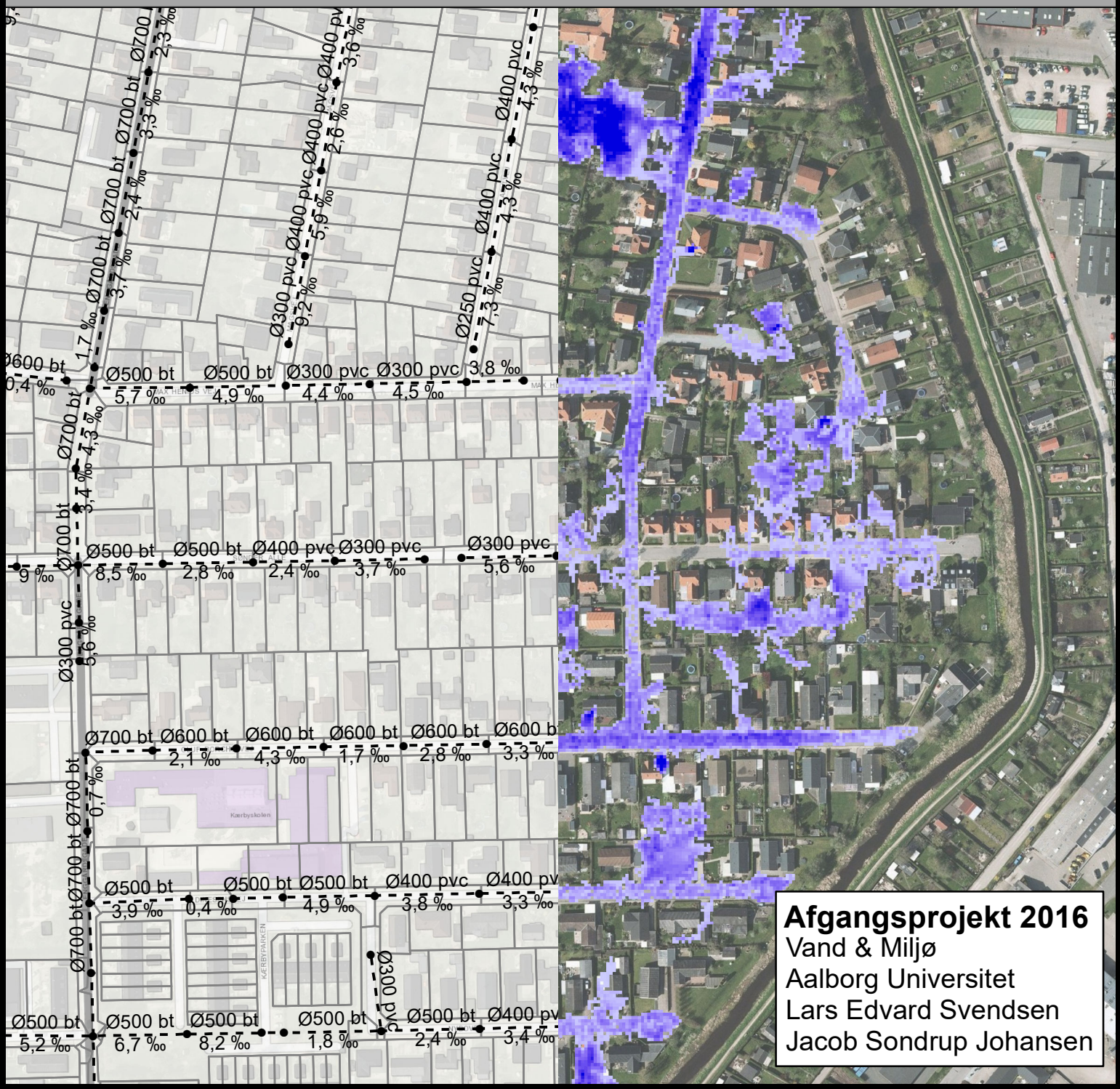


Klimasikring af Kærby



Afgangsprojekt 2016

Vand & Miljø
Aalborg Universitet
Lars Edvard Svendsen
Jacob Sondrup Johansen

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

School of Engineering and Science
Sofiendalsvej 9-11
9000 Aalborg
http://www.ses.aau.dk

Titel:

Klimasikring af Kærby

Tema:

Regn- og spildevandsafledning

Projektperiode:

01.09.2015 - 28.06.2016

Projektgruppe:

VM9-1-2015

Deltagere:

Lars Edvard Svendsen
Jacob Sondrup Johansen

Vejleder:

Søren Liedtke Thorndahl

Oplagstal: 4
Sidetal: 109
Bilagssidetal: 74
Elektroniske bilag: 12
Afsluttet d.: 09.06.2016

Synopsis:

Nærværende rapport omhandler en kapacitetsanalyse af Kærbys nuværende afløbssystem, Vestre Landgrøft og Østerå, med henblik på at klimasikre bydelen.

Af mere akademiske årsager indeholder afgangsprojektet også en sammenligning af to typer overflademodeller. Resultatet af sammenligningen har vist, at den mere avancerede overflademodel B giver en bedre beskrivelse af det afstrømmede volumen end den simple overflademodel A.
Analysen af Kærbys afløbssystem har vist, at der er en del udfordringer i forhold til at leve op til nuværende funktionskrav og samtidig begrænse udledning af opspædet spildevand til nærliggende recipient under kraftig regn. Kapacitetsanalysen af Østerå og Vestre Landgrøft har vist, at der er en mindre risiko for oversvømmelse fra Vestre Landgrøft. For at undersøge et forventeligt fremtidigt serviceniveau i bydelen, er der foretaget en fremskrivning af en lokal regnserie.
Som en kortsigtet løsning for at begrænse udledningen af opspædet spildevand samt forbedre serviceniveau, er der dimensioneret tre first flush bassiner og tre nedsivningsbassiner. Som en langsigtet plan er der dimensioneret et nyt regnvandssystem for bydelen, der lever op til nuværende funktionskrav. Yderligere er der testet flere forskellige klimasikrende foranstaltninger i form af sænkede vejarealer, rørbassiner og arealer udlagt som ekstra bassinvolumen under ekstrem hændelser.

Abstract

the present report is concerned with an analysis regarding the capacity of the sewerage system along with the recipients Vestre Landgrøft and Østerå in the city of Kærby, in regard to climate proofing the city.
For academic reasons, the report is also comparing two types of surface runoff models. The result of the comparison has shown, that the more advanced surface model B gives a better description of the runoff volume, than the less complicated surface model A.
The analysis of the sewerage system in Kærby has shown, that there are a few challenges in order to meet the functional requirements, and at the same time reduce the discharge of wastewater to the recipients during heavy rainfall. In the report, several areas, that are in risk of flooding during heavy rainfall, has been pointed out. The capacity analysis of Vestre Landgrøft and Østerå shows, that there is small risk of flooding from Vestre Landgrøft. In order to investigate the future conditions for Kærby, a historic rain series has been extrapolated to the year 2100.
As a short term solution in order to reduce flooding of the city and discharge to the recipients, three firstflush basins and three infiltration basins has been dimensioned. For the long term solution, a new separate rainwater system has been dimensioned to meet the functional requirements now as well as in 2100. Furthermore, several climate proving precaution has been tested, such as lowering the streets, introducing pipe basins and expropriate plots, in order to reduce damage from flooding during heavy rainfall.

Forord

Indeværende projekt er udarbejdet af projektgruppe VM9-1-2015, 9. og 10. semester Vand & Miljø, ved Aalborg Universitet. Projektet er udarbejdet i perioden fra d. 1. september 2015 til d. 9. juni 2016.

Indeværende projekt er udarbejdet i samarbejde med Envidan A/S, der har bistået med MIKE URBAN-modeller, ledningsplaner og kalibreringsdata. Der skal i den forbindelse lyde en speciel tak til Aske Malvang Kristensen og Kasper Førby Laden, som har bistået med specialviden om områdets afløbsmæssige forhold og fremvisning af pumpestationer.

Læsevejledning

Projektet er delt op i fem dele, der består af en *Forundersøgelse*, *Problemanalyse*, *Kortsigtet Problemløsning*, *Langsigtet Problemløsning* og *Afrunding*. Der vil i projektet løbende blive henvist til bilag, der findes bagerst i rapporten, og elektroniske bilag, som findes på den vedlagte USB. Projektet anvender kildehenvisninger efter Harvard-metoden, hvor kilden står efter den tekstdel, den er gældende for. Er kilden skrevet ind i en sætning, er den udelukkende gældende for denne sætning. Henvisninger indeholder efternavn på forfatteren og årstal. Forekommer der flere end to forfattere for den enkelte kilde, skrives efternavnet på den første forfatter efterfulgt af "et al.". Et eksempel på en kildehenvisning er [Eksempel et al., 2016]. Detaljerede beskrivelser af litteraturen er angivet i litteraturlisten.

Figurer og tabeller uden kildehenvisninger er egne illustrationer. Der refereres til figurer og tabeller vha. Figur/Tabel tal.

Lars Edvard Svendsen

Jacob Sondrup Johansen

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1 Indledning **1**
1.1 Behov for klimasikring . . . 1
1.2 Klimaforandringer . . . 1
1.3 Projektområde . . . 3
1.4 Fremtidige planer . . . 8

Kapitel 2 Problemformulering **11**

I Forundersøgelse **13**

Kapitel 3 Opsætning af Afløbsmodel **15**
3.1 Modelbeskrivelse . . . 15
3.2 Kalibrering af overflademodeller . . . 18
3.3 Valg af overflademodel . . . 23

Kapitel 4 Opsætning af Vandløbsmodel **27**
4.1 Modelopsætning . . . 27
4.2 Kalibrering af vandløbsmodel . . . 30
4.3 Modelusikkerheder . . . 31
4.4 Delkonklusion . . . 32

Kapitel 5 Analyse af nuværende forhold i Kærby **33**
5.1 Funktionskrav til afløbssystemer . . . 33
5.2 Maksimale tilladelige udledningsmængder . . . 34
5.3 Modelberegninger . . . 34
5.4 Udnyttelse af fuldtløbende rørkapacitet . . . 35
5.5 Opstuvning til terræn . . . 36
5.6 Vurdering af afløbssystemets selvrensningsevne . . . 38
5.7 Udledning fra overløbsbygværker og separate regnvandsledninger . . . 39
5.8 Vurdering af restkapaciteten i Østerå og Vestre Landgrøft . . . 41
5.9 Delkonklusion . . . 44

II Problemanalyse **45**

Kapitel 6 Oversvømmelsestruede områder i Kærby **47**
6.1 Modelopsætning . . . 47
6.2 Simulering af historisk regnhændelse . . . 47
6.3 Oversvømmelsesudbredelse . . . 50
6.4 Sammenligning med kunstigt genererede regn . . . 52
6.5 Oversvømmelse fra recipienterne . . . 54

6.6 Delkonklusion 55

Kapitel 7 Fremtidige Forhold i Kærby **57**
7.1 Fremskrivning af regnserie 57
7.2 Fremtidigt serviceniveau 58
7.3 Fremtidig restkapacitet i recipienterne 60
7.4 Delkonklusion 61

III Kortsigtet Problemløsning **63**

Kapitel 8 Etablering af first flush Bassiner **65**
8.1 Bassindimensionering 66
8.2 Årlige overløbsvolumener 67
8.3 Etablering af bassiner 68
8.4 Delkonklusion 70

Kapitel 9 Lokal Afledning af Regnvand **71**
9.1 Analyse af nedsivningspotentiale 71
9.2 Krav til nedsivningsbassiner 73
9.3 Etablering af LAR-anlæg 73
9.4 Effekt af LAR-løsninger 75
9.5 Delkonklusion 77

IV Langsigtet Problemløsning **79**

Kapitel 10 Separatkloakering i Kærby **81**
10.1 Dimensionering af separat regnvandssystem 81
10.2 Undersøgelse af overholdelse af funktionspraksis 83
10.3 Delkonklusion 85

Kapitel 11 Klimasikring af Kærby **87**
11.1 Klimasikrende tiltag 87
11.2 Vurdering af klimasikrende tiltag 92
11.3 Robusthed af klimasikrende tiltag 95
11.4 Delkonklusion 98

V Afrunding **99**

Kapitel 12 Konklusion **101**

Kapitel 13 Perspektivering **103**

Litteratur **105**

VIBilag **111**

Bilag A Opsætning af afløbsmodeller **113**
A.1 Afløbsmodel opsat med overflademodel A 113
A.2 Afløbsmodel opsat med overflademodel B 115
A.3 Beskrivelse af M11EXTRA 117

Bilag B Infiltration af grundvand i afløbssystemet **119**

Bilag C Generalized Likelihood Uncertainty Estimation **121**
C.1 Brugen af GLUE i indeværende projekt 123

Bilag D Valideringsresultater for afløbsmodel **125**

Bilag E Ledningsplaner **139**

Bilag F Alder på afløbssystem **147**

Bilag G SRO Data-ark for overløbsbygværker i Kærby **149**

Bilag H Kalibreringsresultat for Vandløbsmodellen **167**

Bilag I Fremtidigt Klima Scenarie 2 **169**

Bilag J Fotobilag **171**

Bilag K Elektronisk Bilag **183**
K.1 MIKE URBAN-model over Kærbys afløbssystem opsat med overflademodel A. 183
K.2 MIKE URBAN-model over Kærbys afløbssystem opsat med overflademodel B. 183
K.3 Observerede vandstande i pumpesumpe anvendt til kalibrering og validering. 183
K.4 MIKE URBAN-model over Østerå vandløbssystem. 183
K.5 Vandstandsmålinger og tværsnitsmålinger i Vestre Landgrøft, Østre Landgrøft og Østerå. 183
K.6 Rå- og korrigerede SRO-data fra overløbsbygværker i Kærby. 184
K.7 Radarbilleder af regnhændelse d. 6. august 2012. 184
K.8 Matlab-model til beregning af first flush bassinvolumen. 184
K.9 MIKE URBAN-model first flush bassiner. 184
K.10 MIKE URBAN-model nedsivningsbassiner. 184
K.11 MIKE URBAN-model separat regnvandssystem. 184
K.12 Prisoverslag for klimasikrende tiltag. 184

Indledning 1

I 2014 udgav *The Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) den tredje opdatering af den femte hovedrapport. Rapporten fastslår, at de globale klimaændringer med stor sandsynlighed skyldes udledningen af drivhusgaser. Selv med drastiske tiltag inden for miljøfremmende teknologier er det vurderet, at den globale opvarmning ikke kan stoppes, men vil stige med yderligere 1-3,7 °C før temperaturen stabiliserer sig. [Edenhofer et al., 2014]

1.1 Behov for klimasikring

D. 2. juli 2011 blev København ramt af det hidtil størst målte skybrud i København. Den størst målte nedbørsmængde blev målt i botanisk have til 135,4 mm over 24 timer jf. Beredskabsstyrelsen [2012]. Målet med klimasikring er at sikre byer mod regnbetingede oversvømmelser, da de har økonomiske, sundheds- og sikkerhedsmæssige konsekvenser. For forsikringsselskaberne kostede skybruddet over København d. 2. juli 2011 næsten 6 mia. kr. fordelt på 90.644 skader. Dette beløb inkluderer ikke de skader der var på offentlige institutioner som skoler, sygehuse osv., da disse skader blev delvist eller helt dækket af Københavns Kommune. Under selve skybruddet forekom der store problemer for elnettet, sundhedsvæsnet og infrastrukturen. Ca. 10.000 hustande var uden strøm og alarmcentralen modtog ekstraordinært mange sundhedsrelaterede opkald. Flere steder i byen var veje oversvømmet, hvilket besværliggjorde fremkomsten for ambulancer og den generelle trafik. [Beredskabsstyrelsen, 2012]
Økonomiske analyser har vist, at det generelt kan betale sig at øge kapaciteten af afløbssystemer for at undgå oversvømmelser, som kan resultere i skader, der højst sandsynligt vil overgå anlægsomkostningerne. [Miljøministeriet, 2007]

1.2 Klimaforandringer

Aalborg har i de sidste årtier oplevet ekstreme regnhændelser af skybrudskarakter. Ved en regnhændelse d. 6. august 2012 forekom der flere oversvømmelser spredt i Aalborg. Dette er dokumenteret af borgerhenvendelser og tilkaldelser af skadeservice. Regnen havde en gentagelsesperiode på 36 år for en 30 minutters regn og en maksimal regndybde på 27,8 mm over 30 minutter, hvorved hændelsen klassificeres som et skybrud. [EnviDan, 2012] Det samme skete d. 15. august 2006 hvor en regnhændelse med en gentagelsesperiode på 140 år ramte Aalborg. Den akkumulerede nedbørsmængde blev målt til 104 mm af AAU's regnmåler på Sohngårdsholmsvej med en maksimal regnintensitet på 25 $\mu m s^{-1}$. Denne regn resulterede i fuld udnyttelse af flere rør og bassiner samt oversvømmelser flere

steder i Aalborg. Tidligere hændelser fra henholdsvis 1998 og 2002 har også resulteret i oversvømmelser af dele af Aalborg. [Aalborg Kommune, a]

At disse ekstreme regnhændelser er steget med 20-40 % både i intensitet og hyppighed fra 1980 til nutidens Danmark jf. Aagaard [2013] kan være et tegn på, at klimaet ændrer sig. På globalt plan er klimaet forudset til at forandre sig drastisk inden år 2100 jf. Edenhofer et al. [2014]. I Danmark er nedbøren steget med 15 % siden 1873, hvor temperaturen er steget 1,5 °C i samme periode. Den stigende temperatur er medvirkende til den stigende nedbørsmængde, da en varmere atmosfære kan indeholde større mængder vanddamp, der potentielt kan falde som nedbør jf. Lykkegaard [2014]. På baggrund af scenariet *A1B* udarbejdet af IPCC er nedbøren i Danmark fremskrevet til at stige med yderligere 14 % i år 2100. Med den øgede årsnedbør, er der også forudsagt længere tørkeperioder. De længere tørkeperioder fører til kortere og mere koncentrerede regnhændelser, og dermed også muligheden for flere skybrudshændelser. [Klimatilpasning, 2015]

På baggrund af IPCC seneste rapport og de nye klimascenarier, *Representative Cencentration Pathways* (RCP), har DMI udarbejdet en rapport omhandlende det fremtidige klima i Danmark. Jf. DMI [2014] beskrives det, at den årlige nedbør i Danmark er steget med ca. 100 mm over de seneste 150 år. Hyppigheden af ekstreme hændelser, med mere end 100 mm regn over få timer, er indtil videre steget fra det 20. århundrede til det 21. århundrede. Den stigende nedbør vil hovedsageligt forekomme i vinterperioden, hvor sommernedbøren derimod vil være uændret grundet den stigende temperatur. Dog vil sommeren blive præget af længere tørkeperioder og flere ekstreme regnhændelser. [DMI, 2014]

Foruden de øgede nedbørsmængder, vil klimaforandringer også resultere i en stigning af havniveauet ved Danmarks kyster på 0,2 til 0,7 m for scenarie RCP6.0 og helt op til 1,2 m for DMI's øvre bud. Dermed vil mange kystnære områder med bebyggelse være i farezonen for at blive oversvømmet, medmindre der bliver lavet tiltag, der skal forhindre disse områder i at blive oversvømmet. [DMI, 2014]

Når der klimasikres, er det vigtigt at tage disse klimaændringer i betragtning og dimensionere løsninger efter fremtidige forhold frem for de nuværende nedbørsmængder. Et velkonstrueret afløbssystem kan holde i op til 100 år jf. Foreningen af rådgivende ingeniører [2015], hvorfor en løsning, der eventuelt inkluderer et nyt afløbssystem som minimum skal kunne håndtere de stigende nedbørsmængder denne periode kan medføre.

I forbindelse med dimensionering af afløbssystemer bliver de fremtidige klimaændringer inkluderet ved at bruge klimafaktorer. Disse klimafaktorer er beskrevet af *IDA Spildevandskomiteen* i skrift 30 IDA Spildevandskomiteen [2014]. Der forekommer forskellige klimafaktorer for forskellige gentagelsesperioder og tidshorisonter. Klimafaktorerne for en tidshorisont på 100 år kan ses i Tabel 1.1.

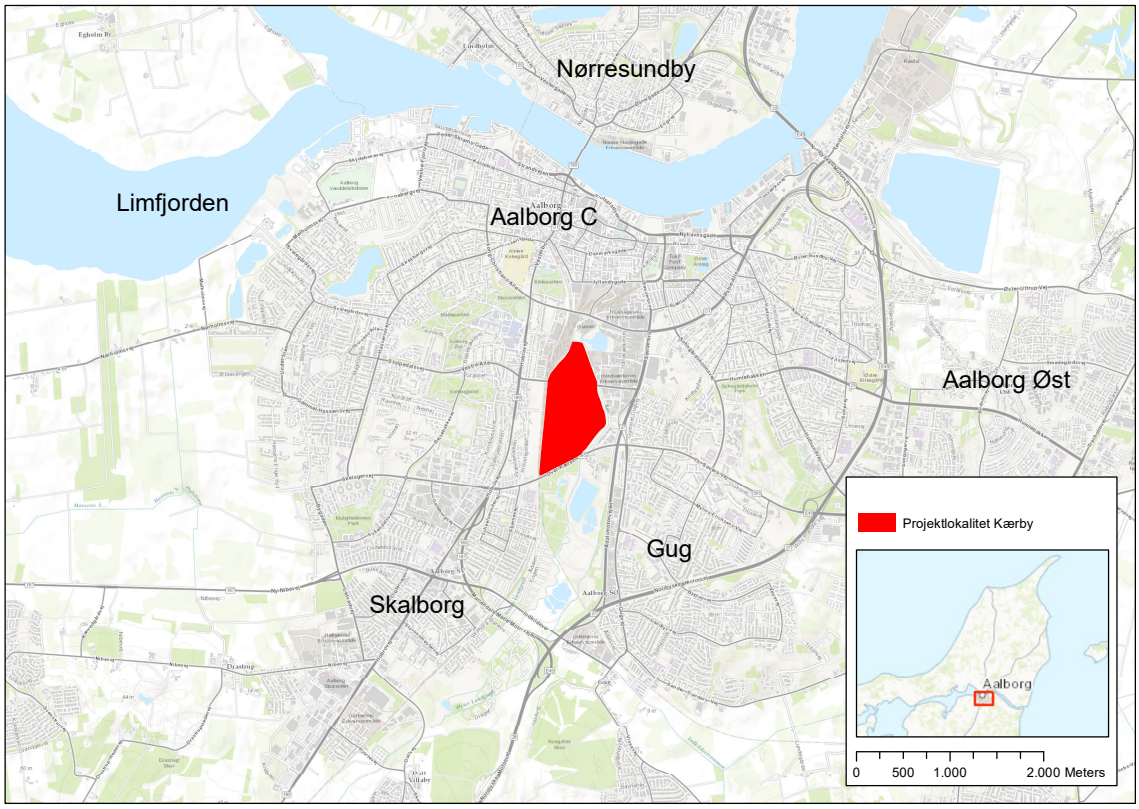
Gentagelsesperiode [år]	**Standard klimafaktor** [-]	**Høj klimafaktor** [-]
2	1,2	1,45
10	1,3	1,7
100	1,4	2,0

Tabel 1.1: Standard og høj klimafaktor for regnhændelser med forskellige gentagelsesperioder med en tidshorisont på 100 år. [IDA Spildevandskomiteen, 2014]

I Tabel 1.1 fremgår der en standard og en høj klimafaktor. Standard klimafaktoren bruges ved dimensionering af nye afløbssystemer hvorimod den høje klimafaktor anvendes til at beskrive et *worst case scenario*. Regnhændelser med en gentagelsesperiode højere end det gældende funktionskrav, defineret af Spildevandskomiteen, skal håndteres ved klimasikring.

1.3 Projektområde

Som fokusområde for dette projekt er bydelen Kærby i Aalborg valgt grundet bydelens udfordrende beliggenhed i forhold til afledning af regn- og spildevand. Bydelen Kærby er et attraktivt og bynært boligkvarter i Aalborg med ca. 2100 indbyggere og dækker et areal på ca. 60 ha hvoraf ca. 25 ha bidrager til afløbssystemet. Bydelen fremgår af Figur 1.1.

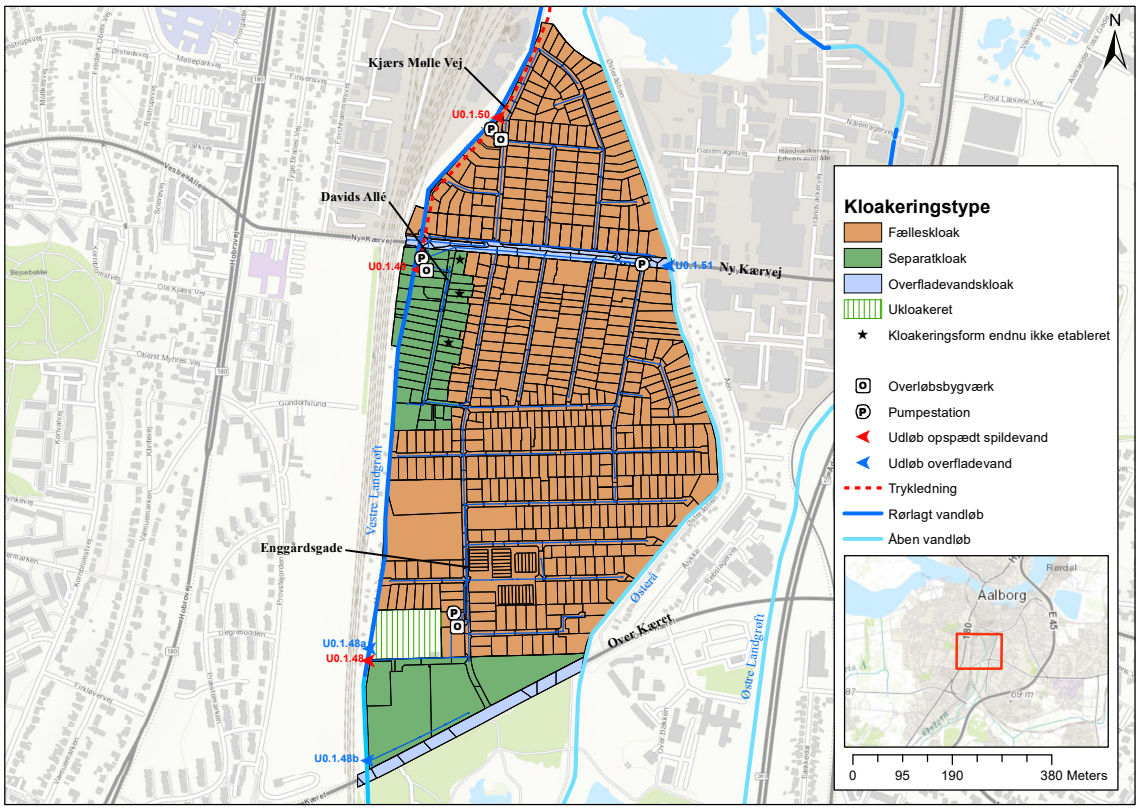


Figur 1.1: Kærby og bydelens centrale placering i Aalborg.

I forhold til regnvandsafledning er udfordringen ved Kærby, bydelens lave placering i landskabet hvor vandspejlet i omkringliggende recipienter er stort set i niveau med terræn. Grundvandsspejlet i området er 0,6-4,5 m under terræn. For at klimasikre Kærby skal der tages stilling til flere aspekter for at kunne sikre området. Det skal blandt andet sikres, at løsningen har den fornødne kapacitet med henblik på fremtidens klimaforandringer. Løsningen skal også udarbejdes med henblik på de nuværende planer for området og den generelle lovgivning.

1.3.1 Nuværende Afløbssystem

Det nuværende afløbssystem i Kærby er primært fælleskloakeret bortset fra to områder i henholdsvis den sydlige og vestlige del af Kærby, hvor der er etableret separatkloakering som det fremgår af Figur 1.2. Derudover er der etableret overfladevandskloak i Ny Kærvej og Over Kæret. Kloakeringstypen for de forskellige områder fremgår af Figur 1.2. Det ukloakerede område i den sydvestlige del af Kærby udgør på nuværende tidspunkt fodboldbaner. Som det fremgår af Figur 1.2 er Kærby afgrænset mod vest af Vestre Landgrøft og mod øst af Østerå. Regn og spildevand fra Kærby afstrømmer til 4 pumpestationer. Tre af pumpestationerne er beliggende i henholdsvis Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Møllevej og pumper fællesvand i nordgående retning mod Aalborg Renseanlæg Vest. De tre pumpestationer er hver især forbundet til et overløbsbygværk, der under overløbshændelser aflaster det fælleskloakerede opland, ved at aflede opspædet spildevand til Vestre Landgrøft. Overfladevand fra Over Kæret afledes via en overfladevandskloak, der udleder ved gravitation til Vestre Landgrøft. Dele af overfladevandet fra Ny Kærvej strømmer til en pumpesump placeret i den østlige ende af Ny Kærvej, hvorfra overfladevandet pumpes ud i Østerå. Af Bilag E fremgår den nuværende ledningsplan.



Figur 1.2: Kloakeringsforhold i Kærby samt bygværker. [EnviDan, 2015a], [Aalborg Kommune, c] og [Aalborg Kommune, d]

Pumpernes ydelse fremgår af Tabel 1.2. For at mindske slitage og øge driftsikkerheden på pumperne, er der på pumpestationerne etableret to pumper i hver pumpesump, der kører på skift. For pumpestationen ved udløb U0.1.51, er der kun etableret en enkelt pumpe.

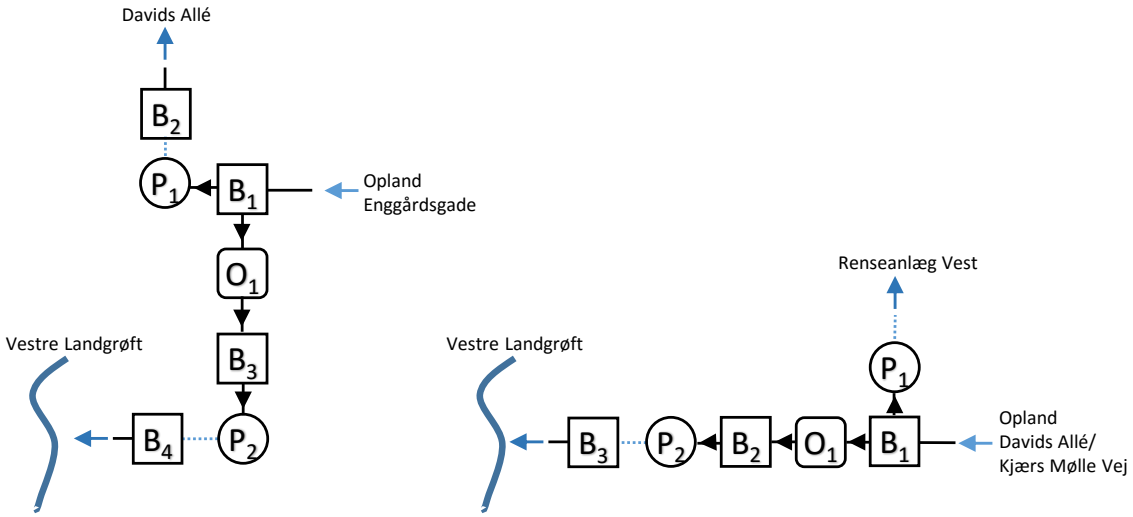
Pumpe Nr.	**Lokalitet** -	**Anvendelse** [-]	**Antal** [-]	**Maks ydelse, total** [$m^3\,s^{-1}$]
$\mathbf{P}_1$	Enggårdsgade	Fællesvand	2	0,015
$\mathbf{P}_2$	Enggårdsgade	Overløb	2	0,550
$\mathbf{P}_1$	Davids Allé	Fællesvand	2	0,033
$\mathbf{P}_2$	Davids Allé	Overløb	2	0,400
$\mathbf{P}_1$	Kjærs Mølle Vej	Fællesvand	2	0,024
$\mathbf{P}_2$	Kjærs Mølle Vej	Overløb	2	0,400
1510200p1	Ny Kærvej	Regnvand	1	0,063

Tabel 1.2: pumpeydelser for pumper i Kærby. Pumpens nr. refererer til Figur 1.3 med undtagelse af pumpen ved Ny Kærvej. [Krüger, 2015]

Figur 1.3 viser opbygningen af pumpestationerne på Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Mølle Vej, hvor opbygningen af pumpestationerne på Davids Allé og Kjærs Mølle Vej er identisk. Generelt gælder det for alle tre pumpestationer, at hvis flowet til $\mathbf{B}_1$ overstiger ydelsen af $\mathbf{P}_1$, sker der overløb fra $\mathbf{B}_1$ via $\mathbf{O}_1$ til $\mathbf{B}_3/\mathbf{B}_2$ for henholdsvis Enggårdsgade og Davids Allé/Kjærs Mølle Vej. Ved overløb pumpes det opspædede spildevand til et

tryktårn $\mathbf{B}_4$ for Enggårdsgade og $\mathbf{B}_3$ for Davids Allé/Kjærs Mølle Vej. Herfra løber vandet ved gravitation til Vestre Landgrøft. $\mathbf{B}_2$ for Enggårdsgade fungerer ligeledes som et tryktårn, hvor vandet løber fra, ved gravitation mod pumpestationen på Davids Allé. $\mathbf{B}_1$ og $\mathbf{B}_3$ for Enggårdsgade samt $\mathbf{B}_1$ og $\mathbf{B}_2$ for Davids Allé/Kjærs Mølle Vej er pumpesumpe for de tilhørende pumper.

Som det fremgår af Figur 1.2 er dele af området omkring pumpestationen på Davids Allé separatkloakeret. Det separate regnvand ledes stadig til pumpestationen og har på nuværende tidspunkt ikke separat regnvandsudløb. Separat spildevand fra det separatkloakerede område til Davids Allé ledes udenom overløbsbygværket og pumpes via en separat spildevandspumpe mod Renseanlæg vest. Separat spildevand fra den sydlige del af Enggårdsgade er koblet på fællessystemet og ledes til pumpestationen i Enggårdsgade. Det separate regnvand fra samme område er koblet på overløbsledningen og ledes uforsinket til Vestre Landgrøft.



Figur 1.3: Skitse af nuværende pumpestationer beliggende i Enggårdsgade (t.v.) og Davids Allé/Kjærs Mølle Vej (t.h.).

1.3.2 Recipienter

Østerå er omfattet af de statslige vandplaner og der er derfor krav til Aalborg Kommune om at restaurere vandløbet til, som minimum at opnå god økologisk tilstand for hele vandløbet. Et led i restaureringen af Østerå indebærer åbningen af åløbet gennem Aalborg samt sløjfning af overløbsbygværker der udleder opspædet spildevand til åen. Østerå er endvidere tiltænkt en rolle i planlægningen af Aalborg Kommunes klimatilpasningsplaner, hvor åen kan bruges til afledning af store mængder overfladevand under kraftige regnhændelser. [Aalborg Kommune, b]

Vestre Landgrøft er ikke målsat som Østerå. Dog er udløbene U0.1.48, U0.1.49 og U0.1.50, der fungerer som regnbetingede udledninger af opspædet spildevand til Vestre Landgrøft, omfattet af Aalborg Kommunes vandhandleplan. Da Vestre Landgrøft og Østre Landgrøft løber sammen med Østerå ca. 500 m nedstrøms Kærby og der skal derfor gøres en indsats over for disse udløb.

Under kraftige regnhændelser, der resulterer i kapacitetsproblemer for afløbssystemet i Kærby, bruges Vestre Landgrøft som recipient for opspædet spildevand, der løber over ved førnævnte overløbsbygværker. Udløbene til Vestre Landgrøft ses på Figur 1.2. Disse udledninger resulterede i, at vandføringen i Vestre Landgrøft steg til $3800\,\mathrm{l\,s^{-1}}$ ($7{,}3\,\mathrm{l\,s^{-1}\,ha^{-1}}$) for en regnhændelse svarende til en 10-års gentagelsesperiode. For samme regnhændelse var vandføringen i Østerå til sammenligning kun $1000\,\mathrm{l\,s^{-1}}$ ($0{,}08\,\mathrm{l\,s^{-1}\,ha^{-1}}$).[Aalborg Kommune, b] Den store vandføring i Vestre Landgrøft kan føre til oversvømmelser af det omkringliggende område. Vestre Landgrøft blev desuden rørlagt langs Kærby i perioden 1940-1941 for at mindske æstetisk forurening fra regnbetingede udløb fra fælleskloakerede oplande. [Kærby Grundejerforening, 2005]



Figur 1.4: Vestre Landgrøft: Overgang fra åbent vandløb til rørlagt strækning.



Figur 1.5: Sammenløb mellem Vestre- og Østre Landgrøft samt Østerå.

Foruden kravet om god økologisk tilstand i Østerå er målsætningen for anvendelsen af åen, at den skal fungere som *Laksefiskevand (opvækst- og opholdsvand) og Karpefiskevand.* Vestre Landgrøft er målsat som *Vandløb belastet af spildevand* med et kvalitetskrav, der er begrænset til, at grøften skal være æstetisk tilfredsstillende. [Nordjyllands Amt, 2004] Strækningen af Østerå langs Kærby er blevet klassificeret ved Dansk Vandløbs Fauna Indeks (DVFI) med et indeks på 4 til 5, hvor god økologisk tilstand svarer til et DVFI på 5. Vestre Landgrøft er derimod ikke klassificeret, da vandløbet ikke er målsat. [Miljø- og Fødevareministeriet, 2016]



Figur 1.6: Vestre Landgrøft ved Over Kæret.



Figur 1.7: Østerå ved Over Kæret.

1.4 Fremtidige planer

Målsætningen for Kærby, der er formuleret af Aalborg Kommune [2015], er at udvikle byen til et centrumnært boligkvarter, der stadig har et grønt præg, som skal synliggøres med Vestre Landgrøft og Østerå. For at fremtidssikre Aalborg mod fremtidige klimaforandringer, har Aalborg Kommune udarbejdet en klimastrategi samt Vision 2100.

Aalborg Kommunes Klimastrategi
Det er af staten pålagt kommunerne at udarbejde en klimastrategi. Den gældende klimastrategi for Kærby er udarbejdet af Aalborg Kommune, der er baseret på det førnævnte klimascenarie *A1B* fra IPCC. Formålet med klimastrategien for Aalborg Kommune er at få et overblik over klimascenarierne og de lokale konsekvenser heraf, og derved udarbejde en plan for at kunne håndtere de fremtidige nedbørsmængder og øget havvandsstand. I klimastrategien nævnes blandt andet Østerå som et geografisk fokusområde med henblik på oversvømmelser. Der redegøres for, at der trods opdæmninger langs Østerå igennem Kærby, stadig er risiko for oversvømmelser i området. Oversvømmelsesrisikoen bunder hovedsageligt i Kærbys lave placering. For at undgå Oversvømmelser forårsaget af Østerå i Kærby, forslår Aalborg kommune igennem klimasikringsplanen, at der bliver udlagt flere vådområder i Østerådalen, der kan udgøre en buffer for store afstrømninger i Østerå samt Vestre- og Østre Landgrøft. Klimastrategien stiller også krav til, at oversvømmelsestruede områder kortlægges. Der er indtil videre udarbejdet lavningskort, der udpeger områder, der risikerer at blive oversvømmet ved kraftig regn. Disse kort siger dog intet om, hvor stor risikoen er, samt i hvor stor en grad en eventuel oversvømmelse vil brede sig. [Aalborg Kommune, 2011]

Kærby er placeret lavt i landskabet i forhold til det omkringliggende terræn. Den lave beliggenhed betyder, at spildevand og overfladevand transporteres videre fra Kærby via pumper. Disse pumper fungerer som flaskehalse, hvis pumpernes ydelse ikke kan håndtere de tilledte vandmængder. Ved kraftige regnhændelser kan opspædet spildevand derfor forekomme på terræn og i kældre i Kærby. Med klimastrategien ønsker Aalborg Kommune endvidere at mindske antallet af udledninger af opspædet spildevand til recipienter samt mindske risikoen for regnbetingede oversvømmelser. For at mindske antallet af disse udledninger foreslås brugen af *Lokal Afledning af Regnvand* (LAR), der tilbageholder regnvandet ved den enkelte grundejer ved enten at nedsive det eller forsinke det. Dog forventes effekten af LAR-løsninger at være utilstrækkelig ved regnhændelser karakteriseret som skybrud, da den enkelte grundejer ikke vil kunne tilbageholde de store vandmængder. [Aalborg Kommune, 2011]
Kloaksystemet vil på sigt også blive påvirket af klimaændringerne. Klimasikringen af kloaksystemet er baseret på princippet om decentral håndtering af regnvand og central håndtering af spildevand. Det skal mindske udledningen og opstuvning af spildevand samt effektivisere spildevandsbehandlingen og gøre den uafhængig af klimaændringer. Dette er nærmere beskrevet ved *Vision 2100*. [Aalborg Kommune, 2011]

Vision 2100
Målet med vision 2100 er som før nævnt at effektivisere rensningen af spildevand og mindske udledninger af opspædet spildevand til recipienter. Dette gøres ved at separere regnvandet fra spildevandet i separatkloakerede systemer. Derved kan transport

og rensning af spildevand forekomme upåvirket af regnhændelser og klimaændringer. Separeringen påvirker endvidere, at overløb og oversvømmelser forårsaget af kraftige regnhændelser i mindre grad vil indeholde farlige stoffer og forurening fra spildevand. [Aalborg Forsyning, 2009]

Problemformulering 2

Projekts første fase indebærer en kapacitetsanalyse af Kærbys nuværende afløbssystem samt en undersøgelse af kapaciteten i recipienterne Østerå og Vestre Landgrøft.

Der udføres endvidere en fremskrivning af en regnserie, for at teste afløbssystemets kapacitet over for fremtidig øgede nedbørsmængder samt flere ekstreme regnhændelser. Ved hjælp af modelkørsler, undersøges gentagelsesperioder for udnyttelse af fuldtløbende rørkapacitet samt opstuvning til kritisk kote. Dette leder til følgende problemstillinger:

Hvilket serviceniveau tilbydes Kærbys borgere på nuværende tidspunkt og hvilket serviceniveau kan borgerne forvente i fremtiden?

Hvilken hydraulisk effekt har de regnbetingede udledninger på recipienterne Østerå og Vestre Landgrøft?

I forbindelse med undersøgelsen af det nuværende og fremtidige serviceniveau i Kærby ønskes det at teste forskellige typer af overflademodeller i MIKE URBAN, hvilket leder til følgende problemstilling:

Hvordan kan afstrømningsforholdene beskrives vha. forskellige overflademodeller og hvad betyder valget af overflademodel for resultatet?

En total separering af regnvand i Kærby er en omfattende og bekostelig affære, som ikke forventes etableret i nærmeste fremtid. Derfor anvendes analysen af afløbssystemet til at finde den bedste overgangsløsning mellem det nuværende fælleskloakerede system og det fremtidige separate afløbssystem med fokus på decentral regnvandshåndtering. På nuværende tidspunkt er regn- og spildevandsafledningen i Kærby begrænset af de videreførende pumper i Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Mølle Vej. Udarbejdelsen af en løsning, leder til følgende problemstillinger:

Hvilke løsninger kan etableres, så borgerne nu og i fremtiden som minimum vil opleve et acceptabelt serviceniveau, samtidig med at udledningstilladelser til Østerå og Vestre Landgrøft overholdes?

Hvilke klimasikrende tiltag kan etableres, så økonomiske og samfundsmæssige konsekvenser af ekstremregn reduceres mest muligt?

Del I

Forundersøgelse

Der opsættes to afløbsmodeller med henholdsvis overflademodel A og B. Disse kalibreres ud fra loggede vandstande i tre pumpesumpe beliggende i Kærby. Overflademodellen med det bedste fit til de observerede data bruges til en videre analyse af det nuværende serviceniveau i Kærby. Der opsættes ligeledes en vandløbsmodel i MIKE URBAN, som kalibreres efter loggede vandstandsdata. Vandløbsmodellen anvendes til at undersøge restkapaciteten i Østerå og Vestre Landgrøft.

Opsætning af Afløbsmodel 3

Til at teste om Kærbys afløbssystem lever op til gældende funktionskrav anvendes en afløbsmodel, som benytter sig af en overflademodel. Der er opsat både en overflademodel A og en overflademodel B. De to overflademodeller kalibreres og sammenlignes for simulerede vandstande. Den overflademodel, som vurderes at passe bedst på loggede vandstande, anvendes i den videre analyse til undersøgelse af afløbssystemets kapacitet samt, hvorvidt udledningstilladelserne er overholdt.

3.1 Modelbeskrivelse

Analysen af afløbssystemet udføres ved brug af afløbsmodelleringsprogrammet MIKE URBAN fra DHI. Afløbsmodellen er på forhånd opsat i modulet MOUSE (Modelling of Urban Sewers) af EnviDan. Afløbsmodellen består af en overflademodel og en hydrodynamisk rørmodel. Før der kan udarbejdes en analyse af det nuværende system, testes forskellen på overflademodel A og B med det formål at bestemme overflademodellen med det bedste fit til observeret data. Overflademodel B udregner, som overflademodel A, det afstrømmede volumen til afløbssystemet fra befæstede arealer. Derudover regner overflademodel B også afstrømning af ikke befæstede arealer, når infiltrationskapaciteten for disse er overskredet. Dette gør overflademodel B yderst interessant i forhold til klimaforandringer, der medfører kraftigere regnhændelser.

Den fysiske struktur i modellen består af en række deloplande koblet på nærmeste brønd i afløbssystemet. Da tilkoblingen af oplandene til brøndene er udført automatisk, er der lavet en grov vurdering, og ændret på de tilkoblinger der ikke stemmer overens med kloakplanen. Rørmodellen bruger parametre for ledningerne i form af diameter, rørenes hældning og ruhed udtrykt ved et Manningtal. [Thorndahl, 2014]

Opsætningen af afløbsmodel med henholdsvis overflademodel A og B er nærmere beskrevet i Bilag A.

3.1.1 Observerede Data

Til kalibreringen af afløbsmodellen bruges der observerede vandstande fra pumpestationerne på Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Mølle Vej. Vandstandene er målt i pumpesumpene tilhørende disse pumpestationer. De målte vandstande i pumpesumpene er logget af Aalborg Forsynings SRO-anlæg og udleveret af EnviDan [2015d]. De observerede vandstande opgives i centimeter som afstanden mellem vandspejl og bund af pumpesump, som skal omregnes til faktiske koter for at gøre disse sammenlignelige med resultaterne fra

MIKE URBAN. Der er udvalgt fire perioder blandt de observerede data, som indeholder en eller flere regnhændelser. De fire perioder fremgår af Tabel 3.1.

Start dato [DD-MM-ÅÅ]	**Slut dato** [DD-MM-ÅÅ]	**Gentagelsesperiode** [år]	**Regndybde** [mm]
12-12-14	14-12-14	<0,3	24,56
08-01-15	10-01-15	<0,3	24,80
04-05-15	05-05-15	0,6	16,47
25-07-15	28-07-15	0,4	71,80

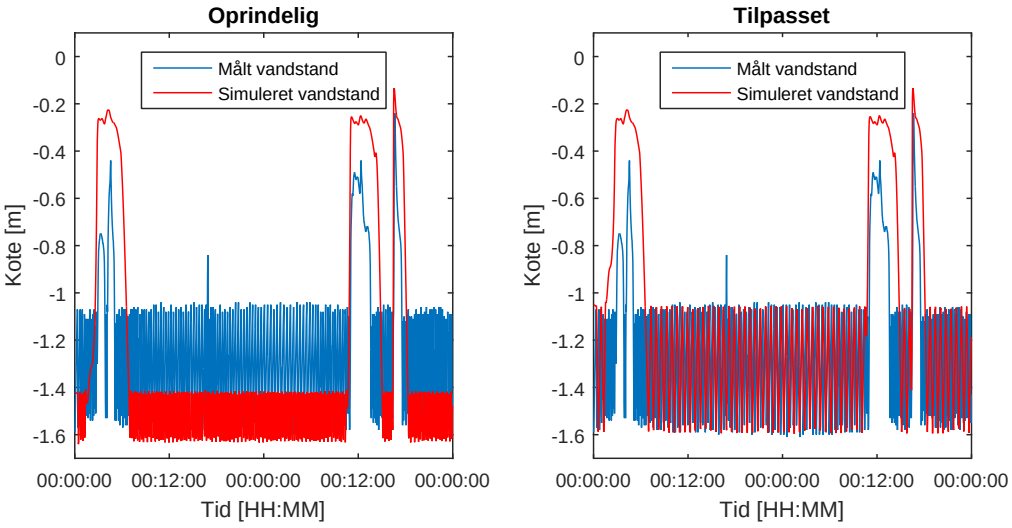
Tabel 3.1: Udvalgte perioder, for hvilke afløbsmodellen er kalibreret efter, samt den totale regndybde og gentagelsesperioden for hver periode. Gentagelsesperioden er den største ved en varighed på enten 10, 30, 60 eller 180 minutter.

På baggrund af de observerede data ændres pumpestart- og stop niveauet for modellen for at sikre, at det simulerede vandspejl under tørvejrsperioder ligger i samme kote som det observerede. Oprindelige og tilpassede pumpestart- og stop koter er angivet i Tabel 3.2.

Lokalitet	**Oprindelige koter**		**Tilpassede koter**	
	Start	Stop	Start	Stop
Enggårdsgade	-1,42	-1,62	-1,05	-1,60
Davids Allé	-0,40	-0,95	-0,55	-1,00
Kjærs Mølle Vej	-0,60	-1,15	-0,70	-1,35
Ny Kærvej	0,88	-0,57	1,13	-0,29

Tabel 3.2: Oprindelige- og tilpassede vandspejlskoter for pumpestart og stop.

Ændringen af pumpestart- og stop niveau er visualiseret på Figur 3.1.



Figur 3.1: Modelleret vandstand i pumpesump på Enggårdsgade, før og efter ændring af pumpestart- og stop niveau, sammenlignet med observeret vandstand.

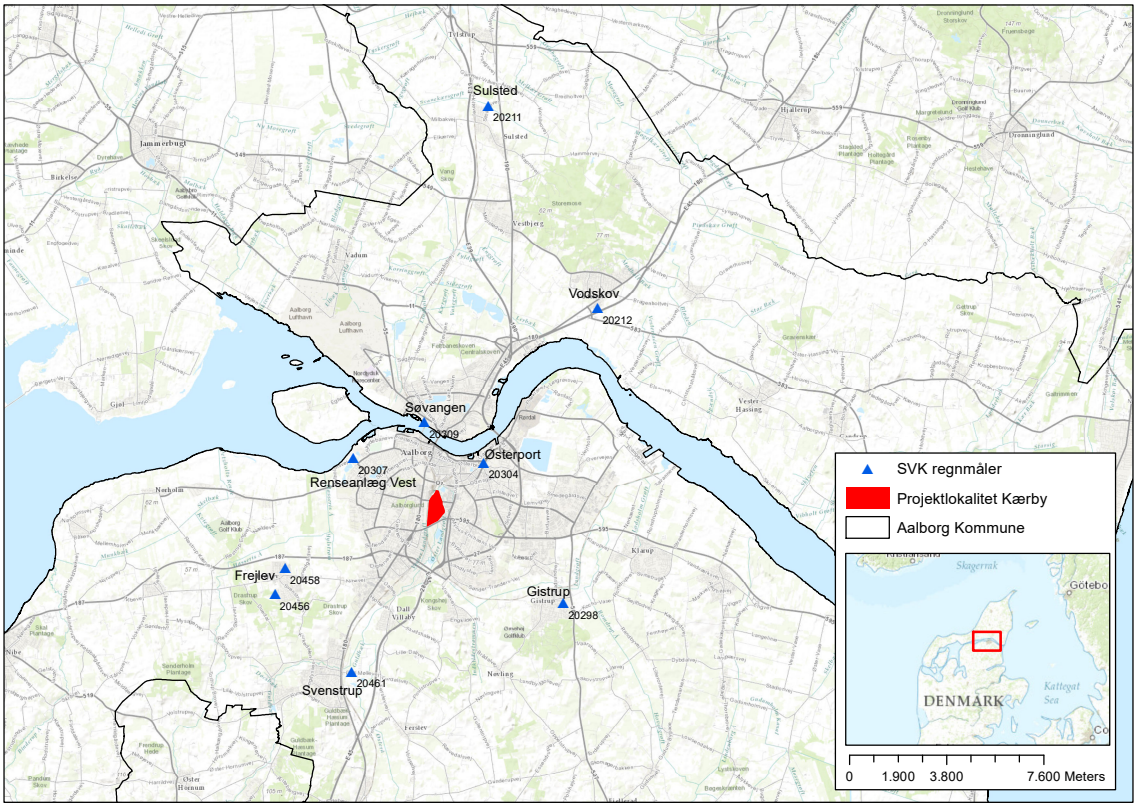
På Figur 3.1 ses det at vandstanden i pumpesumpen på Enggårdsgade er langt mere sammenlignelig med de observerede data efter pumpestart- og stop niveau er ændret.

3.1.2 Tørvejrsflow

I Kærby består bebyggelsen primært af parcelhuse med undtagelse af skole- og institutionsområde i Enggårdsgade og lejlighedskomplekser i den sydvestlige del samt ud til Ny Kærvej. Den sydlige del af Kærby bruges som industrikvarter, hvor der på nuværende tidspunkt er autoforhandlere.
Da oplandet er forholdsvis homogent i hele bydelen, er tørvejrsflowet angivet i enheden $m^3\,s^{-1}\,ha^{-1}$ frem for $l\,p^{-1}\,d^{-1}$. På nuværende tidspunkt er der 2120 personer bosiddende i Kærby fordelt over et areal på ca. 60 ha. Da grundvandsspejlet er beliggende terrænnært og dele af afløbssystemet er af ældre dato, er der stor sandsynlighed for infiltration af grundvand til afløbssystemet. Dette bidrag medtages i modelberegningen som en samlet værdi for spildevandsproduktionen og grundvandsinfiltrationen. Tørvejrsflowet er estimeret ud fra den loggede vandstand og pumpesumpenes kendte geometri. Flowet under tørvejr er udregnet til $0{,}0003\,m^3\,s^{-1}\,ha^{-1}$, der er en gennemsnitlig værdi der dækker hele Kærby oplandet. Omregnet til personbelastning giver dette $677\,l\,p^{-1}\,d^{-1}$. Til sammenligning er middel husspildevandsproduktionen i størrelsesordenen 85-140 $l\,p^{-1}\,d^{-1}$ jf. Leif Winther [2011]. Dette tyder på, at grundvandsinfiltration udgør 4-6 gange spildevandsflowet under tørvejr. Dette vurderes at være realistisk, da ca. 44 % af Kærbys afløbssystem er beliggende under eller delvis under grundvandsspejlet. Et kort over andelen af ledningsstrækninger beliggende under grundvandsspejlet fremgår af Bilag B.

3.1.3 Nedbørsdata

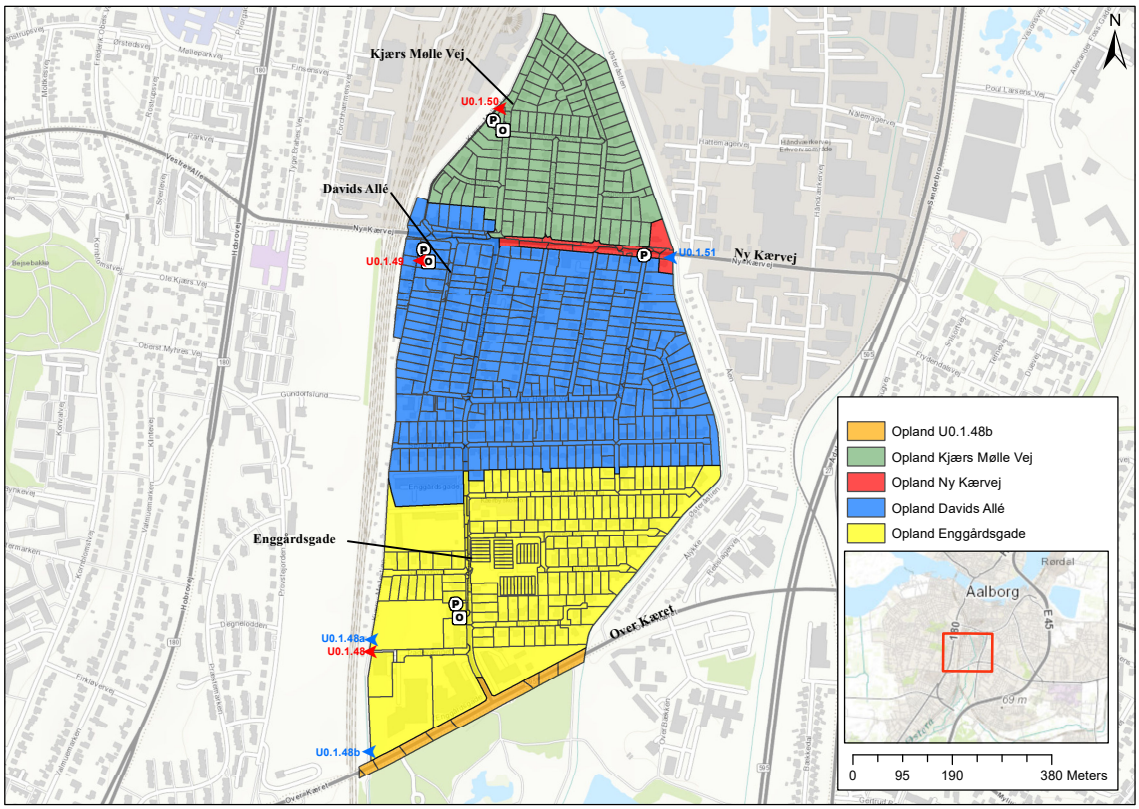
I og omkring Aalborg er der opsat en række regnmålere. Placeringen af disse fremgår af Figur 3.2. Til kalibreringen gøres der brug af en historisk regnserie målt af Spildevandskomiteens (SVK) regnmåler i Frejlev Syd placeret sydvest for Kærby. Regnmåleren har logget regnintensiteter siden september 1997 og er stadig i brug. Dette giver samlet en måleperiode på 18 år. De anvendte data er ukorrigerede, så alle nedbørshændelser er medtaget. Regnmåleren er beliggende i en afstand af syv kilometer fra Kærby. Regnmåler 20304 er placeret på Østerport to kilometer fra Kærby. Grunden til denne regnserie ikke anvendes er, at regnmålinger fra Frejlev Syd-regnmåleren har vist sig at passe bedre på vandstandsmålingerne sammenlignet med regndata fra regnmålere placeret tættere på projektlokaliteten.



Figur 3.2: SVK-regnmålere i Aalborg Kommune. [Spildevandskomiteen, 2015]

3.2 Kalibrering af overflademodeller

Afløbsmodellen kalibreres med metodologien *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE), for at kunne simulere maksimale vandstande i brønde og ledninger samt udledningsmængder til recipienterne korrekt. Derefter er det muligt at kontrollere, hvorvidt funktionskrav og udledningstilladelser er overholdt.
Størstedelen af Kærbys regn- og spildevand ledes til pumpestationerne beliggende i Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Mølle Vej. Enkelte overfladevandskloaker udleder uforsinket til enten Vestre Landgrøft eller Østerå. På Figur 3.3 fremgår de bidragende oplande til hver pumpestation. De bidragende oplande er fundet ved hjælp af den indbyggede funktion *Flow Backward Tracking* i MIKE URBAN. Dette gør det muligt at udpege bidragende oplande til de enkelte pumpestationer. Der er i MIKE URBAN defineret tre parametersæt alt efter hvilken pumpestation oplandene bidrager til. Da de loggede vandstande for pumpestationen beliggende på Ny Kærvej er ikke anvendelige til kalibrering, har de bidragende oplande til denne pumpestation fået tildelt samme parametersæt som for oplandene tilhørende Davids Allé. Oplandene til U0.1.48b har fået tildelt samme parametersæt som oplandene til pumpestationen på Enggårdsgade.



Figur 3.3: Deloplande i Kærby brugt i afløbsmodellen. [Aalborg Kommune, c]

I Tabel 3.3 ses det samlede areal og det bidragende areal for hvert opland angivet på Figur 3.3.

Opland	**Areal** [ha]	**Befæstet areal** [ha]
Enggårdsgade	23,00	9,81
Davids Allé	25,35	10,81
Kjærs Mølle Vej	10,62	4,53
Ny Kærvej	1,17	0,50
U0.1.48b	1,11	1,11

Tabel 3.3: Areal og befæstet areal for de enkelte deloplande i Kærby.

For bedst muligt, at kunne eftervise de reelle forhold i Kærby skal afløbsmodellen kalibreres efter observeret data. Som udgangspunkt er det overflademodellen, der er kalibreret, da dette er den største usikkerhed ved afløbsmodellen. Det er valgt at teste afløbsmodellen med to forskellige overflademodeller, henholdsvis overflademodel A og overflademodel B, for dermed at kunne sammenligne præcisionen af de to modeller. Teorien bag de to overflademodeller er nærmere beskrevet i Bilag A.

3.2.1 Kalibreringsparametre

Ved kalibreringen af overflademodellerne bestemmes et specifikt parametersæt for hvert delopland. Modellens deloplande er de tre beskrevet som Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Mølle Vej. De to overflademodeller benytter forskellige parametre til at beregne mængden af overfladevand, der senere bruges i rørmodellen. Ved kalibreringen er der for samtlige kalibreringsparametre angivet et interval for parameterværdien. Skulle resultaterne indikere, at den reelle parameterværdi ligger uden for det angivne interval, vil intervallet blive ændret og en ny kalibrering vil blive foretaget. Kalibreringsparametrene og de dertilhørende intervaller ses i Tabel 3.4 og 3.5.

Overflademodel A

Parameter	**Enhed**	**Interval**	
		Min	Maks
Hydrologisk reduktionsfaktor	[-]	0,1	1
Initialtab	[mm]	0,001	1
Koncentrationstid	[min]	5	10

Tabel 3.4: Intervaller for parameterværdier anvendt ved kalibrering af overflademodel A.

Overflademodel B

Parameter	**Enhed**	**Interval**	
		Min	Maks
Regn-skaleringsfaktor	[-]	0,1	1
Lav infiltrationskapacitet	$[\mathrm{m\,s^{-1}}]$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Medium infiltrationskapacitet	$[\mathrm{m\,s^{-1}}]$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-4}$

Tabel 3.5: Intervaller for parameterværdier anvendt ved kalibrering af overflademodel B.

Regn-skaleringsfaktoren reducerer mængden af nedbør og dermed det afstrømmede volumen. Denne parameter er medtaget for at sikre, at modellen simulerer det reelle afstrømningsvolumen. Sammenlignet med overflademodel A svarer regn-skaleringsfaktoren til den hydrologiske reduktionsfaktor.

For hver parameter vil der inden for det angivne interval blive genereret et forudbestemt antal tilfældige værdier. De tilfældige værdier bliver derefter sat sammen til tilfældige datasæt der testes af modellen.

3.2.2 Kalibreringsmetode

Kalibreringen er valgt udført i Matlab ved Monte Carlo simuleringer. Afløbsmodellen køres i MIKE URBAN gennem Matlab med de varierende parametersæt vist i Tabel 3.4 og 3.5. Efter hver simulation bruges programmet M11EXTRA, der er en del af MIKE URBAN, til at udvælge simulerede vandstande i de tre pumpesumpe, for hvilke der findes observerede vandstande.

Til bestemmelse af det bedste parametersæt bruges GLUE. Kalibreringen er fortaget for hver af de fire udvalgte perioder jf. Tabel 3.1. For hver periode findes det bedste parametersæt passende til det enkelte delopland. Det optimale parametersæt bestemmes som den kombination, der giver den største likelihood-værdi. Likelihood-værdien er udregnet ved ligning 3.1. [Thorndahl, 2008]

M11EXTRA programmet og GLUE metodologien er nærmere beskrevet i henholdsvis Bilag A og C.

$$L\left(O|M\left(\Theta,I\right)\right) = exp\left(\frac{\sigma^2_{M-O}}{\sigma^2_O}\right) \tag{3.1}$$

Hvor

L	Likelihood-værdi	[-]
O	Observeret vandstandskote	[m]
M	Modelleret vandstandskote	[m]
Θ	Parametersæt anvendt for model	[-]
I	Input til model	[-]
σ^2	Varians af vandstandskote	[m]

Ligning 3.1 bruger variansen af forskellen mellem det observerede og det modellerede samt variansen af det observerede alene.

Den udregnede likelihood-værdi kan være i intervallet 0-1, hvor 1 betyder, at modellen har en god sammenlignelighed med det observerede og 0 betyder at der er en ringe sammenlignelighed mellem modellerede- og observerede vandstande.

De endelige parametersæt er valgt, på baggrund af et vægtet gennemsnit for hver parameter. Det vægtede gennemsnit udregnes på baggrund af den højeste likelihood-værdi for hver hændelse. Dermed bliver der for kalibreringen ikke brugt et acceptkriterie, men jo højere likelihood-værdi jo mere vægter de kalibrerede parametre i det endelige parametersæt. Det vægtede gennemsnit er udregnet jf. Ligning 3.2.

$$P_{avg} = \frac{\Sigma\left(P \cdot L\right)}{\Sigma L} \tag{3.2}$$

Hvor

P_{avg}	Vægtet gennemsnit af parameter	[-]
P	Kalibreret parameterværdi for en enkelt periode	[-]
L	Opnået likelihood for en enkelt periode	[-]

Hermed kan de bedste parametersæt bestemmes for hvert opland. Med henblik på GLUE metodologien skal det bedste parametersæt ikke forstås som et korrekt parametersæt, der resulterer i en korrekt model, men som det parametersæt, der giver de bedste tilnærmede resultater sammenlignet med forskellige observerede data. Dette skyldes *equifinality* tesen,

beskrevet i Bilag C, hvor det formodes, at der ikke kan opnås et parametersæt, der kan anses som værende det rigtige for alle observerede data, men stadig give acceptable resultater.

3.2.3 Kalibreringsresultater

Overflademodel A og B har på baggrund af kalibreringen fået tildelt parametersættene, der fremgår af Tabel 3.6 og 3.7.

Overflademodel A

Opland	**Hydrologisk reduktionsfaktor** [-]	**Initialtab** [mm]	**Koncentrationstid** [min]	**Likelihood interval** [-]
Enggårdsgade	0,616	0,745	10	0,23 - 0,71
Davids Allé	0,646	0,243	8	0,01 - 0,85
Kjærs Mølle vej	0,689	0,736	8	0,30 - 0,52
Standard værdi	0,900	0,600	7	-
Spredningen af de kalibrerede parametre for hvert opland				
Enggårdsgade	0,247	0,215	1,21	
Davids Allé	0,294	0,366	1,37	
Kjærs Mølle vej	0,343	0,160	1,58	

Tabel 3.6: Kalibrerede parametre for overflademodel A til de tre deloplande.

Overflademodel B

Opland	**Skaleringsfaktor regn** [-]	**Infiltrationskapacitet lav** [$\mathrm{m\,s^{-1}}$]	**Infiltrationskapacitet medium** [$\mathrm{m\,s^{-1}}$]	**Likelihood interval** [-]
Enggårdsgade	0,773	$3,42 \cdot 10^{-6}$	$5,20 \cdot 10^{-5}$	0,26 - 0,70
Davids Allé	0,793	$4,00 \cdot 10^{-6}$	$4,75 \cdot 10^{-5}$	0,06 - 0,70
Kjærs Mølle vej	0,686	$5,95 \cdot 10^{-6}$	$6,63 \cdot 10^{-5}$	0,29 - 0,69
Standard værdi	1,000	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$	-
Spredningen af de kalibrerede parametre for hvert opland				
Enggårdsgade	0,293	$3,03 \cdot 10^{-6}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$	
Davids Allé	0,323	$1,93 \cdot 10^{-6}$	$2,84 \cdot 10^{-5}$	
Kjærs Mølle vej	0,285	$2,81 \cdot 10^{-6}$	$3,80 \cdot 10^{-5}$	

Tabel 3.7: Kalibrerede parametre for overflademodel B til de tre deloplande.

Afløbsmodellen testes for fire valideringsperioder, der er forskellige fra kalibreringsperioderne. På baggrund af valideringsresultaterne bestemmes det, hvilken overflademodel, der bruges til den videre analyse.

3.2.4 Modelusikkerheder

I modellen forekommer der usikkerheder, der er gældende for begge overfladem odeller og usikkerheder, som kun er gældende for den enkelte overfladem odel. De fælles usikkerheder er som følger:

- Der kan forekomme usikkerheder i den fysiske struktur for modellen, der kan påvirke den måde, hvorpå vandet bevæger sig i afløbssystemet. Den fysiske struktur består af rørenes ruhed, der ændres med tiden, bundkoter i brønde, der kan være indmålt forkert og overløbskoter i bygværker der ændrer sig med tiden, hvis de ikke bliver renset.
- Regnserien der bruges ved modelkørslerne er målt i Frejlev Syd, der ligger syv kilometer sydvest for Kærby, hvorfor den målte intensitet kan være forskellig fra Kærby. Det vil også resultere i en forskel i forhold til, hvornår regnen er målt i Frejlev Syd, og hvornår det kan ses i de observerede data. Dog formodes det ikke, at der forekommer en variation i årsnedbøren mellem Frejlev Syd og Kærby.
- Koten for vandstandsloggerne i pumpesumpene kan være indmålt forkert, der resulterer i en logget vandstand, der er forskellig fra den reelle vandstand.
- Tørvejsflowet er beregnet som et gennemsnit over hele Kærby, hvor dette flow kan variere meget fra område til område.

For overfladem odellerne gælder det, at den generelle usikkerhed for A er modellens simplicitet, hvor der f. eks. ikke medtages afstrømning fra ikke befæstede arealer under kraftig regnvejr. Overfladem odel B derimod medtager afstrømning fra ikke befæstede arealer ved kraftig regn, dog bruger modellen et større antal parametre til at beskrive denne afstrømning, hvilket er forbundet med parameterusikkerheder.

3.3 Valg af overfladem odel

Overfladem odel A og B er hver især kalibreret med henblik på at bestemme overfladem odellen til brug ved den videre analyse af de nuværende forhold for afløbssystemet i Kærby. De to modeller er valideret for fire perioder, som fremgår af Tabel 3.8, for at kunne fastslå modellen med den største likelihood-værdi.

Start dato [DD-MM-ÅÅ]	**Slut dato** [DD-MM-ÅÅ]	**Gentagelsesperiode** [år]	**Regndybde** [mm]
02-06-15	04-06-15	<0,3	19,60
14-08-15	16-08-15	25	52,93
24-08-15	26-08-15	0,3	17,40
01-09-15	04-09-15	<0,3	18,36

Tabel 3.8: Udvalgte perioder, for hvilke afløbsmodellen er valideret efter, samt den totale regndybde og gentagelsesperiode for hver periode. Gentagelsesperioden er den største ved en varighed på enten 10, 30, 60 eller 180 minutter.

Hver periode kan indeholde flere hændelser, hvorfor de to modeller er valideret med otte hændelser for Enggårdsgade, fem hændelser for Kjærs Mølle Vej og otte hændelser for Davids Allé.

Modelresultaterne er sammenlignet med observerede vandstande i de samme pumpesumpe, som de blev kalibreret for. Sammenligningen mellem modellerede og observerede vandstande udføres ud fra samme likelihood metode som beskrevet i Afsnit 3.2.2. Den gennemsnitlige likelihood-værdi for de fire valideringsperioder skal overstige 0,3 før modellen kan accepteres til brug i en videre analyse. Den overflademodel, der opnår den højeste likelihood-værdi er anvendt i den videre analyse af afløbssystemet.

De observerede valideringsdata er sammenlignet med beregnede vandstande for overflademodel A og B, kan ses i Bilag D, sammen med likelihood-værdien for den enkelte model ved hver periode.

På baggrund af de kalibrerede parametersæt har overflademodel A og B opnået likelihood-værdierne, der fremgår af Tabel 3.9.

Overflademodel	**Gennemsnitlig likelihood-værdi**
A	0,380
B	0,408

Tabel 3.9: Gennemsnitlig likelihood-værdi for overflademodel A og B.

På baggrund af værdierne i Tabel 3.9 er overflademodel B valgt til den fremadrettede analyse af de nuværende forhold i Kærby. MIKE URBAN-modellen opsat med henholdsvis overflademodel A og B er vedlagt på Elektronisk Bilag K.1 og K.2. De målte vandstande, der er anvendt til kalibrering og validering er vedlagt på Elektronisk Bilag K.3

3.3.1 Delkonklusion

På baggrund af arbejdet med overflademodel A og B er der udført en samlet vurdering af, hvilken overflademodel, der anbefales til afløbsmodellering i forhold til tidsforbrug, i forbindelse med opsætning af modellen, og præcision i forhold til de resultater modellen giver, som i indeværende projekt er størrelsen af likelihood-værdien.

Forskellen ved tidsforbruget på de to modeller ligger i selve opsætningen, hvor MIKE URBAN for overflademodel A har et *catchment processing tool*, der bestemmer befæstelsesgraden for hver enkelt matrikel. Overfladetypen brugt i overflademodel B er derimod bestemt manuelt ud fra en procentdel af den enkelte matrikel. Dette er kun muligt fordi Kærby er tilnærmelsesvis homogent fra matrikel til matrikel. Havde Kærby været mere uensartet med hensyn til overfladetypen, havde dette ikke være muligt, hvorfor tidsforbruget på opsætningen af overflademodel B kan variere og være langt større sammenlignet med overflademodel A. Til opsætningen af overflademodel B er der desuden brugt et andet program i form af Matlab, hvorimod der ved opsætningen af overflademodel A kun er anvendt MIKE URBAN. Med hensyn til kalibreringen, er de to overflademodeller kalibreret efter samme metode, hvorfor tidsforbruget for denne del har været ens for de to modeller. Overflademodel B vil generelt tage længere tid at sætte op sammenlignet med overflademodel A. Opsætningstiden af overflademodel B er kortest, hvis det antages, at værdierne for infiltrationskapaciteten og Hortons eksponent er standardværdier eller bliver kalibreret frem for at værdierne måles fysisk, og at oplandet er tilnærmelsesvis

homogent. Hvis det ønskes at bestemme infiltrationskapaciteten og Hortons eksponent ved forsøg forlænges opsætningstiden markant, hvor et inhomogent opland også vil forlænge opsætningen yderligere for overflademodel B. En fordel ved at benytte overflademodel B er, at der ved ekstreme regnhændelser medtager afstrømning fra permeable område, hvilket ikke er muligt for overflademodel A. Dette vil resultere i langt mere præcise resultater, når det netop er ekstrem regnhændelser der simuleres for.

Resultatmæssigt opnår overflademodel B en likelihood-værdi, der er 7,5 % højere end Overflademodel A. Den højere præcision af de modellerede resultater skal medtages i overvejelserne om hvilken overflademodel, der skal benyttes til et givent område.

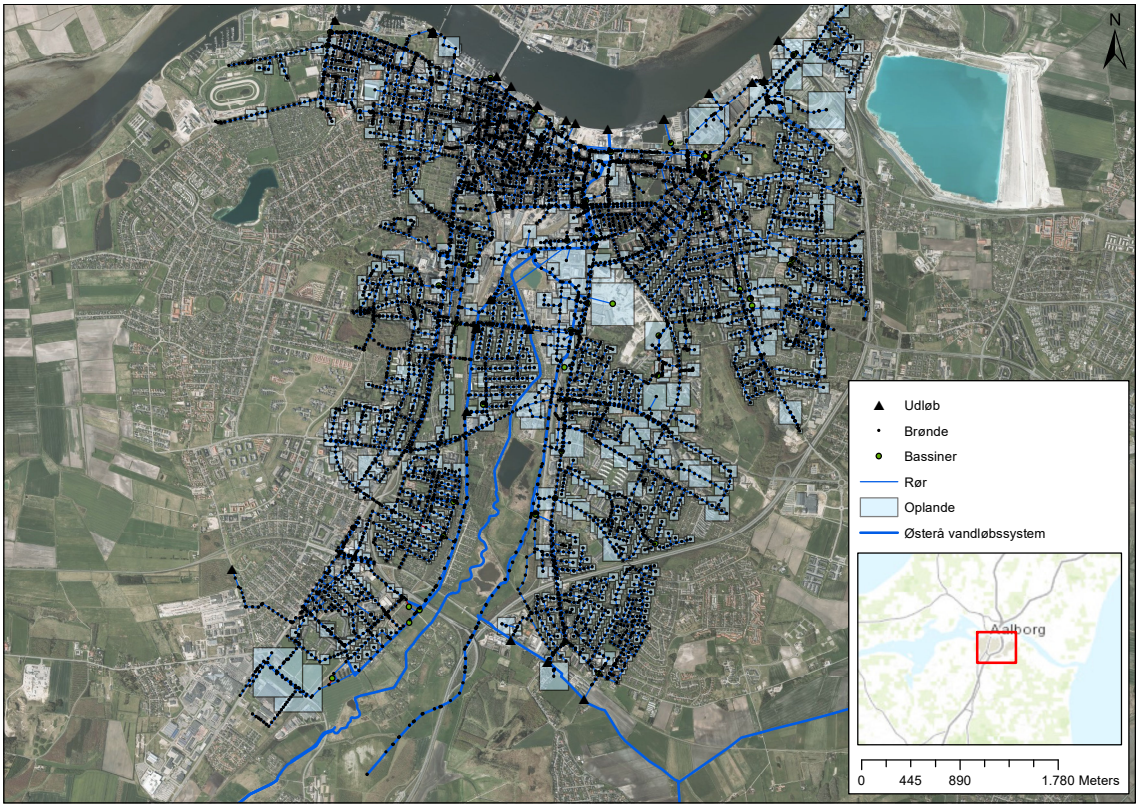
Valget af overflademodel er en vurderingssag. På baggrund af dette projekt kan det anbefales at benytte overflademodel B, for opgaver, der kræver en stor præcision ved kraftige regnhændelser. Ved brugen af overflademodel B bør der bruges kalibreringsdata i form af flowmålinger eller vandstandsdata, da mindre præcise observeringer kan medføre en mindre egnet model.

Opsætning af Vandløbsmodel 4

Til undersøgelse af vandløbenes kapacitet opsættes der en vandløbsmodel, som kan beregne vandstanden i recipienterne Vestre- og Østre Landgrøft samt Østerå. Modellen kalibreres efter målte vandstande i vandløbene.

4.1 Modelopsætning

Til at modellere den nuværende vandstand i Vestre- og Østre Landgrøft samt Østerå bruges en MIKE URBAN-model udleveret af EnviDan. Den udleverede model er opsat med overflademodel A og ses på Figur 4.1.



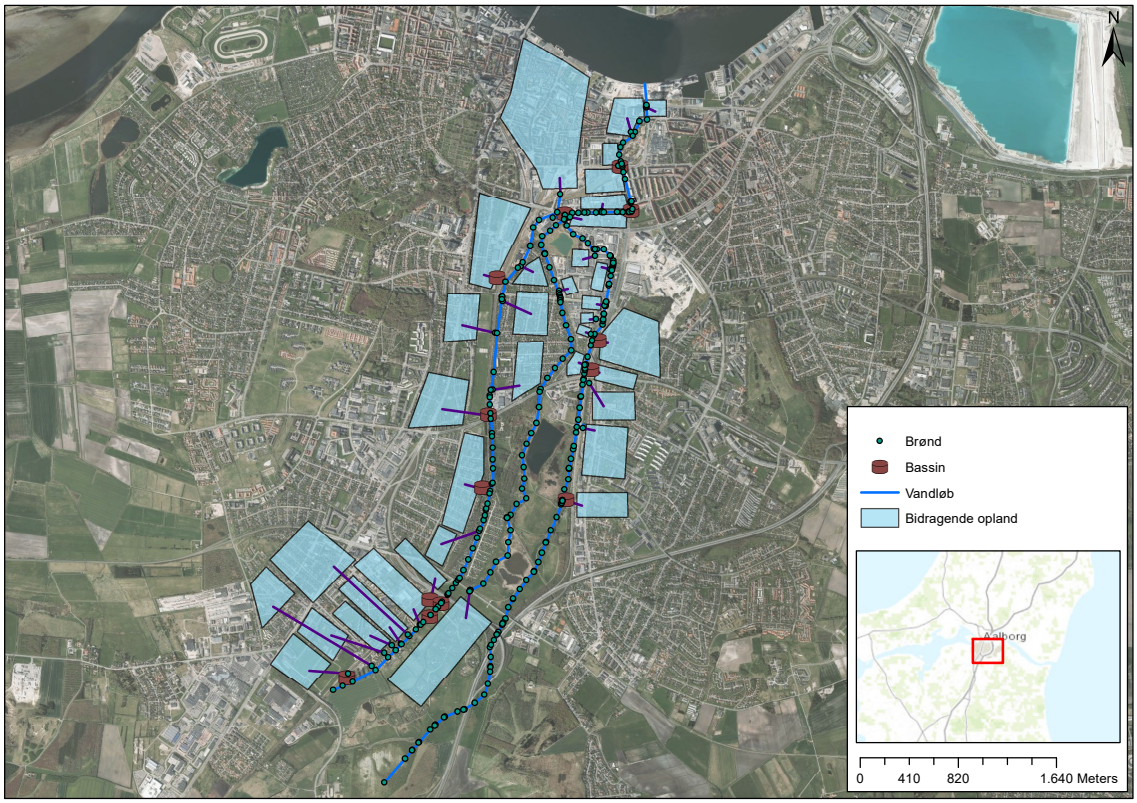
Figur 4.1: Model indeholdende Vestre- og Østre Landgrøft, Østerå samt bidragende oplande. [EnviDan, 2015b]

Modellen indeholder bidragende oplande til vandløbene, der udleder og aflaster regnvand og opspædet spildevand til Vestre- og Østre Landgrøft samt Østerå. Den udleverede

model indeholder kun Østerå nedstrøms sammenløbet med Vestre- og Østre Landgrøft. For at kunne undersøge restkapaciteten i Østerå gennem Kærby, implementeres tværsnitsmålinger af åen i modellen, der blev opmålt i forbindelse med afgangsprojektet Nielsen [2015]. Tværsnittene er opmålt fra Indkildevej til sammenløbet mellem Østerå og landgrøfterne, der fremgår af Figur 4.3. De rørlagte strækninger af recipienterne er beskrevet som lukkede kanaler i MIKE URBAN, hvor de åbne strækninger af recipienterne er beskrevet som åbne kanaler. Både de åbne og lukkede kanaler er beskrevet med *CRS* profiler i MIKE URBAN. *CRS* profilerne beskriver tværsnittet af hver enkelt ledning.

Grundet den udleverede models kompleksitet vil en kalibrering være yderst tidskrævende, hvorfor modellen simplificeres og derefter kalibreres. Derfor vil der forekomme en hvis usikkerhed i forhold til de modellerede resultater.

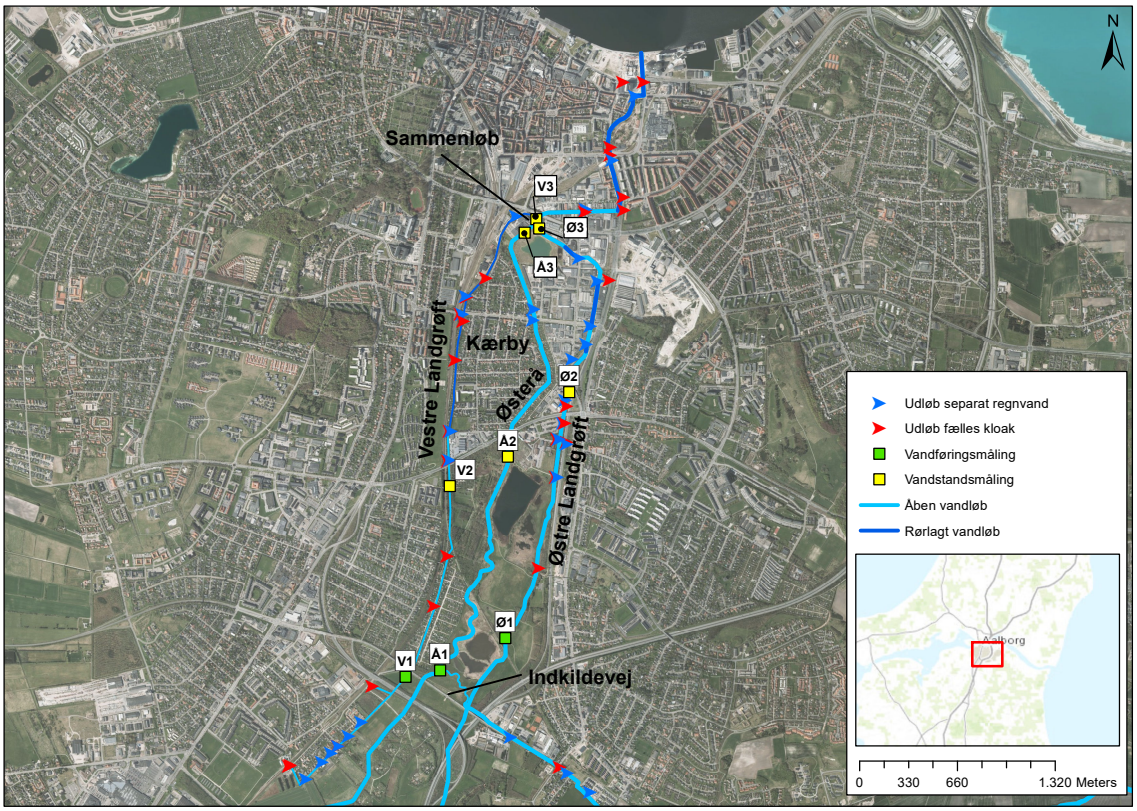
Modellen, der ses på Figur 4.1 simplificeres for at reducere simuleringstiden. Modellens detaljeringsgrad reduceres ved at fjerne kloaksystemet og samtlige oplande, hvorved det kun er Østerå samt Vestre- og Østre Landgrøft der er tilbage i modellen. For at medtage vand fra separat- og fælleskloakerede oplande, tilføjes der et opland til hvert enkelt udløb. Data for hvert enkelt overløbsbygværk og separate regnvandsudløb, herunder befæstet areal, bassinvolumen og videreførende rørkapacitet, fremgår af Aalborg Kommune [2016]. På Figur 4.2 ses den simplificerede model. Den anvendte MIKE URBAN-model over Østerå vandløbssystem er vedlagt på Elektronisk Bilag K.4.



Figur 4.2: Simplificeret model indeholdende Østerå, Vestre- og Østre Landgrøft samt tilhørende oplande.

4.1.1 Observerede data

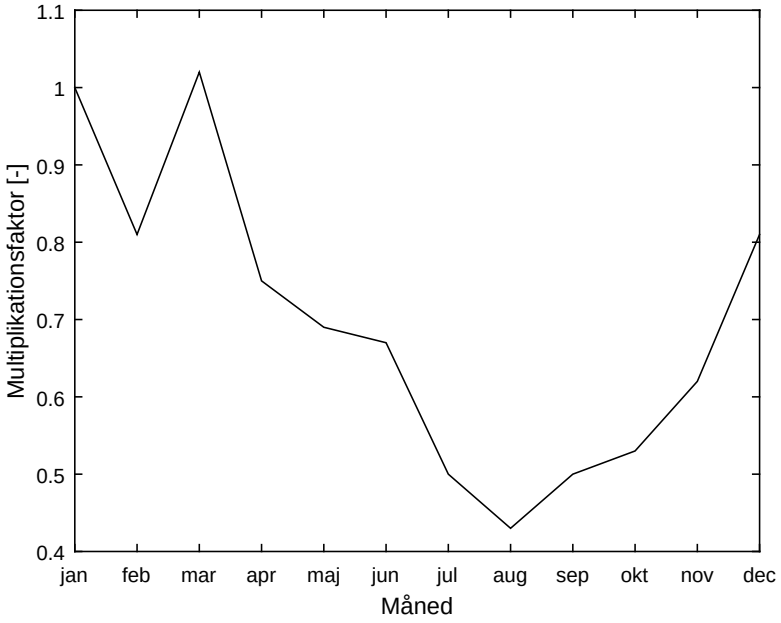
Til modellering af recipienterne gøres der brug af flowmålinger som den øvre randbetingelse. Flowmålingerne er foretaget i Østerå og landgrøfterne i forbindelse med afgangsprojektet Nielsen [2015]. Målingerne er foretaget under tørvejr d. 1-12-2014 og d. 19-01-2015, hvor lokationerne for flowmålingerne er vist på Figur 4.3. Der anvendes en middelværdi af målingerne som øvre vandføringsrandbetingelse i januar måned for Vestre- og Østre Landgrøft samt Østerå.



Figur 4.3: Østerå vandløbssystem, udløb fra kloakerede oplande og målestationer. [Aalborg Kommune, 2016] og [Nielsen, 2015]

4.1.2 Randbetingelser

Vandføringen i vandløbene forventes at have en årlig variation, hvorfor den øvre rand er gjort varierende på baggrund af flowmålinger foretaget af daværende Nordjyllands Amt i Østerå. Dette gøres ved at tilføje et mønster, der karakteriserer forholdet mellem vandføringen i januar måned og de resterende måneder. På Figur 4.4 ses årstidsvariationen for Østerå, der er bestemt på baggrund af flowmålinger for perioden 01-01-2005 til 31-12-2005. [Nordjyllands Amt, 2006]



Figur 4.4: Multiplikationsfaktor for vandføringen afhængig af årstiden.

Multiplikationsfaktoren skal ganges med vandføringen i januar måned 2015, hvorfor multiplikationsfaktoren for januar er 1. Det antages at variationen i Østerå også er gældende for Vestre- og Østre Landgrøft. Vandføringen i de tre recipienter i januar måned fremgår af Tabel 4.1.

Recipient	**Flow** $[m^3\,s^{-1}]$	**Målestation** [-]
Østerå	0,935	Å1
Vestre Landgrøft	0,015	V1
Østre Landgrøft	0,055	Ø1

Tabel 4.1: Flow i de tre recipienter i januar måned 2015 uden påvirkning fra regnbetingede udledninger. Placeringen af målestationerne er vist på Figur 4.3.

Den nedre rand for modellen er vandstanden i Limfjorden ved udløbet af Østerå. Vandstanden i Limfjorden, som er afhængig af tidevand og vindretning, er fastsat til 0,5 m som værende det bedste bud på en kritisk middelvandstand i Limfjorden ved udløbet fra Østerå. [Danmarks Meterologiske Institut, 2016a]

4.2 Kalibrering af vandløbsmodel

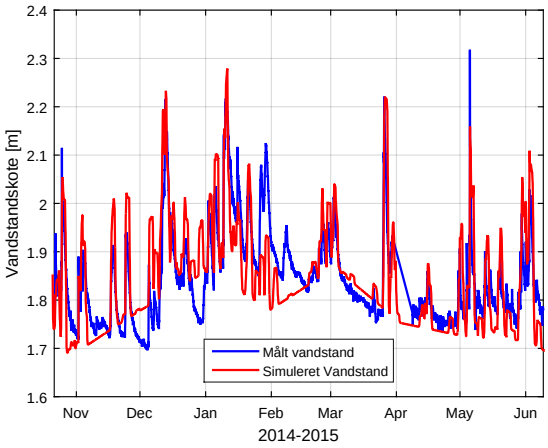
Vandløbsmodellen er kalibreret manuelt efter loggede vandstande i vandløbene, som er foretaget i forbindelse med afgangsprojektet Nielsen [2015]. Vandstandsmålingerne er udført i perioden 21-10-2014 til 09-06-2015 for Vestre Landgrøft og i perioden 07-10-2015 til 21-01-2015 for Østre Landgrøft og Østerå. Regnserien der er brugt til kalibreringen er målt af Svenstrup-regnmåleren der har en samlet længde på 28,9 år.

4.2.1 Kalibreringsparametre

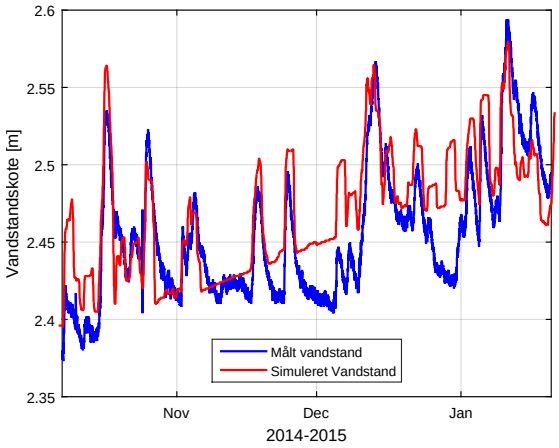
Kalibreringsparametrene for vandløbsmodellen er Manningtallet, koncentrationstiden og det befæstede areal. Manningtallet er brugt til at kalibrere vandstanden i recipienterne under tørvejr. Efterfølgende er modellen kalibreret efter de peaks i vandstanden, der er skabt af de regnbetingede udledninger, ved at justere på de befæstede arealer og koncentrationstiden for disse. Modellen er kalibreret for perioden 01-01-2015 til 31-01-2015.

4.2.2 Kalibreringsresultater

De simulerede vandstande sammenlignet med de målte vandstande fremgår af Figur 4.5 og 4.6 for punkt V3 i Vestre Landgrøft og Å3 i Østerå. Lokalitet for vandstandsmålingerne fremgår af Figur 4.3.



Figur 4.5: Kalibreringsresultat for punkt V3 i Vestre Landgrøft.



Figur 4.6: Kalibreringsresultat for punkt Å3 i Østerå.

Kalibreringsresultaterne for punkt V2, Ø2, Ø3 og Å3 er vist i Bilag H.

På Figur 4.5 og 4.6 ses det, at der forekommer mindre variationer mellem den målte og den simulerede vandstand over måleperioden. Dog er der et godt fit mellem peak-værdierne for den målte og simulerede vandstand, hvilket er det vigtigste, da formålet er at simulere kritiske vandstandskoter, der kan resultere i oversvømmelser. Det ses endvidere, at den simulerede vandstandskote under tørvejr er højere end den simulerede i november og december måned. Dette skyldes højst sandsynligt at variationen, som er benyttet for den øvre rand, er udarbejdet på baggrund af flowmålinger i 2005, hvor de målte værdier, der sammenlignes med, er fra 2014 og 2015.

4.3 Modelusikkerheder

Vandløbsmodellen er en stærkt simplificeret model, hvor oplandene til de regnbetingede udløb, er reduceret til et enkelt opland for hvert udløb. Dermed kan variationer i tidspunktet for udledningen fra de regnbetingede udløb ikke simuleres. Simplificeringen har gjort det muligt at kalibrere vandløbsmodellen efter målte vandstande med en

betydelig lavere simuleringstid, hvor der er opnået en høj sammenlignelighed mellem målte og simulerede vandstande. Derfor vurderes det at den simplificerede kalibrerede vandløbsmodel er den bedst egnede med henblik på simulering af vandstande, som er formålet med modellen.

Årsvariationen for den øvre rand, der er udarbejdet på baggrund af målinger fra 2005, er forskellig fra de målte vandstandsdata i 2015 som det ses på Figur 4.5 og 4.6. Det vurderes, at variationen på maksimalt fem centimeter er acceptabel, da det er peak-værdierne, der målet med vandløbsmodellen.

Effekten af den nedre randbetingelse er undersøgt senere i Afsnit 7.3 i forbindelse med fremtidige havvandstandsstigninger i Limfjorden.

4.4 Delkonklusion

Det vurderes, at vandløbsmodellen er i stand til at beregne forholdsvis præcise vandstande i recipienterne. Især de simulerede peak-værdier har en god sammenlignelig med de målte peak-værdier. Dermed kan vandløbsmodellen simulere kritiske vandstandskoter i recipienterne som resultat af regnbetingede udløb, med det formål at bestemme oversvømmelsestruede strækninger for recipienterne og gentagelsesperioder for opstuvning til terræn.

Analyse af nuværende forhold i Kærby 5

Formålet med analysen er at undersøge, om Kærbys nuværende afløbssystem lever op til gældende minimumsfunktionskrav ift. opstuvning og udnyttelse af fuldtløbende rørkapacitet. Yderligere beregnes ledningernes forskydningsspænding for at undersøge om afløbssystemet er selvrensende. Derudover sammenlignes beregnede udledningsmængder med Nordjyllands Amts beregninger som områdets udledningstilladelser er givet på baggrund af i år 2004. Det samlede årlige overløbsvolumen ønskes også beregnet. Ved hjælp af vandløbsmodellen undersøges gentagelsesperioden for opstuvning til terræn i Østerå og Vestre Landgrøft. På baggrund af beregningen, vurderes restkapaciteten i vandløbssystemet.

5.1 Funktionskrav til afløbssystemer

Minimumsfunktionskravene for afløbssystemer er defineret i Spildevandskomiteens Skrift 27, *Funktionspraksis for afløbssystemer* og fremgår af Tabel 5.1. Minimumsfunktionskravene er defineret som en gentagelsesperiode for opstuvning til kritisk kote. Det skal bemærkes, at det er den virkelig oplevede opstuvningshændelse, som afgør, om afløbssystemet overholder gældende funktionskrav. Værdierne for udnyttelse af fuldtløbende rørkapacitet er anbefalede værdier for dimensionering ved beregningsniveau 1 (Dimensioneringsmetode for mindre afløbssystemer). [IDA Spildevandskomiteen, 2005]

	Gentagelsesperiode [år]	
Arealanvendelse	**Opstuvning til terræn**	**Fuldtløbende rør**
Fælleskloakerede bolig- og erhvervsområder	10	2
Separatkloakerede bolig- og erhvervsområder	5	1

Tabel 5.1: Minimumsfunktionskrav som tilladelig gentagelsesperiode er angivet i år og anbefalet værdi for udnyttelse af fuldtløbende rørkapacitet. [IDA Spildevandskomiteen, 2005]

Foruden serviceniveau stilles der krav til, at afløbssystemet er selvrensende, for at hindre at det stopper til. Selvrensningsevnen vurderes på baggrund af ledningens forskydningsspænding. I nærværende projekt undersøges Kærbys nuværende afløbssystems

selvrensningsevne. Kriteriet for selvrensning er for indeværende projekt fastsat til en forskydningsspænding på 1,5 $\mathrm{N\,m^{-2}}$. [Vollertsen og Thorndahl, 2012]

5.2 Maksimale tilladelige udledningsmængder

På nuværende tidspunkt er der fra Kærby tre udløb fra overløbsbygværker forbundet til det fælleskloakerede opland og tre overfladevandsudløb. Udløbene fra fællessystemet, U0.1.48, U0.1.49 og U0.1.50, aflaster til Vestre Landgrøft. Det samme gør sig gældende for overfladevandsudløb U0.1.48b. Udløbene U0.1.48 og U0.1.48a har fysisk samme udløb til Vestre Landgrøft, men der er givet separate udledningstilladelser. En tilladelse for det opspædede spildevand og en tilladelse for det separate regnvand, som er tilkoblet afløbssystemet nedstrøms overløbsbygværket i Enggårdsgade. Overfladevand fra den østlige del af Ny Kærvej afledes via udløb U0.1.51 til Østerå. Udløbene fremgår af Figur 1.2 på side 5. De maksimalt tilladelige udledningsmængder for de førnævnte udløb fremgår af Tabel 5.2.

Udløbsnr. / Kloakeringstype	**Recipient**	**Oplandsareal (bef.)** [ha]	**Maks. udledning** [$\mathrm{l\,s^{-1}}$]
U0.1.48a / S	Vestre Landgrøft	3,6	400
U0.1.48b / S	Vestre Landgrøft	2,0	220
U0.1.48 / F	Vestre Landgrøft	6,4	670
U0.1.49 / F	Vestre Landgrøft	7,1	370
U0.1.50 / F	Vestre Landgrøft	2,2	105
U0.1.51 / S	Østerå	0,9	100

Tabel 5.2: Maksimale udledningstilladelser og skønnede befæstede arealer for udløbene fra Kærby fastsat af daværende Nordjyllands Amt. Kloakeringsstype: S=Separat regnvandsudløb, F=Udløb fra fælleskloak. [Nordjyllands Amt, 2004]

De maksimale udledninger for separate regnvandsudledninger er teoretisk beregnet på baggrund af en regnintensitet på 110 $\mathrm{l\,s^{-1}ha^{-1}}$ svarende til en 10 minutters regn med en gentagelsesperiode på et år, og for udløb fra fælleskloakerede oplande er udledningen givet på baggrund af en SAMBA-beregning. Vandføringerne er ikke et gældende krav, men er blot en vejledende værdi for niveauet for udledningerne. [Nordjyllands Amt, 2004]

5.3 Modelberegninger

Der gøres brug af MOUSE-modulet *Long Term Statistics* (LTS) til at beregne gentagelsesperioder for udnyttelse af fuldtløbende rørkapacitet, opstuvning til terræn og til at undersøge, om de beregnede udledninger ligger i samme niveau som udledningstilladelserne.

Joblist kriteriet er fastsat, således at alle nedbørshændelser, der opfylder betingelserne i Tabel 5.3, er medtaget. Start- og stopvandføringen er den samlede afstrømmede vandføring, som regnserien medfører. Start- og stopkriteriet er sat tilstrækkelig lavt, så alle regnhændelser er medtaget.

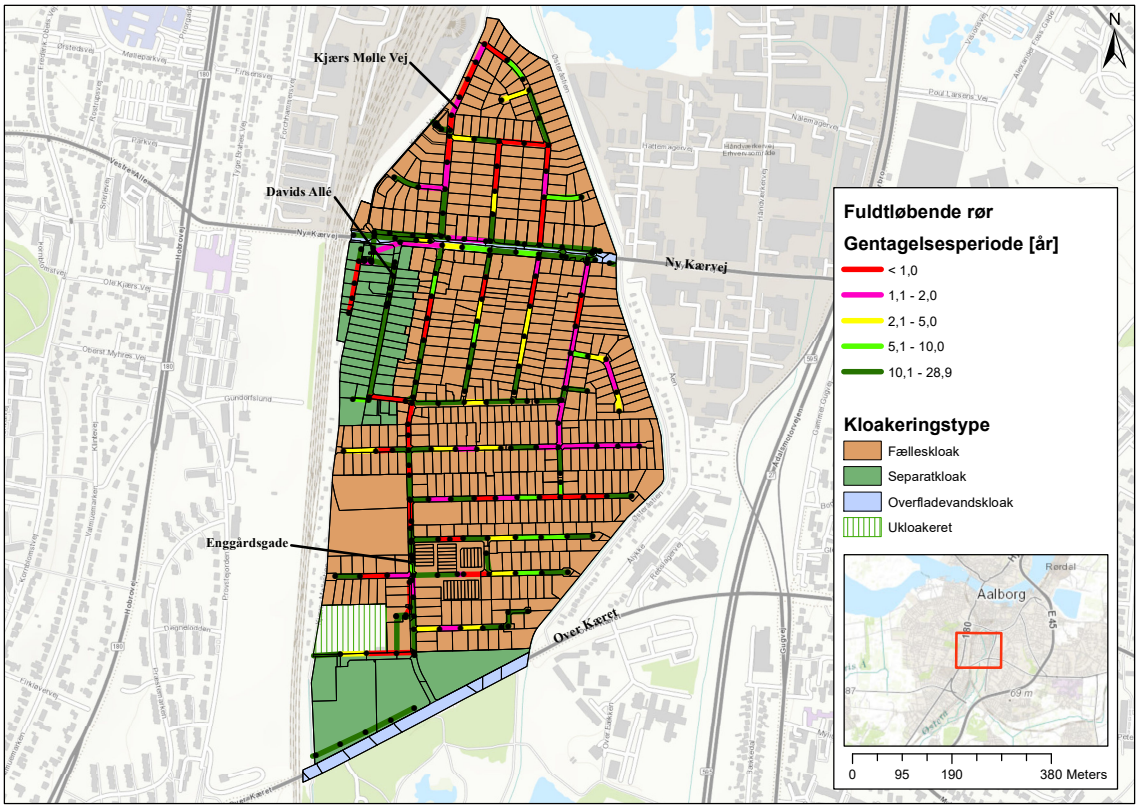
	Vandføring [m3/s]	**Tid** [min]
Start	0,001	1
Stop	0,001	30

Tabel 5.3: Joblist kriterier anvendt til LTS-kørsel.

DMI har defineret, at to regnhændelser adskilles af 60 minutter uden regn jf. Danmarks Meterologiske Institut [2015a], som er implementeret i LTS-beregningen ved at definere den mindste tidsperiode mellem to statistiske resultater for maksimale vandstande, hastigheder og vandføringer. Dette angives i LTS-modulet *Statistics Specification - Global*, hvor tidsperioden er angivet til 60 minutter. Hvis to hændelser sker indenfor 60 minutter, vil kun den største af de to hændelser indgå i de statistiske resultater. [Anne Mikkelsen, 2015]. LTS-beregningen er foretaget ved brug af Svenstrup-regnserien, der har en samlet længde på 28,9-års nedbørsmålinger.

5.4 Udnyttelse af fuldtløbende rørkapacitet

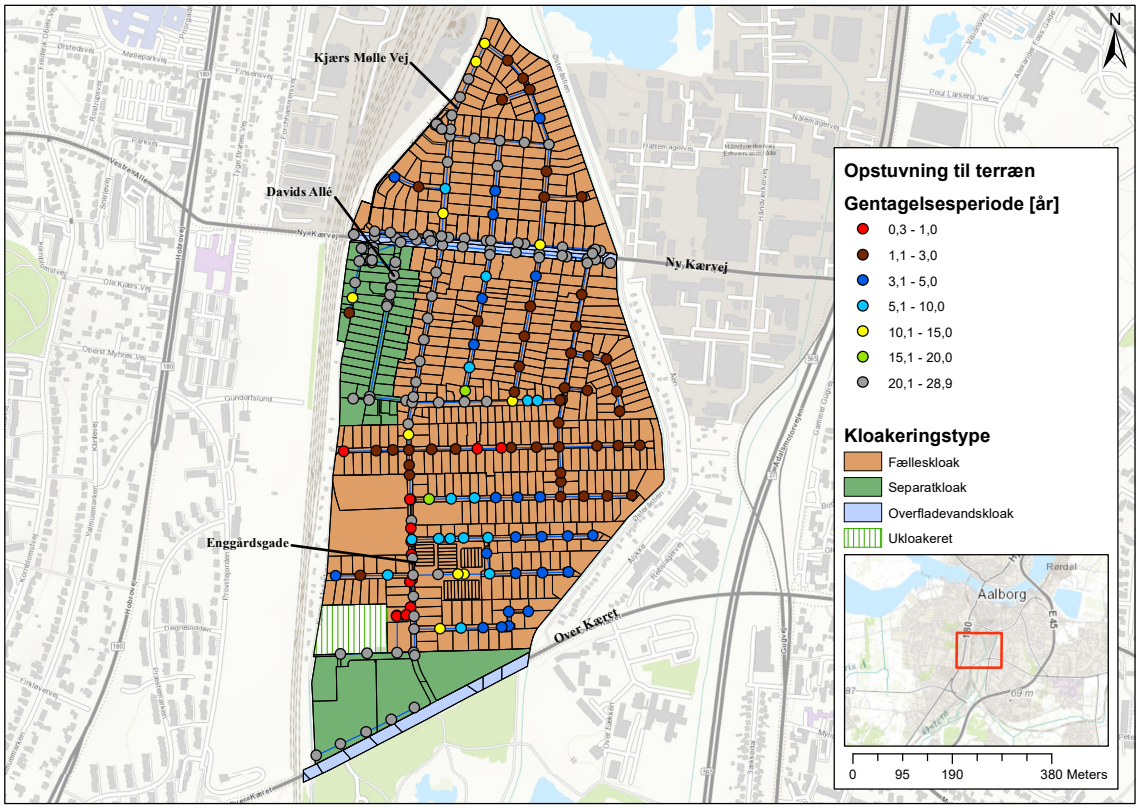
For et fællessystem må der jf. Tabel 5.1 forekomme fuldtløbende rør en gang hvert andet år og for separate regnvandsledninger en gang om året. Som det fremgår af Figur 5.1 ses det, at der flere steder i afløbssystemet forekommer fuldtløbende rør oftere, end hvad nuværende minimumsfunktionskrav tillader. Det er vanskeligt at udpege bestemte dele af afløbssystemet, hvor kapaciteten ikke er tilstrækkelig. I Bilag F fremgår ledningsstrækningernes alder. Der ses ikke nogen entydig sammenhæng mellem ledningsstrækningernes alder og ledningsstrækninger, hvor afløbssytemets funktionkrav ikke er opfyldt. De separatkloakerede dele af afløbssystemet overholder nuværende funktionskrav.



Figur 5.1: Oversigt over gentagelsesperiode for fuld udnyttelse af rørkapacitet.

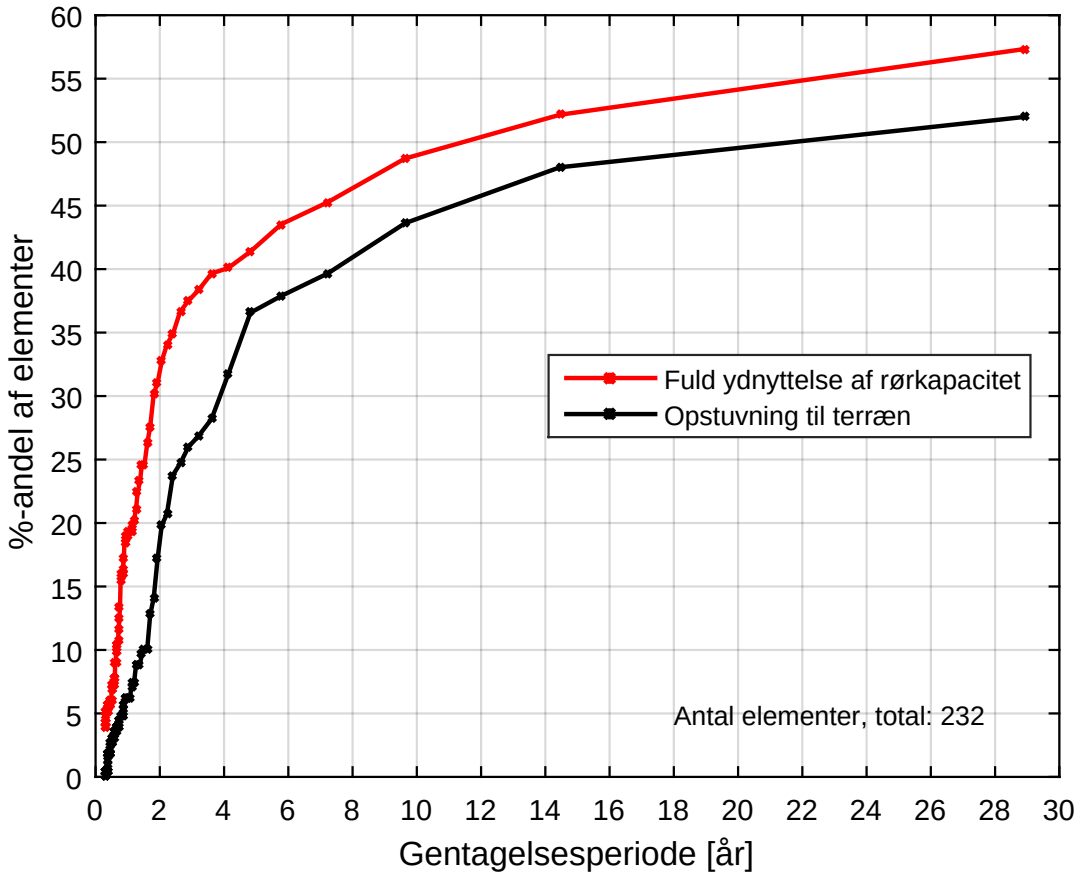
5.5 Opstuvning til terræn

For et fællessystem må der jf. Tabel 5.1 forekomme opstuvning til terræn en gang hvert 10. år, og en gang hvert 5. år for separatkloakerede oplande. Resultatet af opstuvningsberegningen fremgår af Figur 5.2. Beregningen viser, at nuværende krav til serviceniveau langt fra er overholdt i hele afløbssystemet. Værst ser det ud i den sydlige del af Enggårdsgade, hvor der forekommer opstuvning med en gentagelsesperiode <1 år. I den vestlige del af Kærby forekommer der også opstuvning oftere, end funktionskravet tillader. Ved sammenligning med afløbsledningernes alder i Bilag F ses det, at der er en sammenhæng mellem opstuvning og alder. Ledningerne i den sydlige del af Kærby er 50-60 år gamle, hvor opstuvning til terræn forekommer oftest.



Figur 5.2: Oversigt over gentagelsesperiode for opstuvning til terræn.

Figur 5.3 viser fordelingskurven for ledningerne, der er fuldtløbende, og i hvor stor en andel af brøndene, der forekommer opstuvning til terræn ved en given gentagelsesperiode. Det ses, at der ved en gentagelsesperiode på mindre end 2 år er 33 % af ledningerne fuldtløbende. Ved en gentagelsesperiode på mindre end 10 år forekommer der opstuvning i 44 % af brøndene. De separatkloakerede regnvandsledninger er medtaget i statistikken, men de udgør ganske få elementer i den samlede statistik.



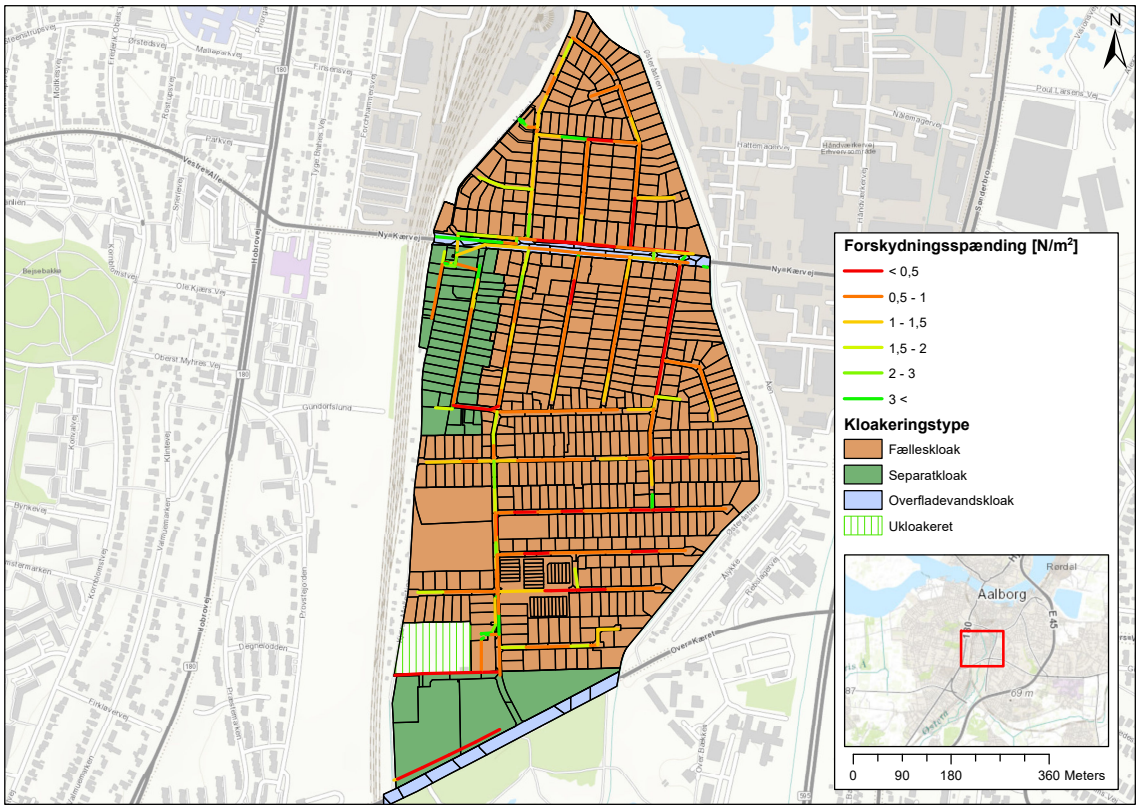
Figur 5.3: Fordelingskurve for brønde med opstuvning til terræn og fuldtløbende ledninger som funktion af gentagelsesperiode.

5.6 Vurdering af afløbssystemets selvrensningsevne

Kærbys nuværende afløbssystems selvrensningsevne vurderes på baggrund af ledningernes bundforskydningsspænding. Da Kærby hovedsageligt er fælleskloakeret med undtagelse af to mindre områder, skal afløbssystemet være selvrensende mindst en gang i døgnet under tørvejr. Tørvejrsvandføringen er koblet på hele Kærby, hvilket omfatter alle separat- og fælleskloakerede oplande. Dette underestimerer forskydningsspændingen og dermed også selvrensningsevnen for de separate regnvandsledninger. For seperate regnvandsledninger bør forskydningsspændingen beregnes på baggrund af vandføringer foresaget af 10 % af en 1-års regn. [Vollertsen og Thorndahl, 2012]

Vandføringen er udtrukket fra en MIKE URBAN beregning i afløbssystemets ledninger under tørvejr, som derefter er multipliceret med en minimums døgnfaktor på 0,6 og en maksimum timefaktor på 1,6. Leif Winther [2011] og Vollertsen og Thorndahl [2012] På Figur 5.4 fremgår de teoretisk beregnede forskydningsspændinger for afløbssystemets ledninger. Som det fremgår af Figur 5.4 overholder størstedelen af afløbssystemet ikke selvrensningskriteriet på minimum $1{,}5\,\mathrm{N\,m^{-2}}$. Blot 27 % af ledningerne overholder kriteriet. På baggrund af dette vurderes afløbssystemets selvrensningsevne som værende af ringe karakter. Det bør dog bemærkes at vurderingen er foretaget på baggrund af en teoretisk beregnet selvrensningsevne. I praksis kan selvrensningsevnen for afløbssystemet

være både af værre og bedre karakter.



Figur 5.4: Ledningsstrækningernes forskydningsspænding.

5.7 Udledning fra overløbsbygværker og separate regnvandsledninger

Maksimale vandføringer fra overløbsbygværker og separate regnvandsudledninger samt et samlet årligt overløbsvolumen er beregnet ved hjælp af MIKE URBAN. Modelresultater er sammenlignet med loggede antal overløb og overløbsvarigheder. Der er i overløbsbygværket i Enggårdsgade, Kjærs Mølle Vej og på Davids Allé opsat SRO-anlæg, der muliggør at måle antallet og varigheden af overløb. En sammenligning mellem SRO-data og MIKE URBAN-resultaterne fremgår af Bilag G for perioden 2010-2014. En beskrivelse af korrigering og vurdering af SRO-data fremgår ligeledes af Bilag G.

5.7.1 Modelopsætning

Ud fra definitionen på overløb om, at der skal være fem timers forudgående periode uden overløb, er LTS-modellen sat op, så der tages højde for dette. Det medtages i MOUSE-LTS modullet *Statistics Specification - Global*, hvor antallet af resultater fra hver hændelse, der ønskes medtaget i MIKE URBAN resultatet kan angives. For akkumulerede værdier såsom overløbsantal og overløbsvarigheder er det mindste tidsinterval angivet til fem timer, hvor der ikke må være en vandføring gennem et udløb. [Anne Mikkelsen, 2015] På denne måde sikres det, at der ikke registreres mere end fem overløb pr. døgn i MIKE URBAN beregningen.

5.7.2 Årlig aflastning fra overløbsbygværker

Resultatet af LTS-beregningen for antal og varighed af overløb er generelt set acceptabelt, dog forekommer der ved nogle af perioderne store afvigelser mellem målte- og beregnede værdier. Det gennemsnitlige antal aflastninger og gennemsnit for overløbsvarighed for perioden 2010-2014 fremgår af Tabel 5.4 for overløbsbygværkerne i Kærby. Alle målte og beregnede værdier for overløb fremgår af Bilag G. På Elektronisk Bilag K.6 er rå- og korrigerede SRO-data vedlagt. Da modellen anses for at give acceptable resultater for overløb, er den endvidere anvendt til beregning af maksimale udledningsmængder for alle udløb til recipienterne, Østerå og Vestre Landgrøft, fra Kærby.

Overløbs-bygværk	**Udløb**	**Overløb, målt**		**Overløb, beregnet**	
		Antal [-]	Varighed [timer]	Volumen [m^3 red. ha^{-1}]	Dybde [mm]
Enggårdsgade	U0.1.48	54	55	1559	156
Davids Allé	U0.1.49	55	228	1662	166
Kjærs Mølle Vej	U0.1.50	22	44	385	39

Tabel 5.4: Gennemsnitlig årlige SRO-målinger for antal og varigheder af overløb samt gennemsnitlig beregnet årlige overløbsvolumener for perioden 2010-2014. [Aalborg Forsyning Kloak A/S, 2010]

Som en del af Aalborg Kommunes vandhandleplan ønskes overløbsvolumenet nedsat til $250\,m^3$ red. ha^{-1} $år^{-1}$. Dette kræver en betydelig reduktion af det aflastede volumen for specielt overløbsbygværket i Enggårdsgade og på Davids Allé. En mulighed, som er foreskrevet i Aalborg Kommunes vandhandleplan, er etablering af 5 mm first flush bassiner med det formål at nedsætte overløbsvolumenet.

5.7.3 Udledningsmængder fra Kærby

Resultaterne af MIKE URBAN beregningen fremgår af Tabel 5.5. Overløbsvandføringen til udløb U0.1.49 og U0.1.50 er udelukkende styret af pumpernes ydelse, da der ikke er koblet nogle oplande på nedstrøms overløbspumperne for henholdsvis Davids Allé og Kjærs Mølle Vej. Det samme er gældende for den separate regnvandsudledning U0.1.51, der også er styret af pumpens ydelse. Det modsatte gør sig gældende for udløb U0.1.48, hvor flere oplande er tilkoblet nedstrøms overløbspumperne i Enggårdsgade. Udløb U0.1.48 aflaster opspædet spildevand fra det fælleskloakerede opland omkring Enggårdsgade, men også en række separatkloakerede oplande er koblet på dette udløb.

Ved at sammenligne de beregnede udledningsmængder med Nordjyllands Amts beregning fra 2004 er udledningerne generelt i samme størrelsesorden. Den største afvigelse forekommer ved udløb U0.1.50 fra det fælleskloakerede opland tilhørende Kjærs Mølle Vej. Her er udledningen knap en faktor fire højere end resultatet af Nordjyllands Amts SAMBA beregning. De nuværende overløbspumper har en samlet maksimal ydelse på $400\,l\,s^{-1}$.

Udløbsnr. / Kloakeringstype	Oplands areal (bef.) [ha]	Beregnet udledning [$l\,s^{-1}$]	Udnyttelse %
U0.1.48 / F	9,81	671	63
U0.1.48b / S	1,11	64	29
U0.1.49 / F	10,81	400	108
U0.1.50 / F	4,53	382	364
U0.1.51 / S	0,50	63	63

Tabel 5.5: Udledningsmængder fra udløb svarende til en gentagelsesperiode på et år og tilhørende befæstede oplandsarealer. Udnyttelsesgraden angiver hvor stor en del de beregnede udledninger udgør af udledningstilladelserne. Kloakeringsstype: S=Separat regnvandsudløb, F=Udløb fra fælleskloak.

Udnyttelsen for U0.1.48 er foretaget på baggrund af summen af tilladelsen fra U0.1.48 og U0.1.48a. Den beregnede udledning med en gentagelsesperiode på et år er fundet ved brug af MOUSE LTS-modulet.

5.8 Vurdering af restkapaciteten i Østerå og Vestre Landgrøft

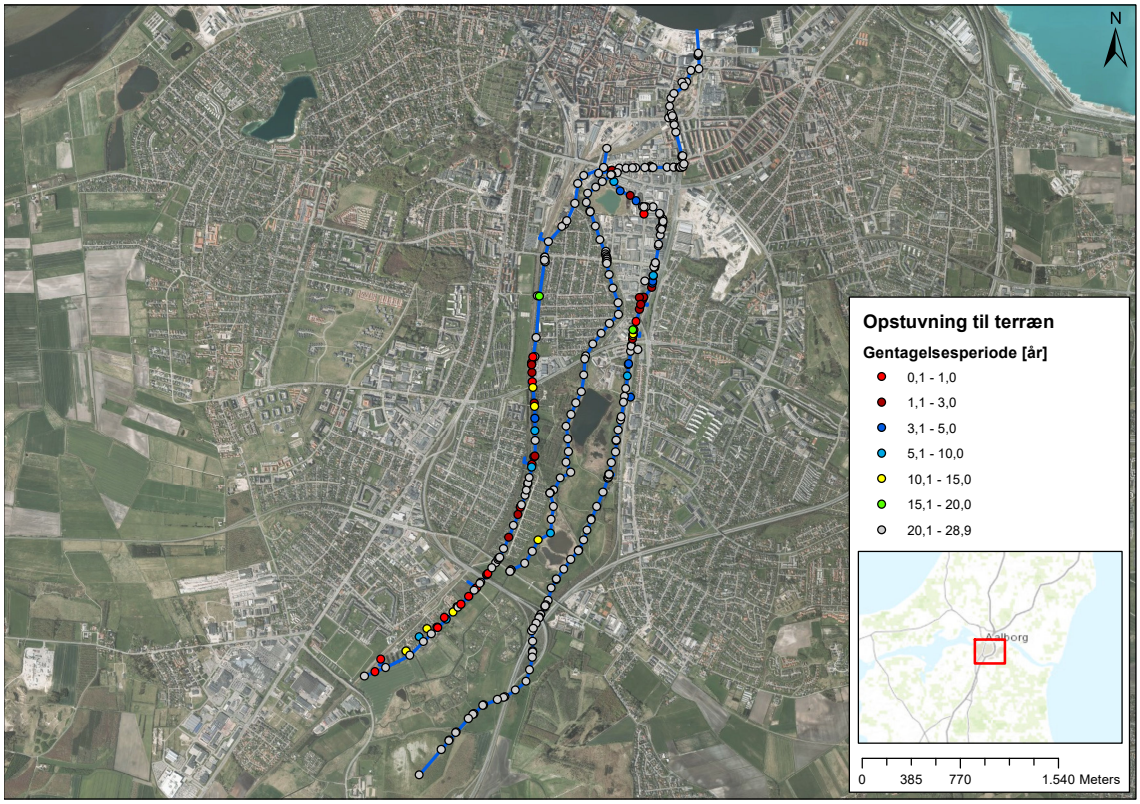
Kærby aflaster fra regnbetingede udløb til recipienterne Østerå og Vestre Landgrøft. Restkapaciteten i de to recipienter er vigtig i forhold til mængden af vand, der kan ledes ud i dem, hvor især Vestre Landgrøft modtager store mængder overløbsvand. Hvis kapaciteten overskrides for de to recipienter kan det resultere i, at de løber over deres breder og skaber oversvømmelser i Kærby. Restkapaciteten i de to recipienter vurderes på baggrund af gentagelsesperioden for opstuvning til terræn.

5.8.1 Modelberegninger

Der gøres brug af MOUSE-modulet LTS til beregning af opstuvning til terræn. Modelberegningerne udføres jf. Afsnit 5.3.

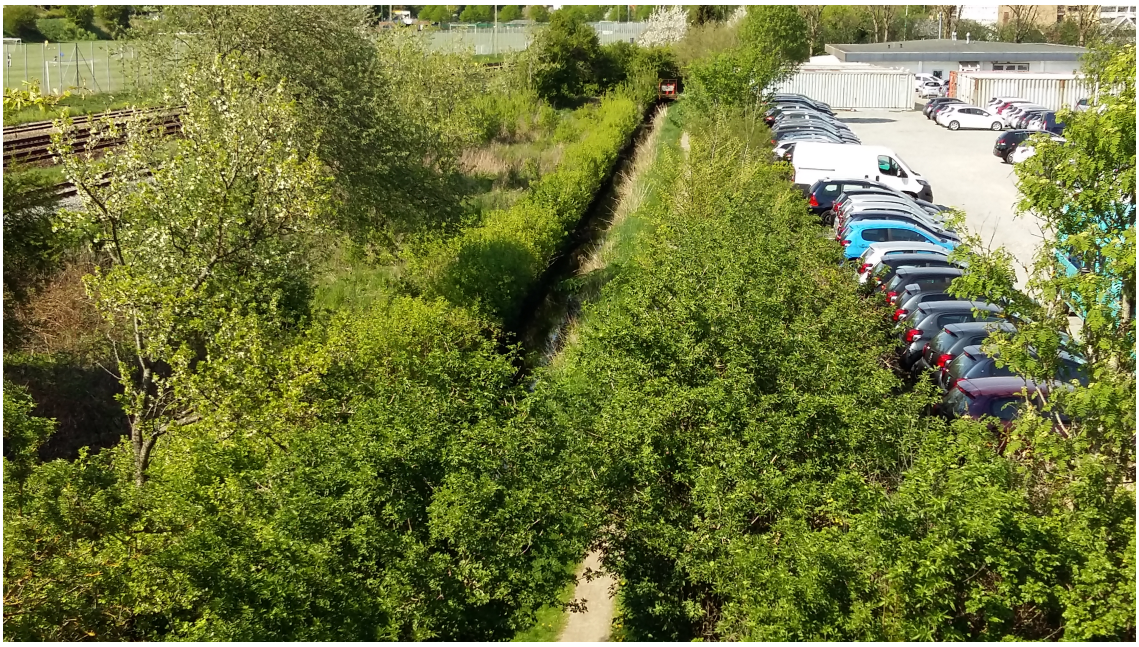
5.8.2 Restkapaciteten i recipienterne

På Figur 5.5 ses hvilke strækninger nær Kærby, hvor der forekommer kapacitetsproblemer i recipienterne.



Figur 5.5: Gentagelsesperiode for opstuvning til terræn for Vestre Landgrøft, Østre Landgrøft og Østerå.

På Figur 5.5 ses det, at kapaciteten for visse strækninger i Vestre- og Østre Landgrøft er utilstrækkelig, hvor oversvømmelser nogle steder forekommer flere gange om året. Østerå har derimod meget få kapacitetsproblemer, hvor der opstrøms Kærby sker opstuvning en gang hvert år eller sjældnere. Konsekvensen af den ringe kapacitet i Vestre Landgrøft i den sydlige del af Kærby vurderes til at være minimal, da det omkringliggende terræn, der bliver berørt består af en grussti som det ses på Figur 5.6.



Figur 5.6: Strækning af Vestre Landgrøft i den sydlige del af Kærby, hvor der er risiko for oversvømmelse. Billedet er taget mod nord fra Over Kæret.

På Figur 5.6 ses områderne som Vestre Landgrøft oversvømmer, når kapaciteten er opbrugt. Øst for grusstien ses en parkeringsplads, der ligger ca. en meter over grusstien, hvorfor denne ikke formodes at blive oversvømmet. Vest for landgrøften ligger et grønt areal mellem Vestre Landgrøft og togbanen. det grønne areal er i niveau med grusstien og kan derfor også forventes at blive oversvømmet, hvorimod togbanen, ligesom parkeringspladsen, ligger ca. en meter over dette niveau og derfor heller ikke forventes at blive oversvømmet.

For Vestre Landgrøft og Østerå sker der en forøgelse af vandføringen, når de regnbetingede udløb tages i brug. Ved en regnhændelse med en 10-års gentagelsesperiode stiger vandføringen i Vestre landgrøft fra 0,015 til 2,55 $\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ og i Østerå fra 0,935 til 2,4 $\mathrm{m^3\,s^{-1}}$. Dermed ses det tydeligt at Vestre Landgrøft er mest påvirket af de regnbetingede udløb hvilket stemmer overens med de mange regnbetingede udløb hertil.

Jf. Afsnit 1.3.2 er vandføring i Vestre Landgrøft og Østerå opgivet til at være henholdsvis 3,8 og 1 $\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ under et skybrud med en 10-års gentagelsesperiode. Vandløbsmodellen er simuleret med Svenstrup-regnserien, der har en måleperiode på 28,9 år. Den tredje største vandføring, der er simuleret, som svarer til en gentagelsesperiode på ca. 10 år, er simuleret til 2,55 $\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ for Vestre Landgrøft og 2,4 $\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ for Østerå på lokation V3 og Å3. De højeste forekommende simulerede vandføringer med en gentagelsesperiode på mindst 28,9 år, er på 3 og 2,75 $\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ for henholdsvis Vestre Landgrøft og Østerå. Uderligere fremgår det af resultaterne, at de simulerede vandføringer fra vandløbsmodellen er underestimeret sammenlignet med de opgivne værdier jf. Aalborg Kommune [b]. Da det ikke vides hvorvidt de opgivne værdier er simulerede eller målte værdier, vurderes det, at de simulerede resultater, som er opnået med vandløbsmodellen, er de mest realistiske værdier.

5.9 Delkonklusion

På baggrund af MIKE URBAN beregningen kan det konkluderes, at afløbssystemet ikke har den fornødne kapacitet, for at nuværende funktionspraksis for afløbssystemer kan opfyldes. Det er udelukkende den fælleskloakerede del af afløbssystemet, hvor problemerne opstår. Op mod 33 % af ledningerne er fuldtløbende oftere end hvert andet år. Resultatet af opstuvningsberegningen viser, at der i 44 % af brøndene forekommer opstuvning til terræn oftere end hvert tiende år. De mest kritiske områder er i den vestlige og sydlige del af Kærby, hvor der forekommer opstuvning oftere end en gang årligt.

Når det kommer til regnbetingede udledninger fra såvel fælleskloakerede oplande som separate regnvandsledninger, ligger disse i samme størrelsesorden som de af Nordjyllands Amt beregnede udledningsmængder, som udledningstilladelserne for området er givet på baggrund af. Kun den beregnede udledning fra U0.1.50 er betydeligt højere, end hvad Nordjyllands Amt har givet tilladelse til i 2004. For at indfri Aalborg Kommunes vandhandleplans mål om bl.a. at nedsætte udledningen fra udløb U0.1.48, U0.149 og U0.1.50, kræver dette en betydelig reduktion af overløbsvand, hvilket undersøges i Kapitel 8.

Med henblik på restkapaciteten i recipienterne er der problemer i Vestre Landgrøft i den sydlige del af Kærby. Oversvømmelser i dette område vurderes dog til at have minimale konsekvenser, da det udsatte område omfatter en grussti og et grønt område.

Del II

Problemanalyse

For at vurdere konsekvensen af det ringe serviceniveau i Kærby, er der udarbejdet en MIKE FLOOD model til at visualisere oversvømmelsesudbredelsen ved opstuvning i kloaksystemet, og ved oversvømmelse fra vandløbene. Yderligere undersøges de fremtidige forhold i afløbssystemet og vandløbene på baggrund af en fremskrivning af en hel regnserie.

Oversvømmelsestruede områder i Kærby 6

For at udpege områder, som er særligt udsatte for oversvømmelse, opsættes en MIKE FLOOD-model for Kærby. Der foretages en MIKE FLOOD beregning for afløbsmodellen og vandløbsmodellen for at undersøge oversvømmelsesudbredelsen og vanddybden fra henholdsvis afløbssystemet og fra recipienterne.

6.1 Modelopsætning

Modellen opsættes ved at loade et overflade- eller terrænkort af typen Digital Elevation Model (DEM), hvorefter det er muligt at generere et 2D-grid med en ønsket opløsning. Det genererede grid sammenkobles med afløbssystemets brønde i den gridcelle, hvor brøndene er placeret. Modelkørslen udføres ved først at køre en *Runoff-simulation* for derefter at køre en *Network-simulation*, hvor *2D overland* modellen medtages. I resultatudvælgelsen kan det bl.a. vælges, om der ønskes middelvanddybder, maksimale vanddybder eller vandhastigheder.

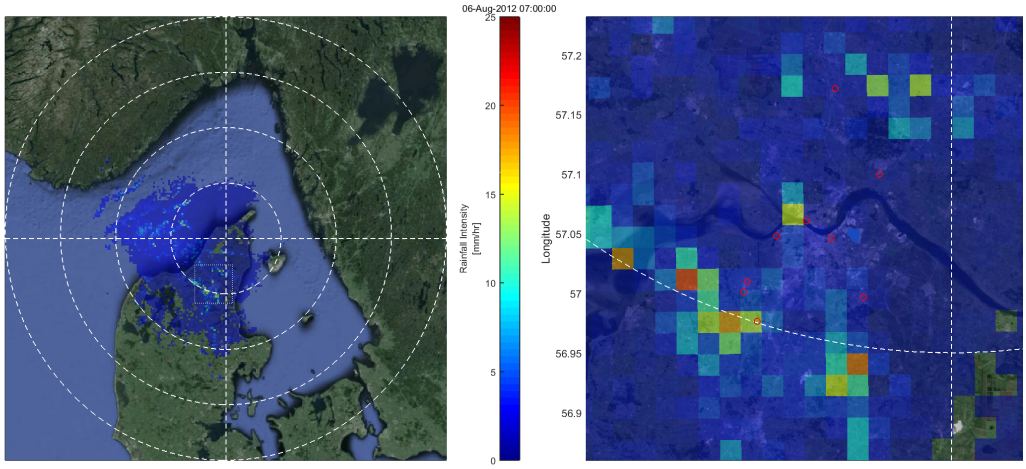
6.2 Simulering af historisk regnhændelse

Til denne simulering er regnhændelsen d. 6. august 2012 udvalgt, da der for denne hændelse er tilgængelige borgerhenvendelser og skadesanmeldelser indberettet for en række adresser i Kærby, som bruges som sammenligningsgrundlag for oversvømmelsesmodellens validitet. Regnhændelsen kan jf. Danmarks Meterologiske Institut [2015b] karakteriseres som en skybrudshændelse, da der er registreret en nedbørsintensitet på 15 mm eller derover på 30 min eller derunder i regnmålere i eller nær Aalborg. Som det fremgår af Tabel 6.1, er der i tre ud af seks regnmålere i eller nær Aalborg registreret en maksimal regndybde indenfor 30 min på over 15 mm.

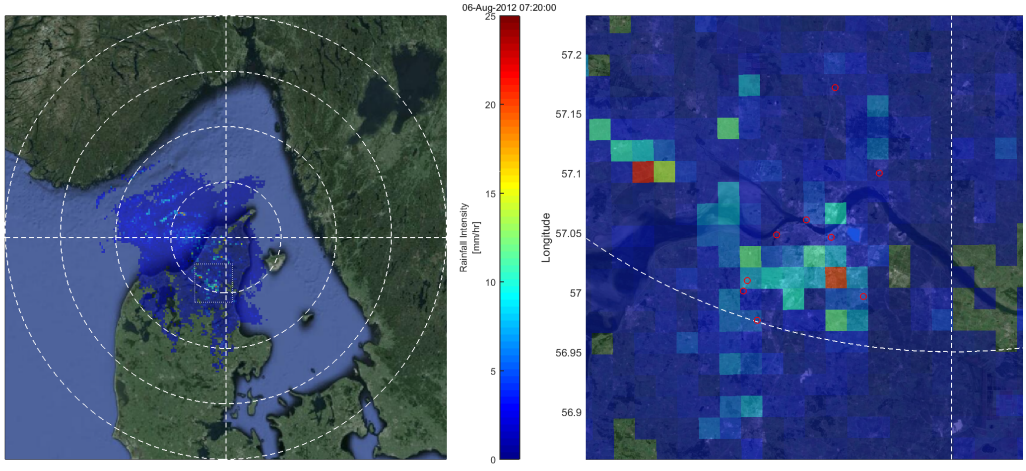
Lokalitet	**Frejlev Syd**	**Østerport**	**Søvangen**
Varighed [min]	263	212	252
Dybde, total [mm]	35,4	40,4	45,8
Maks. dybde, 30 min [mm]	15,8	17,3	29,0
Lokalitet	**Gistrup**	**Renseanlæg Vest**	**Svenstrup**
Varighed [min]	252	251	269
Dybde, total [mm]	19,6	30,2	33,4
Maks. dybde, 30 min [mm]	6,8	11,1	11,2

Tabel 6.1: Nedbørsmængder og varigheder for regnhændelsen d. 6. august 2012 for udvalgte SVK-målere i Aalborg området. [Spildevandskomiteen, 2015]

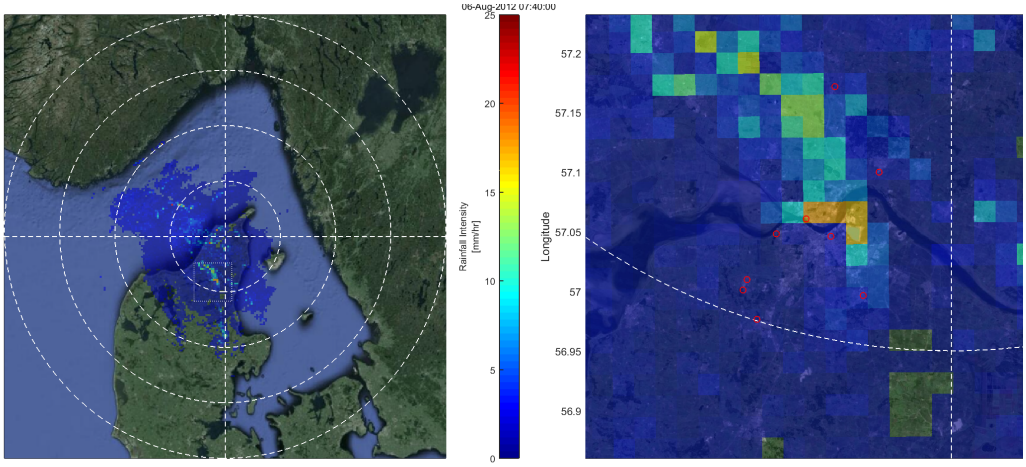
Radarbilleder fra Aalborg Universitets vejrradar på Sohngårdsholmsvej 57 9000 Aalborg fremgår af Figur 6.1, 6.2 og 6.3 fra 07:00 d. 6. august 2012. Retningen for nedbøren er fra syd og drejer mod Nordnordvest og dækker stort set hele Aalborg.



Figur 6.1: Radarbillede 07:00 06-08-2012 over Aalborg. Regnintensitet i mm/time. Røde cirkler viser placering af regnmålere. [Aalborg Universitet, 2016]



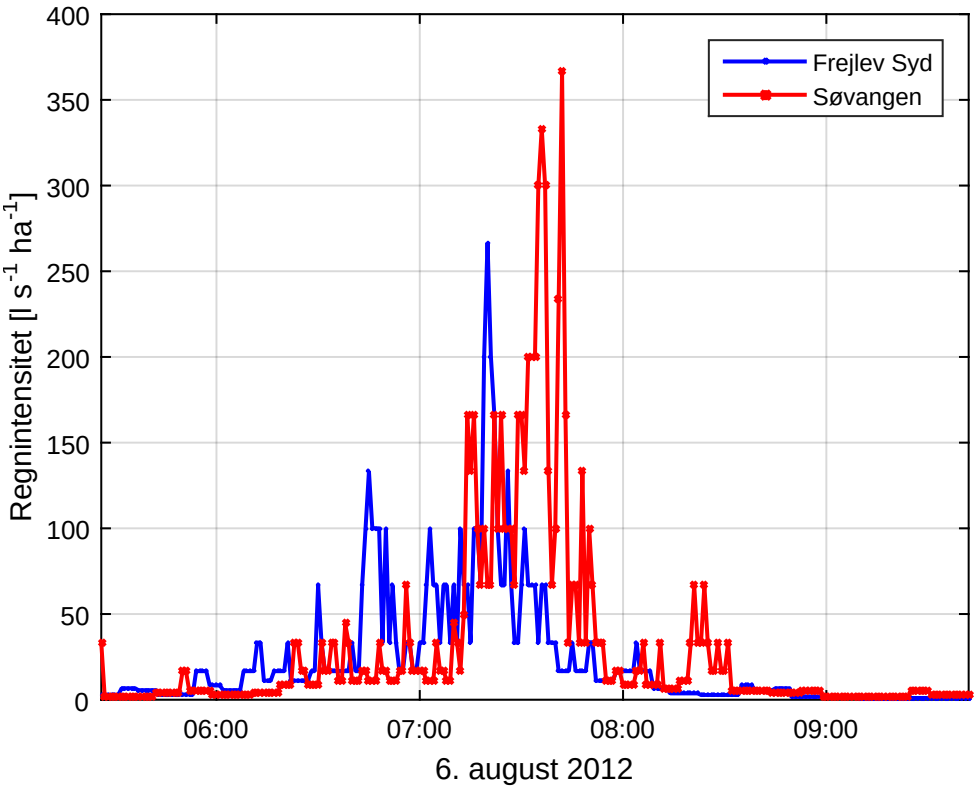
Figur 6.2: Radarbillede 07:20 06-08-2012 over Aalborg. Regnintensitet i mm/time. Røde cirkler viser placering af regnmålere. [Aalborg Universitet, 2016]



Figur 6.3: Radarbillede 07:40 06-08-2012 over Aalborg. Regnintensitet i mm/time. Røde cirkler viser placering af regnmålere. [Aalborg Universitet, 2016]

Radarbillederne på Figur 6.1, 6.2 og 6.3 viser, at der forekommer høje intensiteter i og omkring Aalborg ved samme periode som regnserien på Figur 6.4. Til tiden 07:20 viser radarbilledet på Figur 6.2, at der forekommer nedbør med høj intensitet over Kærby. Derudover viser radarbillederne også, at der forekommer stor variation i nedbørs intensiteten i området, hvilket forklarer de varierende målinger vist i Tabel 6.1. Resterende radarbilleder fra d. 6. august 2012 i tidsrummet 05:00 til 16:00 er vist i E-Bilag K.7.

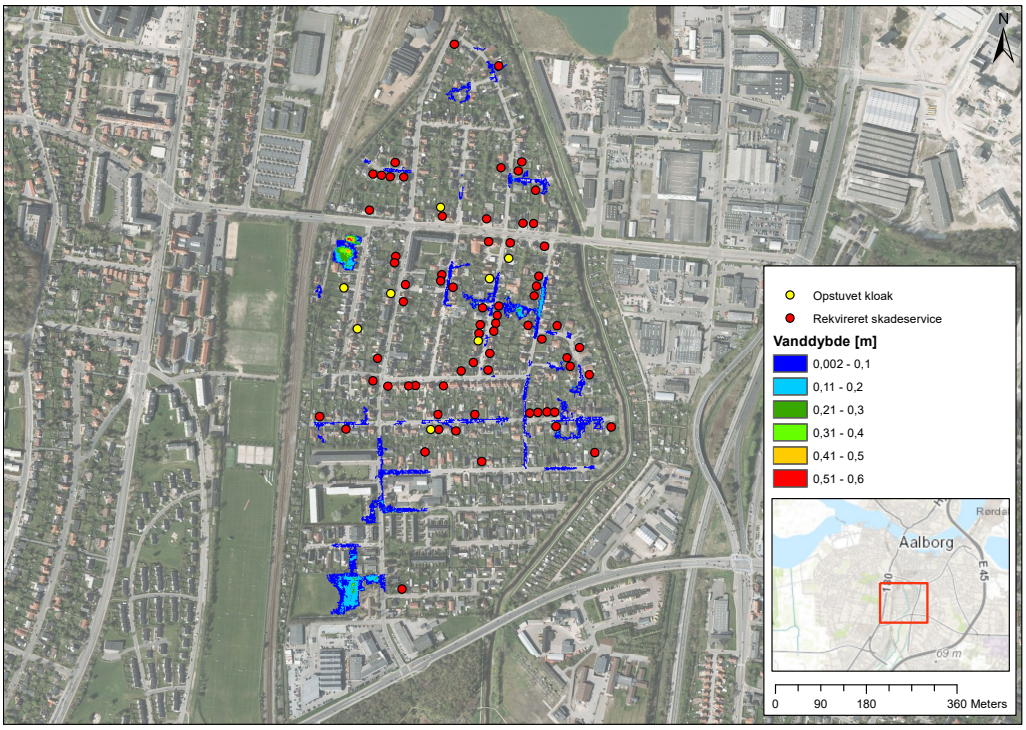
På baggrund af radarbillederne er regnserien målt af Frejlev Syd-regnmåleren udvalgt til simuleringen af oversvømmelsen i Kærby. Foruden regnserien fra regnmåleren Frejlev Syd bruges regnserien fra regnmåleren Søvangen til at simulere en kraftigere regnhændelse. Regnintensiteten for regnhændelserne registreret af Frejlev Syd-regnmåleren og Søvangen-regnmåleren fremgår af Figur 6.4. De maksimale regnintensiteter målt i Frejlev Syd-regnmåleren for varigheder på 10, 30, 60 og 180 minutter var for hændelsen henholdsvis 137, 88, 70 og 32 $\mathrm{l\,s^{-1}\,ha^{-1}}$ svarende til gentagelsesperioder på 1,8, 4, 11 og 10 år. De maksimale regnintensiteter målt i Søvangen-regnmåleren for de samme varigheder var henholdsvis 223, 158, 97 og 41 $\mathrm{l\,s^{-1}\,ha^{-1}}$ svarende til gentagelsesperioder på 12,3, 33,5, 37 og 19 år. Gentagelsesperioderne er beregnet på baggrund af IDA Spildevandskomiteen [2014].



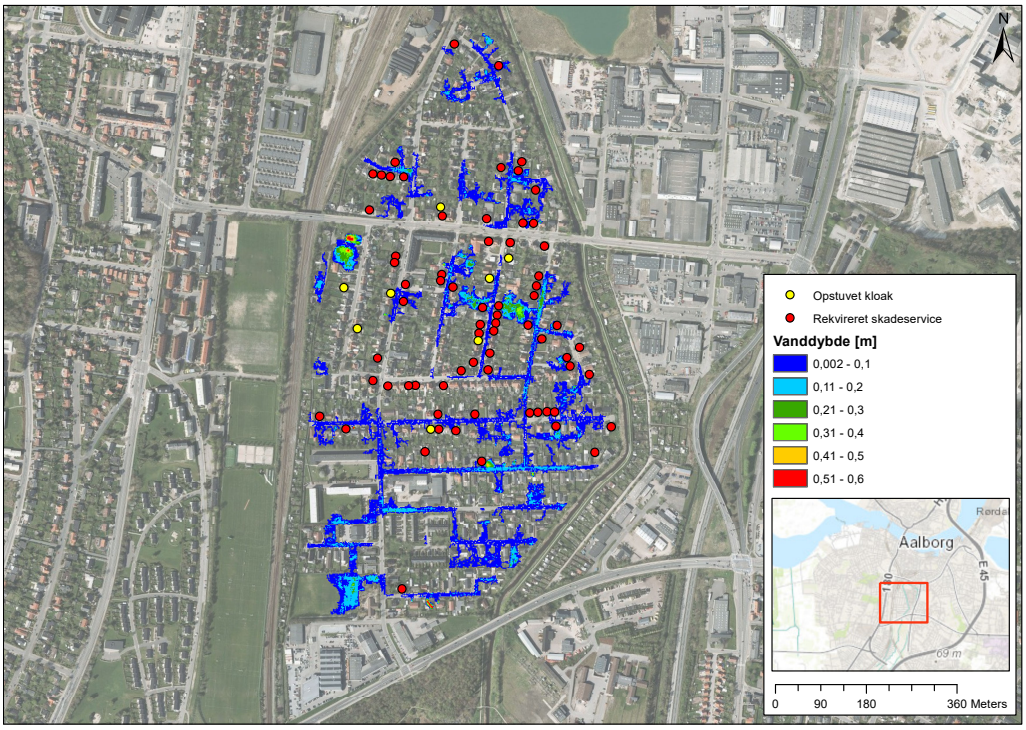
Figur 6.4: Regnhændelsen d. 6. august 2012 registreret ved SVK-regnmålerne 20304 Frejlev Syd og 20309 Søvangen nær Aalborg. [Spildevandskomiteen, 2016]

6.3 Oversvømmelsesudbredelse

2D-modellen er kørt i MIKE URBAN for at simulere oversvømmelsesudbredelsen. Oversvømmelsesudbredelsen er sammenlignet med skadesanmeldelser indberettet i forbindelse med regnhændelsen. I simuleringen er der gjort brug af en *Digital Terræn Model* med en horisontal opløsning på 1,6 m og en vertikal opløsning på 0,01 m. Terrænmodellen består af en rasterfil med højder på overfladen af terræn, hvor bygninger, vegetation og biler er fjernet fra modellen. [Geodatastyrelsen, 2015a] På Figur 6.5 og 6.6 fremgår den simulerede oversvømmelsesudbredelse og borgerhenvendelser vedrørende stuvnings- og afledningsmæssige problemer samt lokaliteter, hvor der er rekvireret skadeservice. Modellen er simuleret med regndata fra Frejlev Syd-regnmåleren. Til sammenligning er der foretaget modelkørsler ved brug af nedbørsdata fra Søvangen-regnmåleren i Nørresundby. Ved brug af regnserien fra Søvangen var oversvømmelsesudbredelsen for stor sammenlignet med borgerhenvendelser og skadesanmeldelser indberettet i forbindelse med regnhændelsen. Borgerhenvendelser og skadesanmeldelser kan være for opstuvning i kældre, hvorfor der ikke nødvendigvis forekommer vand på terræn. Placeringen af de omtalte regnmålere fremgår af Figur 3.2 på side 18. Det ses, at den simulerede oversvømmelsesudbredelse stemmer nogenlunde overens med de gader, hvor der er registreret vandskader eller opstuvede kloaker. De maksimale beregnede oversvømmelsesudbredelser og vanddybder fremgår af Tabel 6.2 ved brug af forskellige regnmålere og forskellige gentagelsesperioder for CDS-regn.



Figur 6.5: Resultat af MIKE FLOOD beregning med Frejlev Syd-regnserien d. 6. august 2012 og borgerhenvendelser indberettet i forbindelse med hændelsen. [Geodatastyrelsen, 2015a], [EnviDan, 2012]

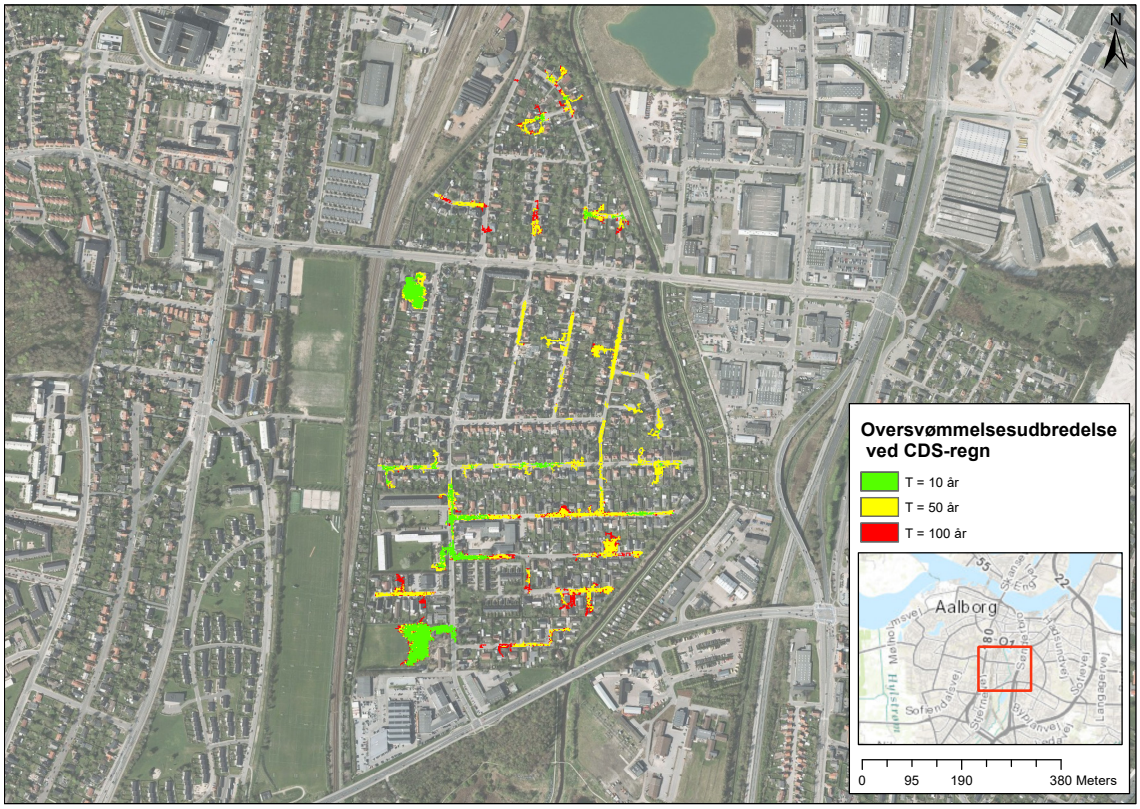


Figur 6.6: Resultat af MIKE FLOOD beregning med Søvangen-regnserie for d. 6. august 2012 og borgerhenvendelser indberettet i forbindelse med hændelsen. [Geodatastyrelsen, 2015a], [EnviDan, 2012]

Resultatet af beregningen på Figur 6.5 viser, at store dele af vejarealerne i den centrale- og sydlige del af Kærby oversvømmes under denne hændelse. Flere steder i den østlige del af Kærby står vandet ind over parcelhusgrundene som værende det mest kritiske. Som det fremgår af Figur 6.5, oversvømmes der i den sydlige ende af Kærby store dele af et parkeringsareal og en fodboldbane under hændelsen. Simuleringen viser også, at området omkring pumpestationen på Davids Allé oversvømmes med ca. 0,5 m vand på terræn. I forhold til resultaterne for regnserien fra Frejlev Syd viser Figur 6.6 endnu større udbredelse af oversvømmelserne.

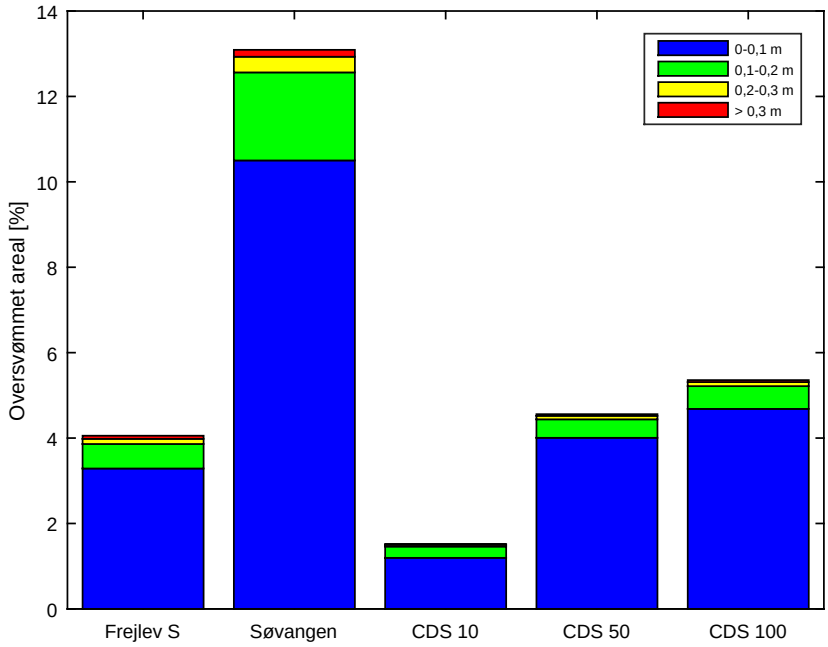
6.4 Sammenligning med kunstigt genererede regn

For at undersøge effekten af regnhændelser med forskellige gentagelsesperioder er MIKE FLOOD-modellen simuleret for tre CDS-regn med gentagelsesperioder på henholdsvis 10, 50 og 100 år. Oversvømmelsesudbredelsen for de tre CDS-regn er vist på Figur 6.7.



Figur 6.7: Resultat af MIKE FLOOD beregning, der viser den maksimale oversvømmelsesudbredelse for gentagelsesperioder for CDS-regn på henholdsvis 10, 50 og 100 år. [Geodatastyrelsen, 2015a], [IDA Spildevandskomiteen, 2014]

Som forventet viser Figur 6.7, at jo større gentagelsesperioden for regnhændelsen er, jo større er arealet, der er oversvømmet. Maksimal oversvømmelsesudbredelse og maksimal vanddybde for beregningerne, udført med CDS-regn og historiske nedbørsmålinger, fremgår af Tabel 6.2. En sammenligning af det oversvømmede areal for de to regnserier og de tre CDS-regn er vist på Figur 6.8.



Figur 6.8: Beregnet oversvømmet areal ved brug af henholdsvis Frejlev Syd-regnmåleren og Søvangen-regnmåleren d. 6. august 2012 samt kunstige CDS-regn med gentagelsesperioder på henholdsvis 10, 50 og 100 år.

Figur 6.8 viser fordelingen af de beregnede vanddybder for regnhændelsen d. 6. august 2012 ved brug af regnmålerne Frejlev Syd og Søvangen. Til sammenligning er der medtaget tre kunstigt genererede CDS-regn med gentagelsesperioder på henholdsvis 10, 50 år 100-års gentagelsesperiode.

Det fremgår tydeligt af Figur 6.6 og 6.8, at simuleringen ved brug af regndata fra Søvangen giver den største oversvømmelsesudbredelse for den simulerede regnhændelse d. 6. august 2012 samt den største vanddybde. Det fremgår også, at oversvømmelsesudbredelsen for den simulerede hændelse ved brug af Søvangen-regnmåleren giver anledning til et større oversvømmet areal end ved brug af en 100-års CDS-regn. Det er vanddybder i intervallet 0-0,1 m, der udgør den største del af oversvømmelsen. Det totale oversvømmede areal i procent fremgår af Tabel 6.2.

Regnmåler/Regn -	**Maks. udbredelse** [%]	**Maks. dybde** [m]
Frejlev Syd	4,1	0,56
Søvangen	13,1	0,87
CDS T=10 år	1,5	0,45
CDS T=50 år	4,6	0,72
CDS T=100 år	5,4	0,72

Tabel 6.2: Maksimal oversvømmelsesudbredelse i procent og vanddybde ved brug af tre forskellige regnmålere samt tre CDS-regn.

Af Tabel 6.2 fremgår det, at den oversvømmede procentandel udgør 1,5 % beregnet ved

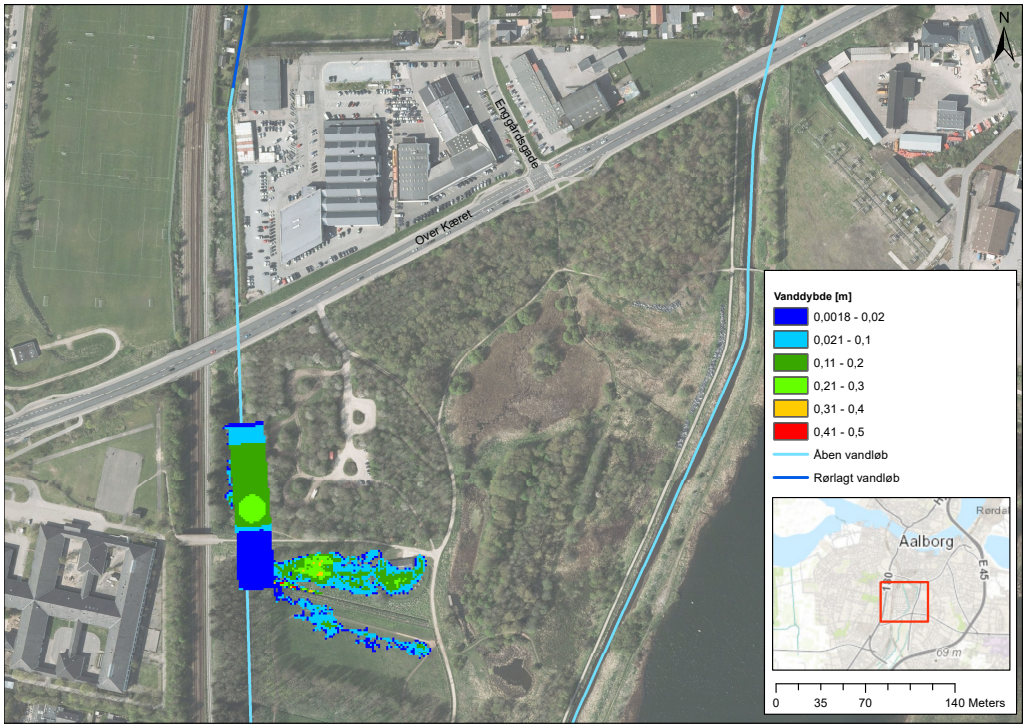
brug af en CDS-regn med gentagelsesperiode på 10 år. Til sammenligning oversvømmes langt større areal, nemlig 4,1 % ved brug af Frejlev Syd-regnmåleren for hændelsen d. 6. august 2012, der har en tilsvarende gentagelsesperiode for regnintensiteter over 60 og 180 minutter.

6.5 Oversvømmelse fra recipienterne

Fra Afsnit 5.8 vides det, at der langs Kærby kun sker opstuvning af Vestre Landgrøft ved Over Kæret, og at Østerå ikke har kapacitetsproblemer ved en gentagelsesperiode på 28,9 år. Derfor udarbejdes der en MIKE FLOOD-model over vandløbsmodellen, som kan modellere udbredelsen af oversvømmelsen fra Vestre Landgrøft. MIKE FLOOD-modellen er opsat jf. Afsnit 6.1 og bruger den samme historiske regnhændelse målt med Søvangen-regnmåleren med en gentagelsesperiode på 37 år, som er beskrevet i Afsnit 6.2.

6.5.1 Oversvømmelsesudbredelse forårsaget af Vestre Landgrøft

Resultaterne af MIKE FLOOD beregningen for vandløbsmodellen er vist på Figur 6.9, hvor resultaterne er beregnet med Søvangen-regnserien.



Figur 6.9: Resultat af MIKE FLOOD beregning med Søvangen-regnserien d. 6. august 2012 for vandløbsmodellen. [Geodatastyrelsen, 2015a]

Det ses på Figur 6.9, at oversvømmelsen af Vestre Landgrøft kun påvirker området syd for Over Kæret. Det berørte område er en del af Østerådalen og omfatter et grønt område og et fritidshus. Oversvømmelsen ved denne strækning skyldes de regnbetingede udledninger opstrøms og nedstrøms for området, som hurtigt opbruger kapaciteten i Vestre Landgrøft. Ved brug af regnserien for Frejlev Syd har det vist sig, at udbredelsen og vanddybden af

oversvømmelsen, er den samme som ved brug af Søvangen-regnserien. I Bilag J fremgår fotos af området under tørvejr. I Afsnit 5.8.2 viser resultaterne, at der sker opstuvning i Vestre Landgrøft lige nord for Over Kæret. Grunden til at dette ikke ses ved MIKE FLOOD-modellen kan skyldes, at terrænmodellen, der bruges, tilpasser terrænkoterne i vandløbsmodellen, hvorfor vandstanden i Vestre Landgrøft nord for Over Kæret ikke længere når en kritisk kote.

6.6 Delkonklusion

Ud fra oversvømmelsesanalysen vurderes den østlige del af Kærby som værende det mest kritiske område i forhold til oversvømmelse sammen med området omkring pumpestationen på Davids Allé, da oversvømmelsen breder sig ind over parcelhus grundene. Det fremgår også af Figur 6.5, at et område, der på nuværende tidspunkt anvendes til legeplads, fodboldbane og parkeringsareal, oversvømmes. Her vurderes den skadevoldende effekt af vandmasserne dog betydeligt mindre, end i de oversvømmede områder med parcelhuse.

Ved sammenligning af det samlede oversvømmede areal simuleret ved brug af en historisk hændelse giver det en betydelig større oversvømmelsesudbredelse end ved brug af en CDS-regn med tilsvarende gentagelsesperiode, hvilket indikerer, at en CDS-regn ikke er egnet til oversvømmelsesmodellering.

Recipienterne udgør ikke en umiddelbar oversvømmelsesrisiko af Kærby. Vestre Landgrøfts kapacitet bliver opbrugt under regnhændelsen d. 6. august 2012 med en 37-års gentagelsesperiode, men oversvømmer kun et mindre område syd for Over Kæret. Konsekvenserne ved oversvømmelse af dette område er vurderet til at være minimale.

Fremtidige Forhold i Kærby 7

Da levetiden på et moderne afløbssystem kan overstige 50-100 år jf. Leif Winther [2011] er der behov for, at tage højde for ændringer i klimaet, der kan medføre større mængder nedbør og flere ekstreme regnhændelser i fremtiden. Ved at tage højde for klimaændringer kan det sikres, at systemet lever op til tidligere nævnte funktionskrav igennem hele dets levetid. Fra Afsnit 5 vides det, at det nuværende afløbssystem i Kærby ikke lever op til funktionskravet under det nuværende klima, hvorfor der undersøges, hvilke yderligere forringelser af serviceniveauet en fremskrivning af klimaet til år 2100 vil medføre.

7.1 Fremskrivning af regnserie

I Tabel 1.1 på side 3 er klimafaktorerne opgivet for en 2, 10 og 100-års hændelse til henholdsvis 1,2, 1,3 og 1,4 med en tidshorisont på 100 år. Disse klimafaktorer er dog ikke hensigtsmæssige at bruge på en hel regnserie, da den årlige nedbør vil blive overestimeret sammenlignet med det, der forventes i år 2100. Derudover vil forventede ændringer for forskellige årstider ikke blive medtaget som færre nedbørshændelser om sommeren, men flere ekstremhændelser, eller en forøgelse af den samlede nedbør om vinteren.

Der findes flere måder at fremskrive en hel regnserie på, blandt andet *Climate matching*, der går ud på at bruge en regnserie fra et område, som har et klima svarende til det, der forventes i fremtiden lokalt. En anden metode er *Resampling of historical rain series*, hvor der bruges en regional klimamodel (RCM) til at producere en regnserie med et tidsskridt på f. eks. en dag. Karakteristika fra den enkelte dag bruges så til at finde en dag fra en historisk regnserie med samme karakteristika.

For indeværende projekt er det valgt at bruge en nyere metode beskrevet i Thorndahl et al. [2016]. Metoden bygger delvist på GLUE-metoden, der er beskrevet i forbindelse med kalibreringen af overflademodellerne. Metoden bygger på, at en historisk regnserie deles op i de fire årstider, hvor der fra disse fire puljer udtrækkes regnhændelser til at skabe en ny regnserie. Det er herefter muligt at ændre på parametrene såsom antal regnhændelser og forekomsten af ekstremregn, der kan variere mellem de fire årstider. De dannede regnserier evalueres efterfølgende på baggrund af en række *target variables*, der dækker over årlig nedbør, nedbør afhængig af årstiden, nedbørshændelser over $10\,\mathrm{mm\,dag^{-1}}$, nedbørshændelser over $20\,\mathrm{mm\,dag^{-1}}$, maksimal daglig nedbør og forholdet mellem intensitet, varighed og frekvens. Hvis den dannede regnserie afviger mere end 15 % for en af de førnævnte *target variabels* forkastes regnen. Efter en tilfredsstillende regnserie er dannet, skal den fremskrives med en klimafaktor for hver enkelt *target variable*.

Klimafaktorer og acceptkriterier, der bruges ved fremskrivningen af den dannede regnserie ses i Tabel 7.1. [Thorndahl et al., 2016]

Target variable	**Enhed**	**Klimafaktor**		**Acceptkriterie og vægt**	
		c_f	std. dev. af c_f	P_{crit}	W_i
Årlig nedbør	[mm]	1,14	0,06	0,89	0,50
Vinter nedbør	[mm]	1,25	0,06	0,90	0,30
Forårs nedbør	[mm]	1,13	0,10	0,82	0,20
Sommer nedbør	[mm]	1,05	0,08	0,85	0,30
Efterårs nedbør	[mm]	1,13	0,10	0,82	0,20
Hændelser over 10 mm per døgn	[-]	1,37	0,12	0,83	0,17
Hændelser over 20 mm per døgn	[-]	2,50	0,14	0,89	0,08
Maksimal daglig nedbør	[mm]	1,14	0,12	0,79	0,08
Intensitet over 60 min, T=2 år	[mm h^{-1}]	1,20	0,10	0,83	0,08
Intensitet over 60 min, T=10 år	[mm h^{-1}]	1,30	0,10	0,85	0,08

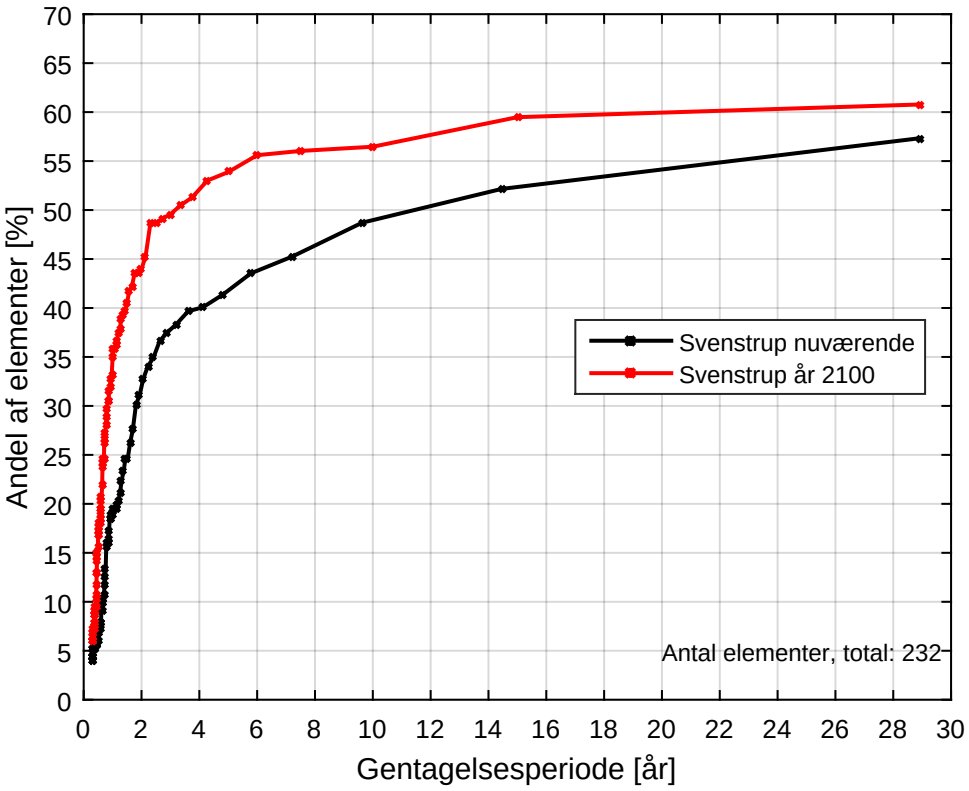
Tabel 7.1: Oversigt over *target variables*, klimafaktorer (c_f), Acceptkriterier (P_{crit}) og vægt i forhold til den samlede vurdering (W_i). [Thorndahl et al., 2016]

Der bliver for hver enkelt *target variable* udregnet et *performance measure*, der beskriver, hvor godt den genererede regn passer med det forventede. Der udregnes et samlet *performance measure* på baggrund af et vægtet gennemsnit af de enkelte *performance measures*. Det er regnserien med den største gennemsnitlige *performance measure*, der anvendes i den videre analyse.

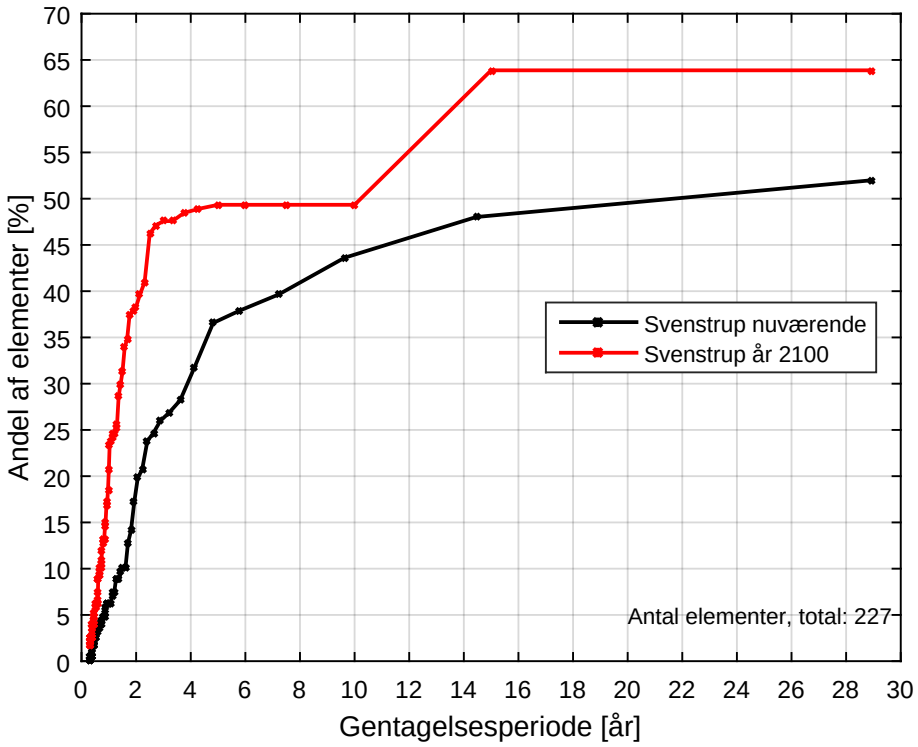
Beregningerne er foretaget på baggrund af klimascenarie A1B, der er et middelscenarie, der ligger mellem RCP2.6 og RCP8.5, hvorfor det er sammenligneligt med RCP6.0. [Danmarks Meterologiske Institut, 2016b]

7.2 Fremtidigt serviceniveau

Afløbsmodellen er kørt i MIKE URBAN for den fremskrevne Svenstrup-regnserie. På Figur 7.1 fremgår fordelingskurven for fuldtløbende ledninger som funktion af gentagelsesperioden. Der er endvidere plottet resultatet for de nuværende forhold til sammenligning, der også er foretaget på baggrund af Svenstrup-regnserien. På Figur 7.2 fremgår fordelingskurven for brønde, hvor der forekommer opstuvning til terræn.



Figur 7.1: Fordelingskurve for udnyttelse af fuldtløbende rørkapacitet som funktion af gentagelsesperiode.



Figur 7.2: Fordelingskurve for brønde, hvor der forekommer opstuvning til terræn som funktion af gentagelsesperiode.

Figur 7.1 og 7.2 viser som forventet, at procentandelen af fuldtløbende rør og brønde, hvor der forekommer opstuvning til terræn som funktion af gentagelsesperioden, stiger ved at bruge regnserien, der er fremskrevet til år 2100 sammenlignet med den oprindelige regnserie. Andelen af rør, der bliver fuldtløbende stiger fra 32 til 44 %, fra 48 til 56 % og fra 57 til 61 % for gentagelsesperioder på henholdsvis 2, 10 og 28,9 år. Andelen af brønde, hvor der sker opstuvning, stiger fra 20 til 38 %, fra 44 til 49 % , fra 52 til 64 % for gentagelsesperioder på henholdsvis 2, 10 og 28,9 år.

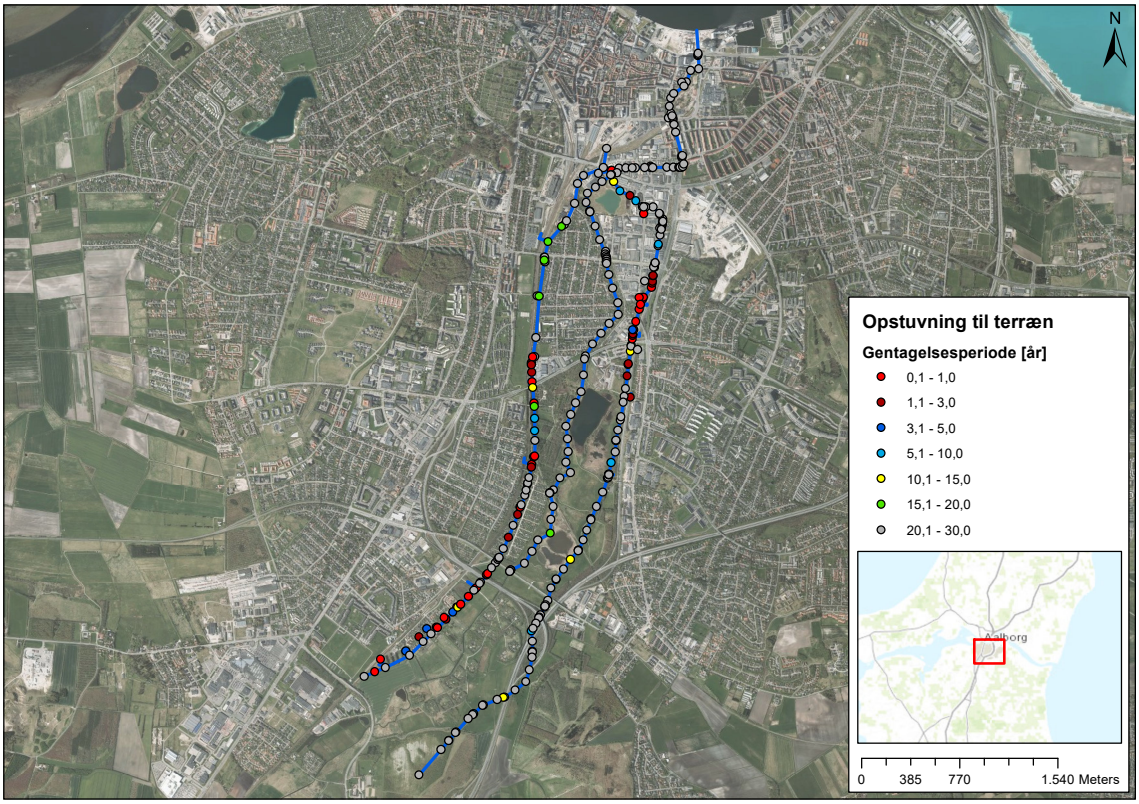
7.3 Fremtidig restkapacitet i recipienterne

Vandløbsmodellen anvendt i Afsnit 5.8 bruges til at bestemme den fremtidige restkapacitet i Østerå og Vestre Landgrøft. Det undersøges om øgede udledningsmængder samt en hævet vandstand i Limfjorden vil medføre kapacitetsproblemer i recipienterne. Vandløbsmodellen er testet for to fremtidige klimascenarier.

- Scenarie 1: Vandstandsstigning i Limfjorden på 0,44 m, der svarer til IPCC's klimascenarie RCP6.0.
- Scenarie 2: *Worst case* scenarie, hvor vandstanden i Limfjorden er hævet med 1,2 m, der er DMI's øvre bud på vandstandsstigninger i havet omkring Danmark. [DMI, 2014]

Til begge scenarier gøres der brug af den klimafremskrevne Svenstrup-regnserie.

Ved sammenligning mellem resultatet af Scenarie 1 på Figur 7.3 og de nuværende forhold i vandløbene, der fremgår af Figur 5.5 på side 42, ses det, at der ikke vil forekomme yderligere kapacitetsproblemer, end der er på nuværende tidspunkt. Gentagelsesperioden for opstuvning til terræn i den rørlagte del af Vestre Landgrøft falder dog til 15,1-20,0 år for en større strækning.



Figur 7.3: Gentagelsesperiode for opstuvning til terræn i Østerå vandløbssystem ved brug af den klimafremskrevne Svenstrup-regnserie og klimascenarie RCP6.0.

Ved Scenarie 2 forekommer der ikke yderligere kapacitetsproblemer, end ved scenarie 1. Et kort over resultaterne fra opstuvningsberegningen er vedlagt i Bilag I. Her ses det, at den forøgede havvandsstigning udelukkende påvirker strækningen af Østerå gennem Aalborg midtby. Dette skyldes, at der flere steder i Østerå forekommer fisketrapper og stryg på strækningen mellem Kærby og Aalborg midtby.

7.4 Delkonklusion

De fremtidige klimaforhold vil medføre en væsentlig forringelse af det nuværende serviceniveau, både i forhold til fuldtløbende rør og opstuvning til terræn. For at sikre et acceptabelt serviceniveau i Kærby bør der implementeres forskellige løsninger, der kan forbedre serviceniveauet nu og sikre det i fremtiden. I de følgende kapitler vil forskellige løsningsforslag blive undersøgt, der kan implementeres på kortsigt såvel som på lang sigt.

Den fremtidige restkapacitet af recipienterne Vestre Landgrøft og Østerå vil ikke blive påvirket af fremtidige havvandsstigninger, svarende til RCP6.0 og DMI's øvre bud. Dog vil den øgede mængde nedbør i fremtiden give anledning til større udledninger fra regnbetingede udløb, hvilket resulterer i, at gentagelsesperioden på 15-20 år for opstuvning til terræn forekommer for en større strækning i den rørlagte del af Vestre Landgrøft.

Del III

Kortsigtet Problemløsning

I Aalborg Kommunes vandhandleplan er det planlagt at gøre en indsats over for tre udløb fra fælleskloak i Kærby. Derfor er der dimensioneret tre first flush bassiner, med det formål at nedsætte overløbsvolumen. Derudover undersøges muligheden for implementering af LAR-løsninger samt effekten af disse på serviceniveau og regnbetingede udledninger.

Etablering af first flush Bassiner

8

Aalborg Kommune har ligesom landets resterende kommuner udarbejdet en vandhandleplan på baggrund af statens vandplaner. Vandhandleplanen for Aalborg Kommune omfatter vandområde *Det Nordlige Kattegat og Skagerrak* samt vandområde *Limfjorden*. Aalborg Kommunes indsats er rettet mod:

- Udledning af organisk stof fra ferskvandsdambrug.
- Spildevandsrensning fra spredt bebyggelse.
- Indsats mod 35 regnbetingede udløb fra fælleskloakerede oplande.
- Åbning af rørlagte vandløbsstrækninger.
- Fjernelse af spærringer samt restaurering af vandløb. [Aalborg Kommune, e]

For indeværende projekt er indsatsen for en reduktion af udledning fra fælleskloakerede oplande relevant, da tre ud af de 35 regnbetingede udløb er beliggende inden for projektlokaliteten. De omtalte udløb er U0.1.48, U0.1.49 og U0.1.50, der fremgår af planen over Kærbys kloaksystem Figur 1.2 på side 5.

Jf. retningslinjerne anført i Aalborg Kommunes vandhandleplan 2015 for indsatser mod regnbetingede udledninger, udføres der som udgangspunkt first flush bassiner svarende til et volumen på $50\,m^3$ red. ha^{-1} ved et afløbstal på $4{,}51\,s^{-1}$ red. ha^{-1}, der svarer til et årligt overløbsvolumen på $250\,m^3$ red. ha^{-1} ved brug af Odense-regnserien. [Aalborg Kommune, e]

Afløbstallet for overløbsbygværket i Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Mølle Vej ses i Tabel 8.1.

Lokation	**Reduceret opland** [ha]	**Afløbstal** [l s^{-1} red. ha^{-1}]
Enggårdsgade	7,58	2,0
Davids Allé	8,57	3,8
Kjærs Mølle Vej	3,11	7,7

Tabel 8.1: Afløbstal samt det reducerede opland for overløbsbygværkerne i Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Mølle Vej.

I Tabel 8.1 er afløbstallet beregnet ved at tage den videreførende pumpekapacitet for hvert opland og dividere den med det reducerede opland til hver pumpestation. Da afløbstallet for overløbsbygværket i Enggårdsgade og Davids Allé er under $4{,}51\,s^{-1}$ red. ha^{-1}, etableres

der her first flush bassiner. På trods af, at afløbstallet for overløbsbygværket på Kjærs Mølle Vej er over 4,5 $\mathrm{l\,s^{-1}}$ red. $\mathrm{ha^{-1}}$, overstiger bygværket stadig kravet om en udledning på under 250 $\mathrm{m^3}$ red. $\mathrm{ha^{-1}}$ $\mathrm{år^{-1}}$, hvorfor der også etableres et first flush bassin for dette overløbsbygværk.

8.1 Bassindimensionering

Til beregning af det nødvendige bassinvolumen opsættes en model i Matlab, hvor det sikres at bassinet kan magasinere som minimum 50 $\mathrm{m^3}$ red. $\mathrm{ha^{-1}}$, og samtidig sikre, at det årlige aflastede volumen ikke overstiger 250 $\mathrm{m^3}$ red. $\mathrm{ha^{-1}}$. Modellens input parametre er følgende:

- Det nuværende overløbsvolumen fra overløbsbygværkerne i Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Mølle Vej.
- Den videreførende pumpekapacitet fra pumpestationerne i Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Mølle Vej.
- Pumpeydelsen fra de nye first flush bassiner tilbage til afløbssystemet ved henholdsvis Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Mølle Vej.

Modellen gør brug af kontinuitetsligningen, hvor vandvolumen i bassinet beregnes for hvert tidsskridt. Vandvolumen for et tidsskridt beregnes ved Ligning (8.1).

$$V_i = V_{i-1} + OV_i - PB \tag{8.1}$$

Hvor

V_i	Vandvolumen i nyt bassin til tidsskridt i [$\mathrm{m^3}$]
OV_i	Overløbsvolumen til det nye bassin til tidsskridt i [$\mathrm{m^3}$]
PB	Pumpekapacitet tilbage til systemet [$\mathrm{m^3}$]

Modellen køres med en *hvis* funktion. Det vil sige at modellen sætter PB til 0 hvis OV_i er større end 0. Dette gøres, da det ikke er muligt at pumpe spildevand tilbage til systemet, hvis det allerede er fyldt, hvilket det formodes at være, hvis der sker overløb fra overløbsbygværket. Hvis V_i overstiger bassinvolumen, regnes overløbsvolumen til recipienten for det enkelte tidsskridt ved Ligning (8.2).

$$OR_i = V_i - BV \tag{8.2}$$

Hvor

OR_i	Overløbsvolumen til recipienten til tidsskridt i [$\mathrm{m^3}$]
BV	Volumen af det nye bassin [$\mathrm{m^3}$]

OR_i kan som minimum være 0, da der ikke kan forkomme en negativ overløbsvolumen. Den årlige udledning er summen af OR_i og må ikke overskride kriteriet på 250 $\mathrm{m^3}$ red.

ha^{-1} $år^{-1}$. Derved findes det optimale bassinvolumen for first flush bassinerne ved en iterationsproces til henholdsvis Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Mølle Vej.

Overløbsvandføringen fra hvert af overløbsbygværkerne er beregnet for år 2012 ved hjælp af MIKE URBAN med Svenstrup-regnserien som regninput. År 2012 er valgt, da dette årsnedbør på 683 mm svarer til, hvad der i gennemsnit kan forventes i årsnedbør i Aalborg området. Bassinvolumen for Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Mølle Vej, der er fundet med resultaterne for år 2012 vil i det følgende afsnit blive testet for perioden 2010-2014 med Svenstrup-regnserien samt for hele Odense-regnserien. Matlab modellen er vedlagt på Elektronisk Bilag K.8.

8.2 Årlige overløbsvolumener

Effekten af de implementerede first flush bassiner på overløbsvolumenerne, ved henholdsvis Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Mølle Vej, er beregnet i MIKE URBAN for perioden 2010-2014. Overløbsvolumener fremgår af Tabel 8.2. til sammenligning fremgår den årlige gennemsnitlige nuværende udledning uden bassiner af Tabel 5.4 på side 40. Det fremgår af Tabel 8.2, at for bygværket i Enggårdsgade og på Davids Allé overskrides kriteriet på 250 m^3 red. ha^{-1} i år 2011. Overskridelsen vurderes acceptabel, da overskridelsen kun forekommer et enkelt år i perioden 2010-2014.

Overløbsbygværk	**Overløbsvolumen** [m^3 red. ha^{-1}]					
	2010	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**Middelværdi**
Enggårdsgade	162	317	225	44	103	170
Davids Allé	206	334	239	184	62	205
Kjærs Mølle Vej	78	175	200	0	0	90
Årsnedbør, Svenstrup [mm]	628	711	683	579	711	662

Tabel 8.2: Overløbsvolumener for år 2010-2014 efter etablering af first flush bassiner.

Bassinvolumenerne er yderligere testet ved brug af Odense-regnserien i henhold til retningslinjerne for dimensionering af first flush bassiner. [Aalborg Kommune, e] Regnserien strækker sig fra 1936-1979, dog afbrudt af nogle år uden målinger, men med en samlet længde på 34 år.
Gentagelsesperioden for overskridelsen af 250 m^3 red. ha^{-1} for de tre overløbsbygværker, ved brug af Odense-regnserien, fremgår af Tabel 8.3. Som det fremgår af resultaterne er gentagelsesperioden for overskridelse af kriteriet langt sjældnere end ved brug af Svenstrup-regnserien.

Overløbsbygværk	**Gentagelsesperiode i år**
Enggårdsgade	17
Davids Allé	17
Kjærs Mølle Vej	11

Tabel 8.3: Gentagelsesperiode for overskridelse af en årlig udledningsmængde af opspædet spildevand på 250 m^3 red. ha^{-1} efter etablering af first flush bassiner.

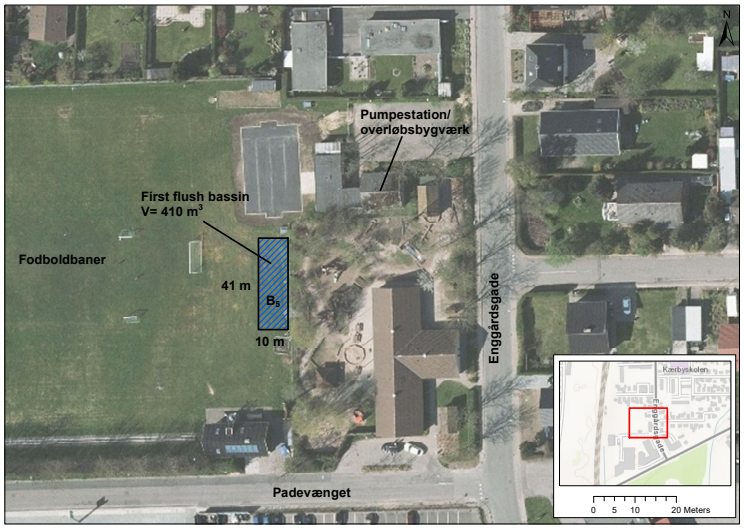
MIKE URBAN-modellen til beregning af overløbsvolumner er vedlagt på Elektronisk Bilag K.9.

8.3 Etablering af bassiner

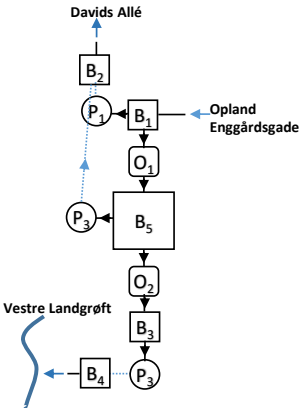
Der er tilstrækkelig med ubefæstet areal omkring de tre overløbsbygværker, hvorfor der etableres tre bassiner i umiddelbar nærhed af bygværkerne. Bassinerne etableres som lukkede bassiner, for at mindske lugt og æstetisk forurening mest muligt. Til dette løsningsforslag ændres der ikke på den videreførende spildevandsmængde fra Kærby, som ledes til renseanlæg Vest, da dette kræver yderligere kendskab til kapaciteten i afløbssystemet nedstrøms Kærby gennem Aalborg Centrum mod Aalborg Renseanlæg Vest.

8.3.1 Enggårdsgade

Placeringen af et 410 m^3 lukket first flush bassin i Enggårdsgade fremgår af Figur 8.1. En skitse over pumpestationen fremgår af Figur 8.2, hvor bassin $\mathbf{B}_5$ illustrerer first flush bassinet. Terræn er i kote 3,53, bundkote af first flush bassin er i kote -1,80 og overløb fra first flush bassin er i kote -0,80. Retur-pumpe $\mathbf{P}_3$ leder det opspædede spildevand tilbage til afløbssystemet. Når der er vand i bassin $\mathbf{B}_5$ pumper $\mathbf{P}_3$ med 5 l s^{-1}. På nuværende tidspunkt er $\mathbf{P}_1$**'s** ydeevne 15 l s^{-1}, men for at undgå en overlastning af den videreførende ledning mod Davids Allé, nedjusteres ydelsen for $\mathbf{P}_1$ til 10 l s^{-1}. En skitse over nuværende pumpestationer fremgår af Figur 1.3 på side 6. Fotos af pumpestationerne i Kærby samt områderne, hvor first flush bassinerne kan etableres fremgår af Bilag J.



Figur 8.1: Fremtidig placering af first flush bassin i Enggårdsgade.

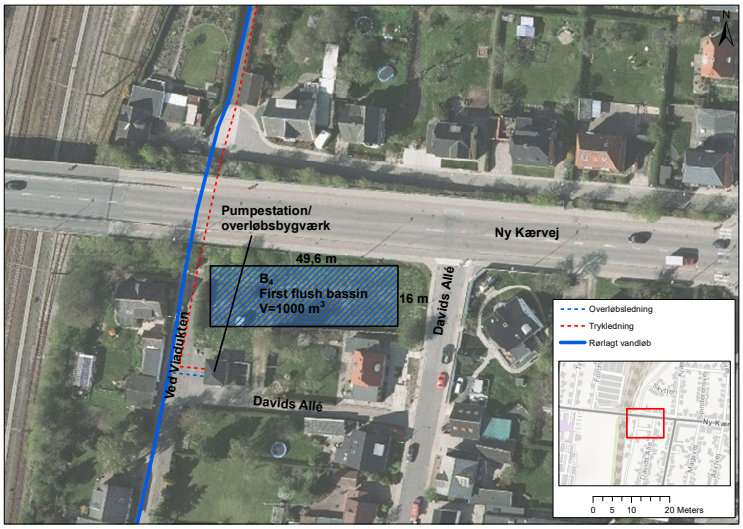


Figur 8.2: Skitse af fremtidig pumpestation i Enggårdsgade.

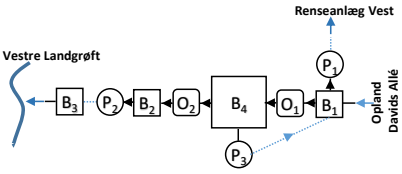
8.3.2 Davids Allé

På Davids Allé etableres et 1000 m^3 stort first flush bassin i umiddelbar nærhed af den eksisterende pumpestation på Davids Allé, der fremgår af Figur 8.3. Terræn er i kote 2,83, bundkote for bassin er kote -1,46 og overløbskote fra bassin er i kote -0,20. First

flush bassin $\mathbf{B}_4$'s forbindelse til den nuværende pumpestation, fremgår af Figur 8.4. Ved overløb fra overløbsbygværk $\mathbf{O}_1$ fyldes first flush bassin $\mathbf{B}_4$. Vandet ledes retur mod Aalborg Renseanlæg Vest via retur-pumpe $\mathbf{P}_3$. Overløb fra first flush bassin sker via overløbsbygværk $\mathbf{O}_2$ til Vestre Landgrøft.



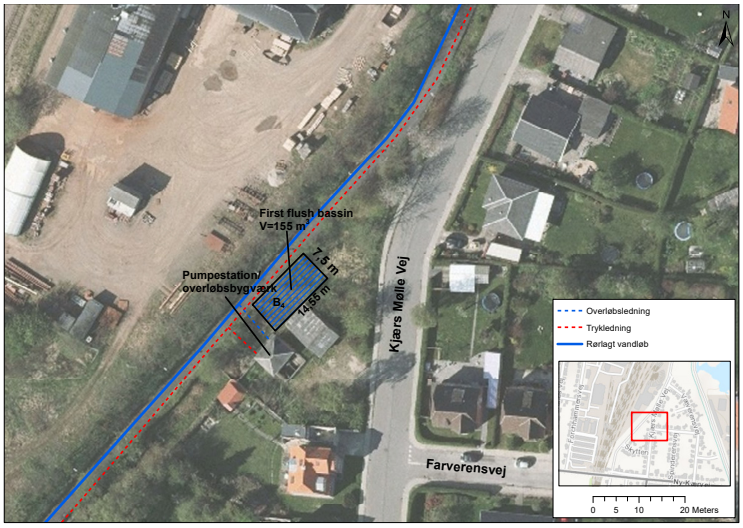
Figur 8.3: Fremtidig placering af first flush bassin på Davids Allé.



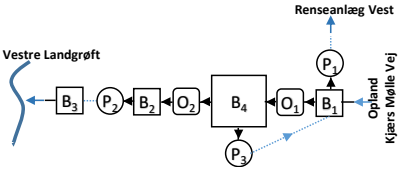
Figur 8.4: Skitse af fremtidig pumpestation på Davids Allé.

8.3.3 Kjærs Mølle Vej

Det nødvendige volumen for first flush bassinet for pumpestationen på Kjærs Mølle Vej er 155 m^3. Terræn er i kote 2,96, bund af bassin etableres i kote -1,7 og overløbskant fra first flush bassin etableres i kote -0,28. Da pumpestationen på Kjærs Mølle Vej er identisk med pumpestationen på Davids Allé kobles first flush bassinet på afløbssystemet ligesom for pumpestationen på Davids Allé. First flush bassinet er skitseret på Figur 8.6 som $\mathbf{B}_4$.



Figur 8.5: Fremtidig placering af first flush bassin på Kjærs Mølle Vej.



Figur 8.6: Skitse af fremtidig pumpestation på Kjærs Mølle Vej.

8.4 Delkonklusion

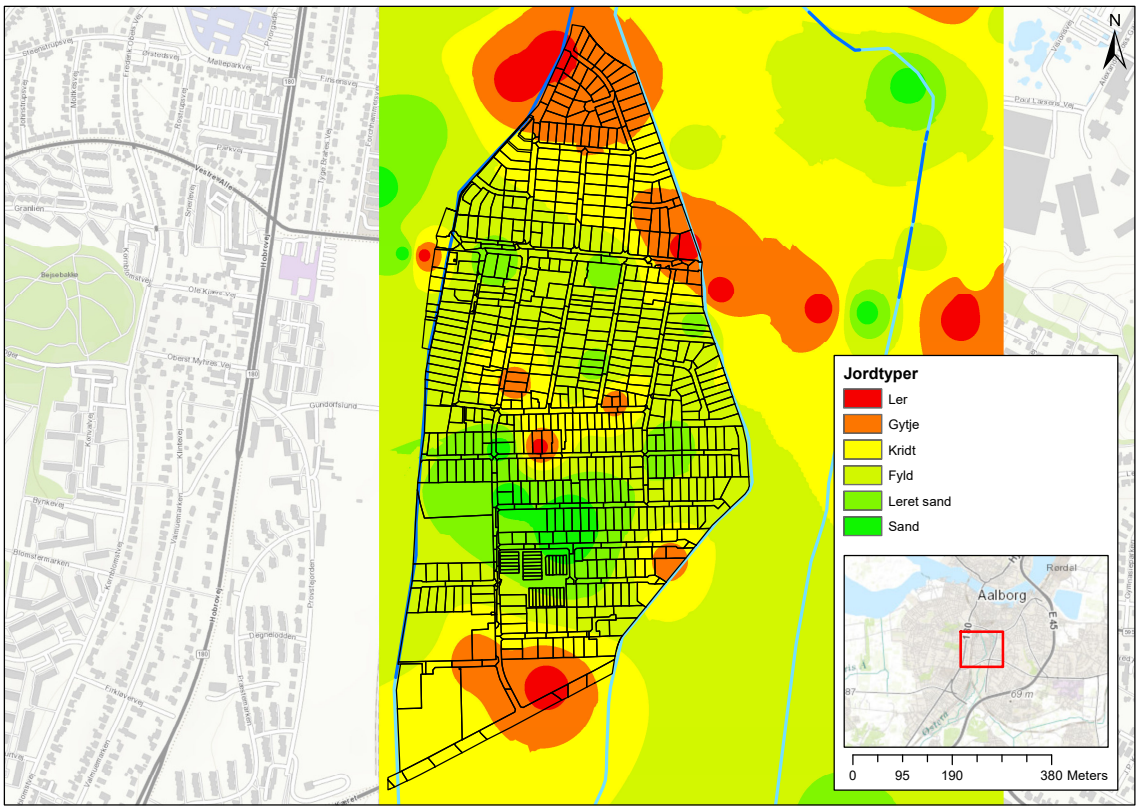
Ved etablering af first flush bassiner til hvert af overløbsbygværkerne, kan den årlige aflastning fra overløbsbygværkerne reduceres til under kriteriet på 250 m^3 red. ha^{-1}. Løsningen fungerer som en kortsigtet løsning, da der på arealerne for bassinernes planlagte placering, hverken er bebyggelse eller infrastruktur, hvorfor løsningerne let kan etableres. Bassinerne fungerer som en overgangsløsning fra de nuværende fælleskloakerede oplande til en fremtidig separatkloakeret bydel, da bassinerne i fremtiden kan genanvendes som forsinkelsesbassiner for regnvand for at mindske den hydrauliske belastning på Vestre Landgrøft.

Lokal Afledning af Regnvand 9

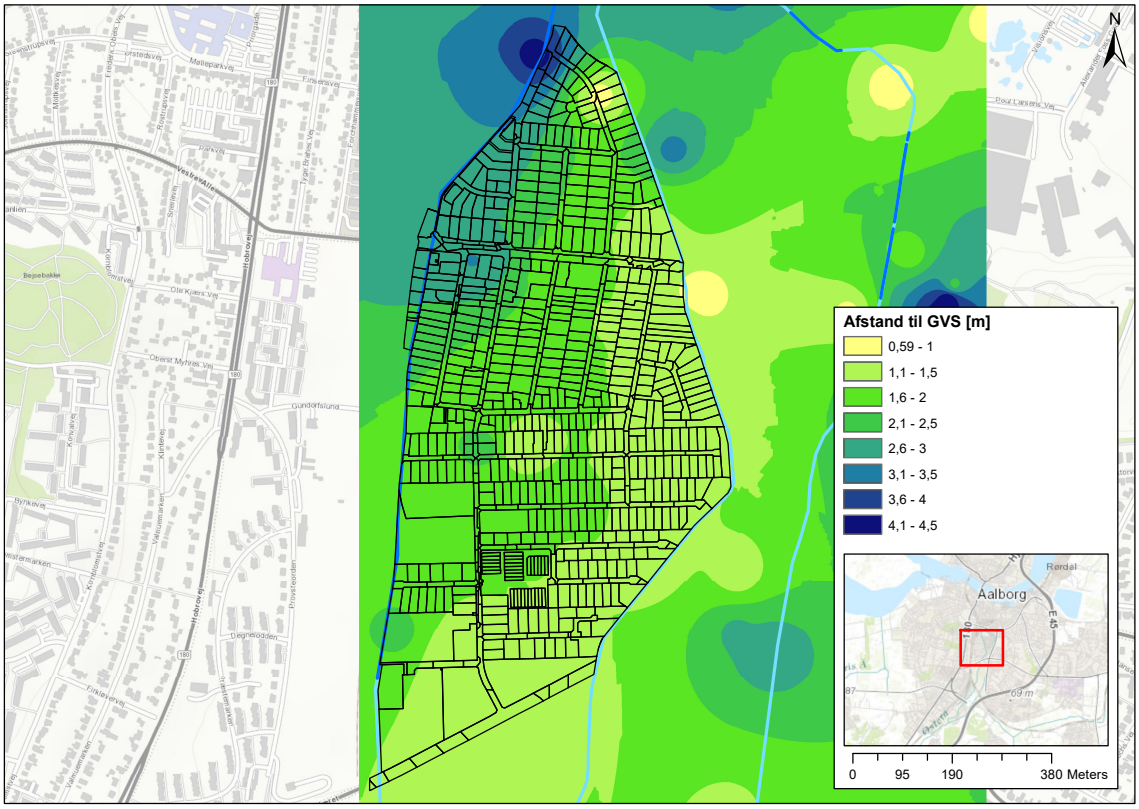
Ved implementering af forskellige LAR-løsninger i Kærby, kan det befæstede areal, der bidrager til afløbssystemet mindskes. Forundersøgelsen har vist, at det nuværende system i Kærby ikke har den fornødne kapacitet, hvorfor der netop er behov for at reducere tilledningen af regnvand til systemet. Det nuværende serviceniveau kan derfor forbedres, samtidig med, at en fremtidig dimensionering af et separatsystem vil kræve en mindre kapacitet, hvis LAR-løsninger kan implementeres i Kærby. Da store dele af de befæstede arealer i Kærby er privatejede, vil det muligvis kræve at privatpersoner etablerer LAR-anlæg på egen grund for at kunne opnå en mærkbar effekt ved implementering af LAR-løsninger. Da LAR-løsninger indebærer nedsivning eller tilbageholdelse af regnvand, undersøges jordbunds- og grundvandsforholdene i Kærby for at bestemme områdets egnethed til nedsivning af regnvand.

9.1 Analyse af nedsivningspotentiale

Nedsivningspotentialet i Kærby er afhængig af jordbundsforholdene og afstanden til grundvandsspejlet. En sandet jordbund er velegent til nedsivning af regnvand, da vandet let kan nedsives til grundvandet. En leret jordbund derimod, er uegnet til nedsivningsløsninger, grundet den lave hydrauliske ledningsevne. Afstanden til grundvandsspejlet påvirker mængden af vand, der kan infiltrere ned i jordbunden. Afstanden til grundvandsspejlet i Kærby er i intervallet 0,6 m til 4,5 m hvor afstanden er lavest i den sydøstlige del og størst i den nordvestlige del. Jordbundsforholdene fra 1-2 m under terræn og afstanden til grundvandsspejlet er vist på henholdsvis Figur 9.1 er baseret på baggrund af 55 boringer i området foretaget fra 1950-2015, og Figur 9.2 baseret på baggrund af 64 pejlinger i området i perioden 1950-2015, begge kort er udarbejdet ved at interpolere data fra geotekniske boringer i- og omkring Kærby.



Figur 9.1: Jordbundsforholdene i Kærby 1-2 m under terræn. [GEUS, 2016]



Figur 9.2: Afstand til grundvandsspejl fra terræn. [Geodatastyrelsen, 2015a] [GEUS, 2016]

Figur 9.1 viser, at der forekommer flere jordtyper i jordbunden i Kærby. Nedsivningsevnen for jordtyperne kridt og fyld er meget varierende, da det ikke vides, hvorvidt kridtet er sprækket, eller hvilken sammensætning fyldjorden består af, hvorfor disse jordtyper bør undersøges nærmere i Kærby. Da det netop er disse to jordtyper, der udgør størstedelen af jordbunden i dybden 1-2 meter i Kærby er det vanskeligt at vurdere nedsivningsevnen i området. Der forekommer dog pletvise lokaliteter, hvor jordbunden består af enten hovedsageligt sand eller ler, hvor muligheden for nedsivning af regnvand er henholdsvis god og dårlig. I store dele af områderne, hvor jordbunden hovedsageligt består af sand, ses det på Figur 9.2, at afstanden til grundvandsspejlet fra terræn ligger imellem 1,6 og 2 m. Med en afstand på mere end 1,6 m under terræn, er der plads til nedsivning af regnvand. Dog vil denne afstand blive reduceret ved udgravning til enten et tørbassin eller faskiner. Da afstanden til grundvandsspejlet er beregnet på baggrund af en enkelt pejling for hver enkelt boring, der er taget i perioden 1950 til 2015, kan Figur 9.2 være misvisende, da grundvandsspejlet både er årstidsafhængig, og kan have ændret sig fra de første boringer blev udført i 1950.

På baggrund af de nuværende tilgængelige data er det muligt at nedsive regnvand fra bassiner enkelte steder i Kærby, hvor jordbunden hovedsageligt består af sand samt hvor grundvandspejlet er mere end 1 m under terræn. Dog bør der udføres en udvidet analyse af jordbunden i de områder, hvor der overvejes nedsivning, med det formål at bestemme den faktiske afstand til grundvandsspejlet og den hydrauliske ledningsevne for jordbunden.

9.2 Krav til nedsivningsbassiner

For at kunne etablere nedsivningsbassiner til nedsivning af tag- og overfladevand skal følgende lovmæssige krav være opfyldt: [Teknologisk Institut, 2016]

- Afstand til vandløb, søer eller hav skal være minimum 25 m.
- Afstand til drikkevandsboringer skal være minimum 25 m.

Foruden de lovmæssige krav er der vejledende afstandskrav i henhold til DS440, som er følgende: [Teknologisk Institut, 2016]

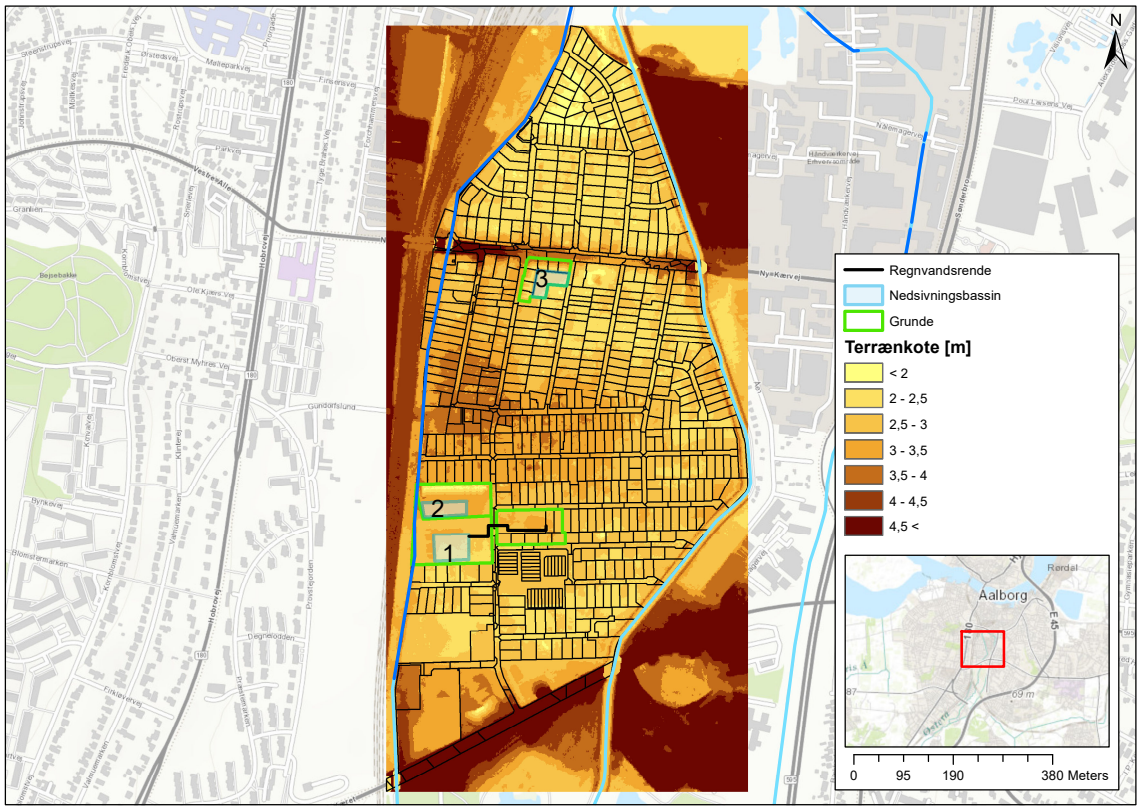
- Afstand til beboelseshus med eller uden kælder skal være minimum 5 m.
- Afstand til hus uden beboelse medkælder skal være minimum 5 m.
- Afstand til hus uden beboelse uden kælder skal være minimum 2 m.
- Afstand til skel skal være minimum 5 m.

Disse krav gælder for tag- og overfladevand og ikke spildevand. Tag- og overfladevand defineres som regnvand fra arealer som tage og jernbaner og må ikke indeholde andre stoffer, end hvad der sædvanligt tilføres regnvandet i forbindelse med afstrømning på veje, parkeringspladser osv. eller have en væsentlig anden sammensætning jf. Miljøministeriet [2016].

9.3 Etablering af LAR-anlæg

Da der kun forekommer enkelte lokationer i Kærby, hvor der er mulighed for nedsivning af overfladevand, vurderes det, at det ikke er muligt for den enkelte grundejer at etablere

LAR-anlæg på dennes grund. Derfor vil effekten af tre nedsivningsbassiner, der er placeret egnede steder i Kærby, blive undersøgt. Der er udpeget tre områder nær tre lejlighedskomplekser samt Kærbyskolen hvor større nedsivningsbassiner kan etableres. Oplandene samt placering af nedsivningsbassiner kan ses på Figur 9.3. For at koble overfladevandet fra Kærbyskolen til bassin 1 etableres der en regnvandsrande fra skolen til bassinet som vist på Figur 9.3 og 9.4.



Figur 9.3: Mulige områder for etablering af større nedsivningsanlæg samt opland til disse. [Geodatastyrelsen, 2015a]

På Figur 9.3 ses de tre områder, hvor det er muligt at etablere større nedsivningsbassiner. Anlæg 1 og 2 fremgår af Figur 9.4. Anlæg 3 fremgår af Figur 9.5.



Figur 9.4: Område for Nedsivningsbassin 1 og 2 samt regnvandsranden mod vest.



Figur 9.5: Område for nedsivningsbassin 3 mod nord.

Bassin 1 skal nedsive vandet fra Kærbyskolen samt det sydlige af de to lejlighedskomplekser mod vest, bassin 2 skal nedsive vandet fra det nordlige af de to lejlighedskomplekser mod vest og bassin 3 skal nedsive vandet fra lejlighedskomplekset mod nord. De tre bassiner kan etableres som tørbassiner med nedsivning. Det befæstede opland samt overfladeareal og udregnet bassindybde til hvert bassin er angivet i Tabel 9.1. Udregningerne er udført jf. LAR I DANMARK [2016], hvor den hydrauliske ledningsevne er bestemt på baggrund af jordtyperne vist på Figur 9.1. Den hydrauliske ledningsevne er vurderet til $1 \cdot 10^{-5}$ m s^{-1}, der svarer til en dårligt ledende sand jf. LAR I DANMARK [2016]. Gentagelsesperioden for overløb i bassin 1 og 2 er 10 år, hvor bassin 3 er dimensioneret med en gentagelsesperiode på 100 år. Dette skyldes, at der er mulighed for at etablere overløb fra bassin 1 og 2 til Vestre Landgrøft, hvorimod bassin 3 ligger meget centralt i Kærby uden mulighed for at etablere overløb uden risko for at skade omkringliggende bygninger.

Bassin nr.	**Bef. areal** [ha]	**Overfladeareal bassin** [ha]	**Bassindybde** [m]	**Dræn kapacitet** [l s^{-1}]
1	1,14	0,4	0,15	2,00
2	0,47	0,25	0,10	1,25
3	0,15	0,2	0,10	1,00

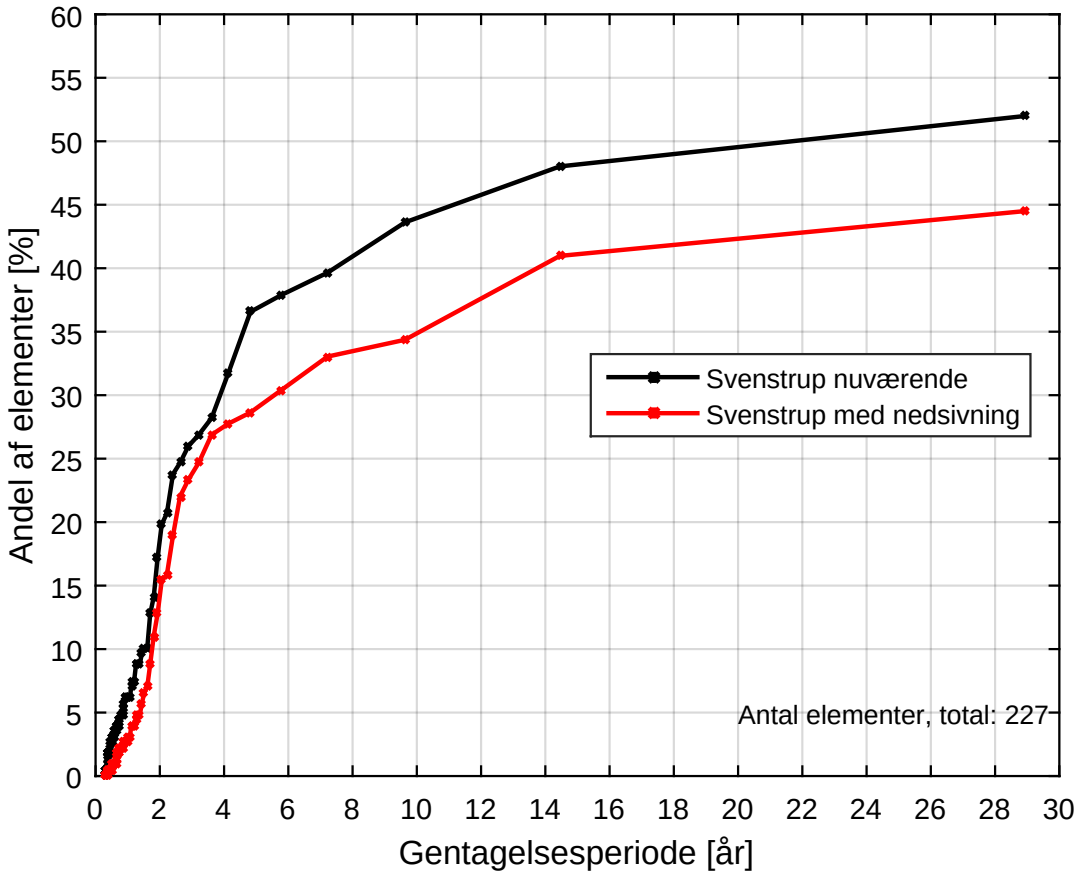
Tabel 9.1: Udregnede bassindybder på baggrund af det befæstede areal og bassinernes overfladeareal samt drænkapaciteten.

I Tabel 9.1 ses det, at de udregnede bassindybder ikke overstiger 15 cm. Dermed kan bassinerne sænkes yderligere, for dels at sikre mod overløb og dels at gøre det muligt at tillede vandet fra de befæstede arealer via gravitation. I forhold til at skulle lede vandet via gravitation til bassin 1, er der en udfordring med vandet fra Kærbyskolen. Kærbyskolen ligger 0,5 m over terrænkote for bassin 1. For at lede vandet via overfladen til bassinet skal det krydse Enggårdsgade. En mulighed for vandet at krydse Enggårdsgade på, kan være ved at udgrave regnvandsrenden på tværs af vejen, som derefter vil blive tildækket af en rist. Denne regnvandsrende kan føres igennem skolegården for derved at bruge vandet rekreativt. Regnvandsrenden starter i kote 3,1 ved Kærbyskolen, slutter i kote 2,6 ved bassinkanten og er 172 meter lang. Dette giver Regnvandsrenden et fald på 3 ‰, hvilket resulterer i en ringe selvrensningsevne. Derfor bør bassinet sænkes med 36 cm, for at opnå et fald i regnvandsrenden på 5 ‰, hvorved bundforskydningsspændingen bliver 1,7 N m^2 for 10 % af en 1-års regn hvor kriteriet jf. Vollertsen og Thorndahl [2012] er 1,5 N m^2 for separate regnvandsledninger. En sænkning af bassinkanten med 36 cm vil resultere i, at bassinbunden for bassin 1 bliver placeret 50 cm under terræn, hvilket ikke vil resultere i problemer vedr. grundvandsspejlet. I forhold til omkostningerne ved etableringen af disse tre tørbassiner, kan Aalborg Kommune tilbyde den private grundejer at etablere disse anlæg uden omkostninger for disse. MIKE URBAN-modellen er vedlagt i Bilag K.10.

9.4 Effekt af LAR-løsninger

Effekten ved implementering af nedsivningsbassiner er blevet undersøgt med afløbsmodellen i MIKE URBAN. Løsningsforslaget er testet for hele Svenstrup-regnserien. En sam-

menligning af forholdene før og efter implementering af nedsivningsbassinerne ses på Figur 9.6 som en fordelingskurve for brønde med opstuvning til terræn.



Figur 9.6: Fordelingskurve for brønde med opstuvning til terræn før og efter implementering af nedsivningsbassiner.

Som det ses på Figur 9.6 har implementeringen af nedsivningsbassiner i Kærby en effekt på serviceniveauet. Effekten på andelen af brønde, hvori der sker opstuvning til kritisk kote reduceres for samtlige gentagelsesperioder. Ved en regnhændelse med en 10-års gentagelsesperiode er andelen af brønde med opstuvning til kritisk kote reduceret fra ca. 44 % til ca. 34 %. Gentagelsesperiode for opstuvning til terræn for bassinerne er beregnet ved hjælp af MIKE URBAN til at være over 28,9 år for Svenstrup-regnserien.

Det er endvidere undersøgt, hvorvidt implementeringen af nedsivningsbassinerne vil have en effekt på de udledte volumener af opspædet spildevand til Vestre Landgrøft. Det er valgt at sammenligne antallet af overløb og den totale overløbsvolumen for perioden 2010 til og med 2014 med resultaterne i Bilag G. Overløbsvolumenerne og antal er beskrevet i Tabel 9.2.

Scenarie	**Antal overløb** [år^{-1}]	**Total overløbsvolumen** [m^3 red. ha^{-1} år^{-1}]
Overløb fra Enggårdsgade		
Nuværende forhold	91	1559
Med nedsivningsbassiner	63	1028
Overløb fra Davids Allé		
Nuværende forhold	52	1662
Med nedsivningsbassiner	43	1411
Overløb fra Kjærs Mølle Vej		
Nuværende forhold	17	385
Med nedsivningsbassiner	17	385

Tabel 9.2: Effekten på overløbsvolumen til Vestre Landgrøft. Værdierne er et gennemsnit af de simulerede overløb for perioden 2010 til og med 2014 ved implementering af nedsivningsbassiner.

I Tabel 9.2 ses det, at der ved implementeringen af nedsivningsbassiner sker en reducering i antallet af overløb og overløbsvolumenerne. Det er for overløbsbygværket i Enggårdsgade, hvor effekten er størst, hvilket er forventeligt, da bassin 1 og 2 er placeret i oplandet til Enggårdsgade. Da pumpen i Enggårdsgade pumper til Davids Allé, vil overløbsbygværket på Davids Allé også blive påvirket udover den effekt implementeringen af bassin 3 vil medføre. Der forekommer ingen effekt for overløbsbygværket på Kjærs Mølle Vej, hvilket er forventeligt, da der ikke er implementeret nedsivningsbassiner til dette opland.

9.5 Delkonklusion

Ved implementering af LAR-løsninger vil forholdene i Kærby blive forbedret, både med hensyn til opstuvning af opspædet spildevand til terræn og i forhold til recipient belastningen. Dog vil der stadig forekomme problemer, hvorfor der er behov for at implementere LAR-løsningerne i sammenspil med andre løsninger, for at kunne opnå et tilfredsstillende serviceniveau. For eksempel, kan størrelsen af first flush bassiner, beskrevet i afsnit 8 på side 65, reduceres ved at implementere nedsivningsbassiner. Da der ikke forekommer opstuvning til terræn fra nedsivningsbassinerne, kan det tilbydes nærliggende grundejere at tilkoble sig nedsivningsbassinerne, for derved at nedsætte belastningen på afløbssystemet yderligere.

Del IV

Langsigtet Problemløsning

Der dimensioneres et separat regnvandssystem for Kærby i henhold til Vision 2100, som overholder nuværende funktionskrav til afløbssystemet. For regnhændelser med en gentagelsesperiode højere end 5 år, undersøges flere klimasikrende tiltag, der skal reducere omfanget af skader ved oversvømmelser. De klimasikrende tiltag vurderes på baggrund af etableringsomkostningerne og effekten af det enkelte tiltag.

Separatkloakering i Kærby 10

Aalborg Kommune ønsker at omlægge de nuværende fællessystemer til separate regn- og spildevandssystemer jf. Vision 2100, som er beskrevet i Afsnit 1.4. Derfor dimensioneres der et nyt separat regnvandssystem for Kærby i de områder, hvor separering af regn- og spildevand endnu ikke er foretaget.

10.1 Dimensionering af separat regnvandssystem

Det nye separate regnvandssystem dimensioneres efter de funktionskrav, der er opgivet af Spildevandskomiteen, så det overholder nuværende funktionskrav til afløbssystemet, om fuldtløbende ledninger en gang om året og opstuvning til terræn en gang hvert femte år jf. IDA Spildevandskomiteen [2005]. Dimensioneringen er foretaget på baggrund af nedenstående forudsætninger:

- Det nye separate regnvandssystem lægges i samme tracé som det nuværende fællessystem med de samme bidragende arealer.
- Regnvandet pumpes og udledes til Vestre Landgrøft og Østerå i de samme punkter som for det nuværende system.
- First flush bassinerne, beskrevet i Afsnit 8, ombygges til forsinkelsesbassiner for at overholde kravet om en udledning på maksimalt 1-2 $\mathrm{l\,s^{-1}\,ha^{-1}}$ jf. Miljøministeriet Naturstyrelsen [2013]. På baggrund af analysen af recipienterne, er det vurderet, at Vestre Landgrøft er hydraulisk belastet.
- De planlagte nedsivningsbassiner, beskrevet i Afsnit 9, er implementeret.
- Ledninger med diameteren Ø200 - Ø400 er i materialet PVC og ledninger med diameteren fra og med Ø450 er i beton, grundet enhedsprisen.
- Det formodes, at de nuværende lægningsdybder er tilstrækkelig i forhold til frostsikring, jordtryk og trafiklast.
- Der itereres for passende ledningsdiametre, som opfylder funktionskravet.
- Der ses bort fra dimensioneringen af et separat spildevandssystem i indeværende projekt.

Regnvandssystemet lægges i samme tracé, da de yderste ledningsstrækninger på nuværende tidspunkt ligger lige under frostfri dybde. Det nye regnvandssystem dimensioneres med beregningsniveau 1 og 2 og kontrolleres med beregningsniveau 3 jf. IDA Spildevandskomiteen [2005], hvor der bliver gjort brug af henholdsvis en kasseregn, CDS-regn til at dimensionere ledningsstørrelserne i systemet og en fremskrevet historisk regnserie til at teste det nydimensionerede systems robusthed. Der bruges endvidere en

sikkerhedsfaktor, som skal sikre, at det nye system kan overholde funktionskrav i hele dets levetid. For first flush bassinerne, der ombygges til forsinkelsesbassiner gælder det, at kapaciteten ikke må overskrides oftere end en gang hvert femte år. Derfor skal disse bassiner udvides som angivet i Tabel 10.1. Det nødvendige bassinvolumen er beregnet på baggrund af regneark tilhørende IDA Spildevandskomiteen [2014]. Bassinvolumenerne for Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Mølle Vej er beregnet for en afskærende ledningskapacitet på henholdsvis 46, 51 og 21 $\mathrm{l\,s^{-1}}$ og en gentagelsesperiode på 5 år.

Lokation	**Volumen for planlagte first flush bassiner** [$\mathrm{m^3}$]	**Nødvendig volumen for forsinkelsesbassiner** [$\mathrm{m^3}$]
Enggårdsgade	410	2550
Davids Allé	1000	2900
Kjærs Mølle Vej	155	1000

Tabel 10.1: Nødvendige volumener for forsinkelsesbassiner beregnet jf. IDA Spildevandskomiteen [2014], sammenlignet med volumener for de planlagte first flush bassiner.

Som det fremgår af Tabel 10.1 er det nødvendigt at udbygge de planlagte first flush bassiner ved en ombygning til forsinkelsesbassiner. Grunden til den store forøgelse af bassinerne er kravet om, at der ikke må ske overløb fra forsinkelsesbassinerne mere end en gang hvert femte år, hvorimod first flush bassinerne kan have et samlet overløb på 250 $\mathrm{m^3}$ red. $\mathrm{ha^{-1}}$ $\mathrm{år^{-1}}$. Det bør overvejes hvorvidt volumen af de planlagte first flush bassiner bør udvides, så de senere kan bruges som forsinkelsesbassiner uden behov for ombygning.

10.1.1 Dimensionsgivende regn

Der er brugt to forskellige regn til dimensioneringen af det nye separate regnvandssystem. Den første regn er en kasseregn med en 10 minutters varighed og en intensitet på 14,7 $\mu\mathrm{m\,s^{-1}}$, der svarer til en 1-års regn i år 2100. Denne regn bruges ved dimensionering i forhold til fuldtløbende ledninger. Den anden regn, der bruges er en 5-års CDS-regn, der er genereret på baggrund af koordinaterne for Svenstrup-regnmåleren med en årsmiddelnedbør på 702 mm jf. IDA Spildevandskomiteen [2014]. Svenstrup koordinaterne er valgt, da forrige resultater er regnet for Svenstrup-regnserien. Karakteristikaene for CDS-regnen er en varighed på 240 minutter og et tidsskridt på 1 minut. CDS-regnen bruges til at dimensionere det separate regnvandssystem, for at sikre at der ikke forekommer opstuvning til terræn oftere end ved en gentagelsesperiode på 5 år.

10.1.2 Sikkerhedsfaktor

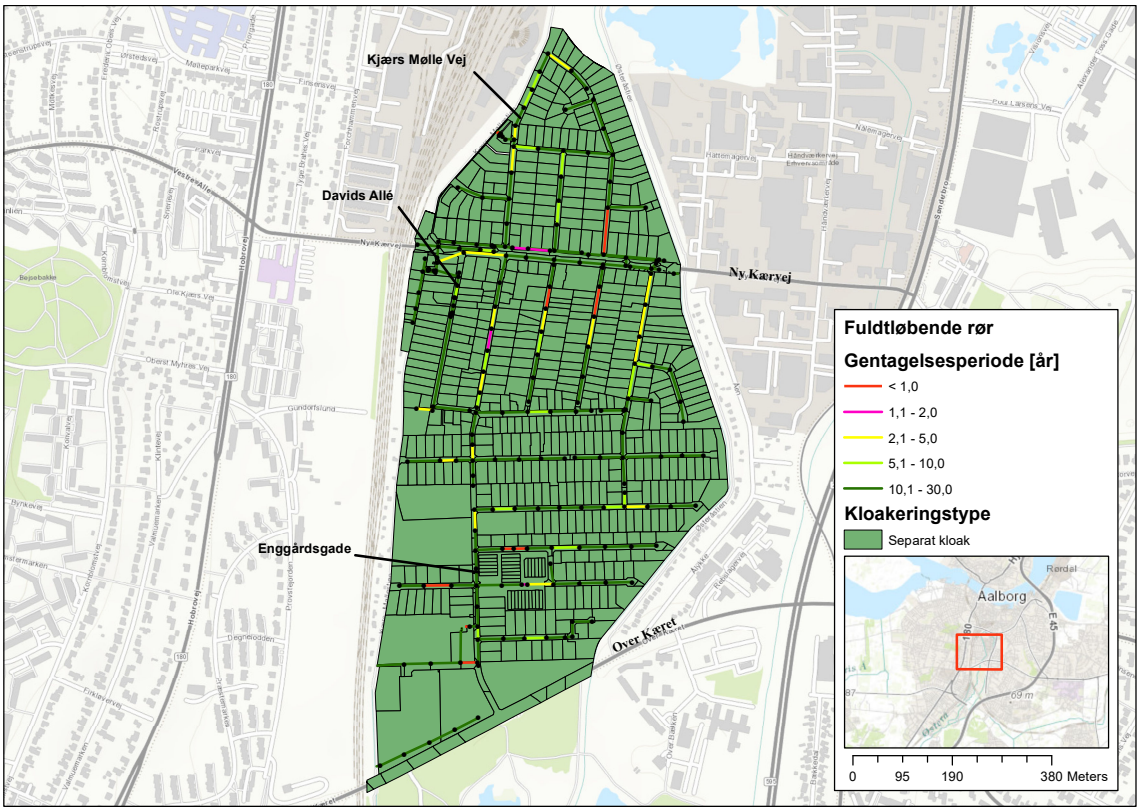
Begge regn er blevet ganget med en sikkerhedsfaktor for at sikre, at det nydimensionerede regnvandssystem også lever op til funktionskravet i år 2100. sikkerhedsfaktoren dækker over klimaændringer, modelusikkerheder og ændringer i arealanvendelsen. [IDA Spildevandskomiteen, 2005] Det vurderes at klimafaktoren er 1,25 for en regnhændelse med en gentagelsesperiode på 5 år jf. IDA Spildevandskomiteen [2014]. Usikkerhedsfaktoren sættes til 1,04 da der stadig vil forekomme en form for usikkerhed på trods af, at modellen er kalibreret. fortætningsfaktoren er sat til 1, da Kærby vurderes at være fuldt udbygget.

Dette resulterer i en samlet sikkerhedsfaktor på 1,3. Denne sikkerhedsfaktor er vurderet for CDS-regnen med en 5-års gentagelsesperiode, men bruges ligeledes for kasseregnen med en 1-års gentagelsesperiode.

Hvis en ledning har vist sig at blive fuldtløbende ved beregninger med 1-års kasseregnen, er ledningsdiameteren øget. Sker der efterfølgende opstuvning til kritisk kote ved brug 5-års CDS-regnen er ledningsdiameteren øget yderligere for at sikre, at det nye separate regnvandssystem lever op til funktionskravet. MIKE URBAN-modellen for det separate regnvandssystem er vedlagt i Elektronisk Bilag K.11 og ledningsplanen er fremgår af Bilag E.

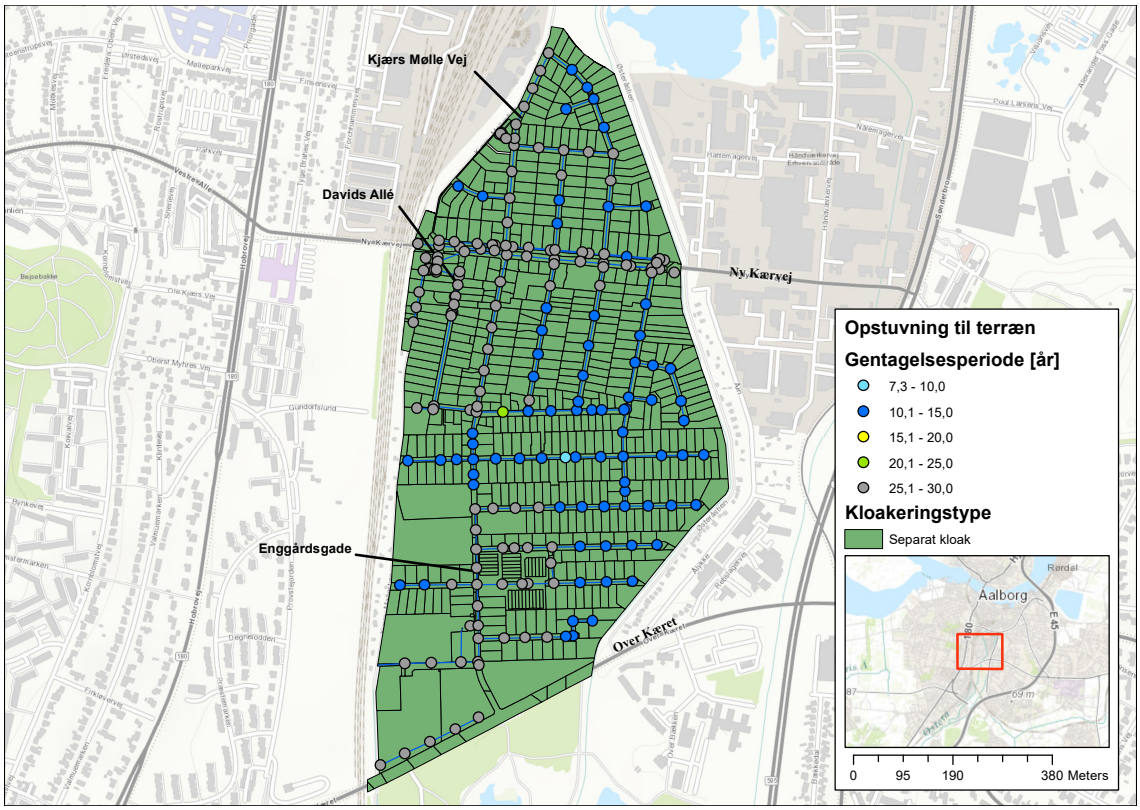
10.2 Undersøgelse af overholdelse af funktionspraksis

Det nye separate regnvandssystem er testet for beregningsniveau 3, med den fremskrevne Svenstrup-regnserie, for at undersøge, hvorvidt systemet lever op til gældende funktionskrav. Resultatet af ledningerne der bliver fuldtløbende oftere end en gang om året er vist på Figur 10.1.



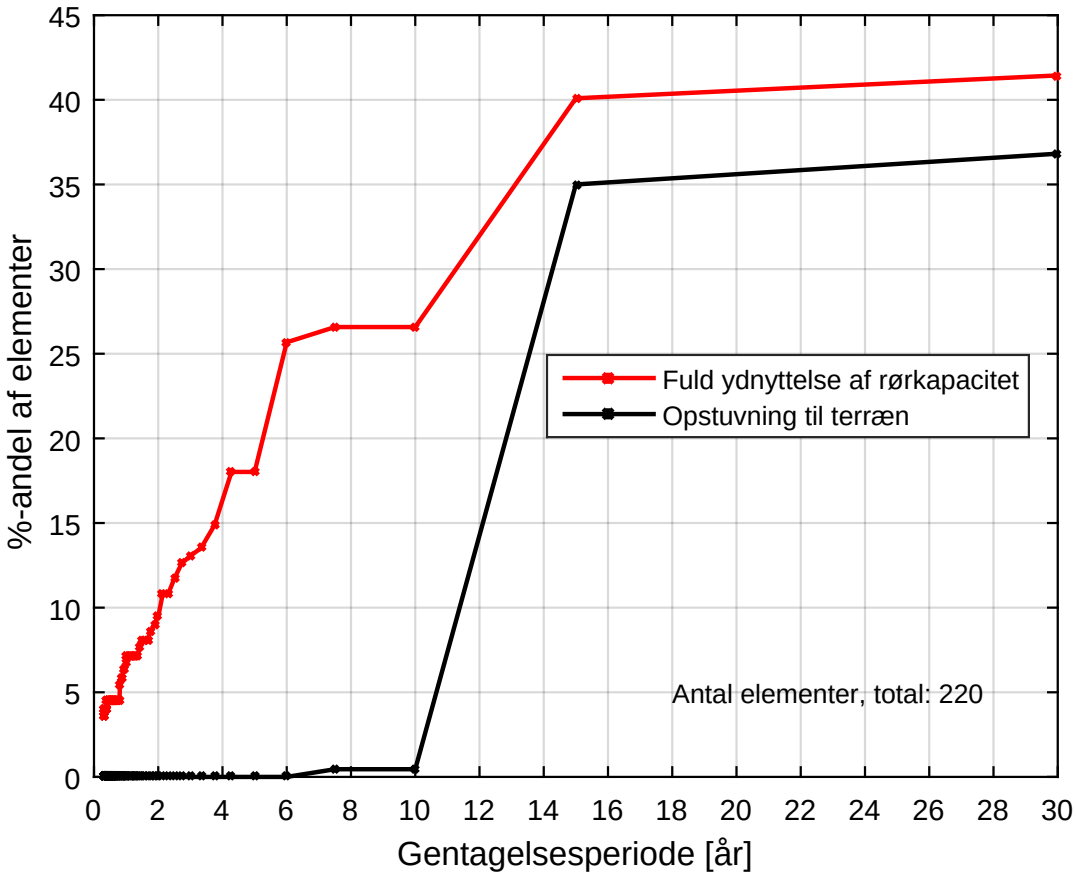
Figur 10.1: Gentagelsesperiode for fuldtløbende ledninger i Kærby.

Det ses på Figur 10.1, at der forekommer ledninger i det nydimensionerede regnvandssystem, som er fuldtløbende oftere end en gang om året. Resultatet af brønde, hvori der sker opstuvning oftere end en gang hvert femte år er vist på Figur 10.2.



Figur 10.2: Gentagelsesperiode for opstuvning i brøndene til terræn i Kærby.

Det ses på Figur 10.2, at det nye separate regnvandssystem lever op til funktionskravet med hensyn til opstuvning til terræn. Den mindste simulerede gentagelsesperiode for opstuvning til terræn er på 7,3 år. Derfor vurderes det, da funktionskravet er overholdt for opstuvning til terræn, at det nydimensionerede regnvandssystem har den fornødne kapacitet, på trods af enkelte ledningstrækninger bliver fuldtløbende oftere end en gang om året. Fordelingskurven for fuldtløbende ledninger og brønde med opstuvning til terræn er vist på Figur 10.3.



Figur 10.3: Fordelingskurven for fuldtløbende ledninger og brønde med opstuvning til terræn.

Figur 10.3 viser, at funktionskrav er overholdt med hensyn til opstuvning til terræn, men at en mindre andel på 7 % af ledningerne bliver fuldtløbende mere end en gang om året.

10.3 Delkonklusion

Det nye separate regnvandssystem er dimensioneret efter beregningsniveau 1 og 2, og er herefter testet ved beregningsniveau 3, hvor der er anvendt en fremskrevet historisk regnserie. Dermed vurderes det, at systemet som minimum vil leve op til gældende funktionskrav jf. IDA Spildevandskomiteen [2005]frem til år 2130, hvor den fremskrevne regnserie stopper, da regnserien er fremskrevet til perioden år 2100-2130. Det separate regnvand pumpes fra afløbssystemet til recipienterne med $21\,\mathrm{s}^{-1}\,\mathrm{ha}^{-1}$.

Klimasikring af Kærby 11

Ved regnhændelser, der har en gentagelsesperiode højere end 5 år, vil der stadig være risiko for oversvømmelser med økonomiske konsekvenser til følge. Derfor er det nydimensionerede regnvandssystem testet for tre klimasikrende tiltag ved brug af en MIKE FLOOD-model, som er beskrevet i Afsnit 6.1. Af de tre klimasikrende tiltag udvælges det bedste, vurderet på baggrund af de økonomiske omkostninger for etableringen samt effekten af det enkelte tiltag. Der ses for indeværende projekt bort fra driftsomkostningerne. Det klimasikrende tiltag testes endvidere for tre historiske regnhændelser, med henblik på at vurdere robustheden af det valgte klimasikrende tiltag.

11.1 Klimasikrende tiltag

Der er opstillet fire scenarier, hvor scenarie 2,3 og 4 medtager de tre klimasikrende tiltag som det nydimensionerede regnvandssystem er testet for er:

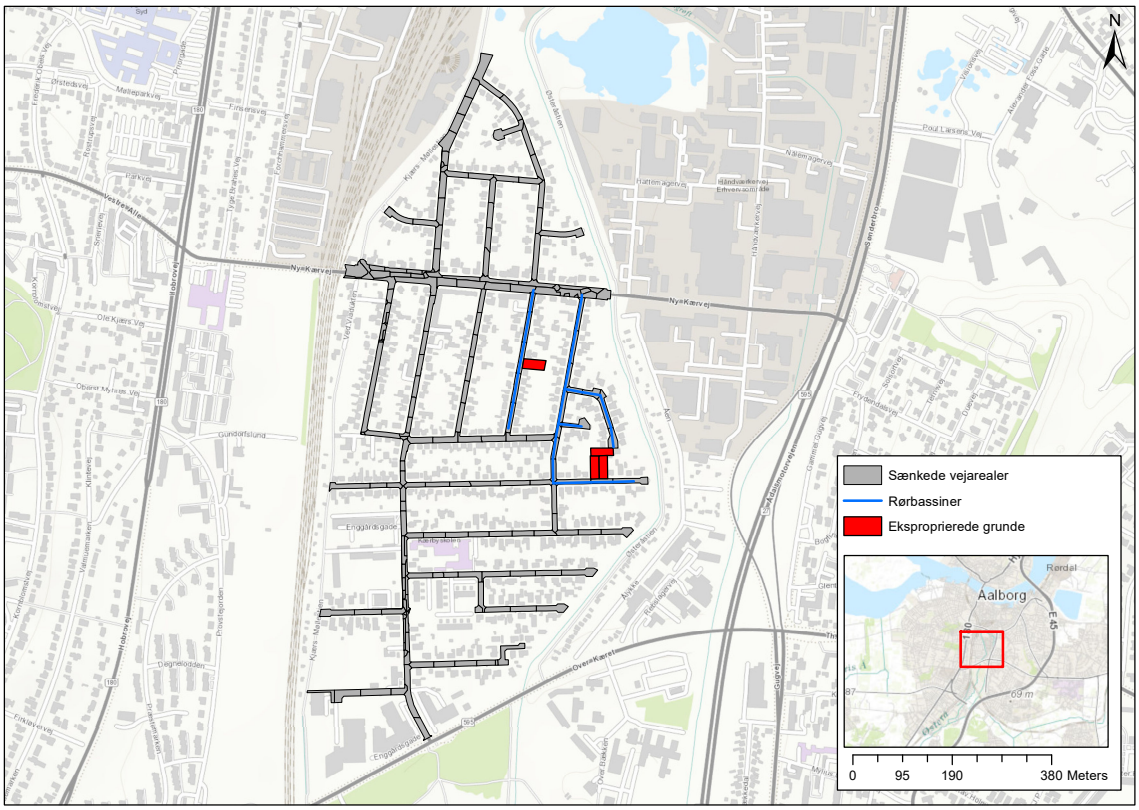
1. Separat regnvandssystem uden yderligere klimasikrende tiltag.
2. Separat regnvandssystem samt sænkede vejarealer.
3. Separat regnvandssystem samt sænkede vejarealer, hvor der yderligere er implementeret rørbassiner.
4. Separat regnvandssystem samt sænkede vejarealer, hvor der er eksproprieret grunde til frie områder for kontrollerede oversvømmelser.

Der er på nuværende tidspunkt ikke defineret et funktionskrav for vand på terræn for Aalborg Kommunes kloakopland. Derfor defineres funktionskravet for vand på terræn for indeværende projekt som følgende:

Der må maksimalt forekomme 0,05 m vand på terræn på privat grund ved en gentagelsesperiode på 10 år.

Valget af den dimensionsgivende vanddybde er foretaget på baggrund af en vurdering af, at 0,05 m vand på terræn forholdsvis let kan holdes væk fra kælderskakter og kældervinduer ved simple foranstaltninger. Gentagelsesperioden for funktionskravet er valgt, da dette er en fordobling af funktionskravet for opstuvning til terræn, og er sat til 10 år for at begrænse omkostningerne for de klimasikrende løsninger. Det vurderes at etableringsomkostningerne for yderligere klimatiltag vil overstige skadesomkostningerne ved regnhændelser med højere gentagelsesperioder end 10 år.

De sænkede vejarealer, strækninger for rørbassiner og eksproprierede grunde er vist på Figur 11.1.



Figur 11.1: Sænkede vejarealer, strækninger for rørbassiner og ekspropierede grunde i Kærby for henholdsvis scenarie 2, 3 og 4.

Strækningerne for rørbassiner og de ekspropierede grunde for scenarie 3 og 4 er valgt på baggrund af den simulerede oversvømmelsesudbredelse for scenarie 2.

Alle fire scenarier simuleres med en CDS-regn med en 10-års gentagelsesperiode og en varighed på 240 minutter beregnet for lokationen af Svenstrup-regnmåleren med regneark tilhørende IDA Spildevandskomiteen [2014]. CDS-regnen er endvidere regnet med en sikkerhedsfaktor for at afspejle forholdende i år 2100. Der bruges en CDS-regn til dimensioneringen af de klimasikrende tiltag på trods af, at det er vurderet, at CDS-regn er mindre anvendelige ved oversvømmelsesmodellering jf. Afsnit 6, da en dimensionering med historiske regnhændelser ville være langt mere omfattende.

Som sikkerhedsfaktor anvendes værdien 1,3, der er bestemt i Afsnit 10.1.2. Denne sikkerhedsfaktor er vurderet til at være realistisk trods den øgede gentagelsesperiode.

Sikkerhedsfaktoren medtages i MIKE FLOOD-modellen således, at denne kan simuleres for år 2100, den implementeres i MIKE FLOOD-modellen ved at gange den på regn-skaleringsfaktorerne for de forskellige deloplande. De nye regn-skaleringsfaktorer for de tre deloplande er vist i Tabel 11.1.

Delopland	Oprindelig regn-skaleringsfaktor [-]	Fremskrevet regn-skaleringsfaktor [-]
Enggårdsgade	0,773	1,02
Davids Allé	0,793	1,04
Kjærs Mølle Vej	0,686	0,90

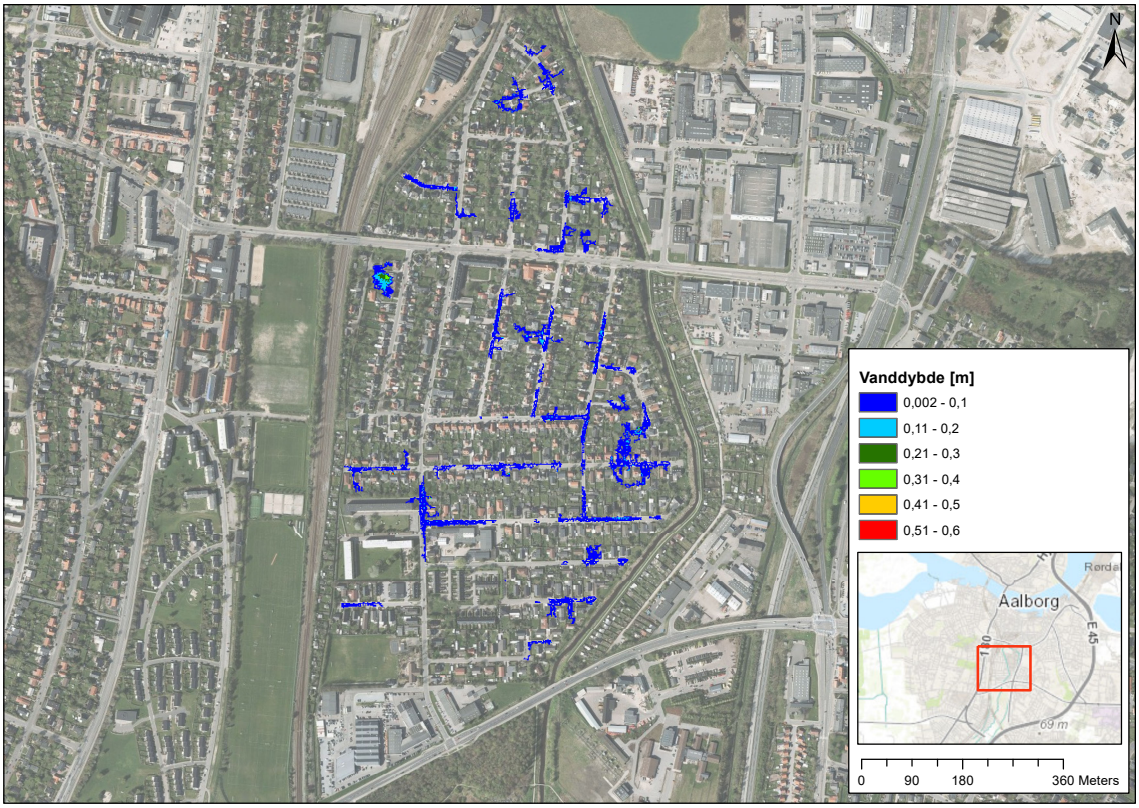
Tabel 11.1: Regn-skaleringsfaktorer for de tre deloplande omregnet på baggrund af sikkerhedsfaktoren.

Regn-skaleringsfaktoren for Davids Allé gælder ligeledes for deloplandet til Ny Kærvej. Oplandene til U0.1.48b har fået samme faktor som for Enggårdsgade.

11.1.1 Scenarie 1

Scenarie 1 tester det nydimensionerede separate regnvandssystem med en CDS-regn med en 10-års gentagelsesperiode. CDS-regnen er anvendt med en sikkerhedsfaktor, hvorved oversvømmelsesudbredelsen for samme CDS-regn i år 2100 findes.

På Figur 11.2 ses udbredelsen og dybden af oversvømmelsen beregnet for scenarie 1.



Figur 11.2: Oversvømmelsesudbredelse ved scenarie 1. [Geodatastyrelsen, 2015a]

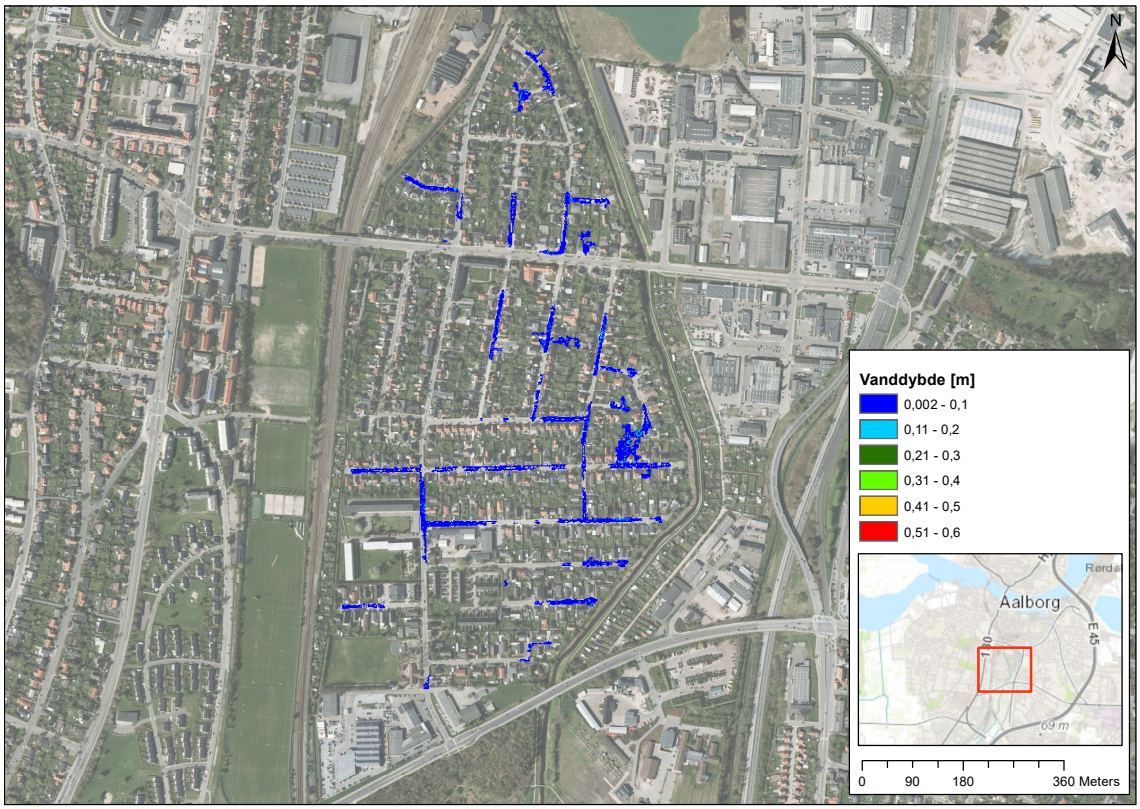
De oversvømmede arealer, der ses på Figur 11.2 viser, at der forekommer oversvømmelser af vejarealer og grunde. De dybeste vanddybder forekommer ved pumpestationen på Davids

Allé. Det ses endvidere, at der i den nordøstlige, østlige og sydøstlige del af Kærby flere steder forekommer vand på terræn på private grunde. Den samlede oversvømmelse udgør et areal på 2,55 ha, hvoraf 1,13 ha er private grunde og 1,42 ha er vejarealer.

11.1.2 Scenarie 2

For scenarie 2 ændres den anvendte højdemodel, der bruges i MIKE FLOOD-modellen, hvor alle vejarealer sænkes med 0,1 m i forhold til nuværende terrænkote. Derved skabes der et ekstra magasineringsvolumen, hvor vandet kan stuve op, uden at oversvømme og skade omkringliggende grunde og bygninger.

På Figur 11.3 ses udbredelsen og dybden af oversvømmelsen beregnet for scenarie 2.



Figur 11.3: Oversvømmelsesudbredelse ved scenarie 2. [Geodatastyrelsen, 2015a]

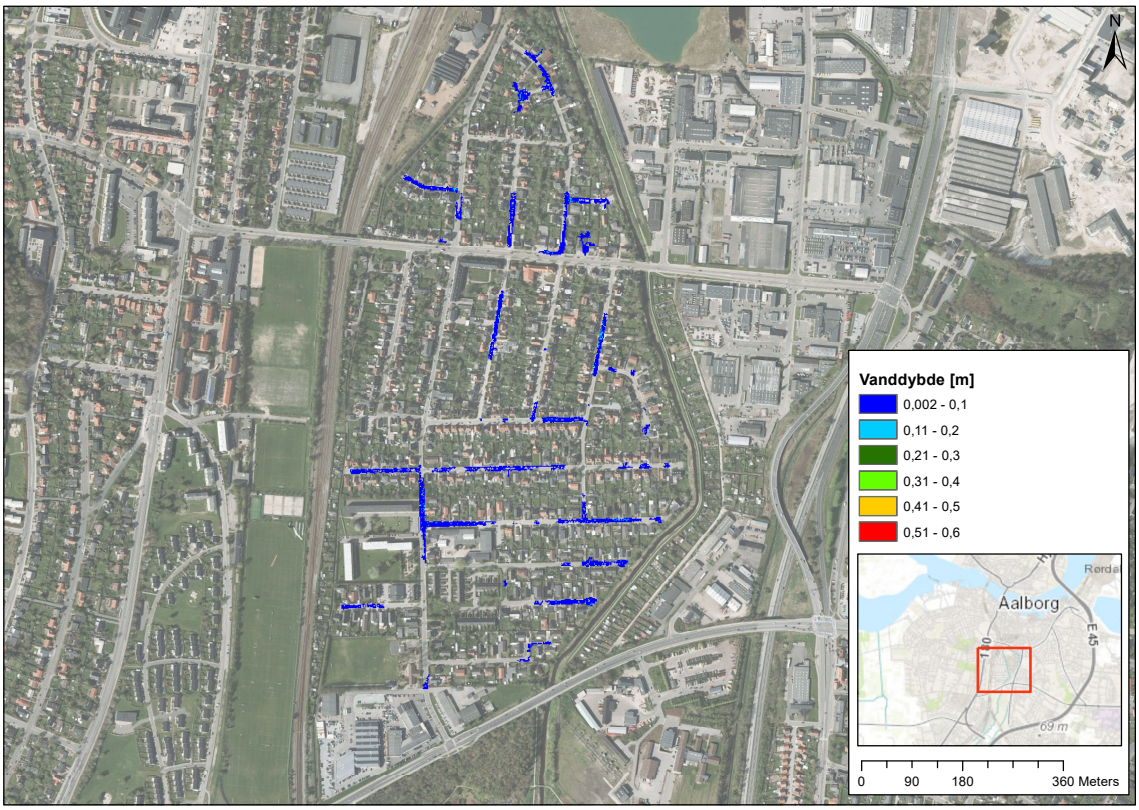
Ved at sænke vejarealet med 0,1 m i hele Kærby ses det, at udbredelsen af oversvømmelser ved de private grundejere er reduceret de fleste steder sammenlignet med scenarie 1. Dog ses det også, at der enkelte steder forekommer vand på terræn ved de private grundejere, hvor det ikke forekom ved scenarie 1. Den samlede oversvømmelse udgør et areal på 2,17 ha, hvoraf 0,41 ha er private grunde og 1,76 ha er vejarealer.

11.1.3 Scenarie 3

Scenarie 3 bygger videre på Scenarie 2 ved at etablere rørbassiner i de mest udsatte områder i Kærby. Derved tilbageholdes der et større vandvolumen i regnvandssystemet, hvorved en eventuel oversvømmelse kan reduceret. Rørbassinerne er dimensioneret ved en

iterationsproces for at opnå de optimale rørdimensioner. Dimensionerne for rørbassinerne er vist i Bilag E.

På Figur 11.4 ses udbredelsen og dybden af oversvømmelsen beregnet for scenarie 3.



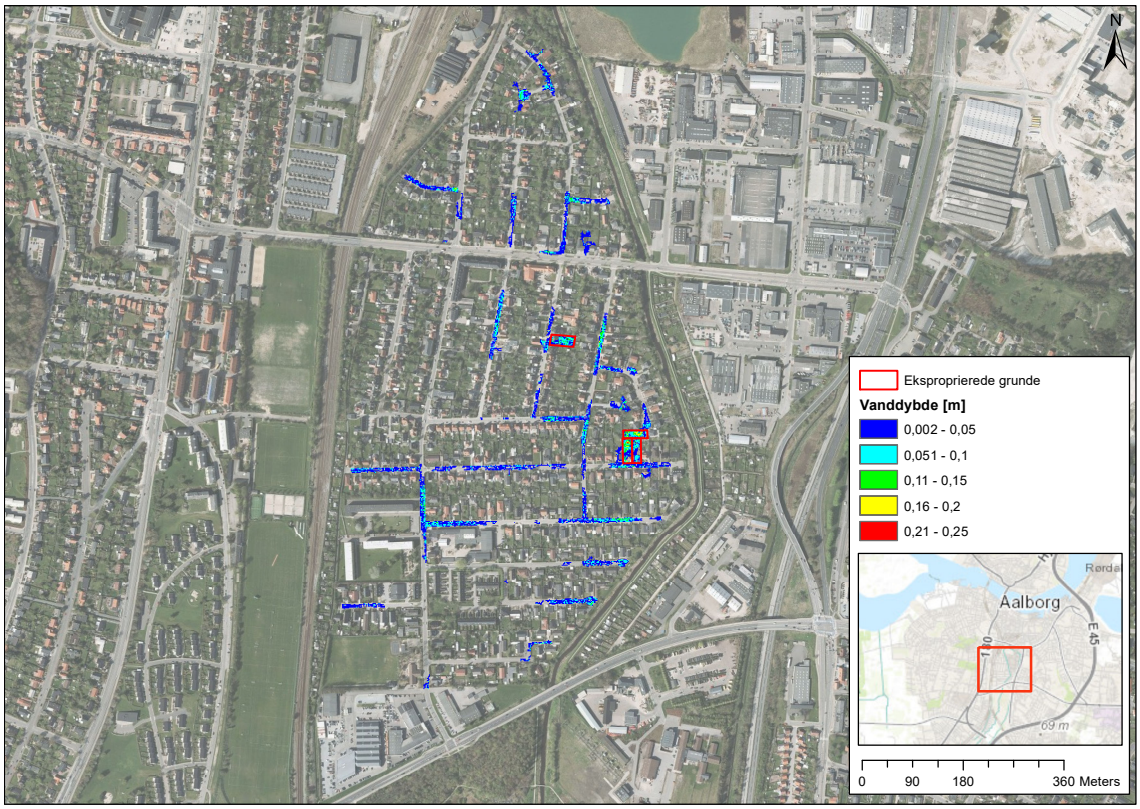
Figur 11.4: Oversvømmelsesudbredelse ved scenarie 3. [Geodatastyrelsen, 2015a]

Ved implementeringen af rørbassiner ses det på Figur 11.4, at oversvømmelsesudbredelsen ved de private grundejere er reduceret til maksimalt 0,05 m vand på terræn og flere steder er oversvømmelsesudbredelsen nu kun i vejarealerne. Dermed overholder dette scenarie det definerede funktionskrav til vand på terræn. Den samlede oversvømmelse udgør et areal på 1,59 ha, hvoraf 0,11 ha udgør private grunde og 1,48 ha udgør vejarealer.

11.1.4 Scenarie 4

Scenarie 4 bygger ligeledes videre på scenarie 2. Her undersøges muligheden for ekspropriering af ejendomme i Kærby til brug for frie arealer. Formålet med de frie arealer er at have områder, hvor overfladevand kan tilledes og derved kontrollere eventuelle oversvømmelser, hvorved vandet ikke vil påvirke andre bebyggede grunde med en risiko for at forvolde skade. De frie arealer er sænket 0,5 m i forhold til det omkringliggende terræn, hvorved de vil fungere som bassiner ved oversvømmelser. De fri arealer er tiltænkt, at blive tilkoblet afløbssystemet så de kan tømmes ved gravitation, når der igen er kapacitet i afløbssystemet. Der er udvalgt fire grunde i Kærby til ekspropriering på baggrund af oversvømmelsesudbredelsen, som er beregnet for scenarie 2.

På Figur 11.5 ses udbredelsen og dybden af oversvømmelsen beregnet for scenarie 4.



Figur 11.5: Oversvømmelsesudbredelse ved scenarie 4. [Geodatastyrelsen, 2015a]

Ved at Ekspropriere fire ejendomme i Kærby og derefter ombygge dem til frie arealer, overskrider vanddybden for oversvømmelse ved de private grundejere ikke 0,05 m ved en gentagelsesperiode på 10 år. Ved dette scenarie bliver vandet håndteret på overfladen som det ses på Figur 11.5, hvor de eksproprierede grunde opmagasinere store dele af det opstuvede vand. Den samlede oversvømmelse udgøre et areal på 2,08 ha, hvoraf 0,16 ha er private grunde og 1,92 ha er vejarealer og frie arealer.

11.2 Vurdering af klimasikrende tiltag

For at vurdere den bedste klimasikrende løsning for Kærby, vil de fire scenarier blive vurderet på baggrund af de økonomiske omkostninger for det enkelte tiltag, samt effekten det enkelte tiltag har på oversvømmelsesudbredelsen og vanddybden ved de private grundejere.

11.2.1 Anlægsomkostninger

Anlægsomkostningerne alene for det nydimensionerede regnvandssystem er foretaget som en overslagsberegning på baggrund af en logaritmisk sammenhæng mellem pris og ledningsdimension pr. meter jf. Leif Winther [2011]. Denne overslagsberegning indeholder udgifter til materialer samt anlægsomkostninger. Anlægsomkostningerne for de fire scenarier er vist i Tabel 11.2. Ekspropriationsomkostningerne er overslag på baggrund af en gennemsnitlig opkøbspris for grundene. Grundprisen er vurderet på baggrund af nuværende boliger, der er til salg i Kærby til 3.000.000 kr. jf. Home [2016].

Etableringsprisen for et enkelt bassin er vurderet til 100.000 kr., hvor prisen indeholder nedrivning af hus, udgravning af det frie areal og tilkobling til kloaksystemet.

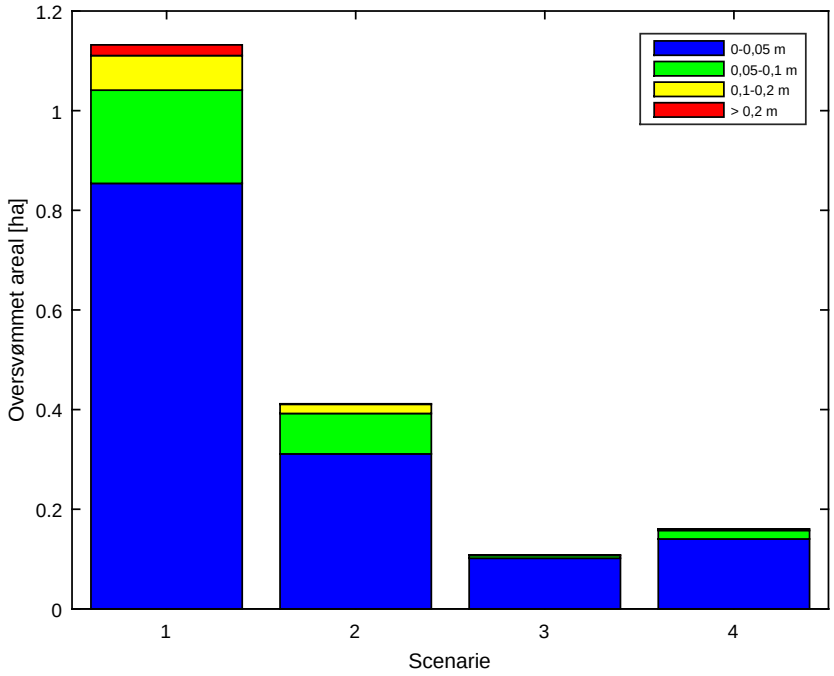
Scenarie	**Anlægs-omkostninger** [kr.]	**Ekspropriations-omkostninger** [kr.]	**Total-Omkostninger** [kr.]
1	55.730.000	0	55.730.000
2	55.730.000	0	55.730.000
3	56.621.000	0	56.621.000
4	56.130.000	12.000.000	68.130.000

Tabel 11.2: Anlægsomkostninger for de fire scenarier.

Som det fremgår af Tabel 11.2, er anlægsomkostningerne for scenarie 1 og 2 ens, da sænkningen af vejarealerne antages udført i forbindelse med etableringen af det separate regnvandssystem. Anlægsomkostningerne for scenarie 3 er 891.000 kr. højere sammenlignet med scenarie 1 og 2, hvilket er en forøgelse på 1,6 %. Dette skyldes den højere pris for de benyttede rør ved rørbassinerne. For Scenarie 4 er anlægsomkostningerne 12.400.000 kr. større sammenlignet med scenarie 1 og 2, og 11.509.000 kr. større sammenlignet med scenarie 3. Dette resulterer i en forøgelse af anlægsprisen på 18,2 % sammenlignet med scenarie 1 og 2, og 16,9 % sammenlignet med scenarie 3. Udregningerne af anlægsomkostningerne fremgår af Elektronisk Bilag K.12.

11.2.2 Effekt af klimasikrende tiltag

Effekten af de fire scenarier er vurderet ud fra arealet af private grunde, der bliver oversvømmet ved beregninger med en 10-års CDS-regn. Der er set bort fra det oversvømmede vejareal, da det er ønsket at tilbageholde opstuvet vand på disse arealer. Oversvømmelsesarealet på de private grunde er vist på Figur 11.6.



Figur 11.6: Beregnet oversvømmet areal på private grunde for de fire scenarier.

Det ses på Figur 11.6, at der ved scenarie 1 oversvømmes 1,13 ha, hvoraf 0,28 ha af det oversvømmede areal har en vanddybde på mere end de acceptable 0,05 m. For scenarie 2, hvor vejarealerne er sænket med 0,1 m, er det oversvømmede areal betydeligt reduceret til 0,41 ha sammenlignet med scenarie 1. Der forekommer dog stadig oversvømmede områder på 0,1 ha, hvor vandstanden overstiger 0,05 m. Scenarie 3 har den mindste oversvømmelsesudbredelse på 0,11 ha, hvilket er en fjerdedel af scenarie 2. For scenarie 3 ses det endvidere, at der er 64 m^2 hvor vandstanden overstiger 0,05 m. Dette kan skyldes, at der er lavninger på nogle af de private grunde, hvor vanddybden vil blive dybere. Scenarie 4 har et oversvømmet areal på 0,16 ha, hvor arealet af områder med en vanddybde på mere end 0,05 m er på 202 m^2.

11.2.3 Valg af klimasikrende tiltag

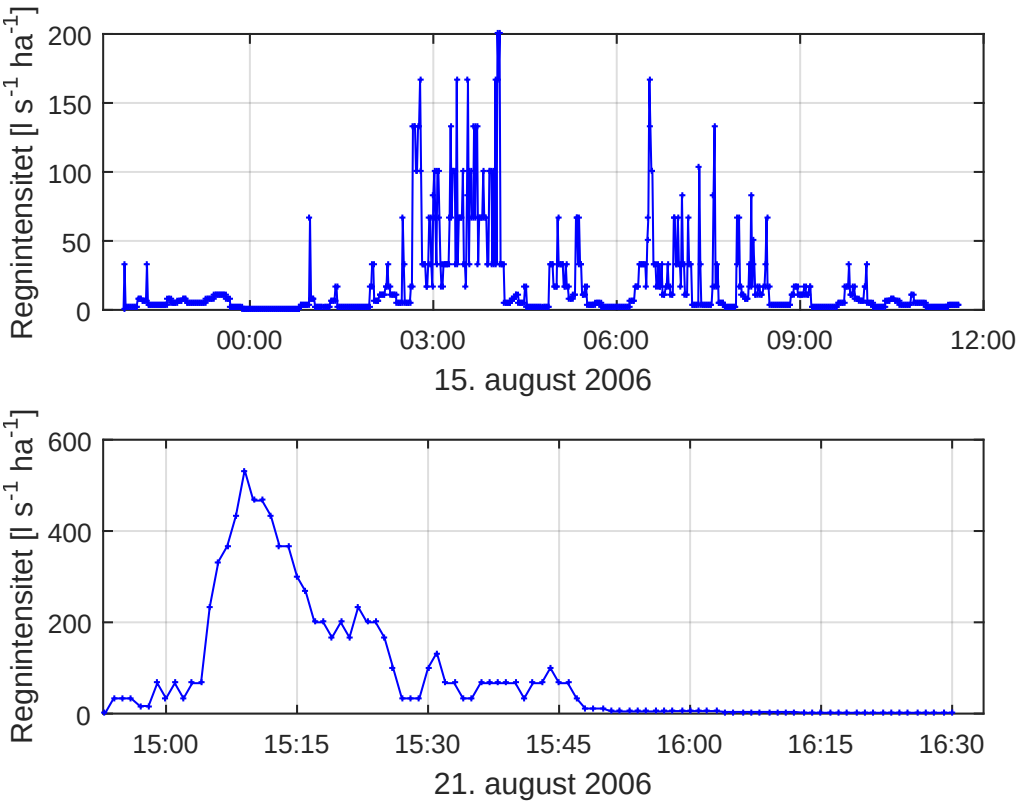
Den bedste klimasikrende løsning er valgt på baggrund af en samlet vurdering af etableringsomkostningerne og effekten af det enkelte tiltag. Scenarie 1 og 2 er de billigste. Oversvømmelsen ved en 10-års CDS-regn for scenarie 1, der er uden klimasikrende tiltag, er dog ikke acceptabelt. Det samme gælder scenarie 2, der på trods af det sænkede vejareal, stadig vil oversvømme flere private grunde med en vanddybde på mere end funktionskravet på 0,05 m, hvorfor disse to scenarier er valgt fra. Scenarie 3, der koster ca. 891.000 kr. mere end scenarie 1 og 2, resulterer i et betydeligt mindre oversvømmet areal med lave vandstande. Scenarie 4 derimod koster ca. 11.509.000 kr. mere end scenarie 3 og har en større oversvømmelsesudbredelse og flere områder med en vanddybde på over 0,05 m. Derfor vælges scenarie 3, hvor der er implementeret rørbassiner i den østlige del af Kærby som den bedste klimasikrende løsning.

11.3 Robusthed af klimasikrende tiltag

Robustheden af den valgte klimasikrende løsning er testet for tre fremskrevne historiske regnhændelser, for at undersøge oversvømmelsesudbredelsen under forskellige ekstrem regn. Robustheden er testet for år 2100, hvorfor der anvendes en sikkerhedsfaktor ganget på de tre historiske regnhændelser. Den anvendte sikkerhedsfaktor er bestemt til 1,3 jf. Afsnit 10.1.2.

11.3.1 Historiske regnhændelser

De tre historiske regnhændelser, som er anvendt til at teste den klimasikrende løsning, er alle målt med Søvangen-regnmåleren. Hændelserne fandt sted d. 15. august 2006, d. 21. august 2006 og d. 6. august 2012. Regnhændelsen d. 6. august 2012 er beskrevet i Afsnit 6.2. Hændelsen d. 15. august 2006 havde en gentagelsesperiode på 150 år for en regnvarighed over 720 minutter og hændelsen d. 21. august 2006 havde en gentagelsesperiode på 220 år for en regnvarighed over 10 minutter. Gentagelsesperioden er beregnet jf. IDA Spildevandskomiteen [2014]. Regnintensiteten for regnhændelserne d. 15. og 21. august 2006 er vist på Figur 11.7.

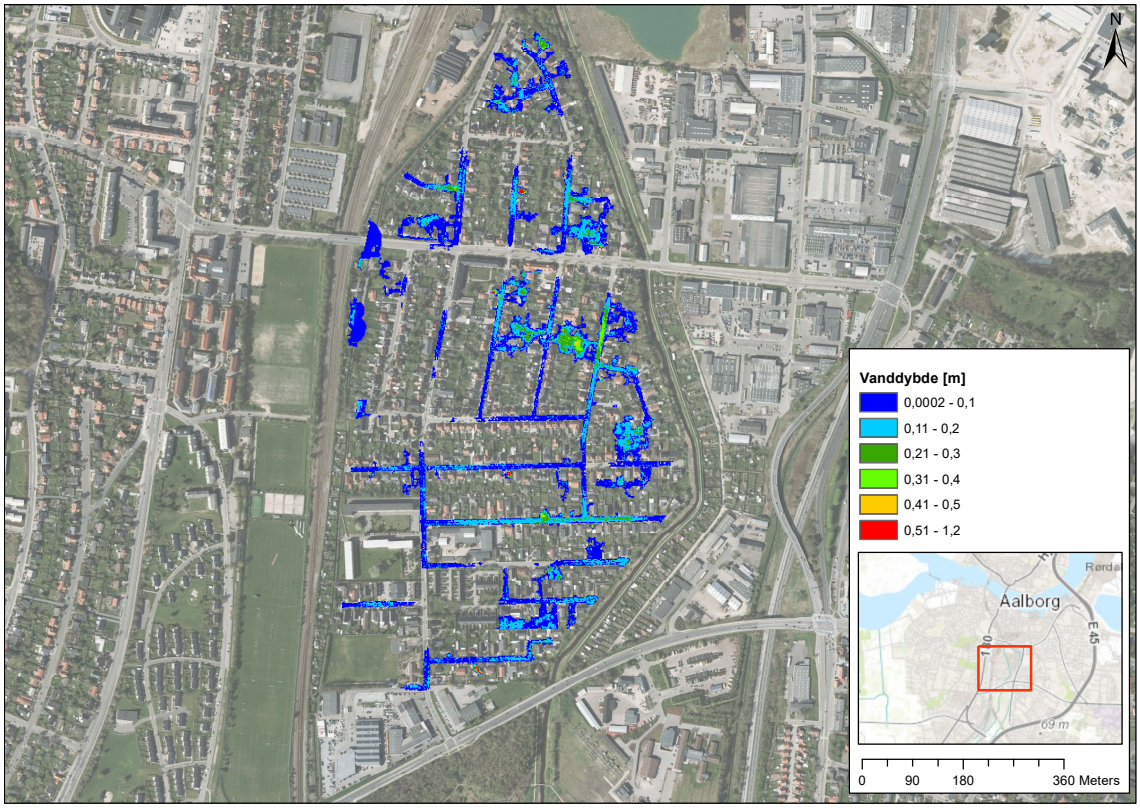


Figur 11.7: Regnhændelserne d. 15. og 21. august 2006 målt af Søvangen-regnmåleren.

Den samlede regndybde for hændelserne d. 15. og 21. august 2006 er henholdsvis 85 og 50 mm.

11.3.2 Resultat

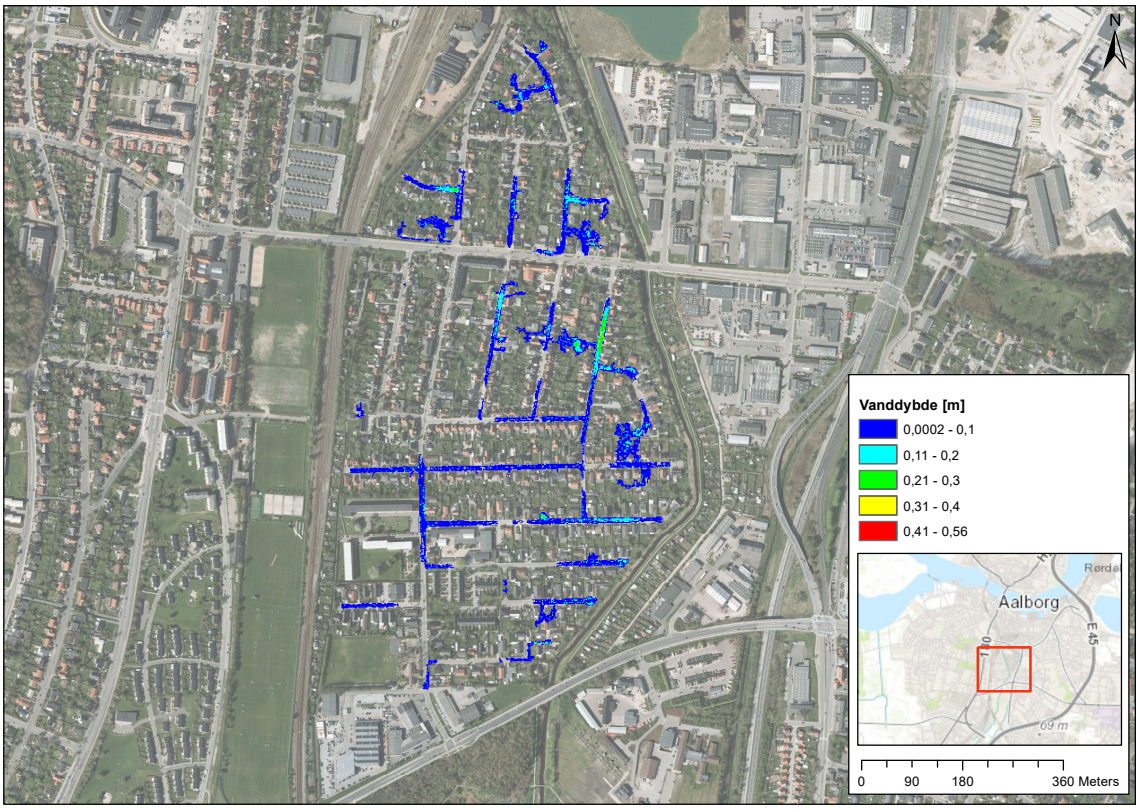
De tre fremskrevne regnhændelser er testet i MIKE FLOOD-modellen, for at bestemme det oversvømmede areal på private grunde. Den mest kritiske hændelse var fra d. 21. august 2006, som resulterede i det største oversvømmede areal samt de største vanddybder på terræn. Oversvømmelsesudbredelsen for den fremskrevne regnhændelse fra d. 21. august 2006 ses på Figur 11.8.



Figur 11.8: Oversvømmelsesudbredelse for den fremskrevne regnhændelse fra d. 21. august 2006. [Geodatastyrelsen, 2015a]

Det ses på Figur 11.8, at der forekommer flere oversvømmede områder, hvor vanddybden på private grunde, hvor vanddybden maksimalt er simuleret til 1,24 m. Det klimasikrende tiltag har derfor ikke kapaciteten til at kunne håndtere et så kraftigt skybrud. Dog kan det heller ikke forventes, at et klimasikrende tiltag, der er dimensioneret til at sikre private grunde med en gentagelsesperiode på 10 år, kan håndtere regnhændelser med en langt højere gentagelsesperiode.

Oversvømmelsesudbredelsen for den fremskrevne regnhændelse fra d. 6. august 2012 er vist på Figur 11.9.

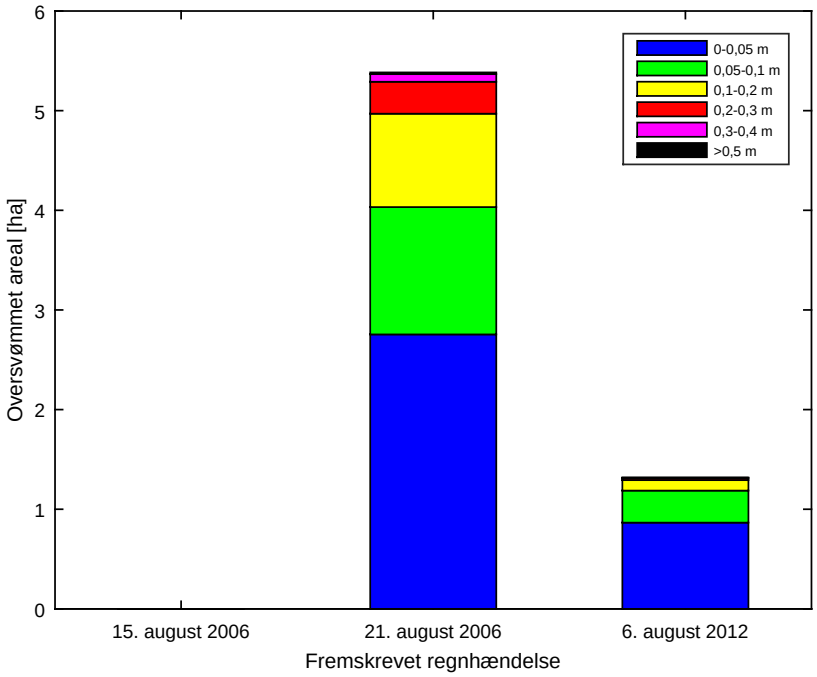


Figur 11.9: Oversvømmelsesudbredelse for den fremskrevne regnhændelse fra d. 6. august 2012. [Geodatastyrelsen, 2015a]

Figur 11.9 viser, at den fremskrevne regnhændelse fra d. 6. august 2012 ikke resulterer i de samme oversvømmelser og vanddybder som den fremskrevne regnhændelse fra d. 21. august 2006. Dette er forventeligt, da den anvendte regnserie har en gentagelsesperiode på 37 år for en varighed på 60 minutter sammenlignet med 220 år for en varighed på 10 minutter. På trods af den mindre gentagelsesperiode, er der stadig flere private grunde, som bliver oversvømmet. Vanddybden ved de oversvømmede private grunde er dog ikke højere end 0,1 m med enkelte undtagelser, hvor vanddybden maksimalt er simuleret til 0,56 m.

For den fremskrevne regnhændelse fra d. 15. august 2006 forekommer der ingen oversvømmelser på trods af gentagelsesperioden på 150 år. Dette skyldes, at regnhændelsen er langvarig med en mindre intensitet. Gentagelsesperioden for de fremskrevne regnhændelser fra d. 21. august 2006 og d. 6. august 2012 er derimod kortvarige regnhændelser af skybrudskarakter. Dette indikerer, at det klimasikrende tiltag kan håndtere længerevarende kraftige regnhændelser langt bedre en kortvarige skybrud.

På Figur 11.10 ses en sammenligning af det oversvømmede areal på private grunde for de tre fremskrevne regnhændelser.



Figur 11.10: Beregnet oversvømmet areal på private grunde for regnhændelserne d. 15. og 21. august 2006 samt d. 6 august 2012.

Det ses på Figur 11.10, at der for regnhændelsen d. 21. august 2006 er oversvømmet 5,38 ha af de private grunde, hvoraf der for 2,63 ha af det oversvømmede areal forekommer en vanddybde større end 0,05 m. For regnhændelsen d. 6. august 2012 bliver 1,32 ha af private grunde oversvømmet hvor af 0,45 ha opnår en vanddybde større end 0,05 m.

11.4 Delkonklusion

Som klimasikrende tiltag i Kærby vurderes det, at den bedste løsning indebærer sænkning af vejarealer samt implementering af rørbassiner. Vurderingen er foretaget på baggrund af en overslagsberegning for anlægsudgifterne samt for oversvømmelsesudbredelsen og vanddybden. På baggrund af en analyse af det klimasikrende tiltags robusthed, vurderes afløbssystemet med det implementerede tiltag, til at kunne håndtere langvarige kraftige regnhændelser. Dog er systemet med det implementerede tiltag sårbar over for kortvarige kraftige regnhændelser af skybrudskarakter.

Del V

Afrunding

Konklusion 12

Analysen af forholdene i Kærby viser, at der er problemer med opstuvning til terræn fra kloaksystemet, kapacitetsproblemer i Vestre Landgrøft samt ugunstige forhold for implementering af LAR-løsninger.

Det nuværende serviceniveau i Kærby er beregnet med en afløbsmodel i MIKE URBAN. Modelresultatet viser, at der for det nuværende system forekommer en del ledninger, der er fuldtløbende oftere end en gang hvert andet år, og brønde, hvori der sker opstuvning oftere end en gang hvert tiende år, hvorfor serviceniveauet i Kærby ikke overholder de gældende funktionskrav. Modelresultaterne viser endvidere, at forholdene er mest kritiske i den sydlige og østlige del af Kærby, hvor der kan forekomme opstuvning til terræn op til flere gange om året. På baggrund af det ringe serviceniveau er der udarbejdet en oversvømmelsesmodel i MIKE URBAN, der viser at flere områder i Kærby bliver oversvømmet ved kraftige regnhændelser.

I forbindelse med undersøgelsen af det nuværende serviceniveau, er afløbsmodellen i MIKE URBAN testet med den simple overflademodel A og den mere avancerede overflademodel B. De to overflademodeller er kalibreret og valideret for de samme perioder og observerede vandstande, med henblik på at sammenligne dem og afgøre overflademodellen med det bedste fit. Sammenligningen af de to overflademodeller resulterede i, at overflademodel B giver de bedste resultater sammenlignet med målte vandstande i pumpesumpene, hvor overflademodel A er langt hurtigere at sætte op.

Restkapaciteten i Østerå og Vestre Landgrøft er undersøgt med en vandløbsmodel, der ligeledes er opsat i MIKE URBAN. Vandløbsmodellen viser, at Østerå ikke stuver op ved Kærby ved en gentagelsesperiode på 28,9 år, og at Vestre Landgrøft har kapacitetsproblemer i den sydvestlige del af Kærby, hvor der forekommer opstuvning til terræn oftere end en gang om året. For den udsatte del af Kærby benyttes oversvømmelsesmodellen i MIKE URBAN, som viser, at en oversvømmelse har få eller ingen konsekvenser.

Forholdene for det nuværende afløbssystem i Kærby samt Østerå og Vestre Landgrøft er videre undersøgt med en klimafremskrevet historisk regnhændelse. Regnhændelsen er fremskrevet til perioden 2100 til 2130 og afspejler de forventede forhold som resultat af klimaændringer i denne periode. Resultatet for afløbssystemet viser, at det forventede serviceniveau i år 2100 er drastisk forværret sammenlignet med det nuværende. Forholdene i Østerå er uændrede, hvor der sker en mindre forværring af forholdene i Vestre Landgrøft.

På baggrund af det ringe serviceniveau i Kærby er der udarbejdet to kortsigtede tiltag, som vil forbedre forholdene med hensyn til serviceniveau samt reducere belastningen

af Vestre Landgrøft betydeligt. De to tiltag omhandler tre first flush bassiner samt tre større nedsivningsbassiner i Kærby. De to tiltag sikrer tilsammen, at udledningskravene til vandløbene overholdes, og at serviceniveau forbedres mærkbart.

Da de kortsigtede tiltag ikke er tilstrækkelige til at overholde de gældende funktionskrav, er der dimensioneret et nyt separat regnvandssystem. Det nye separate regnvandssystem overholder de gældende funktionskrav frem til år 2130. Til håndtering af ekstreme regnhændelser er der udvalgt et klimasikrende tiltag, der sikre de private grunde mod oversvømmelser, dybere end 0,05 m vand, ved en gentagelsesperiode på 10 år.

Perspektivering 13

For at sætte den udførte analyse og udarbejdede løsningsforslag ind i en større samfundsmæssig sammenhæng, kunne det være interessant at foretage en mere deltaljeret beregning af, hvad forskellige klimatilpasningstiltag koster i forhold til de samfundsmæssige konsekvenser fremtidige klimaforandringer kan få.

Spildevandskomiteens nyeste skrift, Skrift 31 Spildevandskomiteen [2016], beskæftiger sig med denne problemstilling og i dette skrift defineres metoder for kommuner og forsyninger til at definere et funktionskrav for vand på terræn. Der lægges i skriftet op til, at der defineres et funktionskrav for vand på terrræn ud fra en af følgende tre metoder:

1. Funktionskravet defineres ud fra en fastsat vanddybde som funktion af en fastsat gentagelsesperiode.
2. Funktionskravet defineres ud fra en fastsat vanddybde som funktion af en gentagelsesperiode, som varierer på baggrund af arealanvendelsen.
3. Funktionskravet defineres ud fra en lokal samfundsøkonomisk optimering, som en mindste gentagelsesperiode for skadevoldende hændelser. [Spildevandskomiteen, 2016]

I forhold til sammenligning af løsningsforslag lægges der op til, at vurderingen foretages enten som en *Cost-benefit analyse*, hvor der inddrages samfundsøkonomiske fordele og ulemper i vurderingen af løsninger eller en *samfundsøkonomisk optimering*. Ved sidstnævnte fastlægges der et serviceniveau for vand på terræn. Selve optimeringen bygger på at finde det mest optimale forhold mellem anlægs- og driftsomkostninger holdt op i mod skadeomkostningerne. [Spildevandskomiteen, 2016] I Skrift 31 er den samfundsøkonomiske del tredje og sidste del i den egentlige risikoanalyse. Første del indeholder, som udført i indeværende projekt, et oversvømmelseskort med en oversvømmelsesudbredelse som funktion af en sandsynlighed (gentagelsesperiode). Anden del er et værdikort, hvor fx. forskellige typer af infrastruktur, anlæg og bygninger inddeles i værdiklasser. Dette kunne ligeledes udføres for projektlokaliteten Kærby.

Som beregningsværktøj for de samfundsøkonomiske omkostninger, har COWI A/S udarbejdet regnearket *Projekt om Lokale Analyser af Samfundsøkonomi i Klimatilpasning* (PLASK) for Naturstyrelsen. Med PLASK kan der udføres en *Cost-benefit analyse* af et konkret klimasikringstiltag. I regnearket indtastes anlægsomkostninger, herunder dimensioner på ledninger, bassiner, belægningstyper mm. Der kan også medtages eventuelle sidegevinster med i beregningen. Udgifterne sammenlignes med omkostninger ved en oversvømmelse, herunder direkte tab af fx. bygninger og infrastruktur, men også omkostninger ved oprydning og evakuering kan medtages i beregningen. [Spildevandskomiteen,

2016] PLASK gør det lettere at sammenligne og vurdere forskellige klimasikrende tiltag, hvilket der er potentiale for at anvende i Kærby.

Formålet med at implementere Skrift 31 i Kærby, er at vurdere de klimasikrende tiltag på baggrund af en samfundsmæssig analyse, som kan fører til en optimeret klimasikring af Kærby med hensyn til anlægsomkostninger og skadeomkostninger.

Litteratur

Aagaard, **2013**. Lars Henrik Aagaard. *Dansk ekstremregn kan have toppet*. URL: http://www.b.dk/viden/dansk-ekstremregn-kan-have-toppet, 2013.

Aalborg Forsyning, **2009**. Aalborg Forsyning. *Vision 2100*, 2009.

Aalborg Forsyning Kloak A/S, **2010**. Aalborg Forsyning Kloak A/S. *SRO-data for overløb udleveret af EnviDan A/S*, 2010.

Aalborg Kommune, **2015**. Aalborg Kommune. *3.1.B1 Kærby*. URL: http://www.aalborgkommuneplan.dk/Kommuneplanrammer/Vest-Aalborg/Kaerby/31B1, 2015.

Aalborg Kommune, **2011**. Aalborg Kommune. *Klimastrategi 2012-2015*, 2011.

Aalborg Kommune, **a**. Aalborg Kommune. *Regnhændelsen d. 15. august 2006, address=URL: http://apps.aalborgkommune.dk/images/teknisk/planbyg/komplan/00/regn15082006.pdf, year =2006.*

Aalborg Kommune, **b**. Aalborg Kommune. *Østerå, Genåbning af Aalborgs Å, address=URL: http://www.aalborg.dk/media/1730192/de-4-posters.pdf, year =2015.*

Aalborg Kommune, **c**. Aalborg Kommune. *Spildevandsplan, Aalborg Kærby-Hobrovej address=URL: http://apps.aalborgkommune.dk/forsyningsportal/akk/spvplan2008/kort/G10_kaerby-hobrovej.pdf, year =2015.*

Aalborg Kommune, **d**. Aalborg Kommune. *Spildevandsplan, Aalborg Grønlænderkvarteret address=URL: http://apps.aalborgkommune.dk/forsyningsportal/akk/spvplan2008/kort/G08_gronlanderkvarteret.pdf, year =2015.*

Aalborg Kommune, **e**. Aalborg Kommune. *Vandhandleplan for Aalborg Kommune address=URL: http://www.aalborg.dk/media/3591255/vandhandleplan-2015-vedtager-oktober-2015-2.pdf, year =2015.*

Aalborg Kommune, **2016**. Aalborg Kommune. *Skema 1.2 Regnbetingede udledninger fra K-områder (WinRis-format*. URL: http://www.aalborg.dk/media/242358/skema_12_regnbetingende-udledninger-fra-k-omraader.pdf, 2016.

Aalborg Universitet, **2016**. Aalborg Universitet. *Aalborg Universitets vejrradar på Sohngaardsholmsvej 57, 9000 Aalborg*. URL: http://www.tv2oj.dk/artikel/128997:Aarhus--Skybrud--300-oversvOemmelser, 2016.

Anne Mikkelsen, **2015**. Rikke Svenningsen Anne Mikkelsen. *Appendix 1: Langtidssimulering i Mike Urban - En introduktion til LTS-beregninger*. 01/06-2015 Aarhus Universitet, 2015.

Beredskabsstyrelsen, **2012**. Beredskabsstyrelsen. *Redegørelse vedrørende skybruddet i Storkøbenhavn lørdag den 2. juli 2011*, 2012.

Beven, **2006**. Keith Beven. *A manifesto for the equifinality thesis*. Journal of Hydrology, 320, 2006.

Beven, **2009**. Keith Beven. *Environmental Modelling: An Uncertain Future?* ISBN: 0-203-93248, Handbook. Routledge, 2009.

Danmarks Meterologiske Institut, **2015a**. Danmarks Meterologiske Institut. *Gældende definitioner for SVK nedbørsdata, samt beskrivelse af KM2-formatet*. URL: `http://www.dmi.dk/fileadmin/Erhverv/Gaeldende_definitioner_for_SVK_nedboerdata.pdf`, 2015.

Danmarks Meterologiske Institut, **2015b**. Danmarks Meterologiske Institut. *Definition på skybrud*. URL: `http://www.dmi.dk/nyheder/arkiv/nyheder-2015/05/hvad-kan-du-forvente-naar-dmi-varsler-skybrud/`, 2015.

Danmarks Meterologiske Institut, **2016a**. Danmarks Meterologiske Institut. *Vandstand i Grønlandshavnen Aalborg*. URL: `http://www.dmi.dk/hav/maalinger/vandstand/`, 2016.

Danmarks Meterologiske Institut, **2016b**. Danmarks Meterologiske Institut. *Fremtidens klima i Danmark*. URL: `http://www.dmi.dk/klima/fremtidens-klima/danmark/`, 2016.

DMI, **2014**. DMI. *Fremtidige klimaforandringer i Danmark*. Danmarks Klimacenter rapport, nr. 6 2014, 35, 2014.

Edenhofer, Pichs-Madruga, Sokona, Minx, Farahani, Kadner, Seyboth, Adler, Baum, Brunner, Eickemeier, Kriemann, Savolainen, Schlömer, Stechow, og Zwickel, **2014**. Ottmar Edenhofer, Ramón Pichs-Madruga, Youba Sokona, Jan C. Minx, Ellie Farahani, Susanne Kadner, Kristin Seyboth, Anna Adler, Ina Baum, Steffen Brunner, Patrick Eickemeier, Benjamin Kriemann, Jussi Savolainen, Steffen Schlömer, Christoph von Stechow, og Timm Zwickel. *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change*, 2014.

EnviDan, **2015a**. EnviDan. *Afløbsmodel af Kærby udarbejdet af EnviDan*, 2015a.

EnviDan, **2012**. EnviDan. *NOTAT, Regnhændelsen den 6. august 2012*, 2012.

EnviDan, **2013a**. EnviDan. *Datagrundlag og forudsætninger for MOUSE-LTS og SRO-data*, 2013a.

EnviDan, **2013b**. EnviDan. *SRO-data Årsrapport for overløbsbygværker 2013*, 2013b.

EnviDan, **2015b**. EnviDan. *Vandløbsmodel af Østerå, Vestre Landgrøft og Østre Landgrøft udarbejdet af EnviDan*, 2015b.

EnviDan, **2015c**. EnviDan. *Alder på ledninger i Kærby*, 2015c.

EnviDan, **2015d**. EnviDan. *Loggede vandstande i pumpesumpe i Kærby for perioden 2014-2015.*, 2015d.

Foreningen af rådgivende ingeniører, **2015**. Foreningen af rådgivende ingeniører. *State of the Nation 2012 - Kloak og spildevand*. URL: http://www.frinet.dk/media/243713/kloakker_spildevand_sotn.pdf, 2015.

Geodatastyrelsen, **2015a**. Geodatastyrelsen. *DHM-Højdemodel 2007*. URL: http://download.kortforsyningen.dk/content/geodataprodukter?field_korttype_tid_1=3662&field_aktualitet_tid=All&field_datastruktur_tid=All&field_scheme_tid=All, 2015.

Geodatastyrelsen, **2015b**. Geodatastyrelsen. *Topografisk objektorienteret kort*. URL: http://download.kortforsyningen.dk/content/geodataprodukter?field_korttype_tid_1=439&field_aktualitet_tid=All&field_datastruktur_tid=All&field_scheme_tid=All&page=2, 2015.

Geodatastyrelsen, **2015c**. Geodatastyrelsen. *Matrikelkort*. URL: http://download.kortforsyningen.dk/content/matrikelkortet, 2015.

GEUS, **2016**. GEUS. *Boringsdatabasen*. URL: http://data.geus.dk/geusmap/?mapname=jupiter#zoom=5.96950169755422&lat=6225000&lon=557500&visiblelayers=Topografisk&filter=&layers=&mapname=jupiter&filter=&epsg=25832&mode=map&map_imagetype=png&wkt=, 2016.

Home, **2016**. Home. *9000 Aalborg*. URL: https://home.dk/resultatliste/?CurrentPageNumber=0&SearchResultsPerPage=15&q=9000%20Aalborg&Energimaerker=null&SearchType=0, 2016.

IDA Spildevandskomiteen, **2005**. IDA Spildevandskomiteen. *Skrift 27, Funktionspraksis for afløbssystemer under regn*, 2005.

IDA Spildevandskomiteen, **2014**. IDA Spildevandskomiteen. *Skrift 30, Opdaterede klimafaktorer og dimensionsgivende rengintensiteter*, 2014.

Klimatilpasning, **2015**. Klimatilpasning. *Klimaændringer i Danmark*. URL: http://www.klimatilpasning.dk/viden-om/klima/klimaaendringeridanmark.aspx, 2015.

Kærby Grundejerforening, **2005**. Kærby Grundejerforening. *Kærby Grundejerforening 1955-2005*, 2005.

Krüger, **2015**. Krüger. *Information om pumper*, 2015.

LAR I DANMARK, **2016**. LAR I DANMARK. *Dimensionering af LAR-anlæg*. URL: http://www.laridanmark.dk/dimensionering-af-lar-anlaeg/31582, 2016.

Leif Winther, jens Jørgen Linde, **2011**. H. Thorkild Jensen Leo Lund Mathiasen og Niels Bent Johansen Leif Winther, jens Jørgen Linde. *Afløbsteknik*. ISBN: 978-87-502-1015-3, Handbook. Polyteknisk Forlag, 2011.

Lykkegaard, **2014**. Anne Marie Lykkegaard. *Rapport: Danmarks klima bliver varmere og vådere i fremtiden.* URL: http://videnskab.dk/miljo-naturvidenskab/rapport-danmarks-klima-bliver-varmere-og-vadere-i-fremtiden, 2014.

Mike by DHI, **2011**. Mike by DHI. *MOUSE, Runoff, Reference Manual*, 2011.

Mike by DHI, **2014**. Mike by DHI. *MIKE URBAN CS/MOUSE TOOLS, M11EXTRAwin and M11EXTRA, E MOUSE engine result files*, 2014.

Miljø- og Fødevareministeriet, **2016**. Miljø- og Fødevareministeriet. *MiljøGIS.* URL: http://miljoegis.mim.dk/cbkort?profile=miljoegis_vandrammedirektiv2011, 2016.

Miljøministeriet, **2016**. Miljøministeriet. *Vejledning til bekendtgørelse om spildevandstilladelser m.v. efter miljøbeskyttelseslovens kapitel 3 og 4.* URL: http://www2.mst.dk/common/Udgivramme/Frame.asp?http://www2.mst.dk/udgiv/Publikationer/1999/87-7909-510-0/html/default.htm, 2016.

Miljøministeriet, **2007**. Miljøministeriet. *Klimatilpasning af afløbssystemer og metodeafprøvning. Økonomisk analyse.* URL: http://www.klimatilpasning.dk/media/599333/klimatilpasning_af_afl_bssystemer_og_metodeafpr_vning.__konomisk_analyse__mim_2007_.pdf, 2007.

Miljøministeriet Naturstyrelsen, **2013**. Miljøministeriet Naturstyrelsen. *Vandplan 2010-2015. Limfjorden. Hovedopland 1.2 Vanddistrikt: Jylland og Fyn - forslag.* URL: http://naturstyrelsen.dk/media/nst/66602/1_2_Limfjorden_VP.pdf, 2013.

Nielsen, **2015**. Kristoffer Nielsen. *Optimeret afstrømning fra regnvandsbassiner til vandløb*, 2015.

Nordjyllands Amt, **2004**. Nordjyllands Amt. *Tilladelse til udledning af opspædt spildevand og overfladevand til vand-områder i Aalborg Kommune*, 2004.

Nordjyllands Amt, **2006**. Nordjyllands Amt. *Afstrømningsmålinger i Nordjyllands Amt 2005*, 2006.

Spildevandskomiteen, **2016**. Spildevandskomiteen. *Metode til risikobaseret design af ekstrem regnvandsafstrømning*, 2016.

Spildevandskomiteen, **2015**. Spildevandskomiteen. *SVK regnmålere.* URL: http://www.dmi.dk/erhverv/anvendelse-af-vejrdata/spildevandskomiteens-regnmaalersystem/, 2015.

Teknologisk Institut, **2016**. Teknologisk Institut. *Nedsivning af regnvand i faskiner - Faskiner.* URL: http://www.teknologisk.dk/nedsivning-af-regnvand-i-faskiner/faskiner/16402, 2016.

Thorndahl, **2008**. Søren Thorndahl. *Uncertainty assessment in long term urban drainage modelling.* ISSN: 1901-7294, DCE Thesis No. 12. Aalborg University, Department of Civil Engineering, 2008.

Thorndahl, **2014**. Søren Thorndahl. *Slides: Urban Regn-og Spildevandsafstrømning lektion 3*, 2014.

Thorndahl, Andersen, og Larsen, **2016**. Søren Thorndahl, Aske Korup Andersen, og Anders Badsberg Larsen. *An event-based stochastic point rainfall series resampler for statistical replication and climate projection of historical rainfall series.* Paper draft, 2016.

Vollertsen og Thorndahl, **2012**. Jes Vollertsen og Søren Thorndahl. *Slides: Grundlæggende Hydraulik og Afløbsteknik*, 2012.

Del VI

Bilags Rapport

Antal Bilag: 10
Antal Elektroniske Bilag: 12

Opsætning af afløbsmodeller A

I følgende kapitel gennemgås modelbeskrivelsen samt modelopsætningen af en MIKE URBAN afløbsmodel for Kærby med to forskellige overflademodeller. MIKE URBAN bruger overflademodellerne til at bestemme volumen af overfladevand, der bidrager til kloaksystemet, samt afløbstiden på overfladen til kloakken, for videre at kunne simulere belastningen af afløbssystemet. I nærværende rapport bliver der gjort brug af overflademodel A og B, der henholdsvis er en simpel og en mere avanceret model.

A.1 Afløbsmodel opsat med overflademodel A

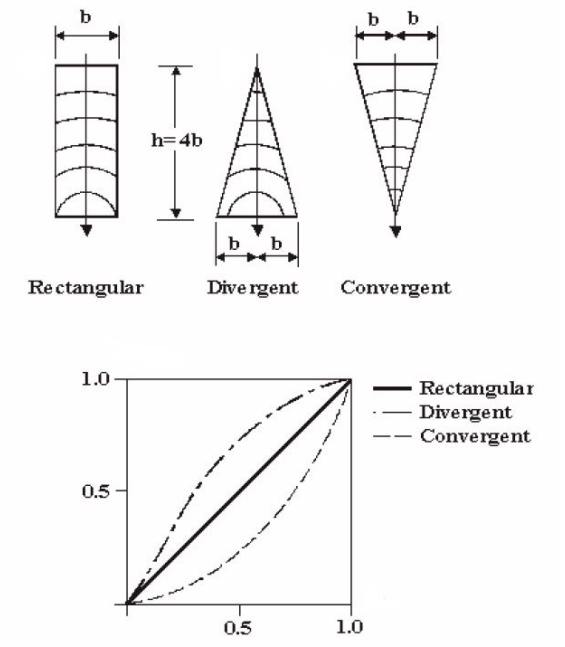
Afløbsmodellen er udarbejdet af EnviDan og dækker Kærby-oplandets afløbssystem. Modellen indeholder Kærbys komplette afløbssystem med rør, brønde, pumper, bassiner og overløbsbygværker. Modelområdet er baseret på et matrikelkort fra Geodatastyrelsen [2015c]. Modellen indeholdt ikke befæstelsesgrader for oplandene, så bestemmelsen heraf er første step i opsætning af afløbsmodellen for overflademodel A. Denne overflademodel kræver som input parameter, det befæstede areal, hydrologisk reduktionsfaktor, overflade koncentrationstid og initialtab. Mike Urban har en automatiseret indbygget funktion, der kan beregne hver matrikels befæstelsesgrad ud fra polygonlag, som indeholder befæstede overflader. Vejmatrikler er udvalgt ved hjælp af ArcGIS fra et matrikelkort over Kærby. Bygninger er udvalgt fra en korttype kaldet *Kort10* fra Geodatastyrelsen [2015b], som er et topografisk objektorienteret kort. Større befæstede arealer, såsom parkeringspladser i Kærby er manuelt tegnet ind i ArcGIS som et polygonlag.

For indeværende projekt bruges tre polygonlag, indeholdende vejmatrikler, bygninger og parkeringsarealer, som eksporteres til MIKE URBAN som shapefiler og MIKE URBAN's indbyggede funktion, *Catchment Processing*, under MOUSE modulet anvendes. Som det første specificeres de tre polygonlags befæstelsesgrad, som i dette tilfælde er 100 %, hvorefter MIKE URBAN beregner, hvor stor en andel de tre polygonlag udgør af hver matrikel for til sidst at beregne en samlet befæstelsesgrad for hver matrikel. Metoden er betydeligt hurtigere at anvende end manuel bestemmelse og indtastning af befæstelsesgrader. For at forbinde hvert opland til en brønd gøres der brug af MIKE URBAN's indbyggede funktion *Catchment Connection Wizard*, der automatisk kobler oplandene på afløbssystemet. Der er flere forskellige koblingsmuligheder, men for modellen anvendt for nærværende projekt, er oplandene koblet på nærmeste brønd.

Overflademodel A bygger på tid/areal-metoden, hvor afløbsvolumen afhænger af initialtabet, det bidragende opland og en hydrologisk reduktionsfaktor. Initialtabet

indeholder befugtningstabet og fyldning af lavninger i oplandet. Det bidragende opland eller det reducerede areal beskrives ved befæstelsesgraden. Den hydrologiske reduktionsfaktor er beskrevet som tabet, der sker ved infiltration, evapotranspiration og lækager i det impermeable lag, der er brugt til bestemmelsen af befæstelsesgraden. Dermed fungerer den hydrologiske reduktionsfaktor som den procentdel af det befæstede areal, der bidrager til afstrømning. [Mike by DHI, 2011]

Ved en simulering bliver der for det enkelte opland lavet en afløbshydrograf, der viser volumen af vand det enkelte opland bidrager med til afløbssystemet som funktion af tiden. Udformningen af afløbshydrografen afhænger af tid/areal-kurven og koncentrationstiden. Koncentrationstiden beskriver tiden det tager fra en regnhændelse begynder til hele det reducerede opland bidrager til afløbssystemet. Tid/areal-kurven beskriver, hvor stor en procentdel af det reducerede opland, der bidrager til afløbssystemet under koncentrationstiden. Tid/areal-kurvens udformning er bestemt af oplandets udformning og koncentrationstiden. I MIKE URBAN er der tre prædefinerede tid/areal-kurver for et rektangulært, divergent og konvergent opland, som ses på Figur A.1. [Mike by DHI, 2011]



Figur A.1: Prædefinerede oplande i MIKE URBAN med dertilhørende tid/areal-kurver. [Mike by DHI, 2011]

Ved modelkørsler, der omfatter en længere periode med flere separate regnhændelser skal initialtabet gælde for hver regnhændelse, dog kan størrelsen af initialtabet variere på baggrund af tidsintervallet mellem regnhændelserne. Initialtabet umiddelbart efter en endt regnhændelse er 0, hvorefter initialtabet stiger som funktion af tiden til det når den angivne værdi. Standard værdien for den rate initialtabet stiger med er sat til 0,0005 $\mathrm{m\,h^{-1}}$. [Mike by DHI, 2011]

A.2 Afløbsmodel opsat med overflademodel B

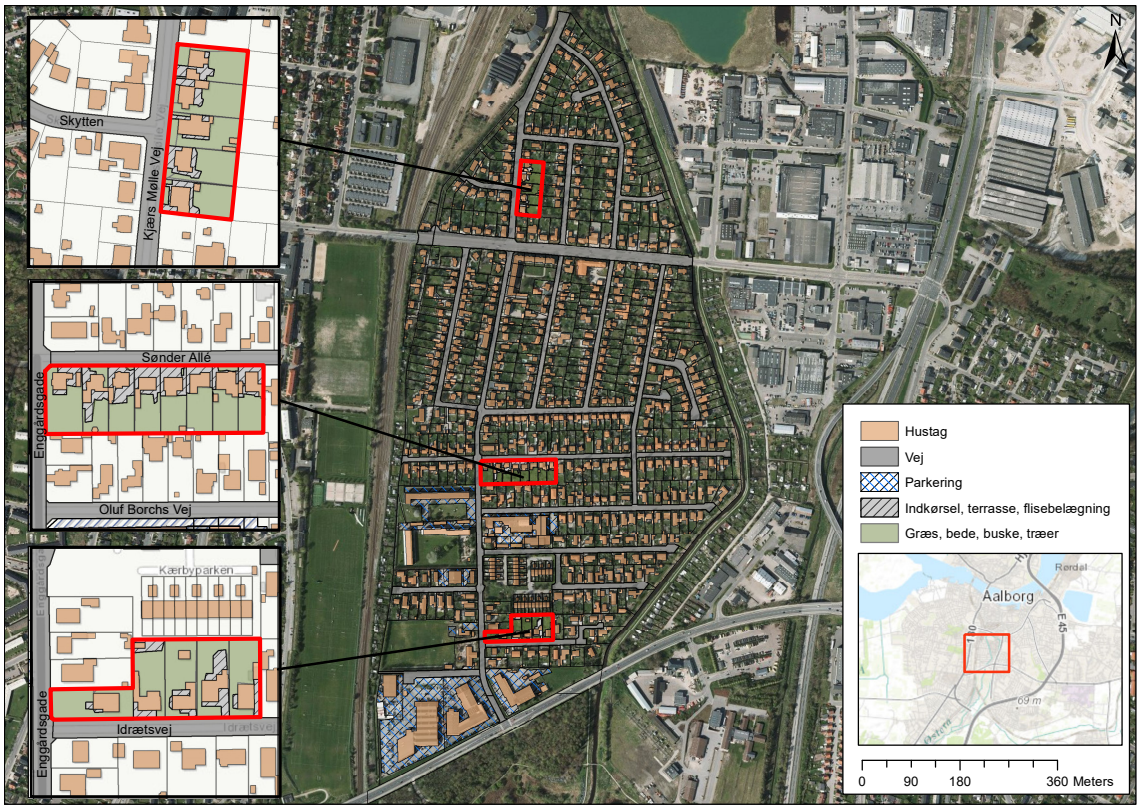
Forskellen på denne overflademodel og overflademodel A, er måden, hvorpå arealet, der bidrager til afstrømning til kloaksystemet findes. Til denne overflademodel opdeles et oplands overflader i fem kategorier. Henholdsvis 2 impermeable flader, en stejl og en flad samt tre permeable flader, lav, mellem og høj.[Mike by DHI, 2011] Den del, der udgør en impermeabel stejl flade er bygningers hustage. Veje og parkeringsarealer udgør flade impermeable overflader. Andelen, der udgør lavpermeable overflader er indkørsler, flisebelægning og terrasser. Mellempermeable belægninger udgør de resterende overflader som hverken indgår under kategorierne lav- eller højpermeable belægninger. Højpermeable overflader er græsarealer og bede. En oversigt over valgte kategorier kan ses i Tabel A.1. I MIKE URBAN angives for hvert enkelt opland, hvor stor en procentdel de fem belægningstyper udgør. Da Kærby består af 808 oplande, vil det være meget tidsskrævende at opmåle og senere indtaste procentsatserne i programmet, hvorfor processen er automatiseret.

Overflade	**Objekt**
Impermeabel stejl	Hustage
impermeabel flad	Veje, parkeringspladser
Permeabel lav	Indkørsler, flisebelægning, terrasser
Permeabel mellem	Resterende arealer
Permeabel høj	Græs, bede, bevoksning

Tabel A.1: Kategori for permeabilitet og overfladetype.

Overfladen *Permeabel mellem* benyttes, hvis det totale areal af de andre fire overflader ikke udfylder det enkelt catchment.

Afløbsmodellen består i bund og grund af en lang række tabeller indbygget i en Access-fil. Det er derved muligt at ændre eller indsætte en række parametre direkte i Access-filen fra et excelark. Først beregnes procentandelen for hver belægningstype. Arealet af bygningernes tage findes ud fra det tidligere omtalte *Kort10*'s attribut tabel, hvor også hele matriklens areal fremgår. Ved simpel procentregning udregnes bygningsandelen i forhold til matriklens total areal. Vejarealerne fås, ligesom for overflademodel A, fra et matrikelkort over bydelen. I kortets attribut tabel fremgår vej andel og matriklens total areal. Areal beregning af lavpermeable flader er manuelt opmålt for tre forskellige kvarterer i Kærby. De udvalgte matrikler til arealopmåling fremgår af Figur A.2 afgrænset med rød. På henholdsvis Idrætsvej, Sønder Allé og Kjærs Mølle Vej er der udvalgt en række villaer, hvor det lavpermeable belægning på hver matrikel er målt op ved hjælp af ArcGIS. Det samme gør sig gældende for den højpermeable belægning, hvor græs og bede er målt op på hver matrikel og omregnet til en procentandel for hver matrikel. Et gennemsnit for procentfordelingen for lavpermeable flader samt højpermeable flader udregnes og antages at være representable for alle matrikler i Kærby. De fundne procentsatser kan nu indsættes i MIKE URBAN databasefilen.



Figur A.2: Belægningstyper i Kærby for tre udvalgte villakvarterer. [Geodatastyrelsen, 2015b], [Geodatastyrelsen, 2015c]

Overflademodel B er, sammenlignet med overflademodel A, mere avanceret og har et behov for flere parametre. Overflademodel B bygger på den kinematiske bølge teori, hvorfor overfladeafstrømningen er simuleret som flowet i en åben kanal påvirket af gravitations- og friktionskræfter. Afløbsvolumen fra modellen er bestemt af de hydrologiske faktorer og det bidragende areal. [Mike by DHI, 2011]

Det enkelte opland beskrives ved en længde og en hældning samt ved fem overfladetyper. Det blev tidligere nævnt at afstrømningen af et opland regnes som flow i en åben kanal, hvorfor et opland får defineret en længde og en hældning af denne kanal med et manningtal til hver overfladetype. Dette erstatter koncentrationstiden fra overflademodel A. Hvor overflademodel A bruger et befæstet areal af et opland, bruger overflademodel B hele oplandet, men med fem overflader med forskellige permeabiliteter.

For at overflademodel B kan fungere, skal den bruge en række hydrologiske parametre. Initialtabet i overflademodel B er opdelt i et befugtningstab og et lagringstab, der hver især er enkelttab ved starten af en regnhændelse. Disse parametre kan variere efter overfladetypen. Derudover bruger modellen et infiltrationstab for de permeable overflader, der bliver brugt en start- og en slutinfiltration, der beskriver infiltrationskapaciteten i de forskellige underlag. startinfiltrationen beskriver infiltrationskapaciteten ved et tørt underlag hvorimod slutinfiltrationen beskriver den ved et vådt underlag. [Mike by DHI, 2011]

Infiltrationskapaciteten i overflademodel B er dynamisk og ændre sig over tid, når det

regner. Her bruges *Horton's Exponent* under regn til at mindske infiltrationskapaciteten i takt med at underlaget nærmer sig en vandmættet tilstand. Modsat bruges *Inverse Horton's Equation* under tørvejr til at beskrive forøgelsen af infiltrationskapaciteten umiddelbart efter en regnhændelse. [Mike by DHI, 2011]

Da det ikke er alle fem overflader der bruger alle de hydrologiske parametre er dette vist i Tabel A.2.

Parameter	**Overflade**				
	Impermeable		**Permeable**		
[-]	**Stejl**	**Flad**	**Lav**	**Mellem**	**Høj**
Befugtningstab	X	X	X	X	X
Lagringstab	-	X	X	X	X
Startinfiltration	-	-	X	X	X
Slutinfiltration	-	-	X	X	X
Horton's Våd	-	-	X	X	X
Horton's Tør	-	-	X	X	X
Manningstal	X	X	X	X	X

Tabel A.2: Tabellen viser, hvilke overflader, der bruger hvilke parametre.

Jf. Tabel A.2 bruger den stejle impermeable overflade (tage), intet lagringstab, da det antages at taghældningen er så stejl, at der ikke forekommer lavninger, som kan lagres vand i. Parametrene startinfiltration, slutinfiltration, *Horton's Exponent* (Horton's Våd) og *Inverse Horton's Equation* (Horton's Tør)bliver udelukkende brugt for de permeable overflader.

A.3 Beskrivelse af M11EXTRA

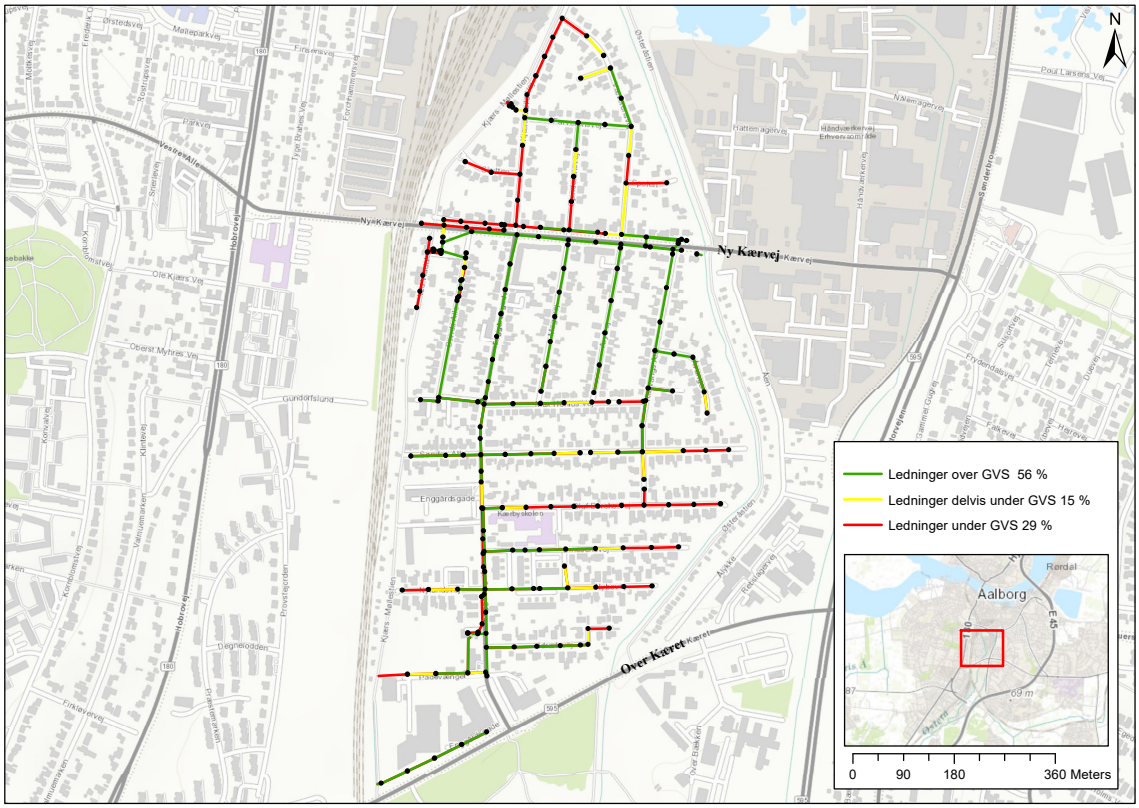
M11EXTRA er et program, der bruges i forbindelse med udtrækning af data fra MOUSE resultatfiler. De simulerede resultater, der er beregnet i MIKE URBAN, kan plottes og vises i MIKE URBAN eller MIKE VIEW. I begge tilfælde vises resultaterne direkte fra den binære resultatfil. Det er muligt at udtrække disse resultater fra Mike view, men ved større projekter kan dette blive en langsommelig og besværlig proces. M11EXTRA programmet gør det muligt at automatisere processen med udtrækning af data fra MIKE URBAN. Resultatfilerne udtrækkes blandt andet i txt-format, hvorfor de fremadrettet er lettere tilgængelige. M11EXTRA programmet findes i to versioner, M11EXTRA og M11EXTRAwin, de to versioner fungerer ens og har det samme formål. Forskellen er at *win*-versionen bliver kørt fra en windows-baseret brugerflade, hvorimod den anden version kan køres ved en kommandoprompt. [Mike by DHI, 2014]

Infiltration af grundvand i afløbssystemet

B

Som tidligere nævnt er Kærby lavt liggende, hvilket medfører, at infiltration af grundvand i afløbssytemet kan forekomme.

Ledningsnettets beliggenhed i forhold til grundvandsspejlet fremgår af B.1. Kortet er lavet på baggrund af 64 grundvandspejlinger forskellige steder i Kærby, udført i perioden 1950 til 2015. Andelen af ledningslængder beliggende under grundvandspejlet udgør 29 %, 56 % er beliggende over grundvandspotentialet og 15 % er delvis under grundvandsspejlet. Det skal bemærkes, at der er en årstidsvariation på grundvandsspejlet på omkring 0,5 m. dette betyder at dele af året vil andelen af ledninger under grundvandsspejlet formentlig være højere end 29 % og infiltration vil kunne forekomme i højere grad.



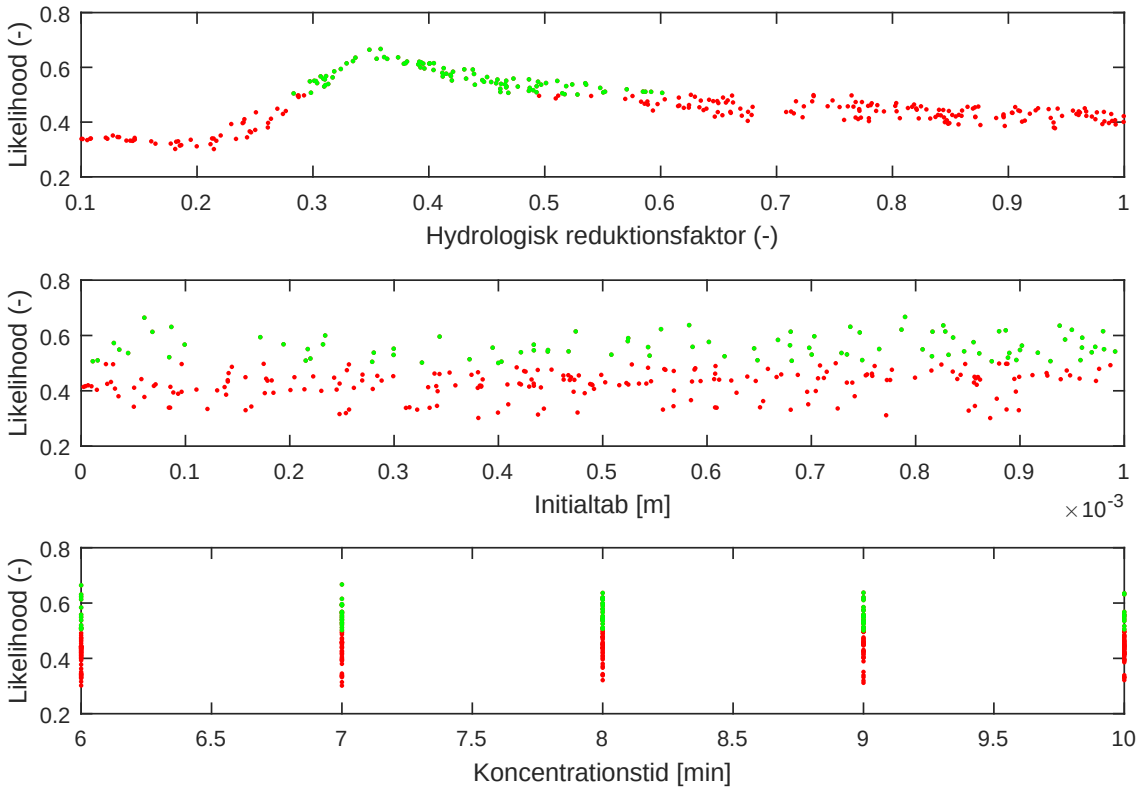
Figur B.1: Ledningernes placering i forhold til grundvandsspejlet. GEUS [2016], [EnviDan, 2015a]

Generalized Likelihood Uncertainty Estimation C

Dette Bilag er baseret på artiklen *A manifesto for the equifinality thesis* Beven [2006] og bogen *Environmental Modelling: An Uncertain Future?* Beven [2009] af Keith Beven og på afhandlingen *Uncertainty assessment in long term urban drainage modelling* Thorndahl [2008] af Søren Thorndahl.

Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) er en metodologi, der er udviklet af Keith Beven og Andrew Binley. Denne metodologi fokuserer på at evaluere modeller og estimere usikkerheder for disse med henblik på *equifinality* tesen. *Equifinality* tesen fokuserer på det faktum, at der er mange forskellige modelrelationer, der ikke kan afvises og burde blive betragtet ved en evaluering af modellens usikkerhed. *Equifinality* betyder at, en model kan opnå det samme resultat og fit til observerede data ved brug af forskellige parametersæt. Dette forekommer ofte ved hydrologiske modeller, hvor flere parametre er afhængige af hinanden. Ved hydrologiske modeller kan der være et lille eller intet kendskab til de hydrologiske parametre for modelområdet, hvorfor disse skal kalibreres. Da hydrologiske modeller ofte kalibreres efter observerede data, betyder risikoen for *equifinality*, at parametersættet med det bedste fit til en del af de observerede data ikke nødvendigvis har det bedste fit til det resterende observerede data. Ved brug af GLUE metodologien accepteres *equifinality* tesen samtidigt, samt at den kalibrede model muligvis ikke er en korrekt model.

Likelihood beskriver ligheden mellem observerede- og modellerede data. Likelihood værdien skal ikke ses som en sandsynlighed for, at modellen er korrekt, men blot som et mål for det fit, der er mellem observerede- og modellerede data. Der findes flere forskellige likelihood funktioner, der hver især arter sig til forskellige former for observerede data. For at bestemme, hvilke parametersæt og værdier, der skal arbejdes videre med, defineres et acceptkriterie for likelihood værdien. Efterfølgende laves der Monte Carlo simuleringer for de forskellige modelparametre, hvor de parametersæt, der opnår en likelihood værdi tilsvarende eller over kriteriet bør overvejes som den variation der kan forekomme i modellen. De accepterede parametersæt kan visualiseres ved såkaldte dotty plots som vist ved Figur C.1.



Figur C.1: Dotty plots for 300 Monte Carlo simuleringer og et likelihood acceptkriterie på 0,5. Grønne dotts er accepterede modelresultater og de røde er forkastede.

De viste dotty plots på Figur C.1 er for den hydrologiske reduktionsfaktor, koncentrationstiden og initialtabet for overflademodel A. Det ses, at der for den hydrologiske reduktionsfaktor er et lokalt maksimum der indikerer, at værdien burde ligge i dette område. For koncentrationstiden og initialtabet ses der ikke et lokalt maksimum, dette indikerer, at parametrene er ufølsomme inden for det forudbestemte interval de kan variere inden for.

Usikkerheden ved f.eks. en hydrologisk model kan findes i de kalibrede parametre såvel som de observerede. En parameter som regnintensiteten er oftest en randbetingelse, der er defineret af observerede data. Dog forekommer der en usikkerhed i disse data, da intensiteten er målt i et enkelt punkt, der ikke nødvendigvis er inden for modelområdet. De kalibrerede parametre vil derfor prøve at kompensere for de usikkerheder de observerede data kan indeholde. På baggrund af dette kan det være besværligt at udpege den eller de parametre der indeholder usikkerheden.

Evaluering af hvorvidt en model kan accepteres eller afvises afhænger af, hvorvidt det valgte acceptkriterie er overholdt i forhold til likelihoodværdien. Da likelihoodværdien ikke er en fastsat værdi, er dette i sidste ende en vurderingssag for den enkelte.

C.1 Brugen af GLUE i indeværende projekt

Målet med at benytte GLUE til kalibreringen af overflademodel A og B i indeværende projekt, er at finde en simpel, hurtig og præcis metode til kalibrering af disse. Undtagelsesvis fra ovenstående beskrivelse af GLUE, vil der ved disse kalibreringer kun blive brugt det parametersæt, der har den største likelihood for hver enkelt periode og pumpesump. Dermed bliver der ikke arbejdet med konceptet om flere anvendelige parametersæt for den enkelte periode og pumpesump. Dog bliver modellerne stadig kalibreret for flere forskellige perioder og steder, med forskellige parametersæt som resultat. Et vægtet gennemsnit kan da laves over de forskellige perioder for oplandet til hver enkelt pumpesump.

Usikkerheden af de kalibrerede parametre er vurderet på baggrund af spredning for de forskellige perioder.

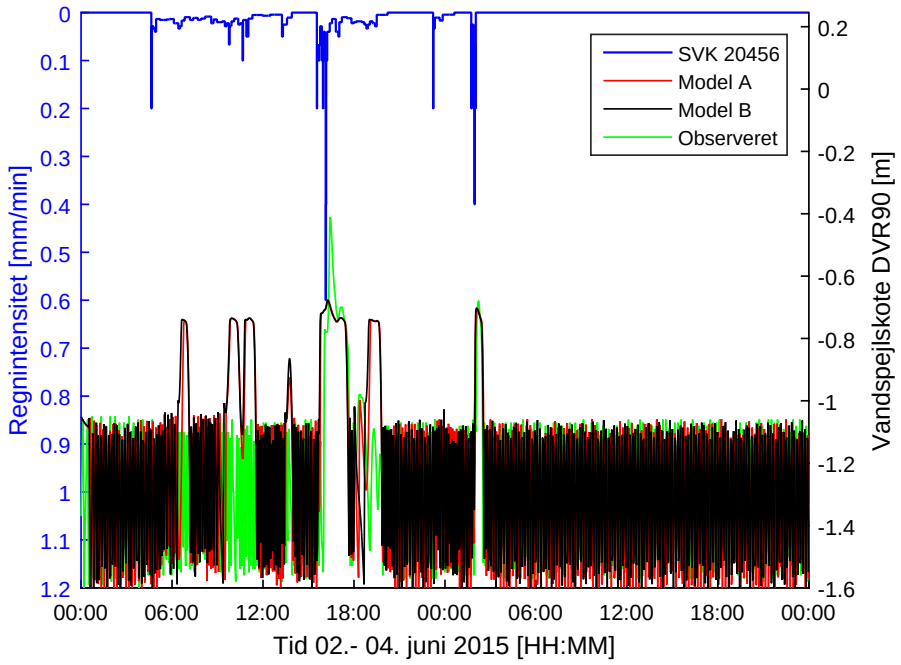
For at modellen kan accepteres, skal en gennemsnitlig likelihood over et antal valideringsperioder, forskellige fra kalibreringsperioderne, overstige likelihood acceptkriteriet.

Valideringsresultater for afløbsmodel D

I det følgende Bilag vil valideringsresultaterne af de to kalibrerede overflademodeller blive præsenteret sammen med de observerede data og likelihoodværdierne for hver validerings hændelse. Det skal bemærkes, at der kan forekomme flere hændelser for hver periode. Likelihoodværdierne vil være vist for hver hændelse, tidspunktet for hændelsen, som likelihoodværdien er blevet udregnet for, vil være specificeret med et start og stop tidspunkt.

De to kalibrerede overflademodeller er valideret på baggrund af simulerede og målte vandstande i pumpestationerne på Enggårdsgade, Davids Allé og Kjærs Mølle Vej.

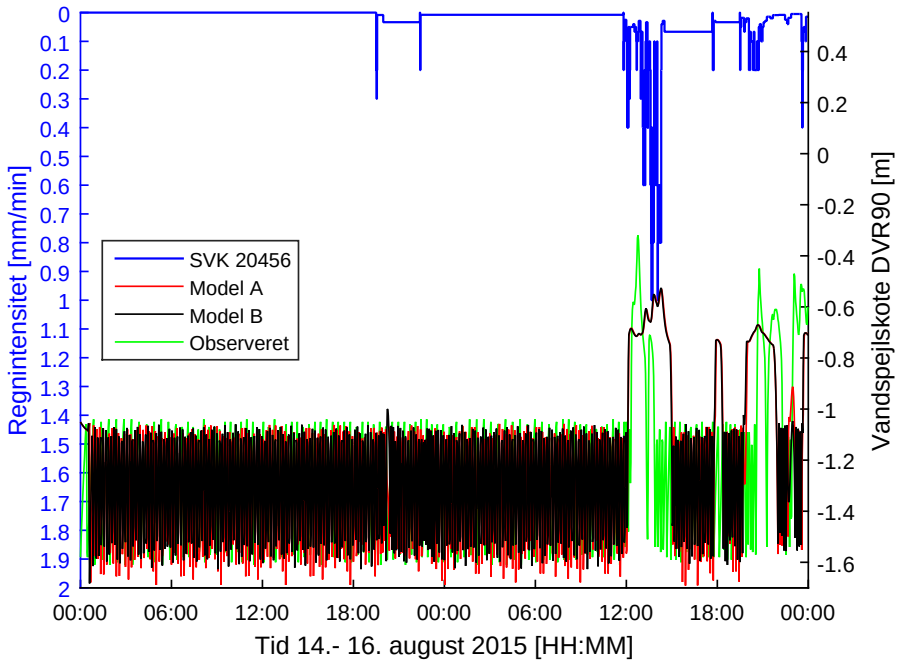
Pumpesump: Enggårdsgade
Regnserie: Frejlev Syd
Periode: 2. juni 2015 - 4. juni 2015



Figur D.1: Modelleret og observeret vandstand i pumpesump.

Starttid/sluttid [dd-hh:mm]	**Overflademodel** [-]	**Likelihood** [-]
02-15:00/02-21:40	A	0,359
03-01:40/03-02:40	A	0,504
02-15:00/02-21:40	B	0,311
03-01:40/03-02:40	B	0,632

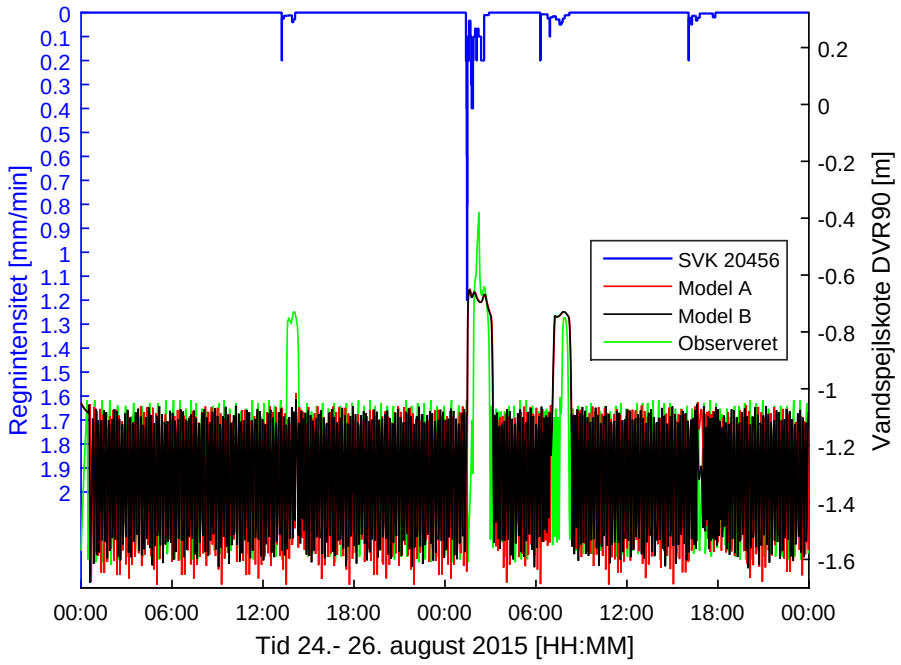
Pumpesump: Enggårdsgade
Regnserie: Frejlev Syd
Periode: 14. august 2015 - 16. august 2015



Figur D.2: Modelleret og observeret vandstand i pumpesump.

Starttid/sluttid [dd-hh:mm]	**Overflademodel** [-]	**Likelihood** [-]
15-12:00/15-16:00	A	0,271
15-20:00/15-22:40	A	0,220
15-12:00/15-16:00	B	0,291
15-20:00/15-22:40	B	0,219

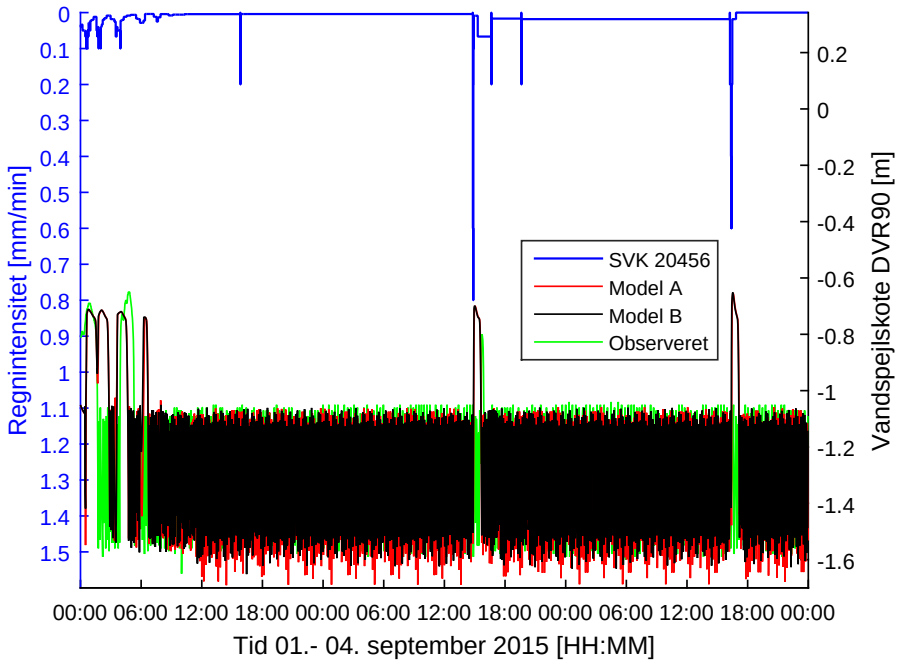
Pumpesump: Enggårdsgade
Regnserie: Frejlev Syd
Periode: 24. august 2015 - 26. august 2015



Figur D.3: Modelleret og observeret vandstand i pumpesump.

Starttid/sluttid [dd-hh:mm]	**Overflademodel** [-]	**Likelihood** [-]
25-01:00/25-03:20	A	0,439
25-06:50/25-08:30	A	0,317
25-01:00/25-03:20	B	0,458
25-06:50/25-08:30	B	0,400

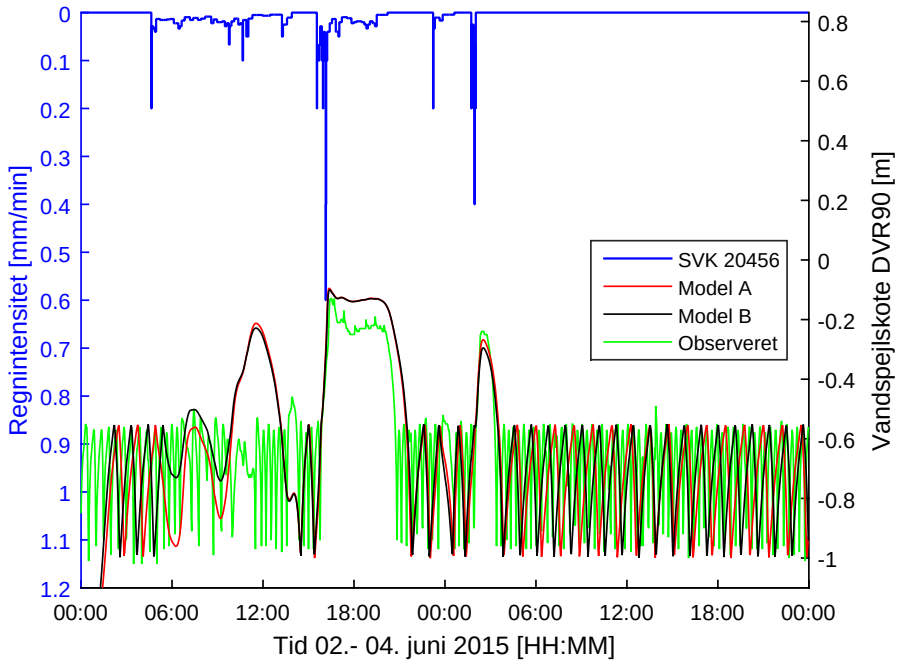
Pumpesump: Enggårdsgade
Regnserie: Frejlev Syd
Periode: 01. september 2015 - 04. september 2015



Figur D.4: Modelleret og observeret vandstand i pumpesump.

Starttid/sluttid [dd-hh:mm]	**Overflademodel** [-]	**Likelihood** [-]
01-00:00/01-05:40	A	0,202
02-14:40/02-16:40	A	0,039
01-00:00/01-05:40	B	0,197
02-14:40/02-16:40	B	0,137

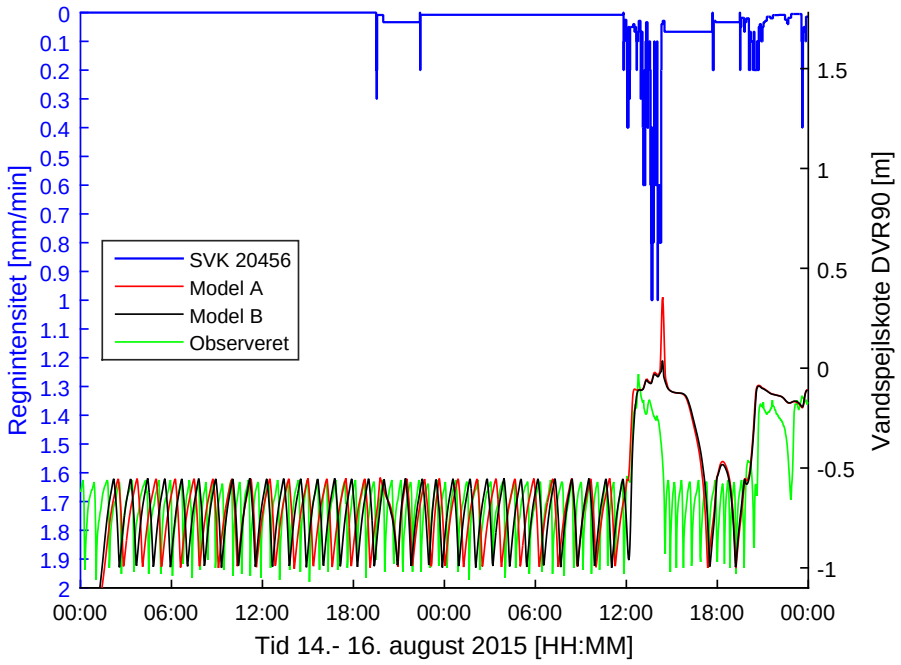
Pumpesump: Davids Allé
Regnserie: Frejlev Syd
Periode: 2. juni 2015 - 4. juni 2015



Figur D.5: Modelleret og observeret vandstand i pumpesump.

Starttid/sluttid [dd-hh:mm]	**Overflademodel** [-]	**Likelihood** [-]
02-15:00/02-21:40	A	0,673
03-01:40/03-03:40	A	0,695
02-15:00/02-21:40	B	0,751
03-01:40/03-03:40	B	0,713

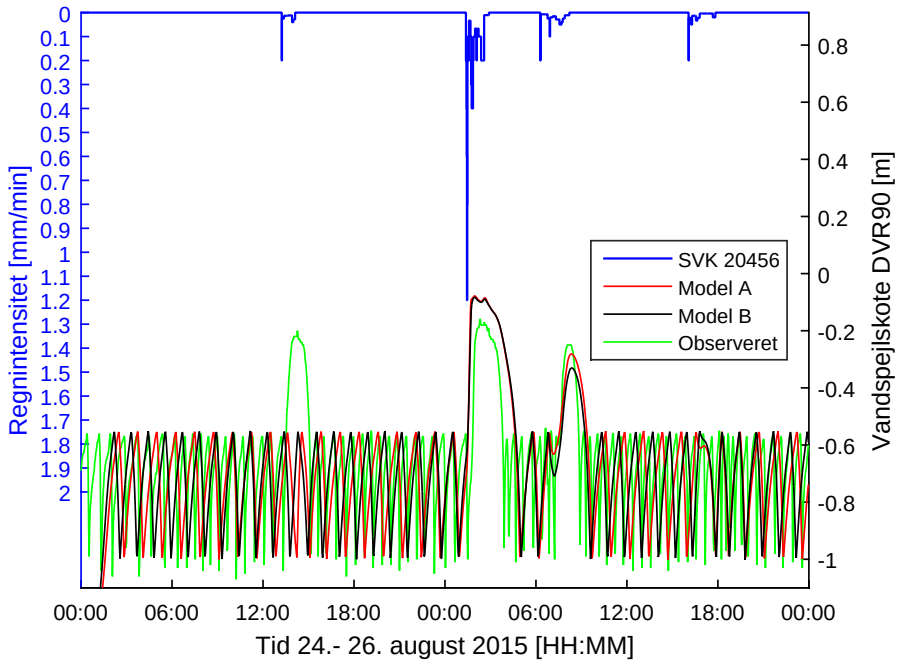
Pumpesump: Davids Allé
Regnserie: Frejlev Syd
Periode: 14. august 2015 - 16. august 2015



Figur D.6: Modelleret og observeret vandstand i pumpesump.

Starttid/sluttid [dd-hh:mm]	**Overfladem odel** [-]	**Likelihood** [-]
15-12:00/15-16:40	A	0,348
15-19:20/16-00:00	A	0,506
15-12:00/15-16:40	B	0,428
15-19:20/16-00:00	B	0,537

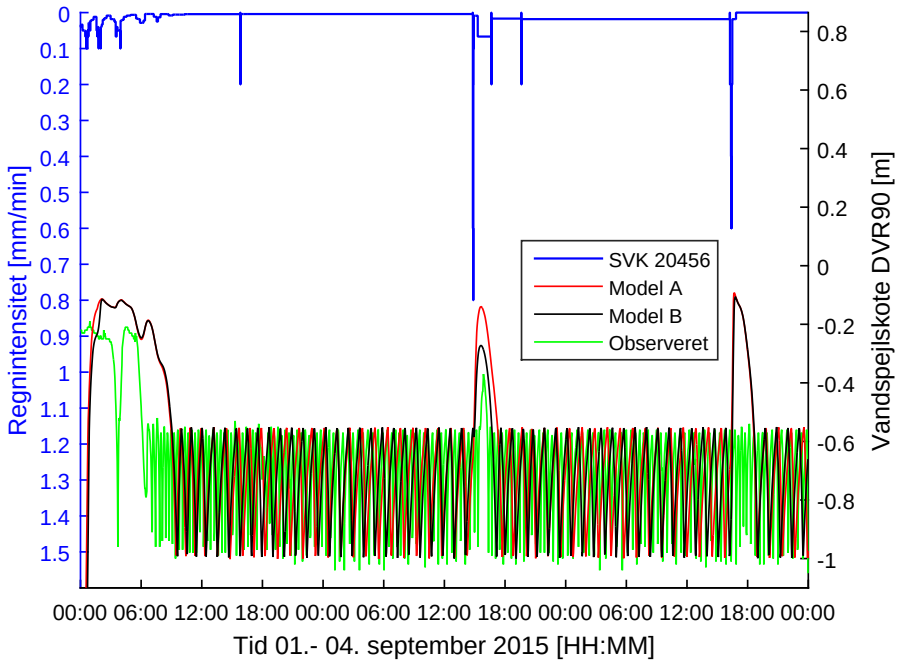
Pumpesump: Davids Allé
Regnserie: Frejlev Syd
Periode: 24. august 2015 - 26. august 2015



Figur D.7: Modelleret og observeret vandstand i pumpesump.

Starttid/sluttid [dd-hh:mm]	**Overflademodel** [-]	**Likelihood** [-]
25-01:20/25-04:20	A	0,571
25-07:00/25-09:20	A	0,567
25-01:20/25-04:20	B	0,606
25-07:00/25-09:20	B	0,580

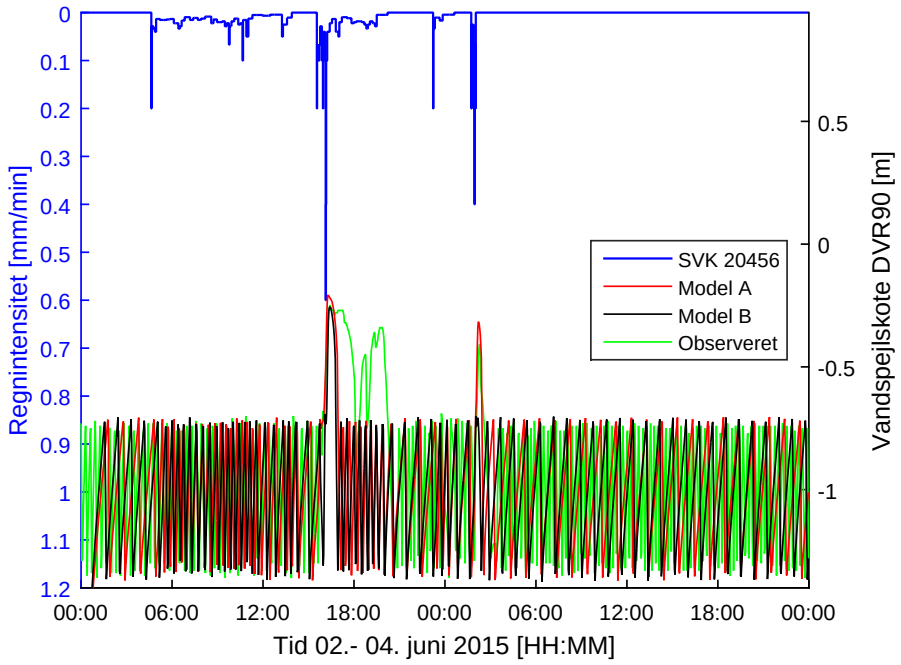
Pumpesump: Davids Allé
Regnserie: Frejlev Syd
Periode: 01. september 2015 - 04. september 2015



Figur D.8: Modelleret og observeret vandstand i pumpesump.

Starttid/sluttid [dd-hh:mm]	**Overfladem odel** [-]	**Likelihood** [-]
01-01:40/01-07:00	A	0,433
02-14:40/02-17:00	A	0,204
01-01:40/01-07:00	B	0,416
02-14:40/02-17:00	B	0,300

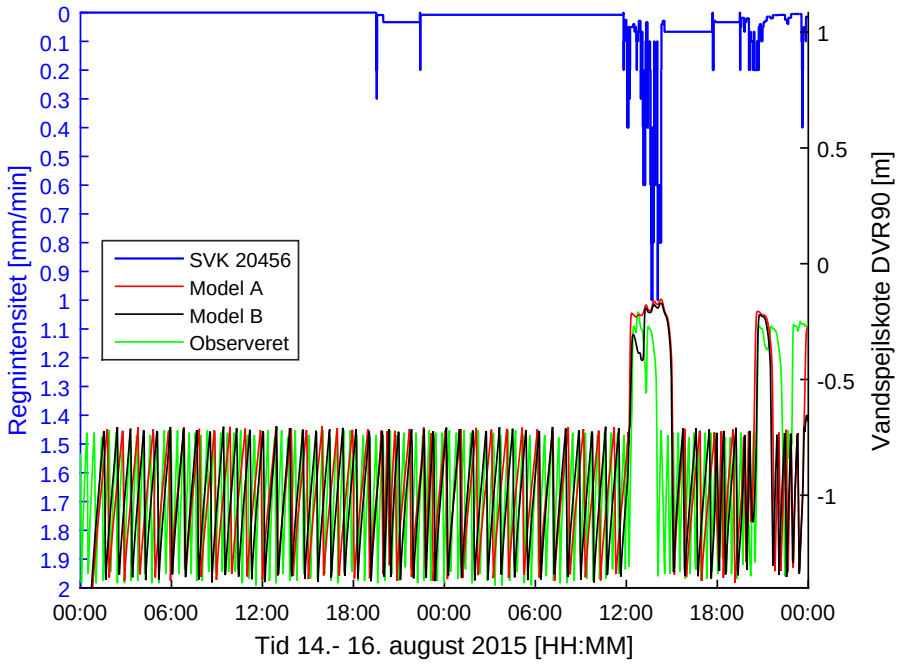
Pumpesump: Kjærs Mølle vej
Regnserie: Frejlev Syd
Periode: 2. juni 2015 - 4. juni 2015



Figur D.9: Modelleret og observeret vandstand i pumpesump.

Starttid/sluttid [dd-hh:mm]	**Overflademodel** [-]	**Likelihood** [-]
02-15:00/02-21:40	A	0,280
02-15:00/02-21:40	B	0,250

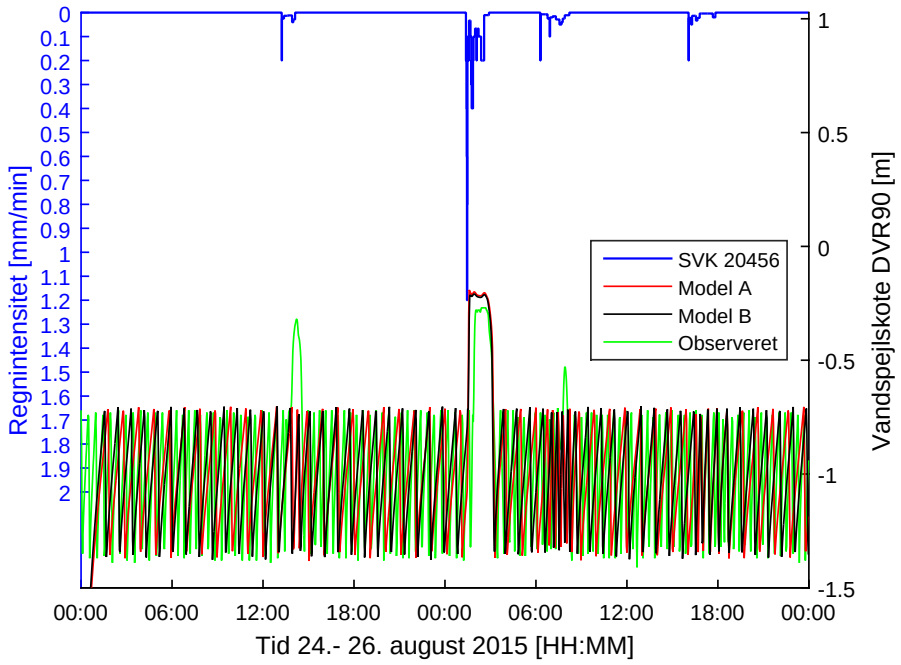
Pumpesump: Kjærs Mølle vej
Regnserie: Frejlev Syd
Periode: 14. august 2015 - 16. august 2015



Figur D.10: Modelleret og observeret vandstand i pumpesump.

Starttid/sluttid [dd-hh:mm]	**Overflademodel** [-]	**Likelihood** [-]
15-12:00/15-16:00	A	0,393
15-20:00/15-22:40	A	0,272
15-12:00/15-16:00	B	0,345
15-20:00/15-22:40	B	0,312

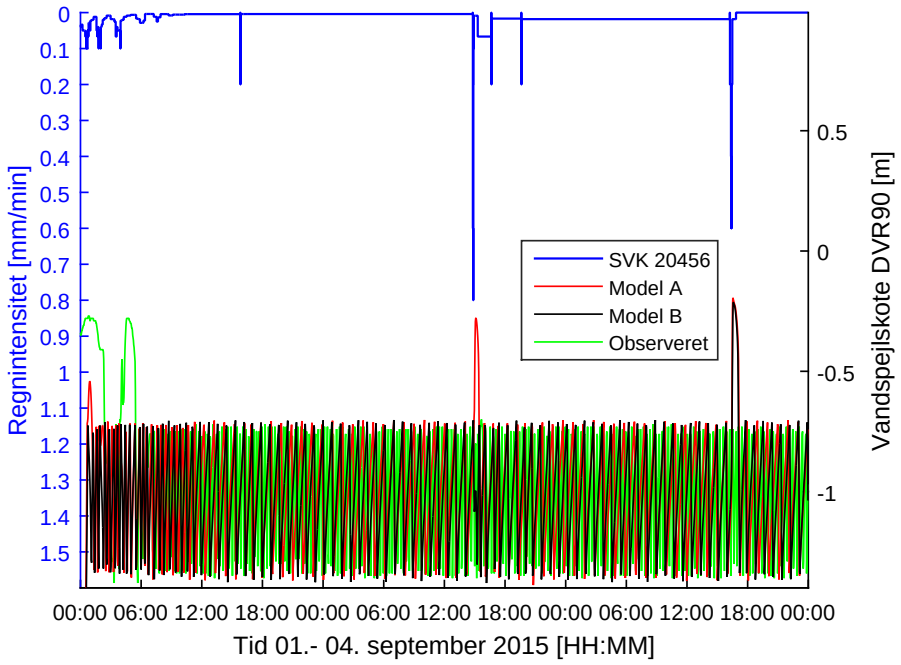
Pumpesump: Kjærs Mølle vej
Regnserie: Frejlev Syd
Periode: 24. august 2015 - 26. august 2015



Figur D.11: Modelleret og observeret vandstand i pumpesump.

Starttid/sluttid [dd-hh:mm]	**Overflademodel** [-]	**Likelihood** [-]
25-01:20/25-04:00	A	0,531
25-01:20/25-04:00	B	0,539

Pumpesump: Kjærs Mølle vej
Regnserie: Frejlev Syd
Periode: 01. september 2015 - 04. september 2015



Figur D.12: Modelleret og observeret vandstand i pumpesump.

Starttid/sluttid [dd-hh:mm]	**Overflademodel** [-]	**Likelihood** [-]
01-00:00/03-18:40	A	0,161
01-00:00/03-18:40	B	0,152

Ledningsplaner E

Dette Bilag indeholder ledningsplaner over det nuværende fællessystem og det nydimensionerede separate regnvandssystem samt ledningsplanen for det klimasikrende tiltag med rørbassiner. Kortene er navngivet jf. Tabel E.1.

Ledningsplan for	**Kortnr.**
Nuværende fællessystem	Ledningsplan 1
Separat regnvandssystem	Ledningsplan 2
Klimasikrende tiltag med rørbassiner	Ledningsplan 3

Tabel E.1: Kortnavn for Ledningsplaner.

.

Ledningsplan 1

- Regnvandsbrønd
- Regnvandsledning
- Fælles brønd
- Fælles ledning

0 45 90 180 Meters

Ny Kærvej

Over Kæret

Kjærs Mellemsti

Østerådalen

Tyge Brahes Vej

Fårdhammersvej

Einsensvej

Gundorfslund

Provstejorden

Enggårdsgade

Kærbyskolen

Kærbyparken

Hattemagervej

Håndværkerparken

Åen

Ålykke

Rebslagervej

Rørdal

Aalborg

E45

180

69 m

N

Ny Kærvej

Over Kæret

Kjærs Møllestien

Østerådalen

Tyge Brahes Vej

Hobrovej

Finsensvej

Forchhammersvej

Gundorfslund

Provstejorden

Kærbyskolen

Kærbyparken

Enggårdsgade

Padevænget

Rørdal

Aalborg

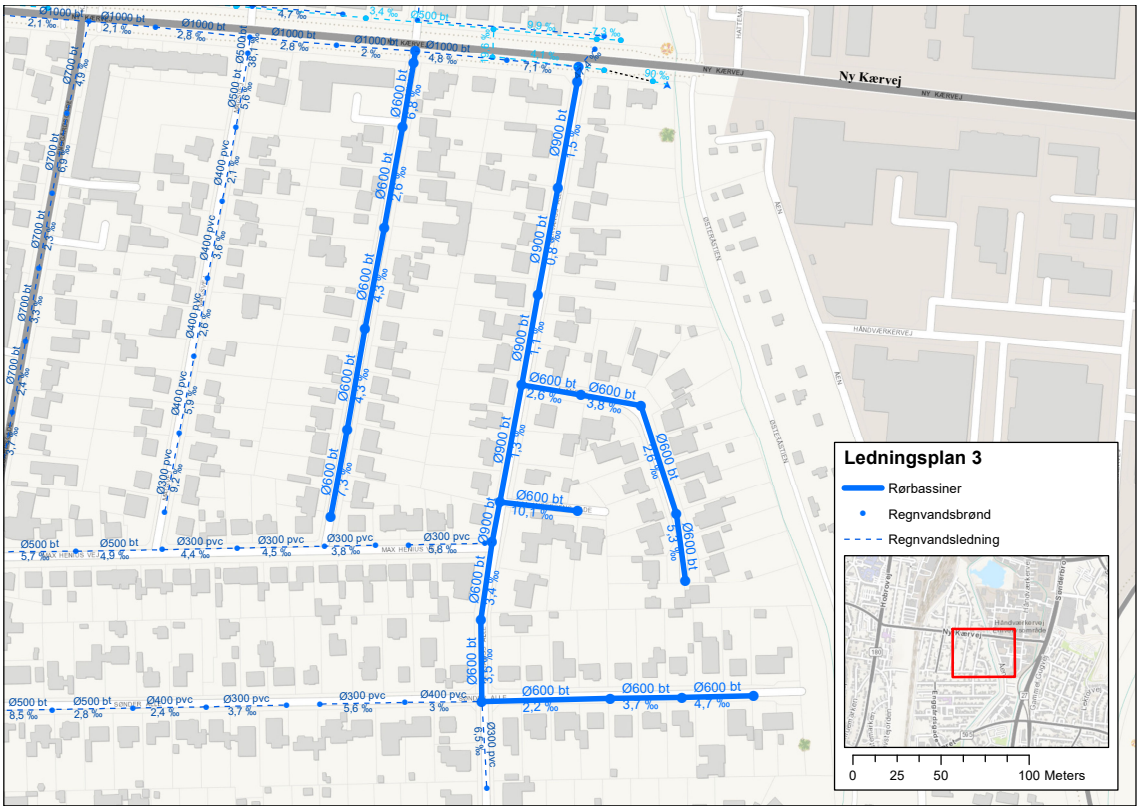
E 45

69 m

0 45 90 180 Meters

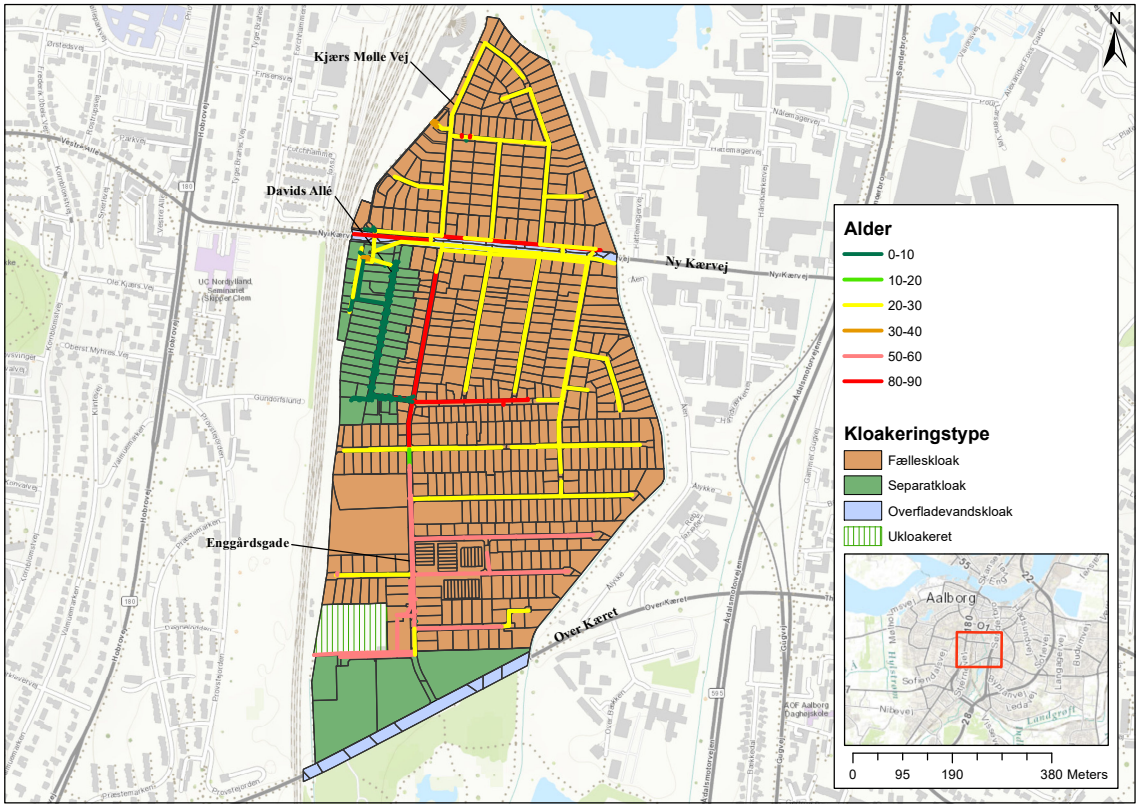
Ledningsplan 2

- Regnvandsbrønd
- Regnvandsledning


Ny Kærvej
NY KÆRVEJ
HÅNDVÆRKERVEJ
Ledningsplan 3
Rørbassiner
Regnvandsbrønd
Regnvandsledning
0
25
50
100 Meters

Alder på afløbssystem F

Afløbssystemet i Kærby er renoveret og udbygget flere gange. Den ældste del af afløbssystemet er etableret i ca. år 1930. Udvalgte strækninger er inden for de seneste 10 år separatkloakeret.



Figur F.1: Ledningsstrækningernes alder og kloakeringstype. [EnviDan, 2015c]

SRO Data-ark for overløbsbygværker i Kærby

G

I følgende Bilag er overløbsvarigheder plottet sammen med tilhørende regn for hvert år i perioden 2010 - 2014. Antallet af overløbshændelser og varighed pr. år sammenlignes med MIKE URBAN LTS-kørsler. Hvis nødvendigt er der foretaget en korrigering af målte SRO-data. Alle SRO-data er logget af Aalborg Forsyning Kloak A/S og rådata er udleveret af EnviDan A/S. [Aalborg Forsyning Kloak A/S, 2010] Inspiration til opsætning af plots og tabeller stammer fra EnviDan [2013b].

G.0.1 Korrigering af SRO-data

SRO-dataene er vurderet og hvis nødvendigt korrigeret. Jf. EnviDan [2013a] er der følgende to kriterier for, hvad en overløbshændelse i et SRO-anlæg er:

- Overløbsvarighed på mindst 5 minutter.
- Forudgående periode uden overløb på mindst 5 timer.

SRO-dataene er korrigeret, hvis det er vurderet, at loggerdataene er forbundet med fejl. Korrigeringen er foretaget for at give et mere retvisende bud på antal og varighed af overløb. Korrigeringen er foretaget efter EnviDan [2013a]'s anvisning for korrigering. De rå SRO-data vurderes at være gode, hvis følgende kriterier er opfyldt:

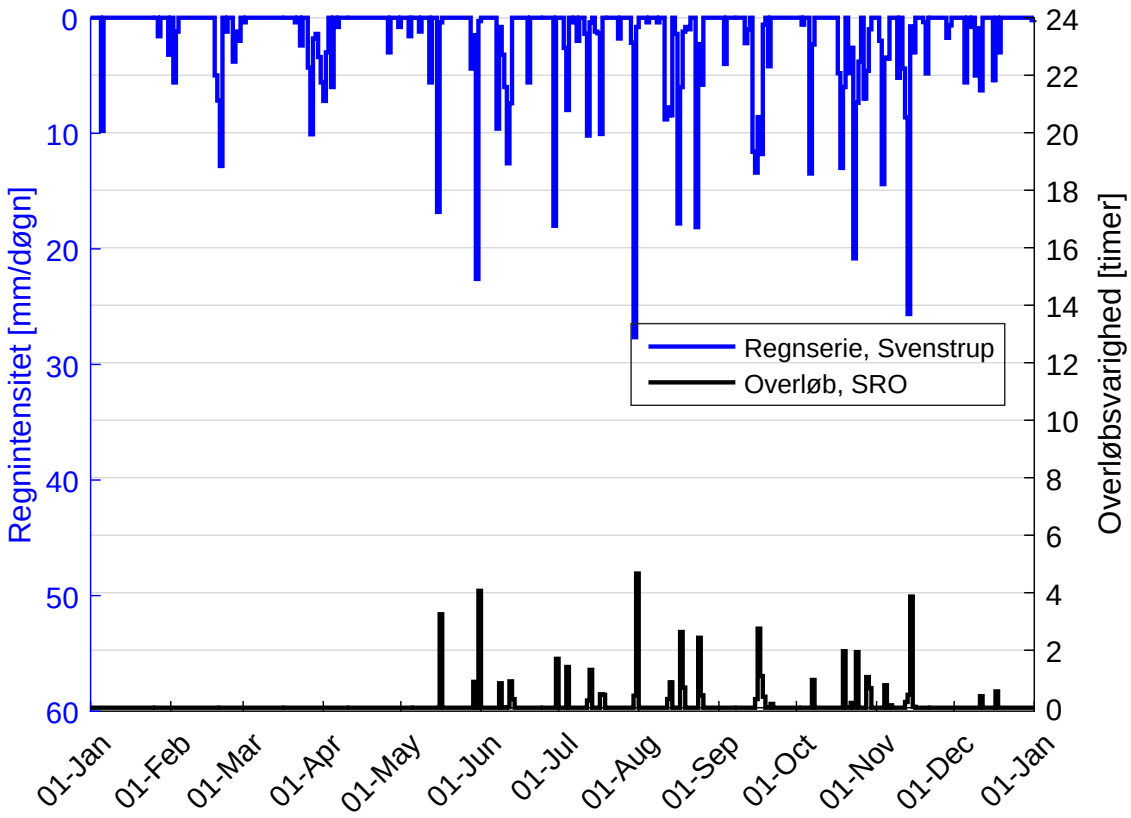
- Der er maksimalt registreret 5 overløb pr. døgn. Ud fra definitionen på overløb bør der ikke kunne forekomme flere.
- Der er ikke registreret overløbsvarigheder over 24 timer pr. døgn.
- Der forekommer maksimalt 15 døgn uden registreringer pr. år. Længerevarende perioder uden registrerede overløb kan forekomme, hvilket resulterer i for få registrerede overløb.

G.0.2 Vurdering af SRO-data

Hvis de tre kriterier er opfyldt for det pågældende SRO-anlæg er de rå SRO-data, i SRO data-arkene markeret med ✓. Hvis et eller flere kriterier ikke er opfyldt, er de rå SRO-data markeret med ÷. Vurderingen af SRO-data bygger på tre SRO-anlæg med loggede data i perioden 2010-2014, hvilket samlet set resulterer i 15 data-ark. 10 ud af 15 perioder opfylder alle tre førnævnte kriterier. Den primær fejl, som opstår i SRO-anlægget er udfald, hvor der i længere perioder ikke logges data. Dette er tilfældet for alle tre SRO-anlæg

i 2014. Den generelle vurdering af SRO-dataene for alle tre SRO-anlæg er, at disse er anvendelige til validering af MOUSE-LTS modellen.

Overløbsbygværk: Enggårdsgade
Regnserie: Svenstrup
Periode: 1. januar 2010 - 31. december 2010

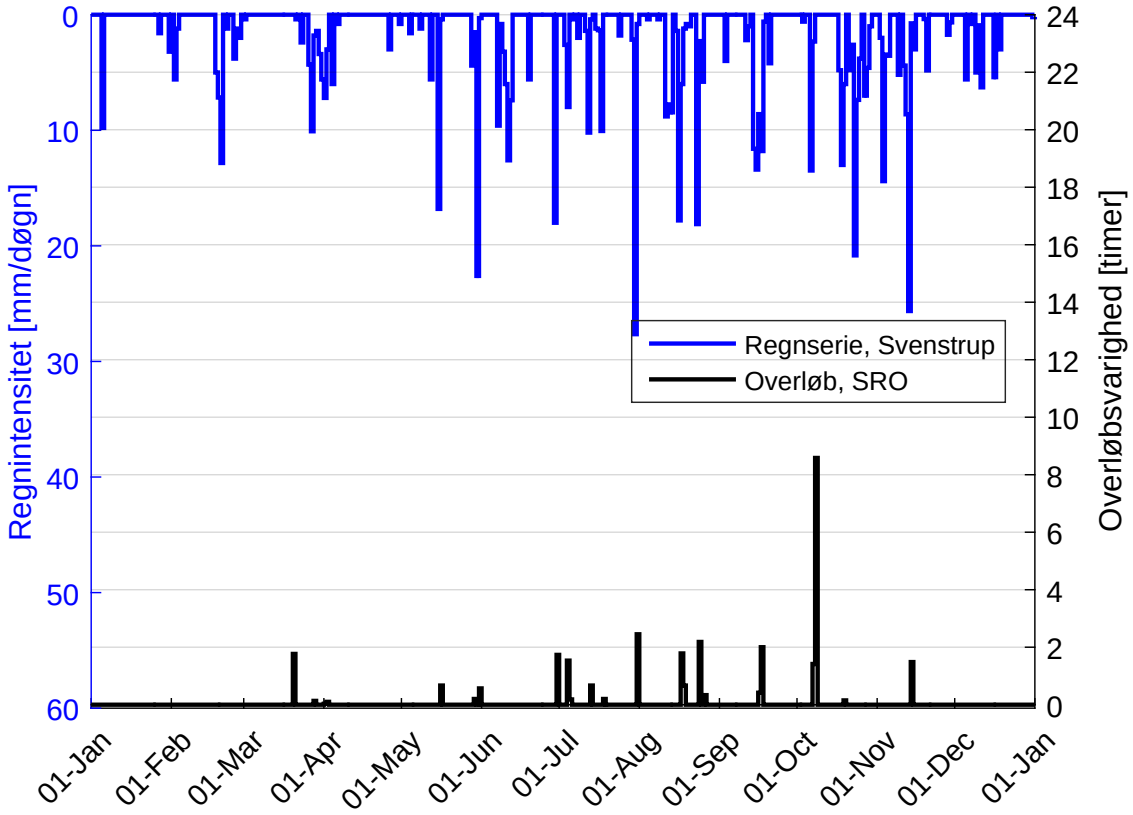


Figur G.1: Overløbsvarighed for overløbsbygværk i Enggårdsgade 2010.

Vurdering af SRO-data	÷
Døgn hvor data er korrigeret	1
Døgn uden måledata	81

	Målt SRO-data	Korrigeret SRO-data	MIKE URBAN beregning
Overløb, antal	44	38	78
Overløb, varighed [timer]	52	46	181
Aflastet volumen [m^3]			12274

Overløbsbygværk: Kjærs Mølle Vej
Regnserie: Svenstrup
Periode: 1. januar 2010 - 31. december 2010

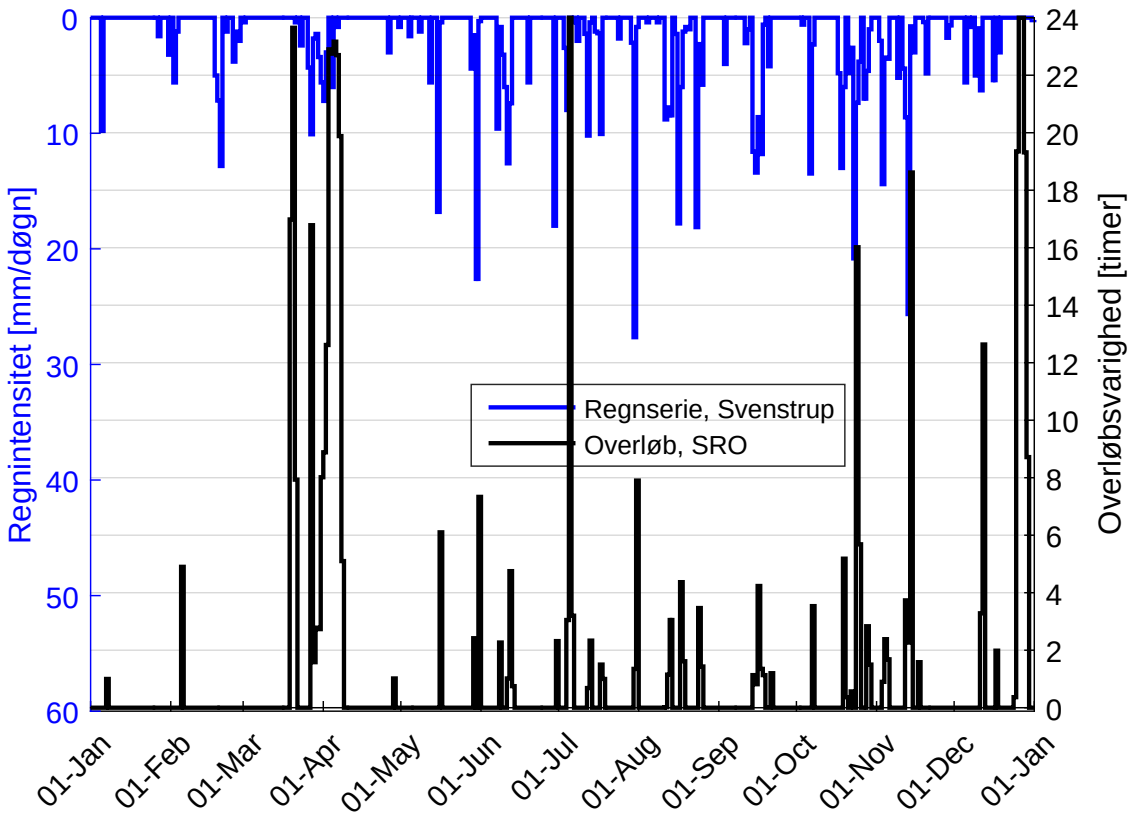


Figur G.2: Overløbsvarighed for overløbsbygværk på Kjærs Mølle Vej 2010.

Vurdering af SRO-data	✓
Døgn hvor data er korrigeret	0
Døgn uden måledata	13

	Målt SRO-data	Korrigeret SRO-data	MIKE URBAN beregning
Overløb, antal	22	22	17
Overløb, varighed [timer]	29	29	11
Aflastet volumen [m^3]			1048

Overløbsbygværk: Davids Allé
Regnserie: Svenstrup
Periode: 1.januar 2010 - 31. december 2010

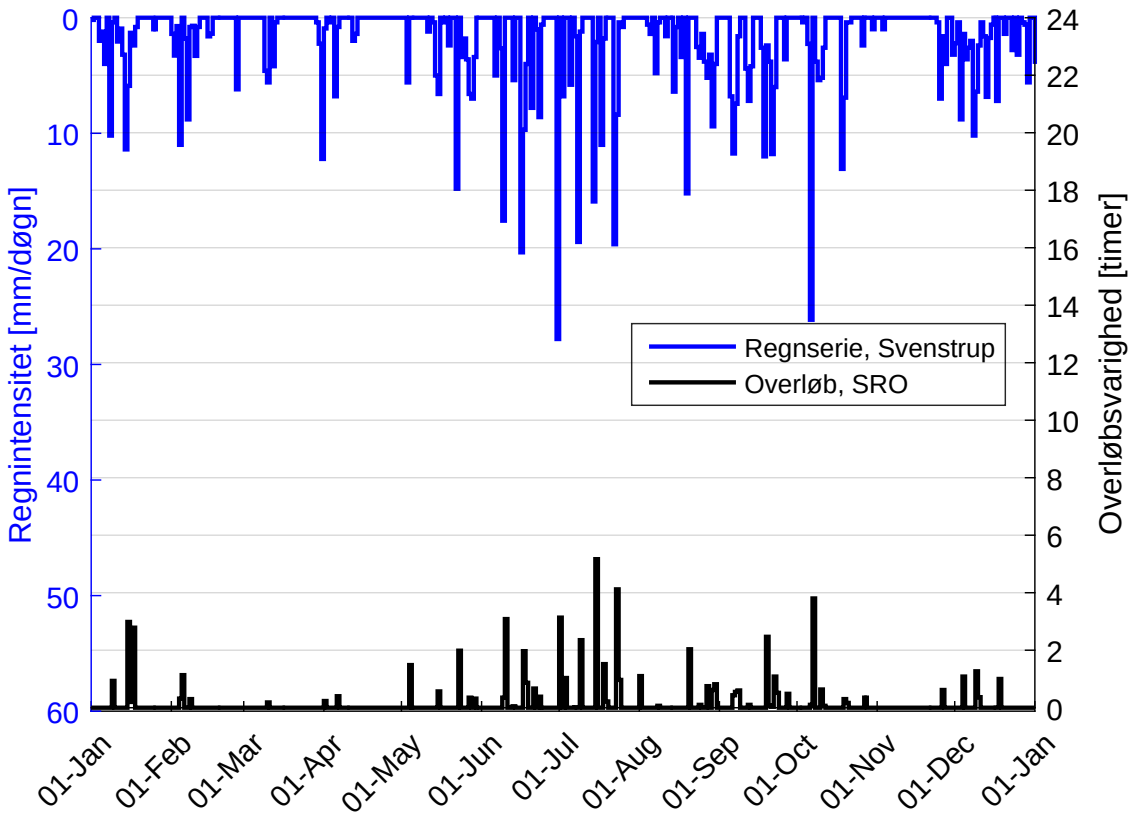


Figur G.3: Overløbsvarighed for overløbsbygværk i Davids Allé 2010.

Vurdering af SRO-data	÷
Døgn hvor data er korrigeret	1
Døgn uden måledata	35

	Målt SRO-data	Korrigeret SRO-data	MIKE URBAN beregning
Overløb, antal	53	50	48
Overløb, varighed [timer]	534	503	137
Aflastet volumen [m^3]			15480

Overløbsbygværk: Enggårdsgade
Regnserie: Svenstrup
Periode: 1. januar 2011 - 31. december 2011

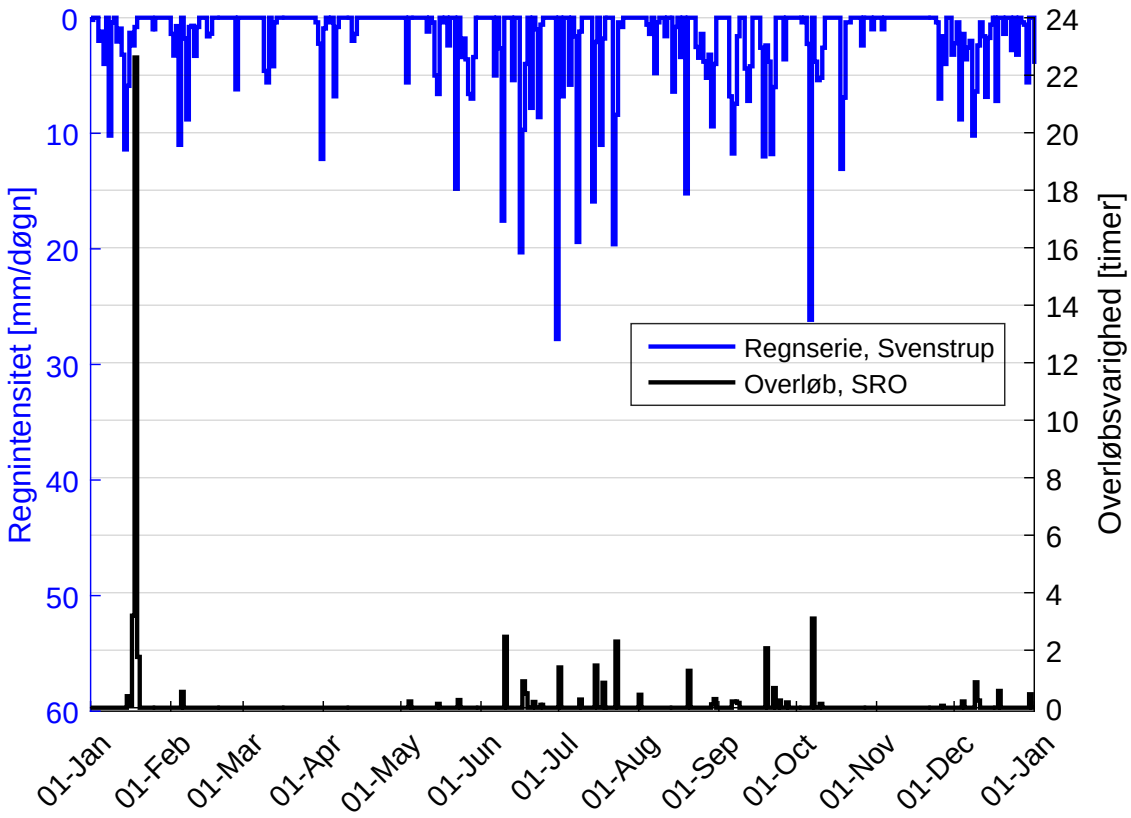


Figur G.4: Overløbsvarighed for overløbsbygværk i Enggårdsgade 2011.

Vurdering af SRO-data	✓
Døgn hvor data er korrigeret	0
Døgn uden måledata	2

	Målt SRO-data	Korrigeret SRO-data	Model beregning
Overløb, antal	58	58	96
Overløb, varighed [timer]	62	62	173
Aflastet volumen [m^3]			14163

Overløbsbygværk: Kjærs Mølle Vej
Regnserie: Svenstrup
Periode: 1. januar 2011 - 31. december 2011

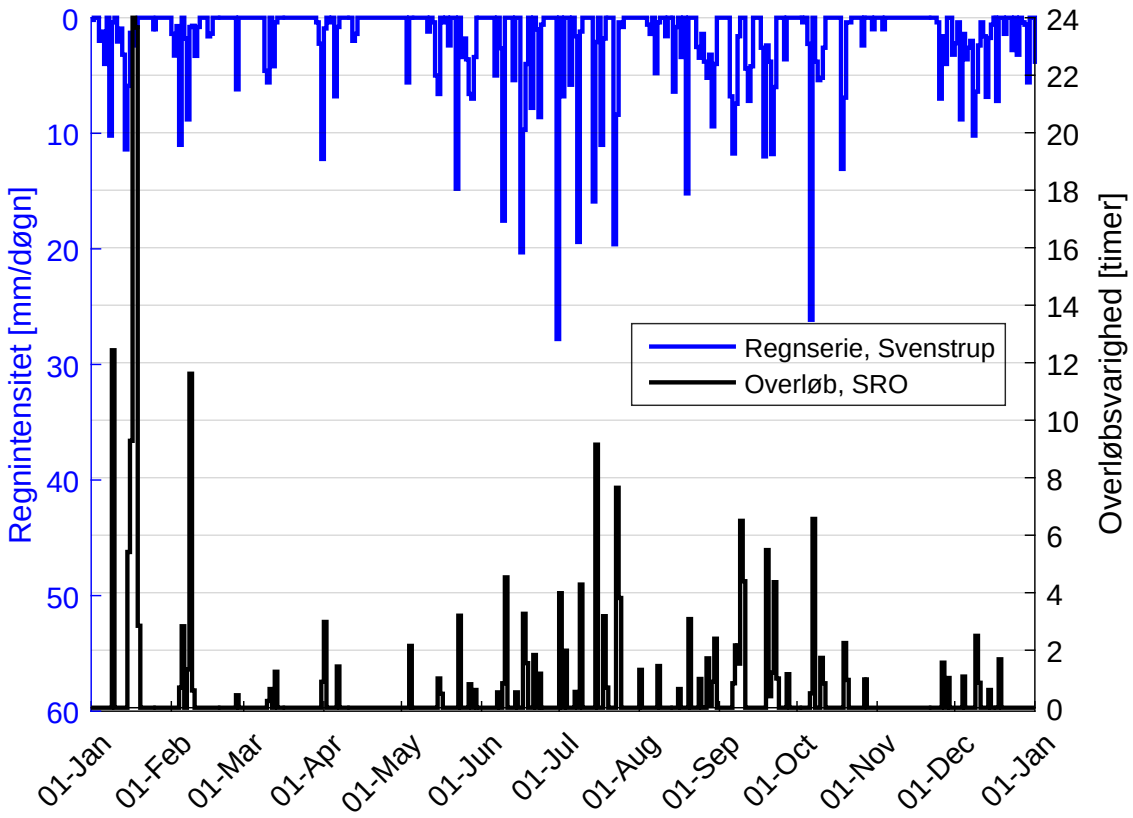


Figur G.5: Overløbsvarighed for overløbsbygværk på Kjærs Mølle Vej 2011.

Vurdering af SRO-data	✓
Døgn hvor data er korrigeret	0
Døgn uden måledata	3

	Målt SRO-data	Korrigeret SRO-data	Model beregning
Overløb, antal	39	39	22
Overløb, varighed [timer]	51	51	23
Aflastet volumen [m^3]			1874

Overløbsbygværk: Davids Allé
Regnserie: Svenstrup
Periode: 1. januar 2011 - 31. december 2011

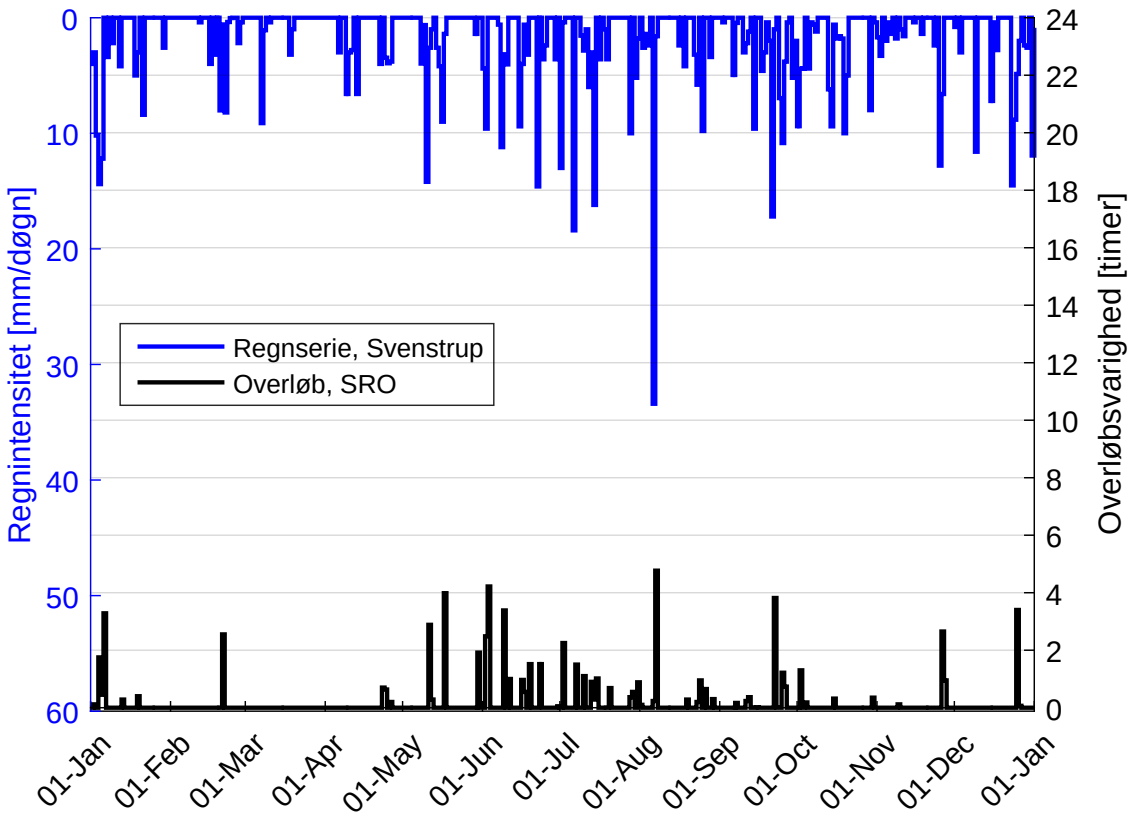


Figur G.6: Overløbsvarighed for overløbsbygværk på Davids Allé 2011.

Vurdering af SRO-data	✓
Døgn hvor data er korrigeret	0
Døgn uden måledata	3

	Målt SRO-data	Korrigeret SRO-data	MIKE URBAN beregning
Overløb, antal	67	67	58
Overløb, varighed [timer]	225	225	125
Aflastet volumen [m^3]			17328

Overløbsbygværk: Enggårdsgade
Regnserie: Svenstrup
Periode: 1. januar 2012 - 31. december 2012

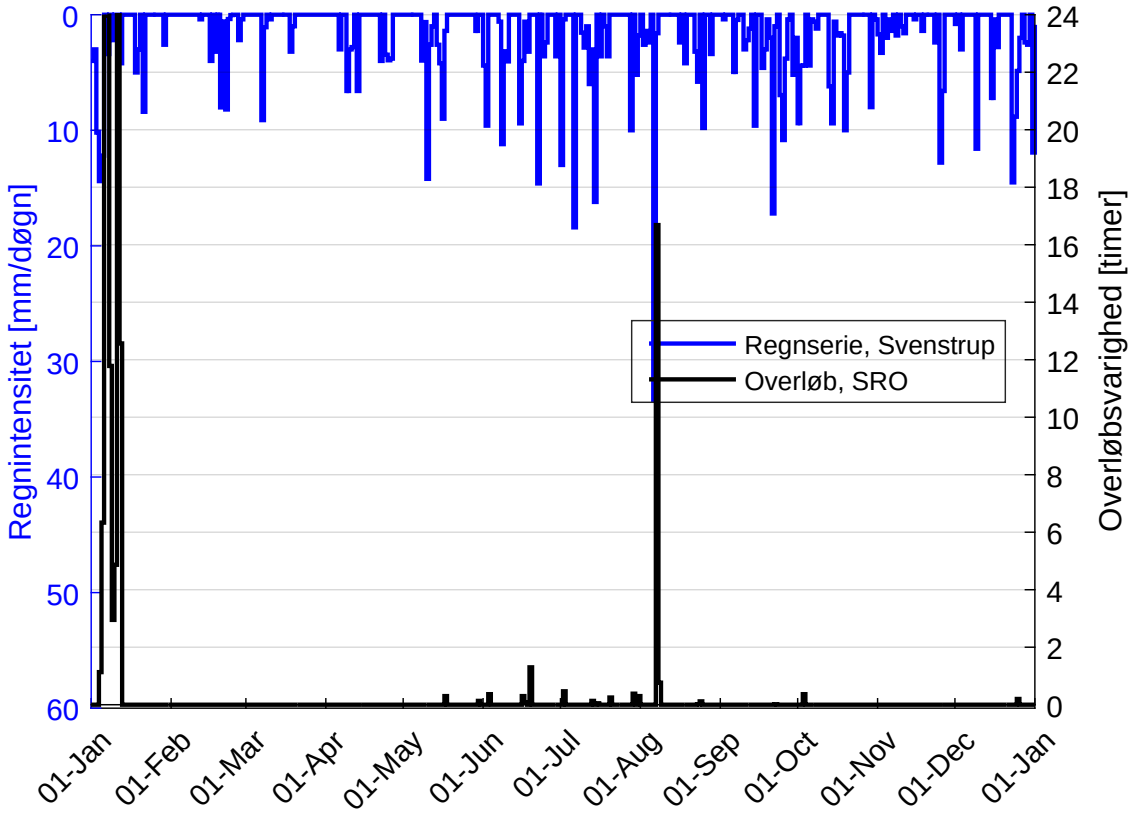


Figur G.7: Overløbsvarighed for overløbsbygværk i Enggårdsgade 2012.

Vurdering af SRO-data	✓
Døgn hvor data er korrigeret	0
Døgn uden måledata	10

	Målt SRO-data	Korrigeret SRO-data	MIKE URBAN beregning
Overløb, antal	61	61	97
Overløb, varighed [timer]	68	68	177
Aflastet volumen [m^3]			11589

Overløbsbygværk: Kjærs Mølle Vej
Regnserie: Svenstrup
Periode: 1. januar 2012 - 31. december 2012

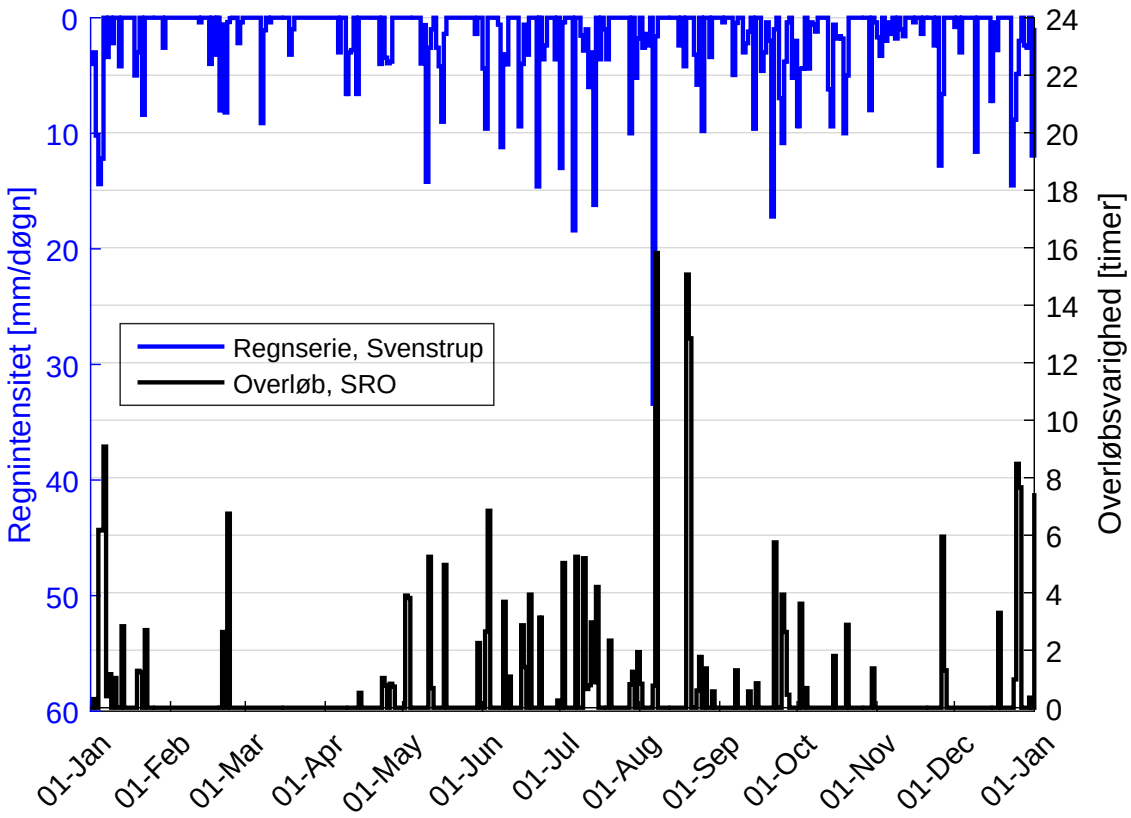


Figur G.8: Overløbsvarighed for overløbsbygværk på Kjærs Mølle Vej 2012.

Vurdering af SRO-data	✓
Døgn hvor data er korrigeret	0
Døgn uden måledata	13

	Målt SRO-data	Korrigeret SRO-data	MIKE URBAN beregning
Overløb, antal	25	25	13
Overløb, varighed [timer]	134	134	11
Aflastet volumen [m^3]			1398

Overløbsbygværk: Davids Allé
Regnserie: Svenstrup
Periode: 1. januar 2012 - 31. december 2012

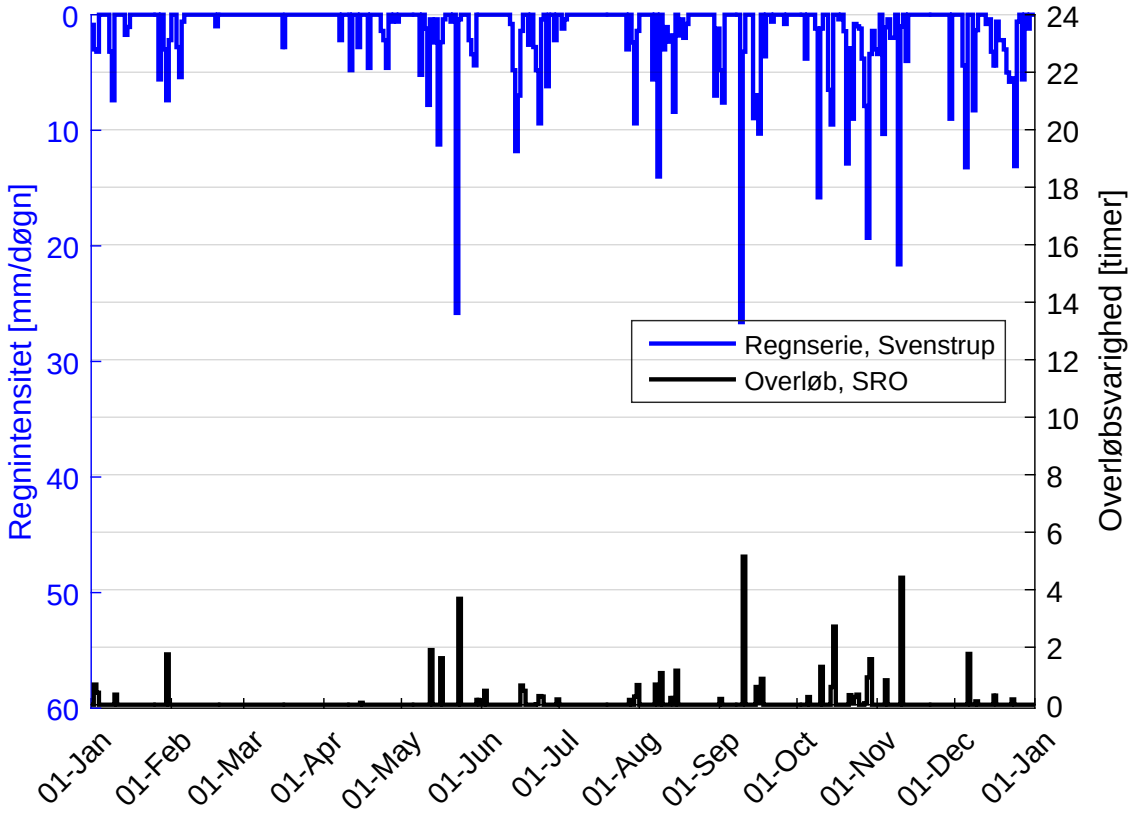


Figur G.9: Overløbsvarighed for overløbsbygværk på Davids Allé 2012.

Vurdering af SRO-data	✓
Døgn hvor data er korrigeret	0
Døgn uden måledata	11

	Målt SRO-data	Korrigeret SRO-data	MIKE URBAN beregning
Overløb, antal	74	74	50
Overløb, varighed [timer]	227	227	113
Aflastet volumen [m^3]			14184

Overløbsbygværk: Enggårdsgade
Regnserie: Svenstrup
Periode: 1. januar 2013 - 31. december 2013

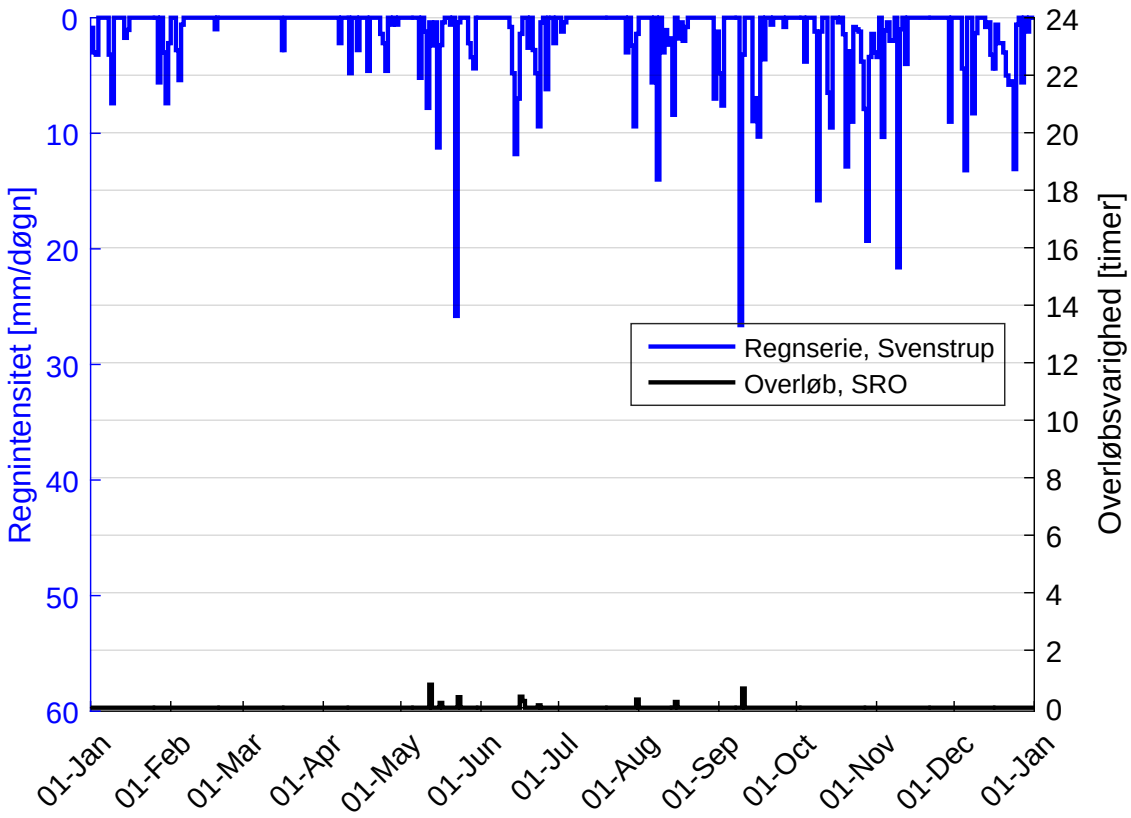


Figur G.10: Overløbsvarighed for overløbsbygværk i Enggårdsgade 2013.

Vurdering af SRO-data	✓
Døgn hvor data er korrigeret	0
Døgn uden måledata	3

	Målt SRO-data	Korrigeret SRO-data	MIKE URBAN beregning
Overløb, antal	47	47	82
Overløb, varighed [timer]	41	41	157
Aflastet volumen [m^3]			9447

Overløbsbygværk: Kjærs Mølle Vej
Regnserie: Svenstrup
Periode: 1. januar 2013 - 31. december 2013

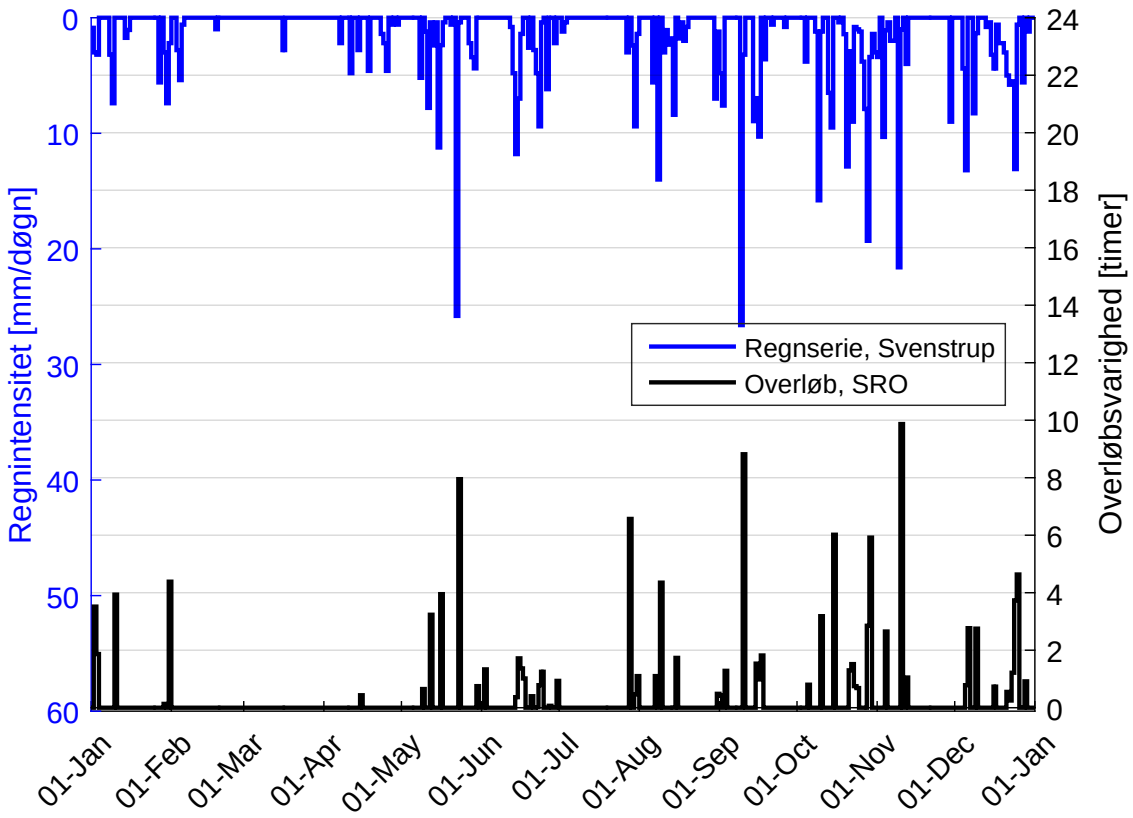


Figur G.11: Overløbsvarighed for overløbsbygværk i Kjærs Mølle Vej 2013.

Vurdering af SRO-data	✓
Døgn hvor data er korrigeret	0
Døgn uden måledata	3

	Målt SRO-data	Korrigeret SRO-data	MIKE URBAN beregning
Overløb, antal	10	10	17
Overløb, varighed [timer]	3	3	10
Aflastet volumen [m^3]			631

Overløbsbygværk: Davids Allé
Regnserie: Svenstrup
Periode: 1. januar 2013 - 31. december 2013

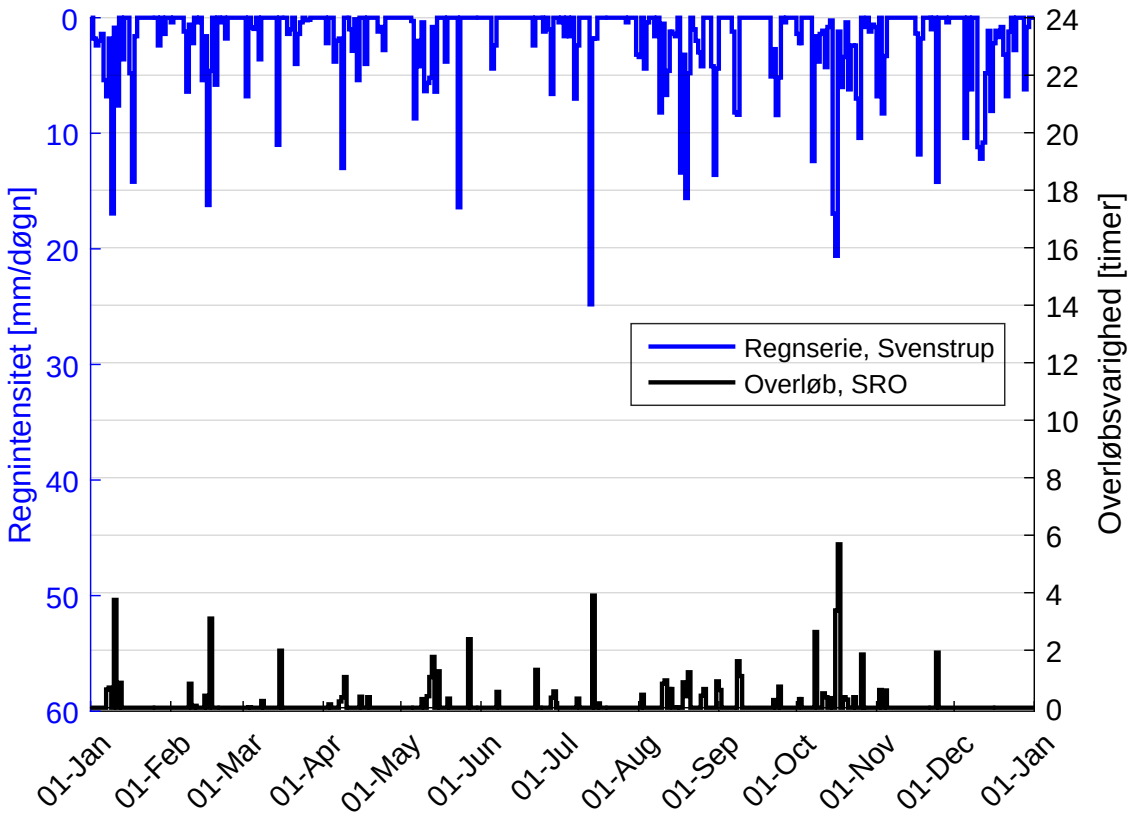


Figur G.12: Overløbsvarighed for overløbsbygværk på Davids Allé 2013.

Vurdering af SRO-data	✓
Døgn hvor data er korrigeret	0
Døgn uden måledata	8

	Målt SRO-data	Korrigeret SRO-data	MIKE URBAN beregning
Overløb, antal	63	63	48
Overløb, varighed [timer]	133	133	105
Aflastet volumen [m^3]			11178

Overløbsbygværk: Enggårdsgade
Regnserie: Svenstrup
Periode: 1. januar 2014 - 31. december 2014

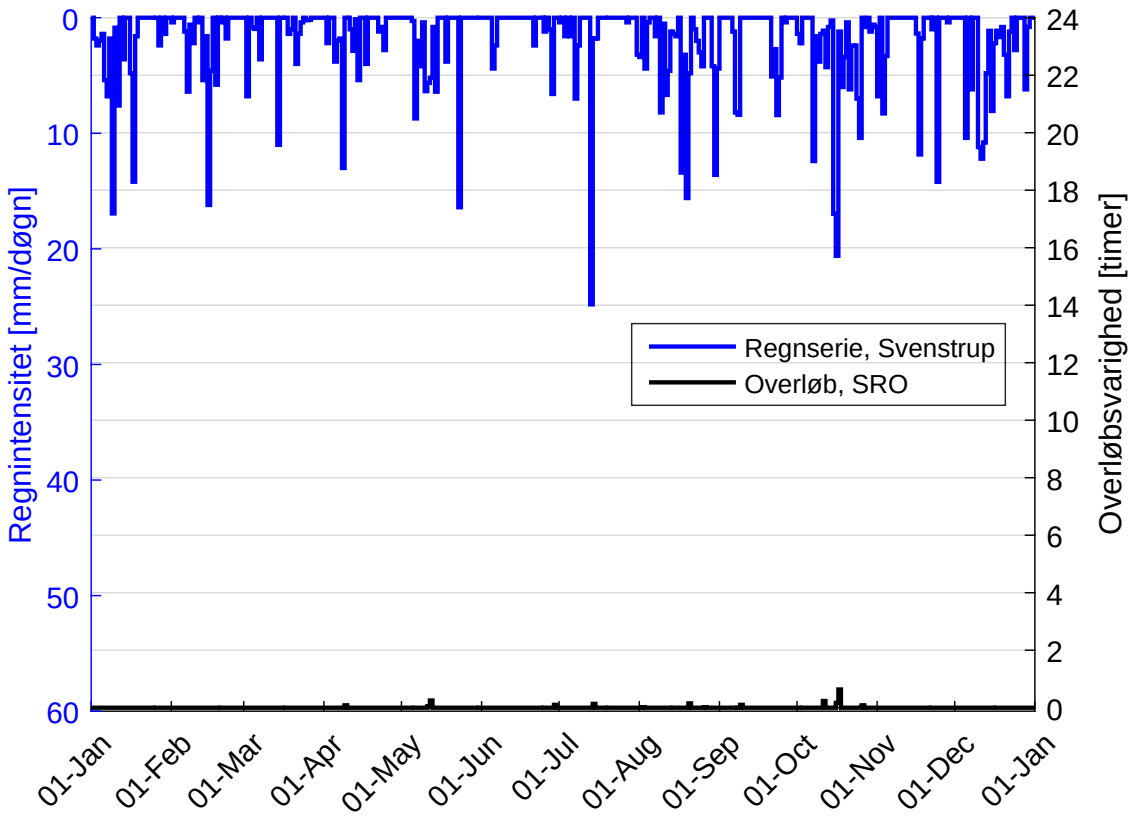


Figur G.13: Overløbsvarighed for overløbsbygværk i Enggårdsgade 2014.

Vurdering af SRO-data	÷
Døgn hvor data er korrigeret	0
Døgn uden måledata	32

	Målt SRO-data	Korrigeret SRO-data	MIKE URBAN beregning
Overløb, antal	65	65	100
Overløb, varighed [timer]	61	61	180
Aflastet volumen [m^3]			11621

Overløbsbygværk: Kjærs Mølle Vej
Regnserie: Svenstrup
Periode: 1. januar 2014 - 31. december 2014

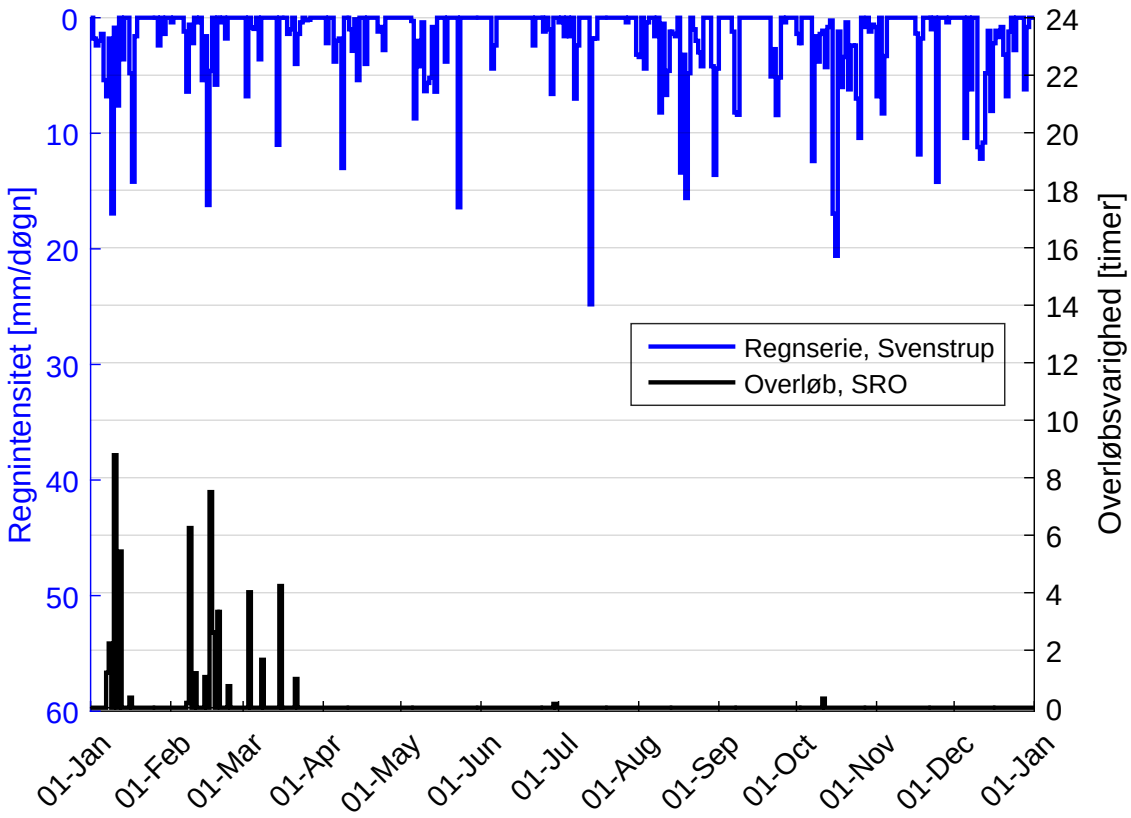


Figur G.14: Overløbsvarighed for overløbsbygværk på Kjærs Mølle Vej 2014.

Vurdering af SRO-data	÷
Døgn hvor data er korrigeret	0
Døgn uden måledata	25

	Målt SRO-data	Korrigeret SRO-data	MIKE URBAN beregning
Overløb, antal	13	13	18
Overløb, varighed [timer]	2	2	14
Aflastet volumen [m^3]			1037

Overløbsbygværk: Davids Allé
Regnserie: Svenstrup
Periode: 1. januar 2014 - 31. december 2014



Figur G.15: Overløbsvarighed for overløbsbygværk på Davids Allé 2014.

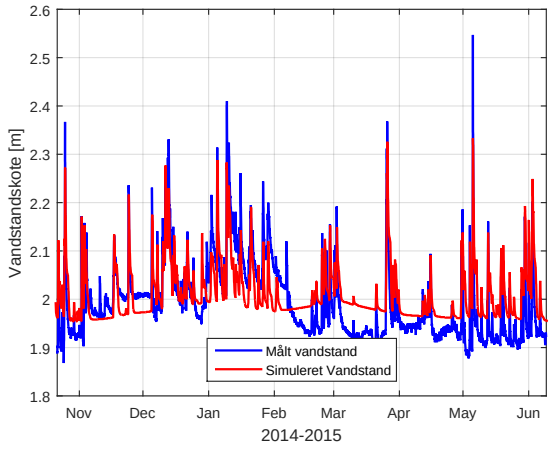
Vurdering af SRO-data	÷
Døgn hvor data er korrigeret	0
Døgn uden måledata	25

	Målt SRO-data	Korrigeret SRO-data	MIKE URBAN beregning
Overløb, antal	21	21	56
Overløb, varighed [timer]	52	52	115
Aflastet volumen [m^3]			13068

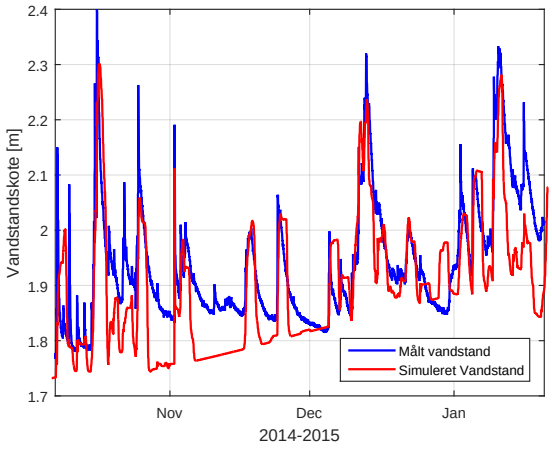
Kalibreringsresultat for Vandløbsmodellen

H

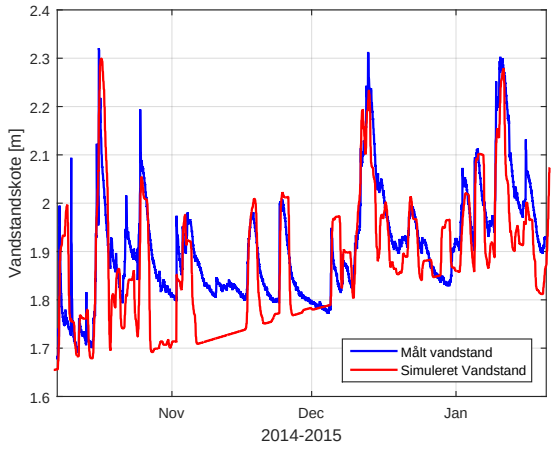
En sammenligning af de kalibrerede og simulerede vandstande i punkterne V2, Ø2, Ø3 og Å2 er vist på Figur H.1, H.2, H.3 og H.4.



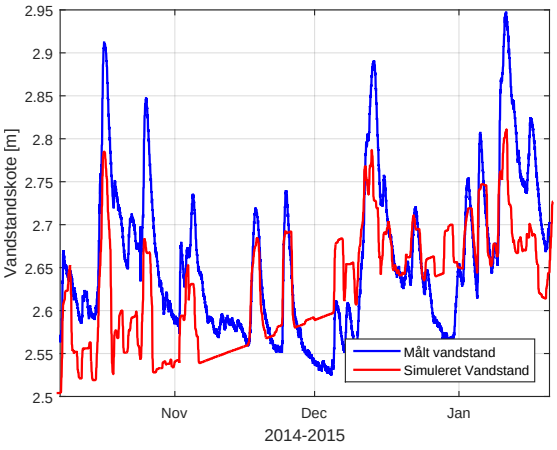
Figur H.1: Kalibreringsresultat for punkt V2 i Vestre Landgrøft.



Figur H.2: Kalibreringsresultat for punkt Ø2 i Østre Landgrøft.



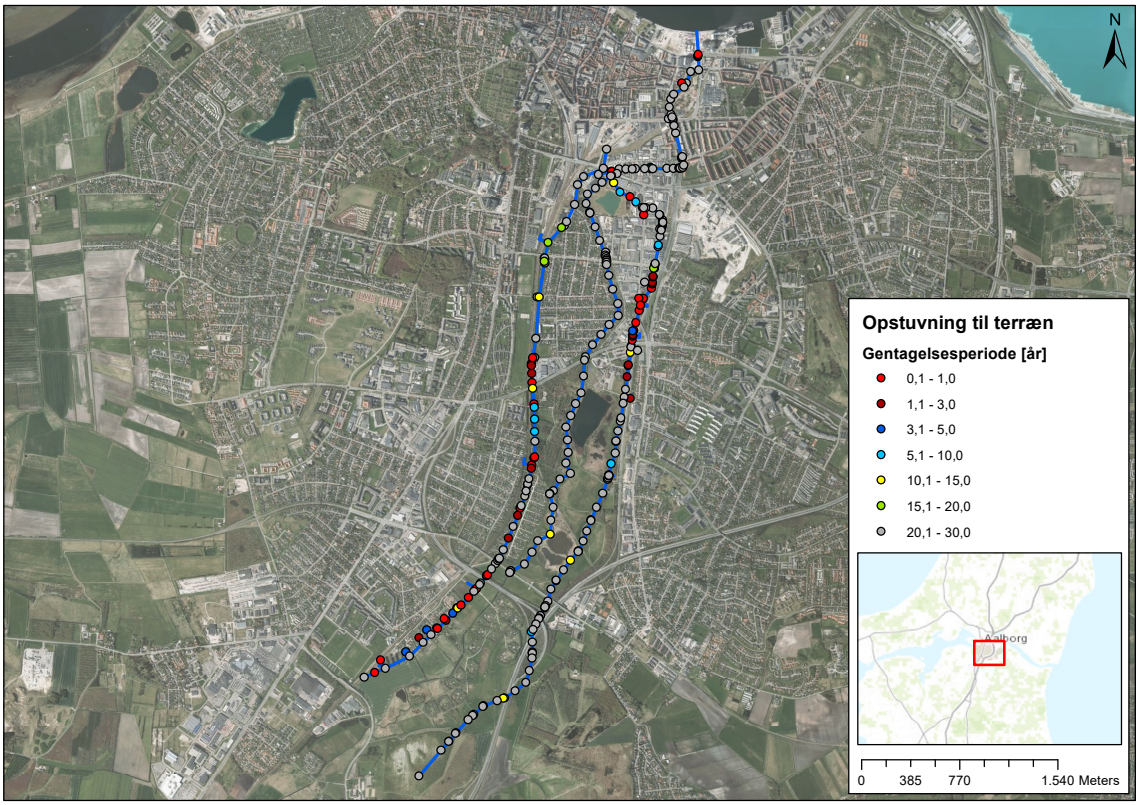
Figur H.3: Kalibreringsresultat for punkt Ø3 i Østre Landgrøft.



Figur H.4: Kalibreringsresultat for punkt Å2 i Østerå.

Fremtidigt Klima Scenarie 2 I

Resultat af en opstuvningsberegning udført for Østerå vandløbssystem fremgår af Figur I.1. Her er anvendt en klimafremskrevet Svenstrup-regnserie samt DMI's øvre bud på en fremtidig havvandstandsstigning omkring Danmark.

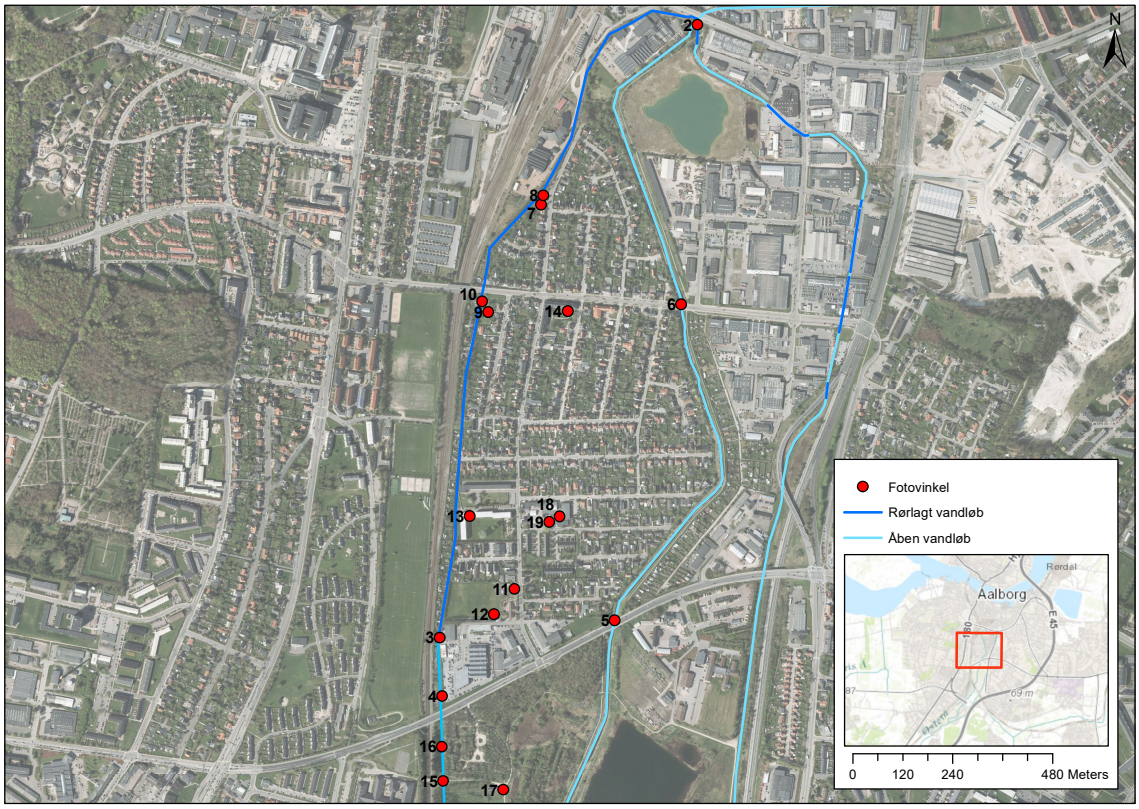


Figur I.1: Gentagelsesperiode for opstuvning til terræn i Østerå vandløbssystem ved brug af en fremskrevet regnserie og DMI's øvre bud på en fremtidig havvandstandsstigning.

Fotobilag J

I følgende Bilag fremgår fotos af nuværende pumpestationer, områder for planlagte first flush bassiner, nedsivningsbassiner og vandløbene.

Oversigtskort over hvor billederne er taget fremgår af Figur J.1. Numrene refererer til Figur-nummeret.



Figur J.1: Oversigtskort for fotos.



Figur J.2: Sammenløb mellem Østerå og Østre Landgrøft. Billede taget mod syd.



Figur J.3: Vestre Landgrøft: Overgang fra åbent vandløb til rørlagt strækning.



Figur J.4: Vestre Landgrøft set fra Over Kæret. Billede taget mod nord.



Figur J.5: Østerå set fra Over Kæret. Billede taget mod nord.



Figur J.6: Østerå set fra Ny Kærvej. Billede taget mod nord.



Figur J.7: Pumpestationen på Kjærs Mølle Vej.



Figur J.8: Område for first flush bassin på vestsiden af pumpestationen på Kjærs Mølle Vej.



Figur J.9: pumpestationen på Davids Allé.



Figur J.10: Område for first flush bassin på nordsiden af pumpestationen på Davids Allé.



Figur J.11: Pumpestationen i Enggårdsgade.



Figur J.12: Område for first flush bassin på vestsiden af pumpestationen i Enggårdsgade.



Figur J.13: Område for nedsivningsanlæg 1 og 2.



Figur J.14: Område for nedsivningsanlæg 3.



Figur J.15: Oversvømmelsestruet område nær Vestre Landgrøft. Billede taget mod syd.



Figur J.16: Oversvømmelsestruet område nær Vestre Landgrøft. Billede taget mod syd.



Figur J.17: Oversvømmelsestruet område ca. 120 meter fra Vestre Landgrøft. Billede taget mod vest.



Figur J.18: Området for regnvandsrende i skolegården på Kærbyskolen.



Figur J.19: Området for regnvandsrende i skolegården på Kærbyskolen.

Elektronisk Bilag K

Følgende dokumenter og modeller kan ses på vedlagte Bilags-USB:

K.1 MIKE URBAN-model over Kærbys afløbssystem opsat med overflademodel A.

Indeholder en Microsoft Access-fil *Kaerby_overflade_A*, som kan åbnes med MIKE URBAN.

K.2 MIKE URBAN-model over Kærbys afløbssystem opsat med overflademodel B.

Indeholder en Microsoft Access-filen *Kaerby_overflade_B*, som kan åbnes med MIKE URBAN. Derudover indeholder dette Bilag også en Matlab-fil *Udregning_overflader_B*, som udregner sammensætningen af de forskellige overflader ved brug af Microsoft Excel-filen *Udregning_overflader_B*.

K.3 Observerede vandstande i pumpesumpe anvendt til kalibrering og validering.

Indeholder en excel-fil med målte vandstande i pumpesumpene i Enggårdsgade, Davids Allé og på Kjærs Mølle Vej.

K.4 MIKE URBAN-model over Østerå vandløbssystem.

Indeholder en Microsoft Access-filerne *Aalborg vandlobsmodel* og *Aalborg vandlobsmodel simpel*, som kan åbnes med MIKE URBAN. De to filer er for henholdsvis den udleverede vandløbsmodel og den simplificerede vandløbsmodel.

K.5 Vandstandsmålinger og tværsnitsmålinger i Vestre Landgrøft, Østre Landgrøft og Østerå.

Indeholder Microsoft Excel-filer med loggede vandstande i perioden 2014-2015 for Vestre Landgrøft, Østre Landgrøft og Østerå. Tværsnitsmålinger af Østerå er vedlagt i en Microsoft Excel-fil. Både vandstandsmålinger og tværsnitsmålinger.

K.6 Rå- og korrigerede SRO-data fra overløbsbygværker i Kærby.

indeholder en Microsoft Excel-fil med data, som er anvendt til validering af afløbsmodellen i forhold til antal og varighed af overløb.

K.7 Radarbilleder af regnhændelse d. 6. august 2012.

Indeholder radarbilleder for d. 6. august 2012 i perioden kl. 05.00 til kl. 16.00 med et interval på 10 minutter.

K.8 Matlab-model til beregning af first flush bassinvolumen.

Indeholder Matlab-modellen *Bassin*, der udregner first flush bassinvolumenerne med Matlab Data-filerne *lang_serie_dav_2012*, *lang_serie_eng_2012* og *lang_serie_kja_2012*. Matlab Data-filerne er regnet med Matlab-modellen *lang_serie_udregning* ved brug af Microsoft Excel-filerne *david*, *enggaardsgade* og *kjaersmolle*.

K.9 MIKE URBAN-model first flush bassiner.

Indeholder en Microsoft Access-filen *Kaerby_first_flush*, som kan åbnes med MIKE URBAN.

K.10 MIKE URBAN-model nedsivningsbassiner.

Indeholder en Microsoft Access-filen *Kaerby_nedsivningsbassiner*, som kan åbnes med MIKE URBAN.

K.11 MIKE URBAN-model separat regnvandssystem.

Indeholder en Microsoft Access-filen *Kaerby_separat*, som kan åbnes med MIKE URBAN. Dette system overholder opstuvning til terræn maksimalt en gang hvert femte år.

K.12 Prisoverslag for klimasikrende tiltag.

Indeholder Microsoft Excel-filen *Pris*, der er brugt til udregning af etableringsomkostninger for de forskellige klimasikrende tiltag.