modificering af afstrømningsmodel . . . 35
- 5.2 Kalibrering af afstrømningsmodel . . . 38
- 5.3 Følsomhedsanalyse ift. jordparametre . . . 40

6 Overfladeafstrømning **43**
- 6.1 Overfladeafstrømning i Lystrup . . . 44
- 6.2 Overfladeafstrømning ift. jordtype . . . 46

7 Afløbsmodel **49**
- 7.1 Modelopbygning . . . 50
- 7.2 Afstrømning fra ubefæstede arealer . . . 51
- 7.3 Opsætning af simuleringskriterier . . . 55

8 Påvirkning af afløbssystemet **57**
- 8.1 Påvirkning på afløbssystemet i caseområdet . . . 57
- 8.2 Påvirkning på afløbssystemet ift. jordtype . . . 60

9 Klimaudviklings påvirkning på afløbssystemet **65**
- 9.1 Klimaudviklingens betydning for caseområdet . . . 66
- 9.2 Klimaudviklings betydning ift. jordtype . . . 68

10 Diskussion **71**

11 Perspektivering **75**

12 Konklusion **79**

Litteratur **81**

A Analyse af jorden i Lystrup **83**

B Opsætning af MMS-Model **87**

C Jordparametre fra det danske jordkartotek **93**

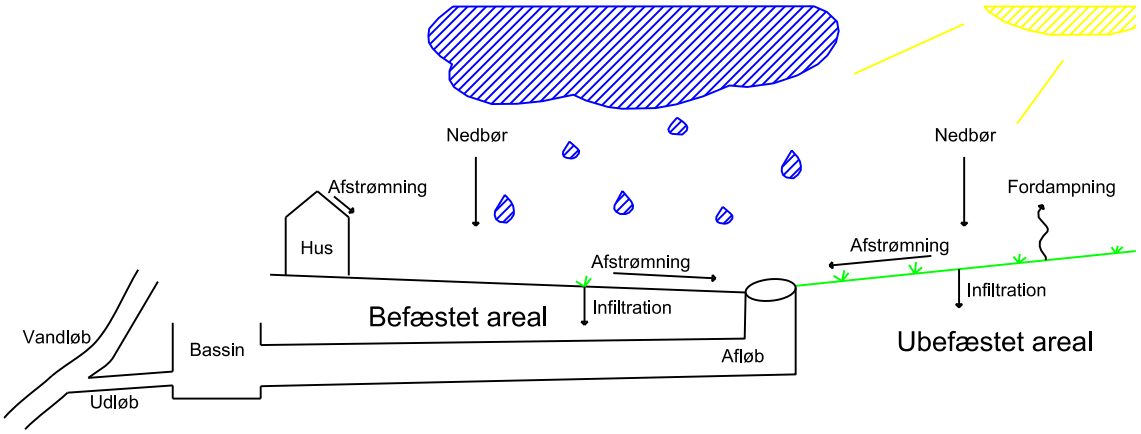
D Følsomhedsanalyse **97**

E Klimafaktorer til fremskrivning af regnserie **99**

F Elektronisk bilag **101**

Regnvandshåndtering i Danmark 1

I Danmark dimensioneres afløbssystemer til bl.a. at håndtere vandmængderne under regn. Afløbssystemerne afleder regnvandet til havet, søer, vandløb og rensningsanlæg for at undgå vand uhensigtsmæssige steder. Det er ikke alt regnvand, som ender i afløbssystemet under en regnhændelse. Dele af regnvandet infiltrerer til jorden, fordamper tilbage til atmosfæren eller tilbageholdes i oplandet, og kun det resterende afstrømmer til afløbssystemet. Vandet, som ender i afløbssystemet ledes til recipienten (vandløb, søer eller havet), og forsinkes undervejs i et regnvandsbassin, for at vandløbet ikke overbelastes som illustreret på figur 1.1.



Figur 1.1. Konceptuel model over vandbalancen for overfladeafstrømning fra både befæstede og ubefæstede arealer samt afløbssystem til regnvand.

Når der i dag dimensioneres afløbssystemer til regnvand, defineres oplandsarealerne ud fra befæstelsesgraden. Det medfører, at bidraget fra ubefæstede arealer negligeres, da det antages, at 100 % af regnvandet forsvinder i oplandet ved infiltration, tilbageholdelse samt fordampning, og derved ikke bidrager til afløbssystemet. Denne antagelse er ikke fuldkommen, da der kan forekomme regnhændelser, som skaber overfladeafstrømning fra ubefæstede arealer, hvilket der ikke tages højde for.

Overfladeafstrømning fra ubefæstede arealer opstår, når regnvandet ikke kan infiltrere og derfor vil afstrømme på jordoverfladen. Vandmængden, som vil afstrømme, afhænger af jordtypen, jordens vandmætning, vegetationen på overfladen, terrænhældningen, regnintensitet osv. Det er derfor nødvendigt at undersøge jordforholdene for at kende infiltrationen og derved afstrømningen til afløbssystemet.

Det er ikke nyt at beregne afstrømning fra ubefæstede arealer, og der findes i dag også afløbsmodeller til beregning af afløbssystemer, hvor det er muligt at tage højde for afstrømning fra ubefæstede arealer. Modellerne benyttes sjældent i praksis i Danmark, og ved undersøgelse af afstrømning, benyttes ofte amerikanske standardværdier for en sandet, siltet og leret jordklasse. De valgte standard jordparametre stemmer ikke nødvendigvis overens med danske jordforhold. Der er derfor risiko for fejlvurdering af infiltrationen, og det er derfor nødvendigt at kende jordforholdene for at kunne vurdere jordklassen og den reelle risiko for overfladeafstrømning. [Spildevandskomiteen, 2005]

Det forudsiges at det globale klima vil ændre sig over de næste 100 år, hvilket stiller krav til det fremtidige afløbssystem. Ifølge Spildevandskomiteen, 2008 vil klimaændringerne betyde generelt stigende nedbør, med færre men kraftigere nedbørshændelser i Danmark. Det kan derfor blive nødvendigt at revurdere antagelsen om bidraget fra ubefæstede arealer. Det skyldes at kraftigere regnhændelser øger risikoen for, at de ubefæstede arealer bidrager med afstrømning til afløbssystemet.

Det ekstra bidrag til afløbssystemet fra de ubefæstede arealer kan få betydning for afløbssystemets funktionspraksis, da det ikke er dimensioneret til at håndtere den ekstra vandmængde. Ud over et ekstra afstrømningsbidrag fra de ubefæstede arealer, vil fremtidig øget regn medføre en øget overfladeafstrømning fra de befæstede arealer. Det sætter krav til afløbssystemet, der ikke er dimensioneret til at håndtere vandmængderne og risikoen for oversvømmelse vil derfor øges. Det er altså både afstrømning fra befæstede og ubefæstede arealer, som påvirkes af klimaændringerne. Det er derfor nødvendigt, at undersøge hvorvidt antagelserne omkring de ubefæstede arealer skal revurderes, for at afløbssystemet også i fremtiden kan håndtere de reelt forekomne vandmængder.

1.1 Funktionspraksis

Regnvandssystemer dimensioners til at overholde en given funktionspraksis, som sættes af kommunen/forsyningen. Funktionspraksissen er krav til regnhændelser, som afløbssystemet skal kunne håndtere, uden at der forekommer vand på terræn. Minimumskravet til funktionspraksissen er sat af Spildevandskomiteen og defineres ud fra en gentagelsesperiode for vand på terræn. Minimumskravet er jf. skrift 27 hvert 5. år for separatsystemer og hvert 10. år for fællessystemer. [Spildevandskomiteen, 2005] Efterfølgende har Spildevandskomiteen udgivet skrift 31, til bestemmelse af serviceniveau for regnvand på terræn. Anbefalingen er her 20 cm vand på terræn i parkområder hvert 30. år og 10 cm i boligområder hvert 100. år. [Spildevandskomiteen, 2017]

Hvorvidt afløbssystemet overholder funktionspraksissen for opstuvning til terræn, kan jf. Spildevandskomiteen, 2005 undersøges ud fra beregningsniveau 2 og 3. Ved beregningsniveau 2 benyttes en CDS-regn (Chicago Design Storm), som designes ud fra gentagelsesperioden, som skal overholdes. Det undersøges derved, om afløbssystemet kan håndtere regnhændelsen. [Spildevandskomiteen, 2005]

Ved brug af en CDS-regn kan der ske en overestimering af regnhændelsen, da den benytter den givne gentagelsesperiode for regnintensiteten i alle tidsskridt. Det medfører, at en regnhændelse på 240 min også indeholder regnintensiteter for regnvarigheder på 1 min, med den givne gentagelsesperiode. Det kan skabe en overestimering, da sandsynligheden

for at en langvarig regnhændelse, også vil indeholde højintens peakværdier er minimal. CDS-regn benyttes alligevel ofte til vurdering af overholdelse af funktionspraksis pga. simuleringstiden.

Beregningsniveau 3 tager udgangspunkt i en LTS-simulering (Long Term Statistics) med en historisk regnserie. Derved skabes det reelle billede af afløbssystemets funktion, og giver mulighed for at undersøge gentagelseperioden for opstuvning til terræn for hver enkelt brønd. Der kan ikke undersøges for gentagelsesperioder større end regnseriens længde. Den statistiske sikkerhed for gentagelsesperioden øges derved med stigende længde af regnserien.

Ved brug af historiske regnhændelser forlænges simuleringstiden, hvilket kan være årsag til at vælge CDS-regn frem for en historisk regnserie til undersøgelse af afløbssystemet. Ved dimensionering af bassiner kan det være en fordel at benytte en historisk regnserie, da der her tages højde for koblede regnhændelser, som kan have betydning for bassinkapaciteten.

Inkorporering af jordens infiltrationsevne indgår ikke i beregningsmetoderne og bliver sjældent brugt i Danmark i forbindelse med dimensionering af afløbssystemer, da det antages, at ubefæstede arealer ikke bidrager til afløbssystemet. De to fagområder omkring infiltration og afløbssystemer kombineres derved sjældent i dag, selvom der forelægger allerede kendt viden inden for begge fagområder.

1.2 Problemformulering

Afstrømningsbidraget fra ubefæstede arealer medregnes ofte ikke i afløbsmodeller i dag. Det er derfor relevant at undersøge, hvorvidt et ekstra afstrømningsbidrag fra de ubefæstede arealer har betydning for afløbssystemets funktionspraksis. Det forudsiges, at klimaforandringerne vil øge nedbøren i Danmark. Øget nedbør vil øge sandsynligheden for afstrømning fra de ubefæstede arealer, hvilket kan have betydning for fremtidig dimensioneringspraksis.

Der er kendt viden indenfor både infiltration og afløbsmodellering, samt der er opstillet metoder til at medregne afstrømningsbidraget fra de ubefæstede arealer i afløbsmodeller. Disse metoder benyttes sjældent i praksis i Danmark. Det er derfor relevant at undersøge afstrømningen ved danske jordforhold for at finde en simpel metode, som kan benyttes i fremtiden og kategorisere jordtyperne efter risiko for påvirkning af afløbssystemet. Det kræver en analyse af overfladeafstrømning under danske jordforhold, for at kunne finde en sammenhæng mellem jordparametrene og afstrømningsbidraget, hvilket leder frem til følgende problemformulering:

> *Hvilke jordtyper giver anledning til overfladeafstrømning, og hvilken betydning har overfladeafstrømningen for afløbssystemets funktionspraksis?*

For at undersøge sammenhænge mellem jordforhold og afstrømning fra danske jordtyper skal jordparametrene og den kendte viden om infiltration, samt afløbssystemer belyses. Den kendte viden skaber et grundlag for videre analyse af infiltrationen, så den reelle afstrømning kan beregnes. Derudover skal afløbsmodellen udvides, så der tages højde for ubefæstede arealer, og så betydningen af det ekstra afstrømningsbidrag kan vurderes.

Processer for jord og afløbssystem 2

For at vurdere afstrømningens påvirkning på afløbssystemets funktionspraksis, skal den nuværende viden på området undersøges. Det skaber en forståelse for processerne fra infiltration og overfladeafstrømning til håndtering af overfladeafstrømning i afløbsmodellen. Forståelse for processerne er nødvendig for at opstille en afstrømningsmodel, som kan simulere overfladeafstrømningen fra ubefæstede arealer under danske forhold, samt for at udvide afløbsmodellen så de ubefæstede arealer bliver inkorporeret. Relevant baggrundsviden omhandlende infiltration, overfladeafstrømning og afløbssystemer vil derfor blive belyst i det følgende.

2.1 Infiltration

Som udgangspunkt vil regn, der lander på ubefæstede arealer infiltrere til jorden. Infiltrationen afhænger af jordtypen, som sammen med regnintensiteten er afgørende for overfladeafstrømningen fra ubefæstede arealer. Jordens infiltrationsevne afhænger af flere faktorer herunder bl.a. jordtype, vegetation, terræn og jordens vandmætning. Jordens vandmætning er afgørende for infiltrationsevnen, og ved fuld vandmætning vil de ubefæstede arealer fungere som befæstede arealer og give fuld afstrømning. Det betyder, at risikoen for overfladeafstrømning øges ved stigende vandindhold.

Til bestemmelse af jordens infiltrationsevne er der udviklet forskellige infiltrationsmodeller. Der findes både empirisk og teoretisk bestemte infiltrationsmodeller, men fælles for infiltrationsmodellerne er Darcy's Lov, formel 2.1, som danner grundlag for infiltration. [Loll og Moldrup, 2000]

$$v = -K_s \cdot \frac{\Delta H}{\Delta l} \tag{2.1}$$

Hvor:

v	Infiltrationshastighed	[m s^{-1}]
K_s	Vandmættet hydraulisk ledningsevne	[m s^{-1}]
ΔH	Trykforskel	[m]
Δl	Længde af jordsøjle	[m]

Darcy's Lov er eftervisningen af sammenhæng mellem strømning gennem en vandmættet jordsøjle og trykforskellen mellem ind- og udløb. Ud fra Darcy's Lov kan den vandmættede

hydrauliske ledningsevne bestemmes. Denne har betydning for jordens infiltrationsevne og indgår i kendte infiltrationsmodeller. [Loll og Moldrup, 2000]

To af de kendte infiltrationsmodeller, Horton og Green & Ampt, er hhv. empirisk og teoretisk bestemte [Shao og Baumgartl, 2016; Akan, 1992]. Begge er tilnærmede infiltrationsmodeller, som fremkommer af Darcy's Lov. Der er også udviklet en tredje infiltrationsmodel, MMS-modellen (The Moving Mean Slope), som kobler Darcy's lov med massebevarelsesligningen, og kan derved eftervise infiltrationen ned gennem dybden, modsat de tilnærmede infiltrationsmodeller.

2.1.1 Hortons infiltrationsmodel

Kendetegn for Hortons infiltrationsmodel:

- Empirisk infiltrationsmodel
- En beregningsboks ned i dybden

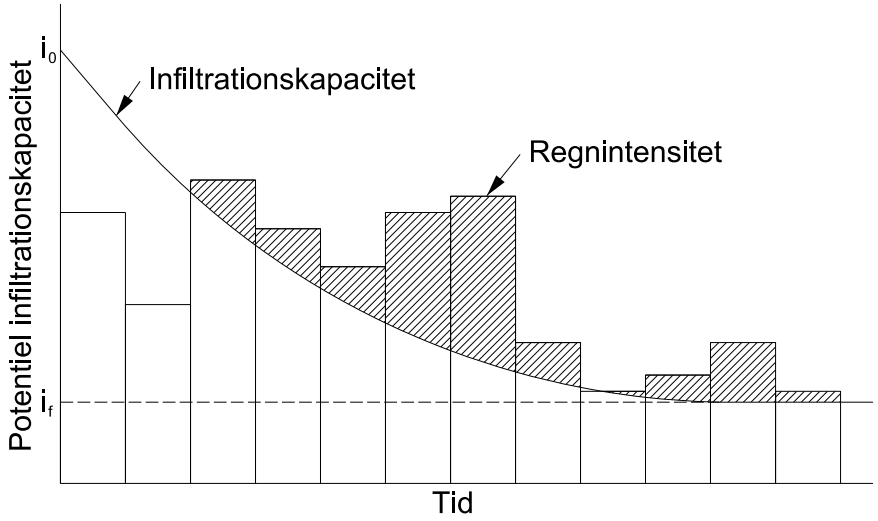
Hortons infiltrationsmodel er en empirisk infiltrationsmodel og benytter empiri i form af forsøgsbaserede værdier til opsætning af modellen. Infiltrationsmodellen har derved ikke direkte sammenhæng til jordparametrene. Den originale Horton infiltrationsmodel fremgår af formel 2.2. [Horton, 1939]

$$v = v_f + (v_0 - v_f)e^{-kt} \tag{2.2}$$

Hvor:

v	Infiltrationshastighed	[m s^{-1}]
v_f	Endelig hastighed	[m s^{-1}]
v_0	Initial hastighed	[m s^{-1}]
k	Henfaldskonstant	[s^{-1}]
t	Tid	[s]

Infiltrationshastigheden, v, beregnes ud fra de tre parametre, endelig- og initial infiltrationshastighed samt henfaldskonstanten. Den endelige infiltrationshastighed, v_f kan ifølge Rossman og Huber, 2016 sammenlignes med den vandmættede hydrauliske ledningsevne, K_s, hvor initial infiltrationshastighed, v_0, og henfaldskonstanten, k, er empiriske værdier, som bestemmes ud fra forsøgsmålinger. Den initiale infiltrationshastighed, v_0, er startbetingelsen for infiltrationen og henfaldskonstanten, k, beskriver jordens infiltrationstab over tid. En konceptuel model over infiltrationshastigheden, v, over tid ved benyttelse af Hortons infiltrationsmodel er illustreret på figur 2.1. [Rossman og Huber, 2016]



Figur 2.1. Konceptuel model over infiltrationsforløbet ved Horton infiltrationsmodel [Slys, 2013 (red.)].

Infiltrationshastigheden, beregnet ud fra Hortons infiltrationsmodel, falder med tiden og tager ikke højde for regnintensiteten, som det fremgår af figur 2.1. Infiltrationshastigheden, v, falder indtil endelig infiltrationshastighed, v_f, svarende til den vandmættede hydrauliske ledningsevne, K_s. Regnintensitet større end infiltrationshastigheden v vil afstrømme på overfladen og definere overfladeafstrømningen fra det ubefæstet areal.

Hortons infiltrationsmodel er simpel at benytte pga. de få inputparametre, og er derfor ofte benyttet i forskellige sammenhænge. Da infiltrationsmodellen er empirisk og ikke har direkte forbindelse til jordparametrene, kan infiltration ikke kobles til de enkelte jordparametre, som hydraulisk ledningsevne, porøsitet osv. Hortons infiltrationsmodel er derved ikke oplagt at benytte til sammenligning af infiltration fra forskellige jordtyper.

2.1.2 Green & Ampt infiltrationsmodel

Kendetegn for Green & Ampt infiltrationsmodel:

- Fysisk baseret infiltrationsmodel
- En beregningsboks ned i dybden

Infiltrationsmodellen opstillet af Green & Ampt er en omskrivning af Darcy's Lov, og tager derved udgangspunkt i de samme fysiske parametre. Green & Ampt infiltrationsmodel er blevet modificeret gennem tiden. Der vil derfor blive refereret til den originale Green & Ampt infiltrationsmodel, som Green & Ampt 1912 gennem rapporten. Green & Ampt 1912 fremgår af formel 2.3. [Green og Ampt, 1912]

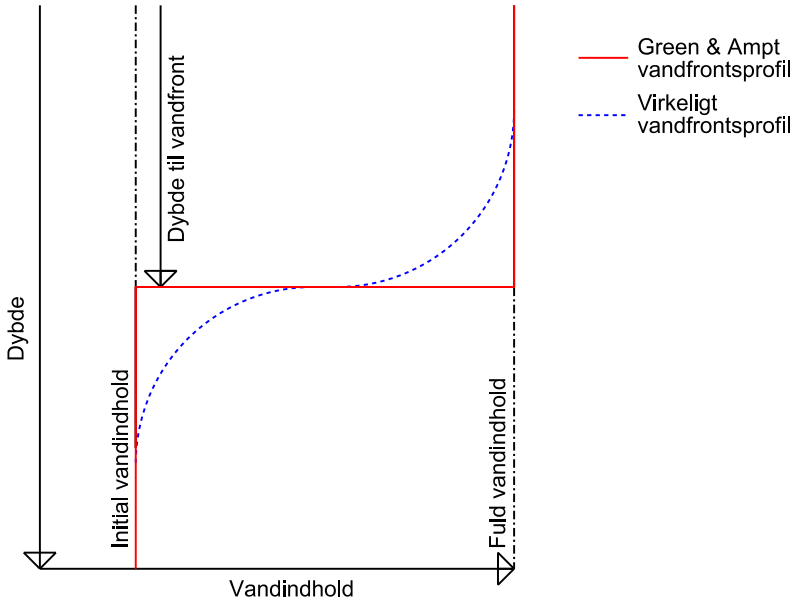
$$v = K_s \cdot \left(1 + \frac{\psi_e}{Z_f}\right) \tag{2.3}$$

$$Z_f = \frac{I_t}{\phi - \theta_{FC}} \tag{2.4}$$

Hvor:

v	Infiltrationshastighed	[m s^{-1}]
K_s	Vandmættet hydraulisk ledningsevne	[m s^{-1}]
ψ_e	Trykpotentiale ved luftindtrængen	[m]
Z_f	Dybde til vandfronten	[m]
ϕ	Porøsitet	[m^3 m^{-3}]
θ_{FC}	Vandindhold ved markkapacitet	[m^3 m^{-3}]
I_t	Akkumuleret infiltrationsmængde	[m]

Infiltrationshastigheden beregnes i Green & Ampt 1912 ud fra fysiske jordparametre som eksempelvis vandmættet hydraulisk ledningsevne, trykpotentiale ved luftindtrængen, vandindhold osv. Da Green & Ampt 1912 tager højde for jordparametrene, kan infiltrationen kobles til parametrene, modsat Hortons infiltrationsmodel. Det gør Green & Ampt 1912 egnet til at undersøge sammenhængen mellem infiltration og jordtype. Antagelserne omkring infiltrationens forløb ned gennem jorden ved benyttelse af Green & Ampt 1912 fremgår af figur 2.2.



Figur 2.2. Konceptuel model over infiltrationsforløbet ned gennem jorden ved Green & Ampt infiltrationsmodel [Kale og Sahoo, 2011 (red.)].

Vandfronten vil ud fra Green & Ampt 1912 bevæge sig ned gennem jorden som en skarp front illustreret på figur 2.2. Denne bevægelse af vandfronten stemmer ikke overens med virkeligheden, hvor vandindholdet gradvist vil falde fra fuld vandmætning til initial vandindhold. Udformning af vandfronten varierer ift. jordtype.

2.1.3 MMS-Model (The Moving Mean Slope)

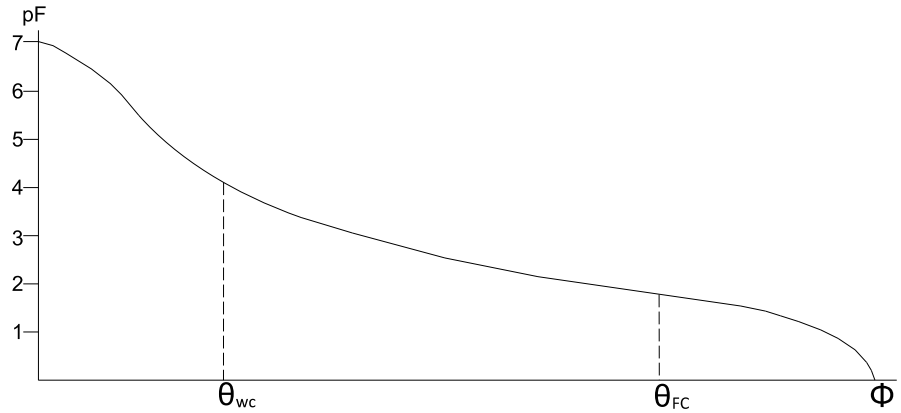
Kendetegn for MMS-Model (The Moving Mean Slope):

- Fysisk baseret umættet zonemodel
- Flere beregningsbokse ned i dybden

MMS-modellen kobler Darcy's Lov, formel 2.1 og massebalancen for derudfra at beregne vandindhold og trykpotentiale ned gennem dybden til forskellige tidspunkter [Loll og Moldrup, 2000]. Modellen kan f.eks. benyttes til at estimere vandfrontens bevægelse og derved bestemmelse af trykpotentiale ved vandfronten. Dybden inddeles i en række bokse, og modellen er opstillet til at beregne en række parametre i og imellem boksene. For at kunne opstille en MMS-model skal følgende inputparametre kendes:

R	Regnintensitet	[m]
ϕ	Porøsitet	[m^3 m^{-3}]
θ_i	Initial vandindhold	[m^3 m^{-3}]
ψ_e	Trykpotentiale ved luftindtrængen	[m]
K_s	Vandmættet hydraulisk ledningsevne	[m s^{-1}]
b	Campbell b	[-]
d	Dybde af boksene	[m]
t	Tidsskridt	[s]

MMS-modellen benytter flere inputparametre end hhv. Horton og Green & Ampt infiltrationsmodel, og kræver derfor et større kendskab til jordens egenskaber for at opstilles. Ud over tidligere benyttede inputparametre benyttes også Campbell b, som er en jordafhængig konstant, der fremkommer af hældningen på jordens retentionskurve. Jordens retentionskurve er logaritmen til trykpotentialet (pF) som funktion af vandindholdet. En konceptuel model af en retentionskurve fremgår af figur 2.3.



Figur 2.3. Konceptuel illustration over en retentionskurve. Vandindhold som funktion af trykpotientiale. pF er log(ψ), θ_{wc} er vandindhold ved visnegrænsen, θ_{FC} er vandindhold ved markkapacitet og ϕ er vandindhold ved vandmætning.

Campbell b indgår i beregning af aktuel trykpotentiale og aktuel hydraulisk ledningsevne formel 2.5 og 2.6, og har derved betydning for jordens infiltrationsevne [Loll og Moldrup, 2000]. Dybden af boksene er valgfri, og tidsskridtet afhænger af regnintensiteten, da

forholdet er afgørende for, om modellen er stabil. Parametrene, som beregnes i og imellem boksene, fremgår af bilag B.

$$K_A = K_s \left(\frac{\theta}{\phi} \right)^{2b+3} \tag{2.5}$$

$$\psi_A = \psi_e \cdot \left(\frac{\theta}{\phi} \right)^{-b} \tag{2.6}$$

Hvor:

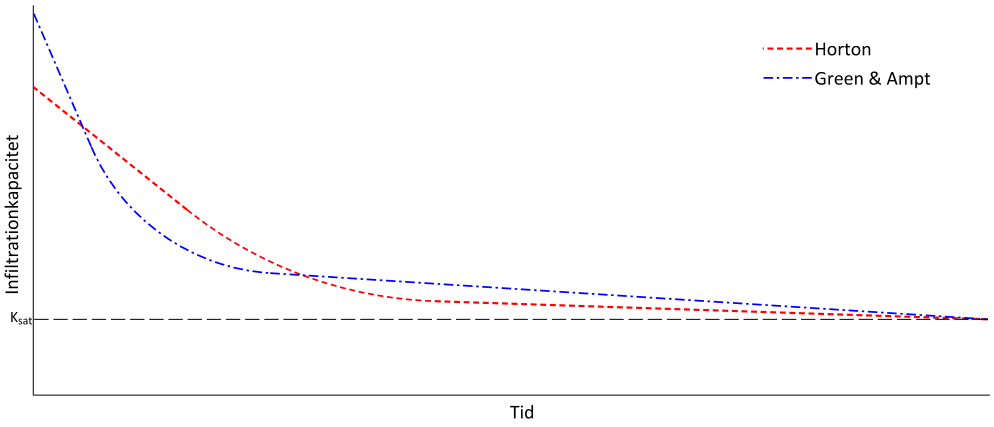
K_A	Aktuel hydraulisk ledningsevne	[m s^{-1}]
K_s	Vandmættet hydraulisk ledningsevne	[m s^{-1}]
θ	Vandindhold	[m^3 m^{-3}]
ϕ	Porøsitet	[m^3 m^{-3}]
b	Campbell b	[-]
ψ_A	Aktuel trykpotentiale	[m]
ψ_e	Trykpotentiale ved luftindtrængen	[m]

MMS-modellen beregner infiltrationen ned gennem dybden, og kan derfor benyttes til at undersøge vandfrontens bevægelse. Derudfra kan jordens trykpotentiale undersøges for forskellige jordtyper. MMS-modellen kobler teorien fra Darcy's Lov, formel 2.1, og massebalance, og vurderes derfor at give et retvisende resultat for infiltrationen i den umættede zone.

2.1.4 Vurdering af infiltrationsmodellerne

De tre kendte modeller til beregning af infiltration, Horton, Green & Ampt og MMS-modellen har forskellige opbygninger og derved også forskellige fordele og ulemper. MMS-modellen er den eneste af de tre infiltrationsmodeller, som har flere beregningsbokse, og derved beregner forløbet ned gennem dybden. Det medfører, at jordlagene kan defineres forskelligt, og ændring i jordtype ned gennem dybden får derved indflydelse på den beregnede infiltrationshastighed. Det er ikke muligt ved hhv. Horton og Green & Ampt, som begge består af en beregningsboks og derved kun medtager en jordtype. MMS-modellen er udviklet til at beregne processerne i den umættede zone, og beregner derfor ikke direkte infiltrationshastigheden. Det medfører, at MMS-modellen ikke benyttes til at undersøge infiltrationen i nærværende kandidatspeciale, men til forståelse af processerne i jorden som finder sted i den umættede zone.

Horton og Green & Ampt infiltrationsmodel er opbygget forskelligt, og udviklingen af infiltrationshastighed over tid er derfor forskellig. Forløbet afhænger af jordtypen for begge infiltrationsmodeller. En konceptuel visualisering af infiltrationshastighedens forløb for de to modeller fremgår af figur 2.4.



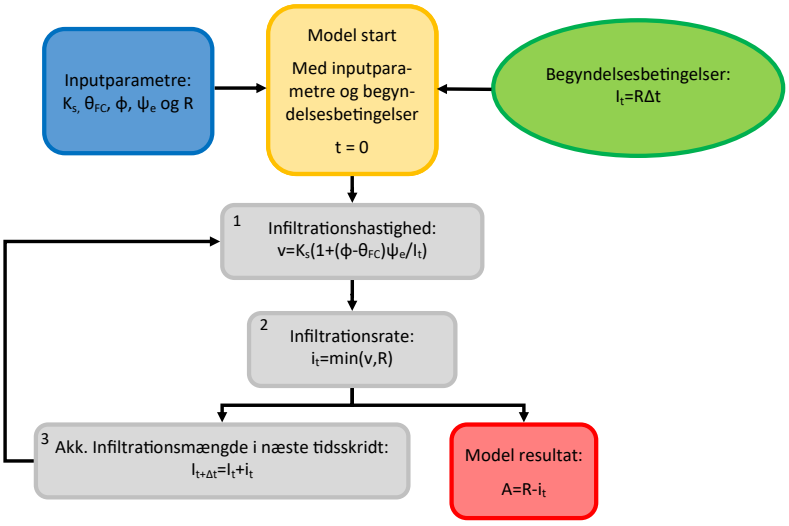
Figur 2.4. Konceptuel illustration af jordens infiltrationskapacitet over tid for Horton og Green & Ampt ved konstant regnintensitet.

Fælles for de to infiltrationsmodeller er et fald i infiltrationshastighed indtil et minimum omkring den vandmættede hydrauliske ledningsevne, K_s. Det er derfor forløbet indtil fuld vandmætning, som adskiller infiltrationsmodellerne fra hinanden og differentierer resultaterne. Hortons infiltrationsmodel er en empirisk model med kun tre inputparametre, hvilket gør den simpel at benytte. Da inputparametrene ikke har direkte tilknytning til jordparametrene, benyttes Hortons infiltrationsmodel ikke til analyse af infiltration under danske jordforhold i nærværende kandidatspeciale.

Green & Ampt 1912 er en fysisk baseret infiltrationsmodel, hvilket betyder, at jordparametrene indgår i infiltrationsmodellen. Det er derved muligt at opstille sammenhænge mellem jordparametrene og beregnet infiltration i modsætning til Hortons infiltrationsmodel. Det gør Green & Ampt 1912 anvendelig til analyse af infiltrationen under forskellige jordforhold. Der tages derfor udgangspunkt i teorien bag Green & Ampt 1912 til vurdering af overfladeafstrømningen og opsætning af afstrømningsmodellen i denne rapport.

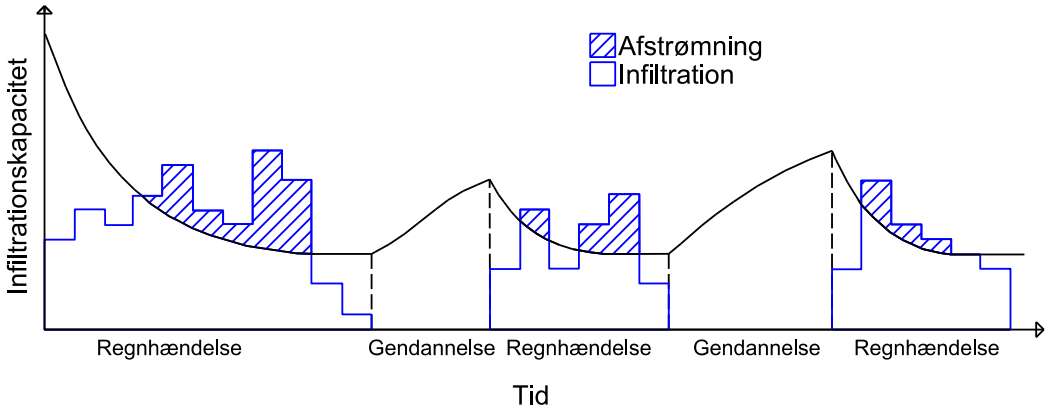
2.2 Dræning af jorden

I beregningsprocessen af afstrømning med udgangspunkt i Green & Ampt 1912 (formel 2.3 på side 7), afhænger infiltrationshastigheden af jordens vandindhold. Da der ikke indgår dræning af jorden, kan jordens vandindhold ikke reduceres, som det fremgår af figur 2.5. Det medfører, at infiltrationshastighed beregnet ud fra Green & Ampt 1912 ikke gendannes efter endt regnhændelse. Green & Ampt 1912 er derfor ikke egnet til at beregne afstrømning ift. koblede regnhændelser og varierende regnintensitet.



Figur 2.5. Flowdiagram over beregningsprocesser i afstrømningsmodel som tager udgangspunkt i Green & Ampt 1912 [Green og Ampt, 1912]. 1: Forklaret i afsnit 2.1.2 2: Mindste værdi af v og R. 3: Samlet infiltrationsmængde til tiden.

For at beregne jordens vandindhold ved begyndelsen af en regnhændelse, skal dræningen medregnes, som angiver jordens gendannelsesproces. Det skyldes, at jorden ikke nødvendigvis gendannes til det initiale vandindhold, mellem to regnhændelser, som det fremgår af figur 2.6. Ved medregning af dræningen, bliver det muligt at undersøge jordens infiltrationhastighed over længere tidsperioder med koblet og varierende regnintensitet.



Figur 2.6. Konceptuel model over jordens gendannelse ved koblede regnhændelser.

For at medregne dræningen, tages der udgangspunkt i en udvidet Green & Ampt infiltrationsmodel (Green & Ampt 2016), hvor dræningen indgår i infiltrationsmodellen, jf. Shao og Baumgartl, 2016. Beregningsprocessen for afstrømning med udgangspunkt i Green & Ampt 2016 fremgår af figur 2.7.

Figur 2.7. Flowdiagram over beregningsprocesser i afstrømningsmodel som tager udgangspunkt i Green & Ampt 2016, hvor dræning indgår [Shao og Baumgartl, 2016]. De to processer foregår sideløbende.

1. I Green & Ampt 2016, er trykpotentialet ved vandfronten, som benyttes i Green & Ampt 1912 formel 2.3 på side 7, erstattet med en konstant, λ, så jordforskellene der opstår gennem jordens trykpotentiale negligeres. Det gør den vandmættede hydrauliske ledningsevne til eneste faktor, som skelner mellem jordtyperne ved beregning af infiltrationshastigheden.

2. Forklaret under beregningsproces for Green & Ampt 1912 figur 2.5.

3. Infiltrationsmængden benyttes til at beregne infiltrationshastigheden i næste tidsskridt, og beregnes ud fra infiltrationraten og drænraten (beregningsboks 6).

4. Den aktuelle hydrauliske ledningsevne er jordens hydrauliske ledningsevne ift. vandindholdet og benyttes til at beregne dræningstiden. Den beregnes ud fra sammenhængen mellem jordens vandindhold og vandmættede hydraulisk ledningsevne, formel 2.5, med en tilnærmelse til Campbell b vha. en empirisk værdi. Den hydrauliske ledningsevne stiger med stigende vandindhold, hvorfor brug af vandmættet hydraulisk ledningsevne, K_s, vil skabe en overestimering af jordens dræning.

5. I beregning af dræningstiden indengår parameteren, D, som er infiltrationsdybden. Infiltrationsdybden er dybden hvor til det vurderes at infiltration vil foregå, f.eks. dybden af den umættede zone. Ud fra infiltrationsdybden og aktuel hydraulisk ledningsevne, kan dræningstiden beregnes. Det er kun vandindhold større end vandindhold ved markkapacitet, som drænes i Green & Ampt 2016.

6. Dræningsraten er intensiteten af dræningen i det pågældende tidsskridt. Den beregnes ud fra en ekspotentiel sammenhæng mellem dræning og tiden, som fremkommer af studier omhandlende vandtransport i nedre jordlag. [Gardner, 1962; Savabi og Williams, 1995]

7. Jordens vandindhold beregnes ud fra infiltrations- og drænraten, og benyttes til at beregne den aktuelle hydrauliske ledningsevne i næste tidsskridt.

I Green & Ampt 2016 er det nødvendigt at kende følgende inputparametre for at benytte infiltrationsmodellen. [Shao og Baumgartl, 2016]

R	Regnintensitet	[m s^{-1}]
θ_{FC}	Vandmætning ved markkapacitet	[m^3 m^{-3}]
K_s	Vandmættede hydraulisk ledningsevne	[m s^{-1}]
ϕ	Porøsitet	[m^3 m^{-3}]
D	Infiltrationsdybde	[m]

Det er teorien bag Green & Ampt 1912 og 2016, som bruges til at analysere og vurdere afstrømningen i rapporten.

2.3 Overfladeafstrømning

Mængden af overfladeafstrømning fra ubefæstede arealer påvirkes af både jord- oplands- og vejrforhold. Det er derfor relevant at undersøge parametrene for at kunne estimere overfladeafstrømning og vurdere validiteten heraf. For at opnå overfladeafstrømning kræver det en regnintensitet, som overskrider jordens infiltrationshastighed. Regnintensiteten er derfor sammen med jordforholdene afgørende for afstrømningsforholdene. Både jordforhold og regnintensitet er derfor inputparametre til infiltrationsmodellen.

Overfladeafstrømningen påvirkes også af parametre, der ikke indgår i infiltrationsmodellen, som oplandet ift. terræn og vegetation samt fordampning der påvirkes af vejrforholdene. Parametrene skal derfor undersøges for at kunne vurdere betydningen for mængden af overfladeafstrømning og vurdere en evt. inkorporering i infiltrationmodellen.

2.3.1 Terræn

Terrænet har betydning for overfladeafstrømningen, da det er afgørende for vandets vej og hastighed. Hastigheden på overfladeafstrømningen vil stige med stigende hældning på terrænet, hvilket kan have betydning for infiltrationen og derved afstrømningsmængden. Terrænets betydning for overfladeafstrømningen vurderes ud fra tidligere studier, hvor afstrømning er undersøgt ift. terrænhældning. Det ønskes at undersøge betydningen af terrænhældning under danske forhold, hvorfor der kun benyttes resultater for terrænhældninger, som kan forekomme i Danmark. Det danske terræn er generelt fladt,

og procentdelen af arealer med en hældning på over 10 % er af en størrelsesorden, så det vurderes, at det ikke er nødvendigt at undersøge. Der undersøges derfor kun for terrænhældninger mellem 0 og 10 %. [Bjerge, 2018]

En udvidelse af Green & Ampt 1912 (formel 2.3 på side 7), hvor terrænhældningen er tilføjet ud fra en teoretisk betragtning jf. Chen og Young, 2006, fremgår af formel 2.7.

$$v = K_s \cdot \left(cos(\gamma) + \frac{(\phi - \theta_{FC}) \cdot \psi_e}{I_t} \right) \tag{2.7}$$

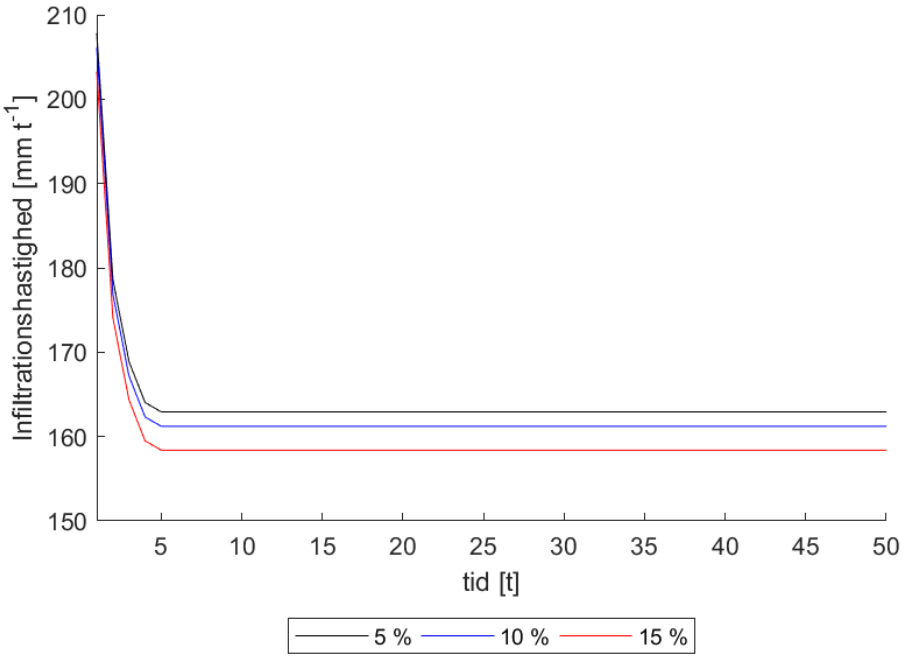
Hvor:

v	Infiltrationshastighed	[m s^{-1}]
K_s	Vandmættet hydraulisk ledningsevne	[m s^{-1}]
γ	Terrænhældning	[°]
ϕ	Porøsitet	[m^3 m^{-3}]
θ_{FC}	Vandindhold ved markkapacitet	[m^3 m^{-3}]
ψ_e	Trykpotentiale ved luftindtrængen	[m]
I_t	Akkumuleret infiltrationsmængde	[m]

Benyttes formel 2.7 vurderes det, at terrænhældninger under 10 % kan negligeres ift. betydning for overfladeafstrømningen. Det vurderes på baggrund af beregningerne illustreret i figur 2.8, som viser at ændringer i infiltrationshastighed kan negligeres, ved terrænhældninger under 10 %. Samme konklusion som fremkommer af Chen og Young, 2006. Beregningerne er foretaget ved udbytning af beregningsboks 1 på figur 2.7 på side 13 med formel 2.7, og med parametreværdierne som fremgår af tabel 2.1.

	K_s [m s^{-1}]	γ [°]	ϕ [m^3 m^{-3}]	θ_{FC} [m^3 m^{-3}]	ψ_e [m]	R [m s^{-1}]
5 %	0,04	4,5	0,426	0,253	4,5 10^{-3}	1,1 10^{-3}
10 %	0,04	9,0	0,426	0,253	4,5 10^{-3}	1,1 10^{-3}
15 %	0,04	13,5	0,426	0,253	4,5 10^{-3}	1,1 10^{-3}

Tabel 2.1. Inputparametre til formel 2.7 ved beregning af terrænhældningens betydning. Resultatet fremgår af figur 2.8.



Figur 2.8. Infiltrationshastighed beregnet ved 5, 10 og 15 % terrænhældning ud fra formel 2.7

Andre studier af afstrømning med stigende terrænhældning giver samme resultat, og viser at terrænhældninger under 8-10 % ikke skaber ekstra afstrømningsmængder [Research Service, 2013]. På baggrund af betragtningerne medtages terrænhældningen ikke i infiltrationsmodellen, da den vurderes at kunne negligeres under danske terrænforhold.

2.3.2 Vegetationen

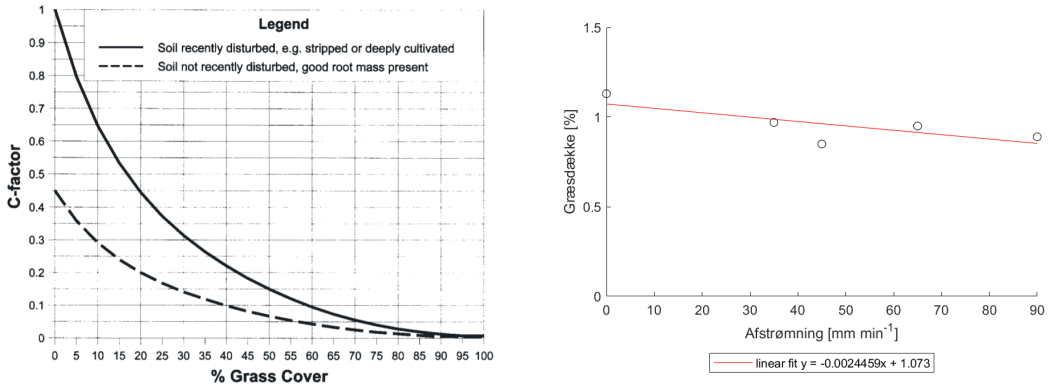
I Green & Ampt 2016 tages der ikke højde for vegetation på terrænoverfladen ved beregning af infiltrationshastigheden. Udgangspunktet for infiltrationen er derved den rene jordtype med en bar terrænoverflade. Dette udgangspunkt er ikke tilfældet udenfor laboratoriet, hvor vegetation har indflydelse på jordens sammensætning og opførelse.

Vegetation er et lag ovenpå jordoverfladen, som kan optage og tilbageholde regnvand, samt skygge så dele af regnvandet ikke rammer jordoverfladen. Mængden af regnvand som optages og tilbageholdes, afhænger af vegetationstype og indholdet af organisk materiale. Organisk materiale kan have en afskyende effekt på vand og vil derved mindske jordens evne til at infiltrere regnvand, og derved skabe en større overfladeafstrømning. Udover at vegetation tilbageholder og optager regnvand, skaber rodnettet makroporer (sprækker og åbninger i jordlaget), som medvirker til en større infiltrationshastighed. [Dunne, Zhang og Aubry, 1991]

Vegetationens påvirkning på overfladeafstrømningen er derved komplekst at medregne i afstrømningsmodellen, da der skal tages højde for nye forhold og ubekendte faktorer i beregningen. Der afgrænses derfor til at undersøge for græsoverflader, da det vurderes at være den udbredte vegetationstype på ubefæstede arealer i Danmark. Teoretiske undersøgelser er for komplekse at medtage i afstrømningsmodellen, hvorfor der tages udgangspunkt i forsøgsbaserede resultater, hvor sammenhængen mellem vegetation og

afstrømningsintensitet er undersøgt. Det er stadig komplekst og et entydigt svar på, hvordan vegetationen skal medregnes fremkommer derfor ikke, da resultaterne fra forsøgene afhænger af jord- og vegetationsforholdene.

For at vurdere betydningen af vegetation ift. overfladeafstrømning sammenholdes to undersøgelser. En model kaldet RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) til beregning af jordtab under en regnhændelse. I modellen tages der højde for vegetation vha. en C-faktor, som beskriver forholdet mellem jordtab under specifikke vegetationsforhold og jordtab under reference forhold. [Research Service, 2013] Der tages udgangspunkt i en C-faktor med stigende græsdække ift. bar jord. RUSLE-modellen sammenholdes med forsøgsresultater jf. Pan og Shangguan, 2006, hvor overfladeafstrømning ift. stigende græsdække er undersøgt. Resultaterne for de to undersøgelser fremgår af figur 2.9.



A. Environment og Heritage, 2018 B. Pan og Shangguan, 2006

Figur 2.9. A. RUSLE C-faktor som funktion af græsdække B. Afstrømning som funktion af vegetationsdække.

Udviklingen af jordtabet ift. græsdække er ekspotentielt faldende, illustreret på figur 2.9 A, hvilket viser, at jordtabet (erosionen) bliver mindre ved stigende græsdække. Da C-faktoren er et udtryk for reducering af erosion, kan den ikke konverteres direkte til en koefficient for overfladeafstrømning ift. græsdække, men som det fremgår af figur 2.9 B er der en sammenhæng.

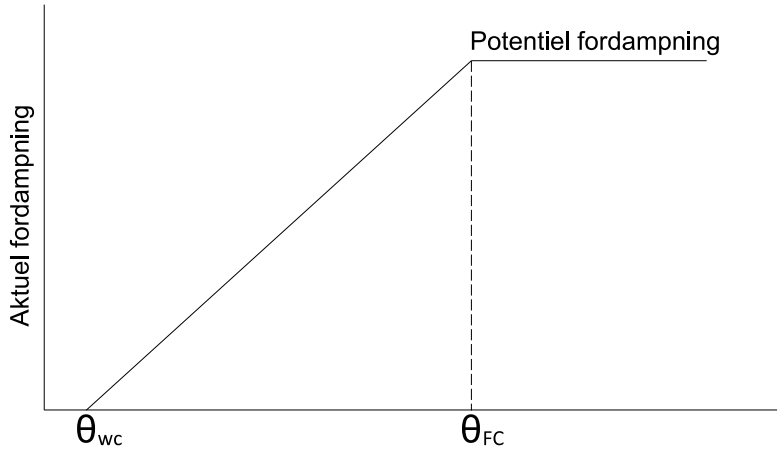
Resultaterne fra forsøg jf. Pan og Shangguan, 2006, hvor afstrømning ift. vegetationsdække er undersøgt, viser et lineært fald i afstrømning med stigende vegetationsmængde. Det vurderes derfor, at vegetation vil mindske overfladeafstrømningen, men at den præcise reduktion er kompleks at bestemme, da den varierer med forskellige jord- og vegetationsforhold. Der vil blive taget højde for vegetationen i afstrømningsmodellen, da den vurderes at have indflydelse på afstrømningsmængden.

2.3.3 Fordampning

Evapotranspiration (fordampning) fra jordoverfladen, medfører et tab af vand, som ikke har mulighed for at infiltrere eller afstrømme. Fordampningstabet negligeres tit i forbindelse med beregning af infiltration og overfladeafstrømning. Det skyldes fordampningens andel i det samlede hydrologiske kredsløb, hvor infiltration og afstrømning udgør den største andel. Der undersøges for fordampning, da den har indflydelse på regnvandsmængden, som har mulighed for at infiltrere. Fordampningen har derved indflydelse på jordens vandmætning,

hvilket har indflydelse på jordens trykpotentiale og derved infiltrationshastighed. [Loll og Moldrup, 2000]

Der er eftervist en sammenhæng i relationen mellem jordens vandmætning og fordampning. Der vil ved en vandmætning af jorden over markkapacitet forekomme potentiel fordampning. Mellem markkapacitet og visnegrænsen vil der forekomme en lineær sammenhæng af den aktuelle fordampning, som illustreret på figur 2.10. Visnegrænsen er defineret som vandmætningen, hvor planter ikke længere kan overleve. Potentiel fordampning er maksimal fordampning fra jordoverfladen og aktuel fordampning er den forekomne fordampning. [Vivoni m.fl., 2008]



Figur 2.10. Konceptuel illustration over sammenhængen mellem fordampning og jordens vandindhold.

Fordampning tilføjes til afstrømningsmodellen vha. en reduktionsfaktor på regnintensiteten, da fordampning har betydning for mængden af regnvand, der har mulighed for at infiltrere. Reduktionsfaktoren fremkommer ved kalibrering af afstrømningsmodellen.

2.3.4 Vurdering af overfladeafstrømning

Ud fra undersøgelser af tidligere studier af terrænets, vegetationens og fordampningens påvirkning på overfladeafstrømningen vurderes det, at vegetation og fordampning skal inkorporeres i afstrømningsmodellen. Der tages højde for vegetationen ved kalibrering af afstrømningsmodellen ift. den hydrauliske ledningsevne, da målt afstrømningsdata fremkommer fra et ubefæstet areal med vegetation. Fordampningen inkorporeres ved en reduktionsfaktor på regnintensiteten, da fordampningen har betydning for mængden af regnvand, der har mulighed for at infiltrere. Værdien af reduktionsfaktoren bestemmes ved kalibrering af afstrømningsmodellen ift. målt afstrømningsdata.

Der tages ikke højde for terrænhældning, da det vurderes ikke at have relevans for mængden af overfladeafstrømning under danske forhold.

2.4 Afløbssystem

Afløbsmodeller er numeriske modeller, der benyttes til at undersøge kapaciteten af afløbssystemet, for at sikre at funktionskravene bliver overholdt. Afløbsmodeller er opbygget af to systemer, en overflademodel og en rørmodel. Rørmodellen bygger på en numerisk beregning af ikke stationære strømninger med vekslende fri overflade og tryksat strømningsbetingelse. Beregningerne tager udgangspunkt i Manning formel 2.8. [Brorsen og Larsen, 2009]

$$Q = AMI^{1/2}R^{2/3} \tag{2.8}$$

Hvor:

Q	Strømning	[m^3 s^{-1}]
A	Tværsnitsareal	[m^2]
M	Manningtal	[$m^{1/3}$ s^{-1}]
I	Energilinjens gradient	[m m^-1]
R	Hydraulisk radius	[m]

Overflademodellen beregner mængden af regnvand, der afledes til afløbssystemet, hvor rørmodellen beregner strømninger og fyldning af rørsystemet. De to mest brugte overflademodeller er tid-areal metoden og kinematisk bølgemodel. I tid-areal metoden (overflademodel A) opdeles oplandet i mindre oplande, som alle tildeles en koncentrationstid. Koncentrationstiden er overfladevandets opholdstid i oplandet. Herudfra kan afstrømningen i et bestemt punkt beregnes.

Den kinematiske bølgemodel (overflademodel B) har indbygget en Horton infiltrationsmodel i programmet for afløbsmodellering, MIKE URBAN. Det medfører, at det hydrologiske tab til infiltration kan beregnes i afløbsmodellen. Beregnes infiltrationstabet ud fra Green & Ampt, kan afløbsmodellen SWMM benyttes, da der her er indbygget både en Horton og en Green & Ampt infiltrationsmodel. [DHI, 2017] De indbyggede infiltrationsmodeller benyttes sjældent i praksis i Danmark, da de ubefæstede arealer ofte negligeres, og der derfor ikke forekommer infiltration i modellerne.

Oplandsarealerne defineres i både overflademodel A og B ud fra en følgende parametre:

α	Befæstelsesgrad	[-]
φ	Hydrologiske reduktionsfaktor	[-]
R_0	Initialtab	[m]
t_c	Koncentrationstid	[min]

Befæstelsesgraden definerer andelen af området, der er befæstet areal, og derved bidrager til overfladeafstrømningen. Ikke alt vand fra det befæstede areal bidrager til afløbssystemet, da noget går til befugtning og opmagasinering i lavninger, hvilket reduktionsfaktoren tager højde for. Initialtabet er mængden af nedbør, der vurderes at falde før der opstår overfladeafstrømning. Regnhændelser mindre end initialtabet vurderes at gå til befugtning

af overfladen. Koncentrationstiden er overfladevandets opholdstid i det pågældende opland. [Rossman og Huber, 2016]

Ved opsætning af afløbsmodellen ud fra disse kriterier medregnes de ubefæstede arealer ikke i overfladeafstrømningen, hvilket er den metode, som ofte benyttes i dag i Danmark. Det medfører, at overfladeafstrømning fra ubefæstede arealer negligeres, da det antages at regnvand, som lander på de ubefæstede områder infiltrerer til jorden. Overfladeafstrømningen bestemmes derfor kun ud fra de befæstede arealer. [Spildevandskomiteen, 2005]

Undersøgelser af afløbssystemet vil blive foretaget ud fra en MIKE URBAN afløbsmodel med en overflademodel A. Det vælges at benytte overflademodel A, da der tages højde for processerne, som forekommer på de ubefæstede arealer igennem en særskilt afstrømningsmodel. Afløbsmodellen udvides, så afstrømningsmodellen definerer de ubefæstede arealer i MIKE URBAN afløbsmodellen.

Rapportstruktur 3

Påvirkningen på afløbssystemet ved medregning af afstrømningsbidrag fra ubefæstede arealer undersøges gennem en række analyser og beregningsprocesser. Her kombineres de to fagområder, og der tages udgangspunkt i den viden, som allerede findes på området. Processerne ender ud i en analyse af påvirkningen på afløbssystemet, når bidraget fra ubefæstede arealer medregnes, som det fremgår af figur 3.1.

Figur 3.1. Flowdiagram over rapportstrukturen fra jordens inputparametre til vurdering af påvirkningen af afløbssystemet.

Afstrømningen fra de ubefæstede arealer afhænger af jordforholdene og regnintensiteten. Det er derfor nødvendigt at kende de relevante jordparametre til undersøgelse af jordens infiltrationshastighed, og regnintensiteten for at beregne afstrømningsmængden. Det første led i rapportstrukturen er derfor at fastsætte inputparametrene.

Afstrømningsmodellen er andet led i rapportstrukturen og benyttes til at beregne mængden af regnvand, der afstrømmer på jordoverfladen. Opsætningen af afstrømningsmodellen er afgørende for den beregnede overfladeafstrømning, som definerer de ubefæstede arealer i afløbsmodellen. Opsætning af afstrømningsmodellen undersøges nærmere, for at opstille en model der tager højde for de jordfysiske processer, som har indflydelse på afstrømningen.

Overfladeafstrømningen, som er resultatet fra afstrømningsmodellen, definerer de ubefæstede arealer og anvendes som inputparameter i afløbsmodellen. Afløbsmodellen skal derfor opstilles, så afstrømningen fra de ubefæstede arealer kan inkorporeres. Opsætning af afløbsmodellen og definering af oplandsarealer vil derfor blive undersøgt, så bidraget fra de ubefæstede arealer kan indgå i analysen af afløbssystemets funktionspraksis.

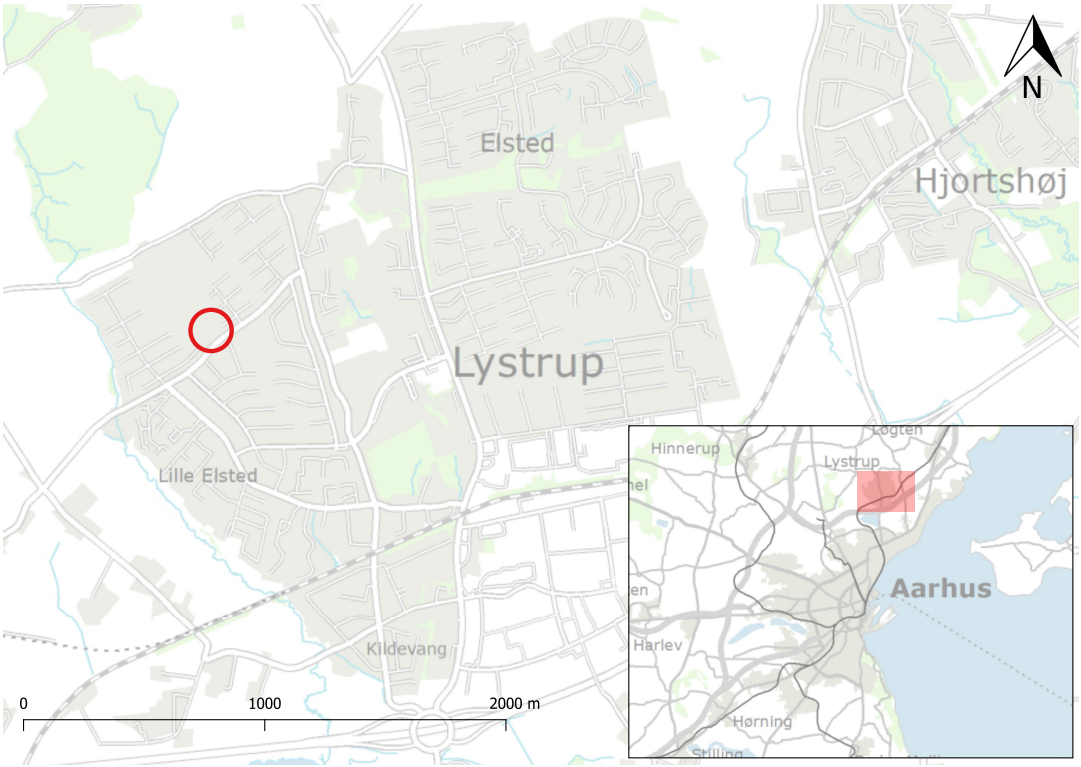
Påvirkningen af afløbssystemets funktionspraksis er sidste led i rapportstrukturen og vurderes ud fra resultatet af afløbsmodellen, hvor både de befæstede og ubefæstede arealer bidrager til afløbssystemet. Der antages en afstrømning på 100 % fra de befæstede arealer og en afstrømning fra de ubefæstede arealer afhængig af jordtypen. Resultatet vil blive vurderet ift. en referencemodel, hvor kun de befæstede arealer bidrager til afløbssystemet.

Inputparametre 4

Figur 4.1. Flowdiagram over rapportstruktur fra jordens inputparametre til vurdering af påvirkningen af afløbssystemet.

Afstrømning fra de ubefæstede arealer afhænger af to typer inputdata, jordens sammensætning og regnintensiteten. For at analysere påvirkningen på afløbssytemet ved et ekstra afstrømningsbidrag fra de ubefæstede arealer, er det derfor nødvendigt at fastlægge begge datagrundlag. Bestemmelse af inputparametre er derfor første led i rapportstrukturen, som det fremgår af figur 4.1.

Inputparametrene indgår i analysen af afstrømning fra ubefæstede arealer under danske forhold. Der benyttes derfor data for danske forhold men også data fra et caseområde. Caseområdet benyttes til analyse og kalibrering af afstrømningsmodellen, for at sikre at den kan simulere en forekommen afstrømningshændelse. Caseområdet er et ubefæstet byområde på 4300 m^2, placeret i Lystrup, nord for Aarhus, som det fremgår af figur 4.2.



Figur 4.2. Placering af caseområdet i Lystrup. Den røde cirkel markerer placeringen af caseområdet i Lystrup, og den røde firkant er placeringen af Lystrup ift. Aarhus.

Det er ikke selve området, som skal undersøges, men afstrømningen fra forskellige jordtyper. Det betyder, at hvilket som helst andet område også kunne have været valgt. Lystrup er udvalgt, da Aarhus Vand A/S i samarbejde med Envidan A/S og Aalborg Universitet har et forskningsprojekt kaldet MOGO (Monitering af Overfladeafstrømning fra Grønne Områder), hvor overfladeafstrømning fra det ubefæstede område i Lystrup er undersøgt. [Nielsen m.fl., 2019] Overfladeafstrømningen fra det ubefæstede område er i den forbindelse blevet undersøget i perioden oktober 2016 til april 2018, hvor der forefindes både regn-, afstrømnings-, poretryk og vandmætningsserier for området. Det er derved muligt at sammenholde simuleret og registreret data. Derudfra kan det vurderes, hvorvidt afstrømningssmodellen er egnet til at analysere overfladeafstrømning. For at kunne sammenligne simuleret og registreret afstrømning, skal jord- og regndata for caseområdet fastlægges.

Der undersøges derfor jord- og regndata for både caseområdet i Lystrup, men også fra jorddatabaser jf. Hansen, 1976; Cosby m.fl., 1984, for at kunne analysere afstrømning under danske jordforhold.

4.1 Jorddata

Afstrømningen afhænger af jordforholdene, og det er derfor nødvendigt at fastlægge jordparameterne for at kunne benytte afstrømningsmodellen. Der tages udgangspunkt i teorien bag Green & Ampt 1912 og 2016 for at kunne sammenholde jordparametrene med infiltrationshastigheden. Følgende jordparametre er derfor relevante at kende for at benytte Green & Ampt 1912 og 2016. Jordparametrene benævnes med enheder, som benyttes i afstrømningsmodellen senere i rapporten.

K_s	Vandmættede hydraulisk ledningsevne	[mm t^{-1}]
θ_{FC}	Vandmætning ved markkapacitet	[m^3 m^{-3}]
ϕ	Porøsitet	[m^3 m^{-3}]
ψ_e	Trykpotentiale ved luftindtrængen	[mm]
b	Campbell b	[-]

Den vandmættede hydrauliske ledningsevne, K_s, er jordens evne til at lede vand under vandmættede forhold. Værdien stiger med vandmætning af jorden og er derved størst ved fuld vandmætning. [Loll og Moldrup, 2000] På grund af andre jordfysiske forhold, er K_s nedre grænse for infiltrationshastighed i Green & Ampt 1912 [Green og Ampt, 1912].

Vandmætning ved markkapacitet, θ_{FC} er jordens vandmætning efter en periode uden nedbør, og defineres ved et trykpotentiale i jorden på 1000 mm. Trykpotentialet er jordens evne til at tiltrække vand og afhænger af vandindholdet og er derfor varierende. Trykpotentialet kan udtrykkes ved formel 2.6 på side 10, ud fra Campbell b og retentionskurven, illustreret på figur 2.3 på side 9.

Porøsitet, ϕ, er andelen af jorden, der er luft eller vand under vandmættede forhold. Den effektive porøsitet er mængden af jorden, som er fyldt med luft under vandmætning ved markkapacitet, og er derved jordens opmagasineringsvolumen under infiltration.

For at undersøge afstrømningen under danske jordforhold, er det nødvendigt at bestemme jordparametrene, så realistisk som muligt. Der undersøges derfor jorddata fra både det danske jordkartotek, de amerikanske jordklasser og caseområdet Lystrup. De amerikanske jordklasser undersøges, da de ofte danner datagrundlag for analyse af infiltration/afstrømning under danske jordforhold. Det skyldes, at det bygger på et større datasæt end det danske jordkartotek. Det undersøges derfor, hvorvidt værdierne stemmer overens med danske jordforhold, så de kan benyttes til analysen. [Hansen, 1976; Cosby m.fl., 1984]

4.1.1 Jordtypen i caseområdet Lystrup

I forbindelse med MOGO-projektet er jordforholdene i Lystrup blevet undersøgt ud fra monitering, infiltrationsforsøg og prøveudtagning [Nielsen m.fl., 2019]. Jordtypen og valg af jordparametre vurderes ud fra bestemmelsen under MOGO-projektet og ud fra nye prøveudtagninger i forbindelse med denne rapport. Der er udtaget 20 nye intaktprøver, der undersøges for vandindhold ift. jordens trykpotentiale, porøsitet, og hydrauliske ledningsevne. Prøvestørrelse og målemetode til parameterbestemmelse af de 20 nye intaktprøver stemmer overens med metoderne i det danske jordkartotek [Hansen, 1976]. Databehandling og placering af prøveudtagningerne fremgår af bilag A.

Jordparametrene for Lystrup fundet i forbindelse med MOGO-projektet og for de 20 nye intaktprøver fremgår af tabel 4.1.

		MOGO		Nye jordprøver	
		GNS.	STD.	GNS.	STD.
K_s	[mm t^{-1}]	66	-	19,2	0,80
ϕ	[m^3 m^{-3}]	0,426	0,04	0,406	0,04
θ_{FC}	[m^3 m^{-3}]	0,253	0,02	0,282	0,04
ψ_e	[mm]	4,5	-	45,8	8,57
b	[-]	10,2	-	9,6	1,84

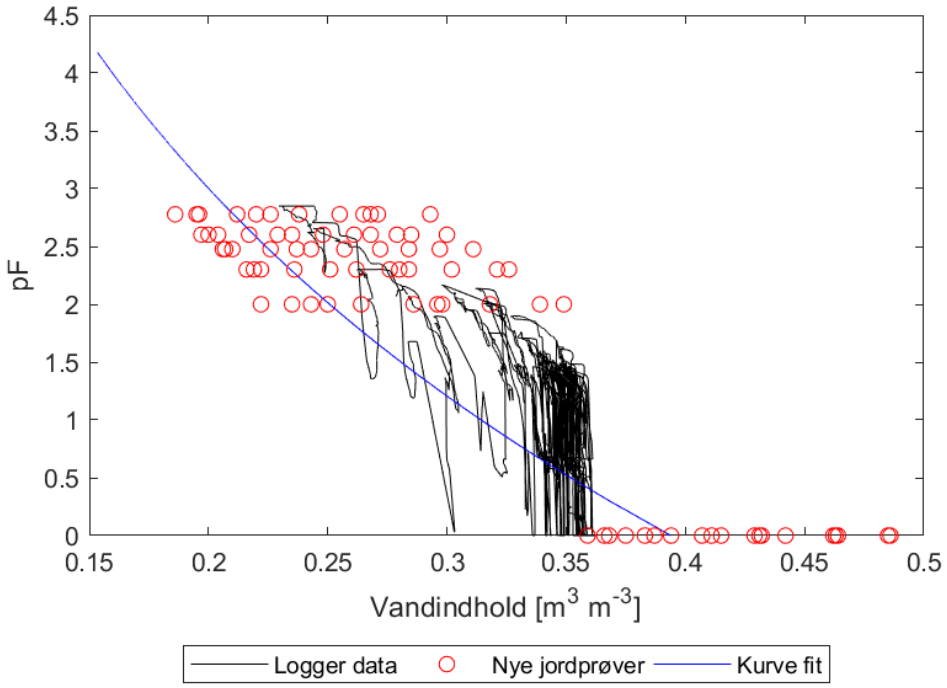
Tabel 4.1. Jordparametre for jorden i Lystrup, bestemt ud fra MOGO-projektet og de 20 nye intaktprøver.

Værdierne for jordparametrene varierer indenfor, hvad der vurderes at være måleusikkerhed for de to prøveudtagninger, bortset fra værdien for den vandmættede hydrauliske ledningsevne, K_s, som det fremgår af tabel 4.1. Forskellen på værdien skyldes forskellige målemetoder, for MOGO-projektet og de nye intaktprøver. Vandmættede hydraulisk ledningsevne er bestemt ud fra dobbelt ring infiltrationstest i MOGO-projektet og for de nye intaktprøver ved "constant head-forsøg. Det medfører en skala forskel på de to forsøg, som påvirker resultatet. Forskellen opstår, da intaktprøverne isoleres, så der kun foregår 1D infiltration og de ikke påvirkes af jordens trykpotentiale.

For porøsitet, ϕ, og vandmætning ved markkapacitet, θ_{FC}, benyttes værdierne, som er bestemt ud fra MOGO-projektet, da værdierne ligger indenfor måleusikekrheden, og det er disse værdier, som indgår i retentionskurven.

Trykpotentialet og Campbell b er fundet ud fra kurve fit til målt data fra MOGO-projektet, hvilket medfører, at der ikke forekommer gennemsnit og standardafvigelse. Værdierne er

beregnet ud fra formel 2.6 på side 10 for de nye intaktprøver. Trods afvigelser i resultaterne, vurderes det, at samme retensitionskurve kan benyttes for MOGO-projektet og de nye intaktprøver, som det fremgår af figur 4.3.



Figur 4.3. Kurve fit ift. logger data fra MOGO-projektet og data fra nye intaktprøver. Retentionskurven (kurve fit) har, Campbell b: 10,2 ψ_e: 4,5 mm og θ_s: 0,426, nærmer beskrivelse i bilag A.

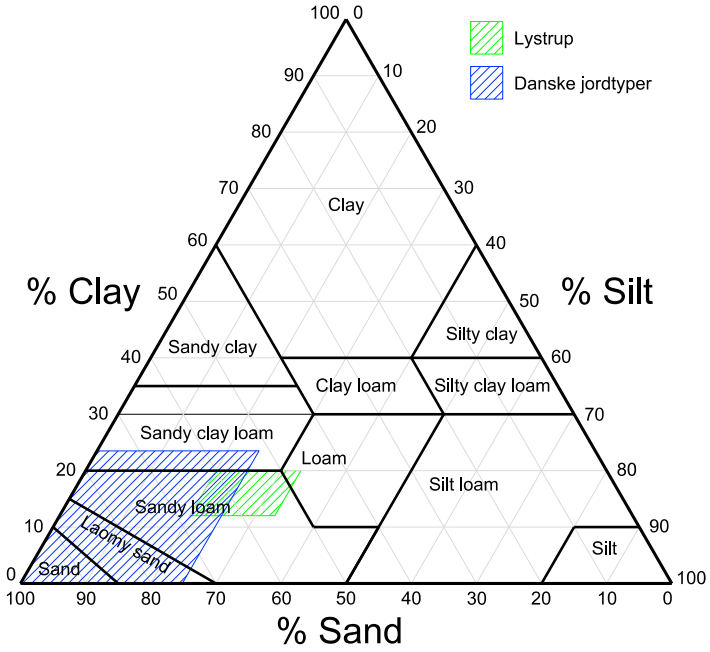
4.1.2 Danske jordforhold

Til at undersøge afstrømningen for danske jordforhold, benyttes det danske jordkartotek og de amerikanske jordklasser. De amerikanske jordklasser benyttes pga. øget datamængde. For at undersøge danske jordforhold, benyttes kun jordklasser fra den amerikanske jorddatabase, som stemmer overens med jordtyper fra det danske jordkartotek. Det danske jordkartotek og de amerikanske jordklasser skal derfor undersøges for at kunne udvælge de amerikanske jordklasser, som repræsenterer danske jordforhold.

Det danske jordkartotek er en samling af 50 jordprøver taget 16 forskellige steder i Danmark. Ud af de 50 jordprøver er der udarbejdet retentionskurver for 41 af jordprøverne, hvilket er jordprøver, som repræsenterer de danske jordforhold i denne rapport. Jordprøverne er ikke et fuldendt billede af danske jordtyper, men giver et spænd fra leret til sandet jord under danske jordforhold. Jordparametre og fordelingsfunktioner for de benyttede jordprøver fremgår af bilag C.

De amerikanske jordklasser indeholder en større datamængde end det danske jordkartotek, og består af 1448 jordprøver inddelt i 11 jordklasser ud fra indhold af sand, silt og ler. Værdierne for indhold af sand, silt og ler er fremkommet som medianen for hver jordklasse. Tilsvarende er der fundet gennemsnitsværdier for Campbell b, $\log(\psi_e)$, $\log(K_s)$ og ϕ for alle jordklasser. [Cosby m.fl., 1984]

Sammenligning af det danske jordkartotek, de amerikanske jordklasser og jordtypen i Lystrup ift. indhold af sand, silt og ler er illustreret på figur 4.4.



Figur 4.4. Trekantsdiagram med fordeling af de amerikanske jordklasser [Cosby m.fl., 1984], sammenlignet med fordelingen af jordprøverne fra det danske jordkartotek [Hansen, 1976] og jordtypen i Lystrup [Nielsen m.fl., 2019].

Sammenligningen mellem de amerikanske jordklasser og de danske jordtyper, figur 4.4, viser, at de danske jordtyper generelt er sandet, og at der ikke forekommer svært lerede eller siltede jordtyper. Jordtypen fra Lystrup, indholder mere silt end der forefindes i jordtyperne i det danske jordkartotek. Det bevidner, at det danske jordkartotek ikke er et fuldendt billede af danske jordtyper, men et udpluk som giver en indikation af de danske jordforhold.

Undersøgelser hvor der er valgt en sandet, leret og siltet amerikansk jordklasse, til at illustrere infiltration under danske jordforhold vurderes at være misvisende ud fra analysen, som fremgår af figur 4.4. Værdierne for en leret eller siltet amerikansk jordklasse ligger udenfor intervallet for danske jordforhold, det vurderes derfor at skabe en fejlanalyse ved brug af disse amerikanske jordklasser.

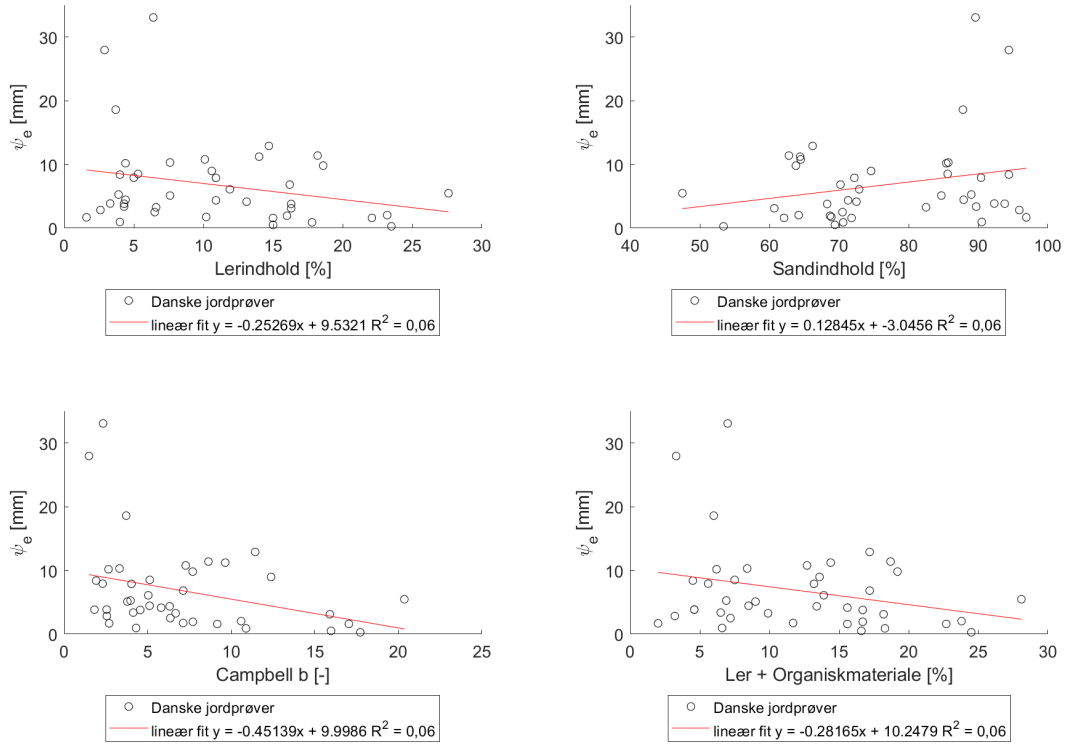
De amerikanske jordklasser kan ikke udvælges udelukkende på baggrund af jordens struktur, da jordparametrene har en betydning, da de kan svinge indenfor samme jordklasse. Der foretages derfor en sammenligning af jordparametrene i det danske jordkartotek ift. jordparametre for de amerikanske jordklasser.

For jordprøverne i det danske jordkartoket er jordens trykpotentiale ved luftindtrængen ikke beregnet, hvilket er inputparametre til Green & Ampt 1912, og en jordparameter som skal benyttes til udvælgelse af amerikanske jordklasser. Jordens trykpotentiale undersøges derfor for de danske jordprøver for at finde frem til den værdi, som skal benyttes i analyserne.

4.1.3 Undersøgelse af trykpotentiale

Trykpotentialet er jordens evne til at tiltrække vand, og har derfor betydning for jordens infiltrationshastighed. Jordpartiklerne kan tiltrække vandmolekylerne pga. den polære overflade. Tiltrækningen danner derved et sug, som øger hastigheden af vandtransporten i jorden. Hvor polære jordpartiklerne er, afhænger af sammensætningen af sand, ler og organisk materiale. Ud over polariteten afhænger trykpotentialet også af jordens vandindhold, da trykpotentialet falder med stigende vandindhold.

Trykpotentialet ved luftindtrængen, ψ_e, beregnes ud fra relationen mellem trykpotentiale og Campbell b formel 2.6 på side 10. Der tages udgangspunkt i et gennemsnit af de beregnede ψ_e mellem pF 1,2 - 2,2 for hver jordprøve. Det beregnede trykpotentiale ift. jordparameter fremgår af figur 4.5.



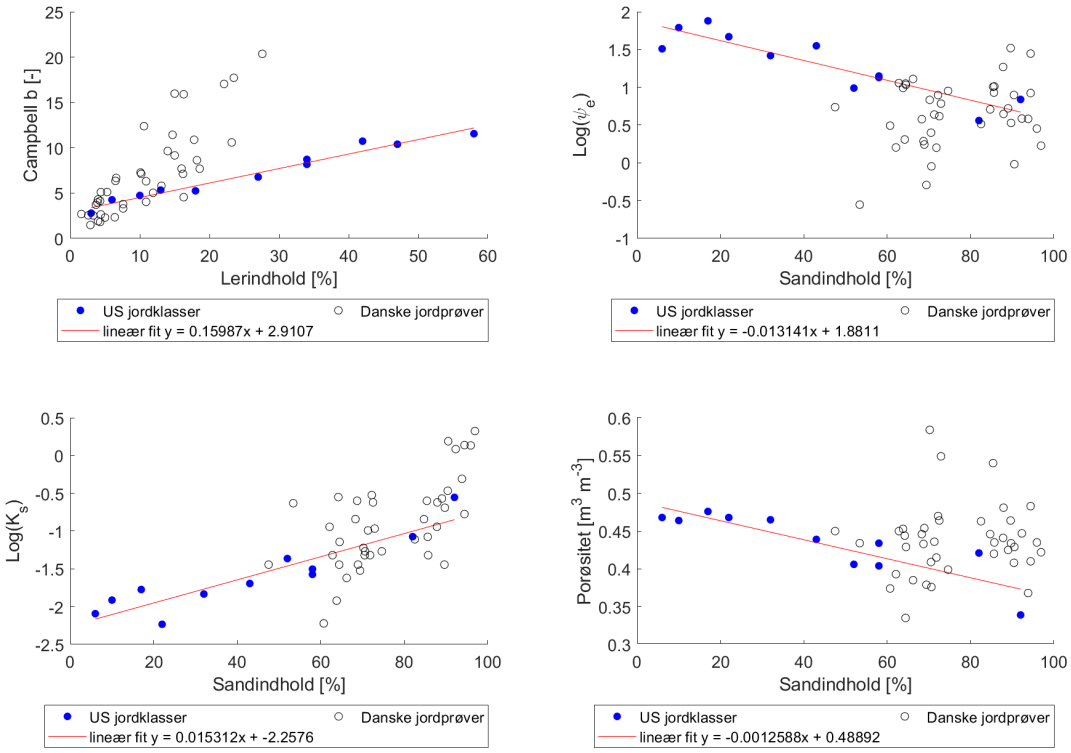
Figur 4.5. ψ_e som funktion af hhv. ler, sand, Cambell B og lerindhold + organisk materiale. Det lineær fit er for de amerikanske jordklasser.

Ud fra sammenhængene mellem ψ_e og jordparametrene for de amerikanske jordklasser jf. Cosby m.fl., 1984, som viser en stigning i ψ_e ved stigende lerindhold, giver de beregnede trykpotentialer ved luftindtrængen, ψ_e, modsatrettet hældning på tendenslinjen, som det fremgår af figur 4.5. Den modsatrettede hældning på tendenslinjen skyldes, at nogen af jordprøverne består af sprukket ler, og derfor giver et lavere trykpotentiale end det reelle. Jordparametrene, som er opstillet i det danske jordkartotek, tager ikke højde for evt. sprukket ler, og beregning af trykpotentiale stemmer derfor ikke nødvendigvis overens med virkeligheden. Ud fra R^2-værdierne på figur 4.5, fremgår det, at der ikke er en entydig sammenhæng for ψ_e, beregnet ud fra det danske jordkartotek.

Der forefindes ikke andre estimater for ψ_e for jordprøver fra det danske jordkartotek, benyttes de beregnede værdier ud fra formel 2.6. Det antages derfor, at usikkerheden pga. sprukket ler kan negligeres.

4.1.4 Udvælgelse af amerikanske jordklasser

For at udvælge de amerikanske jordklasser, som er relevante at undersøge ift. danske jordforhold, er parameterværdierne for jordprøverne i det danske jordkartotek sammenholdt med de amerikanske jordklasser, som det fremgår af figur 4.6.



Figur 4.6. Jordfysiske parametreværdier ift. indhold af hhv. ler og sand for de amerikanske jordklasser og de danske jordprøver.

Sammenhængen mellem jordparametrene viser, at de danske jordtyper er sandede ift. de amerikanske jordklasser, som det også fremgår af figur 4.4. Det er derfor kun de sandede jordklasser, som er listet i tabel 4.2, der er repræsentative for de danske jordforhold. Det er derfor disse jordklasser, der undersøges i forhold til overfladeafstrømningens betydning for afløbssystemet under danske jordforhold. Indhold af sand, ler og silt samt værdier for jordfysiske parametre for de udvalgte amerikanske jordklasser fremgår af tabel 4.2.

Jordindhold	Silt [%]	Ler [%]	Sand [%]		Danske jorder [antal]
Sand	5	3	92		17
Loamy sand	12	6	82		6
Sandy loam	32	10	58		14
Loam	39	18	43		0
Sandy clay loam	15	27	58		4
Sandy clay	6	42	52		0
Jordparametre	b [-]	ψ_e [mm]	K_s [mm t^{-1}]	ϕ [m^3 m^{-3}]	
Sand	2,79	69	168	0,339	
Loamy sand	4,26	36	51	0,421	
Sandy loam	4,74	141	19	0,434	
Loam	5,25	355	12	0,439	
Sandy clay loam	6,77	135	16	0,404	
Sandy clay	10,73	98	26	0,406	

Tabel 4.2. Gennemsnitsværdier for udvalgte amerikanske jordklasser jf. Cosby m.fl., 1984 og antal danske jordprøver, der indgår i hver jordklasse.

Jordprøverne fra det danske jordkartotek og jordtypen i Lystrup er fordelt mellem de amerikanske jordklasser ud fra indhold af sand, ler og silt, intervallerne for de amerikanske jordklasser fremgår af figur 4.4. Fordelingen af de danske jordprøver fremgår af bilag C og antallet af jordprøver, som hører under hver amerikansk jordklasse fremgår af tabel 4.2. Der er ingen af de danske jordprøver, der hører ind under de amerikanske jordklasser 'loam' og 'sandy clay', hvilket også fremgår af figur 4.4, hvor de nævnte jordklasser ligger udenfor feltet af danske jordprøver jf. Hansen, 1976. De to amerikanske jordklasser benyttes stadig til vurdering af overfladeafstrømning, da de jordfysiske parametre ligger indenfor de danske jordprøvers parameterværdier, som det fremgår af figur 4.6.

4.2 Regndata

Ud over jordforholdene afhænger afstrømningen fra de ubefæstede arealer af regnintensiteten. Det er derfor nødvendigt, at fastlægge hvilke regnhændelser der undersøges for. Afløbssystemet skal overholde en funktionspraksis, som er defineret ud fra gentagelsesperioden på regnhændelser, som afløbssystemet skal kunne håndtere, som beskrevet i afsnit 1.1 på side 2. Det er derfor relevant at undersøge regnhændelsen og kende gentagelsesperioden, inden den benyttes til analyse af afløbssystemet.

Der benyttes i rapporten to typer af regndata, enkelte regnhændelser og en historisk regnserie. De enkelte regnhændelser benyttes til analysering og vurdering af afstrømningsmodellen og den historiske regnserie til analyse og vurdering af afløbssystemets funktionspraksis.

4.2.1 Regnhændelser for caseområde

Der foreligger for caseområdet i Lystrup både regndata og afstrømningsdata. Begge typer af data skal benyttes for at analysere og vurdere afstrømningsmodellen. Den simulerede afstrømning skal sammenholdes med registreret afstrømning for at validere afstrømnings-

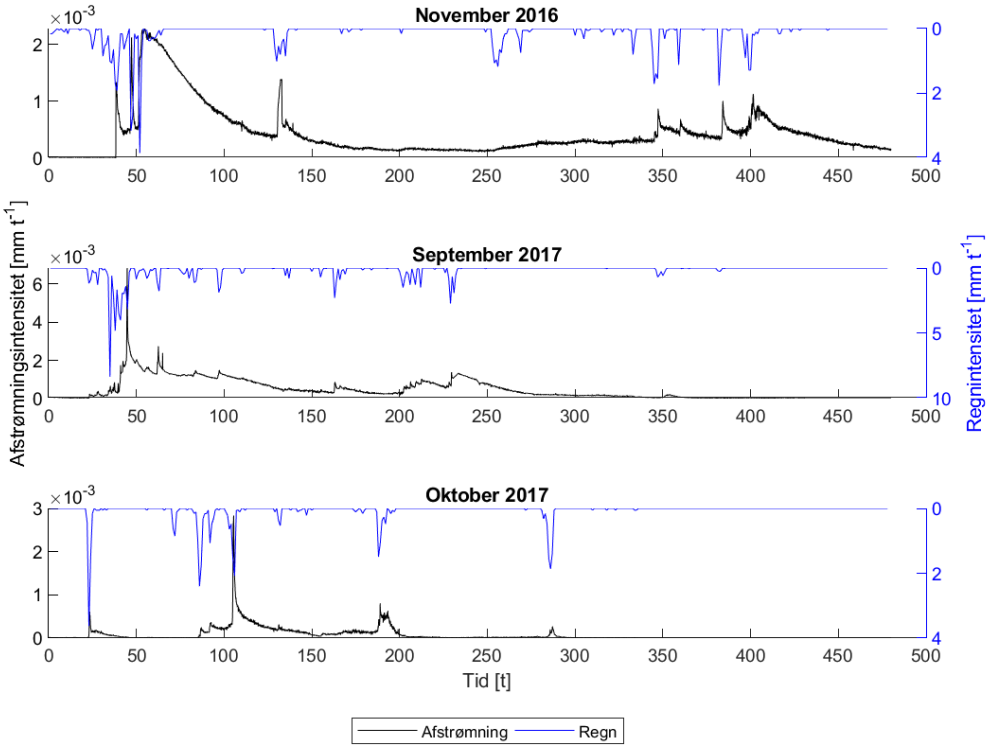
modellen. Det er derfor nødvendigt, at inputparametre til afstrømningsmodellen i form af regndata er sammenfaldende med en afstrømningshændelse.

Regnintensiteten er registreret med en regnmåler placeret på det ubefæstede område i Lystrup, og er derved regnintensiten, som har forårsaget den registrerede afstrømning. Afstrømningen i Lystrup er registreret for et ubefæstet område på 4300 m^2, som har hældning ned til en opsamlingsrende, hvor overfladeafstrømningen bliver registreret vha. en flowmåler. Opsamlingsrenden og det ubefæstede område fremgår af figur 4.7.

Figur 4.7. Opsamlingsrende til overfladeafstrømning og det ubefæstede areal i Lystrup. Foto: Kristoffer Nielsen, EnviDan.

Afstrømningsmodellen valideres ud fra tre afstrømnings-/regnhændelser. De to som har givet den største akkumulerede afstrømningsmængde, og en afstrømningshændelse med en akkumuleret afstrømning på 2 mm. Afstrømningshændelserne er udvalgt for at undersøge, om afstrømningsmodellen kan simulere forskellig niveauer af afstrømningsmængde.

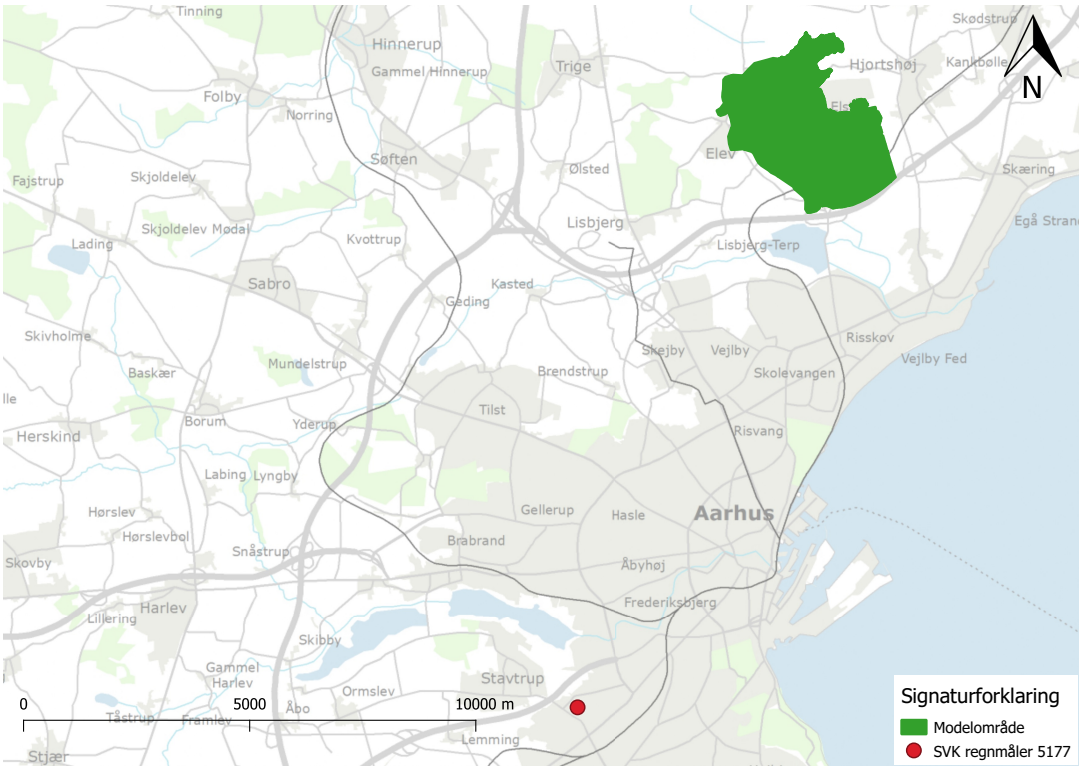
Regnhændelserne sammenfaldende med de udvalgte afstrømningshændelser, er inputparametre til afstrømningsmodellen og den kalibreres ift. de registrerede afstrømningshændelser. De tre udvalgte regnhændelser er alle regnhændelser, som afløbssystemet skal kunne håndtere, da gentagelsesperioderne for regnhændelserne ligger mellem 0,2 år til 2 år, ift. akkumulerede regnmængder. Da regnserien for det ubefæstede areal i Lystrup kun forløber over et enkelt år, kan gentagelsesperioden ikke beregnes ud fra denne regnserie. Sammenlignes den med regnhændelser fra SVK regnmåleren 5177 placeret i Lystrup med sammenfældende akkumuleret regnmængder. Det skaber en usikkerhed på gentagelsesperioden, men det vurderes, at de tre regnhændelser ikke overstiger en gentagelseperiode på 5 år, hvorved at afløbssystemet skal kunne håndtere regnhændelserne. De tre udvalgte afstrømningshændelser og sammenfaldende regnhændelser fremgår af figur 4.8.



Figur 4.8. Udvalgte afstrømningshændelser og sammenfaldende regnhændelser registreret for caseområdet i Lystrup [Nielsen m.fl., 2019].

4.2.2 Historisk regnserie

Overfladeafstrømningens påvirkning på afløbssystemets funktionspraksis vurderes ud fra en historisk regnserie, for at kunne vurdere gentagelsesperioder for opstuvning til terræn og bassin udnyttelse. Afløbssystemet analyseres derved ud fra beregningsniveau 3, som beskrevet i afsnit 1.1 på side 2. Vurderingen er en relativ vurdering mellem to opsætninger af afløbsmodellen med og uden afstrømningsbidrag fra de ubefæstede arealer. Det har derfor ingen betydning, hvilken regnserie der benyttes, blot det er samme regnserie. Der benyttes en regnserie fra SVK regnmåler nr. 5177 placeret i Viby [Sarup, 2017]. Placering af caseområde og SVK regnmåler fremgår af figur 4.9.



Figur 4.9. Placering af SVK regnmåler 5177 ift. caseområdet.

Regnmåleren og caseområde er placeret hhv. nord og syd for Aarhus. Det medfører, at regnserien som benyttes, ikke er regnintensiten som er faldet i caseområdet. Det vurderes, at den stedslige variation fra regnintensitet kan negligeres.

Den historiske regnhændelse skal fungere som inputparametre til Green & Ampt 2019, for at komme frem til den modificerede regnhændelse, som beskriver overfladeafstrømningen fra de ubefæstede arealer. Den historiske regnhændelse er sammen med den modificerede regnhændelse inputparametre til afløbsmodellen. Her beskriver den historiske regnhændelse de befæstede arealer og den modificerede regnhændelse det ekstra afstrømningsbidrag fra de ubefæstede arealer.

Regnserien fra SVK regnmåleren nr. 5177 placeret i Viby, strækker sig fra år 1979 til år 2018. Det er nødvendigt at undersøge alle 39 år, da gentagelsesperiodernes statistiske sikkerhed stiger med stigende længde af regnserien.

De tre største regnhændelser gennem de 39 år, har fundet sted i perioden fra år 2013 til og med år 2016, som det fremgår af tabel 4.3. Derudover var der en oversvømmelseshændelse i Aarhus i år 2012 jf. Mathiasen, 2012, som genererede betydelige mængder overfladeafstrømning. Oversvømmelseshændelsen i år 2012 er ikke blandt de tre største regnhændelser, hvilket skyldes, at det var en lokal oversvømmelse og regnintensiteten derfor ikke har forårsaget oversvømmelse i Viby, hvor regnmåleren er placeret.

	Akk. regnmængde [mm]	Gentagelsesperiode [år]
13/7 - 2014	55,6	39
10/2 - 2016	48,6	19,5
22/5 - 2013	46,6	13

Tabel 4.3. De tre største regnhændelser ud fra akkumuleret regnmængder i regnserie fra Viby år 1979-2018, SVK-regnmåler nr. 5177.

Afstrømningsmodellen benytter det første år i regnserien til at opnå stabilisering i form af jordens vandindhold og forudgående infiltrationsmængde. Det medfører, at afløbssystemets funktionspraksis vurderes ud fra en regnserie fortløbende fra år 1980-2018.

Afstrømningsmodel 5

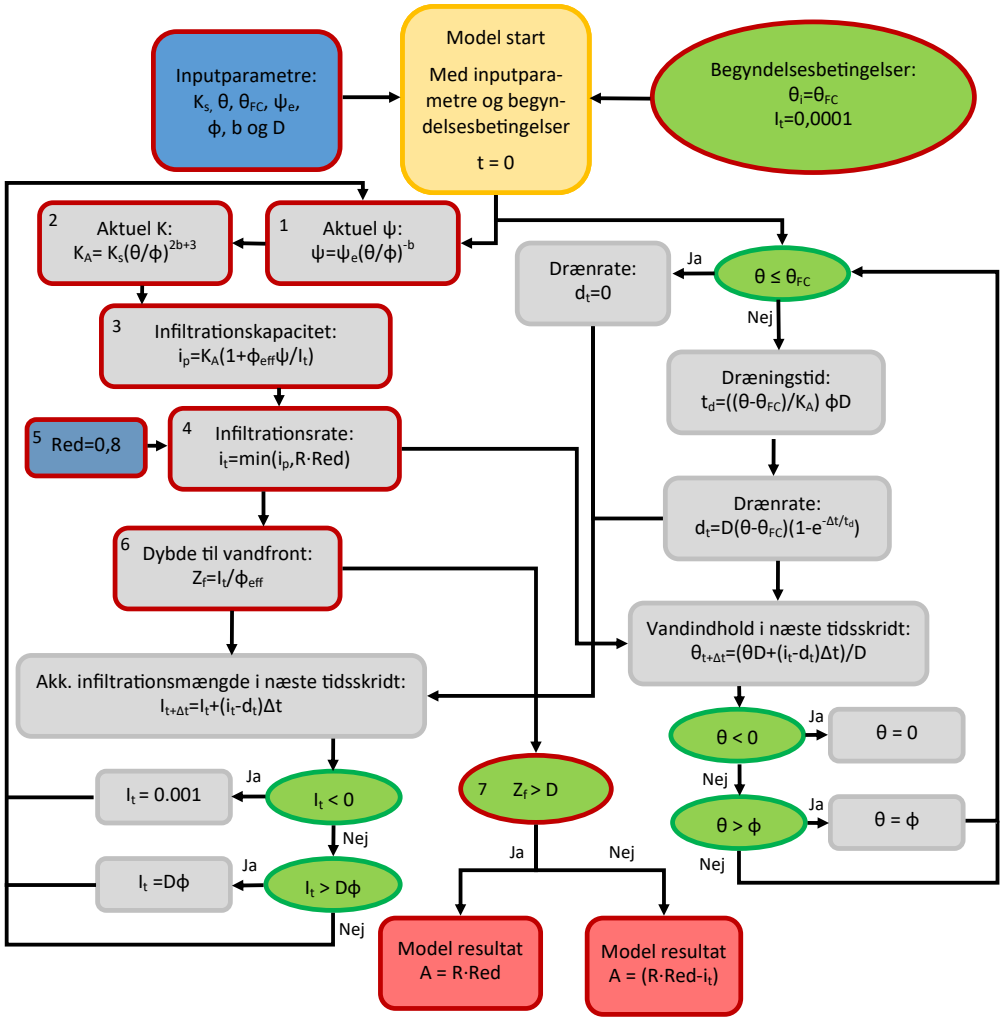
Figur 5.1. Flowdiagram over rapportstruktur fra jordens inputparametre til vurdering af påvirkningen af afløbssystemet.

Afstrømningsmodellen er andet led i rapportstrukturen, som det fremgår af figur 5.1. Dette led har betydning for afstrømningen, som definerer de ubefæstede arealer i afløbsmodellen. Afstrømningssmodellen tager udgangspunkt i teorien bag Green & Ampt 1912 og 2016, beskrevet i afsnit 2.1.2 på side 7 og afsnit 2.2 på side 11, for at kunne vurdere overfladeafstrømningen ift. jordparameterne. Green & Ampt 1912 og 2019 er infiltrationsmodeller, da resultatet er infiltrationsmængde. Modellerne modificeres til afstrømningsmodeller, da modelresultatet er afstrømning, og infiltration en mellemregning for at nå frem til resultatet.

Det undersøges hvorvidt afstrømning simuleret med Green & Ampt 2016 (figur 2.7 på side 13) stemmer overens med den registrerede afstrømningsmængde fra caseområdet. Der tages udgangspunkt i de tre udvalgte regn-/afstrømningshændelser og jordtypen i Lystrup, beskrevet i afsnit 4.2.1 på side 30 og afsnit 4.1.1 på side 25. Ved gennemregningen simulerer Green & Ampt 2016 ingen afstrømning fra caseområdet. Green & Ampt 2016 kan altså ikke simulere den afstrømning, som er registreret fra caseområdet. Det vurderes derfor, at den ikke kan benyttes til at undersøge afstrømning under danske jordforhold. Green & Ampt 2016 modificeres derfor, så det bliver muligt at simulere den registrerede afstrømning fra caseområdet i Lystrup.

5.1 Modificering af afstrømningsmodel

Green & Ampt 2016 modificeres for at kunne simulere den afstrømning, som er registreret i Lystrup. Green & Ampt 2016 modificeres til en dynamisk model, hvor infiltrationshastigheden beregnes i den umættede zone (Green & Ampt 2019). Udover modificering til en dynamisk model, tilføjes der en reduktionsfaktor til afstrømningsmodellen, som reducerer regnintensiteten. Den modificerede afstrømningsmodel, Green & Ampt 2019, fremgår af figur 5.2.



Figur 5.2. Flowdiagram over Green & Ampt 2019, som benyttes til at analysere afstrømningsforholdene. Ændringer fra Green & Ampt 2016 er markeret med rød. Beregninger uden nr. er forklaret i afsnit 2.2 på side 11.

1-3. Green & Ampt 2019 er gjort dynamisk ved at infiltrationshastigheden beregnes ud fra den aktuelle hydrauliske ledningsevne og det aktuelle trykpotentiale. Det medfører, at infiltrationshastigheden beregnes i den umættede zone, frem for i den mættede zone, som i Green & Ampt 1912 og 2016.

4-5. Reduktionsfaktoren, *Red*, tager højde for fordampning og er tilføjet på baggrund af undersøgelserne i afsnit 2.3 på side 14. Reduktionsfaktoren reducerer regnintensiteten og er fundet ved kalibrering (afsnit 5.2), ud fra den registrerede afstrømning i Lystrup.

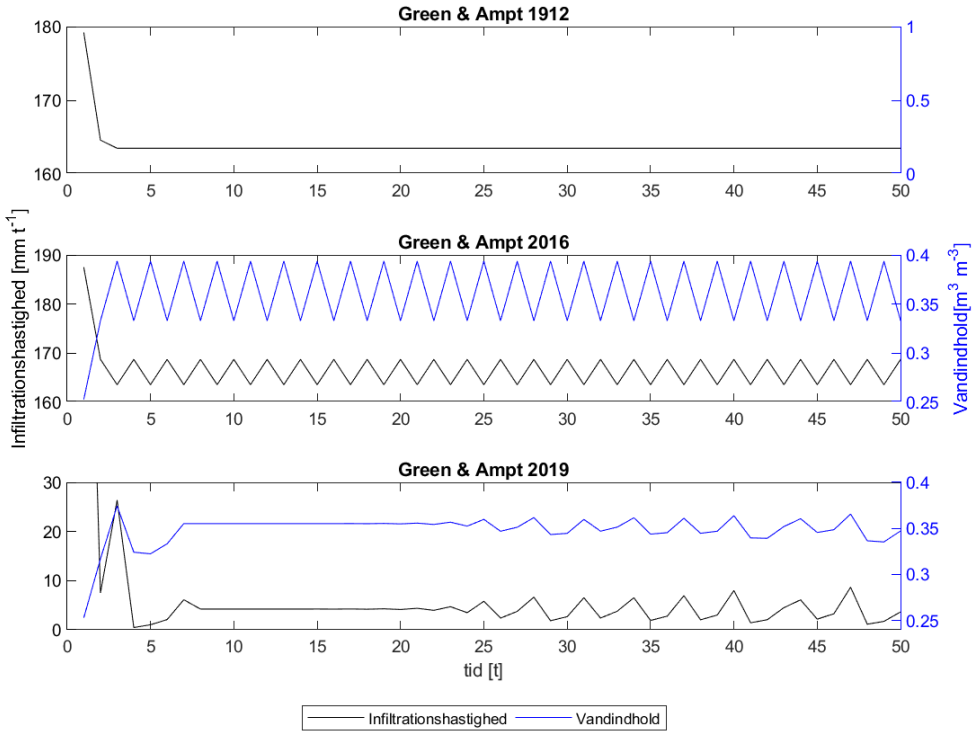
6-7. Infiltrationsdybden tilføjes, da undersøgelser af overfladeafstrømningen i Lystrup jf. Nielsen m.fl., 2019 har vist, at afstrømningen foregår som en "subsurface runoff", hvilket er afstrømning i de overfladenære jordlag. Derudover viser undersøgelserne, at jordens infiltrationsevne falder betydeligt efter en vis dybde, da jorden her vil være så kompakteret, at infiltrationen kan negligeres. I Green & Ampt 2019 antages det derfor, at der ikke foregår infiltration efter denne dybde. Det medfører, at jordens opmagasineringsvolume kan opbruges, og skaber derved en "kop-effekt". Når koppen er fyldt, vil vandet løbe over, og der opstår fuld overfladeafstrømning.

Tilføjelsen af infiltrationsdybden er en tilnærmelse til at simulere "subsurface runoff". Infiltrationsdybden er sammen med beregningstidsskridtet styrende for beregning af jordens vandindhold, og derved modelresultat. Infiltrationsdybden har indflydelse på det infiltrerede vands opblanding med jorden, og tidsskridtet på mængden af vand der opblandes. Forholdet mellem tidsskridt og infiltrationsdybde kan derfor diskuteres. For at opnå en dynamisk model, som simulerer det observerede "subsurface runoff" og jordforholdene i de terrænnære jordlag er infiltrationsdybden sat til 5 cm og beregningsskridtet til en time.

Efter modificering af afstrømningsmodellen er følgende inputparametre nødvendige for at kunne benytte Green & Ampt 2019.

R	Regnintensitet	[mm t^{-1}]
K_s	Vandmættet hydraulisk ledningsevne	[mm t^{-1}]
θ_{FC}	Vandmætning ved markkapacitet	[m^3 m^{-3}]
ϕ	Porøsitet	[m^3 m^{-3}]
ψ_e	Trykpotientiale som skaber luft i systemet	[mm]
b	Campbell b	[-]
D	Infiltrationsdybde	[mm]

Green & Ampt 2019 er en ny modificering af afstrømningsmodellen. Forskellene på de tre afstrømningsmodeller Green & Ampt 1912, 2016 og 2019 fremgår af figur 5.3.



Figur 5.3. Konceptuel model over infiltrationshastighed til tiden ved Green & Ampt 1912, 2016 og 2019. Infiltrationsmodellerne har samme jordtype (Lystrup) og konstant regnintensitet (4 mm t^{-1}). Green & Ampt 1912 beregner ikke vandindhold.

I Green & Ampt 2016 og 2019 indgår dræning, hvilket fremgår ved at infiltrationshastigheden varierer. I Green & Ampt 2016 afhænger infiltrationshastigheden af jordens vandindhold i form af infiltrationsmængde, I_t, hvilket skaber en harmonisk svingning. Ændring i vandindhold angiver differencen mellem infiltration og dræning. Infiltrationshastigheden i Green & Ampt 2019 er ca. en faktor 10 mindre end ved Green & Ampt 1912 og 2016. Det skyldes, at Green & Ampt 2019 beregner infiltrationshastigheden i den umættede zone, hvorved at den hydrauliske ledningsevne og trykpotentialet afhænger af jordens vandindhold. Det medfører den uharmoniske svingning, som fremgår af figur 5.3.

5.2 Kalibrering af afstrømningsmodel

For at Green & Ampt 2019 kan simulere den registrerede afstrømning i Lystrup, skal den kalibreres. Da det kun er muligt at benytte afstrømningsdata fra Lystrup, kan Green & Ampt 2019 ikke valideres ift. andre lokaliteter og jordtyper. Det er derfor nødvendigt at antage, at kalibreringen af infiltrationsmodellen ift. afstrømningsdata i Lystrup, vil forblive den samme, når jordtypen udskiftes til en anden. Green & Ampt 2019 kaliberet ift. afstrømningsdata fra Lystrup, benyttes derfor direkte på andre jordtyper, blot ved udskiftning af inputparametre, til parametre for danske jordforhold.

Inputparametrene varierer ift. placering af udtagelse af jordprøverne, hvilket skaber en usikker. Der kan derfor argumenteres for, at det kan accepteres at kalibrere på alle inputparametrene. Det er ikke holdbart, når Green & Ampt 2019 skal benyttes på andre jordtyper, hvor den ikke kan kalibreres op mod målt afstrømningsdata. For den vandmættede hydrauliske ledningsevne er der en skalafaktor for værdien, fundet på intaktprøver til værdien som skal benyttes i fuldskala. Green & Ampt 2019 kalibreres derfor ift. den vandmættede hydrauliske ledningsevne og reduktionsfaktor for regnintensiteten ud fra "trial and error" -metoden.

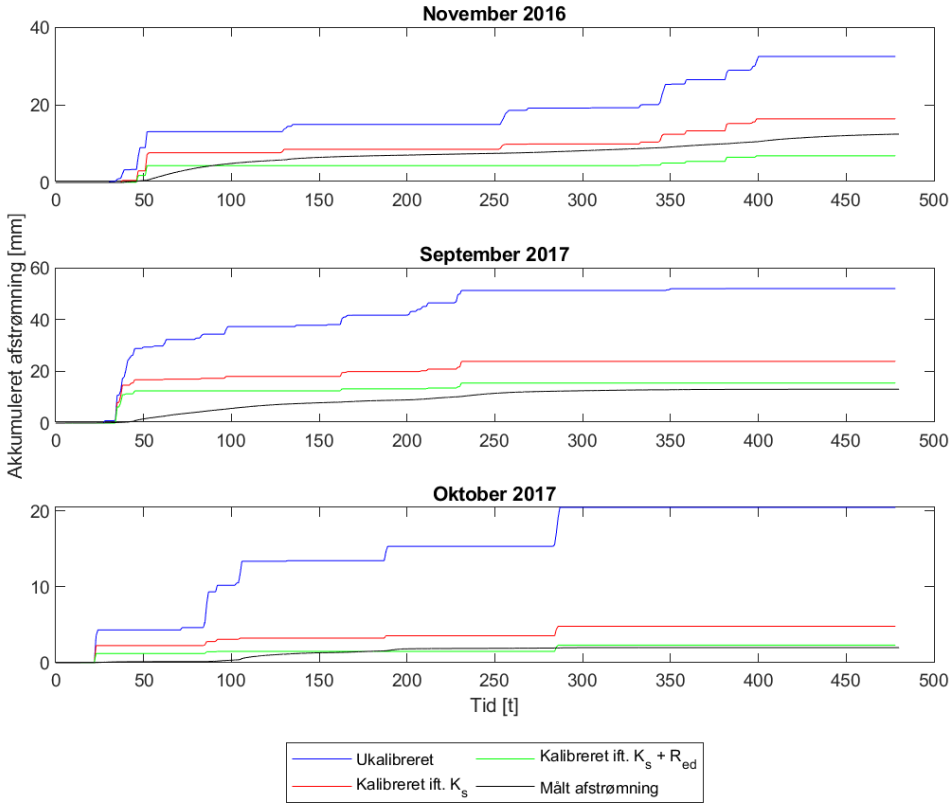
Der kalibreres ift. de tre afstrømningshændelser, som er beskrevet i afsnit 4.2.1. Den simulerede akkumulerede afstrømning sammenholdes med den målte akkumulerede afstrømning. For at kunne sammenholde simuleret akkumuleret afstrømning [mm] og målt akkumuleret afstrømning [m^3], er målt afstrømning fordelt over arealet af det ubefæstede område, ca. 4300 m^2. Usikkerhed i bestemmelse af arealstørrelsen, har derfor betydning for den målte afstrømning. Usikkerheden indgår indirekte i reduktionsfaktoren, da den bestemmes ved kalibrering.

Parameterværdierne før og efter kalibreringen af Green & Ampt 2019 fremgår af tabel 5.1 og resultatet af kalibreringen af figur 5.4.

Før kalibrering	November 2016	September 2017	Oktober 2017
K_s [mm t^{-1}]	19,2	19,2	19,2
θ_{FC} [m^3 m^{-3}]	0,253	0,253	0,253
θ_i [m^3 m^{-3}]	0,341	0,322	0,351
ϕ [m^3 m^{-3}]	0,426	0,426	0,426
b [-]	10,2	10,2	10,2
ψ_e [mm]	-4,5	-4,5	-4,5
D [mm]	50	50	50

Efter kalibrering	November 2016	September 2017	Oktober 2017
K_s [mm t^{-1}]	150	150	150
Reduktionsfaktor [-]	0,8	0,8	0,8

Tabel 5.1. Værdier for kalibreringsparametre før og efter kalibrering af Green & Ampt 2019.

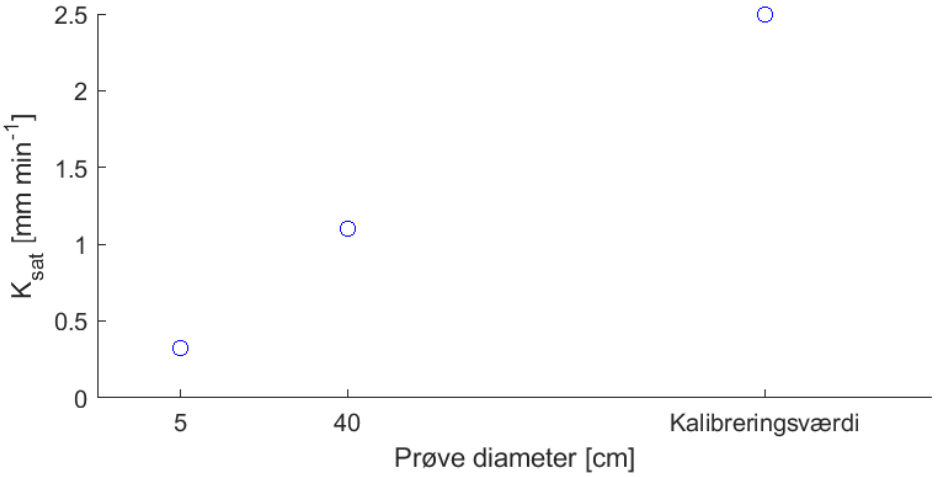


Figur 5.4. Akkumuleret afstrømningsmængde før og efter kalibrering af infiltrationsmodellen, for de tre udvalgte regnhændelser.

I reduktionsfaktoren indgår fordampningen, som reducerer regnintensiteten. Den kan sammenlignes med reduktionfaktoren for de befæstede arealer, som indgår i afløbsmodellen. Her reduceres regnintensiteten også, da ikke alt regnvand vil afstrømme til afløbssystemet pga. fordampning.

Den vandmættede hydrauliske ledningsevne er øget med en faktor 7,81 fra værdien, som er bestemt ud fra intaktprøver, til værdien som benyttes i Green & Ampt 2019, som

det fremgår af tabel 5.1. Det kan accepteres at ændre på den vandmættede hydrauliske ledningsevne pga. skala påvirkning, fra bestemmelse af parameteren ud fra en jordprøve på 100 cm^3, til anvendelse på et areal på 4300 m^2. Undersøgelser viser, at den vandmættede hydrauliske ledningsevne vil stige ved anvendelse på større skala end bestemmelsesskalaen [Jafari og Stark, 2017]. Det samme fremgår ud fra resultaterne af den vandmættede hydrauliske ledningsevne i Lystrup, som illustreret på figur 5.5.



Figur 5.5. Skala påvirkning af den vandmættede hydrauliske ledningsevne, K_s

Skalapåvirkningen for den vandmættede hydrauliske ledningsevne, K_s, er jordtypeafhængig. Da det ikke er muligt at kalibrere K_s for andre jordtyper, antages det, at K_s vil stige med en faktor 7,81 for alle de danske jordtyper. Det medfører, at den kalibrerede Green & Ampt 2019 benyttes direkte på andre jordtyper, blot ved ændring af inputparametre.

5.3 Følsomhedsanalyse ift. jordparametre

Jordparametrene, som er inputparametre til Green & Ampt 2019, er stedslig variable og bestemmes ud fra klassifikationsforsøg af jorden, hvorfor usikkerheder på parameterværdierne forekommer. Det undersøges derfor, hvilken betydning usikkerhed på inputparametrene har for den simulerede overfladeafstrømning. Herudfra kan det vurderes, hvor præcist en parameter skal bestemmes, for at mindske risikoen for fejlvurdering af overfladeafstrømningen ift. afstrømning fra det ubefæstede område. Green & Ampt 2019's følsomhed overfor følgende inputparametre undersøges.

θ_{FC}	Vandindhold ved markkapacitet	[m^3 m^{-3}]
K_s	Vandmættet hydraulisk ledningsevne	[mm t^{-1}]
D	Infiltrationsdybde	[mm]
ϕ	Porøsitet	[m^3 m^{-3}]
b	Campbell b	[-]
ψ_e	Trykpotientiale ved luftindtrængen	[mm]

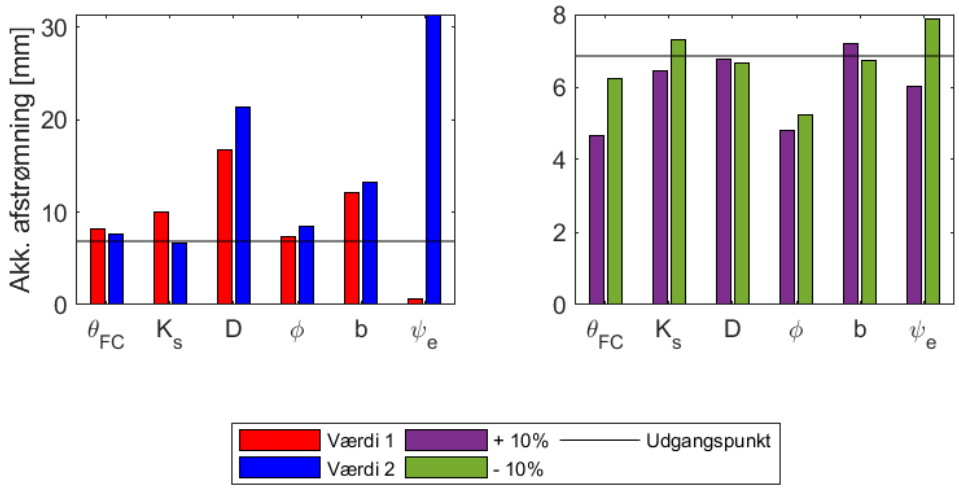
Green & Ampt 2019's følsomhed overfor inputparametrene, vurderes ud fra en absolut ændring i simuleret overfladeafstrømning ift. registreret overfladeafsrømning. Hver

inputparameter ændres en ad gangen, både med en ændring på +/- 10 %, men også med en vurderet realistisk usikkerhed for parametrene. De vurderede værdier som benyttes i følsomhedsanalysen fremgår af tabel 5.2.

	θ_{FC} [m^3 m^{-3}]	K_s [mm t^{-1}]	D [mm]	ϕ [m^3 m^{-3}]	b [-]	ψ_e [mm]
Værdi 1	0,263	100	100	0,436	12	-10
Værdi 2	0,243	200	200	0,416	14	-1

Tabel 5.2. Værdier der er vurderet til realistisk usikkerhed for inputparametrene og som benyttes i følsomhedanalysen.

Følsomhedsanalysen er foretaget over de tre udvalgte regnhændelser. Resultatet for den første regnhændelse, november 2016, er illustreret på figur 5.6, og resultatet for de to resterende regnhændelser fremgår af bilag D.



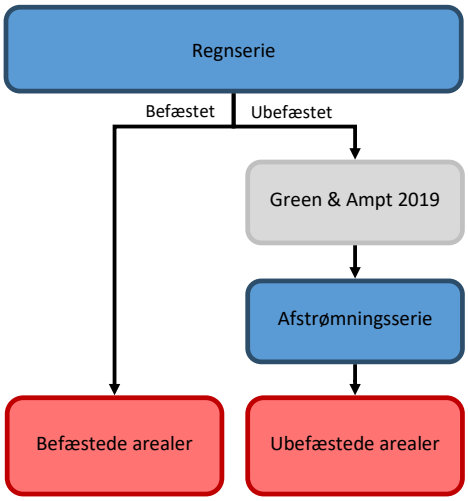
Figur 5.6. Følsomhedsanalyse af Green & Ampt 2019 over regnhændelse november 2016 som er udvalgt i afsnit 4.2.1.

Ud fra følsomhedsanalysen fremgår det, at det er inputparametrene D og ψ_e, som Green & Ampt 2019 er mest følsom overfor. Infiltrationsmodellen reagerer også på inputparametrene θ_{FC} og ϕ, ved en ændring på 10 %. Infiltrationsdybden og trykpotentialet er parametre, som der typisk ikke undersøges. Det er derfor relevant at undersøge de andre jordparametre for at mindske akkumuleret usikkerhed.

Overfladeafstrømning 6

Figur 6.1. Flowdiagram over rapportstruktur fra jordens inputparametre til vurdering af påvirkningen af afløbssystemet.

Afstrømningen er tredje led i rapportstrukturen, og er resultatet af Green & Ampt 2019, men også inputparametre til afløbsmodellen. For at finde afstrømningen, som definerer de ubefæstede arealer i afløbsmodellen, skal afstrømningsmodellen gennemregnes med den historiske regnserie, beskrevet i afsnit 4.2.2. Ved at gennemregne afstrømningsmodellen med den historiske regnserie, modificeres regnserien, så den repræsenterer overfladeafstrømningen fra de ubefæstede arealer. Den modificerede regnserie (afstrømningsserien) beskriver de ubefæstede arealer i afløbsmodellen, hvor den originale regnserie definerer de befæstede arealer, som der fremgår af figur 6.2.

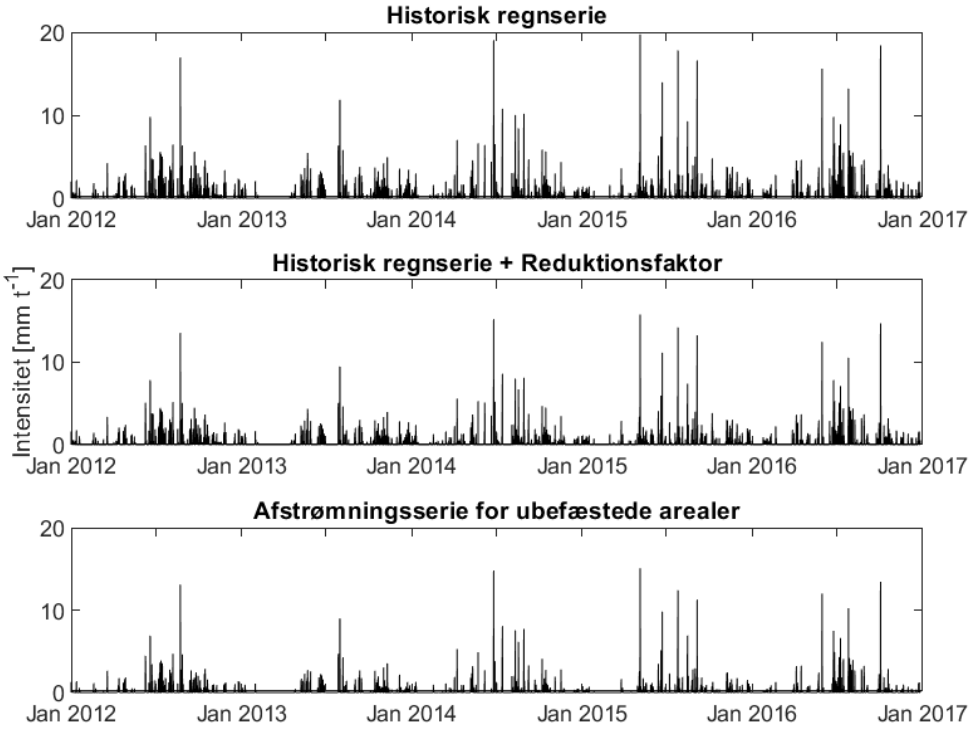


Figur 6.2. Konceptuel model over definering af hhv. de befæstede og ubefæstede araler.

Afstrømningen er defineret, som den del af regnintensiteten der ikke reduceres af reduktionsfaktoren eller infiltrerer i jorden. Overfladeafstrømningen undersøges for caseområdet i Lystrup og ift. jordprøverne i det danske jordkartotek og de udvalgte amerikanske jordklasser, beskrevet i afsnit 4 på side 23.

6.1 Overfladeafstrømning i Lystrup

Den historiske regnserie, introduceret i afsnit 4.2.2 på side 32, bliver modificeret til en afstrømningsserie, ud fra Green & Ampt 2019. Det er jorddata fra Lystrup, præsenteret i afsnit 4.1.1 på side 25, som er inputparametre til Green & Ampt 2019. Modificering fra regnserie til afstrømningsserie fremgår af figur 6.3. Der tages udgangspunkt i tidsperioden år 2012-2016, da denne periode indholder de største akkumulerede regnhændelser, som beskrevet i afsnit 4.2.2 på side 32.



Figur 6.3. Historisk regnserie fra Viby, SVK regnmåler 5177 og afstrømningsserie ift. jordtypen i Lystrup for perioden år 2012-2016. Historisk regnserie + Reduktionsfaktor: Historisk regnserie reduceret med en faktor 0,8 (afsnit 5.2). Afstrømningsserie for ubefæstede arealer: Historisk regnserie modificeret ift. Green & Ampt 2019 (afsnit 5.1).

Afstrømningsserie, udgør 36 % af den historiske regnserie ud fra akkumuleret mængde over tidsperioden år 2012-2016. Det betyder, at 36 % af den samlede regnmængde afstrømmer på overfladen, hvilket svarer til en afstrømning på ca. 250 mm om året. Mængden af regn og afstrømning varierer hen over året, og den største andel af afstrømning forekommer i sensommeren og om efteråret, som det fremgår af tabel 6.1.

	Vinter		Forår		Sommer		Efterår	
	Regn [mm]	Afstrømning [mm]	Regn [mm]	Afstrømning [mm]	Regn [mm]	Afstrømning [mm]	Regn [mm]	Afstrømning [mm]
2012	62	14	79	22	271	138	215	61
2013	50	14	98	30	85	40	171	55
2014	107	21	91	37	236	115	179	54
2015	46	7	141	52	259	119	219	73
2016	108	18	138	45	234	127	181	53
GNS.	66	15	109	39	217	93	193	55

Tabel 6.1. Akkumuleret regn og afstrømning fra ubefæstede arealer opgjort for de fire årstider hen over tidsperioden fra år 2012-2016.

Ud fra tidsperioden år 2012-2016, forekommer den største andel af afstrømning om sommeren, hvor den største andel af regnen også falder. Oversvømmelseshændelsen, som fandt sted i Aarhus i sommeren år 2012 jf. Mathiasen, 2012, giver derved udslag på simuleret afstrømningsmængde. Her afstrømmer 51 % af regnen, hvilket giver en akkumuleret afstrømning på 138 mm i sommeren år 2012. Det er den periode i løbet af de 5 år, med størst simuleret akkumuleret afstrømning.

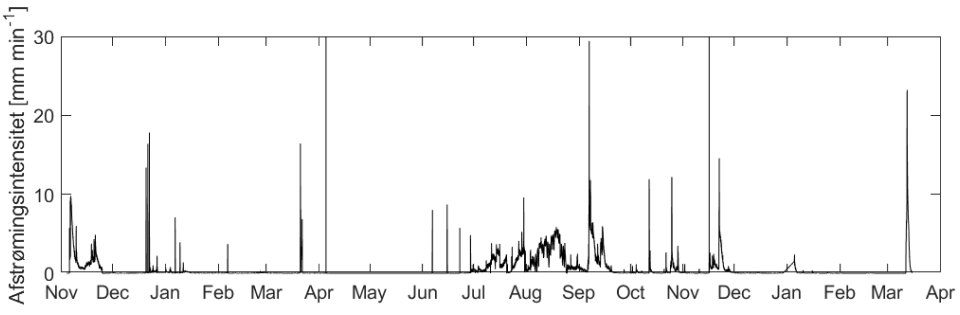
Afstrømningsserien er ikke en procentsats af regnserien, da der om sommeren afstrømmer ca. det dobbelte procentpoint af regnen end om vinteren, som det fremgår af tabel 6.2.

	Vinter	Forår	Sommer	Efterår
2012	23	28	51	28
2013	28	31	47	32
2014	20	41	49	30
2015	15	37	46	33
2016	16	33	54	29
GNS.	14	22	32	20

Tabel 6.2. Procentdel af regnen som er afstrømmet opgjort for de fire årstider i tidsperioden fra år 2012-2016.

Den større andel af afstrømning, om sommeren end om vinteren, kan skyldes den mindre vinternedbør, som i simuleringen vil give en mindre vandmætning af jorden. Green & Ampt 2019 er opsat til at skabe fuld overfladeafstrømning ved fuld vandmætning af jorden. En mindre initial vandmætning af jorden, vil derfor mindske risikoen for fuld overfladeafstrømning, hvilket kan medføre forskellen på andelen af afstrømning om sommeren og vinteren.

Den simulerede årsvariation for afstrømning fra de ubefæstede arealer, stemmer overens med den registrerede variation i afstrømning fra det ubefæstede areal i Lystrup. Her har de største registrerede afstrømningshændelser fundet sted i sensommeren og om efteråret, som fremgår af figur 6.4.



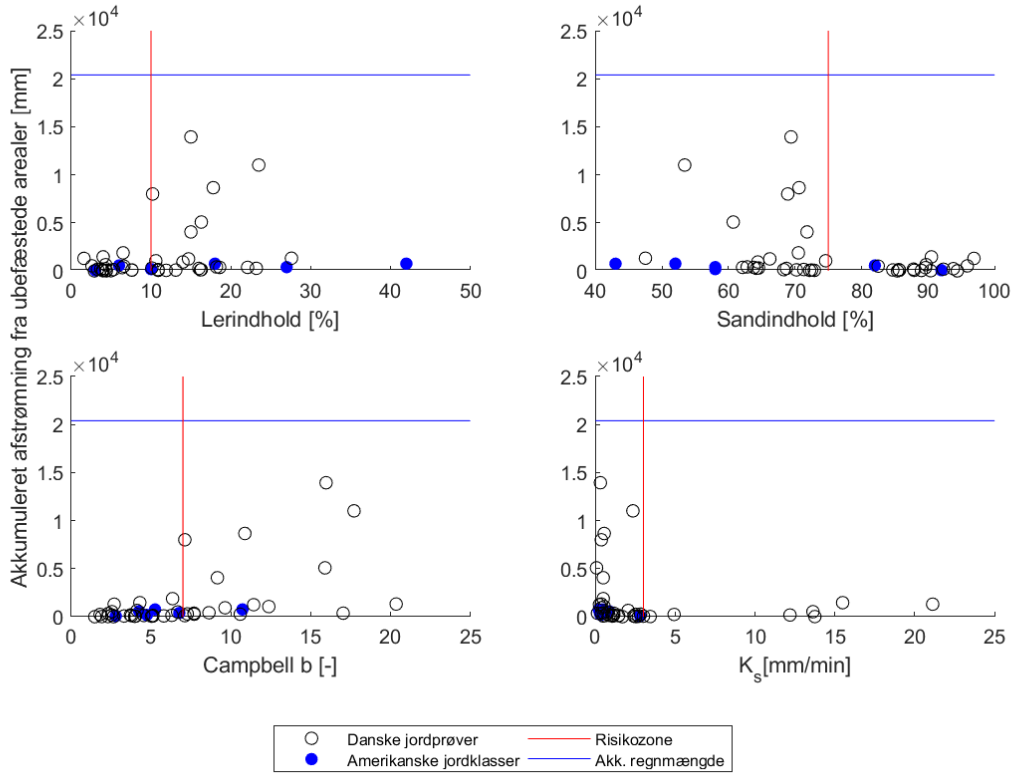
Figur 6.4. Rå data over registreret afstrømning fra det ubefæstede areal i Lystrup.

6.2 Overfladeafstrømning ift. jordtype

Overfladeafstrømningen undersøges for de seks udvalgte amerikanske jordklasser og de 41 danske jordprøver, beskrevet i afsnit 4 på side 23, ud fra Green & Ampt 2019. Afstrømningsmodellen er udvidet og kalibreret til at kunne simulere den registrerede afstrømning fra det ubefæstede areal i Lystrup. Da der ikke forekommer data til at kunne validere Green & Ampt 2019 på andre jordtyper, antages det, at den kan benyttes direkte på andre danske jordtyper, blot ved ændring af inputparametrene.

Under kalibreringen af Green & Ampt 2019, blev den vandmættede hydrauliske ledningsevne, K_s, opskaleret med en faktor 7,81 ift. værdien for intaktprøver, afsnit 5.2 på side 38. Den vandmættede hydrauliske ledningsevne, som er angivet for de amerikanske jordklasser og det danske jordkartotek, er alle fundet ud fra intaktprøver. Det vurderes derfor, at de opgivne værdier for K_s, kan opskaleres med samme faktor. Der kan forekomme usikkerheder, ved opskalring med samme faktor på tværs af jordtyper. Det er ikke muligt at undersøge usikkerheden pga. manglende data, og den negligeres derfor.

Afstrømningen undersøges som akkumuleret afstrømning under den historie regnserie fra år 1980-2018. Afstrømning ift. inputparametre for både de amerikanske jordklasser og det danske jordkartotek er illustreret af figur 6.5.



Figur 6.5. Akkumuleret afstrømning for de udvalgte amerikanske jordklasser og jordprøverne fra det danske jordkartotek ift. jordparameter. Afstrømning er beregnet ud fra Green & Ampt 2019, beskrevet i afsnit 5.1. Rød linje angiver risikozone for markant afstrømningsmængde fra ubefæstede arealer. Blå linje er akkumuleret regnmængde i perioden år 1980-2018.

Da afstrømning er komplekst at beregne og afhænger af flere inputparametre, som har indflydelse på hinanden, kan der ikke opstilles en entydig tendens over akkumuleret afstrømning ift. jordparametre, som det fremgår af figur 6.5. Der kan derimod opstilles risikozoner, hvor der er risiko for, at jordtypen skaber en betydelig afstrømningsmængde. Risikoen for markante afstrømningsmængder, vurderes ud fra figur 6.5, at stige ved et lerindhold på over 10 % eller et sandindhold på under 75 %.

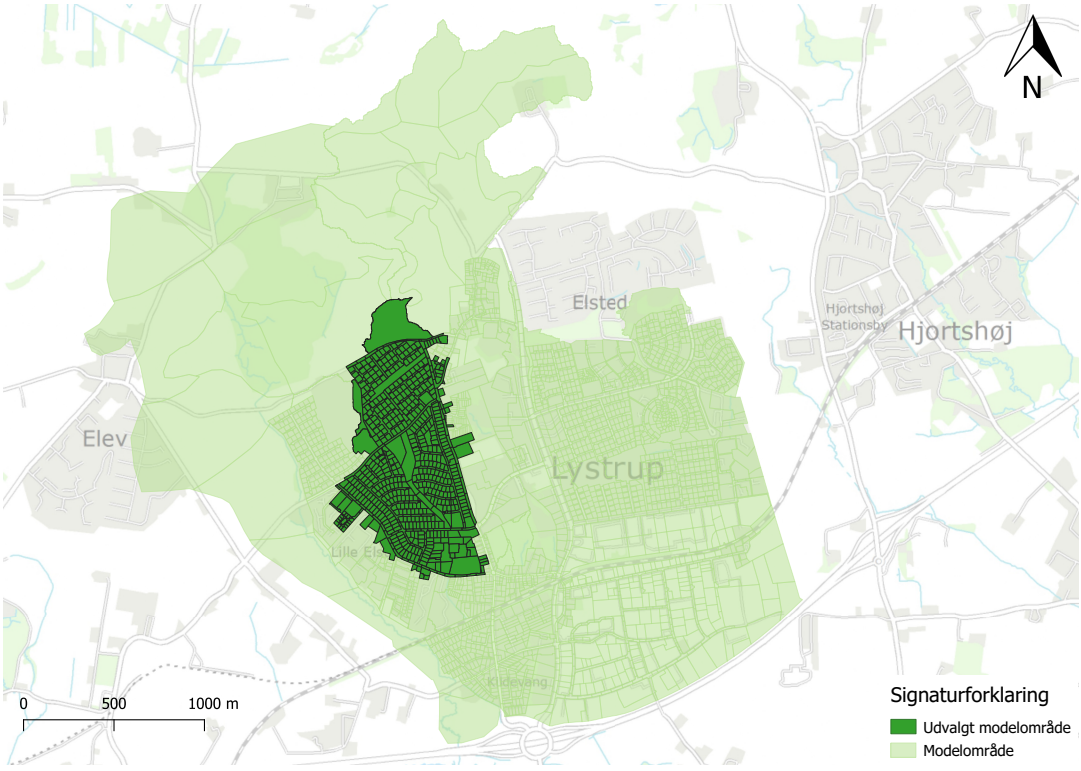
De amerikanske jordklasser estimerer ikke markante afstrømningsmængder, som det fremkommer af nogen danske jordtyper. Det vurderes derfor, at der er risiko for underestimering af afstrømningsforholdene ved brug af de værdier fra de amerikanske jordklasser. I stedet for anbefales det, at udvælge en af de danske jordprøver som modeljord for afstrømningforholdene. De amerikanske jordklasser benyttes derfor ikke til yderligere vurdering af påvirkning på afløbssystemet funktionspraksis.

Afløbsmodel 7

Figur 7.1. Flowdiagram over rapportstruktur fra jordens inputparametre til vurdering af påvirkningen af afløbssystemet.

Afløbsmodellen er fjerde og sidste led inden betydningen af det ekstra afstrømningsbidrag fra ubefæstede arealer vurderes, som det fremgår af figur 7.1. Analysen er resultatet af afløbsmodellen og betydningen undersøges ud fra en afløbsmodel over Lystrup.

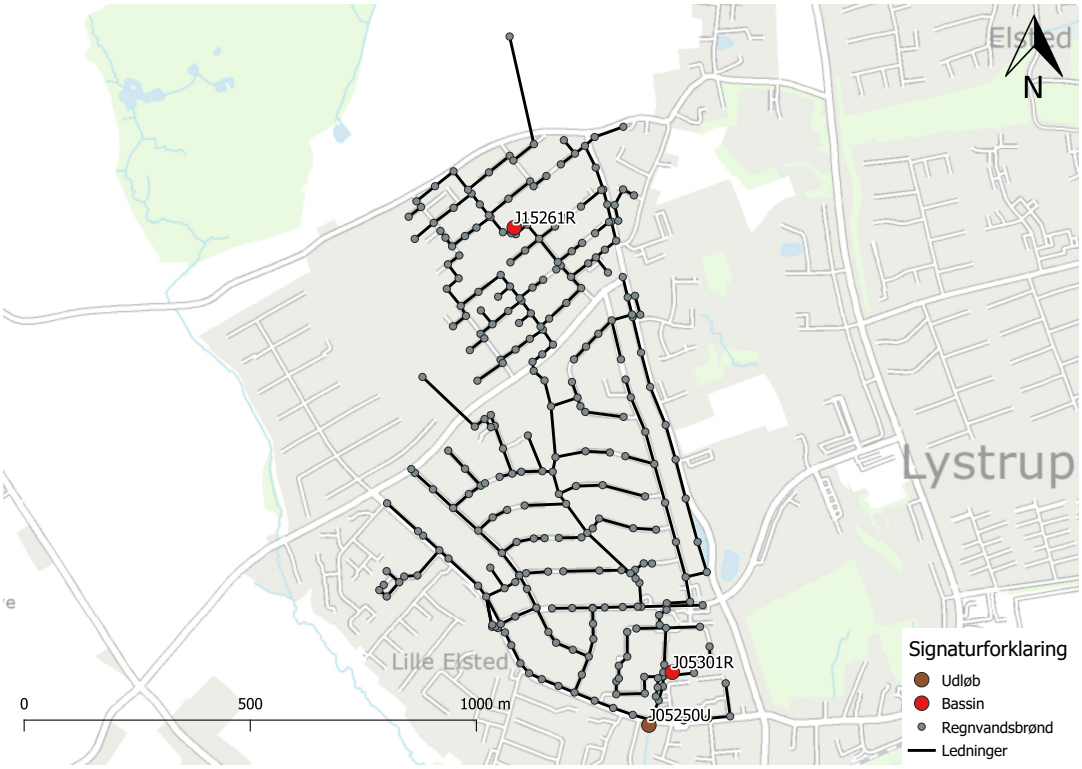
Da det er en sammenligning af to afløbsmodeller, er det ikke nødvendigt at analysere hele afløbssystemet i Lystrup. Der udvælges derfor et delområde af afløbsmodellen, for at effektivisere simuleringsprocessen. Området er udvalgt ved at undersøge oplandene til de enkelte udløb. Der ønskes et delopland, som repræsenterer et gennemsnitsopland til en afløbsmodel fra et byområde, fordi de befæstede arealer også har betydning for analysen af afløbsmodellen. Det medfører et opland, som indeholder paracelhusområde, stisystemer og grønne arealer. Det udvalgte delopland fremgår af figur 7.2.



Figur 7.2. Udvalgt afløbsmodelområde ud fra oprindelig afløbsmodel for Lystrup.

7.1 Modelopbygning

Den udleverede afløbsmodellen er opbygget i MIKE URBAN ud fra det reelle afløbssystem, som finder sted i Lystrup. I Lystrup er der separatkloakeret, og afløbsmodellen indholder derfor kun regnvandsledninger, da spildevandsafledningen håndteres separat og ikke er relevant for håndteringen af regnvandet. Det udvalgte afløbsmodelområde er 77 ha, og indeholder to bassiner og et udløb. Placeringen af brønde, ledninger, bassiner og udløb fremgår af figur 7.3.



Figur 7.3. Placering af regnvandsbrønde, bassiner, ledninger og udløb i det udvalgte modelområde.

Den oprindelige afløbsmodel er opbygget som en standard afløbsmodel, hvor der ikke tages højde for afstrømningsbidrag fra ubefæstede arealer. Det medfører, at oplandene i afløbsmodellen er defineret ud fra en befæstelsesgrad, hydrologisk reduktionsfaktor og et initialtab. Befæstelsesgraden beskriver andelen af oplandet, der er befæstet areal og derved bidrager til afløbssystemet. Den hydrologiske reduktionsfaktor angiver andelen af det befæstede areal, der bidrager til afstrømningen, da en del af regnvandet vil blive tilbageholdt pga. lavningsmagasinering og lignende. Initialtabet er mængden af regn, der skal forekomme, før der opstår afstrømning til afløbssystemet, da det antages at regnmængden indtil initialtabet går til befugtning af overfladen. [Aarhus Kommune og Rambøll, 2011] Parameterværdier og fysisk data som benyttes i den oprindelige afløbsmodel fremgår af tabel 7.1.

Hydrologiske parametre		
Befæstelsesgrad, α	[%]	varierende
Hydrologisk reduktionsfaktor, φ	[-]	0,9-1
Initialtab, R_0	[m]	0,0006
Koncentrationstid, t_c	[min]	7

Tabel 7.1. Hydrologiske parameterværdier for den udleveret Mike Urban afløbsmodel.

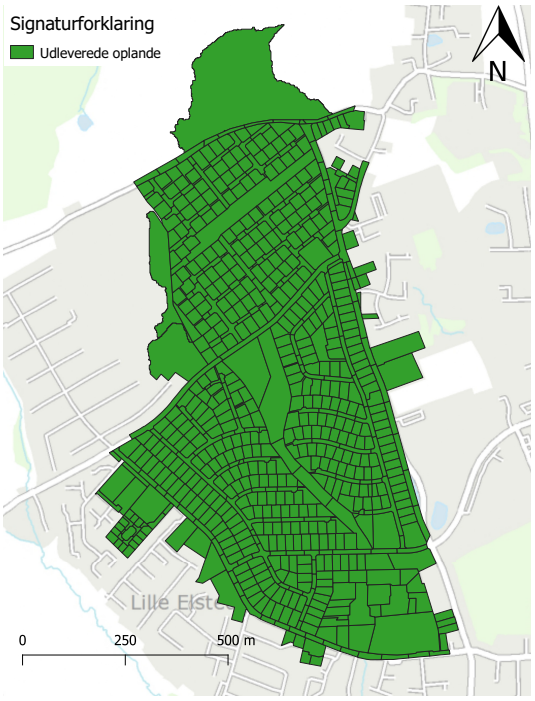
For at inkorporere afstrømningsbidraget fra de ubefæstede arealer i afløbsmodellen, skal der differentieres mellem befæstede og ubefæstede arealer. Det medfører en opdeling af oplandsarealerne, så de ikke defineres ud fra en befæstelsesgrad.

7.2 Afstrømning fra ubefæstede arealer

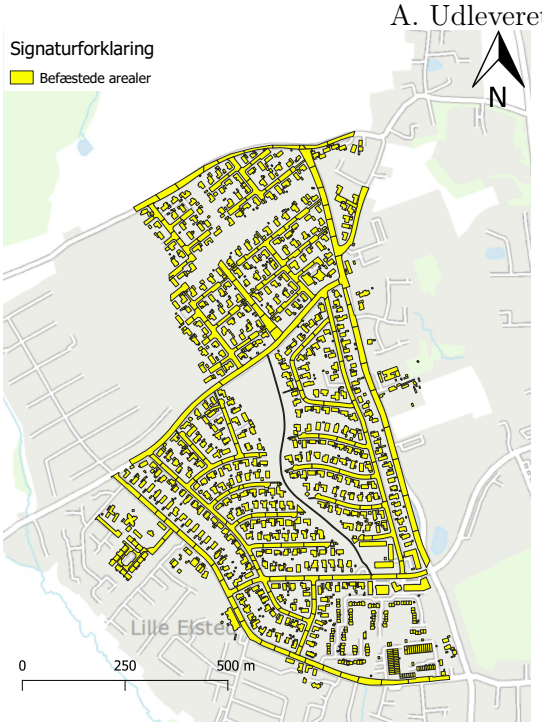
Oplandene i den udleverede afløbsmodel bliver defineret ud fra en befæstelsesgrad. Det medfører, at der ikke er en direkte opdeling af de befæstede og ubefæstede arealer, og de kan derfor ikke defineres forskellig, som det fremgår af figur 7.5. Den udleverede afløbsmodel er standard metoden til opstilling af afløbsmodeller i Danmark i dag.

Det er nødvendigt at opdele oplandene i en befæstet og ubefæstet del, for at kunne definere oplandsarealerne forskelligt. Derved bliver oplandene defineret som enten 100 % befæstede- eller 100 % ubefæstede arealer, alt efter hvilken overfladebelægning oplandet består af. Befæstede arealer består af tagflader og vejarealer. Det resterende areal vurderes at være grønne områder, hvor infiltration kan forekomme. Derved forefindes der ingen oplande, som er delvist befæstede, da alle oplande defineres som enten befæstede eller ubefæstede.

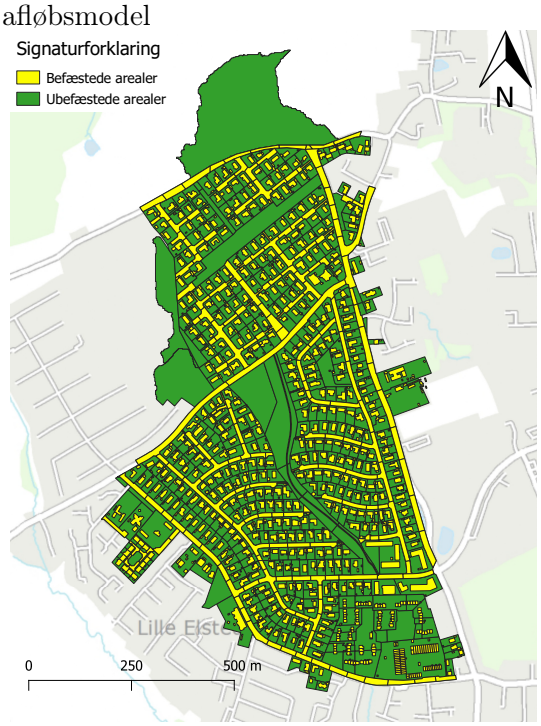
Der forefindes derved tre afløbsmodeller, som benyttes i rapporten. Den udleverede afløbsmodel, som er en standard afløbsmodel og en afløbsmodel hhv. ekskl. og inkl. de ubefæstede araler. Afløbsmodellen ekskl. de ubefæstede arealer benyttes som referencemodel til vurdering af påvirkning af de ubefæstede arealer på afløbssystemet. Denne afløbsmodel benyttes for at sikre samme sammenligningsgrundlag ift. andelen af befæstede og ubefæstede arealer for de to afløbsmodeller. Oplandsopdeling for de tre afløbsmodeller fremgår af figur 7.4.



A. Udleveret afløbsmodel



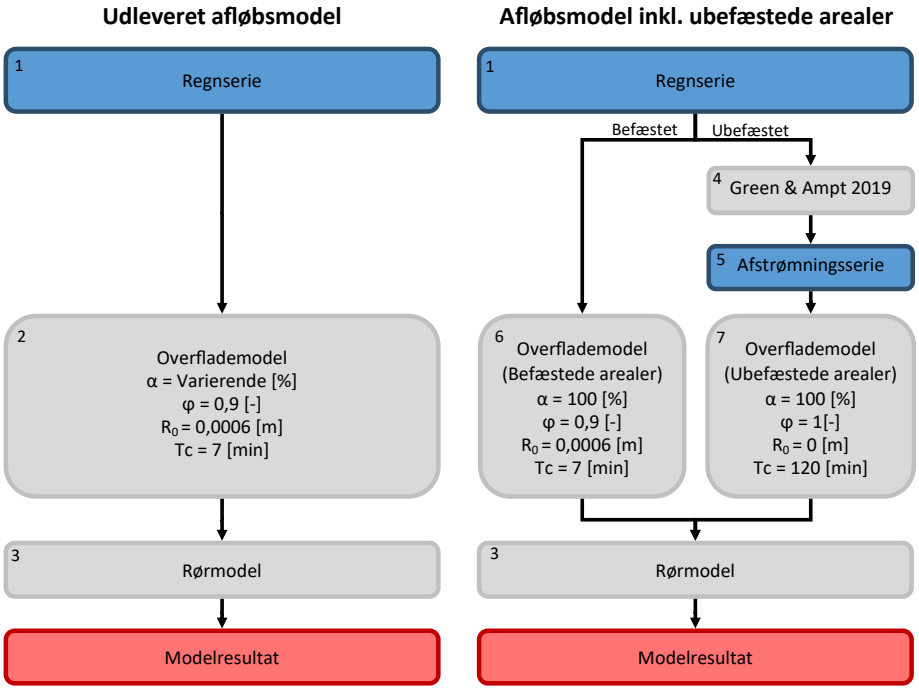
B. Afløbsmodel ekskl. ubefæstede araler



C. Afløbsmodel inkl. ubefæstede arealer

Figur 7.4. De tre typer af afløbsmodel. A. Standrad afløbsmodel i Danmark i dag. B. Benyttes som referencemodel. C. Benyttes til undersøgelse af påvirkningen på afløbssystemet.

Opdeling af oplandsarealerne medfører, at der kan tilkobles forskellige regnserier, som defineres hhv. befæstede og ubefæstede arealer. Da variationen på overfladeafstrømning fra befæstet og ubefæstet areal er inkorporeret i de tilkoblede regnserier, skal alle oplandene have samme befæstelsesgrad i afløbsmodellen. Det medfører, at alle oplandsarealer har en befæstelsesgrad på 100 % både for befæstede og ubefæstede oplande, som det fremgår af figur 7.5.



Figur 7.5. Flowdiagram over beregningsstrukturen for den udleveret afløbsmodel og afløbsmodellen inkl. de ubefæstede arealer.

1. Den historiske regnserie definerer afstrømningsmængden i den udleverede afløbsmodel og afstrømningen fra de befæstede arealer (beregningsboks 6) i afløbsmodellen inkl. ubefæstede arealer. Der ud over er den inputparameter til afstrømningsmodellen, som definerer de ubefæstede arealer (beregningsboks 7) i afløbsmodellen inkl. ubefæstede arealer.

2. Overfladearealerne i den udleverede afløbsmodel defineres ud fra en befæstelsesgrad, som angiver andelen af arealet der bidrager til afløbssystmet. Det er standard metoden for opbygning af afløbsmodeller i Danmark i dag.

3. Rørmodellen er opsat ens for afløbsmodellerne og tager udgangspunkt i manningformlen, som beskrevet i afsnit 2.4 på side 19.

4. Regnserien modificeres til en afstrømningsserie ud fra afstrømningsmodellen, Green & Ampt 2019. Afstrømningsmodellen er forklaret i afsnit 5.1 på side 35.

5. Afstrømningsserien, som er resultatet af afstrømningsmodellen, definerer de ubefæstede arealer i afløbsmodellen.

6. De befæstede arealer defineres ud fra samme hydrologiske parametre som i den udleverede afløbsmodel. Befæstelsesgraden ændres til 100 % for alle de ubefæstede arealer, da de befæstede og ubefæstede arealer er adskilt fra hinanden.

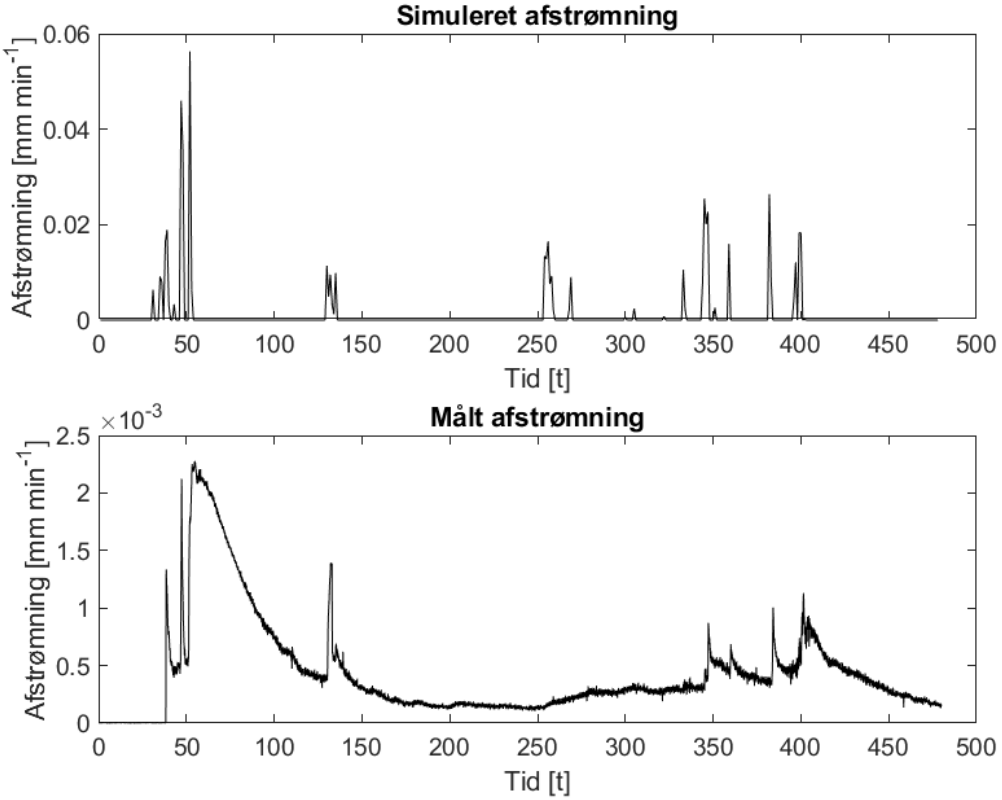
7. Da de befæstede og ubefæstede arealer er adskilt, defineres de ubefæstede arealer som 100 % befæstet, da der tilkobles en modificeret regnserie i form af en afstrømningsserie. Der tages højde for de hydrologiske parametre for de ubefæstede arealer i afstrømningsmodellen, hvorfor reduktionsfaktoren sættes til 1 og initialtabet til 0. Der tages ikke højde for koncentrationstiden i afstrømningsmodellen og den indstilles derfor i afløbsmodellen.

7.2.1 Parameterbestemmelse

Oplandsarealerne defineres ud fra de hydrologiske parametre; befæstelsesgrad, hydrologisk reduktionsfaktor, initialtab og koncentrationstid. Ved opdeling af oplandsarealerne skal de befæstede og ubefæstede arealer defineres forskelligt udover befæstelsesgraden, som sættes til 100 % for alle oplandsarealer. For de befæstede arealer forbliver de hydrologiske parametre som i tabel 7.1, da de beskriver afstrømningsgraden fra de befæstede arealer.

De ubefæstede arealer tager højde for de hydrologiske parametre gennem Green & Ampt 2019. De er derved inkorporeret i afstrømningsserien, som definerer de ubefæstede arealer. Det medfører, at initialtabet sættes til 0, og at den hydrologiske reduktionsfaktor sættes til 1. Bibeholdes de oprindelige parameterværdier medfører det en yderligere reducering af overfladeafstrømning, og skaber en underestimering af betydningen for afløbssystemet.

Green & Ampt 2019 beregner afstrømning, som en peak-værdi når regnen forekommer, og tager derved ikke højde for koncentrationstiden i oplandet. Det fremgår af figur 7.6 og bilag A, hvor simuleret og registreret afstrømning for de udvalgte regnhændelser beskrevet i afsnit 4.2.1 er illustreret.



Figur 7.6. Simuleret og målt afstrømning for det ubefæstede caseområde i Lystrup under regnhændelsen november 2016. Simuleret afstrømning er beregnet ud fra Green & Ampt 2019 (afsnit 5.1 på side 35), og målt afstrømning er registreret under MOGO-projektet [Nielsen m.fl., 2019].

Koncentrationstiden i oplandet har indflydelse på længden af afstrømningen, og vil derved skabe en blødere afstrømning, frem for en peak-værdi, som det fremgår af figur 7.6. Koncentrationstiden, som benyttes i afløbsmodellen, er fundet ved at undersøge tiden fra den simulerede peak-værdi til den registrerede afstrømningsmaksimum. Ved at undersøge denne tidsforskydning for de tre regnhændelser beskrevet i afsnit 4.2.1, fremkommer en tidsforskydning på 2 timer. Ud fra denne betragtning ændres koncentrationstiden for de ubefæstede arealer til 120 min, da det vurderes at skabe et mere realistisk billede af afstrømningsforløbet.

Koncentrationstiden har betydning for afløbssystemets funktionspraksis, da der skabes en forsinkelse af afstrømningsbidraget fra de ubefæstede arealer. Ændring i koncentrationstiden kan derfor ændre vurdering af afstrømningsbidragets påvirkningen på afløbssystemet. Det kan derfor diskuteres, hvorvidt afstrømningstiden bør vurderes som forsinkelse på peak-værdier eller på afstrømningsmængder, og hvorvidt koncentrationstid ud fra caseområdet i Lystrup kan konverteres til andre ubefæstede områder. Caseområdet i Lystrup er ca. 4300 m^2, hvilket vurderes at være større end et gennesnits areal for et ubefæstet område i afløbsmodellen. Der kan derfor argumenteres for, at koncentrationstiden skal differentieres ift. areal størrelse. Betydning af koncentrationstiden er ikke undersøgt i rapporten.

Parameterværdierne, som benyttes i afløbsmodellen efter opdeling af oplandene, fremgår af tabel 7.2.

Hydrologiske parametre		Befæstet areal	Ubefæstet areal
Befæstelsesgrad, α	[%]	100	100
Hydrologisk reduktionsfaktor, φ	[-]	0,9	1
Initialtab, R_0	[m]	0,0006	0
Koncentrationstid, t_c	[min]	7	120

Tabel 7.2. Hydrologiske parameterværdier for Mike Urban afløbsmodel inkl. de ubefæstede arealer.

7.3 Opsætning af simuleringskriterier

For at få statistiske resultater for opstuvning til terræn og flow i afløbssystemet, køres en LTS-simulering (Long Time Statistics). Det kræver, at der opsættes en række simuleringskriterier i MIKE URBAN, som har betydning for hvilke regnhændelser der bliver medtaget i analysen. Simuleringskriterierne skal derfor overvejes, for at sikre at der undersøges for de ønskede regnhændelser.

LTS-simuleringen udvælger simuleringsperioder ud fra start- og stopkriterier, og der undersøges derved kun for regnhændelser indenfor simuleringsperioderne. Ved analyse af det ekstra afstrømningsbidrags betydning for afløbssystmet, er det interessant, at undersøge for alle regnhændelser, da afstrømning fra ubefæstede arealer ikke kun afhænger af regnintensiteten, men også jordens vandmætning og derved den forudgående historik. Start- og stopkriterierne defineres ud fra indløbsflow til afløbsmodellen i en givet tidsperiode. Ved startkriteriet er indløbsflowet et minimumsflow, som skal være opnået i tidsperioden, for at starte en simuleringsperiode. Omvendt ved stopkriteriet, er det et maksimumsflow, som ikke må opnås i den pågældende tidsperiode, for at afslutte

simuleringsperioden. De opstillede start- og stopkriterier for LTS-simuleringen fremgår af tabel 7.3.

	Indløbsflow [m^3 s^{-1}]	Tid [min]
Startkriterie	0,01	1
Stopkriterie	0,01	30

Tabel 7.3. Start- og stopkriterier for LTS-simuleringen i MIKE URBAN.

Det er muligt at opbygge simuleringen med en hotstart, hvilket betyder, at der vil være vand i systemet ved begyndelsen af en regnhændelse/simuleringsperiode. Der benyttes ingen hotstart, og det antages derved, at systemet er tomt, når en ny simuleringsperiode påbegyndes.

Der benyttes samme jobliste for alle de beregnede afløbsmodeller, for at kunne sammenligne dem efterfølgende. Joblisten er baseret på afløbsmodellen inkl. de ubefæstede arealer, hvor de ubefæstede arealer defineres ud fra jordtypen i Lystrup.

Påvirkning af afløbssystemet 8

Figur 8.1. Flowdiagram over rapportstruktur fra jordens inputparametre til vurdering af påvirkningen af afløbssystemet.

Det sidste led i rapportstrukturen er vurdering af påvirkningen på afløbssystemet, ved medregning af et ekstra afstrømningsbidrag fra de ubefæstede arealer. Vurderingen sker på baggrund af en gennemregning af afløbssystemet ud fra afløbsmodellen ekskl. de ubefæstede arealer, som sammenlignes med resultatet fra afløbsmodellen inkl. de ubefæstede arealer. Påvirkningen undersøges både ift. caseområdet i Lystrup og ift. jordtyperne i det danske jordkartotek, ud fra afløbsmodellen inkl. de ubefæstede arealer.

Påvirkningen på afløbssystemet analyseres ud fra beregningsniveau 3, hvor der benyttes en historisk regnserie, som beskrevet i afsnit 1.1 på side 2. Beregningsniveau 3 benyttes for at udføre en statistisk analyse af påvirkningen på afløbssystemets funktionspraksis.

8.1 Påvirkning på afløbssystemet i caseområdet

Det forventes, at belastningen på afløbssystemet øges, ved medregning af et ekstra afstrømningsbidrag fra de ubefæstede arealer. En øget belastning kan resultere i lavere gentagelseperiode for opstuvning til terræn, større samlet udløbsmængde og større udnyttelse af bassiner. Udløbsmængden stiger som forventet ved medregning af de ubefæstede arealer, som det fremgår af tabel 8.1.

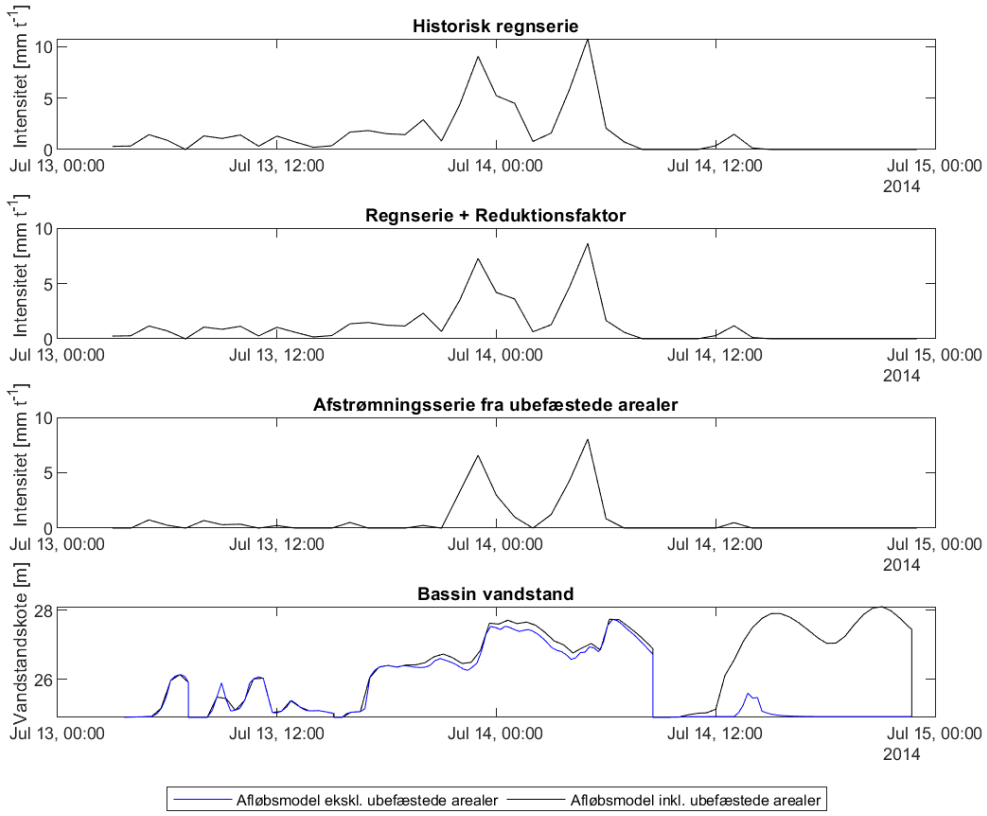
	Afløbsmodel ekskl. ubefæstede arealer [m^3 10^6]	Afløbsmodel inkl. ubefæstede arealer [m^3 10^6]	Stigning [%]
Samlet udløbsmængde	3,5	6,2	43

Tabel 8.1. Samlet udløbsmængde fra J05250U, for afløbsmodel hhv. ekskl. og inkl. ubefæstede arealer , ved gennemregning af historisk regnserie på 38 år.

Afstrømning genereres ikke kun under ekstremhændelser, og det er derfor relevant også at medtage mindre regnhændelser i analysen. Ud fra den samlede udløbsmængde i afløbsmodellen ekskl. de ubefæstede arealer vurderes det, at andelen af regn som medtages

i analysen er acceptabel. Det vurderes, da 80 % af regnen medregnes i afløbsmodellen, beregnet ud fra 25 ha befæstet areal i afløbsmodellen og at der falder 20.400 mm regn i løbet af de 38 år. Den fravalgte regn vurderes ikke at have betydning for afløbssystemet.

Vandets forløb fra regnhændelse til vandstand i bassin J05301R, fremgår af figur 8.2.

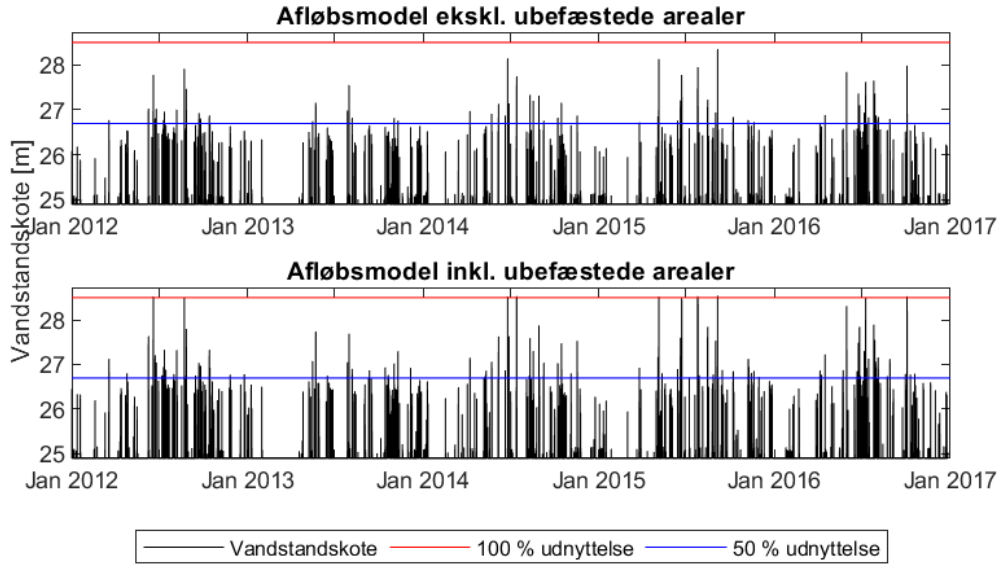


Figur 8.2. Vandets forløb fra regnhændelse til vandstand i bassin J05301R, under regnhændelsen 13.-14. juli 2014. Historisk regnserie + Reduktionsfaktor: Historisk regnserie reduceret med reduktionsfaktor på 0,8, beskrevet i afsnit 5.2 på side 38. Afstrømningsserie for ubefæstede arealer: Historisk regnserie modificeret ift. Green & Ampt 2019, beskrevet i afsnit 5.1 på side 35.

De ubefæstede arealer påvirker bassin vandstanden med en forsinkelse, hvilket skyldes koncentrationstiden på 2 timer. Ud fra bassin vandstanden fremgår det, at beregningen stoppes d. 14. juli omkring kl. 8.00 og derved tømmes bassinet. Ved påbegyndelse af ny simuleringsperiode, antages bassinet tomt, hvilket vurderes at være forkert i denne situation. Det vurderes derfor, at de ubefæstede arealer i denne situation vil øge bassin vandstanden mere end analysen viser. Der medtages derfor ikke nok simuleringsperioder til at vurdere påvirkning på afløbssystemet. Der ændres ikke på simuleringsperioderne, da det er en relativ vurdering mellem to afløbssystemer.

Afløbssystemet i Lystrup er et separat system, og skal derfor opretholdes en gentagelsesperiode for opstuvning til terræn på minimum 5 år jf. Spildevandskomiteen, 2005. Bassin udnyttelsen og afløbssystemets funktionspraksis undersøges derfor, for at kunne vurdere om det ekstra afstrømningsbidrag har betydning for afløbssystemets funktionspraksis.

Udnyttelse af regnvandsbassinerne vurderes ud fra vandstanden, hvor 100 % udnyttelse antages som vandstand til terræn. Der indgår to regnvandsbassiner i modeloplandet, placeret som det fremgår af figur 7.3 på side 50. Vandstanden i regnvandsbassin J05301R, for afløbsmodellen hhv. ekskl. og inkl. de ubefæstede arealer er illustreret for tidsperioden år 2012-2016 i figur 8.3 og tabel 8.2.



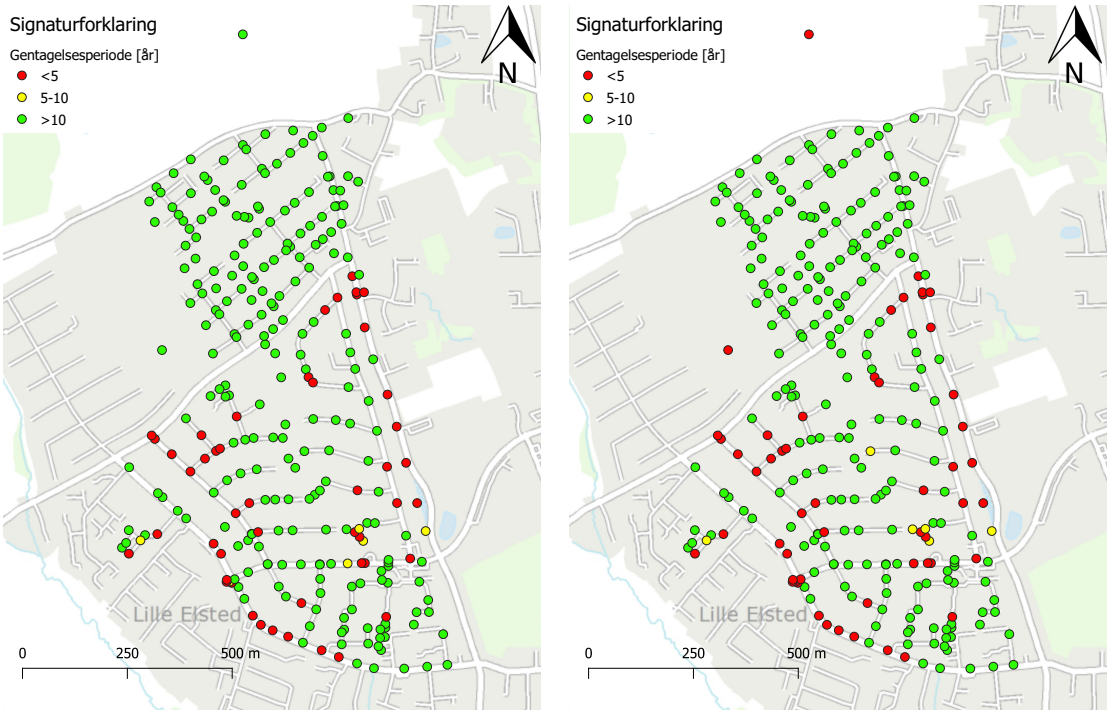
Figur 8.3. Vandstandskote og udnyttelse af bassin J05301R, i referencemodellen og Lystrup modellen.

		Referencemodel	Lystrup model
100 % udnyttelse	[år]	38	4,2
Opstuvning til terræn	[antal brønde]	49	55

Tabel 8.2. Gentagelsesperiode for udnyttelse af bassin J05301R i hhv. referencemodellen og Lystrup modellen.

Ved medregning af de ubefæstede arealer, kan bassin J05301R ikke opretholde afløbssystemets funktionspraksis på minimum 5 års gentagelsesperiode, som det fremgår af tabel 8.2. Det medfører, at bassinvolumen skal udvides for at kunne overholde krævene til 100 % udnyttelse. Det vurderes derfor, at medregning af det ekstra afstrømningsbidrag fra de ubefæstede arealer har betydning for bassindimensioneringen.

Vurderes funktionspraksissen ud fra gentagelsesperiode for opstuvning til terræn, stiger antallet af brønde der opnår en gentagelseperiode på mindre end 5 år med ca. 10 %, som det fremgår af tabel 8.2 og figur 8.4. Det ekstra afstrømningsbidrag vurderes derfor ikke at have betydning for opstuvningen til terræn, da en ændring på 10 % vurderes at være indenfor modelusikkerheden.



Afløbsmodel ekskl. ubefæstede arealer Afløbsmodel inkl. ubefæstede arealer

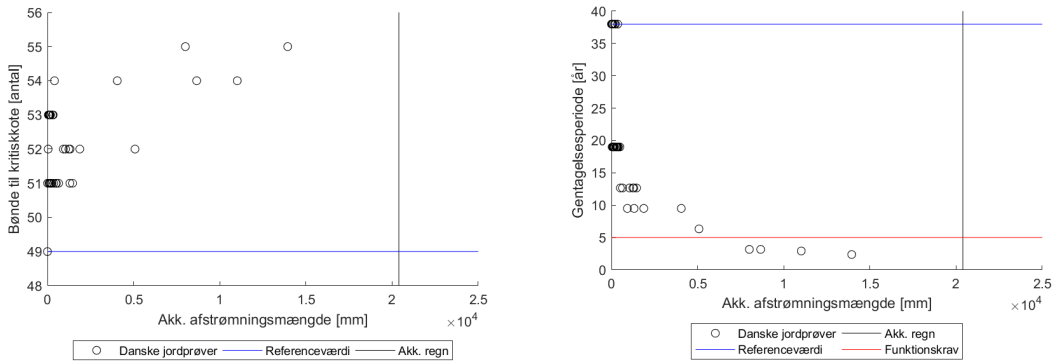
Figur 8.4. Gentagelsesperiode for opstuvning til terræn, ved en historisk regnserie på 39 år. Beregnet for referencemodellen og Lystrup modellen.

Årsagen til at funktionspraksissen er upåvirket ved vurdering af opstuvning til terræn, skyldes at de ubefæstede arealer har en koncentrationstid på 2 timer, som medfører en forsinkelse af bidraget fra de ubefæstede arealer, som det fremgår af figur 8.2. Det betyder, at afløbssystemets kapacitet ikke bliver opbrugt på trods af håndtering af en større akkumuleret mængde regnvand.

8.2 Påvirkning på afløbssystemet ift. jordtype

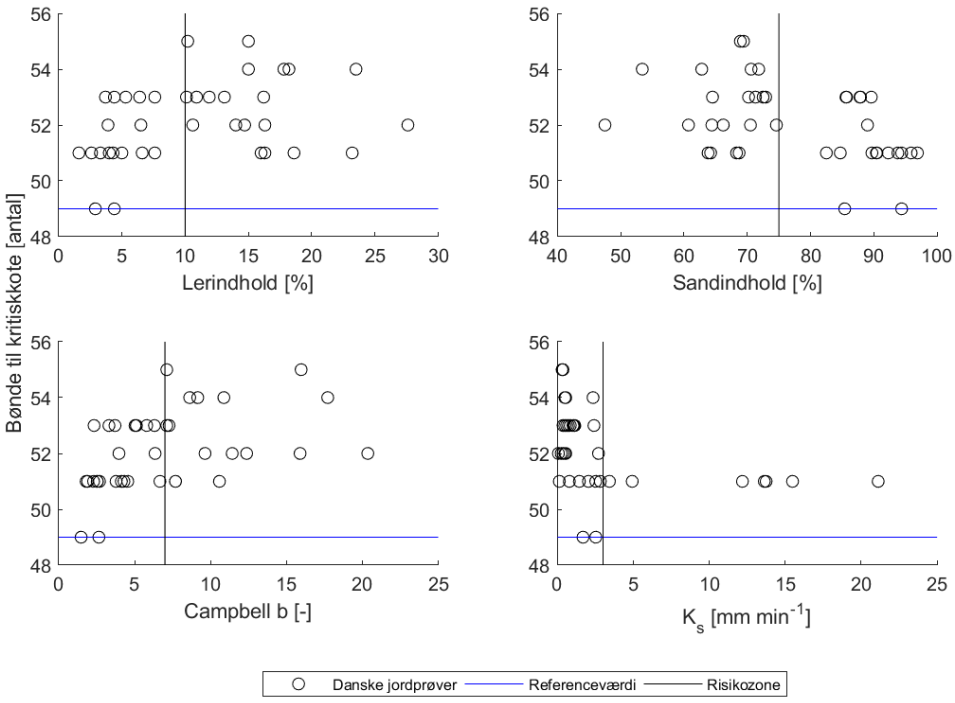
De ubefæstede arealer bliver defineret forskelligt for hver jordtype, og defineres ud fra afstrømningsserien, som er genereret for hver jordtype i afsnit 6.2. Da det er en relativ sammenligning mellem jordtyperne, benyttes samme afløbsmodel, parameterværdier og jobliste til LTS-simulering (Long Term Statistik), som beskrevet i afsnit 7 på side 49.

Overfladeafstrømningens påvirkning på afløbssystemet undersøges for både opstuvning til terræn og bassin udnyttelse, da det ekstra afstrømningsbidrag ikke nødvendigvis har samme indflydelse på de to elementer i afløbssystemet. Vurderingen udarbejdes på baggrund af, hvorvidt der sker en ændring i funktionspraksis og bassinudnyttelse ift. afløbsmodellen ekskl. de ubefæstede arealer. En gentagelsesperiode på under 5 år for 100 % bassin udnyttelse vurderes at være kritisk, da det er kravet til funktionspraksissen. Påvirkning på afløbssystemet ift. akkumuleret afstrømningsmængde fra de ubefæstede arealer fremgår af figur 8.5.

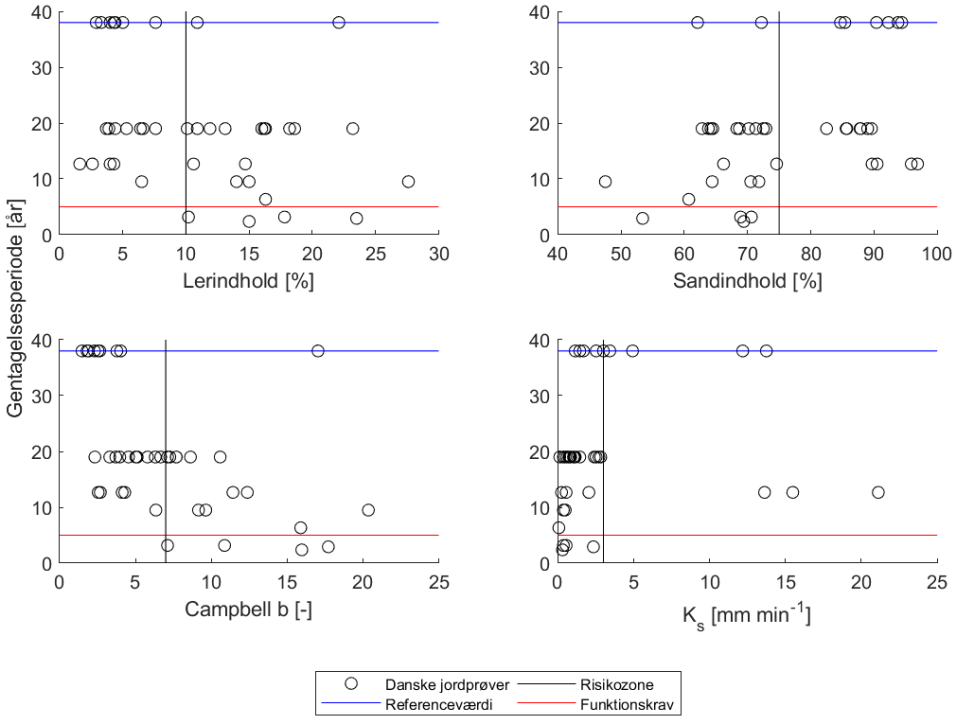


Figur 8.5. Ændring af afløbssystemets funktionspraksis ift. akkumuleret afstrømningsbidrag fra de ubefæstede arealer.

Det ekstra afstrømningbidrag fra ubefæstede arealer er relevant at medregne i analysen af afløbssytemet, da det har betydning for funktionspraksissen, som det fremgår af figur 8.5. Der udarbejdes derfor en risikovurdering af, hvilke jordtyper der påvirker afløbssystemet. Påvirkning på afløbssystemet ift. jordtype fremgår af figur 8.6 og 8.7.

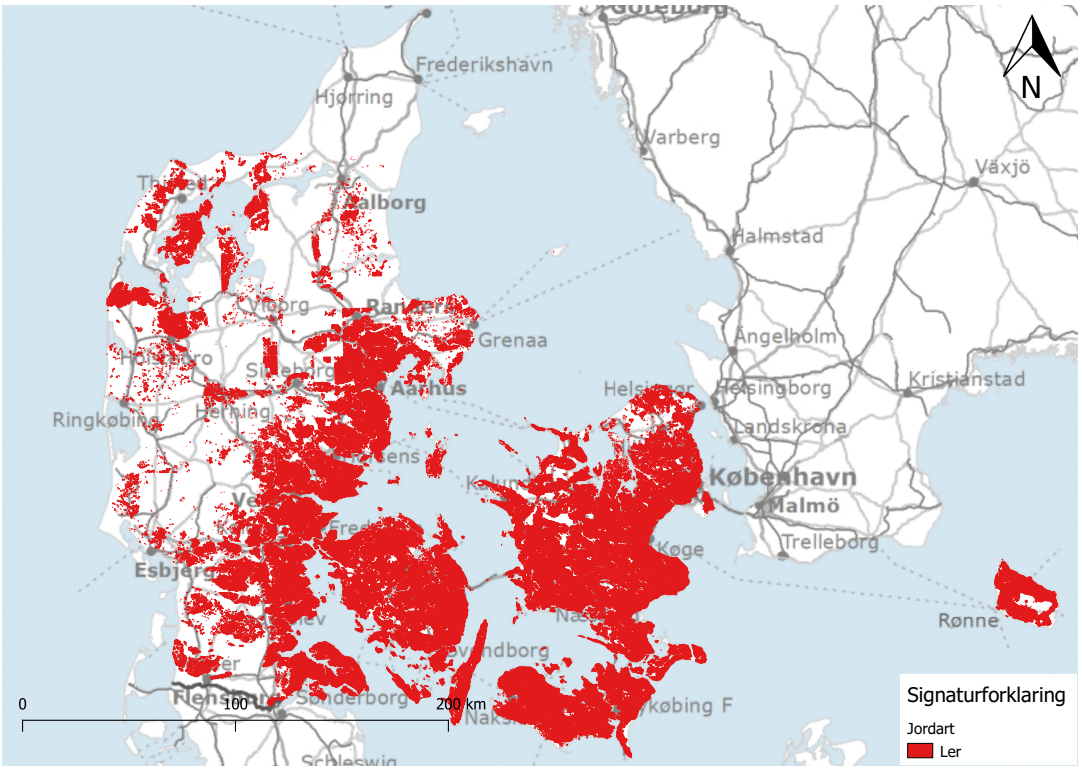


Figur 8.6. Antallet af regnvandsbrønde med en gentagelsesperiode for vand på terræn på under 5 år.



Figur 8.7. Gentagelsesperiode for overstigning af maks. kapacitet i regnvandsbassin J05301R.

Analysen viser samme tendens som afstrømningsanalysen afsnit 6.2, hvor jordtyper med et lerindhold over 10 % eller et sandindhold på under 75 % skaber afstrømning, som kan give problemer for afløbssystemet. Det anbefales derfor, at overfladeafstrømning medregnes for jordtyper med et lerindhold på over 10 %, da det vurderes at have betydning for afløbssystemet. Det medfører, at Danmark kan inddeles i risikozoner for overfladeafstrømning ud fra jordartskortene. Udbredelsen af områder i Danmark, hvor de øverste jordlag typisk har over 10 % ler (risikozone), fremgår af figur 8.8.



Figur 8.8. Områder af Danmark med højt indhold af ler, som vurderes som risikozone for overfladeafstrømning fra ubefæstede arealer.

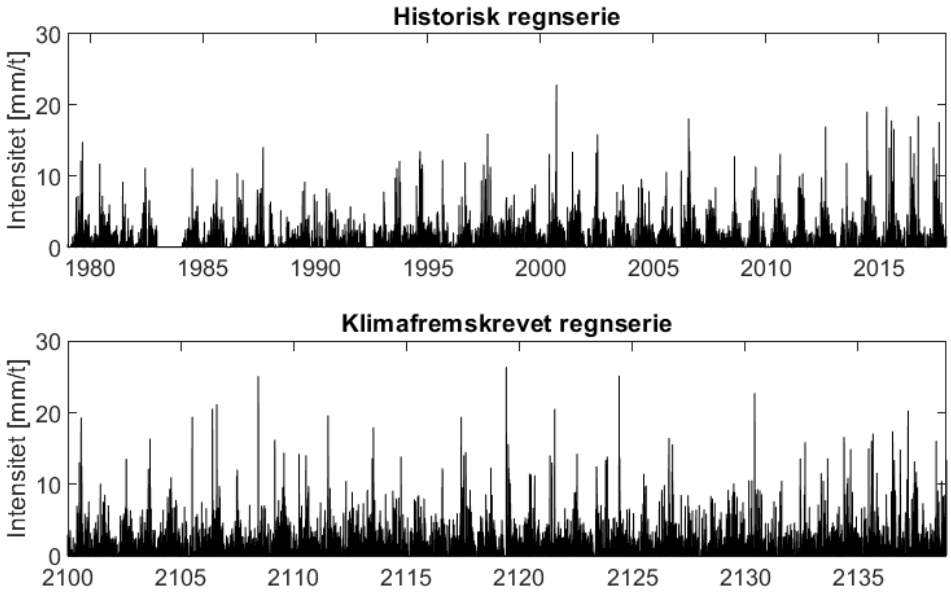
Risikozonen for overfladeafstrømning, ved et indhold af ler på over 10 %, befinder sig især i den østlige del af Danmark, som det fremgår af figur 8.8. Det vurderes at være områder, hvor det er relevant at undersøge jordforholdene nærmere, for at kunne tage højde for overfladeafstrømningen. Caseområdet Lystrup hører ind under risikoområdet, hvilket stemmer overens med både jordanalysen for området, mængden af registreret overfladeafstrømning og analysen af påvirkningen på afløbssystemet. Risikokortet, figur 8.8, er en overordnet screening af hvilke områder, der vurderes at være udsat for overfladeafstrømning i mængder, som har betydning for afløbssystemet, og det anbefales derfor, at afstrømningsbidraget fra de ubefæstede arealer medregnes i disse områder.

Der kan stadig forekomme overfladeafstrømning, som påvirker afløbssytemet udenfor risikozonen og det anbefales derfor altid at undersøge jordforholdene, før det vurderes hvorvidt afstrømningsbidraget skal medregnes.

Klimaudviklings påvirkning på afløbssystemet 9

Det forudsiges, at det globale klima vil ændre sig i løbet af de næste 100 år, hvilket ifølge Spildevandskomiteen, 2008, betyder stigende nedbør med færre men kraftigere nedbørshændelser i Danmark. Ændringer i klimaet kan medføre, at flere jordtyper genererer overfladeafstrømning, som vil påvirke afløbssystemets funktionspraksis. Det er derfor relevant at undersøge, hvilken betydning fremtidige klimaændringer har på overfladeafstrømning og derigennem påvirkning på afløbssystemet.

Til at undersøge afstrømningens påvirkning på afløbssystemet under fremtidige klimaforhold benyttes samme jorddata, som beskrevet i afsnit 4 og en klimafremskrevet regnserie jf. Andersen og Thorndahl, 2019. Regnserien er fremskrevet ud fra senarie RCP4.5, hvor der fremskrives med forskellige klimafaktorer efter hændelse og årstid. Derved tages der højde for, at klimaændringerne ikke påvirker ens. De benyttede klimafaktorer fremgår af bilag E. De faktiske ændringer kendes ikke, og der er derfor fremskrevet 8 versioner af Viby regnserien fra SVK regnmåler nr. 5177. Den fremskrevne regnserie version 2, vurderes ifølge Andersen og Thorndahl, 2019 som bedste bud på de fremtidige klimaforhold. Det er derfor version 2, som benyttes til vurdering af fremtidig påvirkning på afløbssystemet. Ændring fra den originale regnserie fra SVK måler nr. 5177 til den klimafremskrevede regnserie for samme regnmåler, fremgår af figur 9.1.



Figur 9.1. Vandstandskote og udnyttelse af bassin J05301R, i referencemodellen og Lystrup modellen.

9.1 Klimaudviklingens betydning for caseområdet

Afstrømningsbidraget under klimafremskrevet vejrforhold undersøges ud fra Green & Ampt 2019, beskrevet i afsnit 5. Akkumuleret afstrømningsmængde fra de ubefæstede arealer ud fra jordtypen i Lystrup stiger gennemsnitlig over en 5 års periode, som forventet ved den klimafremskrevede regnserie, som det fremgår af tabel 9.1 og tabel 9.2.

	Vinter		Forår		Sommer		Efterår	
Historisk	Regn [mm]	Afstrømning [mm]	Regn [mm]	Afstrømning [mm]	Regn [mm]	Afstrømning [mm]	Regn [mm]	Afstrømning [mm]
2012	62	14	79	22	271	138	215	61
2013	50	14	98	30	85	40	171	55
2014	107	21	91	37	236	115	179	54
2015	46	7	141	52	259	119	219	73
2016	108	18	138	45	234	127	181	53
GNS.	66	15	109	39	217	93	193	55
Klima-fremskrevet								
2112	125	24	109	41	196	84	248	76
2113	146	48	171	68	207	106	252	61
2114	139	48	206	61	183	91	193	74
2115	104	33	157	63	243	108	184	62
2116	102	31	150	56	212	94	83	29
GNS.	123	37	159	58	208	97	192	60

Tabel 9.1. Akkumulerede regnmængder og afstrømningsmængder fra de ubefæstede arealer under den historiske og klimafremskrevne regnserie opgjort for årstiderne i en 5 års periode. Afstrømningen er beregnet ud fra jorddata for jordtypen i caseområdet, Lystrup, beskrevet i afsnit 4.1.1. Historisk data er de samme som i tabel 6.1 på side 44.

Historisk	Vinter	Forår	Sommer	Efterår
2012	23	28	51	28
2013	28	31	47	32
2014	20	41	49	30
2015	15	37	46	33
2016	16	33	54	29
GNS.	14	22	32	20
Klima-fremskrevet				
2112	19	37	43	30
2113	33	40	50	24
2114	34	29	50	38
2115	31	40	45	34
2116	30	37	44	35
GNS.	29	37	46	32

Tabel 9.2. Procentdel af regnen afstrømmet fra de ubefæstede arealer under den historiske og klimafremskrevne regnserie opgjort for årstiderne i en 5 års periode. Historisk data er de samme som i tabel 6.2 på side 45.

Afstrømningen fra de ubefæstede arealer ud fra den klimafremskrevne regnserie, stiger mest om vinteren og om foråret, som det fremgår af tabel 9.1. Den gennemsnitlige stigning om

sommeren og om efteråret i akkumuleret afstrømning fra de ubefæstede arealer vurderes at kunne negligeres. Det vurderes, da den historiske periode er udvalgt efter ekstreme regnhændelser, som er forekommet i sensommeren og efteråret, hvor den klimafremskrevne periode er tilfældigt udvalgt.

Der forekommer en stigning i procentpoint af regnvand der afstrømmer fra de ubefæstede arealer for alle årstiderne, som det fremgår af tabel 9.2. Det skyldes den øget regnmængde, som skaber en generelt større vandmætning af jorden og derved en øget risiko for overfladeafstrømning. Den største stigning i procentpoint fra den historiske til den klimafremskrevne regnserie forekommer om vinteren og om foråret, hvilket stemmer overens med stigningen i akkumuleret afstrømning i tabel 9.1.

Den øget regnmængde og afstrømning fra de ubefæstede arealer påvirker afløbssystemet. Påvirkning på afløbssystemets funktionspraksis i fremtiden analyseres derfor ud fra MIKE URBAN afløbsmodellen, beskrevet i afsnit 7. Parameterværdierne, som beskriver de befæstede og ubefæstede arealer, forbliver de samme, men der genereres en ny jobliste for den klimafremskrevede regnserie. Det skyldes, at flere simuleringsperioder er relevante at medtage i analysen, pga. øget afstrømningsmængde. Joblisten genereres efter samme kriterier, som beskrevet i afsnit 7.3.

Afløbssystemets funktionspraksis vurderes ud fra bassin udnyttelse og opstuvning til terræn. Det forventes, at tilføjelsen af de ubefæstede arealer vil have en større betydningen ved den klimafremskrevne regnserie end den har i dag, da den genererede afstrømningsmængde er øget. Resultatet af analysen fremgår af tabel 9.3.

100 % udnyttelse	Afløbsmodel ekskl. de ubefæstede arealer [år]	Afløbsmodel inkl. de ubefæstede arealer [år]
Historisk	38	4,2
Klimafremskrevet	6,3	0,3
Opstuvning til terræn	[antal brønde]	[antal brønde]
Historisk	49	55
Klimafremskrevet	81	108

Tabel 9.3. Gentagelsesperiode for udnyttelse af bassin J05301R og antal brønde med opstuvning til terræn med en gentagelseperiode på under 5 år i hhv. referencemodellen og afløbsmodel inkl. de ubefæstede arealer.

Under klimafremskrevne vejrforhold, kan bassin J05301R stadig opretholde funktionspraksissen i referencemodellen, med en gentagelsesperiode for 100 % udnyttelse på over 5 år, som det fremgår af tabel 9.3. Medregnes de ubefæstede arealer vil der opstå 100 % bassin udnyttelse ca. hver 4. måned, og funktionspraksissen bliver derved ikke opretholdt. Det vurderes derudfra, at medregning af ubefæstede arealer i fremtiden har indflydelse på bassindimensioneringen, og derfor bør medtages.

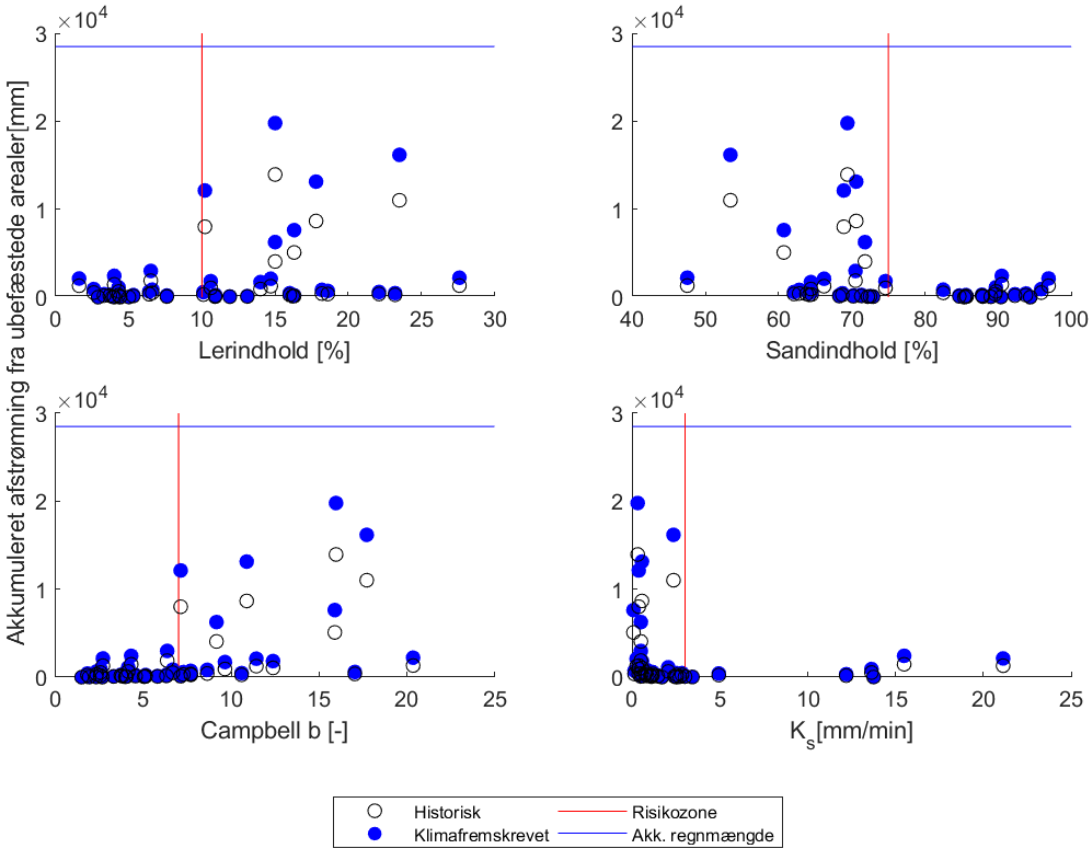
Undersøgelser af afløbssystemets funktionspraksis med den klimafremskrevne regnserie medfører en stigning på 33 % i brønde, som opstiger til terræn med en gentagelseperiode på under 5 år. Ved den historiske regnserie fremkommer derimod kun en stigning på 12 %. Det skyldes, at den større mængde af regn vil øge vandmætningsgraden af jorden,

og der vil derved oftere opnås fuld overfladeafstrømning. De kraftigere regnhændelser vil oftere have en regnintensitet, som overskrider jordens infiltrationshastighed. De to betragtninger medfører, at der genereres større mængder af overfladeafstrømningen under klimafremskrevne vejrforhold.

9.2 Klimaudviklings betydning ift. jordtype

Den fremtidige påvirkning på afløbssystemet ift. jordtype vurderes ud fra den klimafremskrevne regnserie. Ud fra analysen af den fremtidige påvirkning af afløbssystemet i Lystrup modellen, formodes det at risikozonen for jordtyper, der påvirker afløbssystmet, vil udvides, så flere jordtyper vil påvirke afløbssystemet.

Vurderes risikozonen ud fra genereret afstrømningsmængde, forbliver grænsen den samme, som vurderet i afsnit 8.2. Jord med et lerindhold over 10 % eller et sandindhold under 75 %, som det fremgår af figur 9.2.

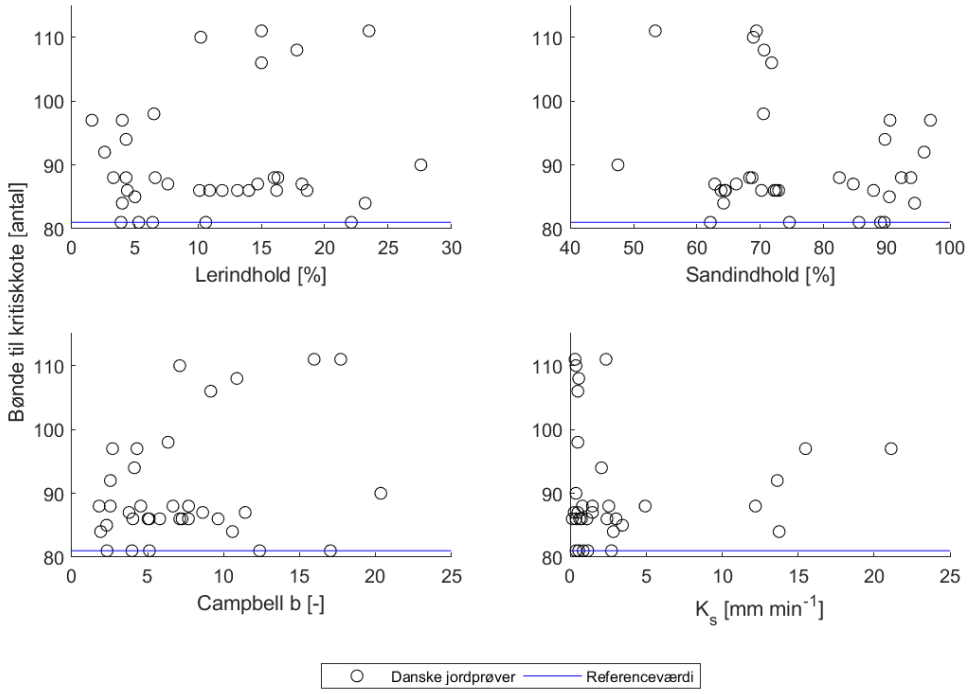


Figur 9.2. Akkumuleret afstrømningsmængde fra de ubefæstede arealer ud fra historisk og klimafremskrevet regndata.

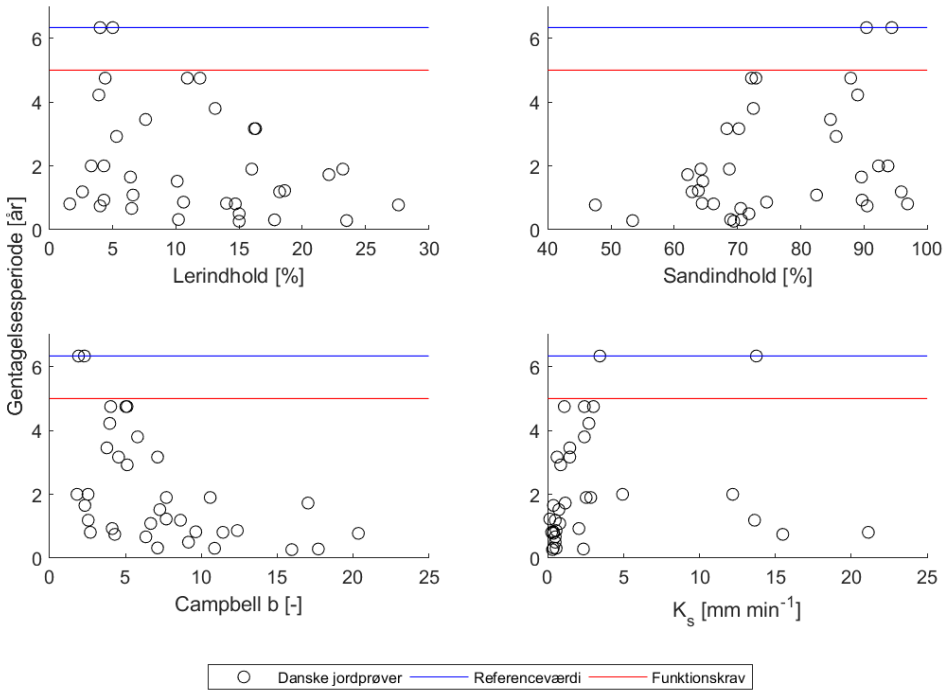
Risikozonen ud fra akkumulerede afstrømningsmængder ændres ikke, men der genereres generelt mere afstrømning for den klimafremskrevne regnserie, end den historiske regnserie. Jordtyper reagerer ikke ens på den klimafremskrevne regnserie. Tendensen er, at jo mere afstrømning jordtypen genererer under den historiske regnserie, jo mere påvirkes jordtypen

af den klimafremskrevne regnserie. Det medfører, at afstrømningen fra jordtyper inde i risikozonen (over 10 % ler) stiger procentvis mere, end afstrømningen fra jordtyperne udenfor risiko zonen. Det skyldes, at jordtyperne udenfor risiko zonen, kan håndtere den ekstra vandmængde i den klimafremskrevet regnserie.

Det er ikke kun afstrømningen fra de ubefæstede arealer, der påvirkes af den klimafremskrevet regnserie, men også afstrømningen fra de befæstede arealer stiger. Det undersøges derfor, om den ekstra mængde akkumuleret afstrømning har betydning for afløbssystemets funktionspraksis. Det undersøges ud fra bassin udnyttelsen af bassin J05301R og opstuvning til terræn. Resultaterne fremgår af figur 9.4 og 9.3.



Figur 9.3. Antallet af regnvandsbrønde med en gentagelsesperiode for opstuvning til terræn på under 5 år.



Figur 9.4. Gentagelsesperiode for 100 % udnyttelse af regnvandsbassin J05301R med den klimafremskrevne regnserie.

Medregning af de ubefæstede arealer i en klimafremskrevet situation medfører, at kravet til afløbssystemets funktionspraksis ikke kan overholdes uafhængigt af jordtypen, som det fremgår af figur 9.3 og 9.4. Årsagen til, at alle jordtyper påvirker afløbssystemet, skyldes den ekstra afstrømning fra de befæstede arealer. Det medfører, at der opstår kapacitetsproblemer i afløbssystemet, ved blot små mængder ekstra afstrømning fra de ubefæstede arealer. Ifølge analysen, vil det derfor medføre en fejldimensionering af afløbssystemet, hvis de ubefæstede arealer ikke medregnes i fremtiden. Det vurderes derfor, at antagelsen om at de ubefæstede arealer ikke bidrager til afløbssystemet, bør revurderes for at kunne opretholde dimensionering, som overholder funktionskravene til afløbssystemet.

10 Diskussion

Beregningsstrukturen for at komme frem til vurderingen af afstrømningens påvirkning på afløbssystemet indeholder fem trin. Rapporten er et udgangspunkt for videre analyse indenfor hvert trin, for at komme frem til en metode, som kan inkorporeres i fremtidig dimensioneringspraksis. Det er derfor relevant at belyse fordele og ulemper samt videre analyse for hvert trin.

Inputparametre: Undersøgelserne i rapporten tager udgangspunkt i seks af de amerikanske jordklasser og 41 jordprøver fra det danske jordkartotek. Det er jordtyper, som er undersøgt for flere jordparametre end der normalt undersøges for under et afløbsprojekt, hvor der typisk undersøges for jordstruktur og derudfra skønnes en vandmættet hydraulisk ledningsevne. Det er ikke nok information til at vurdere afstrømningsforholdene ud fra Green & Ampt 2019. Det anbefales derfor at benytte en modeljord, som minder om den aktuelle jordtype. For at kunne udvælge modeljorden, anbefales det at undersøge jordstrukturen og den hydrauliske ledningsevne, da de fysiske jordparametre kan variere indenfor samme jordstruktur. Det anbefales, at jorden undersøges for så mange jordparametre som muligt, for at opnå den mest præcise vurdering af afstrømningsforholdene.

De 41 danske jordprøver, giver et bredt billede af de danske jordforhold, og er et godt udgangspunkt for vurdering af betydningen for afløbssystemet. Da afstrømning er komplekst og kan variere indenfor samme jordklasse, vil en forbedring af metoden være udvidelse af det danske jordkartotek, så der kommer flere modeljorde. Det vil forbedre udvælgelsen af modeljord, og derved gøre vurderingen af afstrømningsforholdene mere præcis.

Afstrømningsmodel: Green & Ampt 2019 er kalibreret op mod afstrømningsdata fra caseområdet i Lystrup. Der forefindes på nuværende tidspunkt ikke afstrømningsdata for andre ubefæstede områder, og det har derfor ikke været muligt at validere Green & Ampt 2019. Det medfører, at der ikke er sikkerhed for resultatet ved brug af Green & Ampt 2019 på andre jordtyper end jordtypen i Lystrup. Green & Ampt 2019 er bedste bud på en afstrømningsmodel til danske jordforhold, og derfor vurderes påvirkningen alligevel ud fra resultaterne herfra. For at kunne forbedre Green & Ampt 2019 kræves mere afstrømningsdata fra andre jordtyper, så modellen kan valideres.

Afstrømning fra ubefæstede arealer er kompleks, og det er derfor ikke sikkert, at Green & Ampt 2019 kan kalibreres, så den kan analysere afstrømningensforhold fra alle jordtyper. Det kan være nødvendigt at udvikle flere afstrømningsmodeller til forskellige jordklasser. Det medfører, at der sammen med modeljorden følger en type af afstrømningsmodel, som skal benyttes til den pågældende jordklasse. Det har ikke været muligt at undersøge,

hvorvidt det er nødvendigt med flere afstrømningssmodeller, pga. datamængden.

Afstrømningsmodellen tager udgangspunkt i teorien bag Green & Ampt. Det kan diskuteres, om det er relevant at benytte teorien bag Horton, da denne teori ofte benyttes i dag i Danmark til infiltration/afstrømningsanalyser. I det danske jordkartotek er jordprøverne undersøgt for jordparametrene, som benyttes i Green & Ampt. Der forefindes ikke en samling med danske jordprøver undersøgt for de empiriske værdier, der indgår i Horton. Når infiltration/afstrømning undersøges ud fra Horton, benyttes derfor standard værdier, som ikke nødvendigvis har sammenhæng til jordtypen, hvilket skaber en usikkerhed for beregningen. Det er derfor ikke muligt at opsætte en sammenhæng til danske jordforhold, da de empiriske værdier, som benyttes i Horton ikke er undersøgt. Værdierne kan undersøges ud fra et dobbeltring infiltrationsforsøg, som skaber en infiltrationskurve, hvor ud fra værdierne kan bestemmes. Det vurderes ikke at have interesse, da det danske jordkartotek forefindes, og det derfor er relevant at tage udgangspunkt i Green & Ampt.

Overfladeafstrømning: I rapporten er afstrømningen fra ubefæstede arealer beregnet ud fra en historisk regnserie, da jordens vandindhold ved begyndelsen af en regnhændelse har betydning for afstrømningen. Det medfører, at simuleringer i afløbsmodellen er tidskrævende. Det kan derfor være relevant at undersøge betydningen for afstrømningen, ved brug af det simulerede historiske vandindhold og vandindhold ved markkapacitet, som initial vandindhold i Green & Ampt 2019. Forefindes en ubetydelig forskel, vil det være muligt at benytte CDS-regn til undersøgelsen, hvilket minimerer simuleringstiden i afløbsmodellen.

Green & Ampt 2019 tager ikke højde for kompaktering af jorden ved generering af overfladeafstrømning. Kompaktering af jorden kan medvirke til, at de ubefæstede arealer fungerer som befæstede arealer, da der ikke kan foregå infiltration til jorden. Kompaktering kan opstå under anlæggelsen af det ubefæstede areal ved kørsel af maskiner. Det kan derfor diskuteres, om de ubefæstede arealer har et større afstrømningsbidrag end simulerede med Green & Ampt 2019.

Afløbsmodel: Oplandsarealer i afløbsmodellen er blevet opdelt, så der kan differentieres mellem befæstede og ubefæstede arealer. Oplandsarealer defineres ud fra forskellige parametre her i blandt koncentrationstiden. Der er ikke taget højde for koncentrationstiden i Green & Ampt 2019, og det er derfor nødvendigt at indstille denne parameter i afløbsmodellen. Koncentrationstiden afhænger af overfladen, og en undersøgelse af overfladeforhold ift. afstrømningtid vil optimere afløbsmodellen.

I rapporten er koncentrationstiden vurderet ud fra forskellen mellem den simulerede og registrerede afstrømning i Lystrup. Det er kun muligt, fordi der forefindes en registreret afstrømning fra området, hvilket ikke er tilfældet for et almindeligt afløbsprojekt. En forbedring kan derfor være yderligere undersøgelser til opstilling af retningslinjer for udvælgelse af koncentrationstid ift. overfladeforhold og arealstørrelse.

I afløbsmodellen antages det, at alle de ubefæstede arealer bidrager til afløbssystemet, hvilket kan skabe en overestimering af afstrømningsbidraget. Ikke alle de ubefæstede arealer vil have hældning henimod afløbssystemet, men vil tilbageholdes i oplandet i lavninger, hvor der opstår vandpytter indtil vandet infiltrere til jorden. Det medfører en overestimering af afstrømningensmængden, når de ubefæstede arealer medregnes i

afløbsmodellen. For at undgå denne overestimering kan der udføres en GIS-analyse af oplandet, hvor det undersøges hvilke ubefæstede arealer, der har hældning mod brønde tilkoblet afløbssystemet. Denne analyse er ikke foretaget i rapporten, og omfanget af overestimering af afstrømning som ledes til afløbssystemet kendes derfor ikke.

Påvirkning af afløbssystem: Overfladeafstrømning fra ubefæstede arealers betydning for afløbssystemet vurderes i rapporten ud fra et udpluk af afløbsmodellen over Lystrup. Det vides derfor ikke, om påvirkningen ændres ved ændring af afløbsmodel. Påvirkningen afhænger af mængden af ubefæstet areal, som afleder til afløbssystemet. Undersøgelse af påvirkningen på andre afløbssystemer, kunne derfor være relevant at medtage i vurderingen. Der er ikke medtaget analyser af påvirkningen på andre afløbssystemer i rapporten.

Afløbsmodeller kalibreres ud fra registreret strømningsdata fra afløbsmodellen, hvor overfladeafstrømning fra de ubefæstede arealer vil indgå. Det kan derfor diskuteres, om der forekommer en overestimering af påvirkningen på afløbssystemet, da de ubefæstede arealer er kalibreret ift. et ekstra bidrag fra de ubefæstede arealer. Da det er en relativ sammenligning mellem to afløbsmodeller, kan usikkerheden ift. kalibrering af afløbsmodellen negligeres, da det vil være samme usikkerhed i begge analyser.

Perspektivering 11

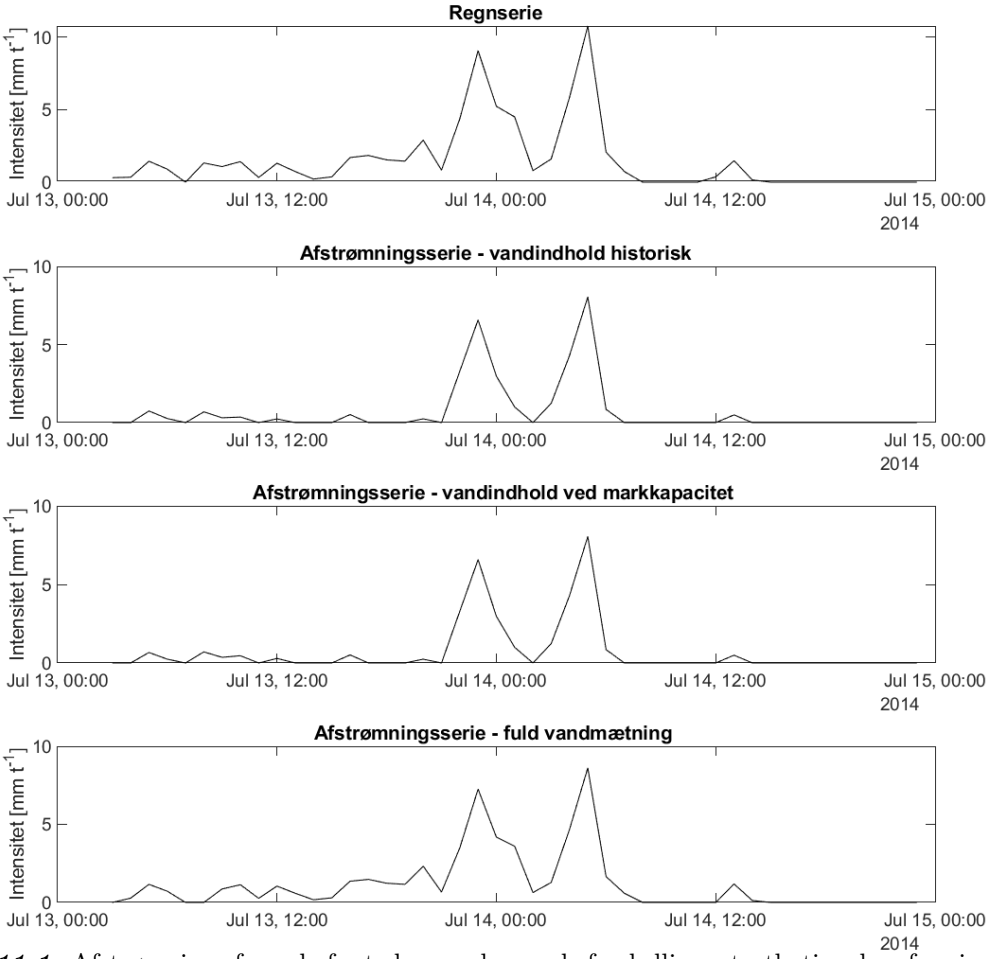
Der dimensioneres afløbssystemer i danmark i dag, også hvor der tages højde for de ubefæstede arealer. Det er derfor relevant at vurdere metoden benyttet i dette kandidatspeciale ift. allerede benyttede metoder og hvordan beregningsstrukturen kan inkorporeres i almen dimensioneringspraksissen.

Dimensionering: Ved dimensionering af afløbssytemer benyttes ofte beregningsniveau 2 med en CDS-regn, da det forkorter simuleringstiden og er værste senarie, som beskrevet i afsnit 1.1 på side 2. Afstrømning fra de ubefæstede arealer afhænger af jordens vandindhold, hvorfor beregningsniveau 3 med en historisk regnserie benyttes i analysen af det ekstra afstrømningsbidrags påvirkning på afløbssystemet. Det skaber en simuleringstid på omkring et døgn for den udvalgte del af afløbsmodellen. Analyseres hele afløbsmodellen, formodes det, at simuleringstiden øges.

Betydningen af startbetingelsen for jordens vandindhold undersøges for at vurdere, hvorvidt beregningsmetode 2 (afsnit 1.1 på side 2), kan benyttes til dimensionering af afløbssystemer når de ubefæstede arealer inkorporeres. Betydningen undersøges ud fra genereret afstrømning under regnhændelsen d. 13/7-2014. Startbetingelserne er hhv. det historisk simuleret vandindhold, vandindhold ved markkapacitet og fuld vandmætning. Resultatet af analysen fremgår af tabel 11.1 og figur 11.1.

	Akkumuleret afstrømning [mm]
Vandindhold historisk	32,2
Vandindhold ved markkapacitet	32,1
Fuld vandmætning	52,0
Regnserie	67,0

Tabel 11.1. Akkumuleret afstrømning simuleret med Green & Ampt 2019 ved Viby regnserien 1979-2018 og med en 38 og 5 års regnhændelse.



Figur 11.1. Afstrømning fra ubefæstede arealer ved forskellige startbetingelse for jordens vandindhold.

Ud fra analysen af betydningen af startbetingelsen for jordens vandindhold, vurderes det, at det historiske vandindhold stemmer overens med vandindhold ved markkapacitet, hvilket ikke behøver at være situationen ved andre regnhændelser. Ønskes det at benytte beregningsniveau 2 med en CDS-regn, som er værste senarie, bør startbetingelsen for jorden vandindhold også være værste senarie, hvilket er fuld vandmætning. Ved fuld vandmætning, vurderes der at ske en overestimering af afstrømningen fra de ubefæstede arealer, da der simuleres ca. 60 % mere akkumuleret afstrømning.

Jordens vandindhold vurderes derfor at være styrende for mængden af overfladeafstrømning, der genereres fra en regnserie. Det medfører, at den samme regnhændelse kan generere forskellige mængder af afstrømning afhængigt af jordens vandindhold. Det anbefales derfor, at benytte en historisk regnserie til dimensionering af afløbssystemer, hvor de ubefæstede arealer inkorporeres.

Registrering af jordens vandindhold kan derfor benyttes til vurdering af risikoen for overfladeafstrømning fra at ubefæstet areal. Opnår jorden ofte fuld vandmætning vurderes det, at det ubefæstede areal vil generere afstrømningsmængder, som har betydning for afløbssystemet, og det anbefales derfor at det medtages i afløbsmodellen.

Medregning af de ubefæstede arealer: Det er ikke nyt at tage højde for de ubefæstede arealer i afløbsmodeller. Der er både indbygget Horton og Green & Ampt infiltrationsmodeller i MIKE URBAN, men disse benyttes typisk ikke i praktisk. Afstrømningen fra de ubefæstede arealer medregnes derfor gennem de hydrologiske parametre; initialtab, befæstelsesgrad og hydraulisk reduktionsfaktor.

I den udleverede afløbsmodel over Lystrup, er der taget højde for afstrømning fra de ubefæstede arealer gennem befæstelsesgraden og initialtab. Metoden for medregning af de ubefæstede arealer i den udleverede afløbsmodel, sammenlignes med metoden benyttet i nærværende kandidatspeciale. Sammenligning af bassin udnyttelse og opstuvning til terræn fremgår af tabel 11.2.

	Udleverede afløbsmodel	Afløbsmodel inkl. de ubefæstede arealer
100 % udnyttelse [år]	3,8	4,2
Opstuvning til terræn [antal]	62	55

Tabel 11.2. Sammenligning af den udleverede afløbsmodel og afløbsmodel inkl. de ubefæstede arealer ift. 100 % bassin udnyttelse og opstuvning til terræn.

Sammenligningen viser at metoden for medregning af de ubefæstede arealer i den udleverede model, skaber større kapacitetsproblemer i afløbssystemet, end der fremgår for afløbsmodellen inkl. de ubefæstede arealer. Det skyldes, at der i den udleverede afløbsmodel er samme koncentrationstid for de befæstede og ubefæstede arealer, hvorved afstrømningen skal håndteres i afløbssystemet samtidig. Dette er ikke tilfældet for afløbsmodellen inkl. de ubefæstede arealer, da koncentrationstiden her er forskellig ift. oplandstypen.

Det vurderes, at den udleverede afløbsmodel overestimere afstrømningen fra de ubefæstede arealer, og det anbefales derfor at undersøge jordtypen og vurdere koncentrationstiden, før de hydrologiske parametre bestemmes for de ubefæstede arealer.

Konklusion 12

Ud fra analyse af overfladeafstrømning fra ubefæstede arealer fremgår det, at de fleste jordtyper giver anledning til overfladeafstrømning. Da afstrømning er komplekst, forekommer der ikke en direkte sammenhæng mellem jordparametrene og mængden af afstrømning. Der opstilles derfor en risikozone, for jordtyper der anbefales at medtage i dimensioneringen af afløbssystemer. Det er jordtyper med et lerindhold på over 10 %, som vurderes at påvirke afløbssystemet i en grad, så der kan opstå fejldimensionering af afløbssystemet, hvis de ikke medtages. De fleste jordtyper påvirker afløbssystemet, i en grad der kan registreres, men ikke nok til at det vurderes at have betydning for afløbssystemets funktionspraksis.

Ud fra jordkortene for de terrænnære jordlag forefindes der lerede topjorde i den østlige del af Danmark. Det vurderes derfor, som risikozone for overfladeafstrømning der vil påvirke afløbssystemet. Det anbefales derfor at undersøge jordforholdene nærmere, og medregne afstrømningsbidraget i afløbsmodellen, for at sikre at funktionspraksissen bliver overholdt i denne del af Danmark.

Det er påviset at overfladeafstrømningen afhænger af jordens vandindhold, og derfor ikke kan medregnes som en fast procentsats af regnintensiteten. Afstrømningsmodellen udvides derfor til Green & Ampt 2019, for at undersøge afstrømningsforholdene for danske jordtyper. Afstrømningensanalysen viser en årsvariation, hvor den største andel af afstrømning forekommer i sensommmeren og om efteråret, hvor de største regnmængder også forekommer.

Ud fra analysen af det danske jordkartotek ift. de amerikanske jordklasser, som bygger på en sammenligning af jordparametrene ift. jordstrukturen, konkluderes det at kun de sandede amerikanske jordklasser, kan benyttes til at analysere afstrømning under danske jordforhold. De resterende jordklasser vurderes at skabe en overestimering af afstrømningsforholdene, da de indeholder mere ler og silt end danske jordtyper. Afstrømningsanalysen angiver, at der er risiko for at de sandede amerikanske jordklasser skaber en underestimering af afstrømningsforholdene. Det konkluderes da de genererer mindre afstrømning end danske jordtyper indenfor samme jordklasse. Det anbefaldes derfor at benytte danske jordtyper, frem for de amerikanske jordklasser til analyse af danske jordforhold.

Undersøgelse af afstrømning fra ubefæstede arealers påvirkning på afløbssystemet, i en klimafremskrevet situation, viser at alle jordtyper generer afstrømning som medfører, at afløbsystmet ikke kan overholde kravene til funktionspraksissen. Det skyldes, den øgede mængde af overfladeafstrømning fra de befæstede arealer, der mindsker kapaciteten til afstrømning fra ubefæstede arealer. Det konkluderes derfor, at antagelsen om at de

ubefæstede arealer ikke bidrager til afløbssystemet bør revurderes, da det er påvist at det kan skabe fejldimensionering hvis de ikke medtages.

Når afløbssystemet kan overholde funktionspraksissen i dag, skyldes det, at de ubefæstede arealer medregnes gennem de hydrologiske parametre. Ud fra sammenligning af den udleverede afløbsmodel, hvor de ubefæstede arealer medtages gennem de hydrologiske parametre med metoden benyttet i dette kandidatspeciale, vurderes det, at standardmetoden fejlvurderer afstrømningsbidraget fra de ubefæstede arealer. Det anbefales derfor at undersøge jordforholdene og overfladekoncentrationstiden for de ubefæstede arealer, ved dimensionering af afløbssystemer.

Litteratur

Akan, A. Osman, 1992, „Horton Infiltration Equation Revisited". I: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 118(5) ASCE, ISSN 0733-9437/92/0005-0828.

Andersen, Christoffer Bang og Søren Thorndahl, 2019, „Klimafremskrivning af Viby-regnserien version 2.1". I: *Under udgivelse.*

Bjerge, Danske, 2018, *Danmarkskort Viser Hvor Landskabet er Stejlest.* Besøgt 11-02-2019. URL: `http://www.danskebjerge.dk/stejlest6.htm`.

Brorsen, Michael og Torben Larsen, 2009, *Lærebog i Hydraulik.* 2. udgave, 3. oplag ISBN: 978-87-7307-978-2. Aalborg Universitetsforlag.

Chen, Li og Michael H Young, 2006, „Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces". I: *Water Resources Research* vol. 42, W07420, doi:10.1029/2005WR004468.

Cosby, B. J. m.fl., 1984, „A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils". I: *Water Resources Research* Vol. 20, NO. 6, s. 682–690.

DHI, 2017, *MOUSE.* Besøgt 29-04-2019. URL: `http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Cities/MOUSERunoffReference.pdf`.

Dunne, Thomas, Weihua Zhang og Brian F. Aubry, 1991, „Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff". I: *Water Resouces Research* Volume 27, Issue 9.

Environment, Office of og Heritage, 2018, *Appendix A.* Besøgt 13-02-2019. URL: `https://www.environment.nsw.gov.au/resources/water/BlueBookV1Apps.pdf`.

Aarhus Kommune og Rambøll, 2011, *Hydrauliske Forudsætninger.* Tek. rap.

Gardner, W. R., 1962, „Approximate Solution of a Non-Steady-State Drainage Problem". I: *Soil Sciense society proceedings* 181.2.

Green, W. H. og G. A. Ampt, 1912, „Studies on Soil Phyics". I: *The Journal of Agricultural Science* 4(1), doi: 10.1017/S0021859600001441, s. 1–24.

Hansen, Loren, 1976, *Jordtyper ved Statens Forsøgsstationer, Soil Types at the Danish State Experimental Stations.* Statens forsøgsvirksomhed i plantekultur.

Horton, R. E., 1939, „Analysis of Runoff-plat Experiments with Varying Infiltration-capacity". I: *Eos, Transactions American Geophysical Union* 20(4), s. 693–711.

Jafari, Navid H. og Timothy D. Stark, 2017, „Field Scale Hydraulic Conductivity and Compressibility of Organic Clays". I: *Elsevier, Engineering Geology* 220(2017)52-64, s. 52–64.

Kale, Ravindra V. og Bhabagrahi Sahoo, 2011, „Green-Ampt Infiltrations Models for Varied Field Conditions: A Revisit". I: *Water Resources Management 25(14):3505-3536* DOI: 10.1007/s11269-011-9868-0.

Loll, Per og Per Moldrup, 2000, *Soil Characterization and Polluted Soil Assessment*. Aalborg Universitet.

Mathiasen, Morten Plesner, 2012, „Omfattende Oversvømmelser i Aarhus". I: *Jyllands-Posten Indland* 26.08.2012 kl. 14:45. URL: `https://jyllands-posten.dk/indland/trafik/article4820107.ece/`.

Nielsen, Kristoffer T. m.fl., 2019, „Field-scale monitoring of Urban Green Area Rainfall-Runoff processes". I: *Journal of Hydrologic Engineering* 24(8):04019022.

Pan, Chengzhong og Zhouping Shangguan, 2006, „Runoff Hydraulic Characteristics and Sediment Generation in Sloped Graddplots under Simulated Rainfall Conditions". I: *Journal of Hydrology* 331 doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.05.011, s. 178–185.

Research Service, USDA-Agricultural, 2013, *Science Documentation - Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2) (for the model with release date of May 20, 2008)*. USDA-Agricultural Research Service, Washington, D.C.

Rossman, Lewis A. og Wayne C. Huber, 2016, *Storm Water Management Model Reference Manual*. Volume 1 - Hydrology (Revised) EPA/600/R-15/162A. Office of Research og Development, U.S. Enviromental Protection Agency.

Sarup, Kim, 2017, *Drift af Spildevandskomiteens Regnmålersystem, Årsnotat 2017*. Besøgt 06-02-2019. URL: `https://www.dmi.dk/laer-om/generelt/dmi-publikationer/`.

Savabi, M. R. og J. R. Williams, 1995, *Chapter 5. Water balance and percolation*.

Shao, Qi og Thomas Baumgartl, 2016, „Fiels Evaluation og Three Modified Infiltration Models for the Simulation og Rainfall Sequences". I: *Soil Sciense* 181.2.

Slys, Daniel, 2013, „Effect of Development of the town of Przemysl on Operation of Its Sewerge System". I: *Ecological Chemistry and Engineering. S = Chemia i Inzynieria Ekologiczna. S 20(2):381-396* DOI: 10.2478/eces-2013-0028.

Spildevandskomiteen, IDA, 2005, *Funktionspraksis for Afløbssystemer under Regn, Skrift nr. 27*. Besøgt 13-03-2019. URL: `https : / / ida . dk / media / 2957 / skrift27funktionspraksi%20sforafloebssystemerunderregn.pdf`.

— , 2008, *Forventede Ændringer i Ekstremregn som Følge af Klimaændringer, Skrift nr. 29*. Besøgt 07-11-2018. URL: `https://ida.dk/sites/default/files/SVK_Skrift29_final.pdf?_ga=1.148991157.2023758509.1452848828.`.

— , 2017, *Metoder til Bestemmelse af Serviceniveau for Regnvand på Terræn, Skrift nr. 31*. Besøgt 13-03-2019. URL: `https://ida.dk/media/2967/svk_skrift31_22092017.pdf`.

Vivoni, Enrique R. m.fl., 2008, „Observed Relation Between Evapotranspiration and Soil Moisture in the North American Monsoon Region". I: *AGU100, Advancing earthand space science* Volume 35, Issue 22.

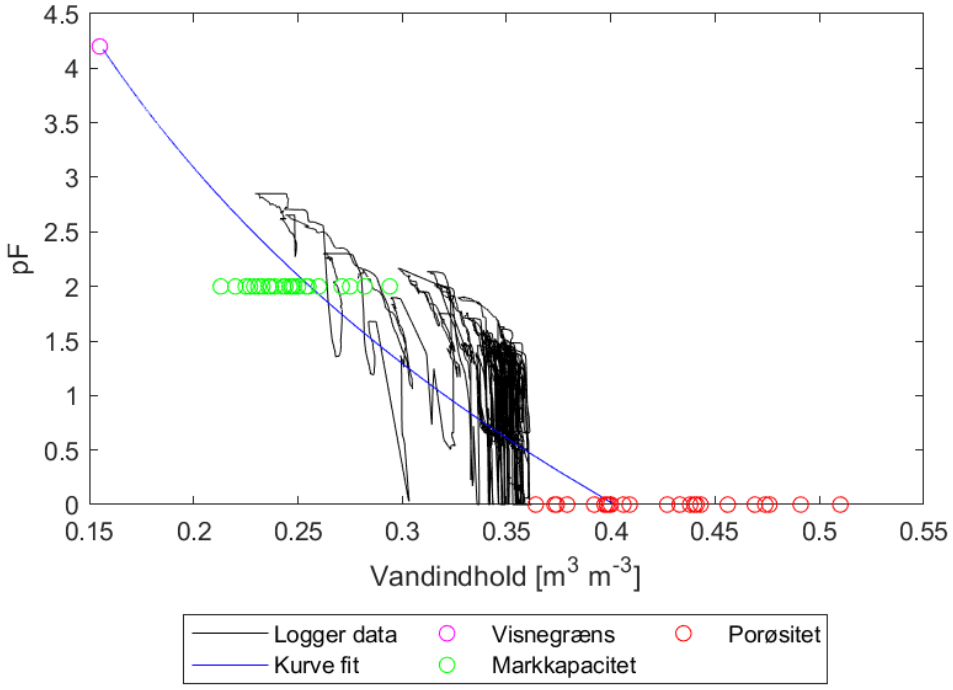
Analyse af jorden i Lystrup A

Jordparametrene i Lystrup er karakteriseret ud fra prøveudtagning og sensormålingerne jf. Nielsen m.fl., 2019. Ud fra Nielsen m.fl., 2019 har jorden i Lystrup jordparametrene, som er opstillet i tabel A.1.

		GNS.	STD.
Volumenvægt	[g cm^{-3}]	1,52	
Porøsitet	[cm^3 cm^{-3}]	0,426	0,04
Markkapacitet	[cm^3 cm^{-3}]	0,246	0,02
Organisk indhold	[%]	5,06	
Vandmættet hydraulisk ledningsevne	[mm min^{-1}]	1,1	

Tabel A.1. Jordparametre for jordtypen i Lystrup jf. Nielsen m.fl., 2019

Green & Ampt 2019 benytter Campbell b og trykpotentialet som inputparametre, hvilket er to parametre, som ikke bestemmes i MOGO. Ud fra sensormålinger over vandindhold og trykpotentiale, kan retentionskurven for jordentypen i Lystrup opstilles. Der er opstillet tre vandindholdssensorer på det grønne område og 2 til måling af jordens trykpotentiale. Retentionskurven er opstillet ud fra middelværdier, som fremgår af figur A.1.



Figur A.1. Retentionskurve for data i forbindelse med MOGO. Markkapacitet og porøsitet er fundet ud fra intaktprøver. Visnegrænsen er fundet ud fra relationen til indhold af ler og organisk materiale jf. Hansen, 1976. Retentionskurven (kurve fit) har, Campbell b: 10,2 ψ_e: 4,5 mm og θ_s: 0,426.

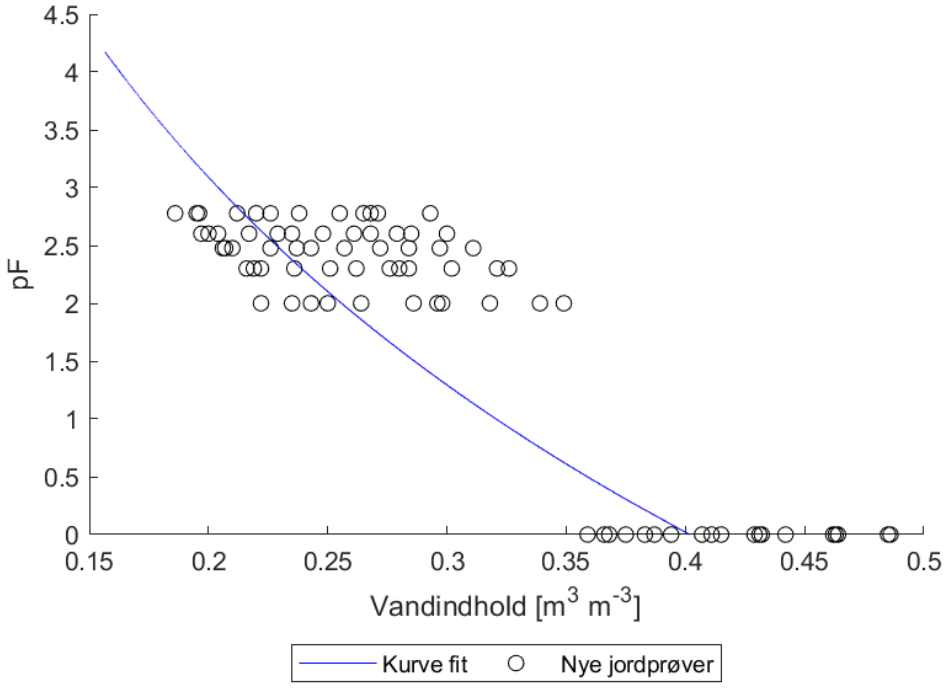
Ud fra retentionskurven, som er opstillet på baggrund af sensormålinger, kan flere værdier af Campbell b og jordens trykpotentiale accepteres, pga. variationen på de målte værdier. Hvorvidt den fundne værdi af Campbell b og trykpotentiale er korrekt ift. jordtypen kan diskuteres sammen med brugbarheden af værdierne i afstrømningsmodellen. For at få en større sikkerhed på jordparametrene er der i forbindelse med dette speciale, derfor indsamlet 20 nye intaktprøver, fem prøver fire forskellige steder på det ubefæstede område. Den cirka placering af prøveudtagningen fremgår af figur A.2.

Figur A.2. Cirka placering af de fire prøveudtagningspunkter på det grønne område i Lystrup.

De 20 intaktprøver benyttes til parametrisering jorden i Lystrup, så den kan benyttes i afstrømningsmodellen og får samme datagrundlag som jordtyperne i det danske jordkatotek. [Hansen, 1976] 12 ud af de 20 intaktprøver, 3 fra hver prøveudtagnings placering, sættes derfor først i sandboks, for at opnå en større vandmætningsgrad og derefter i retentionsboks, for at finde frem til retentionskurven for jordprøverne, og derudfra finde Campbell b og trykpotentialet for jorden. Resultaterne fra de 12 jordprøver i retentionsboks fremgår af tabel A.2 og kurve fit til resultaterne for de 12 intaktprøver fremgår af figur A.3.

	pF 2 [$m^3\ m^{-3}$]	pF 2,3 [$m^3\ m^{-3}$]	pF 2,5 [$m^3\ m^{-3}$]	pF 2,6 [$m^3\ m^{-3}$]	pF 2,8 [$m^3\ m^{-3}$]	ϕ [$m^3\ m^{-3}$]	ρ_b [$g\ cm^{-1}$]	b [-]	ψ_e [mm]
1.1	0,286	0,262	0,243	0,235	0,226	0,442	1,32	7,45	38,2
1.2	0,349	0,321	0,297	0,285	0,271	0,411	1,39	7,00	323,0
1.3	0,318	0,302	0,284	0,279	0,268	0,485	1,20	10,33	13,2
2.1	0,243	0,222	0,206	0,197	0,186	0,359	1,53	6,72	73,3
2.2	0,235	0,219	0,210	0,204	0,196	0,407	1,41	10,08	3,8
2.3	0,250	0,236	0,226	0,217	0,212	0,394	1,44	10,53	8,4
3.1	0,264	0,251	0,237	0,229	0,220	0,415	1,38	9,62	13,7
3.2	0,286	0,280	0,272	0,268	0,265	0,486	1,20	9,93	9,7
3.3	0,222	0,216	0,207	0,200	0,195	0,376	1,49	12,89	1,3
4.1	0,296	0,276	0,257	0,248	0,238	0,463	1,26	8,04	27,9
4.2	0,339	0,326	0,311	0,300	0,293	0,462	1,26	11,62	29,8
4.3	0,298	0,284	0,272	0,261	0,255	0,465	1,26	11,01	7,8
GNS.	0,282	0,266	0,252	0,243	0,235	0,430	1,34	9,60	45,8
STD.	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,11	1,84	8,57

Tabel A.2. Vandindhold ift. pF for de 12 intaktprøver der var i retentionsboks. Første nr. henviser til prøveudtagningens placering og andet nr. er prøvenummering.



Figur A.3. Retentionskurve for jordtypen i Lystrup, med data fra nye intakt prøver taget i forbindelse med dette projekt. Retentionskurven (kurve fit) har, Campbell b: 10,2 ψ_e: 4,5 mm og θ_s: 0,426.

Ud fra retentionskurverne, opstillet ud fra de indsamlede intaktprøver, er Campbell b og trykpotentialet bestemt. Retentionskurven, som er fundet for data fra MOGO, vurderes også at passe på data fundet ud fra de nye intaktprøver. Det vurderes derfor, at parametreværdier fundet i MOGO godt kan benyttes i afstrømningsmodellen.

De resterende otte jordprøver undersøges for hydraulisk ledningsevne. Hydraulisk ledningsevne undersøges ud fra "constant head" forsøg, hvor forsøget er kørt igennem 3-4 gange med hver intakt prøve, og gennemsnittet heraf repræsenterer intaktprøvens hydrauliske ledningsevne. Resultaterne fra "constant head" forsøgene fremgår af tabel A.3.

Forsøg	1.4	1.5	2.4	2.5	3.4	4.4	4.5
1	0,19	0,42	0,71	0,11	0,22	0,16	0,47
2	0,19	0,37	0,63	-	0,24	0,13	0,48
3	0,17	0,35	0,60	-	0,26	0,12	0,50
4	0,16	0,60	0,53	-	0,26	-	0,55
GNS.	0,18	0,46	0,62	0,11	0,24	0,13	0,50
STD.	0,01	0,10	0,07	0	0,02	0,02	0,03

Tabel A.3. Resultater for K_s [mm min^{-}1] ud fra "constant head" forsøg. Prøve 2.5 kompakterede og prøve 3.5 kasseret pga. ormehuller, hvorfor den ikke fremgår af tabellen.

Opsætning af MMS-Model B

For at kunne følge infiltrationen ned gennem jorden er der opstillet en MMS-model (The Moving Mean Slope), som er en umættet zonemodel med flere beregningsbokse. MMS-modellen beregner derved jordens vandindhold og trykpotientiale ned gennem dybden til forskellige tidspunkter. Det kan benyttes til f.eks. at estimere trykpotientialet ved vandfronten under forskellige jordforhold. MMS-modellen skal bruge følgende inputparametre:

R	Regnintensitet	[mm]
θ_s	Vandindhold ved vandmætning	[m^3 m^{-3}]
θ_{init}	Initial vandindhold	[m^3 m^{-3}]
ψ_e	Trykpotentiale ved luftindtrængen	[mm]
K_s	Vandmættede hydraulisk ledningsevne	[mm min^{-1}]
b	Campbell b	[-]
d	Dybde af boksene	[mm]
t	Tidsskridt	[min]

Modellen er opstillet til at beregne en række parametre i og imellem beregningsboksene, som jordlaget inddeles i ned gennem dybden. Det er valgt, at inddele i beregningsbokse af 5 cm og kigge på den øverste meter af jordlaget, den såkaldte umættede zone. Tidsskridtet afhænger af regnintensiteten, som er inputparametre til modellen, da forholdet er afgørende for om modellen er stabil. Parametrene, som beregnes i og imellem beregningsboksene, fremgår af tabel B.1.

i	θ_i	ψ_i	$K_{\psi,i}$	α_i	$K_{L,i}$			
$i_{+1/2}$						$\alpha_{N,i+1/2}$	$K_{N,i+1/2}$	$v_{i+1/2}$
i_{+1}	θ_{i+1}	ψ_{i+1}	$K_{\psi,i+1}$	α_{i+1}	$K_{L,i+1}$	:	:	:
:	:	:	:	:	:	$\alpha_{N,n+1/2}$	$K_{N,n+1/2}$	$v_{n+1/2}$
n	θ_{i+n}	ψ_{i+n}	$K_{\psi,n}$	α_n	$K_{L,n}$			

Tabel B.1. Konceptuelmodel over MMS-Model.

Hvor:

i	Nummer af boks	[-]
θ	Vandindhold	[m^3m^{-3}]
ψ	Trykpotentiale	[mm]
$K_{\psi,}$	Hydraulisk ledningsevne	[mm min^{-1}]
$K_{L,}$	Tilnærmelse af hydraulisk ledningsevne	[mm min^{-1}]
K_N	Hydraulisk ledningsevne mellem boksene	[mm min^{-1}]
v	Hastighed mellem boksene	[mm min^{-1}]

Parametrene i tabel B.1 beregnes ud fra nedenstående formler.

$$\psi_i = \psi_e \left(\frac{\theta_i}{\theta_s} \right)^{2b+3}$$

$$K_{\psi,i} = K_s \left(\frac{\psi_e}{\psi_i} \right)^{2b+3}$$

$$\alpha_i = \frac{2 + \frac{3}{b}}{\psi_i}$$

$$K_{L,i} = K_{\psi,i} e^{-\alpha_i \psi_i}$$

$$\alpha_N = \frac{\alpha_i + \alpha_{i+1}}{2}$$

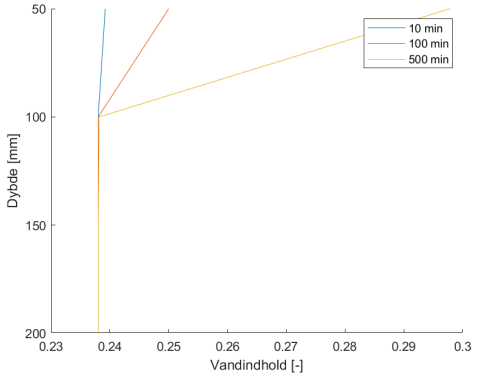
$$K_N = \frac{K_{L,i} + K_{L,i+1}}{2}$$

$$v = -\frac{K_N e^{\alpha_N \psi_{i+1}} - K_N e^{\alpha_N \psi_i}}{e^{\alpha_N \Delta_z} - 1} + K_N e^{\alpha_N \psi_i}$$

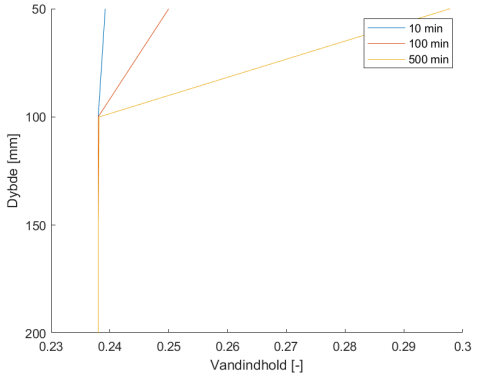
$$\theta_{i+\Delta t} = \theta_i - (V_{i+1/2} - V_{i-1/2}) \cdot \frac{t}{d}$$

For at sikre at MMS-modellen beregner retvisende resultater, er den afprøvet med en YOLO jord, som er en amerikansk jord, hvor infiltrationsforsøget er foretaget, og

resultatværdierne er derfor kendte. Sammenligningsmodellen er sat op ud fra konstanter, som er fundet på baggrund af infiltrationsforsøget med YOLO jorden. Ved sammenligning af de to MMS-modeller sikres det, at MMS-modellen, som kun tager højde for jordparametre og ikke indholder empiriske konstanter, stadig simulerer infiltrationen korrekt. Sammenligningen af de to MMS-modeller fremgår af figur B.1 og figur B.2.



Figur B.1. MMS-model opstillet med empiriske konstanter.



Figur B.2. MMS-model opstillet uden empiriske konstanter.

Sammenligningen mellem de to MMS-modeller, figur B.1 og B.2, viser at de to MMS-modeller giver samme resultat. Det betyder, at MMS-modellen, som er opsat uden empiriske konstanter, og derved kan beregne infiltrationen for en ønsket jordtype, beregner infiltrationen med samme præcision som MMS-modellen opstillet ud fra infiltrationsforsøg. Det vurderes derfor, at den opstillede MMS-model kan benyttes til at undersøge infiltrationen ned gennem jorden for en ønsket jordtype.

B.1 Trykpotentiale nedgennem dybden

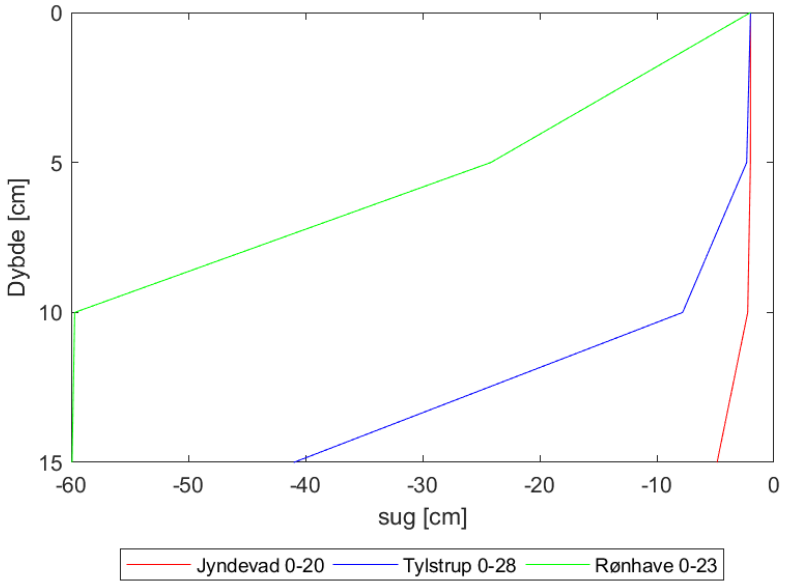
Trykpotentialet ændre sig med vandindholdet, og varierer derfor ned gennem dybden af jorden. Jordtypernes vandindhold er forskelligt, og derfor udvikler trykpotentialet sig også forskelligt. For at undersøge trykpotentialet ned gennem dybden af jorden er der opstillet en MMS-model (The Moving Mean Slope) for de øverste 50 cm.

Der er opstillet følgende randbetingelser i MMS-modellen.

- Fuld vandmætning i øverste boks i alle tidsskridt
- Vandmætning svarende til markkapacitet i hele dybden i første tidsskridt
- Vandmætning svarende til markkapacitet i nederste boks i alle tidsskridt

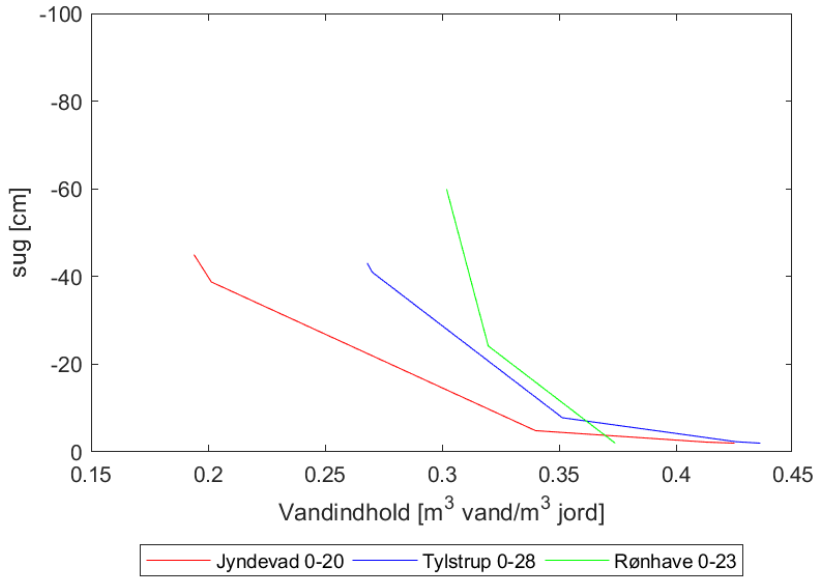
Fuld vandmætning i øverste boks svarer til at påsætte den maksimale regnintensitet, som jorden kan infiltrere. Denne randbetingelse er valgt for at kunne undersøge trykpotentialet ved vandfronten fra begyndelsen af beregningsprocessen. Det antages, at den forudgående periode har været uden nedbør, ved at vandmætningen stemmer overens med markkapacitet i hele dybden i første tidsskridt. Den nederste boks sættes til vandmætning ved markkapacitet i alle tidsskridt, for at undgå numerisk vand i modellen. Det er de øverste 15 cm af modellen, som undersøges, og derfor har randbetingelsen for at undgå numerisk vand ingen betydning for resultatet.

Trykpotentialet ved luftindtrængen, ψ_e, benyttes i MMS-modellen til at beregne trykpotentialet ned gennem dybden. Da der ikke forekommer andre værdier for parameteren end de beregnede ud fra Campbell b formel 2.6 på side 10, er det disse værdier, som benyttes i MMS-modellen. Det skaber en usikkerhed på beregningen, men er bedste bud på en værdi for ψ_e. Trykpotentialet ned gennem de øverste 15 cm for tre af jordprøverne fremgår af figur B.3.



Figur B.3. Suget, ψ, ændring ned gennem dybde, ved hhv. en grov sand, Jyndevad, fin sand, Tylstrup, og ler, Rønhave, efter 10 min.

En leret jordtype, Rønhave 0-23, opretholder et højere trykpotentiale ned gennem dybden end både en grov og fin sand, Jyndevad 0-20 og Tylstrup 0-28, som det fremgår af figur B.3. Sammenligningen mellem jordtyperne viser, at trykpotentialet aftages hurtigere med stigende sandindhold. Ændringen af trykpotentialet ned gennem dybden skyldes jordens vandindhold. Sammenhængen mellem vandindhold og trykpotentiale for de tre jordtyper, fremgår af figur B.4.



Figur B.4. Sammenhængden mellem vandindhold og sug, ψ, ved hhv. en grov sand, Jyndevad, fin sand, Tylstrup, og ler, Rønhave, efter 10 min.

Trykpotentialet aftager med stigende vandindhold for alle jordtyperne jf. figur B.4. Denne sammenhæng fremgår også af formel 2.6, hvor trykpotentialet beregnes ud fra vandindhold og campbell b.

I de videre beregninger for de danske jordklasser, vil den beregnede værdi for trykpotentialet ved luftindtrængen, ψ_e, blive benyttet. Det kan skabe usikkerheder for resultatet, men der forelægger ikke andre værdier for parameteren, som er mulige at benytte.

I forbindelse med undersøgelse af infiltration benyttes ofte parameterværdier fra de amerikanske jordklasser. Det undersøges derfor, hvilke af de amerikanske jordklasser, der repræsenterer danske jordforhold og derved er relevante at arbejde videre med.

Jordparametre fra det danske jordkartotek

C

Jordprøve	θ_{FC} [m^3 m^{-3}]	K_s [mm min^{-1}]	ϕ [m^3 m^{-3}]	b [-]	ψ_e [mm]
Jyndevad 0-20	0,194	2,70	0,425	3,97	5,27
Jyndevad 25-31	0,261	2,40	0,481	5,11	4,45
Jyndevad 31-75	0,135	15,48	0,429	4,30	0,96
Jyndevad 75-100	0,077	21,12	0,422	2,69	1,69
Askov 0-23	0,331	0,54	0,399	12,38	8,97
Askov 23-50	0,270	2,40	0,464	5,80	4,15
Askov 50-100	0,310	2,82	0,444	10,59	2,04
Roskilde 0-27	0,314	0,72	0,429	7,27	10,78
Roskilde 27-50	0,332	0,12	0,453	7,69	9,81
Roskilde 50-80	0,349	0,48	0,450	8,63	11,39
Roskilde 80-100	0,389	0,36	0,450	20,36	5,47
Rønhave 0-23	0,302	0,06	0,374	15,90	3,11
Rønhave 23-75	0,251	0,36	0,454	7,12	1,75
Rønhave 75-100	0,263	0,36	0,335	9,64	11,22
Aarslev 0-60	0,254	3,00	0,470	4,03	7,89
Aarslev 60-100	0,264	0,48	0,415	9,16	1,59
Borris 0-40	0,261	0,84	0,420	5,12	8,51
Borris 40-90	0,119	3,42	0,408	2,30	7,92
Borris 90-120	0,073	4,92	0,368	1,81	3,83
Silstrup 0-40	0,323	0,24	0,385	11,43	12,90
Silstrup 40-65	0,312	2,34	0,434	17,72	0,28
Silstrup 65-100	0,311	1,14	0,393	17,04	1,60
Tylstrup 0-28	0,294	1,14	0,441	3,71	18,60
Tylstrup 28-52	0,234	2,52	0,540	2,65	10,18
Tylstrup 52-76	0,234	0,48	0,435	3,31	10,30
Tylstrup 78-100	0,277	1,68	0,483	1,48	27,96
Ødum 0-40	0,268	1,02	0,436	6,31	4,36
Ødum 40-65	0,230	0,48	0,409	6,35	2,51
Ødum 65-100	0,245	0,54	0,376	10,88	0,90
Højer 0-25	0,327	1,08	0,549	5,03	6,09
Højer 30-55	0,412	0,6	0,584	7,12	6,83
Højer 55-90	0,355	0,36	0,464	2,33	33,07
Blangstedgård 0-30	0,273	0,3	0,379	15,97	0,51
Blangstedgård 30-52	0,262	2,52	0,433	7,70	1,94
Blangstedgård 52-100	0,223	1,44	0,446	4,55	3,79
Lundgård 0-25	0,168	2,04	0,434	4,13	3,38
Lundgård 25-55	0,098	12,18	0,447	2,54	3,86
Lundgård 55-100	0,086	13,62	0,435	2,55	2,84
Studsgård 0-22	0,271	0,78	0,463	6,67	3,27
Studsgård 22-35	0,195	1,44	0,446	3,78	5,11
Studsgård 35-100	0,144	13,74	0,410	1,91	8,40

Tabel C.1. Jordparametre for jorder fra det danske jordkartotek. [Hansen, 1976] Trykpotentialet,ψ_e, er ikke jf. Hansen, 1976, men beregnet ud fra formel 2.6 på side 10, som forklaret i afsnit 4 på side 23.

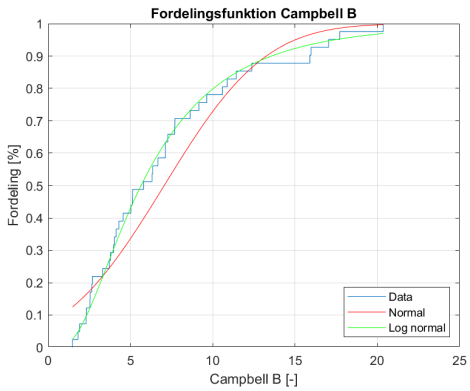
Jordprøverne fra det danske jordkartotek inddeles mellem de seks udvalgte amerikanske jordklasser ift. indhold af sand, silt og ler fremgår af tabel C.2. Udvælgelsen af de seks amerikanske jordklasser fremgår af afsnit 4.1.4 på side 29.

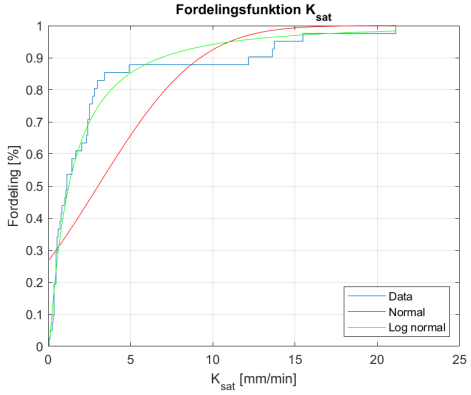
Amerikansk Jordklasse	Danske jordprøver	
Sand	Jyndevad 0-20	Jyndevad 25-31
	Jyndevad 31-75	Jyndevad 75-100
	Tylstrup 0-28	Tylstrup 28-52
	Tylstrup 52-76	Tylstrup 78-100
	Borris 0-40	Borris 40-90
	Borris 90-120	Lundgård 0-25
	Lundgård 25-55	Lundgård 55-100
	Studsgård 0-22	Studsgård 35-100
	Højer 60-90	
Loamy sand	Askov 0-23	Askov 23-50
	Aarslev 0-60	Ødum 0-40
	Studsgård 22-35	Højer 0-25
Sandy loam	Aarslev 60-100	Roskilde 0-27
	Roskilde 27-50	Roskilde 50-80
	Ødum 40-65	Ødum 65-100
	Silstrup 0-40	Rønhave 0-23
	Rønhave 23-75	Rønhave 75-100
	Blangstedgård 0-30	Blangstedgård 30-52
	Blangstedgård 30-52	Blangstedgård 52-100
	Højer 30-55	
Loam		
Sandy clay loam	Askov 50-100	Roskilde 80-100
	Silstrup 40-65	Silstrup 65-100
Sandy clay		

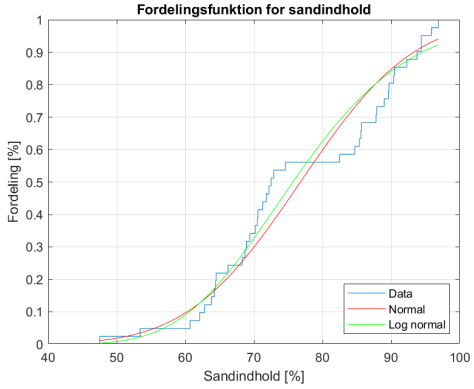
Tabel C.2. Jordprøver fra det danske jordkartotek inddelt i amerikanske jordklasser.

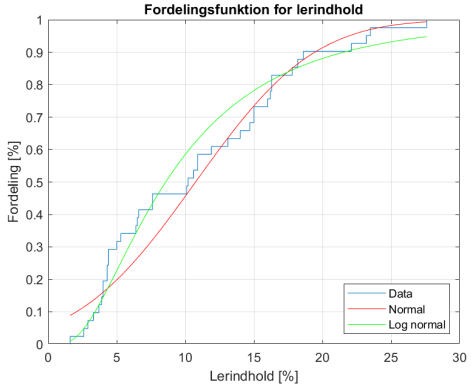
C.1 Fordelingsfunktioner over jordparametre i det danske jordkartotek

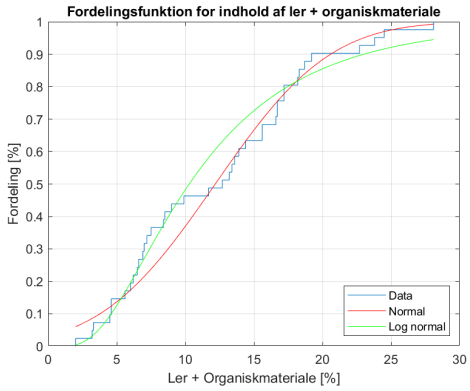
Fordelingsfunktioner over jordparametrene for jordprøverne fra det danske jordkatotek. Ud fra fordelingsfunktionerne kan den statistiske fordeling af jordparametrene vurderes og benyttes til at beregne sandsynligheden for, at overfladeafstrømning vil finde sted i Danmark.

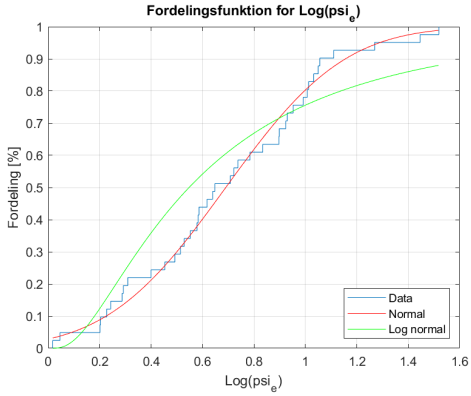

Fordelingsfunktion Campbell B
Fordeling [%]
Campbell B [-]
Data
Normal
Log normal

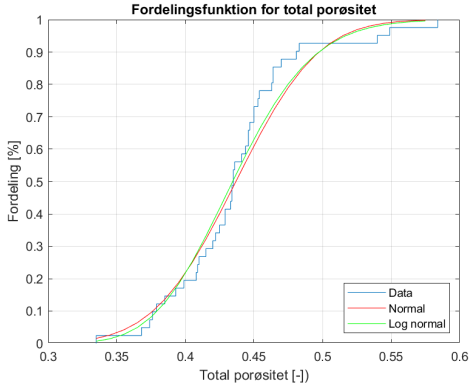

Fordelingsfunktion K sat
Fordeling [%]
K sat [mm/min]
Data
Normal
Log normal

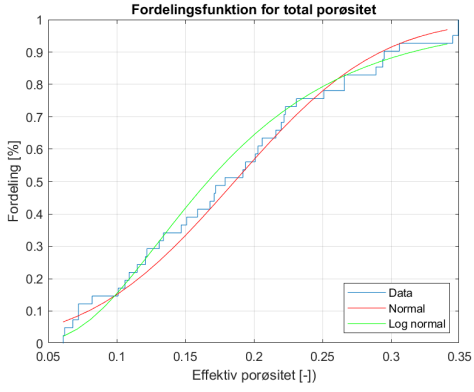

Fordelingsfunktion for sandindhold
Fordeling [%]
Sandindhold [%]
Data
Normal
Log normal


Fordelingsfunktion for lerindhold
Fordeling [%]
Lerindhold [%]
Data
Normal
Log normal


Fordelingsfunktion for indhold af ler + organiskmateriale
Fordeling [%]
Ler + Organiskmateriale [%]
Data
Normal
Log normal

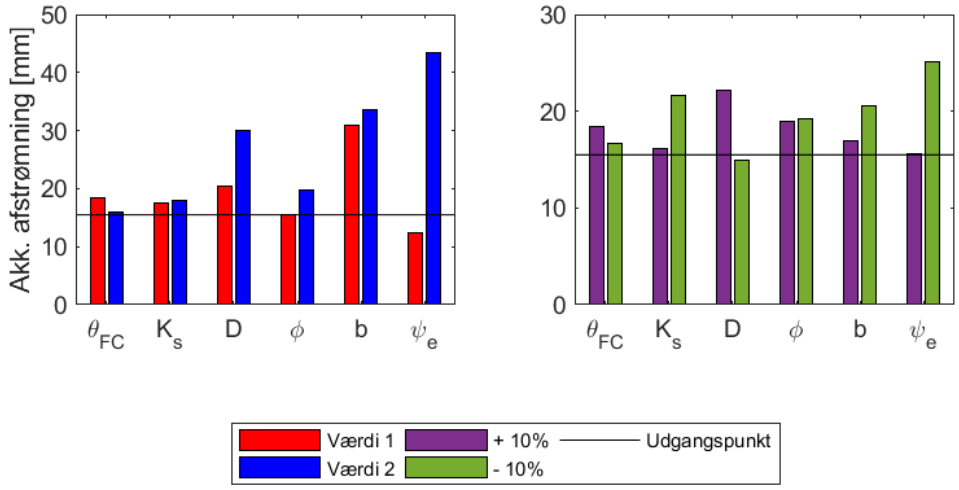

Fordelingsfunktion for Log(psi e)
Fordeling [%]
Log(psi e)
Data
Normal
Log normal


Fordelingsfunktion for total porøsitet
Fordeling [%]
Total porøsitet [-])
Data
Normal
Log normal

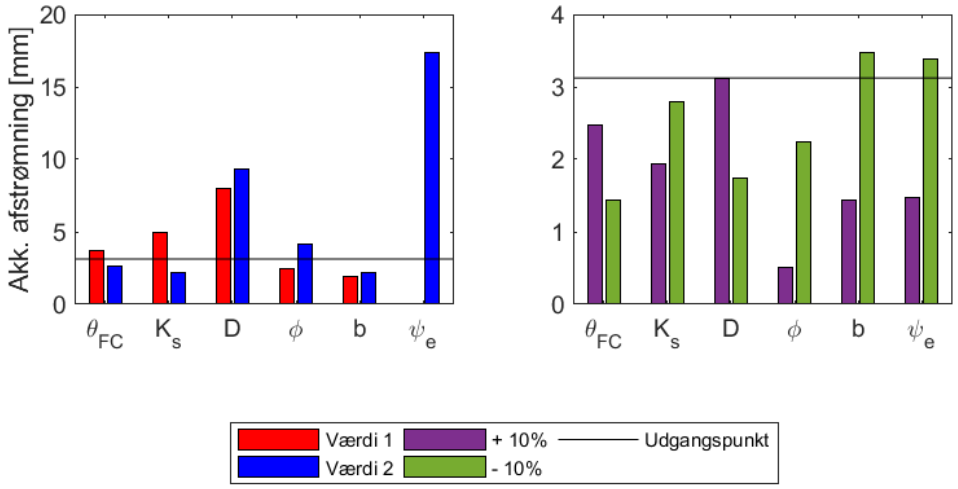

Fordelingsfunktion for total porøsitet
Fordeling [%]
Effektiv porøsitet [-])
Data
Normal
Log normal

Følsomhedsanalyse D

Ud fra følsomhedsanalysen er infiltrationsmodellens følsomhed overfor inputparametrene undersøgt. Følsomhedsanalysen er udført for hver af de tre regnhændelser både ud fra absolut og relativ følsomhed. Inputparametrene er ændret et af gangen, både med en ændring på +/- 10 %, men også med en vurderet realistisk usikkerhed for parameterværdierne. De vurderede parameterværdier, som benyttes i følsomhedsnalysen, fremgår af tabel 5.2. Resultatet af følsomhedsanalysen for anden og tredje regnhændelse fremgår af figur D.1 og D.2.



Figur D.1. Absolut følsomhedsanalyse af afstrømningsmodellen over regnhændelsen September 2017.



Figur D.2. Absolut følsomhedsanalyse af afstrømningsmodellen over regnhændelsen Oktober 2017.

Klimafaktorer til fremskrivning af regnserie

E

Target variable		climate factor (RCP4.5)	Weight
Annual precipitation	ap (mm)	1.08 (± 0.06)	
Seasonal precipitation, winter	spwi (mm)	1.12 (± 0.06)	0.125
Seasonal precipitation, spring	spsp (mm)	1.13 (± 0.08)	0.125
Seasonal precipitation, summer	spsu (mm)	1.06 (± 0.18)	0.125
Seasonal precipitation, autumn	spau (mm)	1.05 (± 0.07)	0.125
Annual number of events above 10 mm per day	n10mm (#)	1.20 (± 0.13)	0.06
Annual number of events above 20 mm per day	n20mm (#)	1.41 (± 0.30)	0.04
Annual Maximum daily precipitation	mdp (mm)	1.12 (± 0.09)	0.05
Annual Maximum 5-day precipitation	*m5dp (mm)*	*1.15 (± 0.06)*	*0.05*
Rain intensity for 10 min, T=2 years	*d10T2 (mm/h)*	*1.20 (±0.10)*	*0.06*
Rain intensity for 10 min, T=10 years	*d10T10 (mm/h)*	*1.30 (±0.20)*	*0.04*
Rain intensity for 60 min, T=2 years	*d60T2 (mm/h)*	*1.20 (±0.10)*	*0.06*
Rain intensity for 60 min, T=10 years	*d60T10 (mm/h)*	*1.30 (±0.20)*	*0.04*
Rain intensity for 360 min, T=2 years	*d360T2 (mm/h)*	*1.20 (±0.10)*	*0.06*
Rain intensity for 360 min, T=10 years	*d360T10 (mm/h)*	*1.30 (±0.20)*	*0.04*
			1

Nye målparametre i version 2.1 er angivet i kursiv.

Figur E.1. Klimafaktorer til fremskrivning af historisk regnserie til en klimafremskrevet regn [Andersen og Thorndahl, 2019].

Elektronisk bilag F

Der er vedlagt to elektroniske bilag til rapporten, det er henholdsvis afstrømningsmodellen og afløbsmodellen.

Afstrømningsmodel:

- Afstroemningsmodel_GA2019 - M-fil

Afløbsmodel: Afløbsmodellen består af tre filer til henholdvis den bagvedlæggende database og MIKE URBAN filen. Filerne skal have samme navngivning for at koble sammen.

- Lystrup_modificeret - Microsoft Access Record-Locking Information
- Lystrup_modificeret - Microsoft Access Database
- Lystrup_modificeret.mup - MUP-fil