Styring af Ikast Afløbssystem
Kandidatspeciale
Master thesis

Rasmus Nielsen, Stafan Priyankan Sri Vijayasekaran og Troels Hosbjerg

Aalborg Universitet - Vand og Miljø - Kandidatspeciale - VM9-7-2015 - 09-06-2016

Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Institut for Byggeri og Anlæg
Sofiendalsvej 9-11
9200 Aalborg SV
Telefon: 99 40 84 84
http://www.byggeri.aau.dk/

Synopsis:

I Ikast Afløbssystem er der observeret overløbsproblemer fra de fælleskloakerede oplande til de nærliggende recipienter. Dette er en klassisk problemstilling, der kan løses ved enten at udskifte dele af afløbssystemet eller blot en større udnyttelse af det nuværende afløbssystems kapacitet ved f.eks. styring. Det er valgt at undersøge potentialet for styring af afløbssystemet.
I dette projekt er to overordnede metoder til styring af Ikast Afløbssystem undersøgt, hvor det er valgt at styre Ikast Afløbssystem med en regel- og algoritmebaseret metodisk tilgang. Samtidigt er det et ønske fra Ikast-Brande Spildevand A/S at eliminere overløbsvolumen til recipienten Storå.
Der udarbejdes lokale og globale regelbaserede styringsstrategier, hvor potentialet af disse opvejes imod hinanden. Ydermere undersøges, hvorvidt det er nødvendigt at etablere et rørbassin i den nordlige del af Ikast for at eliminere overløbet til Storå.
Det er ligeledes forsøgt med en algoritmebaseret tilgang, hvor både en Offline- og Online-model opstilles. Det forsøges at opstille en algoritme til at finde de ideelle pumpekonfigurationer til at reducere overløbsvolumen under forskellige forudsætninger.
Det kan konkluderes, at der er potentiale for at styre på Ikast Afløbssystem ved begge metoder. Den regelbaserede metode viser sig at have den største effekt på reduktionen af det totale overløbsvolumen set over året 2005 for 19 regnhændelser, og ligeledes elimineres overløbet til Storå.

Titel: Styring af Ikast Afløbssystem
Projekt periode: 01-08-2015 - 09-06-2016
Projekt gruppe: VM9-7-2015
Deltagere:

Rasmus Nielsen

Stafan Priyankan Sri Vijayasekaran

Troels Hosbjerg

Vejledere:
Søren Liedtke Thorndahl

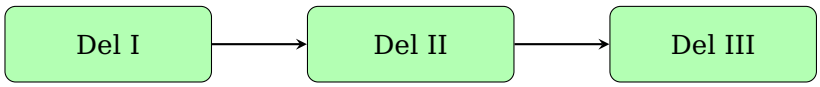
Opslagstal: 5
Sidetal: 97
Bilagssidetal: 55 + Appendiks cd
Afsluttet den: 09-06-2016

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatterne.

Forord

Denne rapport er udarbejdet af Rasmus Nielsen, Stafan Priyankan Sri Vijayasekaran og Troels Hosbjerg, Vand & Miljø 10. semester Aalborg Universitet. Projektet tager udgangspunkt i temaet styring af afløbssystemer. Der rettes en særlig tak til vores vejleder: Søren Thorndahl samt vores eksterne samarbejdspartnere, Krüger A/S og Ikast-Brande Spildevand A/S for hjælp og vejledning gennem projektperioden. Projektperioden strækker sig fra 1. september 2015 til og med 9. juni 2016.

I projektet tages der udgangspunkt i afløbssystemet tilhørende oplandet til Ikast Renseanlæg. Der udarbejdes en række løsningsforslag, der skal formindske aflastningerne til de omkringliggende recipienter. Projektet er opdelt i tre dele som illustreret på nedenstående figur. Del I omhandler projektlokaliteten samt en screening af potentialet for styring af afløbssystemet tilhørende oplandet til Ikast Renseanlæg. Del II indeholder en række regelbaserede styringsstrategier både på lokalt og globalt niveau. I Del III udarbejdes en genetisk algoritme, der søger efter den bedst mulige styringsstrategi, der håndterer den konkrete problemstilling.



På baggrund af emnet har Krüger A/S venligst udleveret to hydrauliske modeller af afløbssystemet tilhørende oplandet til Ikast Renseanlæg, hvor der er en detaljeret og simplificeret model. En nærmere beskrivelse af modellerne er at finde i Appendiks A side 99.

For dette projekt er det valgt at benytte Harvard-metoden som referencemetode. Alle referencer er opstillet i litteraturlisten bagerst i rapporten i alfabetisk rækkefølge. Bøger er angivet med forfatter, forlag og ISBN-nummer. Webadresser er angivet med dato, forfatter og URL-adresse. Figurer, tabeller, beregninger og formler er nummereret jf. kapitel, og hvis anden kildehenvisning ikke er angivet, er disse udarbejdet af gruppen selv. Citater er angivet med kursiv i teksten.

Der bliver anvendt følgende programmer til simulering, beregning og kortlægning: MIKE URBAN, MATLAB, ArcGIS, Excel og Access. Data til udarbejdelse af kort er hentet fra GEUS, Arealinformation, Kortforsyningen og MiljøGIS.

Bilag er placeret bagerst i rapporten, inklusiv en oversigt over de elektroniske bilag, der er vedlagt på CD-rom.

Abstract

In recent and coming years discharge from Ikast urban drainage system is polluting the local recipients: Storå, Karup Å and Skjern Å.

This study assesses development of control strategies for Ikast drainage system with the goal of reducing stress from sewer discharge on the recieving recipients. Two control methods are applied to a drainage model, and the reduction in sewer discharge is optimized.

The applied methods are rule and algorithmic based approaches, where combined sewage overflow (CSO) discharge is reduced by optimizing pump and weirs configurations. The rule based method consists of local and global configurations of pumps and weirs. The local strategies are developed around the idea that each basin is controlled independently from the rest, whereas the global strategy all basins are dependent on each other.

The algorithm features multiobjective optimisation of CSO and pump costs. Two model concepts are developed: Offline and Online. The Offline model optimizes earlier rain events, where a control strategy is sought to be derived from the optimized pump configurations. It is however not possible to determine any tendencies in the optimized pump configurations due to a combination of the algorithms somewhat arbitrary solutions and not enough rain events chosen.

The Online model optimizes CSO and prevents flooding in a time interval of 60 minutes, where a optimized solution is optained at each time step yielding variable pump configurations during the rain events. The Online model is developed with and without forecast. Without forecast the model yields arbitrary results, showing that the current setup requires some level of forecast in order to reduce CSO. With forecast the Online model shows promising reductions of CSO and reduced flooding in Ikast drainage system.

The largest reductions of CSO are achieved by using the rule based methods, where significant reductions of CSO are simulated. It is however possible to implement both the rule and algorithmic based solutions, and it is concluded that Ikast drainage system have a great potential for reducing CSO by implementing system control.

Indhold

Del I Introduktion af projektlokalitet og projektforløb 1

1 Introduktion 3
1.1 Ikast Afløbssystem 5

2 Styring af afløbssystemer 9
2.1 Tilbagefaldsstrategi 11
2.2 Årsager til nedbrud i styring 12

3 Screening af styringspotentiale 13
3.1 Bassinernes egenskaber 13
3.2 Analyse af restkapacitet 14
3.3 Sammenfatning 19

4 Problemformulering 21
4.1 Metode 21
4.1.1 Regelbaseret metode 22
4.1.2 Algoritmebaseret metode 22

Del II Regelbaseret Styring 23

5 Lokal styring 25
5.1 Nedbør 25
5.2 Implementering af procestanke 25
5.3 Teoretisk reducering 27
5.4 Styringsstrategi 28
5.4.1 Styring 1A: Forbedring af nuværende styringsstrategi 28
5.4.2 Styring 1B: Etablering af rørbassin 31
5.4.3 Styring 1C: Forbedret udnyttelse af rørbassin 34
5.4.4 Styring 1D: Styring ud fra sårbare recipienter 36
5.5 Effekt af styringsstrategier 39
5.6 Sammenfatning 40

6 Global styring 41
6.1 Styringsprincip 41
6.1.1 Nedbør 43
6.2 Styringsstrategier 43
6.2.1 Nuværende styringsstrategi 44

6.2.2 Styring 2A: Styring ud fra bassinernes specifikke egenskaber . . 45
6.2.3 Styring 2B: Styring ud fra 'bedste kvalificerede bud' 48
6.3 Effekt af styringsstrategier 50
6.4 Sammenfatning 50
6.5 Styring af rørbassin 51
6.6 Global vs. Lokal styring 52

7 Delkonklusion II **55**

Del III Algoritmebaseret styring **57**

8 Offline optimering **59**
8.1 Opstillede strategier for optimering 59
8.1.1 Strategi 1 59
8.1.2 Strategi 2 60
8.1.3 Nedbør 61
8.2 Metoder 62
8.2.1 Multiobjektive problemstillinger 62
8.2.2 NSGA-II 63
8.2.3 Valg af kode og sammenkobling af modeller 67
8.3 Inputparametre til algoritmen 68
8.4 Resultater 69
8.4.1 Strategi 1: Minimering af overløbsvolumen og pumpeomkostninger 69
8.4.2 Strategi 2: Minimering af overløbsvolumen til Storå 71
8.5 Sammenfatning 72

9 Online optimering **75**
9.1 Strategi til Online-model 75
9.2 Nedbør 76
9.3 Metoder 76
9.3.1 Ekskludering af oversvømmelser 79
9.4 Inputparametre 79
9.5 Resultater 80
9.5.1 Uden forecast 80
9.5.2 Med forecast 83
9.6 Sammenfatning 85

10 Delkonklusion III **87**

11 Diskussion **89**

12 Konklusion **91**

13 Anbefalinger **93**

Litteraturliste **95**

A Modelopsætning
A.1 Hydrologisk og hydrodynamisk overflademodel 99
A.2 Hydrodynamisk rørmodel 102

B Simplificeret afløbsmodel
B.1 Simplificering af ledningsnetværk 105
B.1.1 Nedbør 106
B.2 Metoder 107
B.3 Resultater 107
B.4 Diskussion 109

C Opdatering af hydraulisk model

D Regnhændelse anvendt til styringspotentiale

E Driftsanalyse
E.1 Anvendte regnhændelser 115
E.2 Udnyttelsesgrader 116

F Regnhændelser i 2005 med nedbør større end 2 mm

G Placering af procestanke

H Skitsetegning af rørbassinet

I Regnens indflydelse
I.1 Scenarie 1 126
I.2 Scenarie 2 127
I.3 Scenarie 3 128
I.3.1 Dimensionsgivende regn for bassiner 129
I.4 Overløbsvolumen 130

J Forbedring af nuværende styringsstrategi

K Regelbaseret global styring
K.1 Udnyttelsesgrader 137
K.1.1 Nuværende styring 137
K.1.2 Areal-specifik volumen 139
K.1.3 Bedst kvalificerede bud 141

L Parameterbestemmelse til optimeringsalgoritme

M Parameterbestemmelse til Online-model
M.1 Opdateringsfrekvens og antal generationer 149

M.2 Antal generationer 150

N Beregning af overløbsvolumen

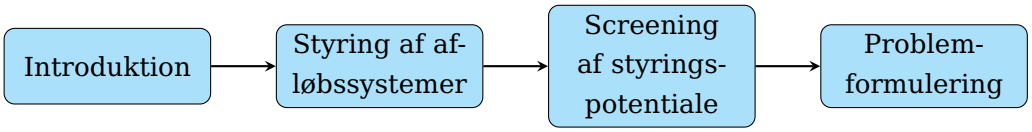
O Elektronisk appendiks

O.1 Tekniske tegninger af bassin 1A12000B 155
O.1.1 130-revD_ Kloakplan_ Gl_ Renseanlæg 155
O.1.2 150-revA_ Sparebassin_ Gl-Renseanlæg 155
O.2 Styringspotentiale_ regnhændelse 155
O.3 Del II 155
O.3.1 Reference model 155
O.3.2 Styring 1A 155
O.3.3 Styring 1B 155
O.3.4 Styring 1C 155
O.3.5 Styring 1D 155
O.3.6 Styring 2A 155
O.3.7 Styring 2B 155
O.3.8 Styring 2C 155
O.4 Del III 155
O.4.1 Offline-model 155
O.4.2 Online-model 155
O.4.3 Online-model med forecast 155

Del I

Introduktion af projektlokalitet og projektforløb

I Del I af rapporten er afløbssystemet tilhørende oplandet til Ikast Renseanlæg præsenteret. Konceptet bag styring af afløbssystemer er introduceret, og et overordnet styringspotentiale for afløbssystemet er analyseret. Sidst er en problemformulering for projektet præsenteret. I diagrammet herunder er kapitlerne vist i kronologisk rækkefølge.



1. Introduktion

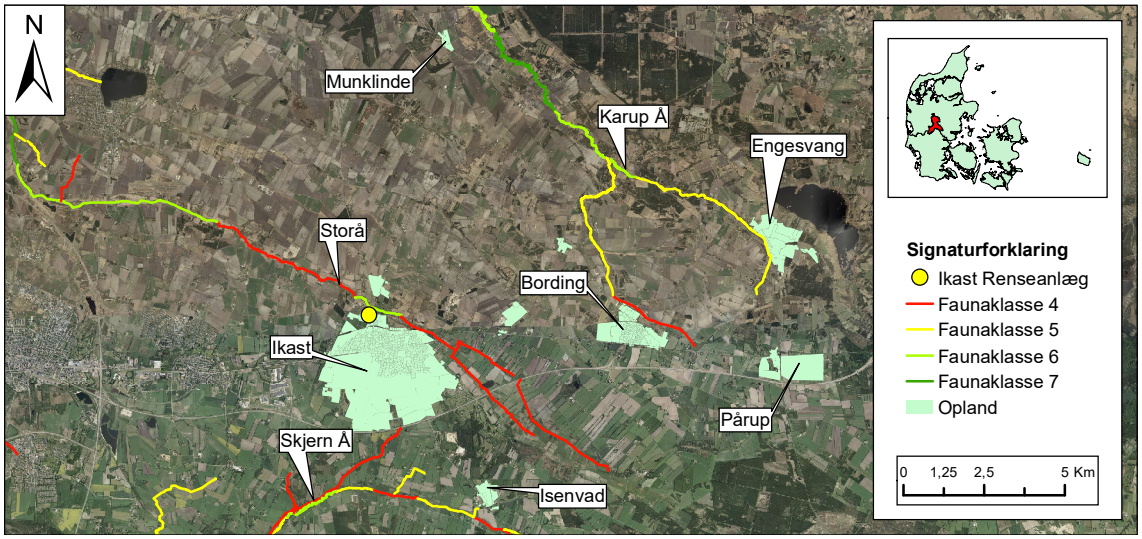
Afgangsprojektet omhandler styring af afløbssystemer. Styring af afløbssystemer har vist sig at kunne reducere overløbsvolumener og overløbsfrekvens til recipienter, men kan også anvendes til at lave kontrollerede oversvømmelser eller udjævning af vandføring til renseanlæg [Schütze et al., 2004].

I Danmark er der implementeret styring af afløbssystemer i bl.a. Kolding, København og Aarhus. I Koldings Afløbssystem er udnyttelsen af bassiner og pumpestationer optimeret. Styringen blev sat i drift juni 2011, og den udledte overløbsvolumen af spildevand til recipienterne er reduceret med 20-30% [Poulsen, 2015]. I København viser modelanalyser, at en styring har potentialet til at reducere overløbsvolumen til Øresund mellem 25 og 50% fra oplandet til renseanlægget Lynetten [EnviDan, 2015]. I Aarhus Havn forventes det at opnå badevandskvalitet efter implementering af samstyring af renseanlæg og afløbssystem [Bassø og Neve, 2009].

Ikast-Brande Spildevand A/S har tilkendegivet, at der ønskes en reduktion af udledt overløbsvolumen til recipienterne fra fælleskloakerede arealer (fremover benævnt som overløbsvolumen) i oplandet til Ikast Renseanlæg. Reduktionen af overløbsvolumen skal få vandløbene Storå, Karup Å og Skjern Å til at imødekomme krav fra vandplanerne om god økologisk tilstand [Lange, 2015b]. En god økologisk tilstand er defineret ved en DVFI-faunaklasse på 5-6 [Naturstyrelsen, 2015]. Vandløbenes nuværende faunaklasser ligger mellem 4-5, som illustreret i figur 1.1 side 4 [Naturstyrelsen, 2015]. Det er fra Ikast-Brande Spildevand A/S ønsket, at projektet fokuserer på at reducere overløbsvolumen til Storå, hvor tre udløb er tilkoblet [Lange, 2015b].

Ekstreme regnhændelser skaber overskridelse af Ikast Renseanlægs og dertilhørende fællessystems kapacitet. Overskridelsen af kapaciteten fører til udledning af opspædet spildevand til recipienterne forbundet med fællessystemet. Udledningen kan føre til forringelse af vandkvaliteten i recipienterne [Pedersen, 2014]. Problemstillingen kan løses ved at udvide kapaciteten i afløbssystemet og renseanlægget eller optimere udnyttelsen af den nuværende kapacitet ved f.eks. styring af afløbssystemet.

I et samarbejde mellem Ikast-Brande Spildevand A/S og den rådgivende ingeniørvirksomhed Krüger A/S er der udarbejdet en analyse af styringspotentialet i afløbssystemet for oplandet til Ikast Renseanlæg (fremover benævnt som Ikast Afløbssystem). Analysen viste et godt potentiale for at styre det tilhørende afløbssystem [Jensen, 2015]. Lokaliteten af oplandet til Ikast Renseanlæg er vist i figur 1.1.



Figur 1.1. Placering af Ikast, Munklinde, Engesvang, Bording, Pårup og Isenvad i Ikast-Brande Kommune [Jensen, 2015]. Faunaklasser er hentet fra [Naturstyrelsen, 2015].

I dette projekt undersøges potentialet for at reducere overløbsvolumen ved styring af Ikast Afløbssystem. I oplandet til Ikast Renseanlæg ligger foruden Ikast byerne Bording, Isenvad, Engesvang, Pårup og Munklinde med et samlet indbyggertal på ca. 26600. Byernes lokalitet er vist på figur 1.1 [Jensen, 2015].

Ikast Renseanlæg er placeret i den nordvestlige del af Ikast, hvor renseanlægget behandler spildevandet mekanisk, biologisk og kemisk for så at udlede det rensede spildevand til Storå. Ikast Renseanlæg blev etableret i 1979, hvor anlægget er dimensioneret til at kunne håndtere en belastning på 63.000 PE (Person Ækvivalenter). På en tørvejrsdag modtager anlægget ca. 6000 m^3 spildevand og på et regnvejrsdøgn op til 35.000 m^3 [Ikast-Brande Spildevand A/S, 2015].

1.1 Ikast Afløbssystem

Afløbssystemet er defineret fra en afløbsmodel udleveret af Krüger A/S. Afløbsmodellen er forsimplet for regn- og spildevand ved at fjerne dele af systemet, der ikke direkte er forbundet med fællessystemet. Modellen er sidst opdateret i oktober 2014. Der tages forbehold for, at data præsenteret for afløbssystemet i dette afsnit er baseret på den udleverede model, og eventuelle afvigelser fra det nuværende afløbssystem kan forekomme.

I dette studie er to afløbsmodeller for Ikast Afløbssystem anvendt: en detaljeret og en simplificeret. Den detaljerede model beskriver fællessystemet, som det var i 2014. Den simplificeret model har reduceret antallet af brønde og rørledninger med henblik på at reducere beregningstiden. Metoden til simplificeringen af modellen er beskrevet og analyseret i appendiks B side 105, hvor det undersøges, om denne afspejler den detaljerede model tilfredsstillende. Den detaljerede model anvendes til analyser i Del I, II og i kapitel 8 side 59 i Del III. Den simplificerede model er anvendt i kapitel 9 side 75 i Del III, hvor en lavere beregningstid var nødvendigt.

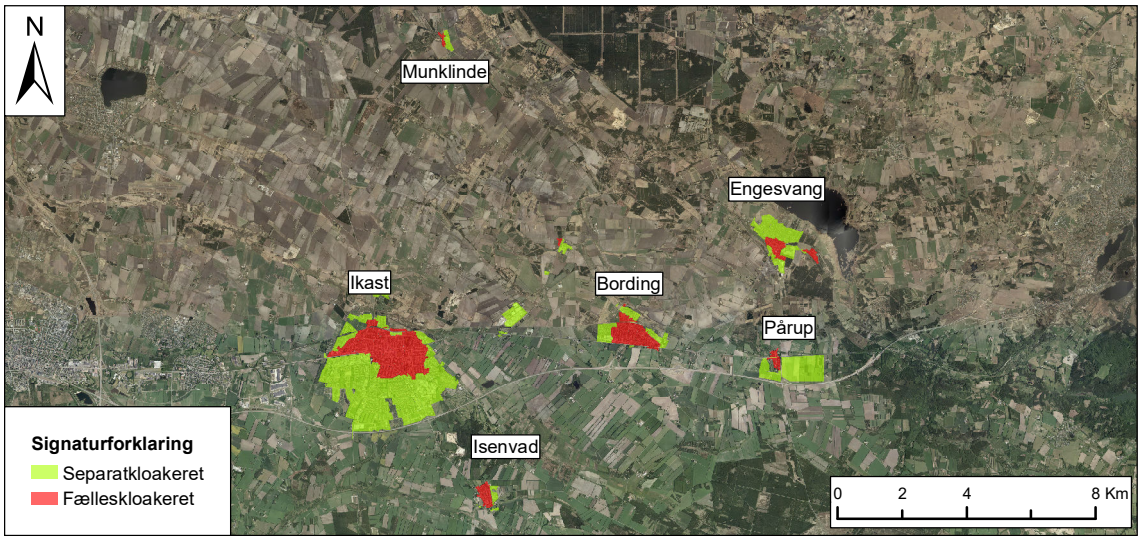
Modellerne er gennem to omgange kalibreret i Ikast og Bording, men det har ikke været muligt at anskaffe dokumentationen for denne. Det er i dette projekt forudsat, at kalibreringen af modellerne er på plads, og der derfor ikke kalibreres på de udleverede modeller.

Afløbsmodellerne beskriver overfladeafstrømningen på oplandet ved tid-areal metoden, hvor vandføring og vandniveau i rørledninger er beskrevet ved en fuld hydrodynamisk rørmodel. En mere detaljeret beskrivelse af modellerne, beregningsmetodik og opsætning er at finde i appendiks A side 99. I tabel 1.1 kan antallet af brønde og rørledninger for begge modeller aflæses.

Model	**Brønde** [-]	**Rørledninger** [-]
Detaljeret	1666	1653
Simplificeret	636	622

Tabel 1.1. Antallet af ledninger og brønde i den detaljerede og simplificerede model.

De ældre dele af afløbssystemet i Ikast, Bording, Isenvad, Engesvang, Pårup og Munklinde er i dag fælleskloakeret. Fordelingen mellem separat- og fælleskloakeringen er vist i figur 1.2.



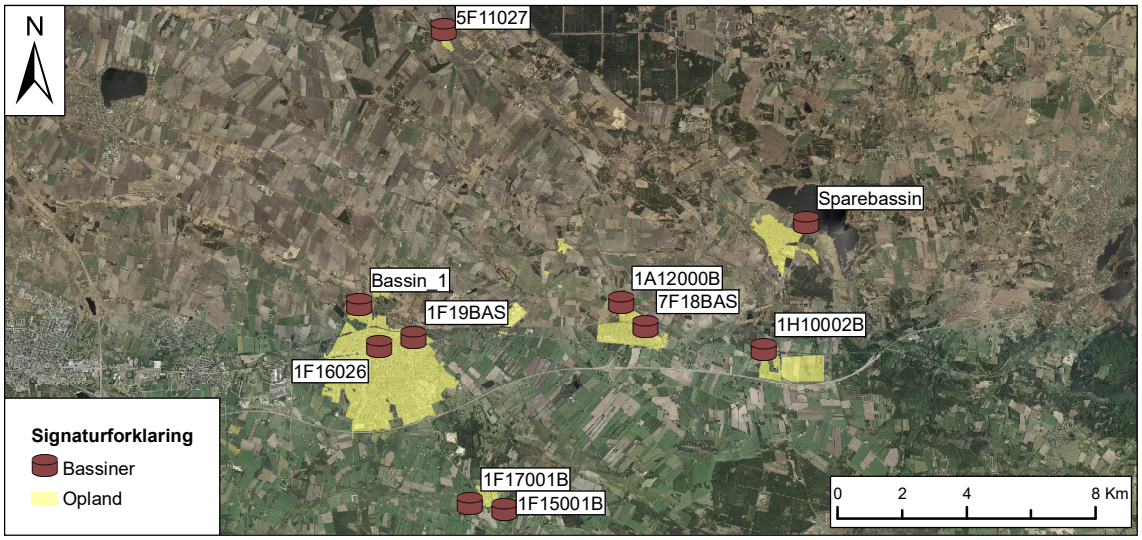
Figur 1.2. Det fælles- og separatkloakerede opland for Ikast Renseanlæg [Jensen, 2015]. De mindre oplande uden navngivning er mindre byer, gårde og noget industri.

I byerne omkring Ikast er der delvis fælles- og separatkloakering, hvor Bording og Isenvad skiller sig ud med større fælleskloakerede end separatkloakerede oplande. Fordelingen mellem fælles- og separatkloakerede oplande kan aflæses i tabel 1.2.

	Total areal [ha]	**Reduceret areal** [ha]
Fælleskloakering	463	172
Separatkloakering	485	155
Sum	949	327

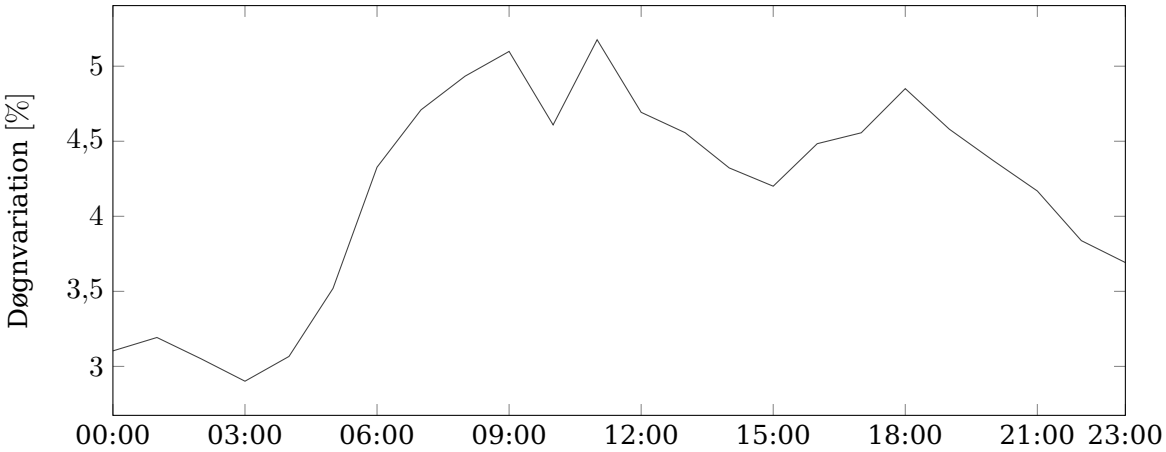
Tabel 1.2. Opdelingen af oplandet for Ikast Renseanlæg. Data er fra Jensen [2015].

Siden sidste opdatering af den hydrauliske model er der udbygget et nyt bassin i Bording, 1A12000B, der er implementeret i modellen ud fra tekniske tegninger udleveret fra Lange [2015c]. En nærmere gennemgang af implementeringen af bassinet er at finde i appendiks C side 111. Afløbssystemet har 10 bassiner i fællessystemet, der er illustreret i figur 1.3 side 7.



Figur 1.3. Bassinerne fordelt ud over Ikast Afløbssystem. Data er fra Jensen [2015].

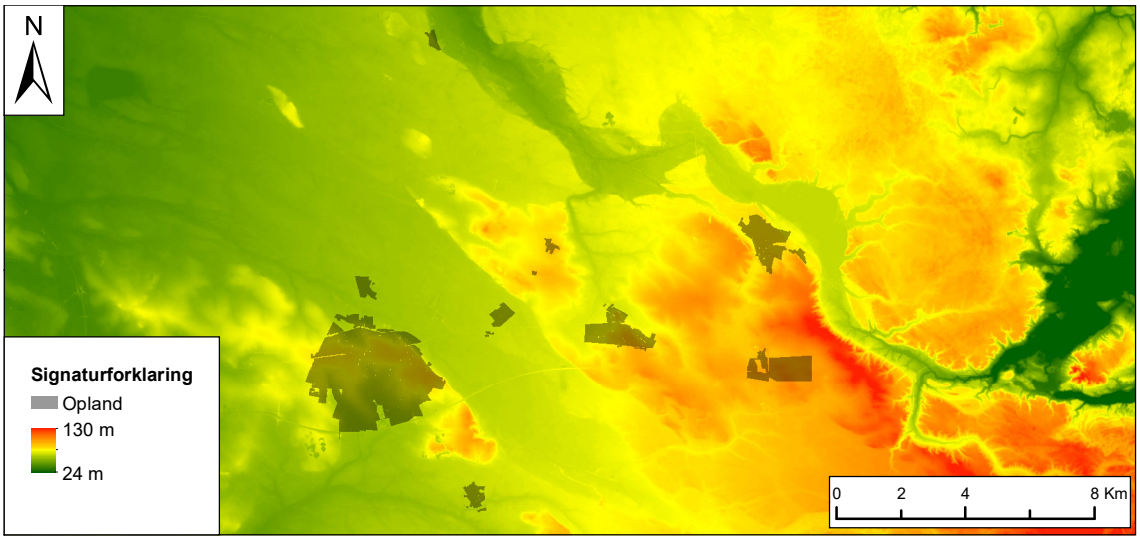
Der er 26600 beboere tilsluttet oplandet til Ikast Afløbssystem. Spildevandsproduktionen er sat til $130\,\mathrm{L/PE/dag}$, og døgnvariationen pr. indbygger er vist i figur 1.4.



Figur 1.4. Døgnvariationen i spildevandsstrømmen i oplandet til Ikast Renseanlæg. Data er fra Jensen [2015].

Døgnvariationen vist på figur 1.4 illustrerer spildevandstrømmen for gennemsnitsdøgnet, der i denne rapport er anvendt for samtlige analyser og modeller.

Ikast-området har et varierende terræn, der er illustreret på figur 1.5. Ikast er delt ved en højderyg, hvor afløbssystemet derfor har gravitationspåvirket afstrømning i nordlig og sydlig retning bestemt fra højderyggen.

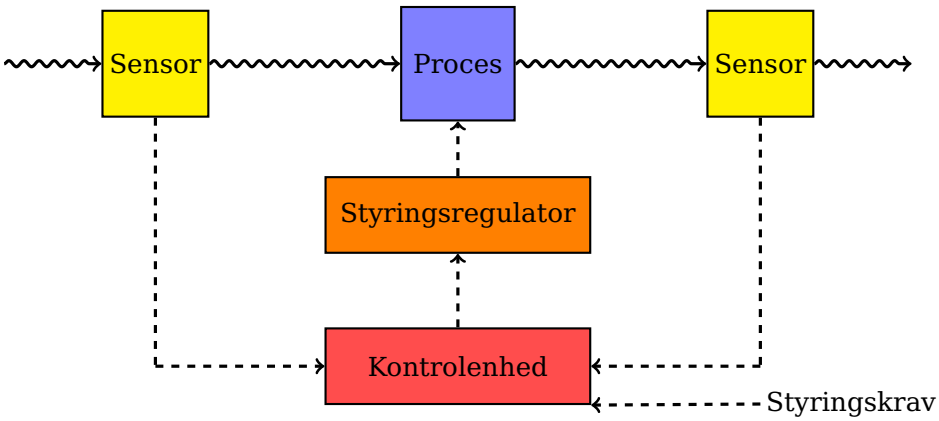


Figur 1.5. Terrænkort over oplandet tilhørende Ikast Renseanlæg.

Efter udforskning af afløbssystemet er næste skridt at undersøge styringspotentialet for Ikast Afløbssystem. Før styringspotentialet er analyseret er det i næste kapitel valgt at præsentere konceptet bag styring og tilbagefaldsstrategier.

2. Styring af afløbssystemer

Et urbant afløbssystem kan styres ved måling af variable processer, der anvendes med eller uden tidsforsinkelse til at styre driften af afløbssystemet. Styring kan derfor forekomme reaktivt ved, at driften af afløbssystemet responderer på målinger fra f.eks. regnmåler data, observeret vandføring eller målt niveau på vandspejl. Det kan også forekomme ved en prædiktiv tilgang, f.eks. ved brug af modeller til at fremskrive regnintensiteten. Et eksempel på styring af en proces i et afløbssystem er illustreret i figur 2.1. En procesvariabel måles af en *sensor* (f.eks. regnmålere, vandniveaumålere, flow målere og vandkvalitetsmålere), der sender måledata til en *kontrolenhed*, der via styringskrav styrer en *styringsregulator* (f.eks. pumper, spjæld, overløb, ventiler og apparat til dosering af kemikalier), som regulerer processen.



Figur 2.1. Eksempel på en styring af en proces. Redigeret fra Schütze et al. [2004].

Styringen af processen i figur 2.1 har en sensor placeret før og efter processen, der måler en procesvariabel. Simplere styringer kan være foruden den ene af sensorne, hvor et system med en sensor før processen kaldes feed forward styring, og et system med en sensor efter processen er et feed backward system.

Styring af et afløbssystem kan forekomme på tre forskellige niveauer alt afhængig af styringskravet, der kan sættes til et fast udgangspunkt eller kontrolleres manuelt af en operatør. [Schütze et al., 2004]

- Passiv styring - Her bestemmer geometrien af afløbssystemet hvorledes systemet skal styres, f.eks. kan en overløbskant fra et overløbsbygværk styre vandet i forskellige retninger.
- Reaktiv styring - Her kan styringen enten være lokalt eller globalt betinget. En lokal styring er defineret ved separate styringer af processer, der er uafhængige af hinanden. I en global styring er processerne styret afhængigt af hinanden med henblik på at opnå en synergieffekt. Bassinerne kan f.eks. tømmes indbyrdes efter udnyttelsesgraden, hvor de mest belastede bassiner tømmes først.
- Prædiktiv styring - Her er styringen betinget af prognoser, der styrer hele afløbssystemet i en global sammenhæng. En prognose kunne forudsige høj belastning af renseanlægget og derved give tid til omstilling af driften med henblik på at forøge kapaciteten på renseanlægget.

Styringsstrategien er oftest udarbejdet som et regelsæt for afløbssystemets reaktion på en række betingelser. Regelsættet fortæller en computer, hvordan funktionen af afløbssystemet skal ændres for at kunne akkommodere f.eks. variation i nedbør eller afstrømning i afløbssystemet. Betingelserne kan opsættes efter nogle kriterier for, hvordan designerne tror, at systemet bedst muligt kan styres mod at udnytte f.eks. kapaciteten bedre. Styringsstrategierne testes herefter i simuleringssoftware og optimeres indtil, at systemet opfører sig tilfredsstillende.

Udviklingsprocessen ved manuelt opsatte styringsstrategier kan til tider virke uoverskueligt ved komplekse afløbssystemer med mange styringsregulatorer. I nogle tilfælde kan det være bedre at udvikle en model til at teste forskellige konfigurationer af styringsregulatorerne. Her kan f.eks. en algoritme undersøge styringsstrategier på baggrund af den hydrauliske models respons på ændring af konfigurationen til styringsregulatorerne. Algoritmen har den fordel, at den kan evaluere forskellige ændringer af systemet hurtigt og optimere efter det. Algoritmen kan derfor overskueliggøre udviklingsprocessen ved at finde den optimale styringsstrategi. Den optimerede styringsstrategi kan være fundet ved en mindre indlysende konfiguration af styringsregulatorerne end fremstillet ved manuelt opsatte strategier.

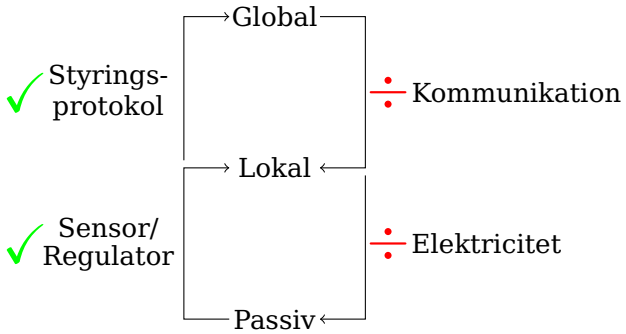
Styringsstrategierne kan udvikles ved en Online simulering af afløbssystemet, hvor modellen med et givet tidsrum (f.eks. hvert femte minut) evaluerer effekten af et sæt forskellige styringer. For hvert tidsskridt implementeres den strategi, der giver de bedste resultater. Modsat kan styringen bestemmes Offline ved at optimere en serie af historiske regnhændelser, hvor der implementeres nogle generelle styringer, der fungerer godt for den gennemsnitlige regnhændelse.

Styring kan etableres for både renseanlæg og afløbssystem med eller uden samstyring. En samstyring af systemerne kan øge mulighederne for kontrol af vandkvaliteten i de modtagende recipienter samt øge kapaciteten af renseanlægget. Målene ved styring af renseanlæg og afløbssystemer er ofte reduktioner af overløbsvolumener eller overløbsfrekvenser. Men kontrollerede oversvømmelser, udjævnelse af peak koncentrationer eller flow mod renseanlægget kan også stilles som et performance krav. [Schütze et al., 2004]

2.1 Tilbagefaldsstrategi

Svigt af styringsstrategier kan forekomme ved strømsvigt, kabelbrud eller andre former for blokering af signaler fra sensorerne. Svigt af styringen kan forværre driften af afløbssystemet, og der bør derfor udtænkes en tilbagefaldsstrategi. Tilbagefaldsstrategien har til formål at sikre, at der stadig kan opretholdes en styring, hvis der kommer udfald på et eller flere styringsniveauer.

Der findes mange former for tilbagefaldsstrategier. Det er muligt at lave en niveaudelt tilbagefaldsstrategi, hvor der ved tilfælde af svigt forekommer et tilbagefald til forrige styringsniveau. Den mest simple tilbagefaldsstrategi er, at systemet går tilbage til passiv styring. I figur 2.2 er sammenhængen mellem anvendt teknologi og styringsniveau illustreret. Teknologiafhængigheden stiger med styringsniveauet, hvor passiv styring er uafhængigt, lokal styring kræver elektricitet, og global styring afhænger af både elektricitet og intern/ekstern kommunikation.



Figur 2.2. Illustration af sammenhængen mellem anvendt teknologi og styringsniveau.

Som illustreret i figur 2.2 er det tydeligt, at der er forskel på risici på teknologien ved de forskellige niveauer. Det globale niveau afhænger af en styringsprotokol, der vælger den bedste styring af afløbssystemet ud fra kontinuerte målinger eller beregninger fra en model. I tilfælde af en global prædikativ styring er det nødvendigt, at en model opsættes og kalibreres løbende med målinger i systemet.

Hvis målinger frafalder, kan en kalibrering blive misvisende, hvilket kan formindske effektiviteten af den globale styring. Herved vil det kunne give problemer i afløbssystemet, hvor der er påsat en styring.

Det lokale niveau er et uafhængigt niveau. Det medvirker at ved tilfælde af udfald på en eller flere sensorer, vil resten af styringskontrollen stadig være eksisterende.

Det kan være svært at vurdere hvilken tilbagefaldsstrategi, der vil være mest optimal for et afløbssystem. Det vil dels afhænge af udbyttet af en evt. tilbagefald i styringsniveau i forhold til prisen for implementering af denne. Ligeledes vil udformningen af afløbssystemet også spille en rolle, da det kunne være en fordel at benytte sig af passiv styring i områder, hvor opstuvning kan være kritisk såsom i lavtliggende boligområder.

2.2 Årsager til nedbrud i styring

Sensorerne benyttet til styring er betinget af elektricitet, hvorfra der kan komme udfald, hvorved spændingen kan falde og sensorens resultater udebliver. Det kan være et stort problem, hvis en vandstandssensor viser, at bassiner er tomme eller fulde, hvis det modsatte er tilfældet, og konsekvensen er en større aflastning et sted i systemet. For at undgå denne konsekvens implementeres tilbagefaldsstrategier og ydermere skal det sikres, at sensorerne kan registrere, at der er et udfald, således at sensoren ikke videresender et forkert signal.

Ved prædiktiv styring er styringen baseret på forudsigelser af regn. Hvis prognoserne ikke er korrekte og viser, at der ikke falder regn, kan det have store konsekvenser for et renseanlæg, der ikke vil have responstid nok på at indstille sig til regnvejrsdrift. Regnmålere og radardata er vedhæftet med store usikkerheder grundet usikkerhed på regnens stedlige variation. For at imødekomme dette, kan det være nødvendigt med online registrering af afstrømningen i et afløbssystem.

3. Screening af styringspotentiale

For at vurdere styringspotentialet tages der udgangspunkt i et notat udleveret fra Jensen [2015]. Styringspotentialet vurderes i notatet hovedsageligt ud fra bassinernes egenskaber i form af det areal-specifikke volumen samt tømmetid. Ikast Afløbssystems styringspotentiale er ikke kun betinget af bassinernes egenskaber men kræver samtidigt, at der er restkapacitet i bassinerne og at en styringsregulator tilstede. Restkapaciteten defineres som den uudnyttede kapacitet i bassinerne under regnvejr. Styringspotentialet i Ikast Afløbssystem vurderes i dette afsnit efter bassinernes egenskaber og den tilhørende restkapacitet.

3.1 Bassinernes egenskaber

Det er valgt at opsætte følgende kriterier, der skal være opfyldt for, at et bassin udvælges som potentielt styringsværktøj.

- Det areal-specifikke volumen i bassinet skal være stort
- Tømmetiden for bassinet skal være lav

Det *areal-specifikke volumen* er et udtryk for forholdet imellem volumenet i bassinet relativt til størrelsen af det reducerede opland tilhørende bassinet. Enheden udtrykkes i mm og kan dermed fortolkes som et udtryk for nedbøren, der må falde på oplandet før, at der forekommer overløb fra bassinet. Jo større areal-specifikt volumen desto større potentiale for styring.

Tømmetiden er fundet for bassiner med styringsregulator ved at dele volumen med tømmepumpens ydelse. For bassiner uden styringsregulator er tømmetiden bestemt ved simulere afstrømningen fra et fyldt bassin og grafisk aflæse tømmetiden. Tømmetiden er fundet ved indsættelse af en kasseregn på $30 \mathrm{l/s/ha}$, der er grafisk illustreret i Appendiks D side 113. Kasseregnen er designet til at sikre fuld udnyttelse af bassinerne således, at tømmetiden kan bestemmes. Desto lavere tømmetid, desto hurtigere kan bassinet omstilles til en ny situation. Hvis tømmetiden er for lang, vil der samtidig være risiko for overløb på selvsamme bassin, der tilbageholdes på. Endelig kan det være en fordel med en tømmepumpe påsat bassinet, da det giver mulighed for at styre afstrømningen fra bassinet.

Tabel 3.1 viser bassinernes specifikke egenskaber i forhold til kriterierne. Bassinernes placering i oplandet er illustreret i figur 1.3 side 7.

Bassin	**Red. Areal** [ha]	**Bassin str.** [m^3]	**Specifik Vol.** [mm]	Q_a [l/s]	**Tømmetid** [T]
1F19BAS	6,4	576,0	9,0	14,0	11,4
1F15001B	8,8	563,8	6,4	7,0	15,0
1F16026	6,2	700,0	11,3	50,0	3,9
1F17001B	9,0	378,0	4,2	17,4	15,1
1H10002B	4,6	850,0	18,3	6,0	39,4
5F11027	1,2	295,6	24,8	5,0	16,5
7F18BAS	10,7	579,1	5,4	19,0	8,5
Bassin_1	172,0	690,0	0,4	-	-
Sparebassin	7,9	260,0	3,3	16,0	4,5
1A12000B	39,1	4100,0	10,5	50,0	57,0

Tabel 3.1. Bassinernes egenskaber. Tømmetiden for Bassin_1 er ikke beskrevet idet det er en integreret del af renseanlægget. Afstrømningen Q_a er modelleret ved MIKE URBAN eller aflæst fra tømmepumpens ydelse, og skal opfattes som et middel.

Bassinet 1F16026 har et godt styringspotentiale, da det areal-specifikke volumen er stort og tømmetiden er relativ lav. Bassinerne 1H10002B, 5F11027 og 1A12000B har også et stort areal specifikt volumen, dog er tømmetiden også høj. De øvrige bassiner fra tabel 3.1, har en høj tømmetid og lav areal-specifik volumen, hvorfor styringspotentialet er mindre. Bassin_1 er en buffertank, der er placeret på renseanlægget. Det træder i funktion så snart, at renseanlæggets indløb bliver for stort, hvormed der forekommer et overløb fra pumpehuset, og hvor vandet derefter ledes over i Bassin_1. Desuden bliver bassinet tømt manuelt, hvilket er årsagen til, at afstrømningen samt tømmetiden ikke er angivet i tabel 3.1.

3.2 Analyse af restkapacitet

Udnyttelsesgraden i bassinerne bestemmes for at beregne restkapaciteten i bassinerne. Restkapaciteten beskriver det bassinvolumen, der potentielt kan udnyttes ved styring. Til simuleringerne anvendes MIKE URBAN-modellen beskrevet i appendiks A side 99, der simuleres med historisk regn for en returperiode på hhv. en måned, et halvt år, et år og fem år vægtet efter nedbør. Returperioderne er valgt efter at dække et bredt interval af nedbør indenfor en 30-årig regnserie. De udvalgte regnhændelser er målt på DMI's regnmåler ved Herning Centralrenseanlæg med stationsnummer 5279. Regnmåleren er udvalgt, da det er den regnmåler med tilstrækkelig datamængde og som ligger nærmest oplandet til Ikast Renseanlæg. Regnhændelserne er kort

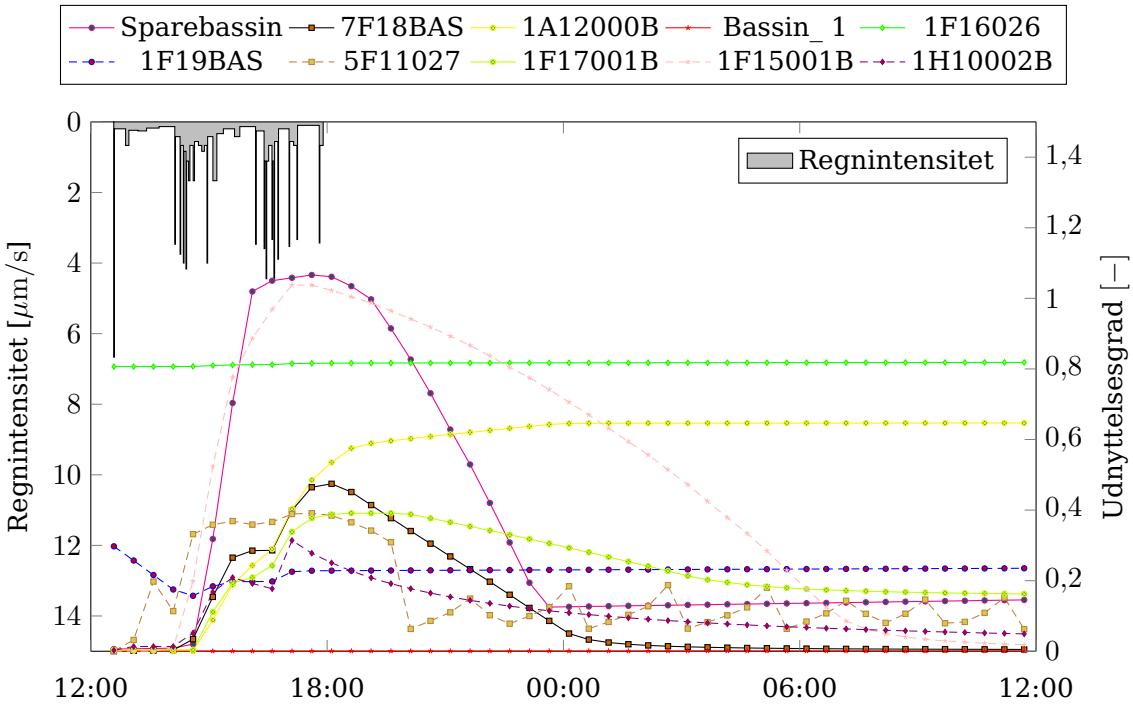
beskrevet i tabel 3.2 side 15 og placeringen ift. oplandet er vist i appendiks E.3 side 116.

Herning Centralrenseanlæg stationsnr.: 5279

Returperiode [År]	**Varighed** [Min]	**Intensitet** [-]	**Gns.** [μm/s]	**Maks.** [μm/s]	**Nedbør** [mm]
1/12	319		0,521	4,44	10,4
0,5	366		0,947	3,33	21,0
1	337		1,320	13,30	26,8
5	931		0,706	6,67	39,6

Tabel 3.2. Regnhændelser med returperioder på en måned, et halvt år, et år og fem år, registreret på Herning Centralrenseanlæg i perioden 1979 til september 2015.

Restkapaciteten defineres som det tørre volumen simuleret i bassinerne, der udtrykkes via udnyttelsesgraden under regnhændelserne. Udnyttelsesgraden af bassiner er beregnet ved at dividere volumen simuleret i bassinet under regnhændelserne med det fuldt udnyttede volumen. I praksis gøres dette ved at bestemme en kritisk højde på bassinerne, som det fuldt udnyttede volumen defineres fra, og dividere den maksimale simulerede vanddybde i bassinet med denne. Den kritiske højde i bassinerne sættes i tilfælde af et tilkoblet overløb til overløbskoten, og i tilfælde uden direkte tilkoblede overløb er den kritiske dybde sat lig med overløbskanten på et reguleringsbygværk opstrøms eller nedstrøms for bassinet. Bassinernes udnyttelsesgrad kan aflæses i figur 3.1 side 16 for en returperiode på måned og deres placering i oplandet er illustreret i figur 1.3 side 7. Udnyttelsesgrader for regnhændelser ved de resterende returperioder er i illustreret appendiks E.2 side 116.



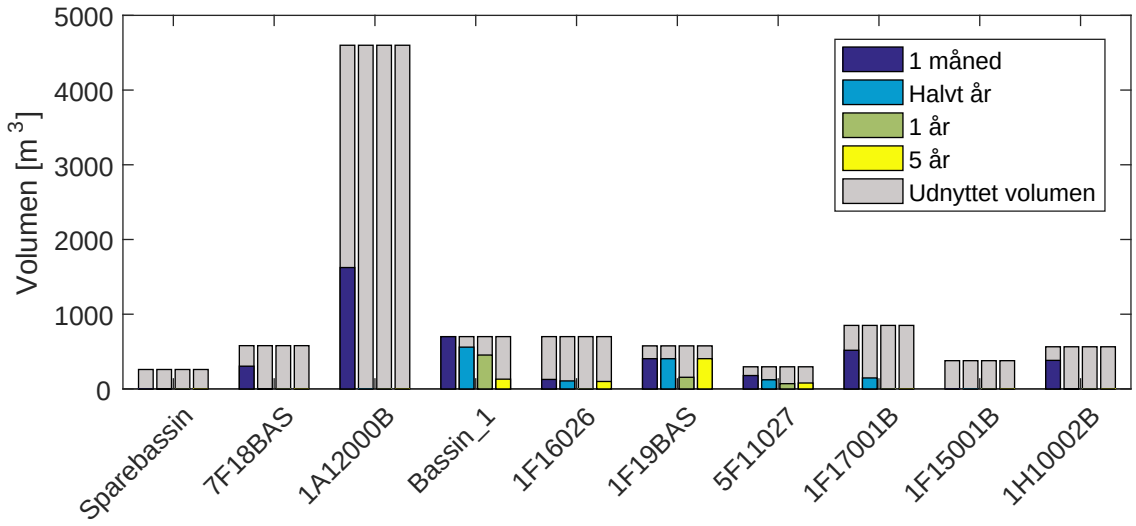
Figur 3.1. Udnyttelsesgraden som funktion af tiden for en regn med en returperiode på 1 måned registreret d. 25-01-1990. Bemærk at udnyttelsesgraderne kan overstige 1, da den hydrauliske model kan simulere vandstande i bassinerne over overløbskoten.

Af figur 3.1 kan det observeres, at der er vand i bassinerne 1F19BAS og 1F16026 allerede i starten af hændelsen. Bassin 1F16026 har en konstant udnyttelsesgrad på 0,8, da der forekommer numerisk vand fra et indløb, der er placeret i en kote tilsvarende 80% af bassinets volumen. Pumpen tilsluttet 1F16026 starter i en højere kote og derfor tømmes bassinet ikke under simuleringen. Volumen i 1F16026 er principielt ikke benyttet under regnhændelsen og derfor er den reelle udnyttelsesgrad tæt på nul.

Udnyttelsesgraden under en regnhændelse med en returperiode på en måned varierer meget for bassinerne, hvilket indikerer, at kapaciteten i bassinerne ikke er jævnt udnyttet. Der forekommer kun fuld udnyttelse af bassinvolumen i Sparebassin og 1F15001B under regnhændelsen. I 7F18BAS, 1F17001B, 5F11027, 1H10002B og 1F19BAS er udnyttelsesgraden under 0,5 i løbet af hændelsen, hvor der observeres enkelte fluktuationer. Udnyttelsesgraden af Bassin_1 er meget lav ($\sim$0), og derfor er det svær at observere på figur 3.1.

I appendiks E.2 side 116 er de tilsvarende udnyttelsesgrader for de resterende returperioder vist, hvor der observeres, at udnyttelsesgraden af bassinerne stiger med returperioden. Ved en returperiode på fem år er der stadigt tre bassiner, der ikke udnyttes optimalt. Det er værd at bemærke, at for alle simulerede returperioder er

der bassiner, hvor der er restkapacitet. Restkapaciteten er bestemt for den maksimale udnyttelsesgrad observeret under simuleringerne for returperioderne på en måned, et halvt år, et år og fem år. Restkapaciteten kan aflæses i figur 3.2.



Figur 3.2. Det tørre volumen i bassiner simuleret for returperioderne. Hvis der ikke forefindes en farvet søjle for et bassin betyder dette, at bassinet har en udnyttelsesgrad på en.

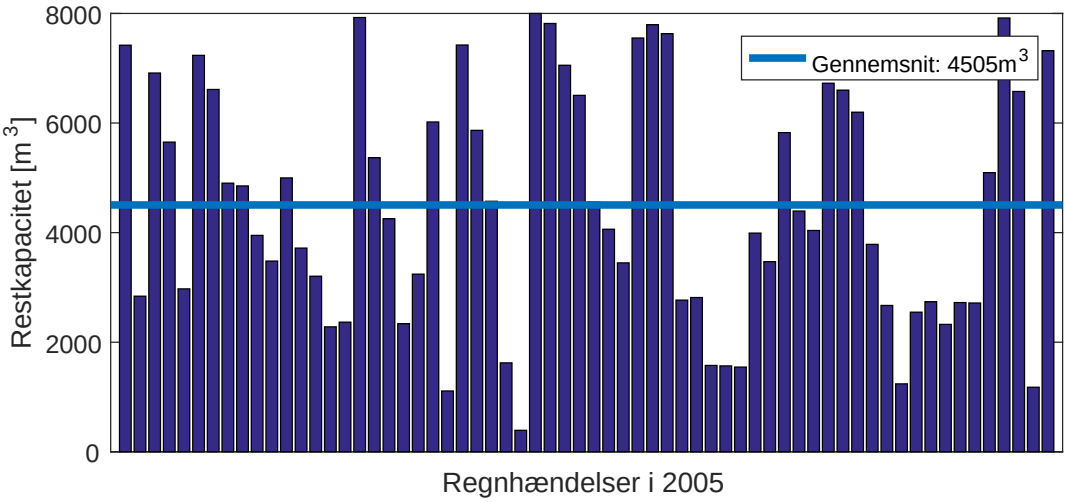
I bassinerne Bassin_1, 1F19BAS og 5F11027 er der restkapacitet at finde for alle returperioderne, hvilket indikerer, at der er et godt potentiale for at optimere udnyttelsen ved f.eks. styring. Den samlede restkapacitet for alle bassiner simuleret under regnhændelserne kan aflæses i tabel 3.3.

Returperiode [År]	**Restkapacitet** [m^3]	**Restkapacitet** [%]
1/12	2147	23
1/2	2958	31
1	1647	17
5	2341	25

Tabel 3.3. Restkapaciteten simuleret under regnhændelserne. Restkapaciteten er udtrykt som hhv. volumen og procentdel af det totale bassinvolumen i oplandet.

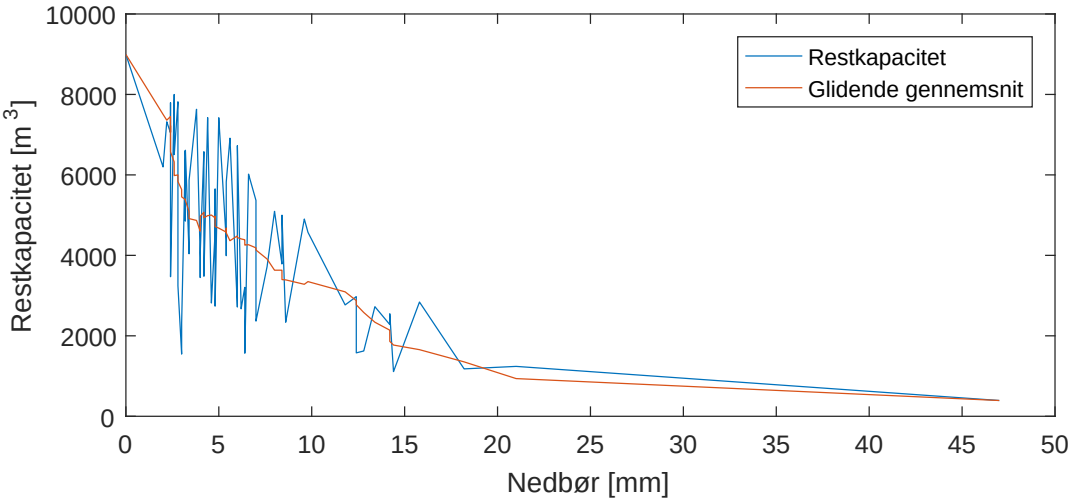
Af tabel 3.3 fremgår det, at for alle regnhændelserne er der mellem 17 og 31% volumen i bassinerne, der kan udnyttes yderligere. Det skal bemærkes, at det numerisk genererede vand i bassin 1F16026 ikke er adderet til volumenerne præsenteret i tabel 3.3 og figur 3.2, hvorfor der kan være yderligere op til $700\,\mathrm{m}^3$ bassinvolumen, der kan udnyttes.

Bassinernes totale restkapacitet i figur 3.3 er bestemt for regnhændelser i 2005 med nedbør på minimum 2 mm, der resulterer i 64 regnhændelser. Regnhændelserne er beskrevet i Appendiks F side 119.



Figur 3.3. Det tørre volumen i bassiner simuleret for året 2005. Restkapaciteterne er beregnet for hver enkelt hændelse ved den maksimale udnyttelsesgrad observeret.

Gennemsnittet viser, at der er stor restkapacitet i afløbssystemet for næsten alle regnhændelser med et minimum på 400 m^3. Kun i 8 ud af 64 regnhændelser er restkapaciteten under 2000 m^3, hvilket viser, at bassinernes kapacitet i modellen har godt potentiale for kunne udnyttes yderligere. Det er undersøgt, om der findes en relation mellem restkapaciteten og den nedbør, der er illustreret i figur 3.4.



Figur 3.4. Det tørre volumen i bassiner simuleret for året 2005 sorteret efter den akkumulerede nedbør. Det glidende gennemsnit er bestemt ud fra et gennemsnit af de 10 nærmeste værdier.

Der viser sig en tendens til, at der er større restkapacitet ved de mindre nedbørsmængder, hvor der findes stor restkapacitet på hændelser med nedbørsmængder mellem 2 og 15 mm. Ved regnhændelser med en nedbør større end 15 mm er der et stort fald i restkapaciteten. Det skal dog bemærkes, at datamængden er tydeligt skævt fordelt, da der er færre regnhændelser med eftersom nedbørsmængden stiger. Det viser sig, at restkapaciteten for regnhændelser mellem 2 og 15 mm har stor varians, hvorfor den enkeltes regnhændelses dynamik også har en essentiel betydning for restkapaciteten.

3.3 Sammenfatning

På baggrund af bassinernes egenskaber angivet i tabel 3.1 side 14 samt tilstedeværelse af en styringsregulator er det fundet, at der er seks bassiner i Ikast Afløbssystem, der har et godt potentiale til styring. De seks bassiner er: 5F11027, 7F18BAS, Sparebassin, 1A12000B, 1F16026 og 1F19BAS. Bassinerne er udvalgt idet, at der er påsat en direkte styringsregulator, der muliggør at styre på, hvornår bassinerne afleder vandet. Ydermere har bassinerne enten en relativ lav tømmetid eller et højt arealspecifikt volumen, hvormed det gør potentialet for at styre på dem godt. Det er valgt ikke at styre på bassin 1F16026 grundet, at bassinet er i renovering, hvormed der laves nogle strukturelle ændringer omkring bassinet og da disse ikke er kendte, er det valgt ikke at medtage bassinet i de forekommende analyser.

Restkapaciteten i Ikast Afløbssystem er beregnet for nedbør på over 2 mm i 2005 til at være gennemsnitlig på 4505 m^3. Restkapacitetens størrelse giver et godt grundlag for videre arbejde med at udnytte denne bedre. Restkapacitetens fordeling afhængigt af

nedbøren viste, at nedbør mellem 2 og 15 mm havde en restkapacitet mellem 2000 og 7000 m^3. Restkapacitetens fordeling er dog misvisende idet, at nedbøren i intervallet 2 til 4 mm ikke resulterer i store mængder overløbsvolumen udledt til recipienterne grundet at afløbssystemet stadigt kan håndtere nedbøren. Det må derfor vurderes, at det bedste interval for at kunne forbedre afløbssystemets håndtering af nedbøren må være i intervallet 4 til 15 mm.

4. Problemformulering

Screeningen viste et godt potentiale for at implementere styring af bassinerne i Ikast Afløbssystem. Under screeningen blev bassinerne med god egnethed for styring og stor restkapacitet identificeret. Det gode potentiale for at styre på bassinerne giver mange muligheder for at kunne udnytte den ekstra kapacitet i afløbssystemet. Det er valgt at undersøge, om restkapaciteten i Ikast Afløbssystem kan udnyttes bedre ved at udvikle nye styringsstrategier. Nøglespørgsmålet for projektet er udformet således:

- Hvad er potentialet for at styre Ikast Afløbssystem med en regel- og algoritmebaseret metodisk tilgang, og hvilken styringsstrategi kan reducere overløbsvolumen mest?

Til det overordnede spørgsmål er der udarbejdet nogle delspørgsmål til hhv. de regel- og algoritmebaserede styringsstrategier.

Del II: Regelbaseret styring

- Hvordan præsterer en simpel lokal styring mod en mere kompleks global styringsstrategi?
- Er det nødvendigt at tilføje ekstra bassinvolumen til systemet for at eliminere overløb til Storå?

Del III: Algoritmebaseret styring

- Er det muligt at bruge en algoritme til at reducere overløbsvolumen uden at gå på kompromis med pumpeomkostninger?
- Er en Online optimering bedre end en gennemsnitlig konfiguration af styrings-regulatorer fundet ved en Offline-model?

Nøglespørgsmålet besvares under konklusionen, hvor delspørgsmålene for regel- og algoritmebaseret styring er besvaret hhv. i del II og III. I Del II anvendes den detaljerede afløbsmodel, hvor i Del III er både den detaljerede og simplificerede afløbsmodel anvendt.

4.1 Metode

Det er valgt at undersøge hvilken metode der bedst kan klarlægge potentialet for styring af Ikast Afløbssystem. Der er taget hensyn til to metoder, regel- og

algoritmebaseret metode for at undersøge hvilke ændringer der skal ske for pumpe- og spjældkonfigurationer, for at imødekomme et ønsket mål om reducering af overløbsvolumen over et simuleret år.

Studiet tager udgangspunkt i modelsammenligninger, og derfor accepteres den nuværende kalibrering af afløbsmodellen udleveret af Krüger A/S.

4.1.1 Regelbaseret metode

Den regelbaserede metode udspringer fra den kendte ”trial and error” metode. Her er det forsøgt at finde de mest optimale sæt af pumpe- og spjældkonfigurationer, ved at se på afløbssystemet og regulere konfigurationer, hvor det synes nødvendigt. Det er derfor valgt at undersøge hvorhenne i systemet, kapaciteten overskrides under regn. Det er valgt at ændre på pumpe- eller spjældkonfigurationer indtil overløbsvolumenet er reduceret tilfredsstillende. Den regelbaserede metode er simpel og ikke tidskrævende at opstille i programmet MIKE URBAN, hvor der gælder enkelte hvis/eller regler for, hvornår pumper eller spjæld skal åbne, alt afhængig af kapaciteten i afløbssystemet.

4.1.2 Algoritmebaseret metode

Den algoritmebaserede metode baserer sig på en matematisk algoritme. Denne metode er avanceret og meget tidskrævende at opstille. Algoritmen er programmeret i programmet MATLAB og anvender MOUSE-motoren til evaluering af afløbsmodellen. Algoritmen finder det bedste kompromis mellem overløbsvolumen og pumpeomkostninger, hvor det kan vælges hvilken af de to objektiver der prioriteres. Metoden, der benyttes i dette projekt, er meget beregningstung og kræver installering af to programmer samt en computer med stor regnekraft. Yderligere kræver metoden en indsigt i optimeringsfunktioner og opsætningen af disse til en algoritme der evt. kan simulere afløbssystemet i realtid, hvormed metoden kan være meget tidskrævende.

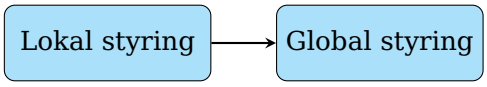
Del II

Regelbaseret Styring

Del II er delt i to kapitler, henholdsvis lokal og global styring. I den lokale styring udarbejdes der fire styringsstrategier med henblik på at reducere det totale overløbsvolumen samt overløbsvolumen til Storå.

I den globale styring udarbejdes to styringsstrategier, hvor bassinerne styres afhængigt af hinanden mod at reducere overløbsvolumen yderligere end fundet ved den lokale styring. I både lokal og global styring er det valgt at undersøge, om der er behov for implementering af et rørbassin for at eliminere overløbsvolumen til Storå.

Regnens indflydelse på styringsstrategien fra foregående analyse undersøges i appendiks I side 125 for at vurdere, om den implementerede styring stadig er funktionel. Modeller anvendt i Del II er vedhæftet i det elektroniske appendiks side155.



5. Lokal styring

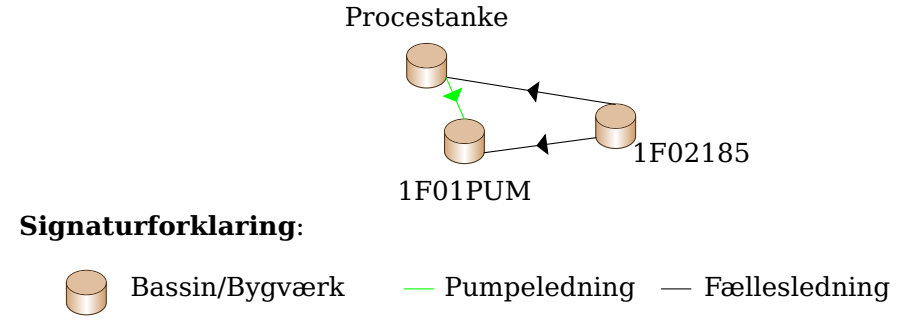
I dette kapitel er det valgt at undersøge, hvorvidt det er muligt at reducere overløbsvolumen til såvel Storå som fra det resterende opland ved implementering af simple lokale styringer. Det er ønsket fra Ikast-Brande Spildevand A/S, at der skal implementeres to ledige procestanke ved renseanlægget [Lange, 2015a]. Dette ønske er medtaget i styringsstrategierne. Der vil blive fremstillet en teoretisk reducering, der er angivet som den maksimale reduktion af overløb gældende for hele oplandet. Der præsenteres fire styringsstrategier og deres evne til at komme i nærheden af den teoretiske reduktion vil blive analyseret og sammenlignet ud fra en 1-årig periode som vist i afsnit 5.5 og 5.6 side 39 og 40. Det er ud fra analysen i afsnit 3.3 side 19 blevet bedømt, at bassinerne Sparebassin, 7F18BAS, 1F19BAS, 5F11027 og 1A12000B kan benyttes i en fremtidig styringsstrategi, hvorfor disse bassiner er inkluderet i samtlige strategier. Da der forefindes tømmepumper på bassinerne, er det valgt at benytte disse som styringsregulatorer.

5.1 Nedbør

Da det ikke står klart hvilke regnhændelser, hvor det bedste styringspotentiale forefindes vælges det at benytte fire returperioder på en måned, et halvt år, et år og fem år som beskrevet i tabel 3.2 side 15 og illustreret i Appendiks E.1 side 115. Det undersøges hvilke regnhændelser, hvor der er størst potentiale for styring.

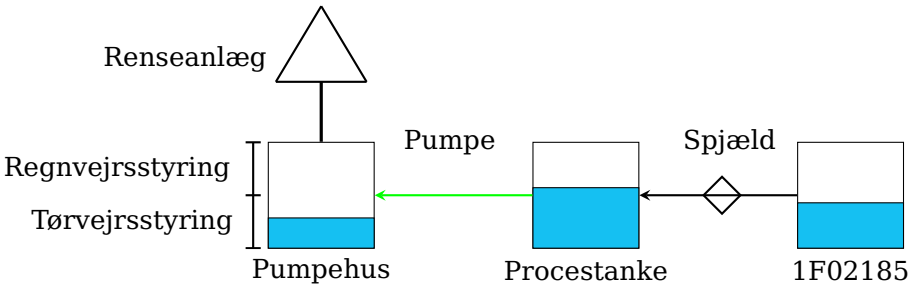
5.2 Implementering af procestanke

Det er valgt at implementere to ubenyttede procestanke på renseanlægget til at være en del af styringen for det nuværende afløbssystem, som vist på figur 5.1 side 26 og placering af procestankene på renseanlægget findes i Appendiks G side 121.



Figur 5.1. Placering af procestankene i forhold til pumpehuset, 1F01PUM, og spjældbygværket, 1F02185.

Det er valgt at implementere de to procestanke som et enkelt bassin, hvormed det har et samlet volumen på 9000 m^3 [Ikast-Brande Spildevand A/S, 2015]. Procestankene modtager vand fra bygværket 1F02185, hvor spjældet er åbent så længe, at procestankene ikke er fyldt. Procestankene er inkluderet som en del af styringen på renseanlægget ved indsættelse af en tømmepumpe, der forbinder procestankene til pumpehuset 1F01PUM som illustreret på figur 5.2.



Figur 5.2. Styring af procestanke og spjældbygværket 1F02185.

Procestankene virker som et ekstra bassin, der afleder vand til pumpehuset under tørvejrsstyring. Pumpen er således styret efter at være aktiv afhængig af vandstanden, der forekommer under tørvejr i pumpehuset 1F01PUM. Herved vil bassinets magasinerede overløbsvolumen ledes ned til renseanlægget alt afhængig af vandstanden i pumpehuset. Det totale overløbsvolumen ved implementering af procestankene for de fire regnhændelser er vist i tabel 5.1 side 27. Det totale overløbsvolumen er angivet som overløbsvolumen i hele systemet, hvor udløbet fra rensningsanlægget ikke er medtaget.

Styringsstrategi	**Total overløb** [m^3]	**Ændring** [%]	**Overløb Storå** [m^3]	**Ændring** [%]
Nuværende	175751,0	-	4443,2	-
Impl. af procestanke	153916,0	-12,4	2155,3	-51,5

Tabel 5.1. Oversigt over ændring i overløbsvolumen over fire sammenlagte hændelser. En negativ/positiv ændring indikerer hhv. reducering/forøgelse i overløbsvolumen.

Ved implementeringen af procestankene er det totale overløbsvolumen reduceret med over 12%, hvorimod overløbsvolumen til Storå er halveret. Grundet den store reduktion af overløbsvolumen til Storå er det valgt at bibeholde implementeringen af procestankene i de forekommende styringsstrategier.

5.3 Teoretisk reducering

Grænseværdien for det mindste overløbsvolumen, der kan forekomme er beregnet ved at fjerne bidraget af regn- og spildevand fra oplandene opstrøms de udvalgte bassiner benyttet til den lokale styring. Reduktionen i overløbsvolumen i denne analyse beskriver, hvor stor overløbsvolumen oplandene opstrøms bassinerne bidrager med, hvilket er lig med den teoretisk mulige reducering af overløbsvolumen ved styring af disse bassiner.

Efter den teoretiske mulige reducering af overløbsvolumen vil der være et restvolumen, der er et udtryk for det resterende afløbssystems håndtering af fælles- og regnvand. Restvolumen viser den andel af overløbsvolumen, der ikke er mulig at reducere igennem styring af de udvalgte fællesbassiner. I tabel 5.2 er den teoretiske reducering fra det nuværende system angivet.

Styringsstrategi	**Total overløb** [m^3]	**Ændring** [%]	**Overløb Storå** [m^3]	**Ændring** [%]
Nuværende	628811,7	-	12988,7	-
Teoretisk reducering	517623,0	-17,7	6239,0	-52,0

Tabel 5.2. Oversigt over den teoretiske reducering af det totale overløbsvolumen for år 2005. En negativ/positiv ændring indikerer hhv. reducering/forøgelse i overløbsvolumen.

Som vist i tabel 5.2 vil det for året 2005 være muligt at reducere med ca. 18% af det totale overløb, de resterende omtrent 82% består foruden regnvandsudledninger også i overløb forårsaget af for små ledningsdimensioner.

5.4 Styringsstrategi

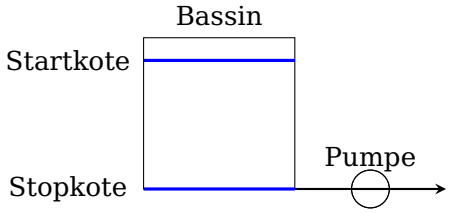
Det er valgt at implementere følgende overordnede styringsstrategier med det formål at reducere det totale overløbsvolumen fra afløbssystemet og overløbsvolumen til Storå ved at udnytte bassinernes kapacitet:

- Styring 1A: Forbedring af nuværende styringsstrategi.
- Styring 1B: Etablering af rørbassin.
- Styring 1C: Forbedret udnyttelse af rørbassin.
- Styring 1D: Styring ud fra følsomme recipienter.

Der gælder for alle fire styringsstrategier, at der ikke må forekomme større opstuvningsproblemer end for det nuværende afløbssystem. Det er ikke ønsket at lave større indgreb i det nuværende afløbssystems struktur. I de følgende fire afsnit 5.4.1, 5.4.2, 5.4.3 og 5.4.4 undersøges det, hvilken effekt de lokale styringsstrategier har sammenlignet med afløbssystemets nuværende styringsstrategi.

5.4.1 Styring 1A: Forbedring af nuværende styringsstrategi

Det er valgt at forbedre den nuværende styringsstrategi for afløbssystemet med det formål at udnytte bassinerne til en større udnyttelsesgrad, hvormed en større mængde vand kan tilbageholdes i bassinerne. Den nuværende styringsstrategi virker som en masse simple lokale styringer, hvor der blot er sat en pumpekonfiguration til for hver tømmepumpe for de styrede bassiner. Det er derfor valgt at benytte de nuværende tømmepumper, der er sat i bassinerne, hvor start- og stopkoterne på pumperne er ændret med henblik på at udnytte bassinernes kapacitet. Stopkoten for pumperne er sat til bunden af hvert bassin, hvormed pumpen først stopper, når bassinerne er helt tømt, som illustreret på figur 5.3.

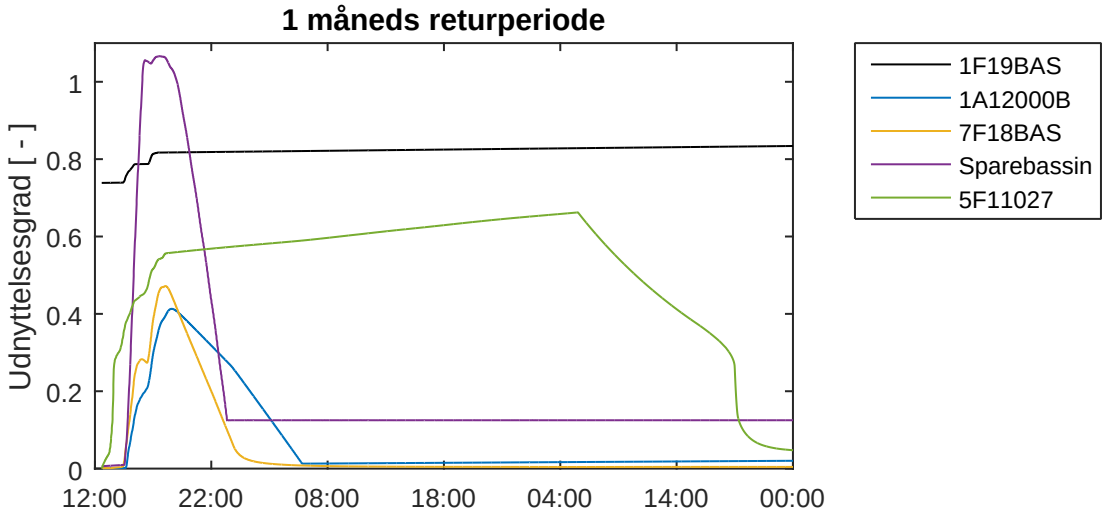


Figur 5.3. Start- og stopkote illustreret for et vilkårligt bassin.

Startkoten er sat efter bassinets udnyttelsesgrad, hvor bassiner med en lav udnyttelsesgrad får en højere startkote end nuværende og omvendt ved høje udnyttelsesgrader efter egen vurdering.

Udnyttelsesgrad

Udnyttelsesgraden for bassinerne ved hændelsen, der forekommer ved en måneds returperiode er illustreret på figur 5.4.



Figur 5.4. Udnyttelsesgraden som funktion af tiden for en returperiode på en måned, hvor der er foretaget en forøgelse af pumpehøjderne.

Det fremgår af figur 5.4, at de fleste bassiner bliver hurtigt fyldt og rammer startkoten for tømmepumpen, derefter tømmes bassinerne. Ligeledes ses det, at udnyttelsesgraden af bassinet 1F19BAS ligger konstant over 0,6, hvilket skyldes numerisk genereret vand fra afløbsmodellen, men det vurderes, at den reelle udnyttelsesgrad af bassinet er lav, da udnyttelsesgraden er forholdsvis konstant under hændelsen. Derudover ses det, at Sparebassin har en udnyttelsesgrad, der er over 1. Dette er grundet, at nedbøren er større end bassinets areal-specifikke volumen. For bassinet 5F11027 ses det, at pumpen starter allerede ved en udnyttelsesgrad lidt under 0,7. Dette skyldes, at for et af de øvrige hændelser har det vist sig at være nødvendigt at sætte startkoten lavere for at undgå overløb. Udnyttelsesgraden for de øvrige regnhændelser er vist i appendiks J side 133. Det fremgår af figur 5.4, at udnyttelsesgraden i Sparebassin ikke går ned i 0, hvor dette skyldes, at der forekommer numerisk vand, og derved bliver bassinet ikke helt tømt. Ved sammenligning af udnyttelsesgraden, illustreret på figur 3.1 side 16 for det nuværende styringsstrategi er udnyttelsesgraden for bassin 5F11027 steget. For de øvrige bassiner er udnyttelsesgraden delvist det samme, dog er der en forskel i hvornår bassinerne aflaster. I appendiks J side 133 viser de resterende returperioder samme tendens.

Overløbsvolumen

Ved Styring 1A er vandet tilbageholdt yderligere i bassinerne, hvormed dette resulterer i en formindsket overløbsvolumen. Det totale overløbsvolumen for det nuværende afløbssystem samt Styring 1A er angivet i tabel 5.3.

Styringsstrategi	**Total overløb** [m^3]	**Ændring** [%]	**Overløb Storå** [m^3]	**Ændring** [%]
Nuværende	175751,0	-	4443,2	-
Styring 1A	150120,0	-14,6	2061,0	-53,6

Tabel 5.3. Oversigt over reduktion i overløbsvolumen over 4 returperioder. En negativ/positiv ændring indikerer hhv. reducering/forøgelse i overløbsvolumen.

Det fremgår af tabel 5.3, at den totale overløbsmængde er reduceret med over 14%. Reduktionen af overløbsvolumen for Styring 1A er høj vurderet relativ højt taget i betragtning af en yderlige reduktion på ca. 3 procentpoint i det totale overløbsvolumen sammenlignet med implementering af procestanke præsenteret i tabel 5.1 side 27.

Funktionskrav

Det er valgt at belyse, hvorledes der forekommer opstuvning til terræn efter implementering af Styring 1A. Den valgte regn til undersøgelse af funktionskravene er med en returperiode på 10 år udvalgt fra regnmåleren på Herning Centralrenseanlæg. På figur 5.5 er det illustreret hvor i oplandet brøndenes topkote overskrides ved det nuværende afløbssystem.

Figur 5.5. Brønde, hvor vandstanden overskrider den kritiske kote, er angivet til at være lig med terrænniveau.

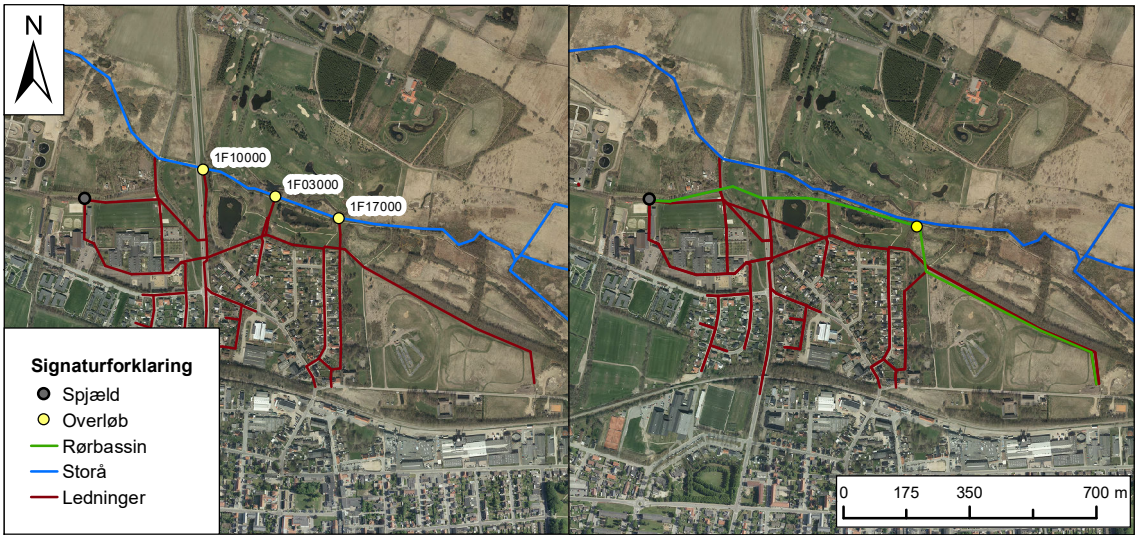
Det fremgår af figur 5.5 side 30, at der er store problemer med opstuvning til terrænniveau for afløbssystemet. Der er 720 brønde, hvor vandstanden når op til terrænniveau og 930 brønde der er under, hvilket svarer til 44% af brøndene, der stuver op over terræn.

Efter implementering af Styring 1A er det fundet, at der er opstuvning til terræn i 44% af brøndende. Hvormed styringsstrategien ikke vil forværre opstuvningsproblemerne.

5.4.2 Styring 1B: Etablering af rørbassin

Det er af Ikast-Brande Spildevand A/S ønsket at etablere et rørbassin i den nordlige del af afløbssystemet i Ikast. Det er planen, at rørbassinet med tiden kan benyttes som en regnvandsledning i det omfang Ikast Midtby separat kloakeres [Lange, 2015a]. Det er valgt at undersøge, hvor høj grad rørbassinet kan reducere overløbsvolumen fra oplandet med særlig fokus på Storå.

Rørbassinet er anlagt i samme trace som den afskærende spildevandsledning, som angivet fra Ikast-Brande Spildevand A/S, Orbicon [2015]. Rørbassinet, der er en gravitationsledning, er anlagt med et fald på 1 promille og har en størrelse på $1000\,\mathrm{mm}$ i diameter, og vil qua dens længde på 1465 meter have et volumen på $1151\,\mathrm{m}^3$. Rørbassinet er tilkoblet det allerede eksisterende spjældbygværk 1F02185, før vandet føres videre til renseanlægget. Overløbene, der har udløb af opspædet spildevand til Storå, kobles til rørbassinet. I figur 5.6 er rørbassinet indlagt i afløbssystemet i det nordlige Ikast og en skitsetegning af rørbassinet findes i appendiks H side 123.

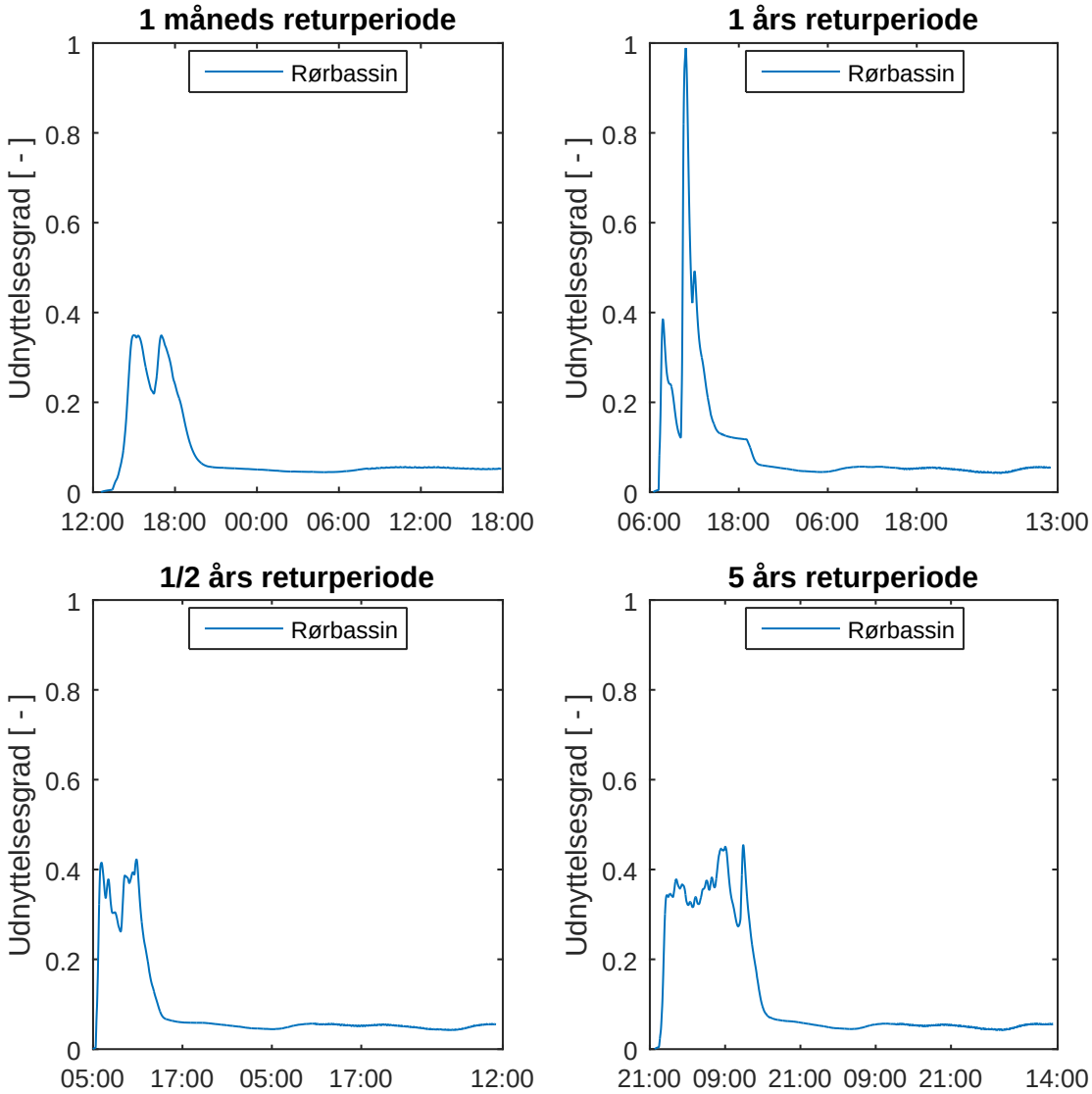


Figur 5.6. Rørbassin indlagt i Ikast. Det er kun den nordlige del af afløbssystemet i Ikast, der er vist. Venstre side af figuren viser det nuværende afløbssystem, mens højre side viser det fremtidige afløbssystem, med ændring af strukturen omkring de tre overløb.

Som illustreret i figur 5.6 side 31 har det været nødvendigt at omstrukturere en del af afløbssystemet for at tilkoble overløbene hørende til udløbene 1F17000, 1F03000 og 1F10000 på rørbassinet. Det har været nødvendigt at omstrukturere afløbssystemet for at undgå implementering af pumper. Det ændrede afløbssystem er vist til højre på figur 5.6 side 31. I tilfælde af ekstremhændelser er der påsat et overløb ved det eksisterende udløb 1F17000 som illustreret i figur 5.6 side 31. Ved at benytte et eksisterende udløb vil omkostningerne ved anlæg af overløbsbygværk også formindskes. [Lange, 2015a]

Udnyttelsesgrad

Udnyttelsesgraden for rørbassinet er vist i figur 5.7.



Figur 5.7. Udnyttelsesgraden for rørbassinet ved de valgte returperioder.

I figur 5.7 side 32 er det illustreret, at der er potentiale til at udnytte mere kapacitet for rørbassinet. Det skal bemærkes, at udnyttelsesgraden under spidsbelastningen for især 1 års returperioden er tæt på maksimal hvormed, der vil være risiko for overløb, hvis der tilbageholdes mere vand.

Overløbsvolumen

Rørbassinet tilbageholder det overløbsvolumen, der skulle forekomme i de tre overløb 1F17000, 1F03000 og 1F10000, mens der samtidig implementeres et overløbsbygværk på rørbassinet til håndtering af ekstremhændelser. I tabel 5.4 er der angivet en oversigt over reduktionen i overløbsvolumen, efter implementering af rørbassinet.

Styringsstrategi	**Total overløb** [m^3]	**Ændring** [%]	**Overløb Storå** [m^3]	**Ændring** [%]
Nuværende	175751,0	-	4443,2	-
Styring 1B	149179,5	-15,1	301,2	-93,2

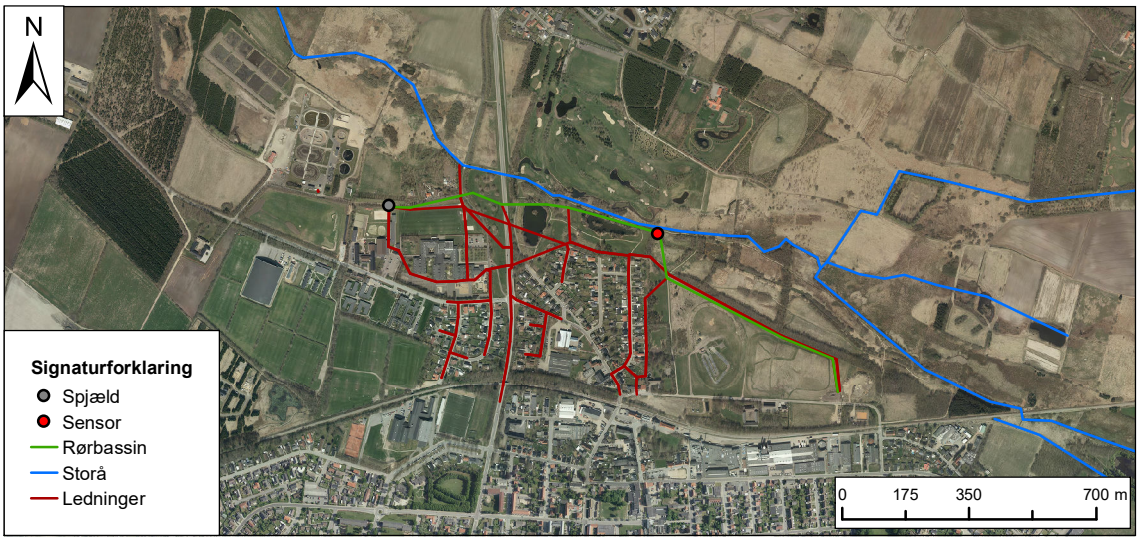
Tabel 5.4. Oversigt over ændring i overløbsvolumen over 4 returperioder. En negativ/positiv ændring indikerer hhv. reducering/forøgelse i overløbsvolumen.

En implementering af rørbassinet vil, som vist i tabel 5.4, reducere overløbsvolumen med over 15% ift. det nuværende afløbssystem uden rørbassin ved returperioder varierende fra en måned til fem år. Der er derved fremkommet en stor reduktion på det overordnede overløbsvolumen samtidig med, at overløbsvolumen til Storå ligeledes er reduceret kraftigt. Ved implementering af rørbassinet forekommer der overløb til Storå én enkelt gang ved en returperiode på en og fem år, hvorimod der for det nuværende system forekommer overløb ved alle 4 hændelser. Implementering af rørbassinet medfører ydermere, at 45% af afløbssystemets brønde opstuver til terræn. Dette er flere end for uden rørbassinet, hvilket kan være grundet omstrukturering af afløbssystemet. Således er det vurderet, at en implementering af rørbassinet ikke skaber større negative konsekvenser for det øvrige afløbssystem.

Det er fundet fra figur 5.7 side 32, at der stadig er et potentiale for styring på rørbassinet, hvormed det altså er yderligere muligt at udnytte rørbassinets kapacitet, og reducere de overordnede aflastninger fra afløbssystemet. Det er dermed valgt at undersøge, hvilken gevinst der vil være ved en bedre udnyttelse af rørbassinet.

5.4.3 Styring 1C: Forbedret udnyttelse af rørbassin

Det er forsøgt at lave en forbedring af afløbssystemet med det etablerede rørbassin. Det er da valgt at implementere styringsstrategien fra Styring 1A præsenteret i afsnit 5.4.1 side 28. Ydermere implementeres en styring på rørbassinet for at påvise, om det er muligt at reducere overløbsvolumen ved implementering af en simpel styring. Det er valgt at indsætte et spjæld i rørbassinet, der styrer efter en sensor indsat ved overløbet som illustreret i figur 5.8.

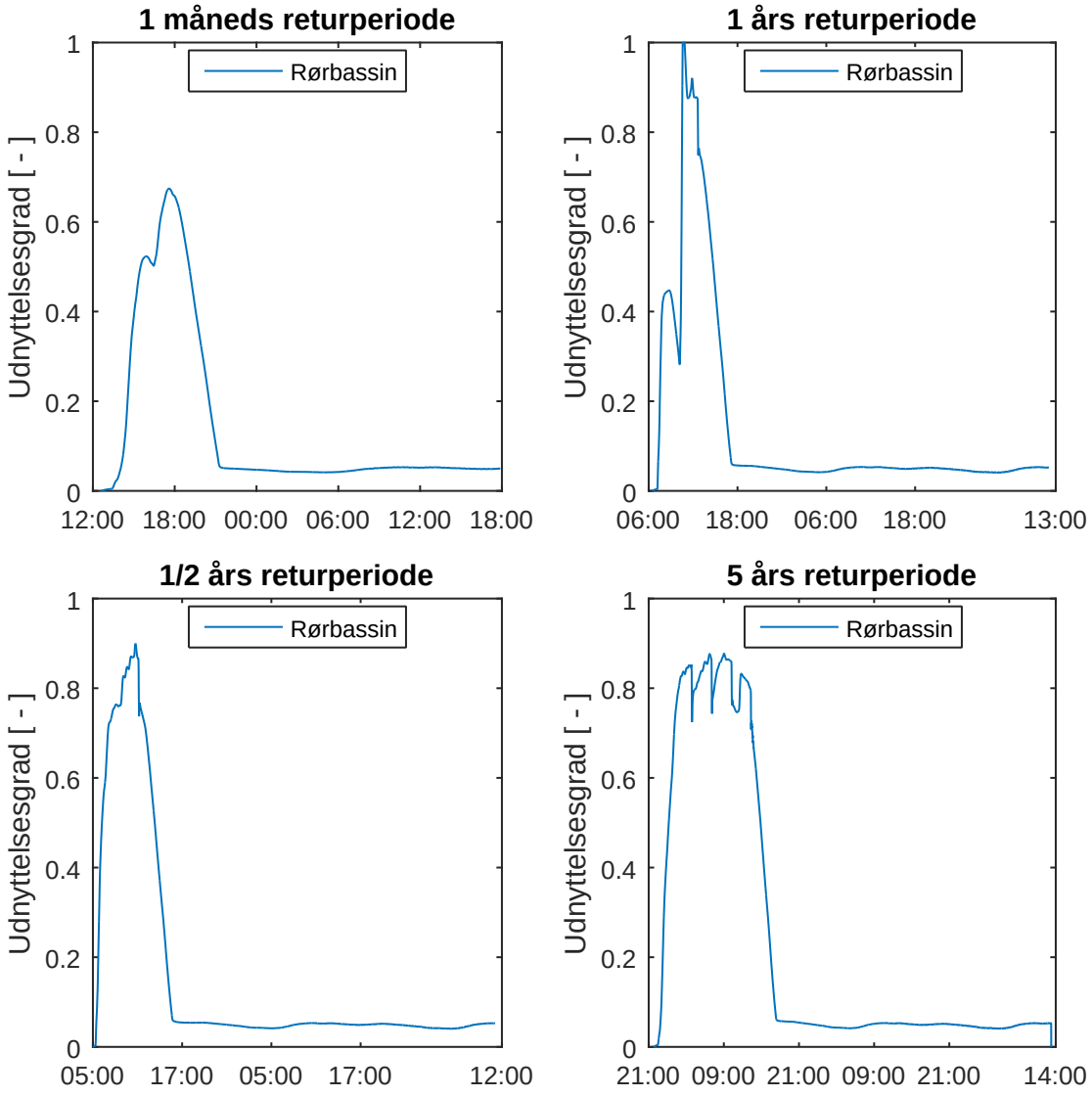


Figur 5.8. Rørbassin i Ikast. Det er kun den nordlige del af afløbssystemet i Ikast, der er vist.

Spjældet, der er indsat som vist i figur 5.8, skal styre hvor meget vand, der må være i rørbassinet. Spjældet er åbent, indtil et givent setpunkt ved sensoren omkring overløbet nås. Setpunktet er sat til kote 58,52, hvilket svarer til 20 cm under overløbskanten. Det er valgt at sætte setpunktet 20 cm under overløbskanten for at undgå overløb. Der vil være en tidsforsinkelse fra spjældet åbnes til vandet i rørbassinet falder, hvilket betyder, at hvis setpunktet sættes højere, vil der være risiko for at indstrømmende vand i røret vil få vandstanden til at stuve over overløbskanten.

Udnyttelsesgrad

I figur 5.9 er effekten af en styring på rørbassinet illustreret.



Figur 5.9. Udnyttelsesgraden for rørbassinet ved de valgte returperioder.

Som illustreret i figur 5.9 sammenlignet med figur 5.7 side 32, har det været muligt at udnytte rørbassinet i en større grad end uden styring for samtlige regnhændelser. Det har været muligt at udnytte rørbassinet uden at risikere større overløbsvolumener, hvilket er illustreret ved at udnyttelsesgraden sjældent er lig 1. Fluktuationer i udnyttelsesgraden skyldes regnhændelsens variationer og tidsforsinkelse ved spjæld, der lukkes eller åbnes. Det kan være risikabelt at sætte setpunktet højere op, da der derved vil være risiko for et større overløb på selve rørbassinet, hvilket ikke er ønsket.

Overløbsvolumen

Det er fundet, at en styring af rørbassinet vil kunne tilbageholde vand med udnyttelsesgrader over 0,8. Det er forventet, at udnyttelsen af rørbassinet vil give yderligere reduktion i overløbsvolumen, hvilket er illustreret i tabel 5.5

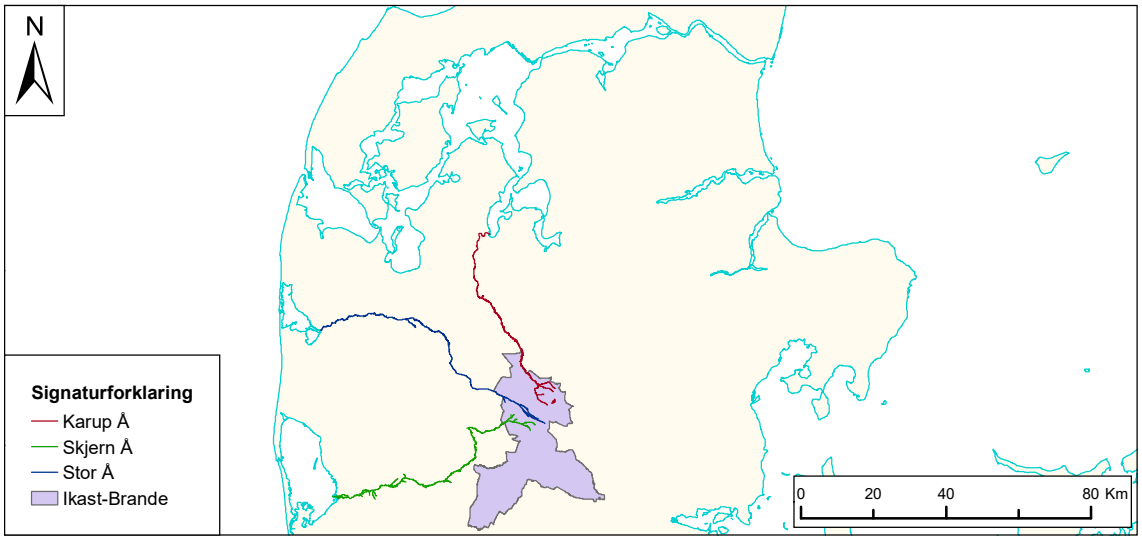
Styringsstrategi	**Total overløb** [m^3]	**Ændring** [%]	**Overløb Storå** [m^3]	**Ændring** [%]
Nuværende	175751,0	-	4443,2	-
Styring 1C	148260,1	-15,6	1017,4	-77,1

Tabel 5.5. Oversigt over ændring i overløbsvolumen over 4 returperioder. En negativ/positiv ændring indikerer hhv. reducering/forøgelse i overløbsvolumen.

Fra tabel 5.5 er det illustreret, at en styring af rørbassinet giver en reduktion i overløbsvolumen på over 15%, hvilket er en større reduktion på omtrent 6 procentpoint sammenlignet med et rørbassin foruden et spjæld. Samtidig er det dog fundet, via sammenligning med tabel 5.4 side 33, at ved styring af rørbassinet forekommer der en mindre reduktion til Storå, hvilket kan indikere at spjældet åbner ved et risikabelt setpunkt. Ydermere er det fundet at en styring af rørbassinet vil medføre at 45% af brøndene stuver op til terræn for en 10-års returperiode, hvilket er det samme som for uden styring på rørbassin.

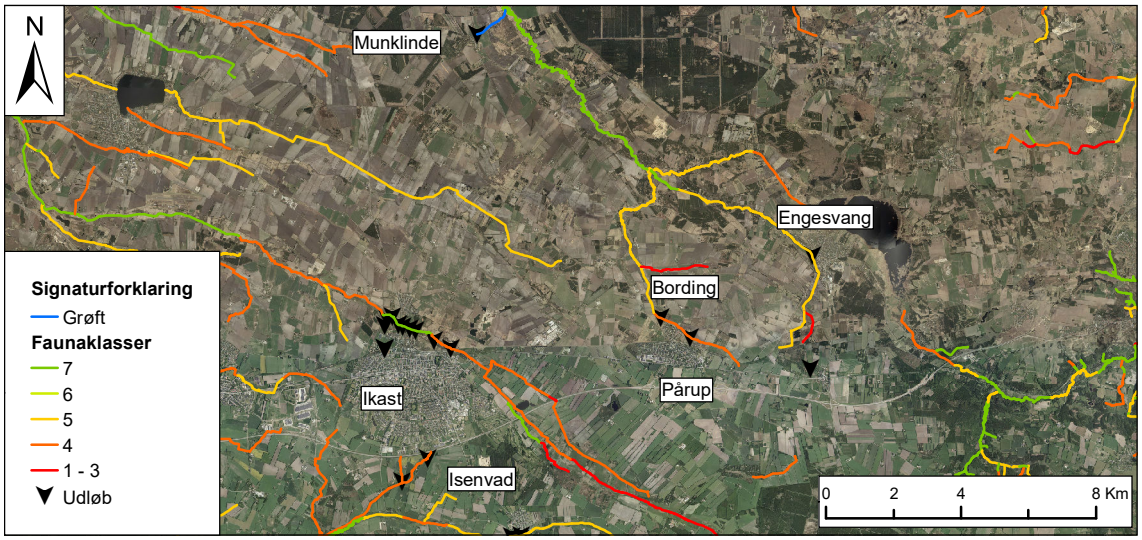
5.4.4 Styring 1D: Styring ud fra sårbare recipienter

Det er valgt at implementere en styring i Ikast Afløbssystem, der tager forbehold for sårbare recipienter. Ved denne styringsstrategi er der ikke implementeret et rørbassin. Formålet med denne styring er at udlede overløbsvolumen til givne recipienter, der er mindst muligt sårbare, for derved at undersøge hvilket bassin, der skader recipienten mindst muligt. I tilfælde af at afløbssystemets kapacitet er ved at være opbrugt, vil det være brugbart at lukke af for et bassin, hvormed kapaciteten af det nedstrøms afløbssystem ikke overskrides. Der er for alle udløb i området tale om recipienter, der er grene eller strækninger af nedstrøms højt målsatte vandløb i form af Storå, Karup Å og Skjern Å, der er illustreret i figur 5.10 side 37.



Figur 5.10. Illustration af åløb tilhørende oplandet [Naturstyrelsen, 2011].

Ofte forekommer der ved udledning af overløbsvand problemer både i henhold til hydraulisk- og stofmæssig belastning. I og med fokus er lagt på fællessystemet forventes der potentielle problemer med den stofmæssige belastning. Grundet den korte opholdstid vil de problemer, der forekommer ved udledning af opspædet spildevand såsom iltsvind være til stede enten flere km nedstrøms for udledningen, eller i flere tilfælde ved den endelige marine recipient, hvilket er enten Limfjorden, Nissum Fjord eller Ringkøbing Fjord for de vandløb, der er inkluderet ved projektområdet, illustreret ved figur 5.10. Det vil derfor være nødvendigt at undersøge vandkvaliteten nedstrøms for udledningspunkterne, hvilket vil kræve et større og udvidet datagrundlag med målinger af f.eks. iltforbrug, datagrundlag der tidsmæssigt kan være svært at anskaffe inden for projektperioden. Det er i stedet valgt at prioritere efter strækninger med høj DVFI klasse. Da det har vist sig besværligt at undersøge den stofmæssige belastning, lægges fokus i stedet på den hydrauliske belastning. I figur 5.11 side 38 er DVFI klassen for hver strækning, der udledes til i oplandet til Ikast Renseanlæg illustreret.



Figur 5.11. Udledninger til vandløb i oplandet. Vandkvaliteten er i vandløbene vist som DVFI-målklasser [Naturstyrelsen, 2011].

Som illustreret i figur 5.11, bliver der udledt til strækninger med DVFI-klasser mellem 1 og 7. For at skåne de højst DVFI-sat vandløb mest muligt er det valgt at prioritere, at udlede til vandløb med faunaklasse op til 4, da en faunaklasse over 5 svarer til god økologisk tilstand eller bedre [Naturstyrelsen, 2015]. Det er da udvalgt at prioritere de overløb, der forekommer i Bording og Munklinde. I Munklinde eksisterer en grøft, der ikke er DVFI-målsat, men det forudsættes, at denne grøft er beregnet til vandafledning af såvel markvand som overløbsvolumen. Bassiner, der vil benyttes, er for Bording 7F18BAS og 1A12000B, mens det er 5F11027 for Munklinde. Styringsmekanismen vil bestå i at udlede direkte til nærliggende recipient for de styrede bassiner.

Overløbsvolumen

Det er forventet, at der vil være en forøgelse i overløbsvolumen for de tre overløb hørende til bassinerne, men en reduktion for den totale udløbsmængde for de resterende udløb i oplandet. Overløbsvolumen er vist i tabel 5.6

Bassin/overløb	**Nuværende** [m^3]	**Styring 1D** [m^3]	**Ændring** [m^3]	**Ændring** [%]
1A12000B	5999,2	26364,4	20365,2	339,5
5F11027	0,0	1167,0	1167,0	-
7F18BAS	2154,2	4090,3	1936,1	89,9
Total overløb	175751,0	174381,1	-1369,9	-0,8

Tabel 5.6. Oversigt over ændring i overløbsvolumen over 4 returperioder. En negativ/positiv ændring indikerer hhv reducering/forøgelse i overløbsvolumen.

Som vist i tabel 5.6 side 38 vil der forekomme en kraftig forøgelse i overløbsvolumen, der ledes ud i mindre bække eller grøfter, hvilket ikke kan være hensigtsmæssigt grundet ekstreme hydrauliske belastninger, hvorved risikoen for erosion af vandløb samt forringelse af økologisk tilstand forøges. Som vist i tabel 5.6 side 38 vil denne form for lokal styring ydermere forårsage en mindre reduktion i det totale overløbsvolumener fra oplandet, der falder marginalt med 0,8%. Ydermere skaber denne form for styring ikke opstuvningsproblemer, i og med 44% af brøndene stadig stuver op til terræn.

5.5 Effekt af styringsstrategier

Det er valgt at undersøge, hvilken effekt de implementerede styringsstrategier har set over et helt år. Det er valgt at fremhæve de fire styringsstrategier samt effekten af de implementerede procestanke. Det er valgt at undersøge for år 2005, da det er vurderet, at dette år repræsenterer perioden med de udvalgte returperioder for regnhændelserne. Nedbøren er kort beskrevet i Appendiks F side 119. I tabel 5.7 er styringsstrategiernes effekt vurderet ud fra året 2005 i forhold til det nuværende system uden yderligere styring.

Styringsstrategi	**Total overløb** [m^3]	**Ændring** [%]	**Overløb Storå** [m^3]	**Ændring** [%]
Nuværende	628811,7	-	12988,7	-
Impl.* af procestanke	581731,4	-7,5	6383,0	-50,9
Styring 1A	580486,9	-7,7	6409,0	-50,7
Styring 1B	575186,1	-8,5	3022,1	-76,7
Styring 1C	573403,9	-8,8	3022,9	-76,7
Styring 1D	672103,6	6,9	6283,7	-51,6

Tabel 5.7. Oversigt over ændring i overløbsvolumen over året 2005. En negativ/positiv ændring indikerer hhv. reducering/forøgelse i overløbsvolumen. *Impl: Implementering.

Det fremgår af tabel 5.7, at der forekommer reduktioner i overløbsvolumener, der er tilnærmelsesvise sammenlignelige med reduktionerne fundet ved de fire returperioder for hver styring. Der er en generel forskel ved styringsstrategierne på omtrent 5-7 procentpoint for det totale overløb og op til 20 procentpoint for overløb til Storå, hvilket er grundet der undersøges hændelser spredt over et helt år, hvor der forekommer flere forskellige returperioder end de førnævnte. Det skal bemærkes, at den årlige reduktion til Storå for styring 1B og 1C er større end ved den teoretiske reducering grundet etablering af rørbassin. Reduktionen viser et estimat af den totale reduktion over et helt år, og ikke et estimat over forventede reduktioner pr. hændelse. Det kan generelt forventes, at hændelser, der forekommer med lav

returperiode, vil give anledning til større reduktioner end større returperioder, hvor kapaciteten af systemet allerede er fuldt udnyttet, grundet dimensioneringen. Det skal dog bemærkes, at regnens dynamik har en stor indflydelse. Reduktionerne vist fra et helt år viser som forventet, at de største reduktioner vil forekomme ved etablering af et styret rørbassin. Det var ligeledes forventet at en styring ud fra recipienter ikke ville medføre nogle reduktioner, i og med der udledes direkte til recipienten fra udvalgte bassiner, der forefindes derimod en betydelig forøgelse af samme grund. Endeligt indikerer tabel 5.7 side 39, at det ved brug af simple lokale styringsstrategier er muligt, at reducere det totale overløbsvolumener fra oplandet til Ikast Renseanlæg til omkring halvdelen af det teoretisk mulige som ifølge afsnit 5.3 side 27 er en reduktion på ca. 18%.

5.6 Sammenfatning

Det er fundet, at en lokal styring af afløbssystemet giver store reduktioner i det totale overløbsvolumen fra fællessystemet, ift. hvad der teoretisk er muligt. Der er undersøgt tre forskellige styringsstrategier, hvor den største reduktion i total overløbsvolumen på 8,8% over en 1-årig periode. Det er påvist, at simple lokale styringer på bassiner kan tilbageholde vand ved givne setpunkter, samtidig med at større overløbsvolumen undgås på selvsamme bassin, der styres fra. Det kan derfor anbefales, at føre den lokale styringsstrategi videre til en global for yderligere at kunne reducere overløbsvolumenerne. Ved den globale styringsstrategi, er det yderligere muligt, at lave en analyse og finde de optimale pumpekonfigurationer for tømmepumperne ved de styrede bassiner, der vil kunne resultere i de største reduktioner i overløbsvolumen.

Ved at prioritere vandløb med høje DVFI-klasser er det muligt, at styre afløbssystemet mod at aflede til recipienter med lav DVFI-klasse. Formålet med denne styringsstrategi var at undersøge hvilke bassiner, der ved overløb af fællesvand medførte mindst skade til nærliggende recipient. Det blev vurderet, at bassin 5F11027 i Munklinde er det bassin, der bør prioriteres i tilfælde af overløb. I en global styringsstrategi vil det derfor være relevant at inkludere dette bassin, som værende det bassin, der kan benyttes til overløb, hvis det resterende afløbssystems kapacitet er udfordret.

6. Global styring

Den lokale styring af afløbssystemet i Ikast præsenteret i kapitel 5 side 25 viste, at der var et potentiale for at reducere overløbsvolumen med styring på lokalt niveau. Derfor undersøges det, om der er et yderligere potentiale for at reducere overløbsvolumen ved en global styringsstrategi. Bassinerne præsenteret i kapitel 5 side 25 anvendes til at udforme en global styringsstrategi. Der præsenteres to styringsstrategier, der vurderes op imod hinanden. Det vælges at undersøge, hvorledes styringen reagerer på fire forskellige regnhændelser, og effekten af styringen vurderes ud fra en 1-årig periode. Styringsstrategien med mindst overløbsvolumen benyttes i sammenhæng med rørbassinet præsenteret i afsnit 5.4.3 side 34, hvor der yderligere laves en analyse af hvornår rørbassinets spjæld skal træde i kraft for at formindske det totale overløbsvolumen.

6.1 Styringsprincip

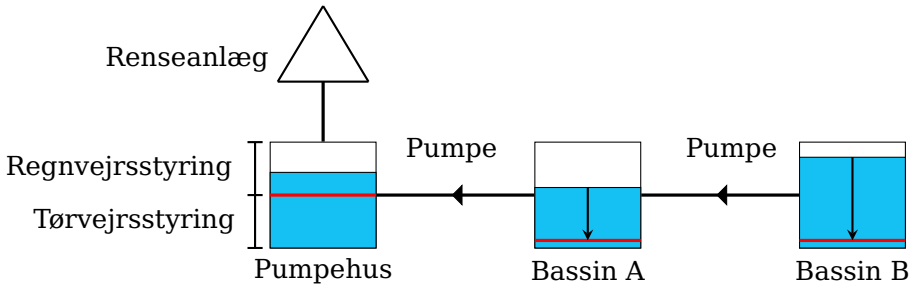
I de lokale styringsstrategier var bassinerne ikke afhængige af hinanden, hvormed dette gav anledning til, at bassinerne kunne aflede vandet på samme tidspunkt, og det gav kapacitetsproblemer nedstrøms i ledningssystemet og dermed overløb. I modsætning til den lokale styring er bassinerne afhængige af hinanden i den globale styring. Ved at bassinerne er afhængige af hinanden kan der styres efter, hvornår det enkelte bassin skal aflede vandet til renseanlægget uden, at der forekommer overløb ved de øvrige bassiner og samtidig skåne ledningssystemet.

Det overordnede princip for de globale styringer er derved, at bassinerne styres under både tør- og regnvejr i en bestemt rækkefølge. Dette gør sig gældende for alle bassiner pånær bassin 5F11027. Det er her ønsket at aflede vandet direkte til recipienten herfra i tilfælde af kapacitetsproblemer nedstrøms i afløbssystemet grundet, at dette bassin havde den mindste effekt på recipienten ifølge afsnit 5.4.4 side 36.

Styringsprincippet er implementeret i MOUSE-modellerne ved nogle simple betingelser, der er defineret ud fra følgende:

Hvis $V_{Niveau,Pumpehus} > Setpunkt_{Pumpehus}$ og $V_{Niveau,Bassin_A} < Setpunkt_{Bassin,A}$:

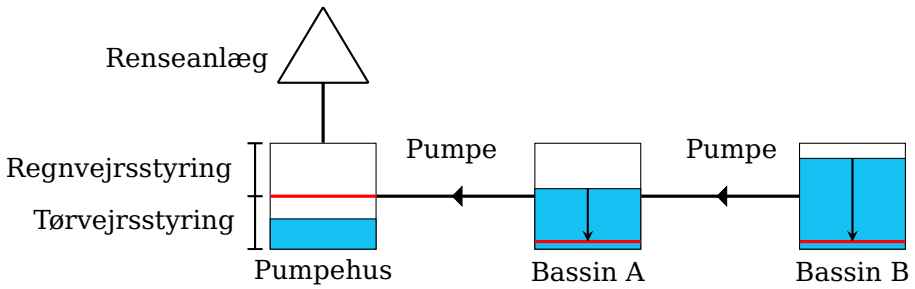
Da gælder Regnstyring for Bassin B forklaret ved figur 6.1.;



Figur 6.1. Princip for regnstyring. De røde streger indikerer setpunkter for bassinerne.

Hvis $V_{Niveau,Pumpehus} < Setpunkt_{Pumpehus}$ og $V_{Niveau,Bassin_A} < Setpunkt_{Bassin,A}$:

Da gælder Tørvejrsstyring for Bassin B forklaret ved figur 6.2.;



Figur 6.2. Princip for tørvejrsstyring. De røde streger indikerer setpunkter for bassinerne.

Ellers

Da gælder Pumpestop for Bassin B.;

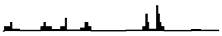
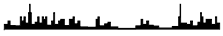
Ved regnstyringen starter pumpen i et bassin, når vandstanden i pumpehuset er over den maksimale kote forekommende ved et tørsvejrsdøgn og så længe vandstanden i bassinet, den pågældende bassin er afhængig af, er under den angivende kote.

Tørvejrsstyring betyder, at pumpen starter i bassinet så længe et tørvejrsflow registreres ved renseanlægget, hvorefter bassinet tømmes. Tørvejrsflow er bestemt ud fra den maksimale vandstand forekommende i pumpesumpen ved renseænlægget under en tørvejrsperiode. Endelig gælder pumpestop, hvor bassinet tilbageholder så meget vand som muligt, og pumpen starter først, når bassinet er fyldt.

6.1.1 Nedbør

Det blev fundet i figur 6.1 side 43, at den største restkapacitet kan findes ved regnhændelser, hvor der falder mellem 4 og 15 mm. I den lokale styring tegnede der sig imidlertid et billede af at en styring vil give størst gevinst ved mindre returperioder, hvilket er illustreret i Appendiks J side 133. Tendensen er, at ved returperioder på over halvt år vil resultere i flere overløb fra de styrede bassiner, herved er der risiko for, at styringen i sig selv medfører uhensigtsmæssige overløb. Det er derfor i den globale styring valgt at simulere fire regnhændelser, der er udvalgt efter at have nedbørsmængder på 4, 7, 10 og $13\,\mathrm{mm}$ som konsekvens af figur 3.4 side 19, hvor den største restkapacitet observeres i dette interval. De udvalgte hændelser har en returperioder på hhv. 0,02; 0,05; 0,08 og 0,14 år for det samlede nedbør, som kort beskrevet i tabel 6.1.

Herning Centralrenseanlæg stationsnr.: 5279

Returperiode [År]	**Varighed** [Min]	**Intensitet** [-]	**Gns.** [μm/s]	**Maks.** [μm/s]	**Nedbør** [mm]
0,02	28		2,380	16,70	4
0,05	143		0,816	10,00	7
0,08	438		0,381	1,67	10
0,14	582		0,372	1,67	13

Tabel 6.1. De fire udvalgte regnhændelser til optimeringen af strategierne for Ikast Afløbssystem. Returperioden er beregnet ud fra frekvensen af nedbør.

Regnhændelserne er målt på DMI's regnmåler ved Herning Centralrenseanlæg med stationsnummer 5279. Varigheden af regnhændelserne spænder fra 27 min. til 9,5 timer og returperioderne ligger mellem 0,02 - 0,14 år. Der er lagt en tørvejrsperiode på 5 dage ind efter regnhændelserne for at sikre, at afstrømningen fra bassinerne er fuldendt.

6.2 Styringsstrategier

Det er valgt at undersøge følgende globale styringsstrategier,

- Styring 2A: Styring ud fra bassinernes specifikke egenskaber.
- Styring 2B: Styring ud fra "bedste kvalificerede bud".

Bassinernes specifikke egenskaber dækker over det areal-specifikke volumen samt tømmetiden for de benyttede bassiner. Bassiner med et lavt areal-specifik volumen eller tømmetid vil aflede vandet til renseanlægget før et bassin med et højere areal-specifik volumen eller tømmetid. Styring efter "bedste kvalificerede bud" er en styringsstrategi, der er udarbejdet på baggrund af kendskab til afløbssystemet, hvor

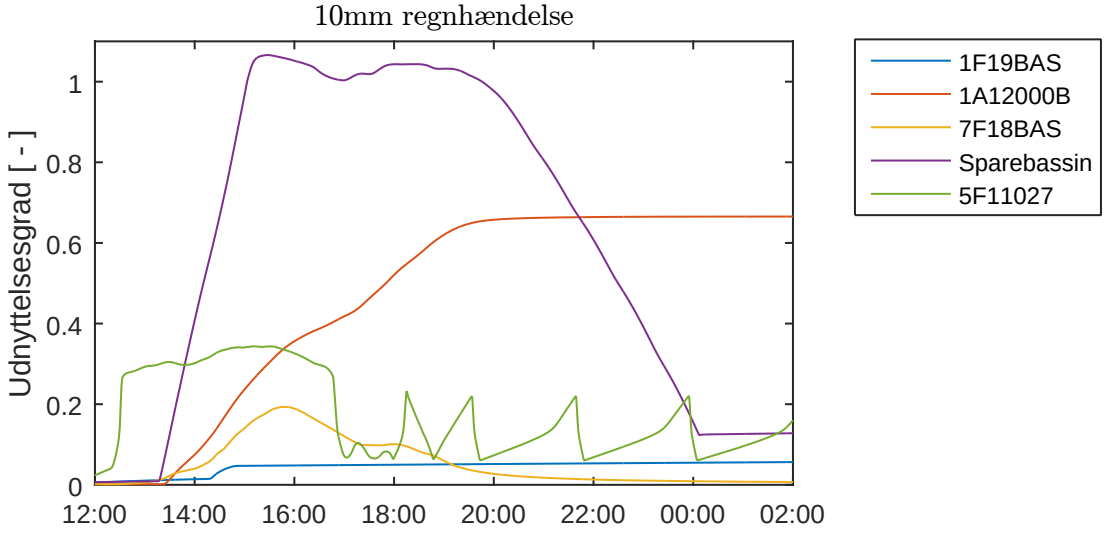
kvalificerede bud på, hvorledes de enkelte styringsregulatorer i form af pumper i afløbssystemet skal styres for at få den størst mulige reduktion af overløbsvolumen. For begge styringsstrategier bestemmes setpunkter, der angiver koten for, hvornår pumperne starter eller stopper, efter kvalificerede bud.

I styringsstrategierne er det et krav, at opstuvning til terræn for en 10-årig periode ikke må forværre den nuværende tilstand, der er undersøgt i afsnit 5.4.1 side 30.

I de følgende tre afsnit 6.2.1, 6.2.2 og 6.2.3 undersøges det, hvilken effekt de globale styringsstrategier har sammenlignet med afløbssystemets nuværende styringsstrategi. Der laves analyser for hvor stor en reduktion af overløbsvolumen styringsstrategierne giver ift. den nuværende styringsstrategi.

6.2.1 Nuværende styringsstrategi

Udnyttelsesgraden er baseret på regnhændelser af 4 mm, 7 mm, 10 mm og 13 mm. I følgende figur 6.3 er udnyttelsesgraden vist for en 10 mm regnhændelse for de bassiner, som er inkluderet i styringsstrategien.



Figur 6.3. Overløbsvolumen for bassiner ved den valgte regnhændelse, ved nuværende styringsstrategi.

Det er tydeligt fra figur 6.3 og Appendiks K.1.1 side 137, hvor de resterende regnhændelser er præsenteret, at der ikke er nogen kontrol, hvor bassinerne styres efter hinanden, men blot tømmes når et setpunkt for en pumpekonfiguration er nået. Dette kan føre til at rørsystemet overbelastes, og at risikoen for overløb i afløbssystemet forøges. Det totale overløb er på $30\,660\,\mathrm{m}^3$ for de fire regnhændelser sammenlagt og 628811,7 m^3 for året 2005.

6.2.2 Styring 2A: Styring ud fra bassinernes specifikke egenskaber

Det er forsøgt at styre bassinerne efter det areal-specifikke volumen og tømmetiden for de benyttede bassiner. Det areal-specifikke volumen er et mål for, hvor stor nedbør bassinerne kan holde tilbage fra dets opland. Derfor er bassiner med et højt areal-specifikt volumen særlige vigtige, da disse giver mulighed for at holde vand tilbage førend de andre bassiner er aflastet. Tømmetiden er en størrelse, der fortæller, hvor hurtigt bassinet kan afgive det tilbageholdte vand. Følgende tabel 6.2 viser, hvorledes bassinerne tømmes vedrørende denne styringsstrategi.

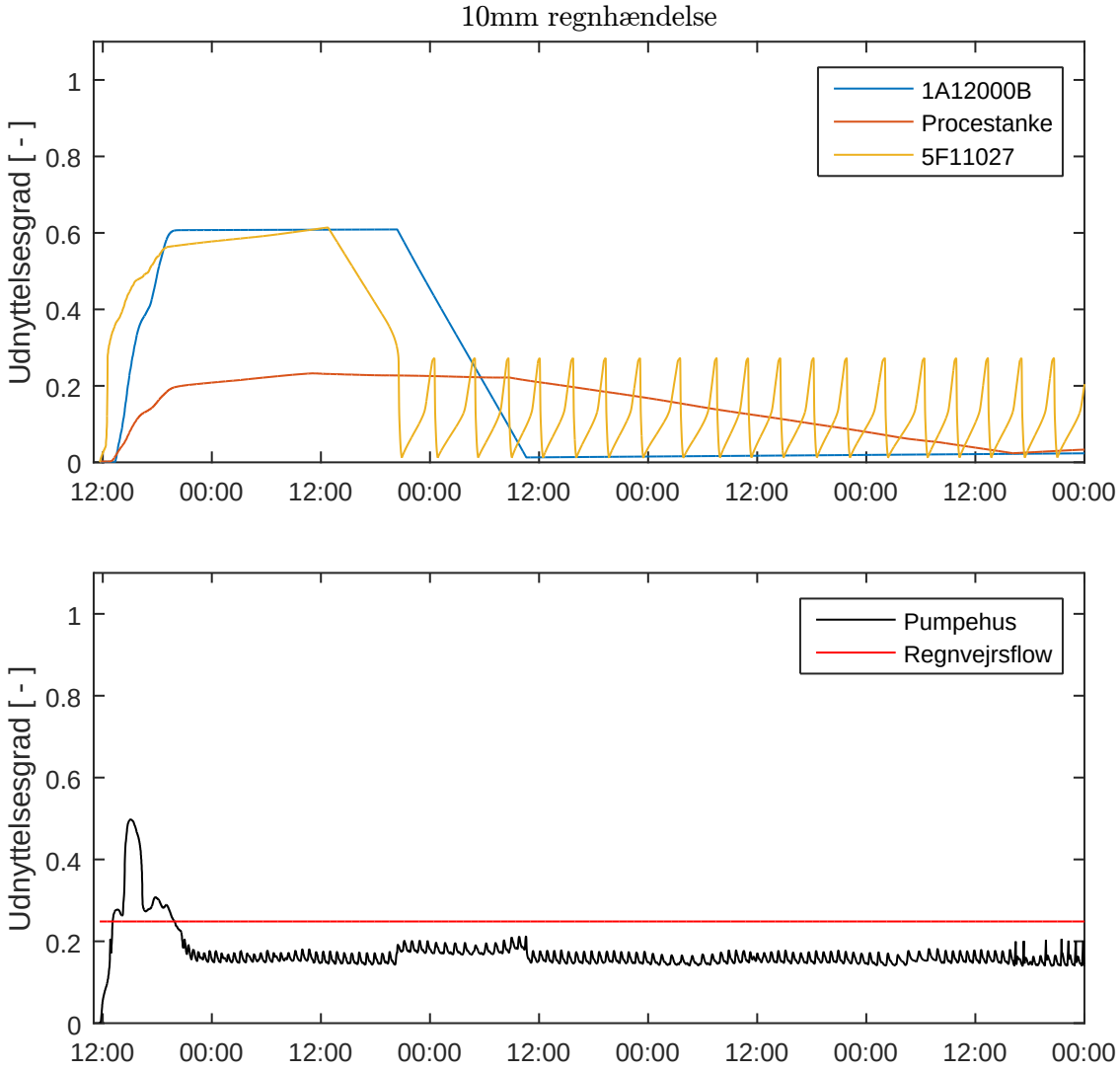
Rækkefølge	Bassin	mm	Timer
1	Sparebassin	3,3	4,5
2	7F18BAS	5,4	8,5
3	1F19BAS	9,0	11,4
4	5F11027	24,8	16,5
5	1A12000B	10,5	56,9
6	Procestanke	39,8	200

Tabel 6.2. Rækkefølge hvormed bassinerne leder vandet til renseanlægget.

Som angivet i tabel 6.2 aflaster bassinerne 1A12000B og procestankene til sidst, hvilket er grundet deres store volumen relativt til de resterende bassiner i oplandet, hvormed disse kan opfattes som værende bassinbuffere. Ydermere er det valgt at styre efter, at 5F11027 aflaster direkte ud til recipienten i tilfælde af at de resterende bassiner er fuldt udnyttet. For de styrede bassiner i afløbssystemet er det gældende, at rækkefølgen for de to styringsstrategier er ens eftersom, at det bassin med mindst areal-specifik volumen ligeledes har mindst tømmetid. Dette betragtes som værende et tilfælde og kun gældende for Ikast Afløbssystem. Eftersom de to styringsstrategier tømmes efter samme rækkefølge vælges det at betragte det som værende én styringsstrategi.

Udnyttelsesgrad

Det forventes, at bassinerne aflaster efter hinanden i rækkefølgen som angivet i tabel 6.2. Udnyttelsesgraden er vist i figur 6.4 side 46. Det er valgt at visualisere, hvordan tre bassiner aflaster ved en regnhændelse på 10 mm, hvoraf de resterende regnhændelser med alle styrede bassiner kan findes i appendiks K.1.2 side 139.



Figur 6.4. Udnyttelsesgraden for de styrede bassiner ved de valgte regnhændelser, hvor setpunktet for regnvejrsflow er givet i den røde linje på nederste figur.

Det er illustreret i figur 6.4 og Appendiks K.1.2 side 139, at bassinerne tømmes som forventet efter rækkefølgen. Det er, som vist i Appendiks K.1.2 side 139, tydeligt at udnyttelsesgraden for Sparebassin er større end 1, hvormed der forekommer et overløb. Det har ikke været muligt at undgå dette overløb, og det var ligeledes var forventet i og med regnhændelsens nedbør er større end bassinets areal-specifikke volumen. Ydermere er det illustreret, at udnyttelsesgraderne for bassinerne er større efter styringsstrategien er implementeret ift. figur 6.3 side 44, og alle bassiner tømmer under tørvejr, hvilket ikke er tilfældet for alle bassiner i det nuværende styringsstrategi. Grundet at bassinerne tømmes under tørvejr muliggør dette, at

bassinernes fulde kapacitet er til rådighed ved en ny regnhændelse. Som vist i Appendiks K.1.2 side 139, er det illustreret at et eller flere bassiner kan aflaste samtidig, idet bassinerne kun er afhængige af dét foregående bassin. Det fremgår af Appendiks K.1.2 side 139, at bassin 5F11027 aflaster samtidigt med Sparebassin. Dette er tilladt så længe udnyttelsesgraden for det foregående bassin 1F19BAS er under sin setpunkt. De mindre fluktuationer, der forekommer efter bassinerne er tømt skyldes tørvejrsstyringen som illustreret på figur 6.4 side 46 for bassin 5F11027. Det er, som vist i Appendiks K.1.2 side 139 ydermere fundet, at udnyttelsesgraderne for bassinerne generelt stiger med øget nedbør og holder sig under 1, hvormed det er muligt at styre på regnhændelser op til 13 mm uden, at der forekommer større overløb fra de styrede bassiner. Det kan da vurderes, at der med denne styring er et højt potentiale til at kunne holde vand tilbage i bassiner uden, at der forekommer overløb fra bassinerne ved enkeltstående regnhændelser på op til 13 mm nedbør.

Overløbsvolumen

Eftersom den globale styring strategis princip er, at bassinerne tømmes en af gangen, vil det give anledning til større kapacitet for ledningssystemet nedstrøms, hvormed det kan give anledning til mindre overløbsvolumen. I tabel 6.3 er overløbsvolumen for de fire hændelser angivet i relation til, hvorledes det nuværende afløbssystem vil reagere på de selvsamme hændelser. Ydermere er det valgt at inkludere overløbsvolumen til Storå, da det er prioriteret at få reduceret disse overløbsvolumen fra udløbene: 1F03000, 1F10000 og 1F17000.

Styringsstrategi	**Total overløb** [m^3]	**Ændring** [%]	**Overløb Storå** [m^3]	**Ændring** [%]
Nuværende	30476,7	-	143,9	-
Styring 2A	28629,9	-7,5	143,9	0,0

Tabel 6.3. Oversigt over ændring i overløbsvolumen over fire regnhændelser. En negativ/positiv ændring indikerer hhv. reducering/forøgelse i overløbsvolumen.

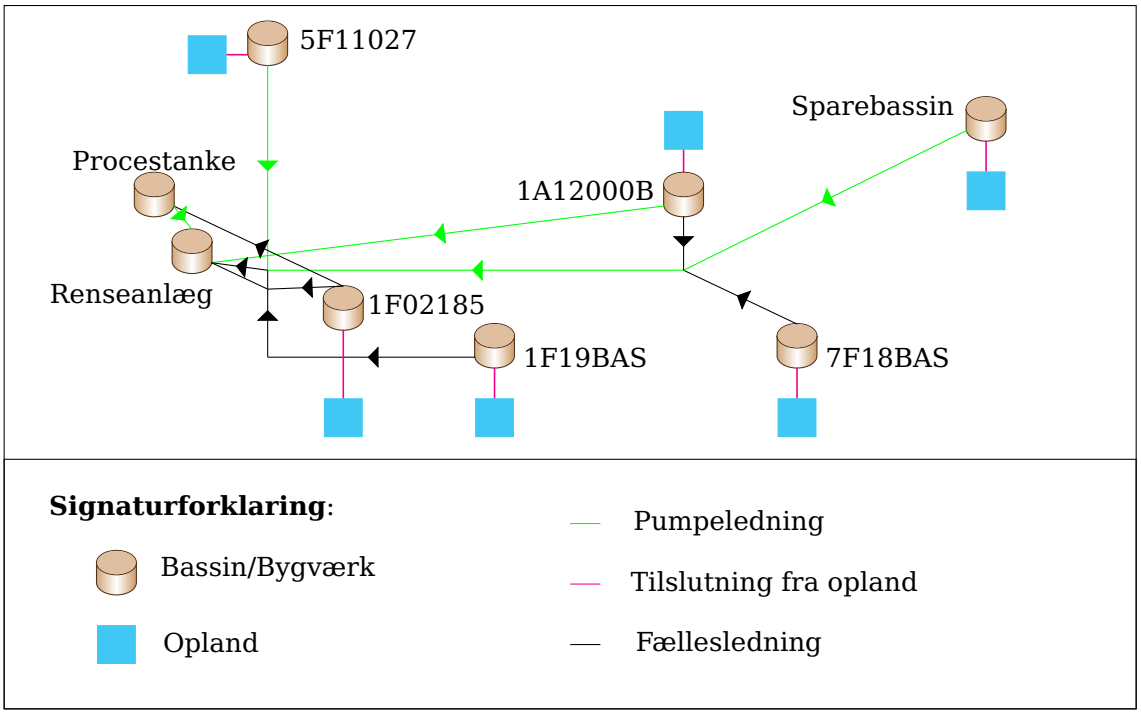
Som vist i tabel 6.3 er reduktionen på det totale overløb omtrent 7,5%, hvilket kan indikere, at en denne form for regelbaseret styring ikke vil have en stor effekt. Den største effekt forekommer ved regnhændelser på 4-7 mm, hvilket kan indikere, at effekten ved styringen er størst ved de mindre regnhændelser på returperioder op til 0,05 år svarende til omtrent to uger, fremfor hændelser med højere returperioder. Ydermere er det fundet, at styringens effekt er ikke eksisterende ift. overløb til Storå, dette kan skyldes valget af bassiner, der styres på, da hovedparten af bassinerne ikke er placeret i det nordlige Ikast. Det, at reduktionen ikke viser sig som værende højere, kan ligeledes skyldes regnens variation, derfor vil en årsperiode være mere relevant for at vurdere effekten, da det er muligt ved denne metode at undersøge styringsstrategiens effekt på flere sammenhængende regnhændelser.

6.2.3 Styring 2B: Styring ud fra 'bedste kvalificerede bud'

Det er valgt at udarbejde en styringsstrategi efter "bedst kvalificeret bud", hvor der opsættes et regelsæt, som styrer pumperne, der tilhører de fem bassiner, der styres på. Reglerne opsættes på baggrund af kendskab til systemet. Derudover er bassinernes areal-specifikke volumener samt pumpeydelsen benyttet for at vurdere, hvilke bassiner, der er i stand til at tilbageholde mest vand og samtidig hurtigt komme af med det. De fem bassiner, som illustreret på figur 6.5, ligger meget spredt i forhold til hinanden, hvilket giver nogle store afstrømningstider før, at det når frem til pumpehuset 1F01PUM, som efterfølgende pumper vandet videre op til renseanlægget.

De tilhørende oplandsarealer er vist på figur 6.5, hvor det fremgår, at bassin 1A12000B og 7F18BAS deler opland, hvormed dette tages i betragtning i udarbejdelsen af styringsstrategien.

Det var udtænkt at benytte procestankene som buffertanke, idet det samlede volumen er på $9000\,\mathrm{m}^3$ og ikke er tilstrækkeligt udnyttet, som vist på Appendiks K.1.2 side 139. Styringsstrategien er baseret på, at de fem bassiner skulle styres efter at aflede vandet til procestankene, som derved benyttes som bassinbuffere, og efterfølgende lede vandet til renseanlægget. Dette er tanken at udnytte procestankene mere end for Styring 2A. Afløbssystemets restriktioner, forhindrer vandet fra de fem bassiner i at blive ledt over i procestankene som illustreret på figur 6.5.



Figur 6.5. De 6 bassiner der styres på med deres tilhørende oplandsarealer.

Det fremgår af figur 6.5 side 48, at tilslutningerne fra de fem bassiners pumpeledninger forekommer efter bygværk 1F02185, hvormed vandet ikke har mulighed for at nå nedstrøms frem til procestankene. Dermed er det ikke muligt at bruge procestankene som bassinbuffere foruden et større indgreb i afløbssystemet, hvilket ikke er hensigten i den globale styringsstrategi.

Rækkefølgen hvormed bassinerne tømmes er bestemt ved en manuel fremgangsmetode. Hvert bassin tømmes i en tilfældig rækkefølge, og der simuleres et overløbsvolumen. Den rækkefølge, der giver det mindste overløbsvolumen er den benyttede løsning til denne styringsstrategi. Rækkefølgen for tømning af bassiner er bestemt til følgende:

1. 1F19BAS, 7F18BAS og Sparebassin
2. 1A12000B og Procestanke
3. 5F11027

Den mest optimale rækkefølge viser sig, at være en kombination af flere bassiner, der tømmes samtidigt. Strategien viser, at det er bedst at tømme bassinerne efter gruppering ift. det areal-specifikke volumen og en vurdering af kapaciteten i eventuelle knudepunkter i afløbssystemet. Det er valgt at aflaste flere bassiner samtidigt fordi, at afløbssystemets kapacitet nedstrøms tillader det. Styringsstrategien er ligeledes vist i appendiks K.1.3 side 141, hvor udnyttelsesgraderne er illustreret for de fire regnhændelser.

Det totale overløbsvolumen efter implementering af denne styringsstrategi er angivet i tabel 6.4.

Styringsstrategi	**Total overløb** [m^3]	**Ændring** [%]	**Overløb Storå** [m^3]	**Ændring** [%]
Nuværende	30476,7	-	143,9	-
Styring 2B	26977,8	-11,5	143,9	0,0

Tabel 6.4. Oversigt over ændring i overløbsvolumen over fire regnhændelser. En negativ/positiv ændring indikerer hhv. reducering/forøgelse i overløbsvolumen.

Det fremgår af tabel 6.4, at der er en total reduktion på 11,5%, hvilket giver en større reduktion end for Styring 2A. Ligeledes ses det, at der er ingen reduktion til Storå, hvilket er ligeledes gældende som for Styring 2A.

6.3 Effekt af styringsstrategier

Effekten af de undersøgte regelbaserede globale styringsstrategier er, som for de lokale styringsstrategier blevet undersøgt ved en udvalgt periode på et år. Ved at vælge en lang periode er det muligt at undersøge, hvorledes styringsstrategien reagerer på sammenhængende regnhændelser fremfor enkeltstående. Herved er det også muligt at undersøge forskellige tidslige variationer for regnen. I tabel 6.5 er reduktioner i overløbsvolumen for året 2005 blevet undersøgt for såvel Storå som totale overløbsvolumen.

Styringsstrategi	**Total overløb** [m^3]	**Ændring** [%]	**Overløb Storå** [m^3]	**Ændring** [%]
Nuværende	628811,7	-	12988,7	-
Styring 2A	560941,0	-10,8	6219,3	-52,1
Styring 2B	531007,0	-15,6	7300,0	-43,8

Tabel 6.5. Oversigt over ændring i overløbsvolumen over 1 år. En negativ/positiv ændring indikerer hhv. reducering/forøgelse i overløbsvolumen.

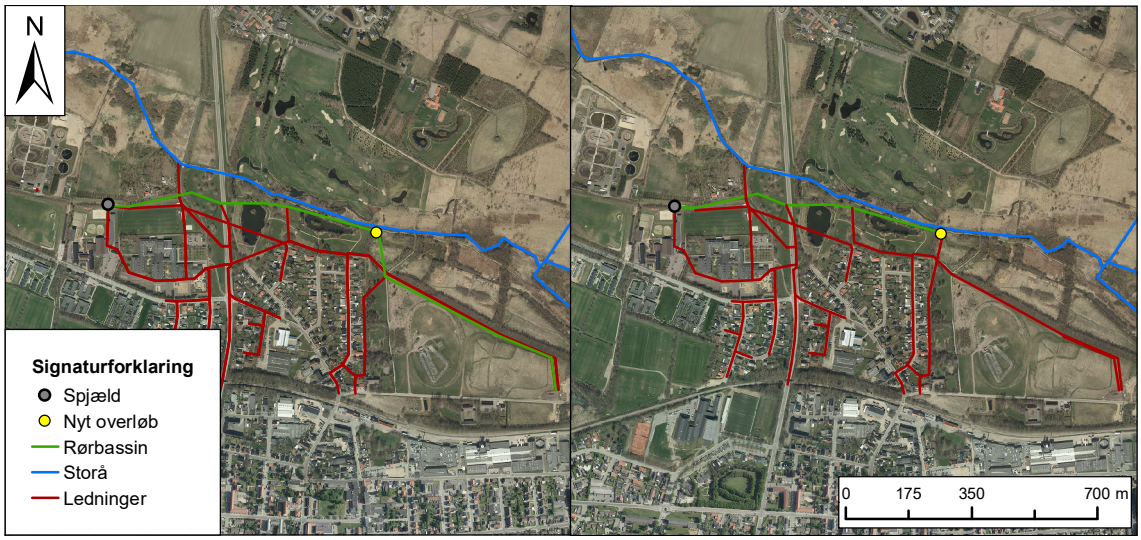
I tabel 6.5 fremgår det, at det er muligt ved en regelbaseret styringsstrategi at reducere udledninger til over 15,6% for totale overløbsvolumener. Ydermere, hvilket er meget interessant er, at det har vist sig muligt at reducere udledninger til Storå med over 4% for de to styringsstrategier, hvilket er nær reduktionerne fundet for Storå i den lokale styring.

6.4 Sammenfatning

Det er fundet, at en global styringsstrategi vil give kraftige reduktioner til Storå på over 44% og reduktioner i totale overløbsvolumener på over 15%. Der ses en generel forskel mellem 1 års perioden samt enkelthændelserne på omkring 5 procentpoint, hvilket skyldes at 4 og 13 mm hændelserne har stor indflydelse, hvis disse ikke medtages vil forskellen derimod være på 1 procentpoint, hvilket er meget sammenligneligt med 1 års perioden. Reduktioner til Storå må betragtes som værende generelt høje set i relation til at det er et prioriteret vandløb af Ikast-Brande Spildevand A/S. Det kan ligeledes konkluderes, at potentialet for styring ved begge globale styringsstrategier generelt er høje for regnhændelser op til 13 mm. Da Styring 2B giver en større reducering i det totale overløbsvolumen er det valgt at arbejde videre med denne styringsstrategi ved yderligere etablering af rørbassinet. Det er for begge styringsstrategier, at der ikke forekommer en forværring af de nuværende opstuvningsproblemer.

6.5 Styring af rørbassin

Som angivet i afsnit 6.2.3 side 48 er det fundet, at den bedste regelbaserede styringsstrategi, er at styre efter styringsstrategi 2B. I kapitel 5 side 25 er det ydermere fundet, at en implementering af et rørbassin vil føre til yderligere reduktioner i overløbsvolumen. Det er da forsøgt at implementere rørbassinet i den globale styringsstrategi. Det vælges at formindske længden af rørbassinet, men så vidt muligt bibeholde dets volumen. Dette gøres for at forsøge at udnytte rørbassinets volumen i største grad. I figur 6.6 er den ændrede struktur med rørbassinet vist og en skitsetegning af rørbassinet findes i appendiks H side 123.



Figur 6.6. Rørbassin indlagt i Ikast. Det er kun den nordlige del af afløbssystemet i Ikast, der er vist. Venstre side af figuren viser rørbassinet som undersøgt i afsnit 5.4.2 side 31, mens højre side viser den formindskede længde af rørbassinet, der benyttes i analysen for den globale styringsstrategi.

Som vist i figur 6.6 er det valgt at anlægge rørbassinet, hvor overløbet til 1F17000 forekommer. Dets fulde længde er på $748\,\mathrm{m}$ og med en diameter på $1400\,\mathrm{mm}$ ændres volumenet til $1152\,\mathrm{m}^3$. Det er valgt at undersøge effekten af spjældet, der er isat på rørbassinet. Spjældet træder i funktion og åbner, når en given vandstand ved overløbet noteres. Det er valgt at undersøge hvilken vandstand, spjældet bør åbne således, at den mindste totale overløbsmængde forekommer. Det er derfor kun valgt at ændre på setpunktet, der repræsenter vandstandskoten ved overløbet for rørbassinet. Rørbassinet styres uafhængig af de andre bassiner i afløbssystemet. Det er valgt at undersøge ved hvilket setpunkt, der forekommer mindst overløb både til Storå men også ift. det totale overløbsvolumen i oplandet. Setpunkterne er sat efter en procent-del af den maksimale vandstand på $1.4\,\mathrm{m}$ i rørbassinet, som er den vandstand, hvor overløbet træder i funktion. Hvilket setpunkt der giver største gevinst er angivet i tabel 6.6 side 52.

Setpunkt	Total overløb [m^3]	Ændring [%]	Overløb Storå [m^3]	Ændring [%]
Nuværende	628811,7	-	12988,7	-
Uden spjæld	511682,0	18,6	65,2	99,5
100%	510785,9	18,8	490,6	96,2
90%	511027,1	18,7	423,9	96,7
80%	511176,7	18,7	277,2	97,9
70%	511176,9	18,7	273,1	97,9
60%	511293,5	18,7	179,1	98,6
50%	511290,9	18,7	162,6	98,7

Tabel 6.6. Oversigt over ændring i overløbsvolumen over 1 år. En negativ/positiv ændring indikerer hhv. reducering/forøgelse i overløbsvolumen. Setpunktet repræsenter vandstandskoten ved overløbet. Det er valgt at undersøge effekten af forskellige setpunkter, samt et scenarie uden spjæld. 100% angiver et scenarie, hvor spjældet først træder i funktion, når der forekommer et overløb.

Som angivet i tabel 6.6 er det muligt at reducere mellem 18,6 og 18,8% ved brug af et rørbassin, hvor den største reduktion ved Storå findes ved etablering af rørbassin uden spjæld. Denne styring benævnes Styring 2C. Det fremgår at ved styring af rørbassinet opnås en større total reduktion end uden. Det forværrer dog udledning til Storå, hvilket ikke er ønsket.

6.6 Global vs. Lokal styring

Den lokale styring viste at med relativt simple indgreb i få udvalgte bassiner, var det muligt at reducere det totale udledninger af overløbsvolumen med omkring 7-8% på et år. Ved yderligere at implementere et rørbassin var det muligt at reducere det totale overløbsvolumen med omkring 9%. Samtidigt viste tabel 5.7 side 39 og at overløbsvolumen til Storå kunne reduceres mellem 50 og 76%, dette viste, at potentialet for reduktioner ved simple lokale styringer generelt var store. En global styringsstrategi sat op efter "Bedste kvalificerede bud" gav reduktioner på over 15%, hvilket er omtrent 7-8 procentpoint større reduktion sammenlignet med den lokale styring. Styring 2A og 2B giver omtrent den samme reduktion af overløbsvolumen til Storå som Styring 1A, hvormed det er nødvendigt at tilføje et rørbassin for at opnå større reduktioner. Hvis rørbassinet derimod implementeres på den globale styringsstrategi Styring 2B, vil der være potentiale for at eliminere udledninger til Storå, samtidig med, at det totale overløbsreduktioner kan reduceres med over 18%.

Det har været tidskrævende at opsætte en global styringsstrategi for afløbssystemet til Ikast Renseanlæg, ydermere har det ligeledes været tidskrævende undersøge optimum for setpunkter til styring af rørbassinet. Den lokale styring derimod var

ikke tidskrævende, i og med der kun blev ændret på hvor hurtig bassinerne skulle tømmes. En global styring med et rørbassin giver større reduktioner til oplandet til Ikast Renseanlæg, mens udledninger til Storå kan elimineres. Det er ligeledes fundet, at afløbssystemet har begrænsninger ift. selve styringen, i og med der er større opstuvningsproblemer, der medfører, at når vand holdes tilbage i rørbassinet, da risikeres der overløb opstrøms bassinet. En større analyse af selve afløbssystemets ledningsstruktur vil kunne udpege "flaskehalse" i systemet, hvis disse flaskehalse kan opløses, da vil potentialet for styringens effekt blive yderligere indfriet, og det vil være muligt at komme tættere på den teoretiske reduktion. Det er dog vigtigt at understrege, at de fundne reduktioner er beregnet ved forudsætning af samme regninput, hvor det er valgt at benytte regnmåleren opsat ved Herning Centralrenseanlæg. Det er derfor forsøgt at ændre regnens distribution over oplandet, der henvises derfor til appendiks I side 125.

7. Delkonklusion II

I denne del er det valgt at lave styring af Ikast Afløbssystem ud fra den regelbaserede metode. De to kapitler baseres på forskellige strategier inden for den regelbaserede metode. Formålet er at undersøge, hvilken effekt en simpel lokal styringsstrategi, hvor alle bassiner er sat til at pumpe ved størst mulig udnyttelse ville have ift. en mere avanceret global styringsstrategi, hvor bassinerne først blev tømt efter hvordan kapaciteten var i selve afløbssystemet for at undgå overløb.

Det konkluderes, at det over et år gennemsnitlig er teoretisk muligt at reducere overløbsvolumen med ca. 18%. Denne reduktion vil være den størst mulige reduktion og vil være til stede i det tilfælde, at der ikke forekommer overløbshændelser fra fællesbassinerne, der er styret på i afløbssystemet. Derved viser den teoretiske reduktion samtidig den andel overløbsvolumen som ikke er mulig at reducere dvs. udløb fra separatsystemer eller rensningsanlægget samt overløb grundet for små ledninger i selve ledningssystemet.

Det konkluderes fra den lokale styring, at det blot ved implementering af to procestanke med et samlet volumen på 9000 m^3 vil forekomme en yderligere reduktion af total overløbsvolumen på 7,5% samt en reduktion af overløb til recipienten Storå på 50,9%. Det er forsøgt at implementere fire styringsstrategier, hvor det viser sig at en forbedret udnyttelse af et etableret rørbassin, Styring 1C, har størst effekt på reduktionen af det totale overløbsvolumen samt overløbsvolumen til Storå på hhv. 8,8% og 76,7%. Det er fra den globale styring konkluderet, at den største effekt er opnået ved en styringsstrategi ud fra bedst kvalificerede bud med et etableret rørbassin, Styring 2C, hvor der er opnået en reduktion på 18,6% i total overløbsvolumen og 99,9% til Storå til forskel for hhv. 8,8 og 76,7% ved den mest effektive lokale styring.

Vedrørende regn er det i den lokale styring valgt at undersøge, hvilken effekt styringen vil have på overløbsvolumen, hvis regninput er ved returperioder på en måned, et halvt år, et år og fem år. Effekten af styringen vil have størst indflydelse på returperioden på en måned. Figur 3.4 side 19 og appendiks J side 133 viser, at potentialet for at reducere overløbsvolumen er størst for mindre returperioder. Derfor vælges det at undersøge, hvilken effekt styringen i stedet har for mindre returperioder varierende fra 4 til 13 mm. Det er fundet fra appendiks I side 125, at den valgte styringsstrategi 2C selv er funktionel under stedlig variation af nedbør.

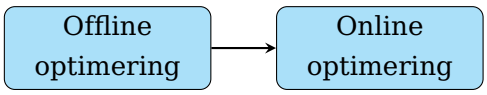
Del III

Algoritmebaseret styring

I del III er pumpernes drift i afløbssystemet med udgangspunkt i det nuværende system optimeret ved en algoritme. Algoritmen anvendes til at udvikle styringsprocedurer for pumpernes pumpeflow i afløbssystemet under regnvejr med henblik på at reducere overløbsvolumen til recipienter og pumpeomkostninger. Der er anvendt to overordnede metoder til at udvikle styringsprocedurer: Offline og Online optimering.

Med Offline-modellen forsøges det at fremstille en styringsstrategi ud fra tendenserne observeret under algoritmens optimering. Online-modellen er designet til at fungere i real-tid, hvor der udarbejdes versioner med og uden forecast.

Offline-modellen tager udgangspunkt i den detaljerede afløbsmodel, hvor Online-modellen bliver designet til en simplificeret afløbsmodel. Den simplificerede afløbsmodel er beskrevet og analyseret i appendiks B side 105. Modeller anvendt i Del III er vedhæftet i det elektroniske appendiks 155.



8. Offline optimering

I dette kaptitel optimeres konfigurationen af pumpeflowet i den detaljerede afløbsmodel via en algoritme med henblik på at reducere overløbsvolumen og driftsomkostninger for pumperne. Offline-modellen beregner effekten af forskellige konfigurationer af styringsregulatorerne for en hændelse og vælger den mest gavnlige konfiguration afhængigt af den simulerede overløbsvolumen og pumpeeffekt.

Det er valgt at anvende optimeringsalgoritmen NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) [Deb et al., 2002] til at optimere to styringsstrategier for afløbssystemet. NSGA-II er tidligere anvendt til flere scenarier som f.eks. optimering af et spildevands renseanlæg [Beraud et al., 2007], design af afløbssystem [Guo et al., 2007] og styring af afløbssystemer [Fu et al., 2008; Beraud et al., 2010]. Artiklen Beraud et al. [2010] har været inspirationen for denne optimering af pumperne i Ikast Afløbssystem, hvor der i artiklen er optimeret afløbssystemer i Berlin og Kolding ved brug af NSGA-II.

8.1 Opstillede strategier for optimering

Det er valgt at optimere i Ikast Afløbssystem med samme struktur og konfiguration, som det er i dag. Med optimeringsalgoritmen er det valgt at fokusere på følgende strategier:

1. Minimering af overløbsvolumen til recipienter og pumpeomkostninger.
2. Prioritering af reduktion af overløbsvolumen til Storå fremfor andre recipienter.

I begge strategier er pumpernes pumpeflow optimeret. Pumpeflowet er begrænset til intervallet, der kan aflæses i tabel 8.2 side 68.

8.1.1 Strategi 1

I strategi 1 søges der efter kompromis mellem overløbsvolumen til recipienterne og pumpernes driftsomkostninger under regnvejr. Driftsomkostningerne kan ikke endvidere beregnes direkte uden kendskab til omkostninger ved variable forhold under drift. Det er valgt at beregne pumpeeffekten som ækvivalens for driftsomkostninger, der er defineret ud fra formel (8.1) [Beraud et al., 2010].

$$\text{Pumpeeffekt} = \int_{t=1}^{n} Q(t) \cdot h(t) \cdot dt \tag{8.1}$$

Hvor:

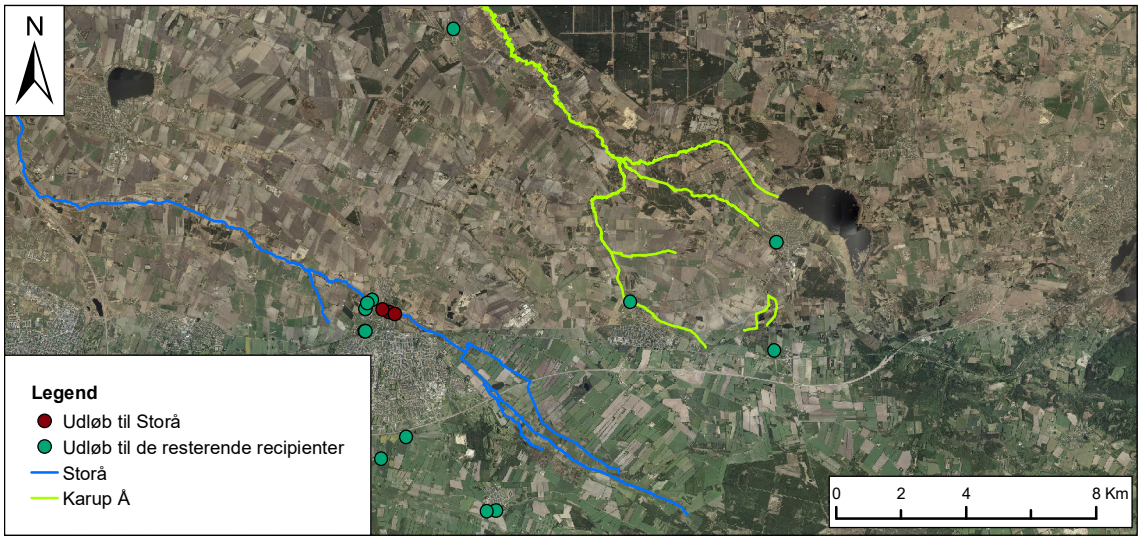
$Q(t)$	Pumpeflow som funktion af tiden $[m^3/s]$
$h(t)$	Pumpens løftehøjde som funktion af tiden $[m]$
dt	Tidskridt $[s]$
n	Sidste tidskridt i simuleringen
t	Tiden $[s]$

Formel (8.1) side 59 er konstrueret med forbehold for MOUSE-modellen, hvor de to varierende parametre i forhold til pumpernes drift er pumpeflow og løftehøjden. Pumpeflowet og løftehøjden er multipliceret for at udlede en formel for energioverførsel fra pumperne til vandet. Løftehøjden er beregnet ved forskellen i vandniveau ved pumpen og brønden, der pumpes til.

Pumpeeffekten som ækvivalens for driftsomkostninger som i kr/m^3 vand er et udmærket bud. Driftsomkostningerne vil være afhængig af de samme faktorer som beskrevet ved pumpeflow og løftehøjden i formel 8.1 side 59. Dertil kommer pumpernes effektivitet og el-forbrug, der ikke er inkluderet i denne model.

8.1.2 Strategi 2

Strategi 2 undersøger, om overløbsvolumen til Storå kan reduceres ved at lede mere overløbsvolumen et andet sted i systemet. Det er interessant at undersøge, om afløbssystemets struktur med styring tillader en højere prioritering af Storå, da det ikke er sikkert, at det samlede overløbsvolumen kan reduceres. Det er valgt at addere overløbsvolumen hos de udløb med Storå som modtagende recipient til en variabel, $V_{Storå}$, og den resterende overløbsvolumen til andre recipienter i systemet for V_{Rest}. Udløbene i de to kategorier er illustreret i figur 8.1.

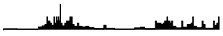
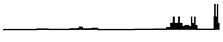


Figur 8.1. Udløb til Storå og de resterende recipienter.

8.1.3 Nedbør

Regninput til optimeringen er valgt som nedbør over 7 mm i år 2005, hvilket giver 19 hændelser. Nedbøren er sat til minimum 7 mm fordi, at den globale styringsstrategi viste, at potentialet for at reducere overløbsvolumen var i intervallet 7 til 13 mm. I tabel 8.1 er der præsenteret en oversigt med de udvalgte regnhændelser.

Herning Centralrenseanlæg stationsnr.: 5279

Nr.	Varighed [T]	Intensitet [μm/s]	Gns. [μm/s]	Maks. [μm/s]	Nedbør [mm]
1	11,50		0,376	1,110	15,8
2	12,40		0,273	1,110	12,4
3	6,72		0,388	1,670	9,6
4	2,65		0,854	23,300	8,4
5	4,23		0,483	1,670	7,6
6	9,23		0,420	3,330	14,2
7	3,95		0,588	3,330	8,6
8	1,58		2,470	16,700	14,4
9	5,03		0,528	5,000	9,8
10	3,28		1,060	3,330	12,8
11	1,80		7,160	33,300	47,0
12	1,98		1,610	6,670	11,8
13	5,97		0,566	3,330	12,4
14	5,55		0,409	6,670	8,4
15	6,10		0,945	3,330	21,0
16	6,08		0,638	3,330	14,2
17	4,67		0,783	3,330	13,4
18	6,78		0,319	1,670	8,0
19	7,58		0,658	3,330	18,2

Tabel 8.1. Regnhændelser med nedbør over 7 mm registreret på Herning Centralrenseanlæg i år 2005.

Nedbøren varierer fra ca. 8 til 47 mm, hvor der både findes nogle høj- og lavintensive regnhændelser med en maksimum intensitet mellem ca. 1 og 33 μm/s.

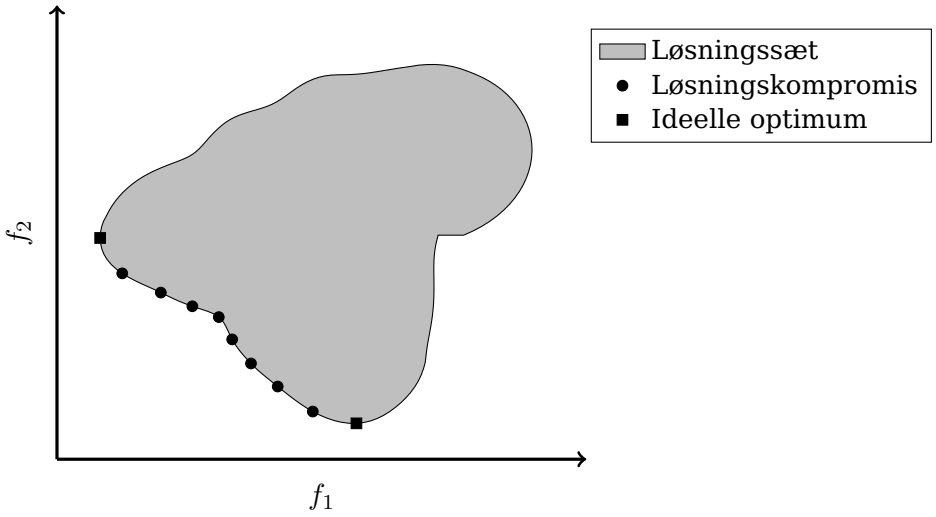
8.2 Metoder

Der anvendes en multiobjektiv genetisk algoritme (NSGA-II) til at lede efter løsninger for begge strategier. Algoritmen er udviklet til at løse multiobjektive problemer med en fremgangsmåde baseret på Darwins evolutionsteori. [Deb et al., 2002]

8.2.1 Multiobjektive problemstillinger

Minimering af overløbsvolumen til recipienter og driftsomkostninger for pumperne kan være modstridende objektiver. Det betyder, at en reduceret aflastning til recipienterne måske kræver en konfiguration af pumperne, der er dyrere i drift. Omvendt betyder det, at reducerede pumpeomkostninger kommer på bekostning af større overløbsvolumen til recipienterne. Samtidigt medfører en reduktion af overløbsvolumen

til Storå ikke nødvendigvis en reduktion af den totale overløbsvolumen til recipienterne. Denne afhængighed af objektiverne er illustreret på figur 8.2. På figur 8.2 beskriver kurven mellem de cirkulære og rektangulære punkter den såkaldte Pareto-front. Pareto-fronten er defineret som det bedste sæt af løsninger mellem objektiverne, hvor der ikke eksisterer løsninger med bedre værdier for begge objektiver. Det totale løsningssæt er markeret med det grå objekt, hvor de ideelle optima for to modstridende objektiver, f_1 og f_2, er markeret ved to rektangler, og løsningskompromis mellem objektiverne er markeret ved cirklerne.



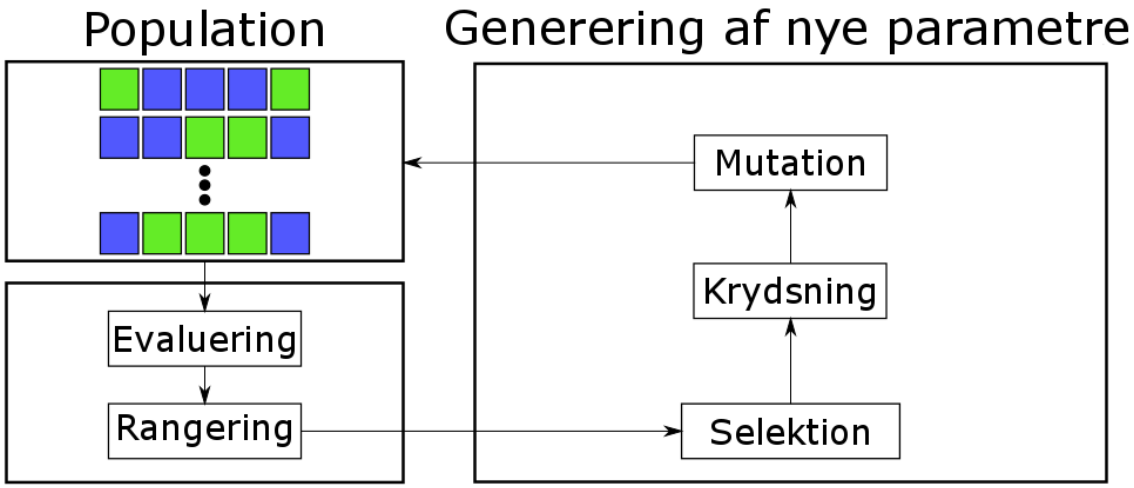
Figur 8.2. Illustrationen viser, hvordan det ene objektiv kan forbedres på bekostning af en forværring af det andet objektiv.

Pareto-fronten giver et overblik over de bedste løsninger i forhold til objektiverne, hvor der for hver løsning er en afvejning mellem objektiverne.

8.2.2 NSGA-II

Valget af en genetisk algoritme til optimeringen er baseret på succes med brug af samme algoritme i forbindelse med optimering af to afløbssystemer i Berlin og Kolding [Beraud et al., 2010]. En genetisk algoritme tager udgangspunkt i Darwins evolutionsteori, der beskriver, hvordan de bedste gener føres videre i et artssammenfund igennem generationer. Teorien beskriver, hvordan de bedste gener vælges (selektion), krydses og muteres til en ny population. NSGA-II benytter samme princip, hvor der genereres en population af inputparametre til en funktion (i dette tilfælde en hydraulisk afløbsmodel). Funktionen evaluerer løsningerne til inputparametrene og rangeres efter deres "fitness". Fitness beskriver, hvor godt inputparametrene eller løsningerne optimerer begge objektiver. Nye løsninger dannes ved at selektere de løsninger med bedst fitness, krydse dem og mutere

inputsparametrene til en ny population, der pånyt evalueres. Denne cyklus benævnes også som en generation, der er illustreret på figur 8.3.



Figur 8.3. Her er en simplificeret illustration af NSGA-II algoritmens process, hvor genereringen af en ny population er vist.

Cyklussen kan gentages alt efter, hvor mange generationer, der er påkrævet for at nå en udviklet Pareto-front. De enkelte processer i boksene på figur 8.3 pånær evaluering er forklaret i afsnittene herunder.

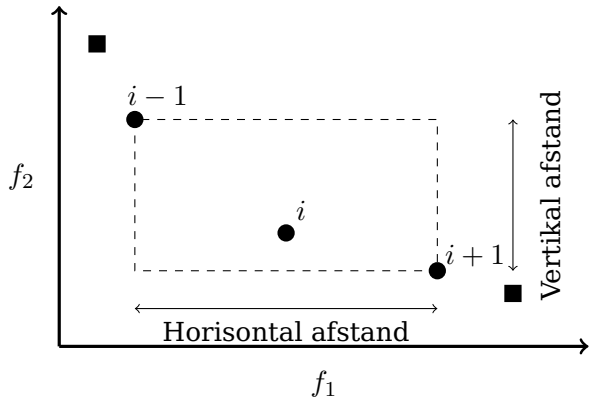
Rangering og selektion

Rangeringen foretages ved at sammenligne alle løsninger for begge objektiver og tildele dem en rang mellem 1 og ∞, hvor rang 1 er den bedste rang. Løsningerne med største rang er punkterne, der ligger på Pareto-fronten. For selektionen vælger algoritmen to tilfældige konfigurationer fra populationen, hvor den bedste løsning på baggrund af rang og densitet vælges.

Densiteten angiver hvor tæt løsningerne er grupperede, og da der er ønsket en stor spredning prioriteres en lav densitet højere end en høj densitet. Løsningerne sorteres for rang og densitet ved følgende eksempel for to løsninger i og j:

Hvis ($i_{rang} > j_{rang} \quad || \quad i_{rang} == j_{rang} \quad \&\& \quad i_{densitet} < j_{densitet}$)
  Løsning i vælges
Ellers
  Løsning j vælges

Algoritmen vælger den bedste løsning efter rang, og hvis rangen er ens, så vælges løsningen med den laveste densitet. Densiteten af løsningerne bestemmes ud fra den geometriske afstand til deres respektive nabopunkter. Den geometriske afstand er illustreret på figur 8.4 med en vertikal og horisontal afstand.



Figur 8.4. Geometrisk afstand mellem to afstande i løsningssættet. Rektanglerne repræsenterer de ydre ekstrema for objektiverne. Figuren er lavet med inspiration fra Deb et al. [2002].

Den vertikale linie beskriver afstanden mellem to løsninger for objektivet f_2 og den horisontale linie beskriver afstanden mellem to løsninger for objektivet f_1. Den vertikale og horisontale afstand midles og angiver densiteten for en løsning. Ekstrema markeret som rektangler på figur 8.4 tildeles en uendelig lav densitet.

Krydsning

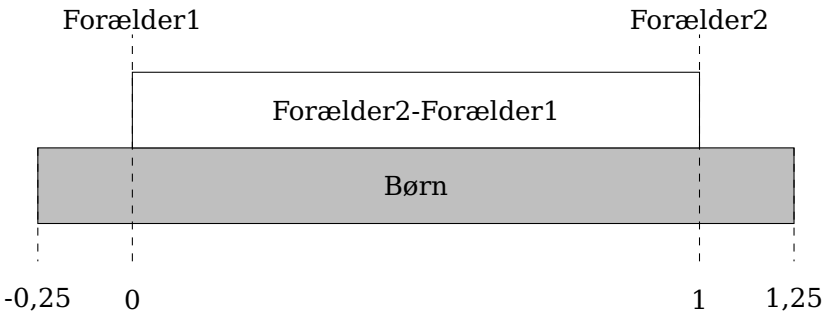
Krydsningen af pumpekonfigurationer er implementeret som angivet i formel (8.2) og (8.3). Der anvendes et fiktivt eksempel, hvor en initial population benævnt som Forælder 1 og 2 krydses til en ny population benævnt som Barn 1 og 2. Forældrene adderes med en normalfordelt tal, R, multipliceret med differensen mellem forældrene. Intervallet angiver hvor stort udfaldsrummet for børnene skal

være i forhold til forældrene. Vælges et interval for R på $[0;0]$, så nedarver børnene forældrene uden krydsning.

$$\text{Barn1} = \text{Forælder1} + R \cdot (\text{Forælder2-Forældre1}) \tag{8.2}$$

$$\text{Barn2} = \text{Forælder2} - R \cdot (\text{Forælder2-Forælder1}) \tag{8.3}$$

Formel (8.2) og (8.3) beskriver, hvordan algoritmen danner nye børn med værdier nær forældrene for at undersøge, om en kombination af forældrene giver bedre løsninger. I figur 8.5 er en illustration af, hvordan børnene kan nedarve værdier fra forældrene og derved udvide udfaldsrummet med en ratio, R, med et interval på $[-0{,}25; 1{,}25]$.



Figur 8.5. Krydsning af to forældre med et interval på $[-0{,}25; 1{,}25]$. Udfaldsrummet for børnene er udvidet med $\pm 25\%$ for forældrenes udfaldsrum. Figuren er lavet med inspiration fra [GEATbx, 2015].

Mutation

Mutationen sikrer, at algoritmen ikke falder i et lokalt optimum, og derfor har muligheden for at udvide søgerummet i håb om at finde et eventuelt globalt optimum. Mutationen er implementeret som inputsparametrene adderet med differensen mellem øvre og nedre interval for inputsparametrene, $L_P - U_P$, multipliceret med et tilfældigt normalfordelt tal, r, og en betinget skaleringsfaktor, S, som vist i formel (8.4). I NSGA-II er skaleringsfaktoren, d, implementeret som vist i formel (8.5). d kan konfigureres til at formindskes eftersom antallet af generationer stiger. Indsnævringen af løsningsintervallet tillader NSGA-II at søge med mindre intervaller efter optimum nær det løsningsområde med det formåede optimum. Nedskaleringsfaktoren, D_{Scale}, kan sættes til 0, hvis der ønskes en konstant skaleringsfaktor.

$$P_{Muteret} = P + S \cdot r \cdot (L_P - U_P) \tag{8.4}$$

$$S = d - D_{Scale} \cdot \frac{i}{n} \tag{8.5}$$

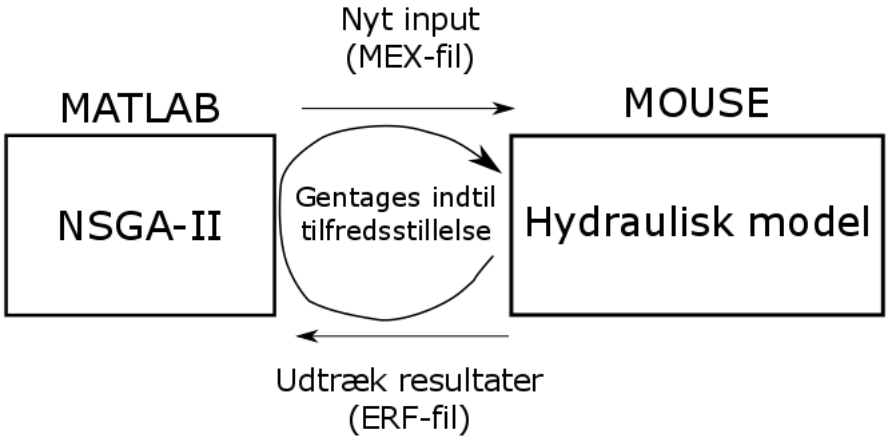
Hvor:

$P_{Muteret}$	Muteret inputsparametre $[-]$
P	Initiale inputsparametre eller fra tidligere generation $[-]$
L_P	Nedre interval af inputsparametre $[-]$, se tabel 8.2 side 68
U_P	Øvre interval af inputsparametre $[-]$, se tabel 8.2 side 68
d	$[-]$
D_{Scale}	Nedskaleringsfaktor $[-]$
i	Generationen, i $[-]$
n	Totalt antal af generationer ønsket simuleret $[-]$

Det kan observeres i formel 8.5 side 66, at eftersom flere generationer er kørt igennem for algoritmen stiger nedskaleringsfaktoren, D_{Scale}, influens på S, og derved indsnævrer søgeintervallet.

8.2.3 Valg af kode og sammenkobling af modeller

Det er valgt at bruge en tilgængelig version af NSGA-II skrevet i kodesproget og matematikprogrammet MATLAB [MathWorks Inc, 2015b]. For dokumentation af koden henvises der til Deb et al. [2002], der er frit tilgængelig som C-kode Deb [2015] og som MATLAB-kode MathWorks Inc [2015a]. Det er valgt at anvende af MATLAB-versionen af koden, hvor valget falder på sammenkoblingen med afløbsmodellen. Tidligere i projektet er der udviklet kode til at konfigurere afløbsmodellen med MATLAB. Til evaluering af afløbsmodellen anvendes MOUSE-motoren anvendt i Del I beskrevet i kapitel 1 side 3. Sammenkoblingen mellem de to modeller foregår ved at redigere inputfilen til MOUSE-motoren (MEX-filen), og derefter startes MOUSE-motoren med den redigerede inputfil. Herefter udtrækkes resultaterne fra LTS (Long Term Statistics) resultatfilen (ERF-filen), hvor de så sendes tilbage til algoritmen. Denne proces er illustreret på figur 8.6.



Figur 8.6. Sammenkoblingen mellem MATLAB og MOUSE-motoren.

8.3 Inputparametre til algoritmen

Inputsparametrene til optimeringsalgoritmen kan aflæses i tabel 8.2.

Parameter	**Interval**	**Enhed**	**Kilde**
Pumpeflow, Q	0,05-0,5	m^3/s	MOUSE-model fra Jensen [2015]
Populationstørrelse, n_{Pop}	50	-	Analyse i appendiks L side 143
Maks. antal generationer, n	15	-	Analyse i appendiks L side 143
Krydsningsinterval, R	-0,25-1,25	-	[GEATbx, 2015]
Skaleringsfaktor, d	0,5	-	Analyse i appendiks L side 143
Nedskaleringsfaktor, D_{Scale}	0	-	Analyse i appendiks L side 143
Tidskridt, dt	1	s	-

Tabel 8.2. Inputsparametrene valgt til optimeringsalgoritmen. Pumpeflowet angivet er for alle 19 pumper i afløbssystemet.

Pumpeflow er udtaget fra afløbsmodellen leveret af Jensen [2015], hvor intervallet er valgt ud fra det største og mindste pumpeflow fundet i modellen. Intervallet er valgt ens for alle pumper i mangel på information om pumperne. Populationsstørrelsen, maksimale antal af generationer, skaleringsfaktor og nedskaleringsfaktor er valgt ud fra en parameterbestemmelse i appendiks L side 143. Populationsstørrelsen viser sig at være den begrænsende faktor for antallet af punkter på Pareto-fronten, hvor valget af størrelsen falder ud fra et skøn og en begrænset tidshorisont.

Antallet af generationer er valgt ud fra den observation, at Pareto-fronten stabiliserer sig generelt ved to til tre generationer før i parameterbestemmelsen. Skaleringsog nedskaleringsfaktorerne viser sig at være dominerende for spredningen af løsningerne fundet af algoritmen. Det viste sig i parameterbestemmelsen, at det var svært at finde et optimum med mange løsninger ved en lav skaleringsfaktor og tilsvarende høj nedskaleringsfaktor. Derfor er nedskaleringsfaktoren effektivt blev sat ude af spil ved at sætte denne til 0.

Krydningsinterval er sat efter anbefaling fra GEATbx [2015], hvor der anbefales et interval på -0,25-1,25.

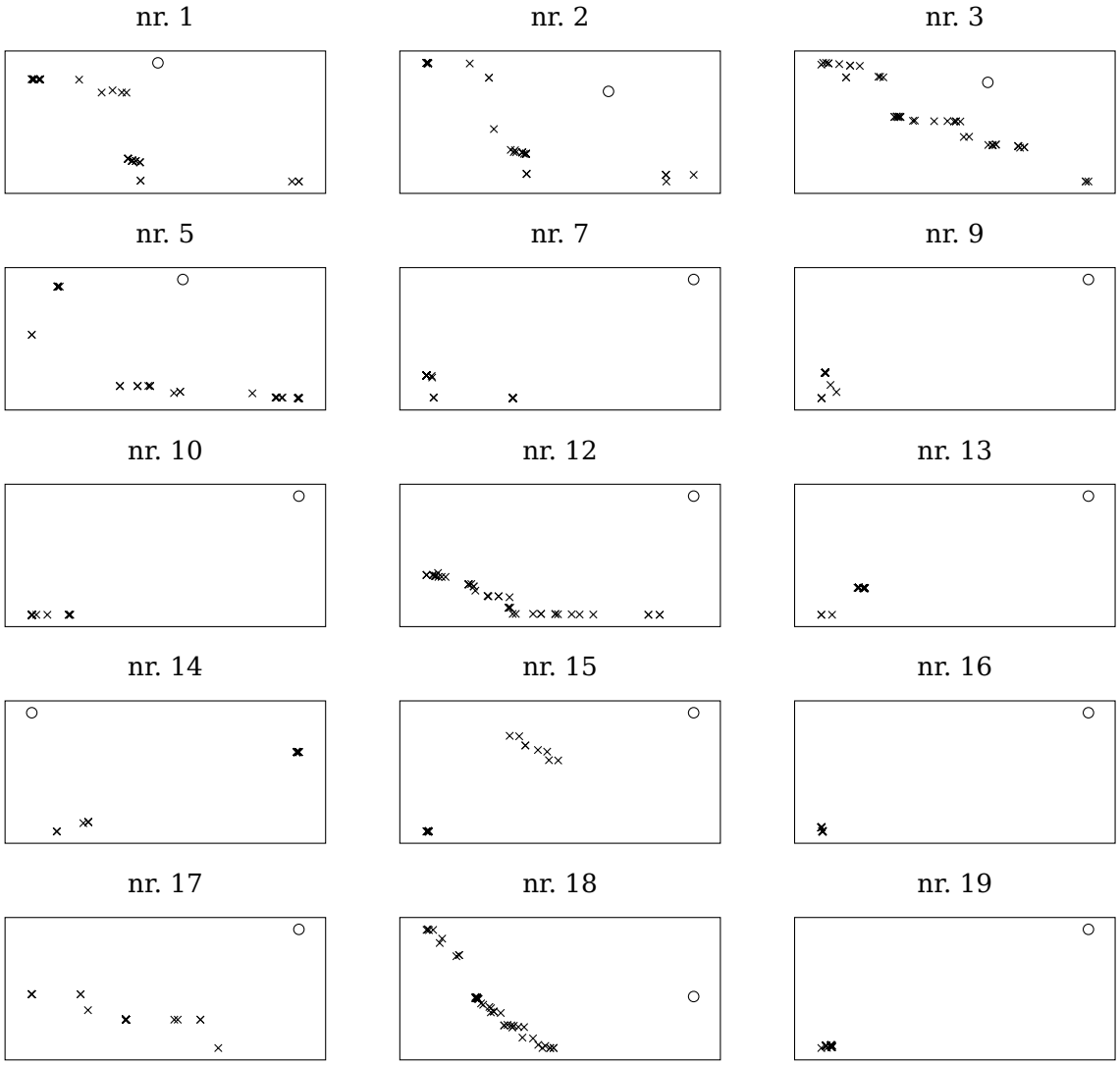
Tidskridtet er for afløbsmodellen sat til 1 sekund, hvilket sikrer, at reduceringerne kan sammenlignes med modellerne udarbejdet i Del II.

8.4 Resultater

I dette afsnit præsenteres resultaterne for Offline-modellen for strategi 1 og 2.

8.4.1 Strategi 1: Minimering af overløbsvolumen og pumpeomkostninger

Algoritmen har været i stand til at optimere 15 ud af 19 hændelser, hvor hændelse nr. 4, 6, 8 og 11 ikke kunne optimeres. De ikke optimerede hændelser resulterede i oversvømmelse ved samtlige undersøgte kombinationer. Nedbøren for de ikke simulerede hændelser er mellem 8 og op til 47 millimeter, hvorfor oversvømmelsen sandsynligvis skyldes den høje maksimale intensitet, der kan aflæses for hændelse nr. 4, 8 og 11 i tabel 8.1 side 62. Det kan dog ikke forklare hændelse nr. 6, hvor hverken maksimum eller middelintensiteten er højere end gennemsnittet, hvorfor det må skyldes variation i intensiteten. Figur 8.7 side 70 viser, at overløbsvolumen kan reduceres i 15 hændelser, og pumpeeffekten kan reduceres i 14 hændelser.



Figur 8.7. Optimeret reduktion af overløbsvolumen er vist på den vertikale akse og pumpeeffekt på den horisontale akse er vist med kryds. Referencepunktet viser den nuværende tilstand i afløbssystemet symboliseret med en cirkel. For hændelse nr. 9, 10, 16 og 19 er det svært at observere Pareto-fronten, da løsningerne er langt fra referencepunktet.

Optimeringsalgoritmen tilnærmer sig Pareto-fronten efter ca. 10 generationer for alle undtagen nr. 13 og 14. Overløbsvolumen er tæt på omvendt proportional med pumpeeffekten for 13 af hændelserne med undtagelse af nr. 13 og 14. Figur 8.7 viser, at der findes adskillige konfigurationer af pumperne, der kan resultere i reduktioner af både overløbsvolumen og pumpeeffekten. De maksimale reduktioner på hhv. overløbsvolumen og pumpeeffekt kan aflæses i tabel 8.3 side 71 for alle regnhændelserne.

Nr. [-]	**Nedbør** [mm]	**Ændring i overløbsvolumen** [%] / [m^3]	**Ændring i pumpeeffekt** [%] / [-]
1	15,8	-16,5/ -1711,0	-13,0/ -56,9
2	12,4	-12,2/ -1188,0	-19,0/ -89,3
3	9,6	-10,7/ -904,7	-10,0/ -41,0
4	8,4	-/ -	-/ -
5	7,6	-50,5/ -513,2	-5,0/ -1,5
6	14,2	-/ -	-/ -
7	8,6	-13,7/ -32,4	-11,0/ -3,0
8	14,4	-/ -	-/ -
9	9,8	-42,3/ -232,6	-91,0/ -43,8
10	12,8	-39,7/ -255,9	-17,0/ -12,7
11	47,0	-/ -	-/ -
12	11,8	-9,4/ -96,0	-61,0/ -2,8
13	12,4	-36,8/ -282,8	-46,0/ -6,0
14	8,4	-47,0/ -2405,0	3,9/ 5,2
15	21,0	-74,6/ -1828,0	-49,0/ -79,3
16	14,2	-20,2/ -40,7	-77,0/ -23,5
17	13,4	-1,3/ -7,4	-1,2/ -0,6
18	8,0	-9,4/ -330,3	-29,0/ -72,0
19	18,2	-29,7/ -122,6	-27,0/ -12,8
Gns.	-	-27,6/ -663,4	-30,0/ -29,3
Sum	-	-22,1/ -9951,0	-20,1/ -440,0

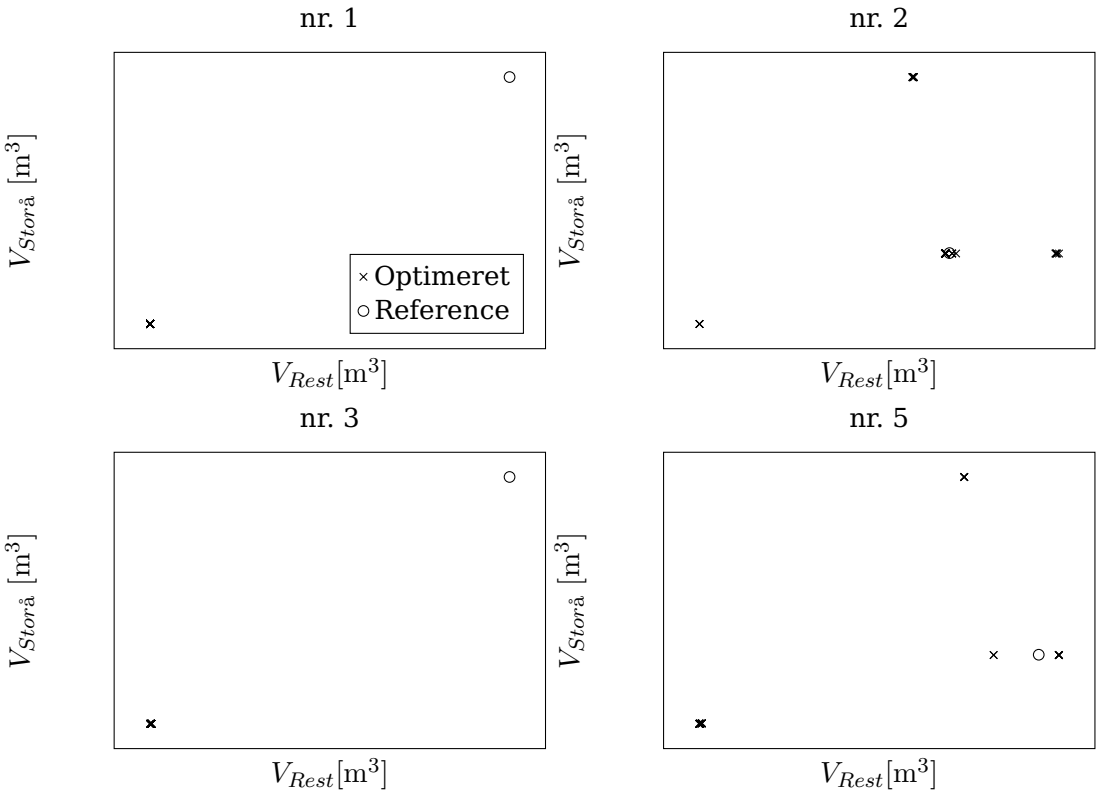
Tabel 8.3. Største reduktion for overløbsvolumen og pumpeeffekt fundet med optimeringsalgoritmen relativt til det nuværende udgangspunkt vist i figur 8.7 side 70. Negative tal angiver en reduktion og positive tal en forøgelse.

Af tabel 8.3 kan det aflæses, at reduktionerne for overløbsvolumen varierer mellem ca. 1 og 75%. Pumpeeffekten reduceres med samme variation som overløbsvolumen, hvor det derfor viser, at begge parametre kan optimeres samtidigt. Den store forskel mellem største og mindste reduktion skal findes ved, at der er stor forskel i regnhændelsernes intensitet og dynamik. Ligeledes skal det også bemærkes, at en reduktion på et vis antal procent ikke medfører den samme reduktion i overløbsvolumen for hver regnhændelse.

8.4.2 Strategi 2: Minimering af overløbsvolumen til Storå

Figur 8.8 side 72 viser, at der findes løsninger med en reduktion af overløbsvolumen til Storå og de resterende recipienter for alle regnhændelserne. Ingen af løsningerne giver større reduktioner til Storå end dem fundet i strategi 1. Algoritmen har ikke været i stand til at danne en Pareto-front i nogle af regnhændelserne, men regn nr.

2 og 5 viser de bedst tilnærmede Pareto-fronter. Antallet af og spredningen mellem løsninger er også markant mindre end i strategi 1.



Figur 8.8. Optimeret reduktion af overløbsvolumen til Storå og de resterende recipienter. Det er kun valgt at illustrere et udvalg af de optimerede hændelser, hvor de resterende grafisk er tilnærmelses identiske med nr. 1 og 3. Referencepunktet viser det nuværende overløbsvolumen til recipienterne.

Reduktionerne for det totale overløbsvolumen til recipienterne er marginalt større end reduktionerne fundet for strategi 1 i tabel 8.3 side 71. Figur 8.8 viser, at der måske eksisterer et global optimum, der ikke er fundet i strategi 1. Der er ikke inkluderet en tabel med reduktioner af overløbsvolumen og pumpeeffekt, da Pareto-fronten ikke er tilnærmet og reduktionerne ikke er markant anderledes end fundet i strategi 1.

8.5 Sammenfatning

Optimeringsalgoritmen er i stand til at finde spredte optimerede løsninger i strategi 1, hvor der er beregnet signifikante reduktioner af overløbsvolumen og pumpeeffekten. I strategi 2 fandt algoritmen lignende reduktioner af overløbsvolumen, men spredningen og antallet af løsningerne var lille. Algoritmen fandt ikke et kompromis mellem overløbsvolumen til Storå og de resterende recipienter. Dette skyldes,

at afløbssystemet ikke er struktureret således, at der er mulighed for at lede overløbsvolumen hen mod andre recipienter fremfor Storå.

Valget af ens pumpeflow på alle pumperne er ikke realistisk, da det varierer for pumperne samt er afhængigt af pumpeledningerne. Pumpeledningerne er ofte de begrænsende faktorer for pumpeflowet. Implementeringen af de fundne løsninger vil kræve en ændring af pumpeledningerne i Ikast Afløbssystem, hvis de dertilhørende pumpeflows ikke er inden for den margin, som afløbssystemet tillader.

Populationsstørrelsens betydning er vægtet højest for antallet af løsninger på Pareto-fronten, men da der er rigeligt med løsninger vurderes det ikke nødvendigt at forøge størrelsen. Valget af et konstant antal af generationer i denne model er ikke nødvendigt, og der vil kunne spares simuleringstid ved at vælge en stop-funktion, hvor der tages højde for f.eks. forandringer i løsningerne.

Resultaterne viser, at valget af en stor spredning på løsningerne er opnået med stor skaleringsfaktor og en nedskaleringsfaktor lig med 0. Dette giver ikke anledning til at indsnævre intervallet, der søges over. En ændring af de to faktorer kan dog vise sig at være fordelagtigt, hvis man på forhånd har viden om, hvor det globale optimum befinder sig.

Algoritmen kan ikke sortere dårlige løsninger fra ved f.eks. opstuvning til terræn, hvor modellen tilgiver løsninger en god rang blot de medfører reduktioner i objektiverne. Algoritmen lærer af de enkelte generationer, men da der ingen begrænsninger er i informationen, så kan algoritmen prioritere nogle dårlige konfigurationer. Algoritmen finder f.eks. ud af, at det bedst kan betale sig at magasinere vandet på terræn i stedet for at lede det til renseanlægget. Det er derfor nødvendigt at undersøge løsningerne fundet af algoritmen med afløbsmodellen for at afgøre, om algoritmen har tilegnet sig den rigtige information om konfigurationerne.

Det er forsøgt at analysere de optimerede pumpekonfigurationer med henblik på at undersøge, om algoritmen danner nogen form for meningsfulde styringsstrategier. Pumpekonfigurationer for hændelserne var dog alle vidt forskellige, og det var ikke muligt at udlede en generel konfiguration. Dette viser, at den individuelle variation af nedbør har stor betydning for udfaldet af modellen.

Det er i næste kapitel forsøgt at tage forbehold for den tidslige variationen af nedbør ved at opbygge en Online-model. Algoritmen skal optimere afløbsmodellen i intervaller for at undersøge, om der kan findes bedre løsninger, hvis pumpeflow kan variere hen over regnhændelsen. Samtidigt undersøges en metode til at sortere løsninger med oversvømmelser fra.

9. Online optimering

Online-modellen beregner effekten ved forskellige konfigurationer af pumpernes pumpeflow for en given opdateringsfrekvens og bestemmer den mest gavnlige konfiguration afhængigt af overløbsvolumen. Opdateringsfrekvensen beskriver, hvor hyppigt Online-modellen opdateres i optimeringsprocessen. Modellen sættes op for den simplificerede afløbsmodel, der er præsenteret i appendiks B side 105. Modellen anvender optimeringsalgoritmen NSGA-II, der er præsenteret i kapitel 8 side 59, og er som udgangspunkt identisk med nogle nye ændringer, som præsenteres i metodeafsnittet i afsnit 9.3 side 76.

Det er valgt at opstille to modeller med og uden forecast af regn for at undersøge, om afløbssystemet kan optimeres uden kendskab til regnens fremtidige varighed eller intensitet. Regninput anvendt til forecast af intensitet og varighed er målt på SVK's regnmåler ved Herning Centralrenseanlæg med stationsnummer 5279.

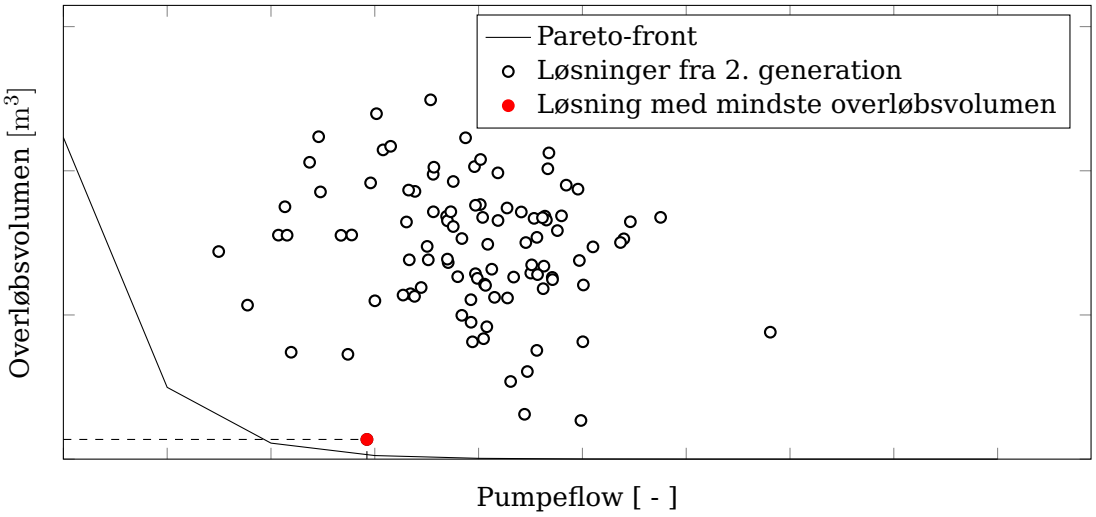
9.1 Strategi til Online-model

For Online-modellen optimeres Ikast Afløbssystem med samme struktur og konfiguration, som der er i dag. Følgende strategi er anvendt til denne optimering:

- Minimering af overløbsvolumen udledt i recipienterne.

Modsat Offline-modellen i kapitel 8 side 59 er optimering af pumpeomkostninger fravalgt. Fravalget foretages, da Online-modellen kræver flere og hurtigere simuleringer, hvor tilnærmelsen af Pareto-fronten er undladt til fordel for at reducere beregningstiden.

Valget af at undlade tilnærmelsen af Pareto-fronten er besluttet efter granskning af algoritmens evne til at reducere overløbsvolumen efter et lavere antal generationer end brugt i Offline-modellen i kapitel 8 side 59. Som illustreret i figur 9.1 side 76 er forskellen mellem et optimum på Pareto-fronten og de bedste punkter i løsningsskyen relativt lav efter blot 2 til 5 generationer.



Figur 9.1. Illustration af det typiske strategi for en hændelse, hvor forskellen mellem en fuldt udviklet Pareto-front og en population efter 2 generationer.

Konsekvensen af at afvige fra Pareto-fronten er nærmere undersøgt i appendiks M side 149. Analysen viser, at algoritmen finder enkelte løsninger nær optimum efter 5 generationer. Det vurderes derfor, at løsninger fundet ved 5 generationer ikke begrænser algoritmens evne til at reducere overløbsvolumen.

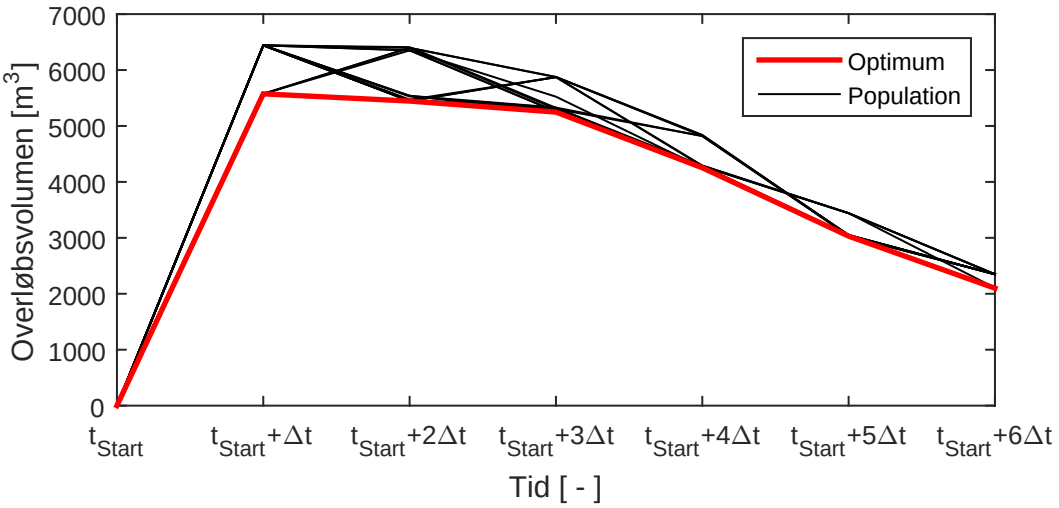
Forecast er implementeret i modellen med en variabel forecast periode. Forecastperioden vil strække sig fra det nuværende tidskridt til resten af hændelsens forløb. Brugen af målt nedbør som forecast er et tænkt scenarie, da fremskrivning af regnintensitet og varighed stadigt er meget usikkert.

9.2 Nedbør

Regninput til optimeringen er valgt som nedbør over 7 mm i år 2005, hvilket giver 19 hændelser. En kort beskrivelse af hændelserne kan aflæses i tabel 8.1 side 62.

9.3 Metoder

Optimeringsalgoritmen anvender samme metode, som beskrevet i afsnit 8.2.2 side 63. Dog optimeres regnhændelsen nu i intervaller. Tidsintervallerne er defineret som fra regnhændelsens start til slut med forøgelse af starttiden med Δt per optimering. Det vil sige, at tidsintervallet følger mønstret illustreret i figur 9.2 side 77. Figur 9.2 side 77 viser resultatet af, hvordan algoritmen har optimeret konfigurationen af pumpeflow med en population på 16 og 15 generationer for en regnhændelse. Algoritmen evaluerer de enkelte løsninger, og udvælger optimum ud fra den simulerede overløbsvolumen.



Figur 9.2. Her er resultatet af optmeringsalgoritmen vist.

Forudsætningen af at kende hele hændelsens forløb til t_{Slut} ligger i nødvendigheden af, at den hydrauliske model skal have tømt opmagasineringen af vand i afløbssystemet inden, at simuleringen kan stoppes. Hvis simuleringen stoppes tidligere, så vil algoritmen prioritere konfigurationer, hvor alle pumper styres til at holde vandet tilbage i systemet så lang tid som muligt. Når der så falder nedbør igen med opmagasineringskapaciteten opbrugt, ledes der uhensigtsmæssigt meget vand til recipienterne.

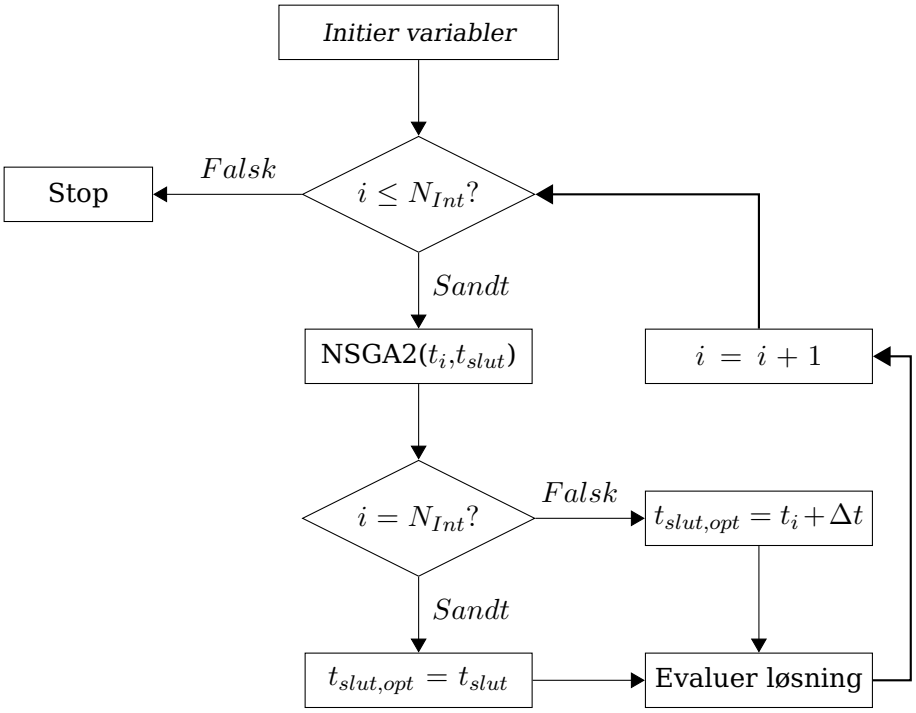
Det har ikke været muligt at udlede overløbsvolumen direkte fra MOUSE-motoren med brug af det tilhørende LTS-modul (Long Term Statistics). LTS-modulet kan ikke anvendes til Online-modellen. Regnhændelserne optimeres i intervaller af Δt, hvorfor der kræves en inputfil med information om vandniveau i afløbssystemet til hver optimering. MOUSE-motoren har en funktion til at køre med hotstart-filer under LTS-modulet, men det har ikke kunne lade sig gøre at få denne funktion i brug. I stedet er det valgt at beregne overløbsvolumen ved at integrere vandføringen, Q, med hensyn til tiden, t, i ledningen direkte opstrøms udløbet, hvilket er beregnet ved formel (9.1).

$$V = \int_i^n Q\, dt \tag{9.1}$$

Volumen beregnet ved formel (9.1) er betinget af den tidslige diskretisering for beregning af vandføring. Den hydrauliske model beregner vandføring i rørledninger med tidskridt Δt. Af hensyn til oplagringsplads er filstørrelsen på resultatfilen kraftigt reduceret ved kun at gemme resultater for vandføring og vandniveau i rørledninger med større intervaller (ofte benævnt som "save interval" i modelsammenhæng). Det er valgt at undersøge den beregnede volumens afhængighed af save interval ved

at beregne volumen med et save interval på hhv. 5 min., 1 min. og 10 sekunder. Resultaterne er sammenlignet med statistikken fra LTS-modulet i en analyse i Appendiks N side 153. Analysen viste sig, at et save interval på 5 minutter ikke giver markante fejl på overløbsvolumen.

Der er fremstillet to fremgangsmetoder til optimeringsprocessen med og uden forecast, der er illustreret som et flowchart i figur 9.3.



Figur 9.3. Flowchart med Online-modellen med og uden forecast. Processen i modellen følger pilenes retning.

Ved start af modellen initieres variablerne. Efterfølgende undersøges en betingelse, hvor det undersøges om den nuværende iteration af modellen er mindre eller lig med N_{Int}. Variablen N_{Int} angiver hvor mange gange regnhændelsen kan opdateres over dens forløb og er beregnet ved at runde resultatet af ved at dividere hændelsens varighed med opdateringsfrekvensen op til nærmeste heltal.

Hvis i er større end N_{Int} stoppes modellen (Falsk), og hvis i er mindre eller lig med N_{Int} fortsætter modellen med NSGA-II (Sandt). NSGA-II er algoritmen, der finder optimum for det nuværende tidsinterval indtil slutningen af hændelsen. Herefter tages der højde for, at ved $i = N_{Int}$ skal sluttiden sættes til t_{slut}. Herefter evalueres løsningen og i forøges med 1.

9.3.1 Ekskludering af oversvømmelser

Under kapitel 8 side 59 var det konkluderet, at NSGA-II fandt løsninger, der inkluderede oversvømmelser. For at imødegå dette problem er der udarbejdet en ændring af den hydrauliske MOUSE-motorens systemfiler. MOUSE-motoren er som standard konfigureret til at stoppe en simulering, hvis vandniveauet i en brønd overstiger 10 m over terræn. Denne funktion er indsat for at sikre, at modellen er stabil under kørsel, hvorfor store tidskridt ofte resulterer i, at vandniveauet i brønde hurtigt stiger til urealistiske værdier.

Det er valgt at bruge denne funktion til at definere oversvømmelse ved, at konfigurere systemfilen dhiapp.ini, hvor en variabel "FLOODLIMIT" ændres til fra 10 til 0,1 m. Dette betyder, at MOUSE-motoren vil stoppe en simulering, hvis vandniveauet i en brønd stiger til 0,1 m over terræn. Højden på 0,1 m er valgt på baggrund af en skønsmæssig bedømmelse af, hvornår oversvømmelse forekommer. Kriteriet er lavere end standardkonfigurationen på 10 m, så det giver ikke anledning til ustabilitet.

Denne ændring af systemfilen kræver dog, at modellen er stabil ved den tidslige diskretisering, der anvendes. Ustabile modeller vil resultere i, at MOUSE-motoren vil stoppe størstedelen af alle simuleringer, hvorfor denne metode ikke er anvendelig ved en ustabil model. I et mere virkelighedsnært scenarie bør dette kriterie sættes efter, hvor meget vandniveauet kan stige over terræn uden, at der forekommer signifikante omkostninger ved oversvømmelse af kældre o.l.

9.4 Inputparametre

For standardparametre til den hydrauliske model og NSGA-II henvises der til tabel 8.2 side 68. I tabel 9.1 er der angivet hvilke parametre, der er ændret ift. tabel 8.2 side 68 og nye introducerede parametre for Online-modellen.

Parameter	**Interval**	**Enhed**	**Kilde**
Opdateringsfrekvens, Δt	60	min	Analyse i appendiks M side 149
Maks. antal generationer, n	5	-	Analyse i appendiks M side 149
Tidskridt, dt	10	s	-

Tabel 9.1. Inputsparametrene valgt til Online-modellen.

Den simulerede reduktion i overløbsvolumen i Appendiks M side 149 på figur M.1 side 150 viser en tilnærmelsesvis eksponentiel stigning som funktion af en stigende opdateringsfrekvens. Denne situation betyder, at der kan udnyttes en lidt lavere opdateringsfrekvens uden, at der forekommer et stort fald i algoritmens evne til at reducere overløbsvolumen. I princippet bør opdateringsfrekvensen sættes til at være lig med den tidslige diskretisering på regninputtet. Dette vil dog resultere i

beregningstider ud over dette projekts tidsramme, hvormed en opdateringsfrekvens på 60 minutter vælges. Det kan dog af figur M.1 side 150 aflæses, at der opgives en stor portion af algoritmens evne til at reducere overløbsvolumen ved at vælge en opdateringsfrekvens på 60 minutter.

Antallet af generationer er reduceret, da det i afsnit M.2 side 150 er vurderet, at antallet af simuleringer kan reduceres kraftigt uden, at NSGA-II mister evnen til at finde løsninger nær optimum. Spredningen i overløbsvolumen faldt i kræft med antallet af generationer forøges, men der er observeret i figur M.2 side 151, at faldet i variabiliteten aftog eftersom antallet af generationer når over 5.

Tidskridtet er valgt højere i Online-modellen, da stabiliteten af den simplificerede model er bedre og en lav simuleringstid er vægtet højere i Online-modellen. Den øgede stabilitet skyldes reduktionen af antal brønde og rør, hvorved afstanden til brønde forøges og den numeriske fejl formindskes tilsvarende. Det betyder dog, at der kan forekomme afvigelser mellem den beregnede overløbsvolumen fundet ved modellen i kapitel 8 side 59 og Online-modellen. Med hensyn til den simplificerede model, er afvigelsen fra den detaljerede model belyst i kapitel B side 105.

9.5 Resultater

I dette afsnit præsenteres resultaterne for Online-modellen med og uden forecast.

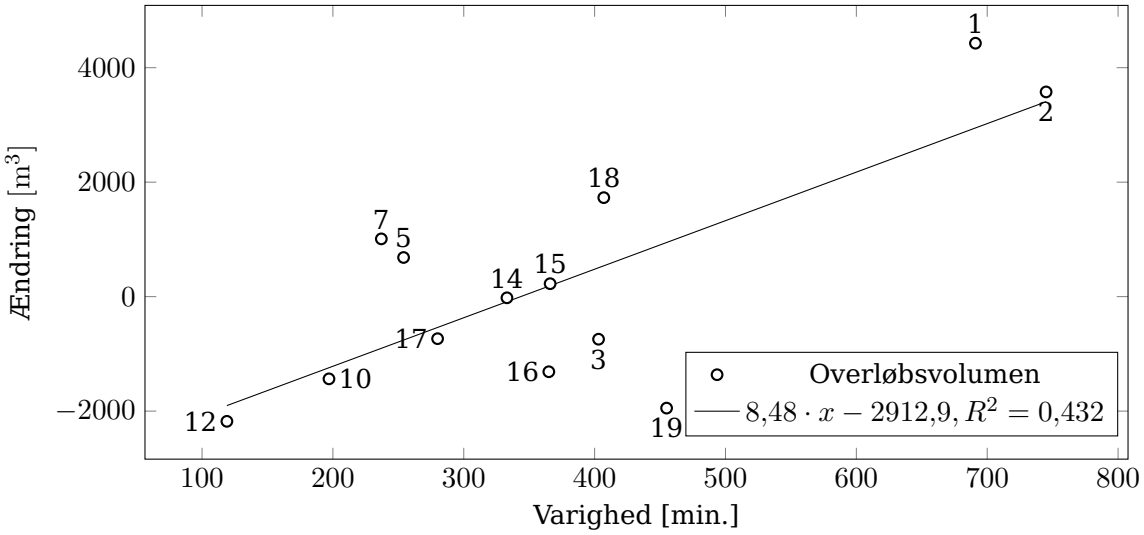
9.5.1 Uden forecast

I tabel 9.2 side 81 kan resultaterne for Online-modellen uden forecast aflæses. Online-modellen har været i stand til at simulere 13 ud af 19 hændelser. Der findes ikke en sammenhæng mellem de ekstra hændelser, der ikke kunne simuleres, og regndata. Overløbsvolumen er reduceret for enkelthændelser mellem 1 og 54% med 6 hændelser med forøget overløbsvolumen mellem 1,8 og 49%.

Nr.	Varighed [T]	Nedbør [mm]	Reference [m^3]	Optimeret [m^3]	Ændring [m^3]	Ændring [%]
1	11,52	15,8	11370,0	15798,0	4400,0	39,0
2	12,42	12,4	8759,7	12336,0	3600,0	41,0
3	6,72	9,6	5976,3	5232,2	-740,0	-12,0
4	2,65	8,4	-	-	-	-
5	4,23	7,6	2016,8	2700,6	680,0	34,0
6	9,23	14,2	-	-	-	-
7	3,95	8,6	3186,8	4195,8	1000,0	32,0
8	1,58	14,4	-	-	-	-
9	5,03	9,8	-	-	-	-
10	3,28	12,8	5244,7	3808,1	-1400,0	-27,0
11	1,80	47,0	-	-	-	-
12	1,98	11,8	4017,4	1838,7	-2200,0	-54,0
13	5,97	12,4	-	-	-	-
14	5,55	8,4	2119,3	2098,8	-21,0	-1,0
15	6,10	21,0	12449,0	12675,0	230,0	1,8
16	6,08	14,2	8651,5	7339,4	-1300,0	-15,0
17	4,67	13,4	6887,8	6153,1	-730,0	-11,0
18	6,78	8,0	3517,6	5247,0	1700,0	49,0
19	7,58	18,2	12813,0	10866,0	-1900,0	-15,0
	Gns.	-	6700,0	6900,0	250,0	4,6
	Sum	-	87011,0	90289,0	3278,0	3,8

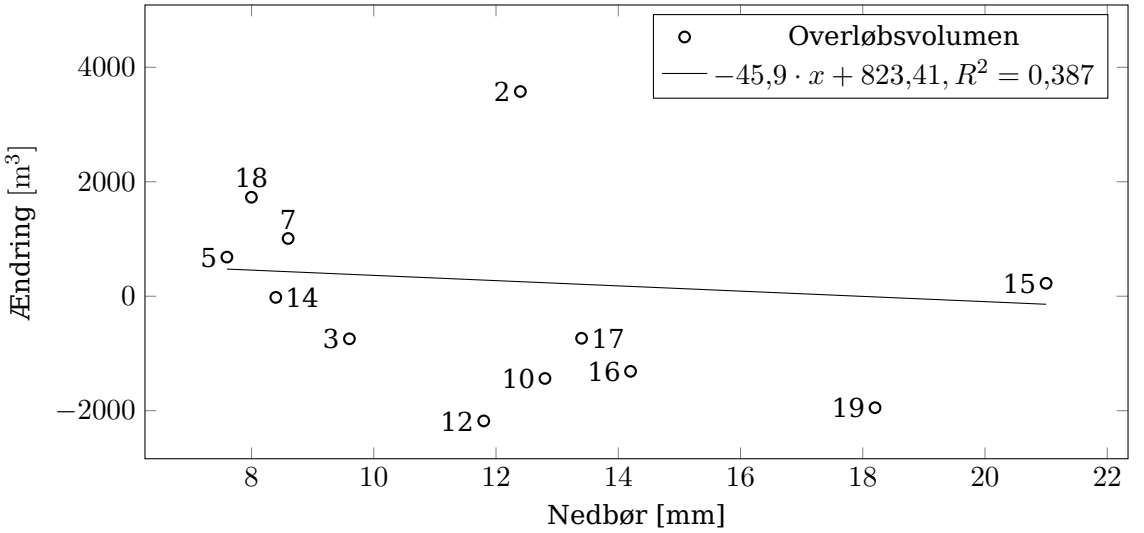
Tabel 9.2. Optimering af 19 regnhændelser i 2005. Negative tal angiver en reduktion af overløbsvolumen, hvor positive tal angiver en forøgelse.

For den gennemsnitlige hændelse forøges overløbsvolumen med ca. 5% og totalt for alle hændelser er overløbsvolumen forøget med ca. 4%. Sammenhængen mellem reduktionen af overløbsvolumen og varighed er illustreret i figur 9.4 side 82.



Figur 9.4. Reduktionen af overløbsvolumen som funktion af varigheden på regnhændelserne. Hændelsens nummer er givet ud for hvert punkt.

Af figur 9.4 observeres en stigende tendens i reduktionen af overløbsvolumen ved større varigheder. Forholdet mellem millimeter nedbør og reduktionen er illustreret på figur 9.5.



Figur 9.5. Reduktionen af overløbsvolumen som funktion af nedbøren på regnhændelserne. Hændelsens nummer er givet ud for hvert punkt.

Data på figur 9.5 indikerer, at der ikke er en direkte tendens mellem nedbøren og den opnåede reduktion. Manglen på en general tendens indikerer, at Online-modellen ikke kan etablere en sammenhæng mellem konfigurationerne af pumperne og deres effekt på overløbsvolumet.

9.5.2 Med forecast

Af tabel 9.3 kan resultaterne fra optimeringen sammenlignet med referencetilstanden aflæses. 4 ud af 19 hændelser kunne ikke simuleres med algoritmen. De 4 hændelser, nr. 4, 6, 8 og 11, resulterede i oversvømmelse ved samtlige undersøgte kombinationer.

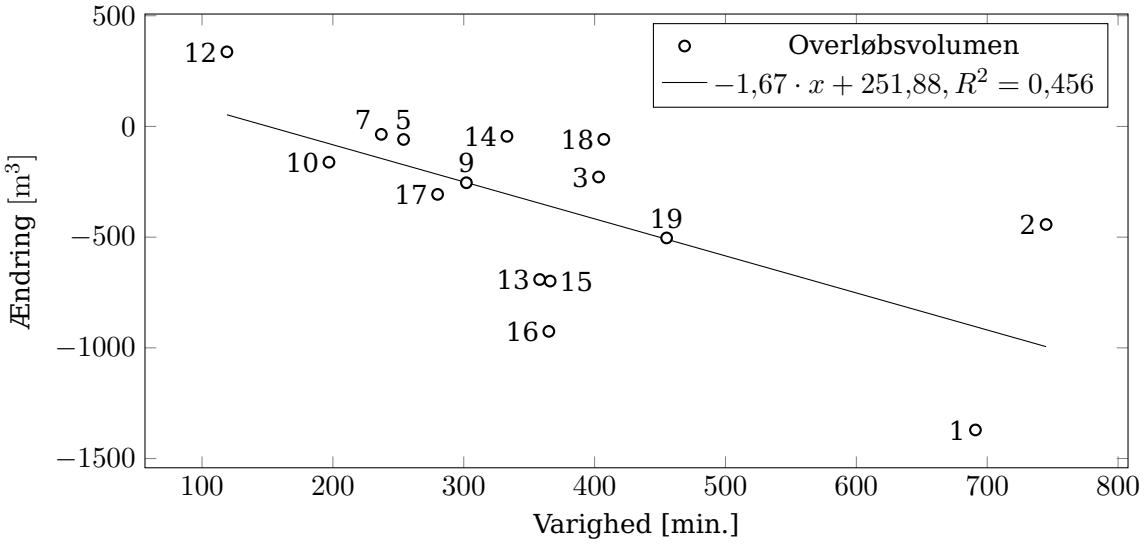
Nedbøren for de ikke simulerede hændelser er mellem 8 og op til 47 mm, hvorfor oversvømmelsen sandsynligvis skyldes den høje maksimale intensitet, der kan aflæses for hændelse nr. 4, 8 og 11 i tabel 8.1 side 62. Det kan dog ikke forklare hændelse nr. 6, hvor hverken maksimum eller middelintensiteten er højere end gennemsnittet, hvorfor det må skyldes variation i intensiteten.

Online-modellen har opnået reduceringer af enkelthændelser på mellem 1 og 12% med en enkelt hændelse, hvor overløbsvolumen er forøget med 8,4%. Den forøgede overløbsvolumen i forhold til referencetilstanden sammenfalder med, at denne hændelse har den mindste varighed på 2 timer.

Nr.	**Varighed** [T]	**Nedbør** [mm]	**Reference** [m^3]	**Optimeret** [m^3]	**Ændring** [m^3]	**Ændring** [%]
1	11,52	15,8	11370,0	9999,5	-1370,0	-12,1
2	12,42	12,4	8759,7	8316,8	-443,0	-5,1
3	6,72	9,6	5976,3	5748,0	-228,0	-3,8
4	2,65	8,4	-	-	-	-
5	4,23	7,6	2016,8	1958,0	-58,8	-2,9
6	9,23	14,2	-	-	-	-
7	3,95	8,6	3187,0	3151,3	-35,7	-1,1
8	1,58	14,4	-	-	-	-
9	5,03	9,8	5250,5	4996,3	-254,0	-4,8
10	3,28	12,8	5244,7	5083,3	-161,0	-3,1
11	1,80	47,0	-	-	-	-
12	1,98	11,8	4017,4	4354,3	337,0	8,4
13	5,97	12,4	7468,8	6777,5	-691,0	-9,3
14	5,55	8,4	2119,3	2074,6	-44,7	-2,1
15	6,10	21,0	12449,0	11751,0	-698,0	-5,6
16	6,08	14,2	8651,5	7726,0	-926,0	-10,7
17	4,67	13,4	6887,8	6581,0	-307,0	-4,5
18	6,78	8,0	3517,6	3459,2	-58,4	-1,7
19	7,58	18,2	12813,0	12310,0	-504,0	-3,9
	Gns.	-	6648,7	6285,8	-362,9	-4,1
	Sum	-	99730,4	94286,3	-5444,1	-5,5

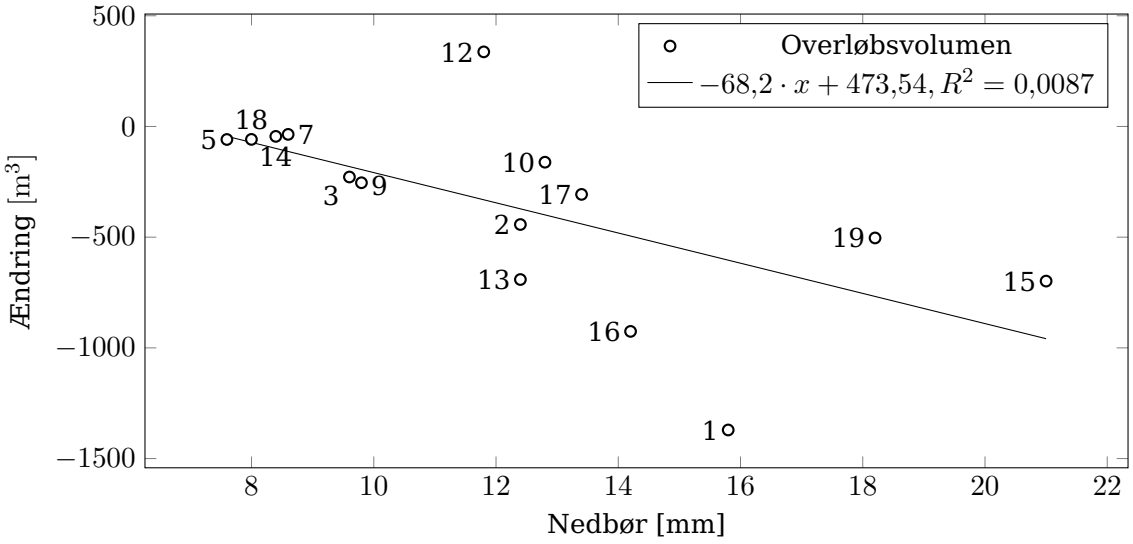
Tabel 9.3. Optimering af 19 regnhændelser i 2005 efter 5 generationer. Negative tal angiver en reduktion af overløbsvolumen, hvor positive tal angiver en forøgelse.

Af tabel 9.3 fremgår det, at Online-modellen kan reducere overløbsmængden med gennemsnitligt 4% per hændelse. Den totale reduktion af overløbsvolumen var på 5,5% for alle 15 hændelser. Sammenhængen mellem reduktionen af overløbsvolumen og varighed er illustreret i figur 9.6.



Figur 9.6. Reduktionen af overløbsvolumen som funktion af varigheden på regnhændelserne. Hændelsens nummer er givet ud for hvert punkt.

Af figur 9.6 observeres en stigende tendens i reduktionen af overløbsvolumen ved større varigheder. Hændelsen med en forøgning af de udledte overløbsvolumen stemmer godt overens med den observerede tendens. Denne situation fremkommer af, at kort højintensivt nedbør fylder bassinerne hurtigt op, hvorefter der ledes overløbsvolumen ud i recipienterne. Samt er tømmetiden af bassinerne ikke lav nok til, at vandet kan ledes optimalt ind til renseanlægget under højintensivt nedbør. Figur 9.6 viser, at der samtidigt er en svag sammenhæng mellem nedbør og reduktionen.



Figur 9.7. Reduktionen af overløbsvolumen som funktion af nedbøren på regnhændelserne. Hændelsens nummer er givet ud for hvert punkt.

Tendensen på figur 9.7 viser, at reduktionen i overløbsvolumen stiger som funktion af stigende nedbør. Forholdet mellem nedbør og reduktionen af overløbsvolumen viser, at Online-modellen er bedre til at håndtere længerevarende regnhændelser end små højintensive hændelser.

9.6 Sammenfatning

Online-modellen kan optimere Ikast Afløbssystem med brug af forecast. Uden forecast er udfaldet fra Online-modellen sandsynligvis tilfældigt. Det hænder af, at Online-modellen uden forecast ikke kan bestemme relationen mellem konfigurationerne af pumperne og den udledte overløbsvolumen korrekt. Dette skyldes, at regninput har for stor effekt på responsen af den hydrauliske model til, at denne kan negligeres under optimeringen. Fra resultaterne kan det observeres, at Online-modellen har svært ved at optimere den hydrauliske model uden brug af et forecast for regninput. Det forventes, at Online-modellen vil producere bedre resultater jo længere forecast, der anvendes. Der er dog i denne rapport anvendt et præcist forecast med den målte regnserie, hvorfor modellen ved mere upræcise forecasts måske vil producere et mere usikkert udfald.

Selv med forecast kan modellen dog ikke nødvendigvis optimere alt nedbør, da det nuværende setup ikke tillader den hydrauliske model at simulere hændelser med oversvømmelse. Resultaterne viser også, at for en enkelt regnhændelse er en forøgelse af overløbsvolumen opnået. Dette er også observeret i et lignende studie af implementeringen af en optimeringsalgoritme [Vezzaroa et al., 2013].

Med forecast kan overløbsvolumen reduceres gennemsnitligt med 4% og uden forecast forøges med 5% på regnhændelser med nedbør i intervallet 7-47 mm. For Online-modellen med forecast har den procentvise reduktion af overløbsvolumen for hændelserne en standardafvigelse på 4,7%. Standardafvigelsen er dog kraftigt påvirket af store afvigelser, hvor der er simuleret en enkelt hændelse med en forøgelse af overløbsvolumen på 8%. Fjernes denne hændelse bliver standardafvigelsen 3,3%, hvilket er meget højt og derfor gør modellens udfald usikkert.

Forskellen mellem at beregne overløbsvolumen manuelt i stedet for at anvende DHI's LTS-modul er undersøgt til at være ubetydelig for afløbssystemet. Intervallet brugt til at beregne overløbsvolumen med i modellen kan reduceres uden større betydning, hvilket reducerer beregningstiden kraftigt.

Ekskluderingen af hændelser, der leder til oversvømmelse har vist sig at have stor betydning for optimeringen ift. Offline-modellen, hvor denne ekskludering ikke er implementeret. Dette viser, at algoritmen kan og vil magasinere vand på terræn, hvis sådan en mulighed præsenterer sig. Definitionen af oversvømmelse er sat til 0,1 meter vand over terræn. Betydningen af dette valg er ikke undersøgt nærmere, men ustabilitet i modellen kan lede til, at der simuleres vand på terræn. Det simulerede vand vil måske ikke være til stede i virkeligheden, hvorfor potentielle løsninger ekskluderes. Effekten af ekskluderingen er dog vurderet til at være på den sikre side. Det vil sige, at valget af definitionen på oversvømmelse med 0,1 meter sandsynligvis godt kan forøges uden forekomst af vand på terræn i et virkelighedsnært scenarie, hvormed flere hændelser måske kunne optimeres.

Opdateringsfrekvensens betydning for Online-modellens evne til at reducere overløbsvolumen er undersøgt til at have en tilnærmelsesvis eksponentiel betydning. Valget af en lav opdateringsfrekvens (f.eks. et minut) måtte nedprioriteres i henhold til beregningstiden og arbejdshukommelsen (RAM: Random Access Memory). Den mest begrænsende faktor er arbejdshukommelsen, der i Online-modellen ikke kan udnyttes optimalt, da programkoden og kodesproget ikke er optimeret til at udnytte arbejdshukommelsen. Dette medfører, at algoritmens fulde potentielle evne til at reducere overløbsvolumen stadigt er ukendt. Algoritmens evne til at reducere overløbsvolumen fra afløbssystemet kan bestemmes, hvis der enten tilføjes mere arbejdshukommelse til beregningscomputeren eller programkoden skrives i et sprog med bedre udnyttelse af arbejdshukommelsen, f.eks. Python eller C.

Det maksimale antal af generationer viste i analysen, at både potentialet for at reducere overløbsvolumen samt formindske spredningen i udfaldet faldt kraftigt fra 1 til 5 generation, men fra 5 til 10 faldt forøgelsen af potentialet kraftigt. Det vurderes, at en øgning af maksimum antal generationer ikke er nødvendigt, men at det kan betale sig så fremt, at beregningstiden reduceres.

10. Delkonklusion III

Strategi 1 i Offline-modellen viser en reduktion på 22% af overløbsvolumen simuleret under året 2005. Resultatet er dog kraftigt påvirket af, at der ikke er inkluderet en metode til at sortere regnhændelser med oversvømmelse fra. Den viste reduktion vil falde betydeligt, hvis der implementeres en frasortering af hændelser, der leder til oversvømmelse.

Strategi 2 i Offline-modellen indikerer, at Ikast Afløbssystem ikke kan konfigureres til at vægte overløbsvolumen udledt til Storå højere end til de resterende recipienter.

Det er ikke muligt at udlede en meningsfuld tendens ved konfigurationerne af de simulerede hændelser for Offline-modellen. Dette kan være fordi, at algoritmens optimering er for vilkårlig samtidigt med, at nedbørens tidslige variation har stor betydning for konfigurationerne. For at kunne danne et mønster i algoritmens optimering, skal antallet af simulerede hændelser hæves, så det bliver muligt at identificere tendenser i løsningerne.

Offline-modellen viser, at det er muligt at reducere overløbsvolumen samtidigt med, at pumpeomkostningerne formindskes.

Online-modellen med forecast er i stand til at optimere den hydrauliske model af Ikast Afløbssystem. Online-modellen med forecast viser en reduktion af overløbsvolumen på 5,5% simuleret under 2005. Online-modellen uden forecast kan ikke reducere overløbsvolumen uden information om den kommende nedbør til næste tidskridt. Det viser sig, at den manglende nedbør til næste tidskridt har for stor indflydelse på overløbsvolumen til at pumperne kan konfigureres korrekt. Dette indikerer, at Online-modellens udfald er meget afhængigt af forecast og usikkerheden på denne.

Online-modellen viser sig at kræve meget computerkraft, og det har i denne rapport været nødsaget til at gå på kompromis med modellens evne til at reducere overløbsvolumen for at kunne reducere simuleringstiden betragteligt. Dette betyder, at der sandsynligvis kan produceres bedre resultater, hvis kraftigere computere tages i brug samtidigt med lidt optimering af programkoden.

11. Diskussion

Det er i dette studie ikke kalibreret på afløbsmodellerne, da det er valgt at lave modelsammenligninger. Det viser sig, at det er muligt at anvende ikke-kalibrerede modeller til reducering af overløbsvolumen uden, at resultaterne afviger fra forventninger til systemets opførsel. I realiteten bør der anvendes kalibrerede afløbsmodeller, hvis reduktionen af overløbsvolumen skal modelleres absolut. Ikke-kalibrerede afløbsmodeller er i dette anvendt med succes til at vurdere styringspotentialet for Ikast Afløbssystem.

Det er valgt at følge opfordringer fra samarbejdspartnere til valg af styringsstrategier og forslag til strukturelle ændringer af ledningssystemet. Det vides derfor ikke, om det kan opnåes større reduktioner ved en anden tilgang til styring af afløbssystemet end dem forslået af samarbejdspartnerne.

Der er i perioden fra projektstart til slut forekommet ændringer i Ikast Afløbssystem, der ikke er medtaget i dette studie. Det betyder, at der kan være enkelte forhold i afløbssystemet, der ikke er afspejlet i dette studie. De nye ændringer i afløbssystemet vil betyde, at de udarbejdede styringsstrategier i dette studie skal revurderes idet ændringer i afløbssystemet kan have stor indflydelse på reduktionerne i overløbsvolumen.

Et bedre kendskab til afløbssystemets struktur, styringsregulatorernes konfigurationer og fordeling af nedbøren over oplandet vil give et bedre grundlag for at vurdere styringspotentialet. Et bedre kendskab til usikkerheden kan sammenkoblet med en simplere model føre til en bedre beskrivelse af usikkerheden på resultaterne som udført i Vezzaroa et al. [2013].

Usikkerheden kunne beskrives ved stokastisk modellering, hvor der kan laves et statistisk udfald af modellen. Den statistiske model beskriver styringspotentialet samt usikkerheden af denne, hvilket er interessant at vide i kommerciel sammenhæng.

Grundlaget for at anvende modeller til at bestemme den absolutte reduktion af overløbsvolumen er meget usikkert, hvorimod styringspotentialet er bedre belyst ved modellerne. Erfaringen fra dette studie viser, at modellerne er gode til at belyse problemerne i afløbssystemet samt bekræftning eller afkræftning af idéer til at løse dem.

12. Konklusion

I denne rapport er styringspotentialet for Ikast Afløbssystem undersøgt ved en regel- og algoritmebaseret tilgang til reduktion af overløbsvolumen. Den regelbaserede styringsstrategi består af en lokal og global styring, hvor den algoritmebasserede styring består af en model med og uden forecast. Styringspotentialet viser, at der er gode muligheder for at reducere udledning af overløbsvolumen ved styring. Overløbsvolumen er bestemt for det nuværende afløbssystem i året 2005 for nedbør over 7 mm til 99730,4 m^3.

Den regelbaserede styringsstrategi viser et stort potentiale for reduktion af overløbsvolumen, hvor det er fundet, at selv simple indgreb kan give store reduktioner. I et lignende studie af styringspotentialet i Kolding stemmer resultaterne overens med det fundne reduktioner i dette studie [Jensen og Jørgensen, 2012]. Det er samtidig i dette projekt fundet, at det største styringspotentiale forefindes ved regnhændelser i et interval imellem 7 og 13 mm, hvilket stemmer overens med erfaringer fra Jensen og Jørgensen [2012]. Det blev konkluderet at selv simple lokale styringer havde en stor effekt. Den største effekt blev dog fundet, at ved en global styring med et etableret rørbassin i den nordlige del af Ikast, Styring 2C. Det blev samtidig konkluderet at det er nødvendigt at tilføje et rørbassin med en volumen på ca. 1200 m^3 for at eliminere overløb til Storå.

Den algoritmebaserede styringsstrategi viser varierende effekt for regnhændelserne, hvilket stemmer overens med et lignende studie af algoritmebaseret styring [Vezzaroa et al., 2013]. Reduktionen af overløbsvolumen er beregnet til at være markant større end ved et studie med implementering af samme algoritme i Kolding Afløbssystem med en reduktion på mellem 0,25 til 1% [Beraud et al., 2010]. Den algoritme-baseret optimering af overløbsvolumen og pumpeomkostninger er udført med Offline- og Online-modeller. Det viste sig muligt at optimere overløbsvolumen uden at gå på kompromis med pumpeomkostningerne. Ved en analyse af resultaterne fra Offline-modellen har det ikke været muligt at identificere algoritmens styringsprincip. Derfor har det ikke været muligt at sammenligne en gennemsnitlig konfiguration af styringsregulatorer fra Offline- med Online-modellen.

Det kan endeligt konkluderes, at Styring 2C vil have størst effekt for året 2005 med 19 regnhændelser over 7 mm, hvor der forefindes en reduktion fra ca. til 85767,8 m^3 svarende til 14%, hvorimod algoritmen finder en reduktion på ca. 5444,1 m^3 svarende til 6%. Herved kan det konkluderes, at potentialet for styring af afløbssystemet til Ikast Renseanlæg er størst for en regelbaseret metodisk tilgang.

13. Anbefalinger

Erfaringerne fra dette studie indikerer, at en lokal styring kombineret med et rørbassin i det nordlige Ikast vil føre til signifikante reduktioner i overløbsvolumen til de modtagende recipienter. Skal belastningen fra afløbssystemet til Storå elimineres, så kan der implementeres en global styring. Både for den lokale og globale styring er det anbefalet, at det undersøges, om mindre dimensioner på rørbassinet kan føre til tilsvarende reduktioner.

Der er et stort bassinvolumen i Ikast Afløbssystem, hvor belastningen er skævt fordelt mellem bassinerne. Belastningen af bassinerne kan gøres mere jævnt fordelt ved at etablere pumpeledninger, der pumper vand fra hårdt til mindre belastede bassiner. Ved at fordele belastningen af bassinerne mere jævnt, så vil mere vand sandsynligvis kunne tilbageholdes. Det anbefales, at der laves videregående undersøgelser med at få belastningen af bassinerne mere jævnt fordelt.

Algoritmen viser, at der er et godt potentiale til at minimere oversvømmelse fra Ikast Afløbssystem. Det anbefales derfor, at det undersøges nærmere, om der kan laves lokale og globale styringer, der samtidigt minimerer oversvømmelse. Det anbefales at lave en mere detaljeret undersøgelse af algoritmens potentiale for at kunne reducere overløbsvolumen. Denne undersøgelse bør inkludere en analyse af kravet til frasortering af hændelser, der fører til oversvømmelse. Et mere realistisk krav til frasortering af hændelser vil føre til, at algoritmen vil kunne opnå større reduktioner af overløbsvolumen.

Litteraturliste

Bassø, L. og Neve, S. (2009). *Inspirationsguide for proaktiv klimatilpasning i vandsektoren*. Nr. ISBN: 87-90455-91-6. Dansk Vand- og Spildevandsforening, Første udgave.

Bentzen, T. R. (2006). *Notat vedr. regn, rørdimensionering og bassindimensionering: primært i forbindelse med vejanlæg*. Nr. ISSN 1901-7286. Aalborg Universitet, Første Udgave udgave.

Beraud, B., Mourad, M., Soyeux, E., Lemoine, C. og Lovera, M. (2010). Optimisation of sewer networks hydraulic behaviour during wet weather: coupling genetic algorithms with two sewer networks modelling tools. *NOVATECH*, SESSION 2.5.

Beraud, B., Steyer, J., Lemoine, C., Latrille, E., Manic, G. og Printemps-Vacquier (2007). Towards a global multi objective optimisation of wastewater treatment plant based on modeling and genetic algorithms. *Water Science and Technology*, 56(9):109-116.

Danmarks Vindmølleforening (2013). *Vindenergi i Danmark*. `http://www.dkvind.dk/fakta/p1.pdf`.

Deb, K. (2015). *Computational Optimization and Innovation (COIN) Laboratory*. `http://www.iitk.ac.in/kangal/codes.shtml`.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. og Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, VOL. 6, NO. 2.

DHI (2014a). *MOUSE PIPE FLOW - Reference manual*. `http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/Document_public/Project/Manuals/US/MOUSE_ReferenceManual_Pipe_Flow.pdf`.

DHI (2014b). *MOUSE SURFACE RUNOFF MODELS - Reference manual*. `http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/Document_public/Project/Manuals/US/MOUSE_ReferenceManual_Runoff.pdf`.

EnviDan (2015). *Intelligent spildevandshåndtering*. `http://www.envidan.dk/Admin/Public/Download.aspx?file=Files%2FFiler%2FPosters%2FIntelligent+spildevandsh%C3%A5ndtering+JAM+NORDIWA+2013.pdf`.

Fu, G., Butler, D. og Khu, S. (2008). Multiple objective optimal control of integrated urban wastewater systems. *Environmental Modelling & Software*, 23(2):225-234.

GEATbx (2015). *Genetic and Evolutionary Algorithms: Principles, Methods and Algorithms*. `http://www.pg.gda.pl/~mkwies/dyd/geadocu/algrecom.html`.

Geodatastyrelsen (2015). *Kortforsyningen*. http://download.kortforsyningen.dk/content/geodataprodukter.

Guo, Y., Walters, G., Khu, S. og Keedwell, E. (2007). Optimal design of sewer networks using hybrid cellular automata and genetic algorithm. I *IWA World Water Congress*.

Ikast-Brande Spildevand A/S (2015). *Spildevandets vej gennem Ikast Renseanlæg*. Ikast-Brande Spildevand A/S, URL: http://www.ikast-brandespildevand.dk/sites/default/files/ikast_renseanlaeg_side_12m._skitse.pdf. Downloaded: 24-09-2015.

Ikast-Brande Spildevand A/S, Orbicon (2015). *Se kloaksystemet*. http://ikast-brande.webgrafkort.dk/mainpage.aspx.

Jensen, N. T. (2015). Mike urban model for oplandet til ikast renseanlæg. Udleveret ved møde med Krüger.

Jensen, N. T. og Jørgensen, P. G. (2012). Sammenligning af metoder til realtidsstyring og prognosticering af afløbssystemet i kolding. Projekt udgivet på AAU.

Lange, K. H. (2015a). Notat om projektideer 9/15. Notat af Kenn Henrik Lange, Ikast-Brande Spildevand A/S.

Lange, K. H. (2015b). Præsentation af projektidéer. Møde med Kenn H. Lange.

Lange, K. H. (2015c). Udleverede tekniske tegninger af nyt bassin i bording. Udleveret ved mail-korrespondance.

Legates, D. R. og McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1):233-241. ISSN 1944-7973. URL http://dx.doi.org/10.1029/1998WR900018.

MathWorks Inc (2015a). *Find minima of multiple functions using genetic algorithm*. http://se.mathworks.com/help/gads/gamultiobj.html?searchHighlight=NSGA#bq_7kit-1.

MathWorks Inc (2015b). Mathlab - the language of technical computing.

Naturstyrelsen (2011). *Miljø- og fødevareministeriet*. http://miljoegis.mim.dk/cbkort?profile=miljoegis_vandrammedirektiv2011.

Naturstyrelsen (2015). *Vandrammedirektivet 2011*. http://miljoegis.mim.dk/cbkort?profile=miljoegis_vandrammedirektiv2011.

Pedersen, M. L. (2014). Forureningsvurderinger i vandløb og søer. Præsentation under undervisning.

Poulsen, T. S. (2015). *Integreret styring af renseanlæg og afløbssystem*. http://www.kruger.dk/krugeras/ressources/files/1/17035,Skybrudsfolder_2014.pdf.

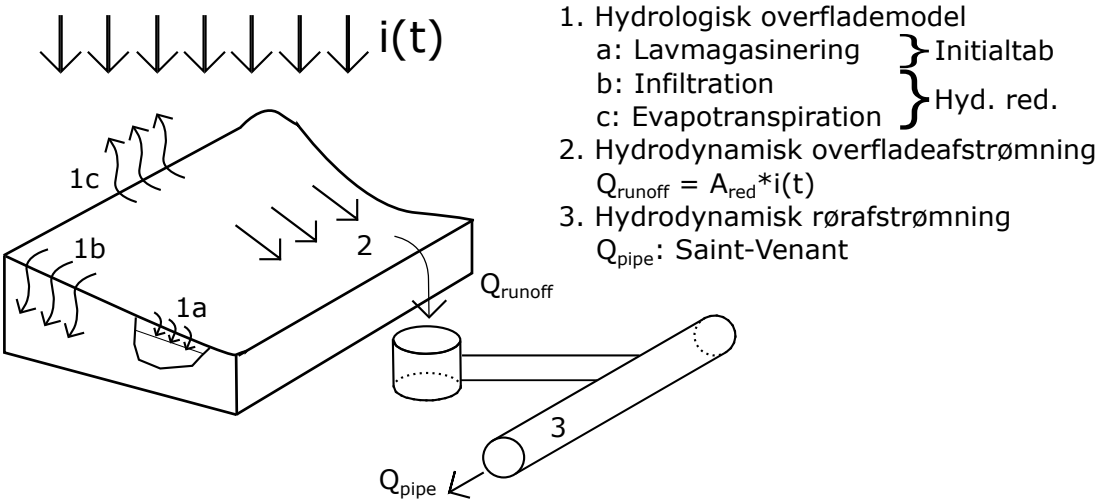
Schütze, M., Campisano, A., Colas, H., Schilling, W. og Vanrolleghem, P. A. (2004). *Real time control of urban wastewater systems—where do we stand today?* http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15730620701754376.

Østergaard Pedersen, C., Gautesen, H. K., Vijayasekaran, S. P. S., Hosbjerg, T. og Nielsen, R. (2014). Analyse af eksisterende afløbssystem og tilhørende recipient i svenstrup. Projekt udgivet på AAU.

Vezzaroa, L., Christensen, M., Thirsing, C., Grum, M. og Mikkelsen, P. (2013). *Water quality-based real time control of integrated urban drainage systems: a preliminary study from Copenhagen, Denmark*. http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:127092/datastreams/file_77e30740-6e81-473b-9d00-2c7158bb6129/content.

A. Modelopsætning

Kapitlet beskriver opsætningen af den detaljerede og simplificerede model anvendt i dette projekt. Afsnittene er delvist taget fra projektet [Østergaard Pedersen et al., 2014], hvor en lignende gennemgang af teorien er beskrevet. Både den detaljerede og simplificerede afløbsmodel er baseret på en konceptuel beskrivelse af Ikast Afløbssystem, der er skitseret på figur A.1. Den konceptuelle beskrivelse består af tre forskellige modeller: hydrologisk overflademodel, beregner det bidragende regninput; hydrodynamisk overflademodel, sammenkobler det bidragende vandvolumen fra regninput til afløbssystemet og hydrodynamisk rørmodel, beregner vandføring og vandniveau i rørsystemet. Overflademodellen beskriver overfladeafstrømningen, der indrager følgende koncepter: regninput, evapotranspiration, lavningsmagasinering og nedsivning. Rørmodellen beskriver vandniveau og vandføring i afløbssystemet.



Figur A.1. Konceptuel model af afløbssystemet.

Den hydrauliske model er en numerisk model opbygget i DHI's MOUSE (MOdel for Urban SEwers), hvor DHI's MIKE URBAN anvendes som den grafiske brugerflade mellem brugeren og MOUSE.

A.1 Hydrologisk og hydrodynamisk overflademodel

Den hydrologiske og hydrodynamiske model er i MIKE URBAN flettet sammen, hvor der findes tre forskellige overflademodeller: A, B og C. Forskellen på

modellerne er ikke gennemgået i denne rapport, og der refereres til DHI [2014b] for forklaring af modellerne. Afløbsmodellen i denne rapport er opbygget med overflademodel A (Tid-arealmetoden), der anvender *hydrologisk reduktionsfaktor*, *initial-tab*, *koncentrationstid* og tid-arealkurve.

Den *hydrologiske reduktionsfaktor* angiver procentdelen af det impermeable opland, der bidrager til afstrømningen som en konstant uafhængigt af tiden. Faktoren beskriver vandtab til f.eks. evapotranspiration og infiltration.

Initialtabet beskriver den nedbør, der falder på overfladen før, at overfladeafstrømningen begynder. Initialtabet kommer af, at overfladen kan optage vand indtil denne er vandmættet og lavningsmagasinering. Ved en vandmættet overflade vil vandet ikke længere nedsive og strømmer i stedet langs overfladen.

Koncentrationstiden beskriver tiden hvormed, at hele oplandet bidrager til overfladeafstrømningen. Hastigheden på overfladeafstrømningen antages uafhængigt af vanddybden og derfor konstant. Tid-arealkurven beskriver forholdet mellem koncentrationstiden og det bidragende areal, hvilket er illustreret på figur A.2.

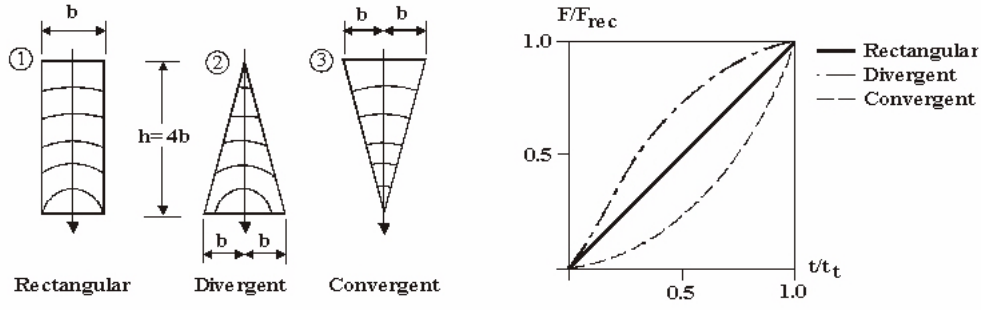
Overfladeafstrømningen er diskritiseret i tiden med tidskridt, Δt og antal beregningsceller, n. Antallet af beregningsceller for overfladeafstrømningen er givet ved formel (A.1) [DHI, 2014b]:

$$n = \frac{t_c}{\Delta t} \tag{A.1}$$

Hvor:

t_c	Koncentrationstiden $[s]$
Δt	Tidskridt $[s]$

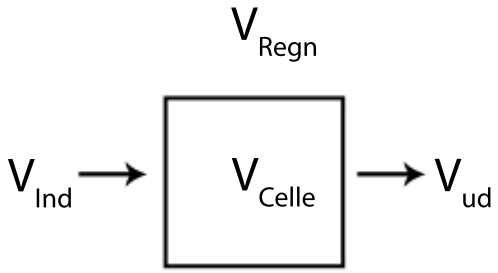
Arealet af hver beregningscelle bestemmes på baggrund af den valgte tid/areal-kurve. Der er tre typer af tid-/arealkurver i MOUSE, der beskriver overfladeafstrømningens bane fra det yderste punkt til nedløbet. De tre tid-/arealkurver er illustreret på figur A.2.



Figur A.2. Tid-/arealkurver tilgændelige i MOUSE. [DHI, 2014b]

Overfladeafstrømningen påvirker afløbssystemet, når vanddybden på oplandsoverfladen overstiger initialtabet. Modsat stopper overfladeafstrømningen ved vanddybder under initialtabet. Hvis simuleringstiden har flere regnhændelser med tørvejrsperioder, kan MOUSE genstarte processen, hvor der på ny skal forekomme vanddybder over initialtabet før, at overfladeafstrømningen bestemmes.

Volumet af overfladeafstrømningen i beregningscellerne bestemmes kontinuert for hvert tidskridt. Det betyder, at der kan opstilles en massebalance for beregningscellerne, der er illustreret på figur A.3 [DHI, 2014b].



Figur A.3. Massebalancen for en beregningscelle i overfladeafstrømningen. [DHI, 2014b]

Massebalancen kan beskrives ved formel (A.2):

$$V_{Celle} = V_{Ind} + V_{Regn} - V_{Ud} \tag{A.2}$$

Hvor:

V_{Celle}	Volumen af en beregningscelle $[m^3]$
V_{Ind}	Volumen tilført fra den foregående beregningscelle for tidsstep δt $[m^3]$
V_{Ud}	Volumen bortløbende vand fra beregningscelle for tidsstep δt $[m^3]$
V_{Regn}	Volumen af den nedfaldne regn multipliceret med beregningscellens areal til tidsstep δt $[m^3]$

A.2 Hydrodynamisk rørmodel

For at kunne simulere en ikke-stationær strømning i et ledningsnet, kan Saint Venant's ligninger for 1-D tilfælde anvendes. Ligningerne udledes ikke, men implementationen i MIKE URBAN beskrives for ledninger med frit vandspejl. Saint Venant's ligninger for bevarelse af masse og moment er givet ved formel (A.3) og formel (A.4) [DHI, 2014a]:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \tag{A.3}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \frac{Q^2}{A}}{\partial x} + gA\frac{\partial h}{\partial x} + gAI_f = gAI_0 \tag{A.4}$$

Hvor:

Q	Vandføring $[\frac{m^3}{s}]$
A	Tværsnit af vandføring $[m^3]$
y	Vanddybde $[m]$
g	Tyngdeaccelerationen $[\frac{m}{s^2}]$
x	Afstand i vandføringens retning $[m]$
t	Tid $[s]$
α	Hastighedskoefficient $[-]$
I_0	Bundliniegradient $[-]$
I_f	Friktionshældning / Energiliniegradient $[-]$

Omskrives kontinuitetsligningen til:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial A}{\partial t} \tag{A.5}$$

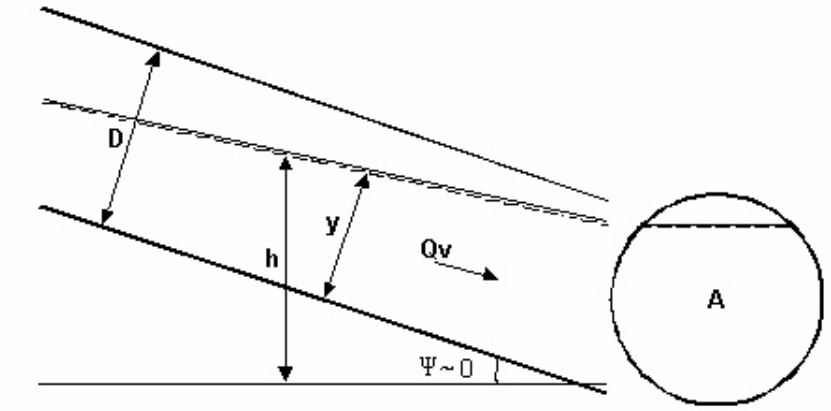
Ud fra formel (A.5) er det evident, at en øget vandføring giver et øget areal. Det vil sige, at vanddybden vil stige indtil, at ledningen er fuldtløbende.

For at kunne anvende Saint Venant's ligninger er følgende antagelser nødvendige:

- Vand er usammentrykkeligt og homogent - f.eks. homogen densitet uafhængigt af temperaturen.

- Bundliniehældningen er tæt på 0, hvilket tillader antagelsen, at $\cos(\phi_0) \to 1$
- Bølgelængderne er store ift. vanddybden, hvilket betyder, at hastigheden kan antages at ligge parallelt med bundhældningen (ingen vertikale strømninger). Denne antagelse betyder, at der er hydrostatisk trykfordelning gennem rørtværsnittet.
- Vandet opnår aldrig en hastighed, der er større end bølgehastigheden.

Ligningerne kan nu implementeres for en rørledning med et cirkulært tværsnit og fritvandspejl, der illustreret på figur A.4:



Figur A.4. Skitse af rørledning med cirkulært tværsnit. [DHI, 2014a]

Hvis bundhældningen er lille, kan bundliniegradienten bestemmes som differencen af ∂y og ∂h mht. ∂x, som beskrevet ved formel (A.6):

$$I_0 = \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \tag{A.6}$$

Momentligningen omskrives formel (A.4) til formel (A.7):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \frac{Q^2}{A}}{\partial x} + gA\frac{\partial h}{\partial x} = gA(I_0 - I_f) \tag{A.7}$$

Herefter indsættes formel (A.6) i formel (A.7), og der kan reduceres til formel (A.8):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \frac{Q^2}{A}}{\partial x} + gA\frac{\partial h}{\partial x} = -gAI_f \tag{A.8}$$

Energiliniegradienten kan beregnes ved introducering af Mannings formlen, og Saint Venant's ligninger kan løses ved en nummerisk finite difference metode. Metoden

kaldes for "Double Sweep Method", hvor en gennemgang af denne er undladt i denne rapport, men der henvises til DHI [2014a] for nærmere beskrivelse.

B. Simplificeret afløbsmodel

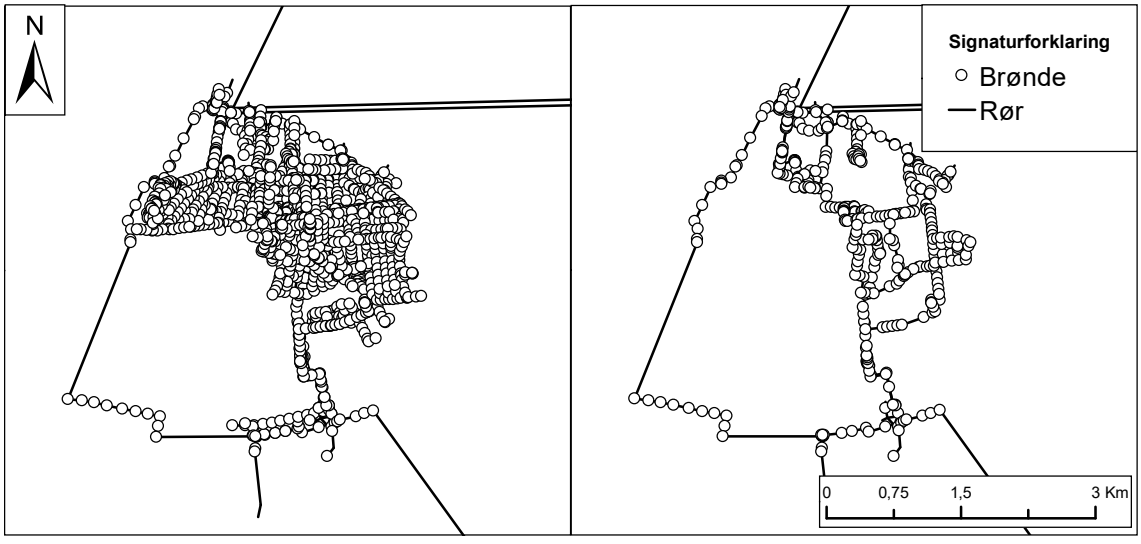
I dette kapitel analyseres en simplificeret hydraulisk model af afløbssystemet med henblik på at anvende modellen til at lave Online styring med algoritmen anvendt i kapitel 8 side 59. Det undersøges, om den simplificerede models resultater afspejler den detaljerede model i god nok detaljegrad.

Tidsintervallet mellem et forecast af regnen og en forudsigelse af overløbsvolumen beregnet ved simulering af afløbssystemet er en af de kritiske faktorer, når der arbejdes med Online modellering af overløbsvolumen. Derfor bør simuleringstiden reduceres mest muligt uden, at detaljegraden for resultaterne formindskes væsentligt.

Simuleringstiden for den detaljerede afløbsmodel af Ikast Afløbssystem ligger på ca. 52 sekunder for et døgn. Til at simplificere afløbsmodellen har Krüger A/S anvendt egen software, FLORA, der har reduceret simuleringstiden til 18 sekunder for et døgn.

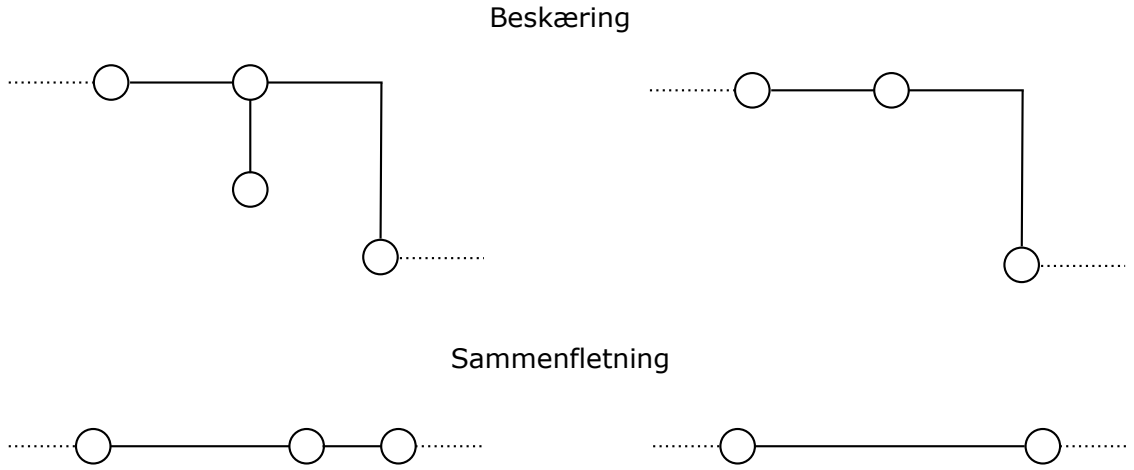
B.1 Simplificering af ledningsnetværk

Den detaljerede model er simplificeret ved at beskære brønde og rørledninger opstrøms i afløbssystemet i Ikast og Bording. Den simplificerede model er illustreret sammenlignet med den detaljerede model med udgangspunkt i Ikast på figur B.1.



Figur B.1. Til venstre ses den detaljerede model og til højre er den simplificerede model i Ikast illustreret.

Afløbsmodellen er simplificeret ved to metoder: beskæring og sammenfletning. Beskæringen fjerner mindre rørledninger opstrøms i systemet med lille diameter og en længde mindre end 10 meter. Sammenfletningen fjerner brønde mellem rørstrækninger med tilsvarende hydraulisk kapacitet f.eks. samme fald og diameter. Metoderne er illustreret i figur B.2. Oplande til simplificerede rørstrækninger er tilkoblet den nærmeste brønd.



Figur B.2. I den øvre og nedre del er hhv. beskæringen og sammenfletningen skitseret.

I tabel B.1 kan antallet af brønde og rørledninger for begge modeller aflæses.

Model	**Brønde** [-]	**Rørledninger** [-]
Detaljeret	1666	1653
Simplificeret	636	622

Tabel B.1. Antallet af ledninger og brønde i den detaljerede og simplificerede model.

Antallet af brønde og rørledninger er reduceret med ca. 62%. Den relativt høje reducering af brønde og rørledninger ser ikke visuelt ud af meget på figur B.1, hvilket skyldes, at ledningsnetværket i Ikast er meget komplekst.

B.1.1 Nedbør

Det er valgt at simulere en enkelt regnhændelse med en nedbør på 10 mm og en varighed på 7,28 timer. Regnhændelsen er illustreret i figur 6.1 side 43.

B.2 Metoder

Den simplificerede models resultater sammenlignes med den detaljerede model, hvor kvadratet på korrelationskoefficienten, R^2, og gennemsnitsfejlen, MAE (Mean Absolute Error) anvendes som indikatorer på fejlen i vandniveau simuleret i udløbene.

R^2 beskriver hvor stor del af variansen i den detaljerede model, der kan beskrives af den simplificerede model. R^2 er begrænset til intervallet 0 til 1. Højere værdier af R^2 viser bedre sammenhæng, og kan beregnes ved formel (B.1) [Legates og McCabe, 1999].

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i-1}^{n} (y_d - \bar{y}_d) \cdot (y_s - \bar{y}_s)}{\left(\sum_{i=1}^{n} (y_d - \bar{y}_d)^2 \right)^{0.5} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} (y_s - \bar{y}_s)^2 \right)^{0.5}} \right)^2 \tag{B.1}$$

Hvor:

y_d	Simuleret værdi fra detaljeret model $[-]$
y_s	Simuleret værdi fra simpel model $[-]$
$\bar{y}_d$	Simuleret gennemsnit fra detaljeret model $[-]$
$\bar{y}_s$	Simuleret gennemsnit fra simpel model $[-]$

R^2 tager kun højde for den lineære forskel mellem modelresultaterne, hvorfor det ikke bør anvendes uden at ligeledes beskrive gennemsnitsfejlen. MAE tager højde for negative forskelle mellem den detaljerede og simplificerede model ved at finde gennemsnittet for den absolutte fejl, som vist i formel (B.2) [Legates og McCabe, 1999].

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |y_d - y_s| \tag{B.2}$$

MAE skal være så lav som muligt, men det afhænger stærkt af formålet med resultaterne, hvor en lavest muligt værdi er det bedste.

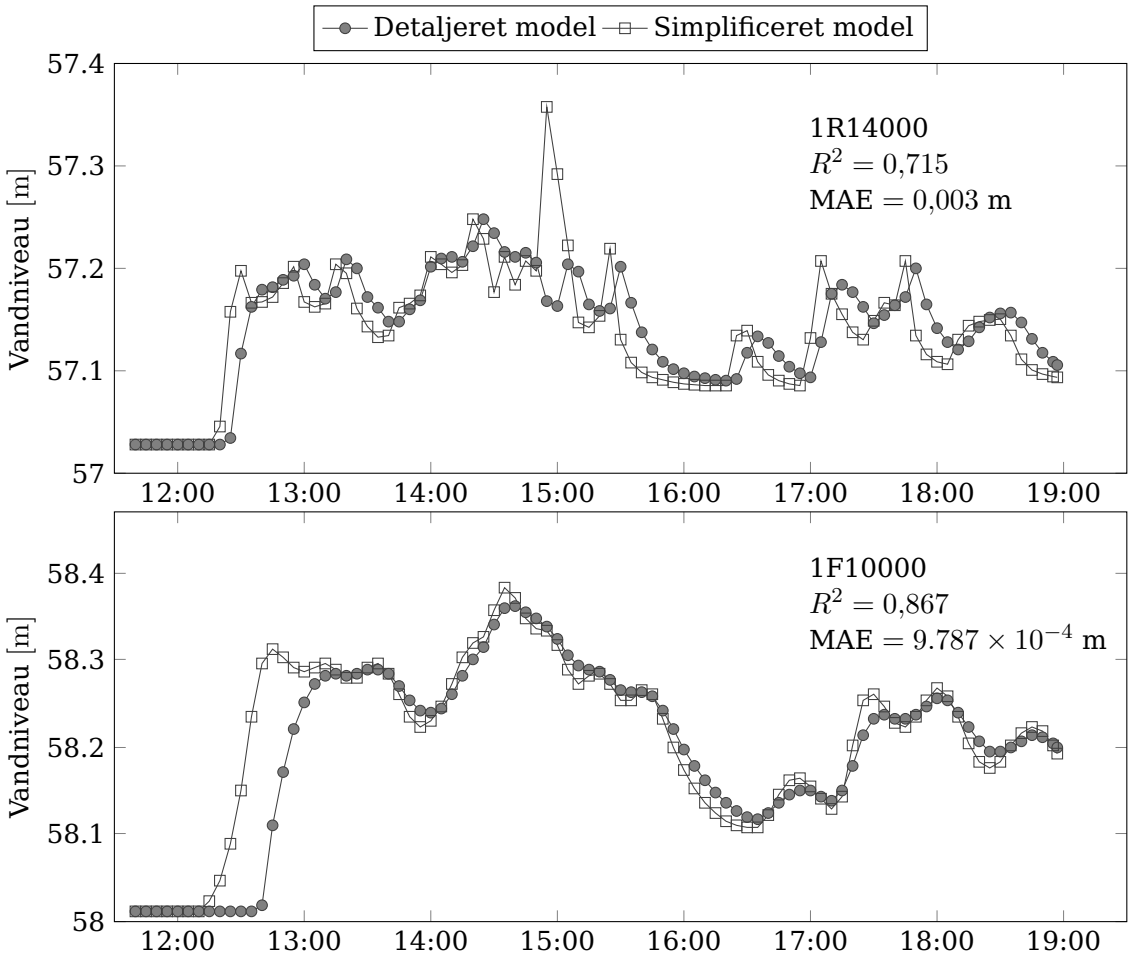
B.3 Resultater

I tabel B.2 kan intervallet og gennemsnittet for korrelationskoefficienten, R^2, og MAE aflæses for vandniveauet i 13 udløb.

Parameter	Min. og maks.	Gennemsnit
R^2	0,715-1 [-]	0,935 [-]
MAE	0-0,026 m	0,004 m

Tabel B.2. Korrelationskoefficienten og MAE for en sammenligning af den simplificerede og detaljerede model. Minimum og maksimum er de mindste og største beregnede værdier for udløbene.

Korrelationskoefficienten viser en god sammenhæng mellem modellerne med kun to udløb, hvor der observeres en mindre afvigelse fra gennemsnittet. MAE viser, at der er en lav afvigelse på resultaterne ved kun et udløb, hvor der afviges meget fra gennemsnittet. Simuleringstiden på hændelsen er reduceret med 72% fra $18\,\mathrm{s}$ til $5\,\mathrm{s}$. På figur B.3 er vandniveauet i udløbene 1R14000 og 1F10000 illustreret for begge modeller, hvor der er beregnet korrelationskoefficient på hhv. 0,715 og 0,867, mens MAE er beregnet til hhv. 0,003 og $9.787 \times 10^{-4}\ \mathrm{m}$.



Figur B.3. Vandstanden i udløb 1R14000 øverst og 1F10000 nederst simuleret i den detaljerede og simplificerede model.

Den simple model forskyder vandet til at nå udløbet en smule før den detaljerede model. Tidsforskydningen er kun tilstede i starten af regnhændelsen, hvorefter tidsforskydningen bliver mindre. Tidsforskydningen forekommer grundet små manglende rørstrækninger til oplandene, hvor de manglende rørstrækninger resulterer i lavere afstrømningstid til udløbet. Tidsforskydningerne er hhv. på 5 og 25 minutter for udløb 1R14000 og 1F10000.

Peaks i vandstanden rammer samme tidspunkter undtagen et punkt for udløb 1R14000 kl. 15 i figur B.3. Figur B.3 viser, at der er god overenstemmelse med de beregnede korrelationskoefficienter og MAE ift., hvor godt visuelt resultaterne fra den simplificerede model passer med den detaljerede.

Vandbalancen i tabel B.3 viser, at der genereres samme volumen af regn- og spildevand, men at der genereres 17% mere numerisk vand i den simplificerede model.

Model [-]	**Regnvand** [m^3]	**Spildevand** [m^3]	**Numerisk genereret vand** [m^3]
Detaljeret	28006,8	1144,4	124,1
Simplificeret	28006,8	1144,4	144,8

Tabel B.3. Regn-, spilde- og numerisk genereret vand ved sammenligning af den simplificerede og detaljerede model.

Væksten af numerisk vand i modellen er ikke indlysende, men det kan være sammenkoblingen af rørstrækningerne, der giver en mindre ideel geometri. Sammenkoblingen kan resultere i større ændringer for fald og diameter mellem rørstrækninger end i den detaljerede model.

B.4 Diskussion

Der observeres en god sammenhæng mellem indikatorerne (korrelationskoefficienten og MAE) og den visuelle inspektion af resultaterne. Det vurderes derfor, at den simplificerede model kan valideres, og at denne kan anvendes til videre brug i projektet.

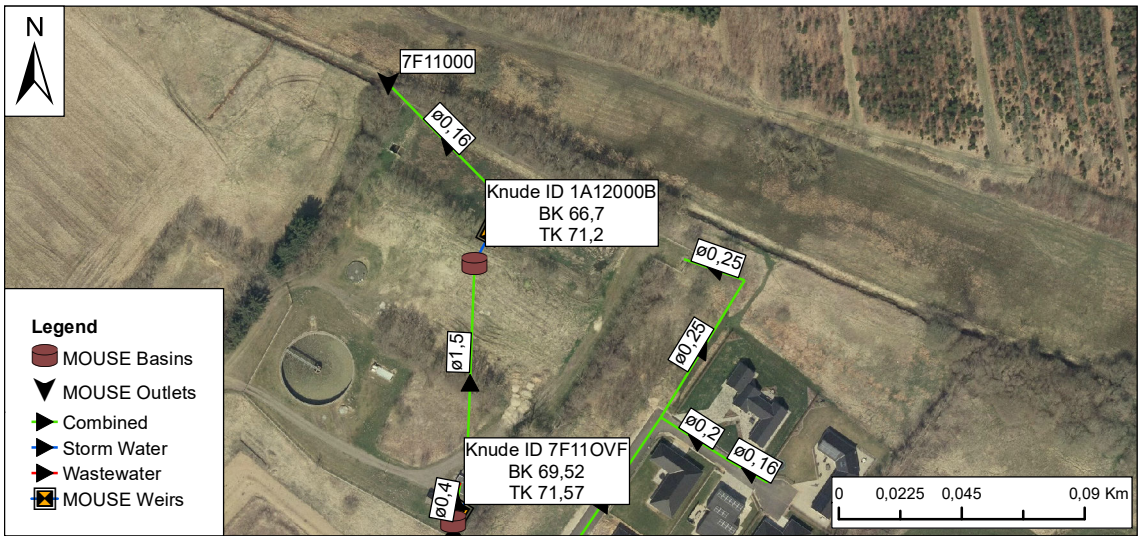
Den forøgede volumen af numerisk vand simuleret i den simplificerede model er relativt lille, og det forventes ikke, at det ekstra volumen af numerisk vand kommer til at have nogen væsentligt indflydelse på resultaterne.

Simuleringstiden er reduceret med 72% uden en væsentlig forværring af resultaterne, hvilket vurderes til at være nok til at forsvare en Online-model med optimeringsalgoritmen anvendt i kapitel 8 side 59.

C. Opdatering af hydraulisk model

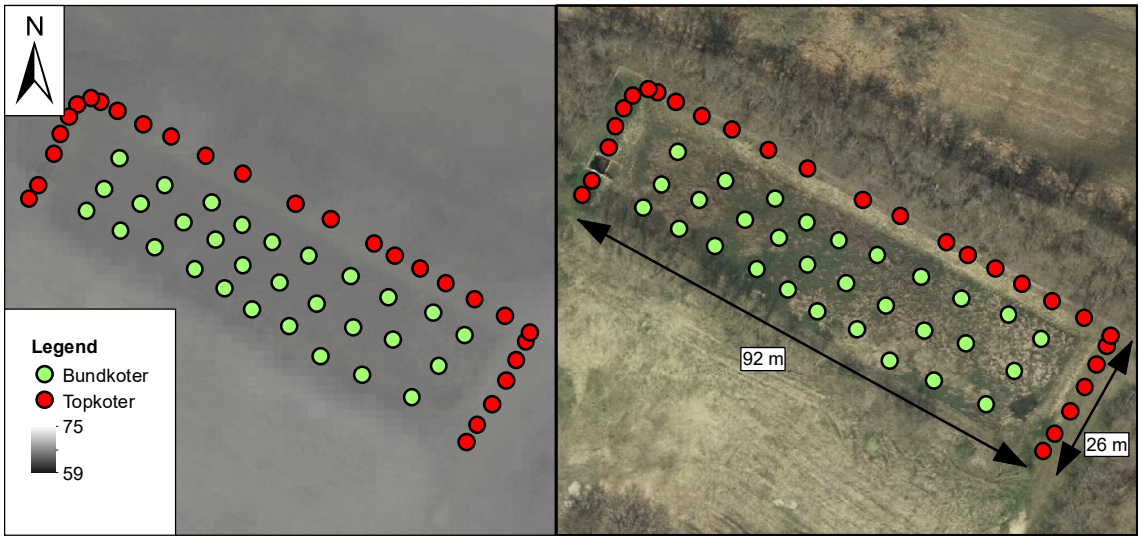
Den hydrauliske model er sidst opdateret af Krüger i oktober 2014. Siden da er der tilføjet et bassin i Bording ved det gamle renseanlæg, der implementeret ud fra tekniske tegninger udleveret af Lange [2015c], der vedhæftet i det elektroniske bilag elektronisk appendiks O.1 side 155.

Bassinet 1A12000B implementeres i den hydrauliske model i henhold til tegningerne appendiks O.1.1 side 155 og appendiks O.1.2 side 155 ind før overløb 7F11000 i forlængelse af ledning 23978 fra reguleringsbygværket 7F11OVF. Den nuværende ledning skiftes ud med en ø1500 og føres op til bassin 1A12000B. 1A12000B har dimensionerne ca. 50x22x4 m (lxbxh) med et totalt volumen på ca. $4000\,\mathrm{m}^3$, hvor der indsættes et overløb i kote 70,5 med en kantbredde på $5.75\,\mathrm{m}$. Overløbet ledes over i bassin 1A11010B med dimensionerne ca. 92x26x1,25 m (lxbxh) med et volumen på ca. $4000\,\mathrm{m}^3$, hvori der er isat en ø160 ledning til udløbet 7F11000. Opsætningen af bassinerne er illustreret i figur C.1.



Figur C.1. Afløbssystemet omkring bassinerne 1A12000B og 1A11010B.

Dimensionerne på 1A11010B er fundet ved GIS-kort, hvor længden og bredden er opmålt, og højden er bestemt ved et gennemsnit af bundkoterne trukket fra topkoterne i et antal punkter vist på figur C.2.



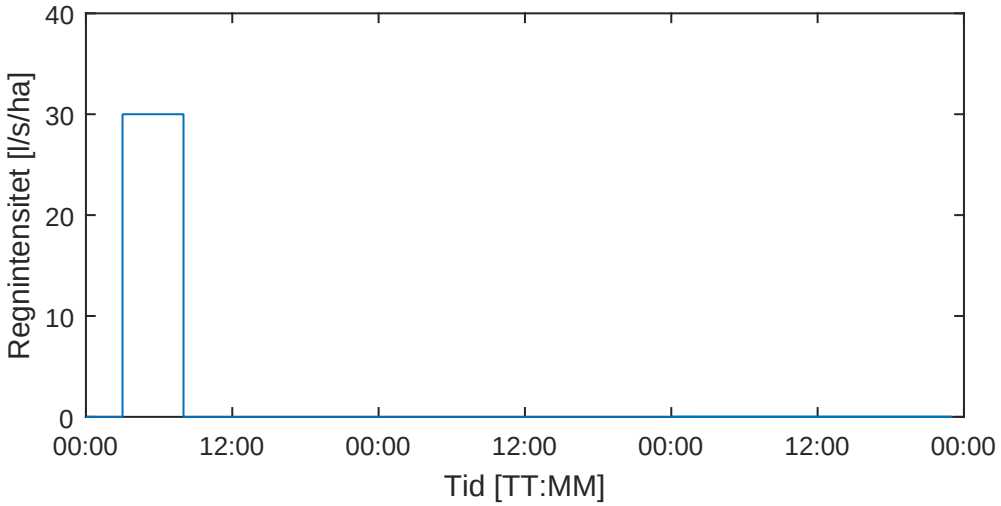
Figur C.2. Top- og bundkoter er fundet ved at indsætte punkter på et terænkortet, hvor der derefter er indhentet terrænniveau og så er terrænniveauerne i punkterne midlet.

Bund- og topkoter er bestemt fra et DHM-terræn kort med et $1.6\,\mathrm{m}$ grid hentet fra Geodatastyrelsen [2015].

D. Regnhændelse anvendt til styringspotentiale

I afsnit 3 er der anvendt en fiktiv regnhændelse. Regnhændelse er opbygget som en kasseregn. Det er en relativ kort regn på 5 timer á $30 \mathrm{l/s/ha}$.

Men for at sikre at bassinerne kan nå at blive tømt, sættes regnhændelsen til en længde på 96 timer, hvor der kun regner i 5 kontinuerte timer. Regnhændelsen er visualiseret i figur D.1

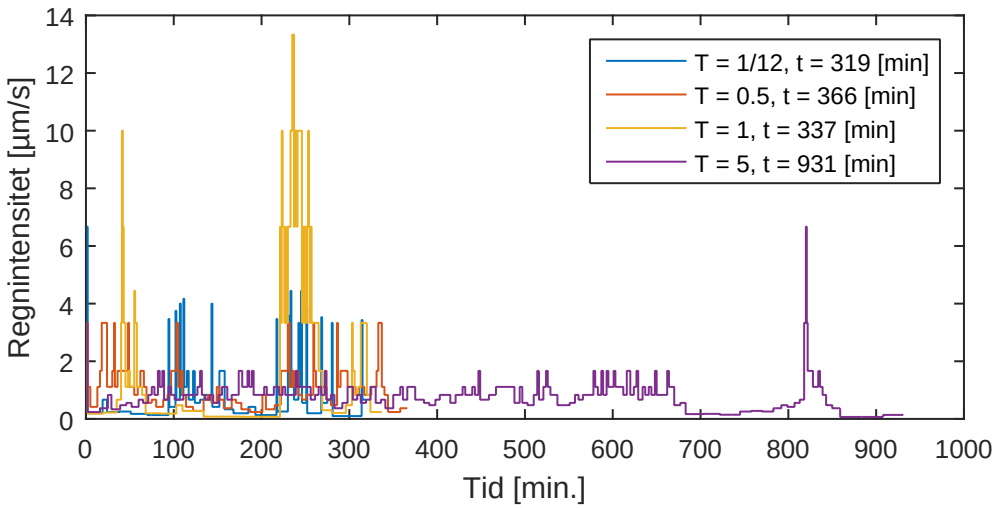


Figur D.1. Regnhændelse benyttet for styringspotentiale.

E. Driftsanalyse

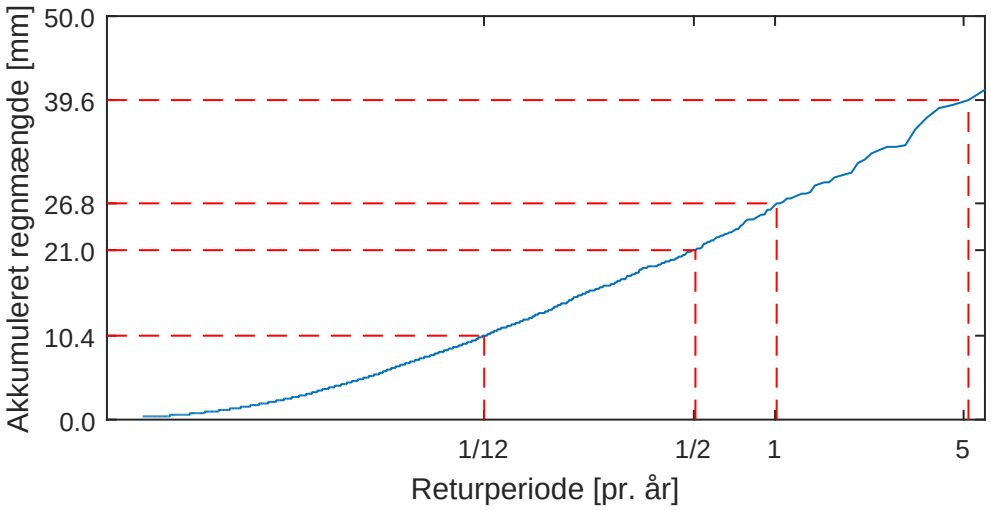
E.1 Anvendte regnhændelser

De historiske regnhændelser målt på Herning Centralrenseanlæg er illustreret i figur E.1.



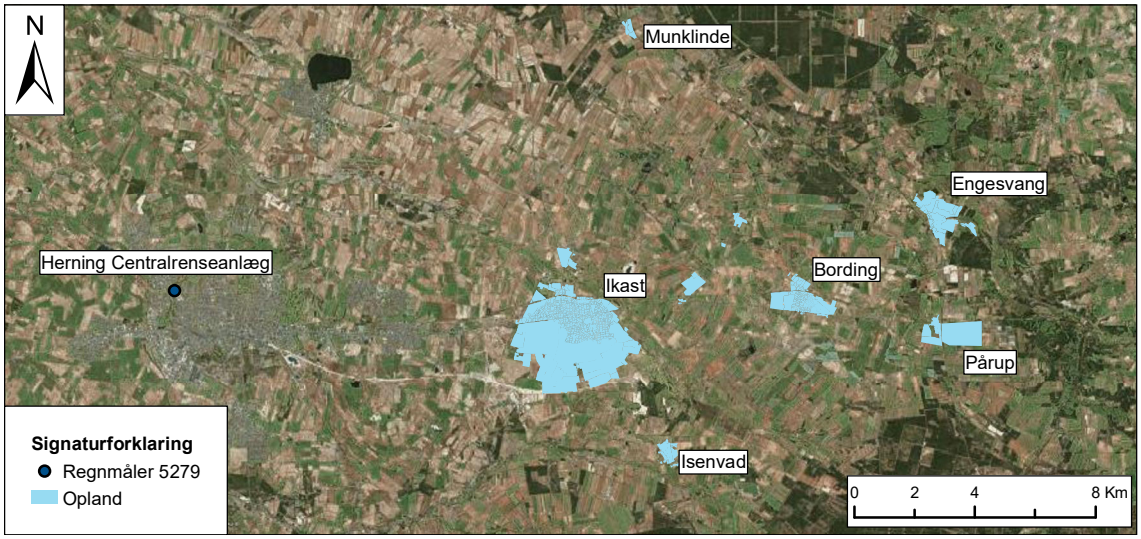
Figur E.1. Regnhændelse med en returperiode på 5 år fra stationsnummer 5279. Regnhændelsen har en akkumuleret regnmængde på 39,6 mm og en varighed på 931 minutter. Returperioden, T, er taget relativt til et år.

Returperiode for akkumulerede regnmængder fra regnhændelser målt på Herning Centralrenseanlæg fra 1979 til 2015 er vist i figur E.2. Den udvalgte regnhændelse til analysen er fremhævet ved de røde markeringer på figuren.



Figur E.2. Akkumulerede regnmænger fra regnhændelser med en returperioder fra stationsnummer 5279. x-aksen er logaritmisk således det er nemmere at differentiere mellem returperioderne.

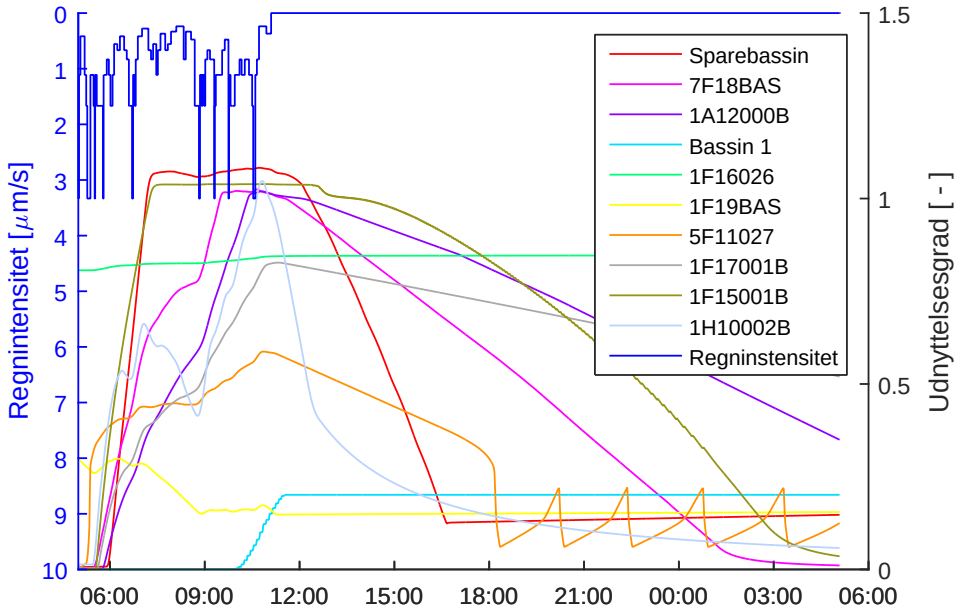
Placeringen af regnmåleren ved Herning Centralrenseanlæg ift. oplandet til Ikast Renseanlæg er vist i figur E.3.



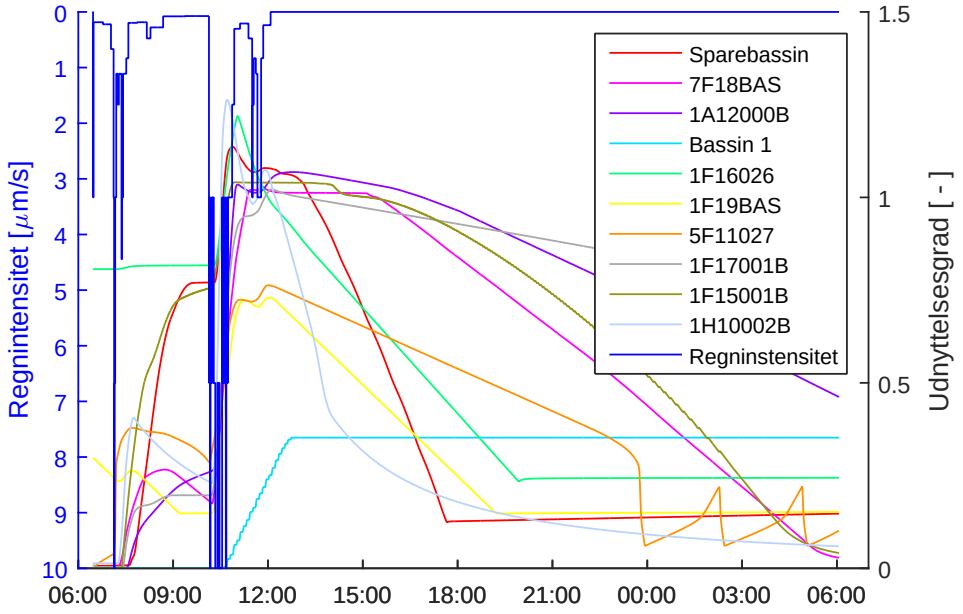
Figur E.3. Herning Centralrenseanlægs placering ift. oplandet til Ikast Renseanlæg.

E.2 Udnyttelsesgrader

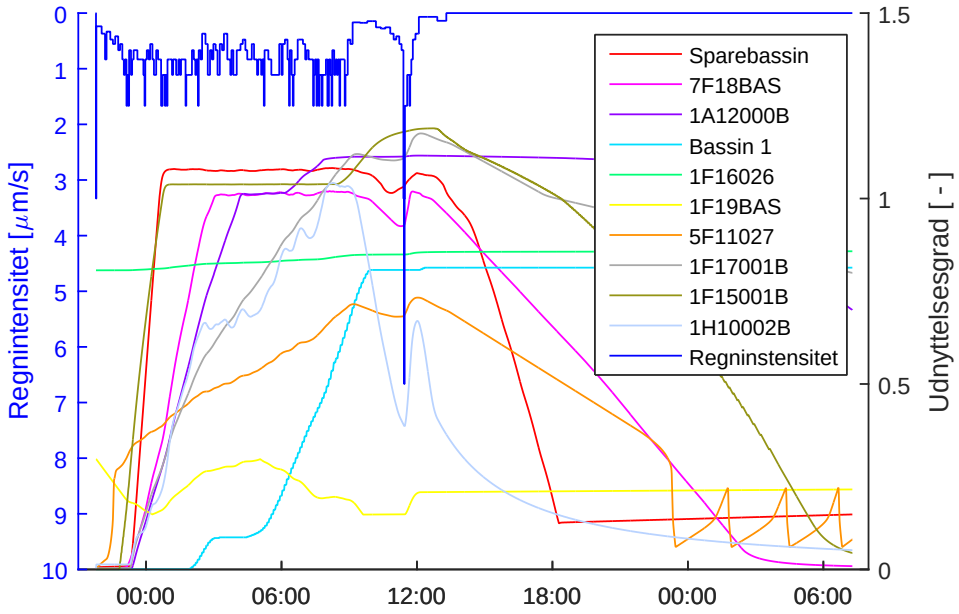
Udnyttelsesgraden for en returperioder på hhv. et halvt år, et år og fem år er illustreret i figur E.4, E.5 og E.6.



Figur E.4. Udnyttelsesgraden for en returperiode på et halvt år.



Figur E.5. Udnyttelsesgraden for en returperiode på et år.

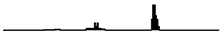
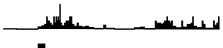
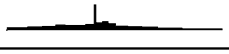


Figur E.6. Udnyttelsesgraden for en returperiode på fem år.

F. Regnhændelser i 2005 med nedbør større end 2 mm

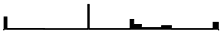
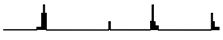
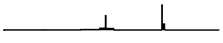
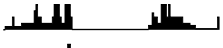
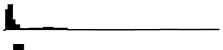
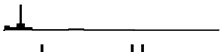
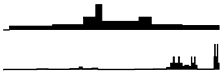
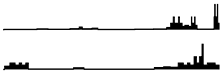
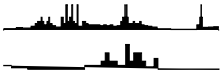
Tabel F.1 og F.2 viser regnhændelser med nedbør større end 2 mm for året 2005.

Herning Centralrenseanlæg stationsnr.: 5279

Nr.	Varighed [T]	Intensitet [μm/s]	Gns. [μm/s]	Maks. [μm/s]	Nedbør [mm]
1	7,27		0,183	1,110	5,0
2	11,52		0,376	1,110	15,8
3	3,18		0,469	1,670	5,6
4	3,23		0,393	1,670	4,8
5	12,42		0,273	1,110	12,4
6	1,18		0,509	0,833	2,4
7	1,68		0,486	1,670	3,2
8	6,72		0,389	1,670	9,6
9	2,23		0,368	1,110	3,2
10	3,77		0,280	1,110	4,0
11	4,65		0,238	0,833	4,2
12	2,65		0,854	23,300	8,4
13	4,23		0,483	1,670	7,6
14	7,72		0,222	0,667	6,4
15	9,23		0,421	3,330	14,2
16	0,52		3,540	13,300	7,0
17	3,77		0,176	1,110	2,6
18	5,62		0,335	1,110	7,0
19	3,33		0,431	3,330	5,4
20	3,95		0,588	3,330	8,6
21	1,07		0,657	5,000	2,8
22	1,85		0,961	3,330	6,6
23	1,58		2,470	16,700	14,4
24	2,92		0,398	1,110	4,4
25	3,85		0,230	1,670	3,4

Tabel F.1. Regnhændelser med nedbør over 2 millimeter registreret på Herning Centralrenseanlæg i år 2005.

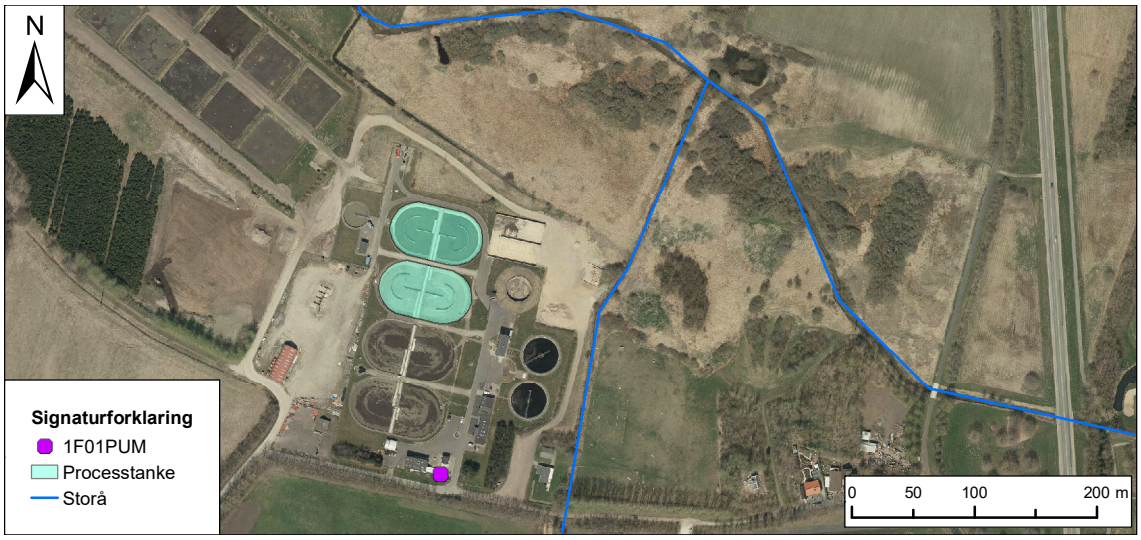
Herning Centralrenseanlæg stationsnr.: 5279

Nr.	Varighed [T]	Intensitet [μm/s]	Gns. [μm/s]	Maks. [μm/s]	Nedbør [mm]
26	5,03		0,528	5,000	9,8
27	3,28		1,060	3,330	12,8
28	1,80		7,160	33,300	47,0
29	0,65		1,000	3,330	2,6
30	0,13		4,070	16,700	2,8
31	4,67		0,130	1,670	2,4
32	1,48		0,445	3,330	2,6
33	2,27		0,564	10,000	4,8
34	1,20		0,868	3,330	4,0
35	1,65		0,633	3,330	4,0
36	0,28		2,040	13,300	2,4
37	3,25		0,187	6,670	2,4
38	2,07		0,480	6,670	3,8
39	1,98		1,610	6,670	11,8
40	2,33		0,517	1,670	4,6
41	5,97		0,568	3,330	12,4
42	1,52		1,120	16,700	6,4
43	0,70		1,010	10,000	3,0
44	0,18		7,220	20,000	5,4
45	2,37		0,257	6,670	2,4
46	1,72		0,833	3,330	5,4
47	4,55		0,316	0,833	5,4
48	3,93		0,225	0,556	3,4
49	5,10		0,315	3,330	6,0
50	1,13		0,725	3,330	3,2
51	0,58		0,833	3,330	2,0
52	5,55		0,409	6,670	8,4
53	2,72		0,610	6,670	6,2
54	6,10		0,945	3,330	21,0
55	6,08		0,636	3,330	14,2
56	0,90		1,420	10,000	4,8
57	1,83		0,421	3,330	3,0
58	4,67		0,780	3,330	13,4
59	5,68		0,283	3,330	6,0
60	6,78		0,319	1,670	8,0
61	3,28		0,202	0,333	2,6
62	4,70		0,235	0,833	4,2
63	7,58		0,658	3,330	18,2
64	2,78		0,198	1,110	2,2

Tabel F.2. Regnhændelser med nedbør over 2 millimeter registreret på Herning Centralrenseanlæg i år 2005.

G. Placering af procestanke

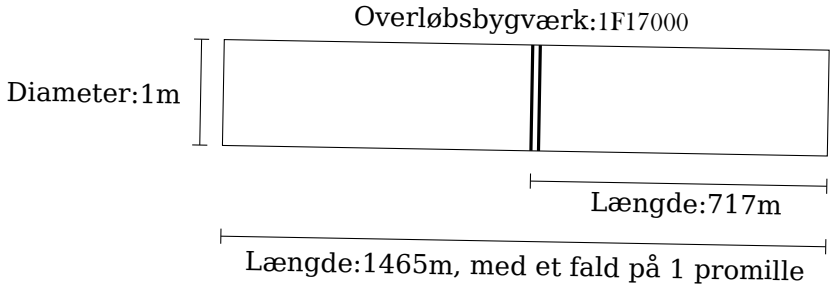
Beliggenheden af de ubenyttede procestanke på renseanlægget fremgår af figur G.1.



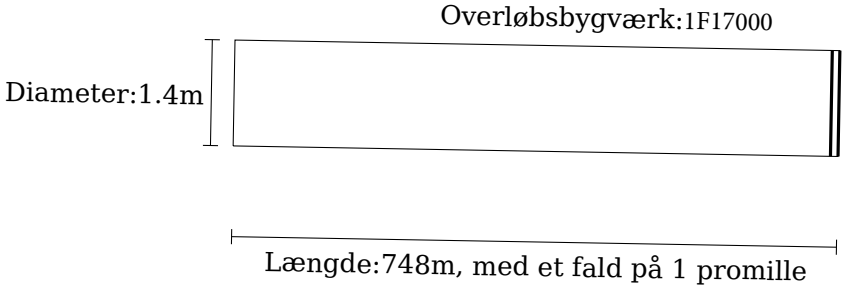
Figur G.1. Placering af procestankene og pumpehuset 1F01PUM.

H. Skitsetegning af rørbassinet

Skitsetegning af rørbassinet implementeret i de lokale styringsstrategier, jf. afsnit 5.4.2 side 31 og afsnit 5.4.3 side 34 er vist på nedenstående figur.

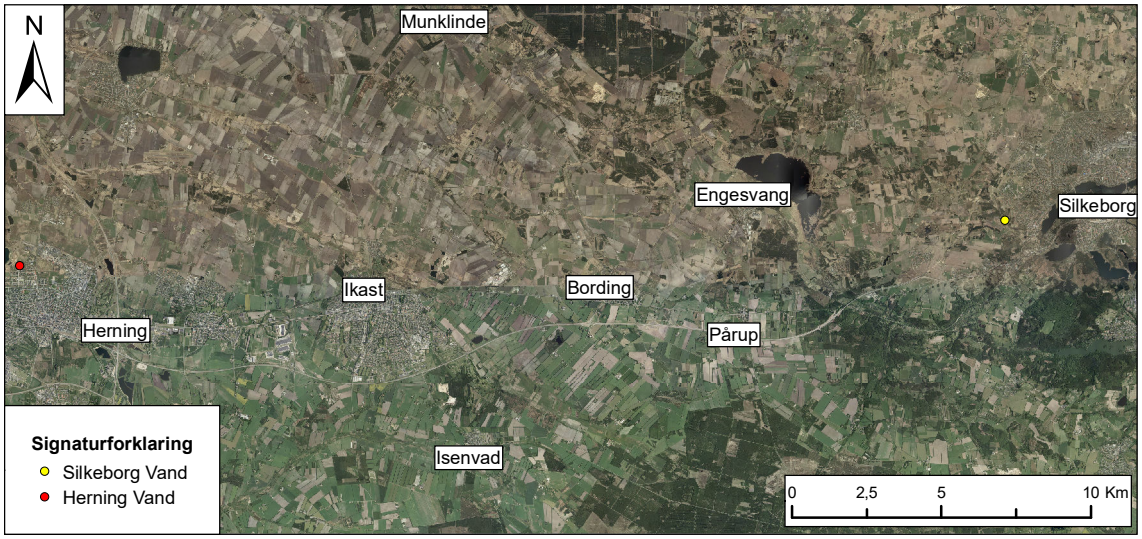


Skitsetegning af rørbassinet implementeret i den globale styringsstrategi, jf. afsnit 6.5 side 51 er vist på nedenstående figur.



I. Regnens indflydelse

En meget afgørende faktor ved styring af afløbssystemer og generelt bare ved analyse af afløbssystemer er input af regn. Nedbørens intensitet og varighed kan være en afgørende årsag til at et afløbssystem med dets tilhørende bassiner går i overløb eller opstuver til terræn. Nedbøren vil typisk variere såvel tidsligt som stedsligt. Oplandet til Ikast Renseanlæg omfatter i alt 6 byer med større individuelle afstande, derved er der høj risiko for at regnen, der falder på Herning Centralrenseanlæg ikke nødvendig er den samme, der falder rundt omkring i oplandet. I figur I.1 er byernes placering i oplandet illustreret med tilgængelige regnmålere i regionen.



Figur I.1. Oversigt over tilgængelige regnmålere i regionen. Herning Centralrenseanlæg er placeret ved Herning Vand, mens Silkeborg Vandværk er placeret ved Silkeborg Vand.

Som illustreret i figur I.1 er der i oplandet store individuelle afstande, der potentielt vil medføre store stedlige variationer af regnen, men ydermere er det også illustreret, at der er få regnvandsmålere i regionen. Dette medfører, at mængden af relevant data er minimal, og datagrundlaget er ikke optimalt. Et optimalt datagrundlag vil enten bestå i radardata eller flere opstillede regnmålere i hver by i oplandet. Da disse data ikke er tilgængelige, er det derimod valgt at inkludere de data som er tilgængelige. Det er derfor valgt, at benytte regnmålere opsat ved Herning Centralrenseanlæg og Silkeborg Vandværk.

Det er valgt at undersøge hvilken effekt styringen Styring 2C fundet fra afsnit 6.5

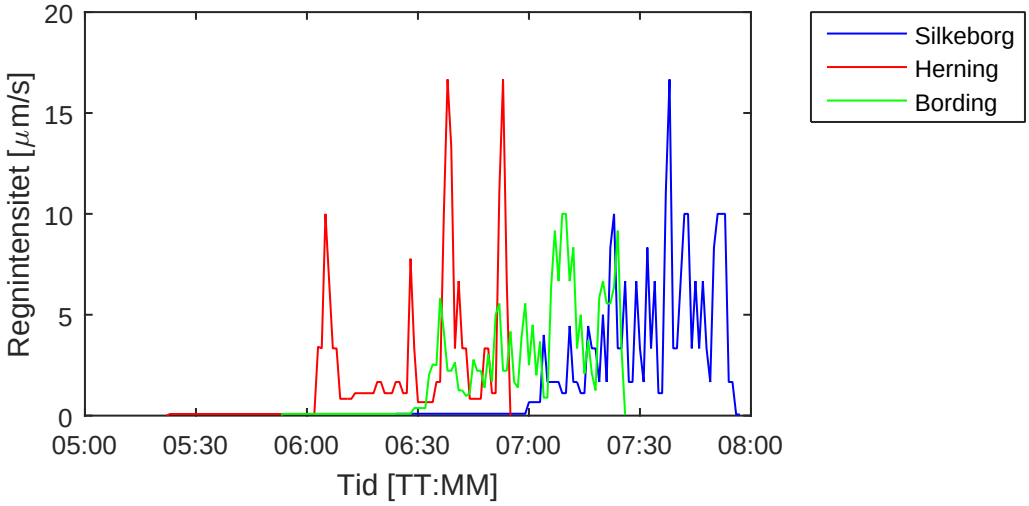
har i tilfælde af stedslig variation af regnen samt i tilfælde af ekstremt nedbør, der er vurderet som værende den regn, hvor der forekommer overløb ved samtlige bassiner i oplandet. Det er valgt at undersøge følgende tre forskellige scenarier:

- Scenarie 1: Stedlig variation med inklusion af Silkeborg Vandværk.
- Scenarie 2: Stedlig variation ved skalering af Herning Centralrenseanlæg.
- Scenarie 3: Dimensionsgivende regn ved brug af regnrækker.

Det er valgt at fremhæve regnhændelsen svarende til en 10 mm nedbør som vist i figur 6.1 præsenteret i afsnit 6.1.1, eftersom det har vist, at der generelt er størst styringspotentiale ved hændelser, der kan karakteriseres som værende mellem-regnhændelser mellem lav og højt nedbør. Det er valgt at fremhæve denne regnhændelse for scenarie 1 og 2. I scenarie 3 er det valgt at undersøge, hvordan styringen reagerer ved en regnhændelse der kan karakteriseres som værende dimensionsgivende.

I.1 Scenarie 1

Som vist i figur I.1 er det tydeligt, at byerne Ikast, Isenvad samt Munklinde ligger nærmere Herning end Silkeborg, hvormed det er valgt at antage, at den regn der falder i Herning, må være den samme som distribueret til byerne i oplandet. For Engesvang og Pårup gælder der derimod en kortere afstand til Silkeborg, hvormed denne regnmåler er taget i betragtning. Endelig gælder der, at Bording er placeret omtrent mellem Herning og Silkeborg, hvormed det er valgt at interpolere nedbøren mellem de to byer. Regnens distribution for en 10 mm hændelse vil da være illustreret som figur I.2.



Figur I.2. Regnhændelse for Herning, Bording og Silkeborg benyttet i simulering af scenarie 1. Det har været nødvendigt at benytte en regnhændelse svarende til 10.5 mm, da datoen for regnhændelsen svarende til 10mm illustreret i figur 6.1 ikke forefindes for regnmåleren i Silkeborg.

Som illustreret i figur I.2 vil der forekomme en tidsforskydning af regnen i hver af de tre lokationer. Dette skyldes at regnen har en stedlig variation og derfor ikke bidrager på samme tid i hele oplandet. Overløbsvolumen der forekommer ved simulering af denne hændelse er vist i tabel I.3 side 131.

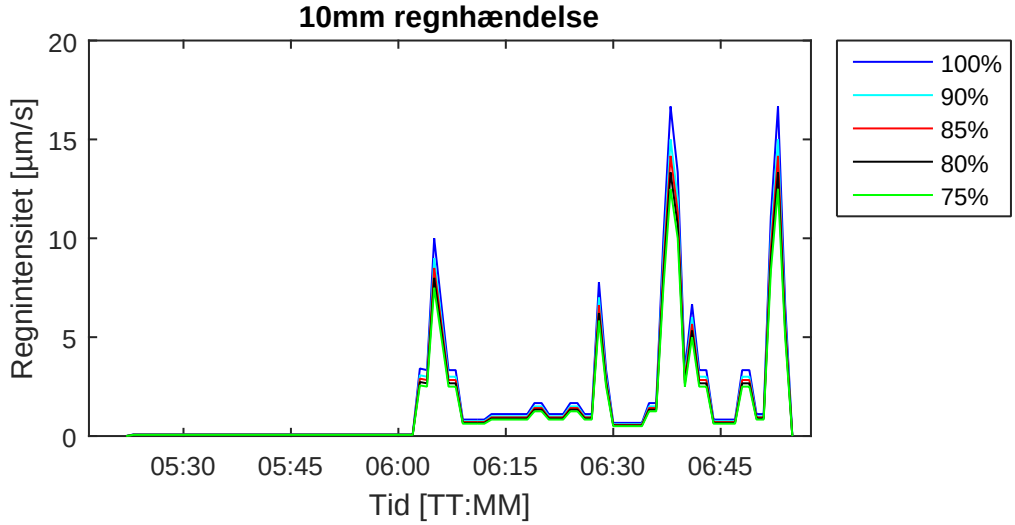
I.2 Scenarie 2

I dette scenarie er det valgt at tage hensyn til regnmåleren i Herning og lave en vægtning ift. dets individuelle afstande i såvel østlig som nordlig retning. Denne vægtning er lavet på baggrund af regnens variation i Danmark, følger vindretningen, der oftest er imod nordøstlig retning [Danmarks Vindmølleforening, 2013]. Det er ligeledes valgt at indtænke føhn-effekten, hvormed skaleringen af regnen falder i sydøstlig retning. Ved at lave denne vægtning fås en skalering som vist i tabel I.1.

By	**Skalering** [%]
Herning	100
Ikast	90
Munklinde	90
Isenvad	85
Bording	80
Engesvang	80
Pårup	75

Tabel I.1. Skalering af nedbør ift. regn målt ved Herning Centralrenseanlæg, der er placeret vest for de øvrige byer.

Efter denne skallering af regnen er foretaget, vil der forekomme følgende distribuering af regnens stedlige variation som vist i figur I.3.



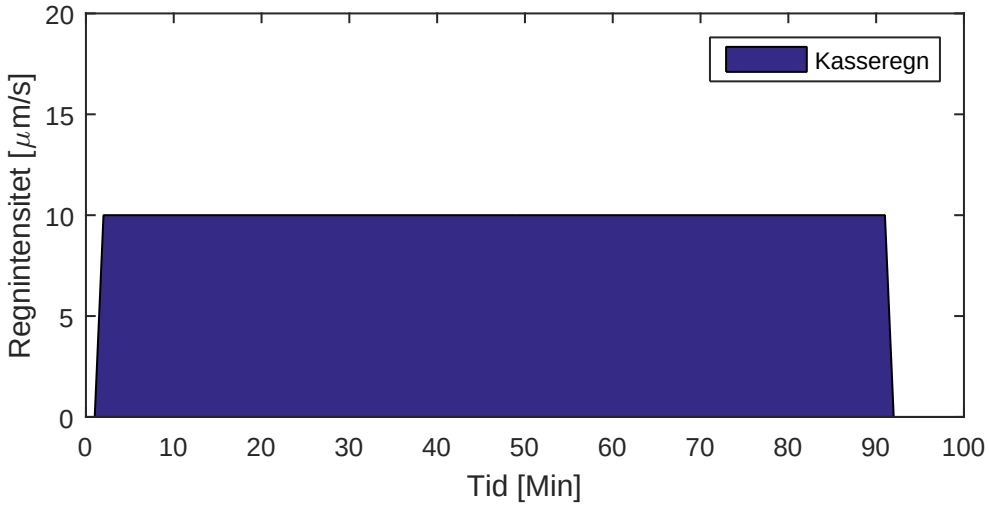
Figur I.3. Regnhændelse, der benyttes til simulering af scenarie 2.

I figur I.3 er det tydeligt, at der ikke forekommer en tidsforskydning. Derimod er skaleringen tydeligt illustreret. Skaleringen af regnen kan være svær at estimere, men ovenstående skalering er vurderet realistisk. Resultater af simuleret overløbsvolumen er ved denne hændelse er vist i tabel I.3 side 131.

I.3 Scenarie 3

I dette scenarie er det valgt at undersøge, hvorledes styringen af afløbssystemet vil reagere, hvis der forekommer en ekstremhændelse svarende til den dimensionsgivende regn for et udvalgt bassin. Det er valgt at tage hensyn til den dimensionsgivende

regn for bassin 5F11027. Det er valgt at udpege dette bassin grundet dets store areal-specifikke volumen. Hvis dette bassin går i overløb, da vil sandsynligheden for de resterende bassiner går i overløb være høj. Da bassinet allerede er indlagt og dimensioneret er det valgt at undersøge den dimensionsgivende regnvarighed og intensitet ud fra regnrækkerne, da der ikke eksisterer viden om dimensioneringen af det specifikke bassin. Dimensioneringen af bassiner foregår med basis fra Bentzen [2006]. Det er beregnet at den dimensionsgivende regn, der benyttes til konstruering af kasseregnen vil have en varighed på 90 minutter og med en regnintensitet på 10 μm/s, hvilket svarer til en akkumuleret regn på over 30 mm og må betegnes som værende ekstrem for bassinerne. Udregningen af kasseregnen kan findes i afsnit I.3.1. Kasseregnen der benyttes som input for dette scenaries simulering er vist i figur I.4.



Figur I.4. Kasseregnen, der benyttes til simulering af scenarie 3.

I.3.1 Dimensionsgivende regn for bassiner

I afsnit I er der angivet et bassin – 5F11027 der har et angivet volumen, men da der ikke findes informationer om dimensionering af dette bassin, er det valgt at konstruere en kasseregn svarende til dets volumen. Der er benyttet inspiration fra Bentzen [2006] til dimensionering af bassiner og kasseregne. Et bassins dimensioner skal være store nok til at holde opmagasinering igennem en given regnperiode med varighed t_r. Opmagasineringen regnes som ændringen mellem ind og udløb fra bassinet.

$$Vol = (Q_{ind} - Q_{ud}) \cdot t_r \tag{I.1}$$

Indløbet kan regnes som intensiteten multipliceret med arealet der bidrager til afstrømningen

$$Vol = (i * F_r - Q_{ud}) \cdot t_r) \tag{I.2}$$

$$Vol = (i * F_r - Q_{ud}) \cdot t_r) \tag{I.3}$$

$$Vol = (c * t_r^{-\alpha} * F_r - Q_{ud}) \cdot t_r) \tag{I.4}$$

Hvor:

c	konstant $[-]$
α	konstant $[-]$
F_r	Reduceret areal $[ha]$
Q_ud	udløb fra bassin $[\frac{l}{s}]$
Vol	Volumen af bassin $[m^3]$
t_r	Regnens varrighed $[s]$
i	Regnens intensitet $[l/s/ha]$

Det forudsættes at den dimensionsgivende returperiode for bassinet er fastsat på 5 år, grundet almen praksis i de danske kommuner ved bassin dimensionering. Gyldigheden for regnvarrigheden t_r ligger ved forudsætning af en dimensionsgivende retuperiode på T=5 år mellem 15 min og 4 døgn. Der er benyttet følgende variable vist i tabel I.2.

c $[-]$	α $[-]$	F_r $[ha]$	Vol $[m^3]$	Q_ud $[\frac{l}{s}]$
28070	0,76	1,19	295	16,5

Tabel I.2. Variable benyttes til at finde dimensionsgivende regn

Ved dimensionering er det ikke muligt at finde en regnvarrighed og intensitet der svarer til det angivne volumen. Dette kan indikere at det anviste reduceret areal ikke er korrekt. Det er i stedet valgt at konstruere en regnrække svarende til en varrighed på 90 min med en intensitet på 10 μm/s, hvilket er tilstrækkelig for overløb i samtlige bassiner.

I.4 Overløbsvolumen

Efter simulering er der forekommet følgende reducering af total overløbsvolumen og udløb til Storå som vist i tabel I.3. Det er valgt at medtage en reference tilstand, hvilket svarer til regnhændelsen målt ved Herning Centralrenseanlæg for samme dato uden skalering for sammenligning med scenarie 1 og 2.

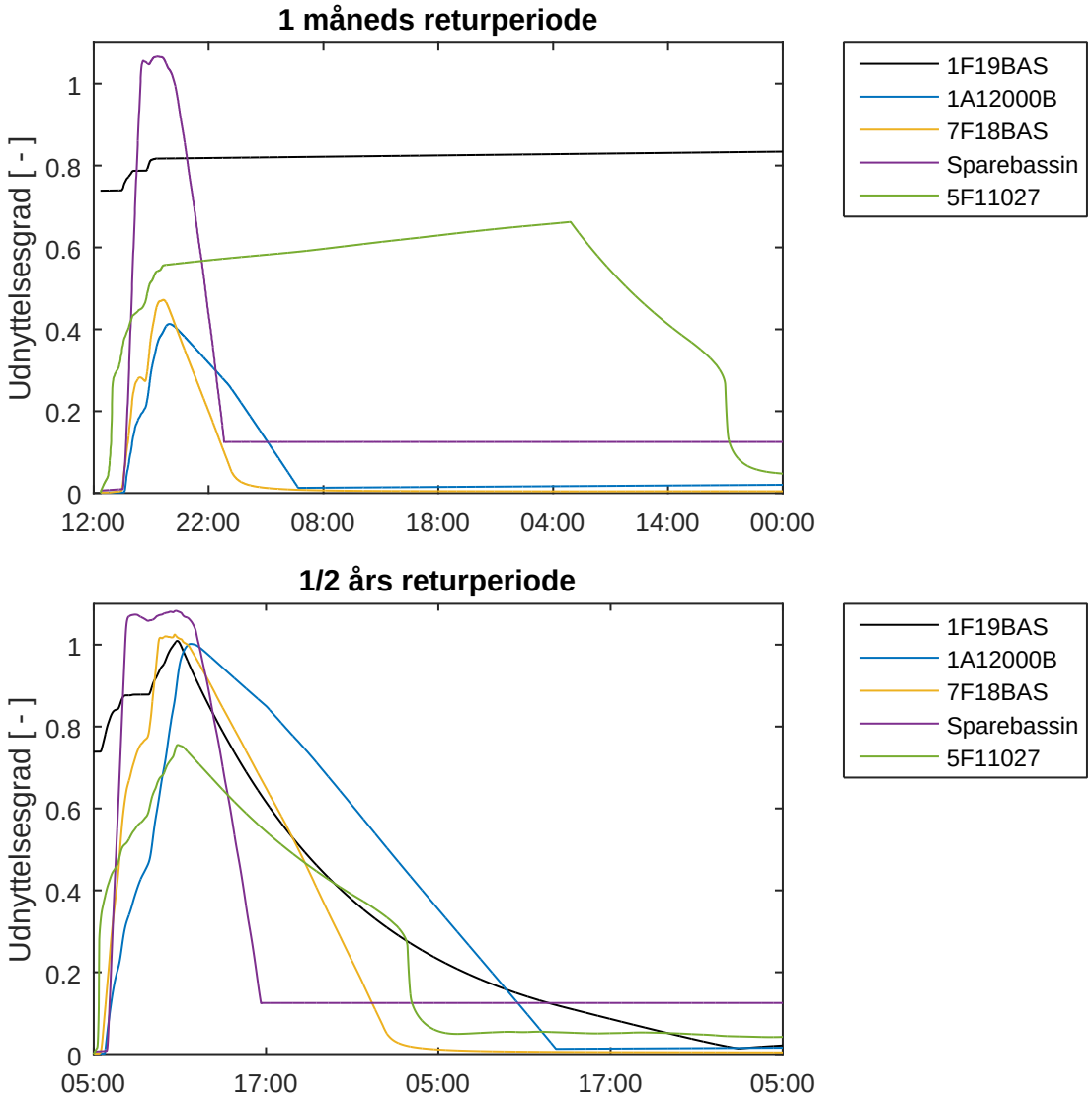
Udløb	**Nuværende** [m^3]	**Styring 2C** [m^3]	**Ændring** [m^3]	**Ændring** [%]
		Total		
Reference	6986,8	4450,3	-2536,5	-36,3
Scenarie 1	6986,8	4450,3	-2536,5	-36,3
Scenarie 2	5190,6	8316,5	3125,9	60,2
Scenarie 3	61842,6	48886,0	-12956,6	-21,0
		Storå		
Reference	751,8	0,0	-751,8	-100,0
Scenarie 1	751,8	0,0	-751,8	-100,0
Scenarie 2	239,5	0,0	-239,5	-100,0
Scenarie 3	11006,4	390,7	-10615,7	-96,5

Tabel I.3. Oversigt over ændring i overløbsvolumen over 10 mm nedbør. En negativ/positiv ændring indikerer hhv. reducering/forøgelse i overløbsvolumen.

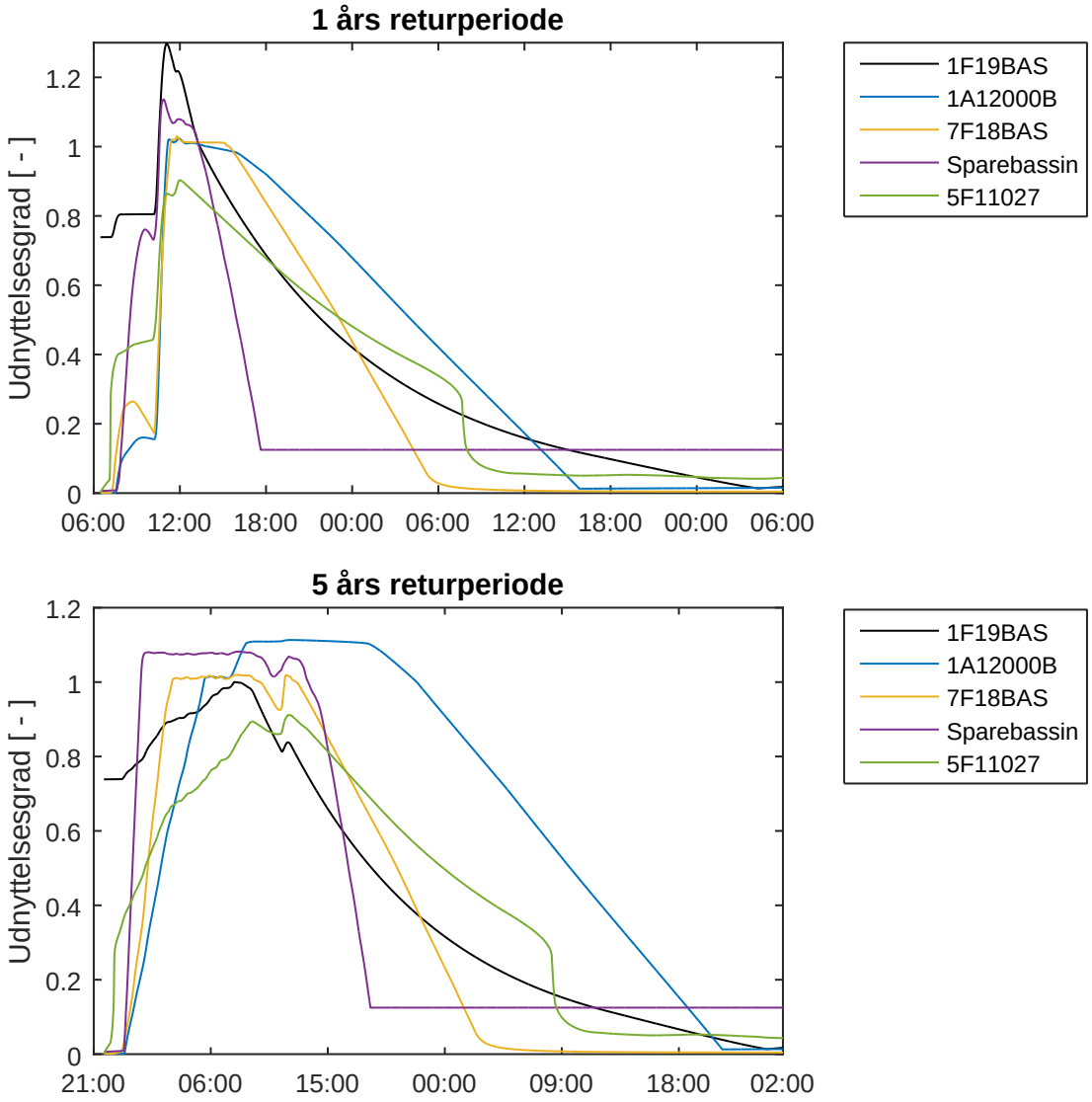
Som illustreret i tabel I.3 vil en effekt af at benytte to regnmålere ikke være tilstede, i og med der ikke er forskel mellem overløbsvolumen fra reference til scenarie 1. Ligeledes har en skalering af samme regn fordelt på oplandets deloplande ikke den store effekt grundet den lave forskel mellem overløbsvolumenerne fra reference til scenarie 2. Det er tydeligt, at der er et stort potentiale for at reducere udledninger ved styringen for både det totale overløbsvolumen og til Storå. Det fremgår af tabel I.3, at ved Scenarie 1 og 2 elimineres udledninger til Storå. Reduktioner nærmer sig 40% for de to scenarier og referencen. Der er en mindre indikation om, at hvis regnen bliver nedskalleret som i scenarie 2 i stedet for tidsforskudt, som forekommer i scenarie 1, da vil der være mulighed for større reduktioner. Det skal dog bemærkes at scenarierne kun er kørt for en middelhændelse, der sagtens kan have en anden fluktuation end andre middelhændelser, hvormed de fundne reduktioner blot skal ses som værende indikationer om, at styringen fungerer selv ved ændring af regnen. For at undgå usikkerheden omkring regnhændelses fluktuationerne bør der undersøges over et helt år i stedet gerne med input af såvel regnmålere som radar, men grundet tidsnød er dette fravalgt. Endelig er det illustreret i tabel I.3, at der ved scenarie 3 forekommer en reduktion på over 20%, hvilket er meget positivt. Dette betyder, at styringen fungerer selv under kraftig regn, hvor der selvom der forekommer overløb på samtlige bassiner, vil det samlede overløbsvolumen være kraftig reduceret fra den nuværende tilstand af afløbssystemet.

J. Forbedring af nuværende styringsstrategi

Udnyttelsesgraden for de enekelte bassiner bestemt for de udpegede regnhændelser er illustreret på figur J.1 og J.2 for hhv., en måned, et havlt år, et år og fem årig returperioder.



Figur J.1. Udnyttelsesgraden for de styrede bassiner ved de valgte returperioder.



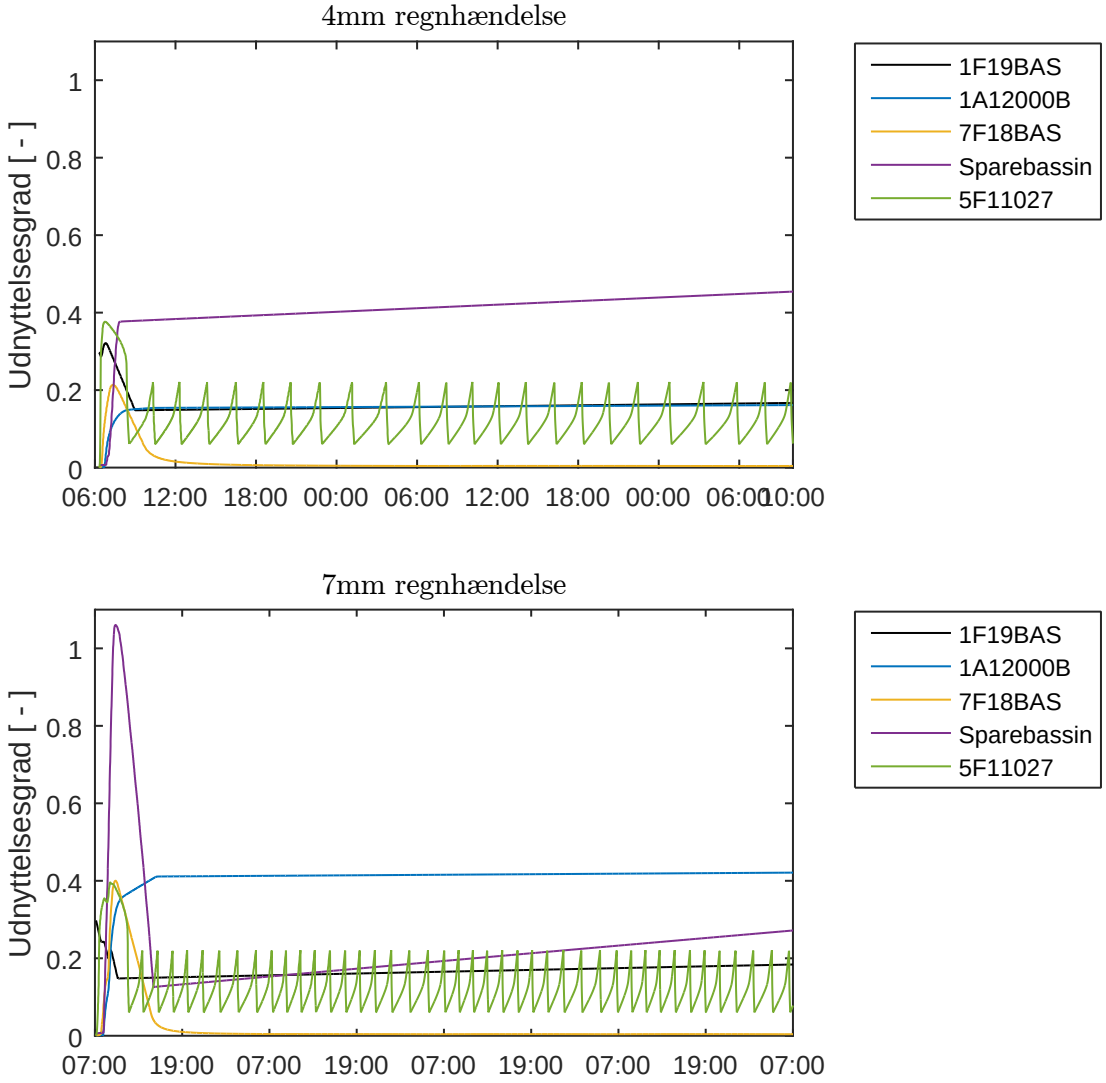
Figur J.2. Udnyttelsesgraden for de styrede bassiner ved de valgte returperioder.

K. Regelbaseret global styring

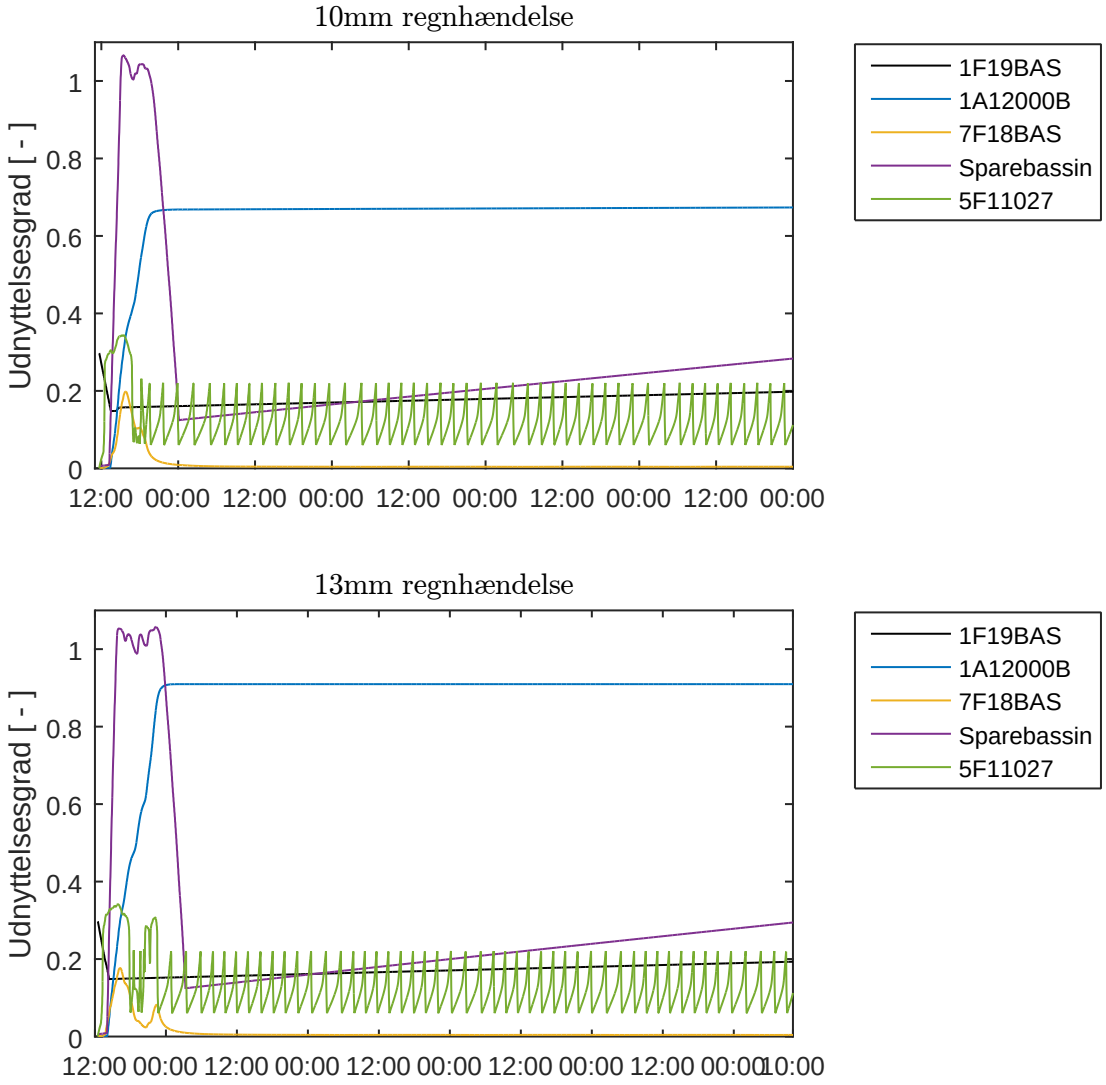
K.1 Udnyttelsesgrader

Udnyttelsesgraderne for hver regelbaseret styring er vist i følgende afsnit.

K.1.1 Nuværende styring

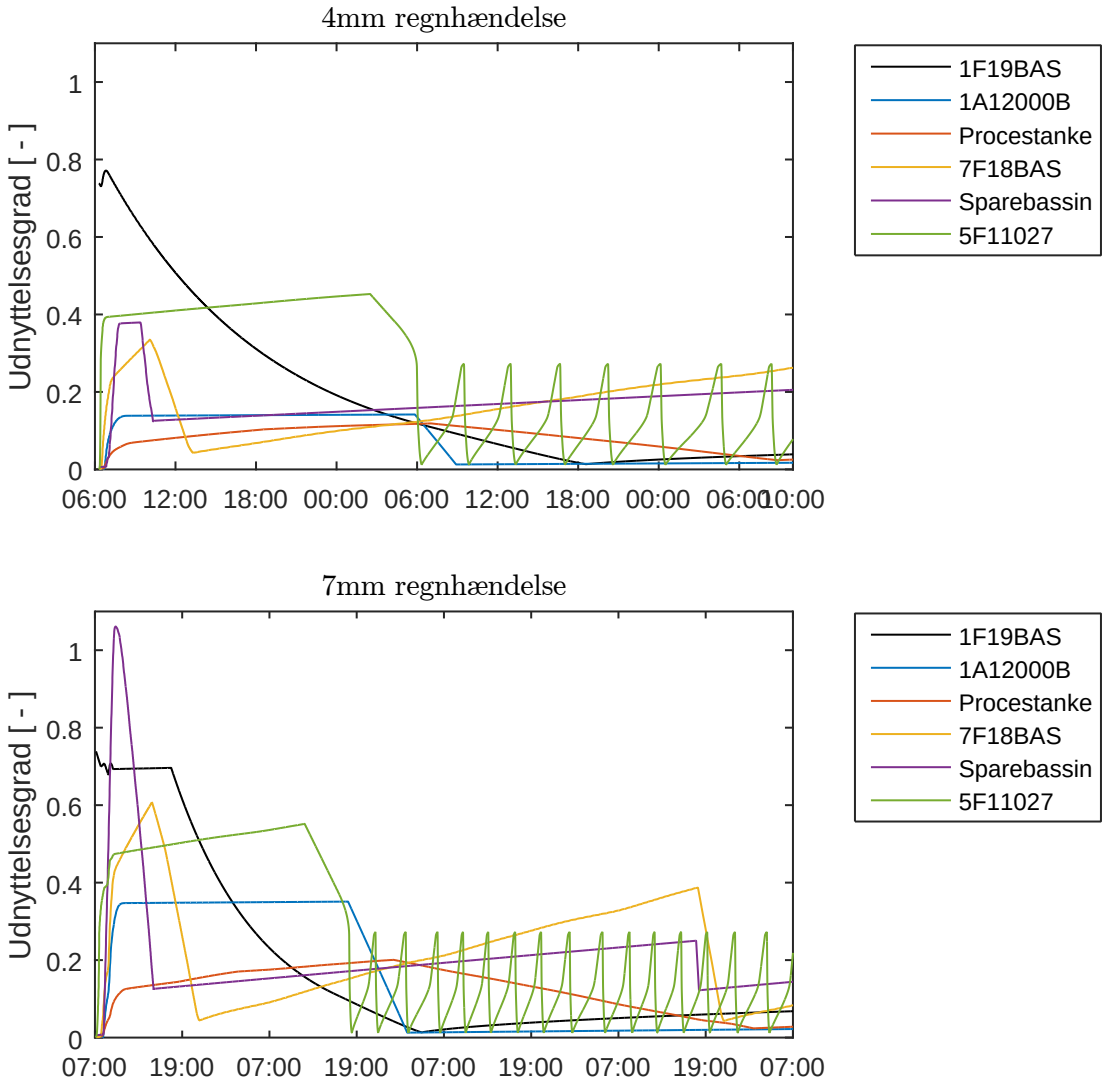


Figur K.1. Udnyttelsesgraden for de styrede bassiner ved de valgte returperioder.

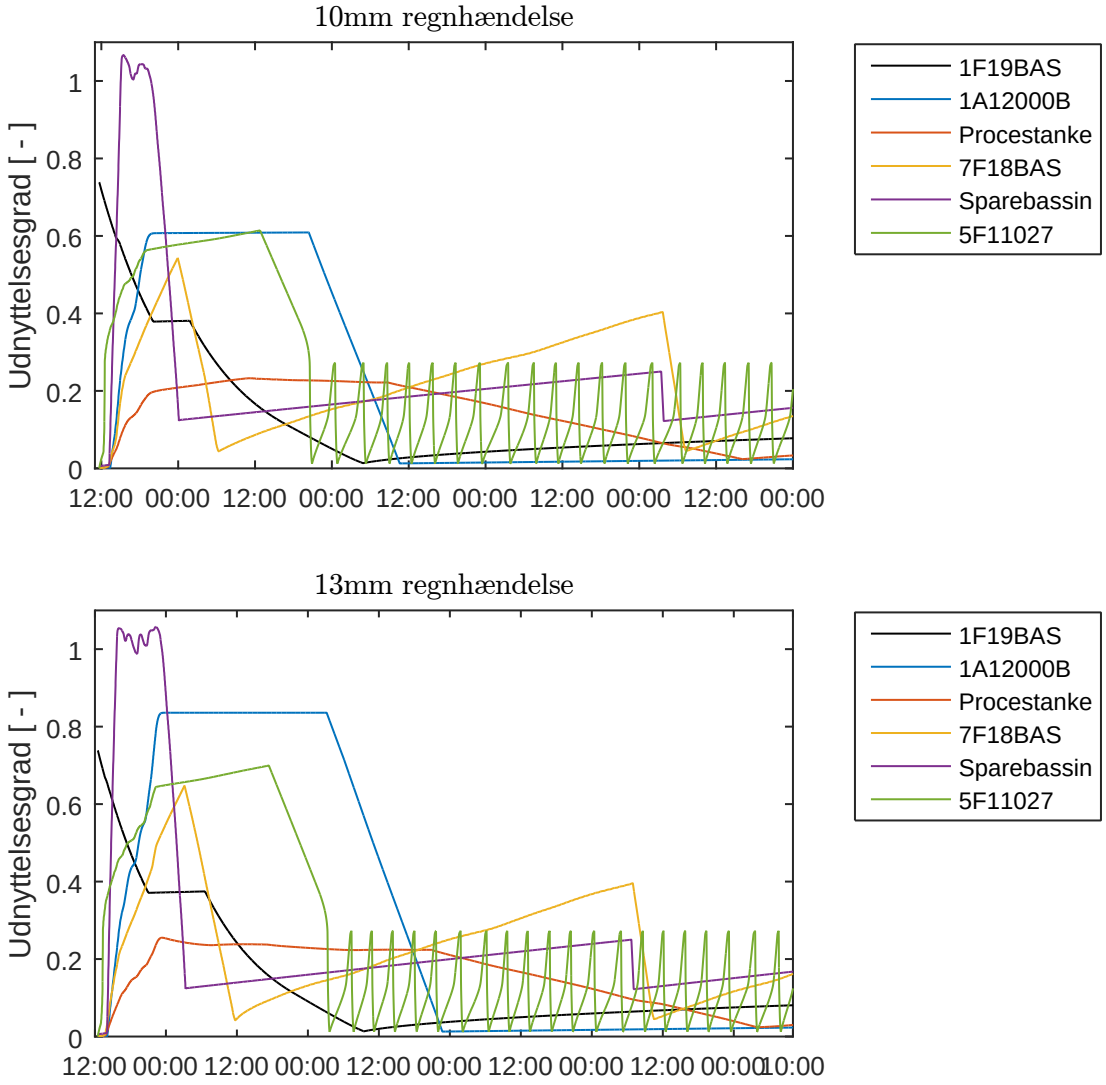


Figur K.2. Udnyttelsesgraden for de styrede bassiner ved de valgte returperioder.

K.1.2 Areal-specifik volumen

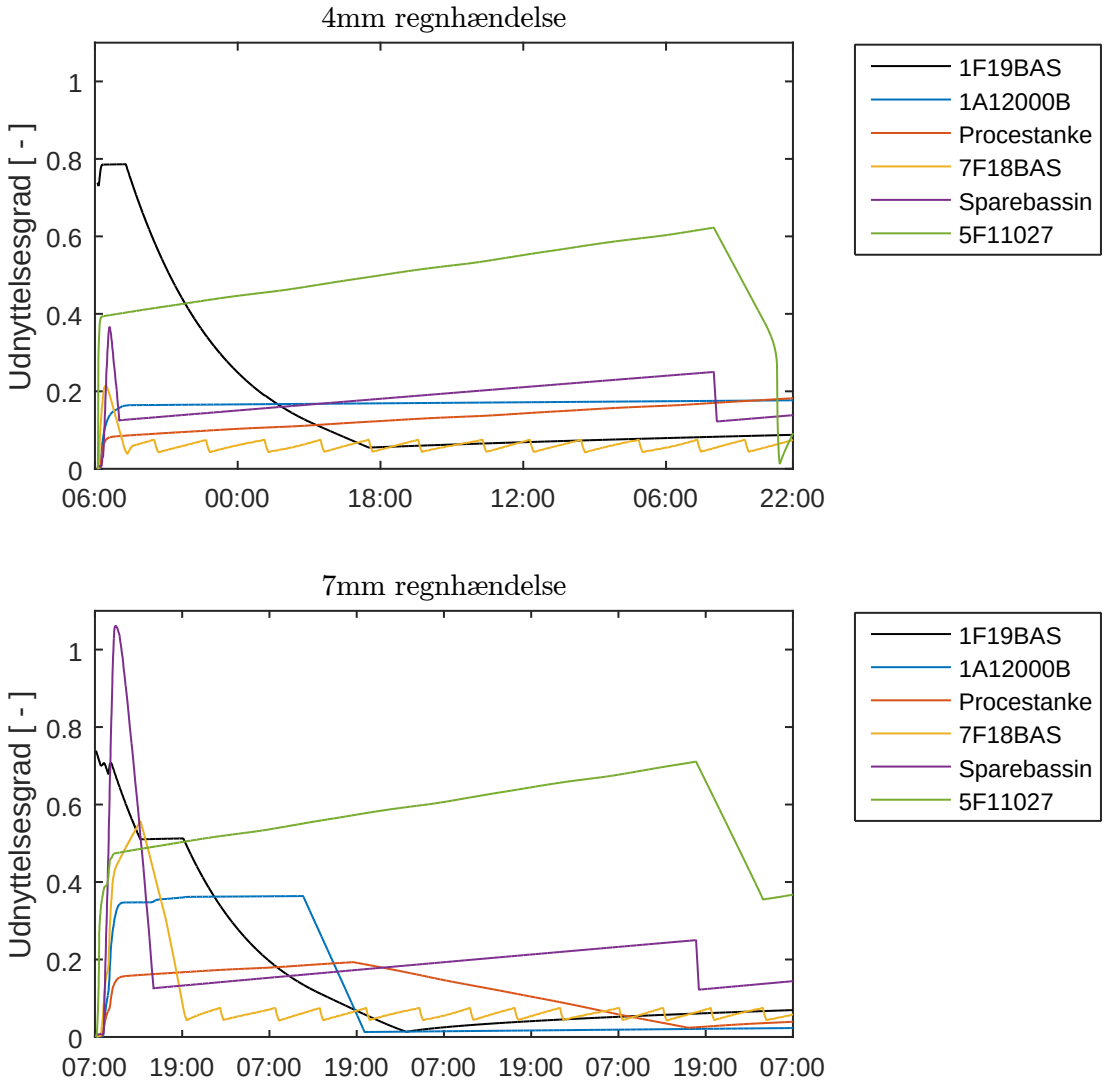


Figur K.3. Udnyttelsesgraden for de styrede bassiner ved de valgte returperioder.

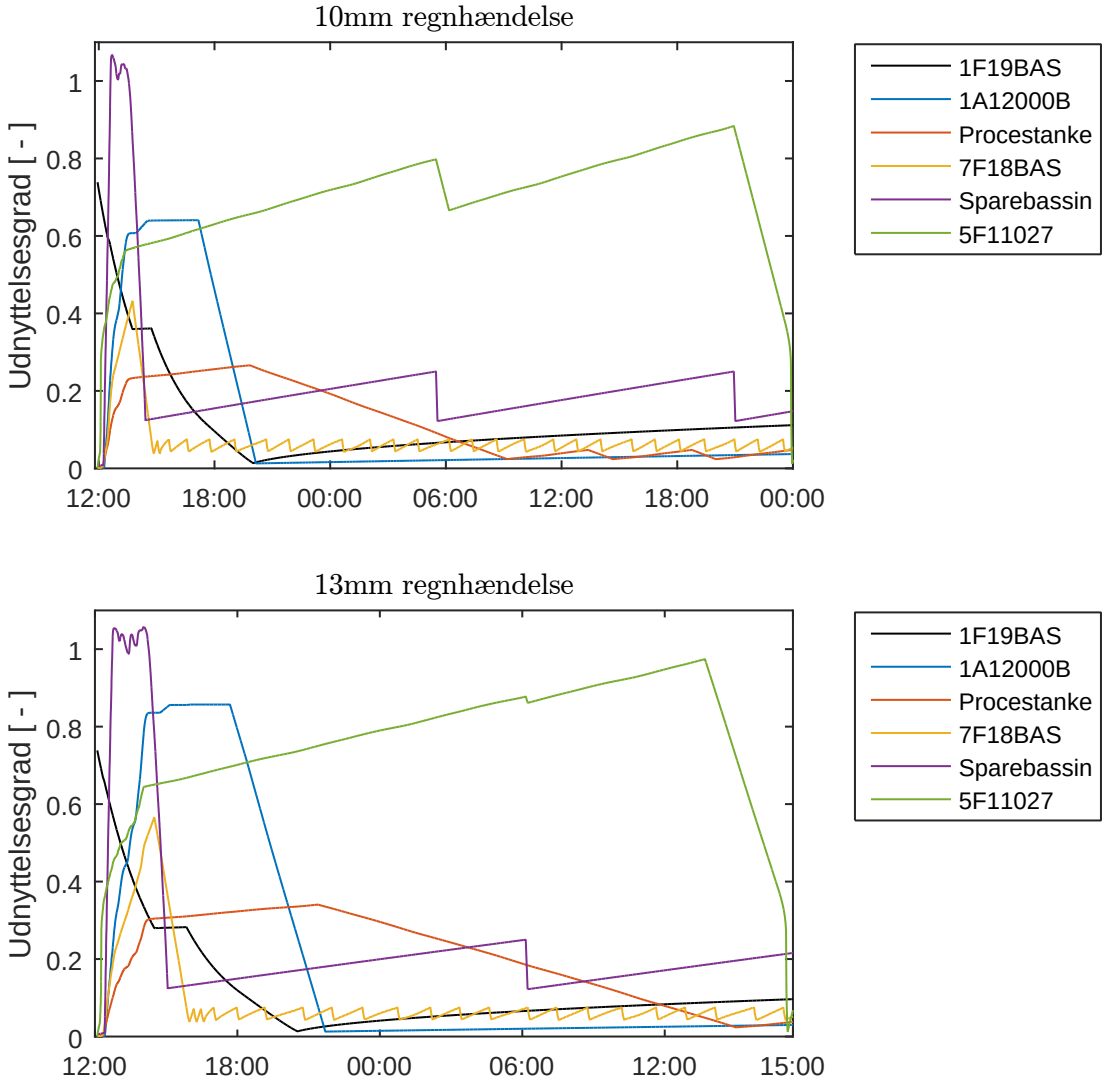


Figur K.4. Udnyttelsesgraden for de styrede bassiner ved de valgte returperioder.

K.1.3 Bedst kvalificerede bud



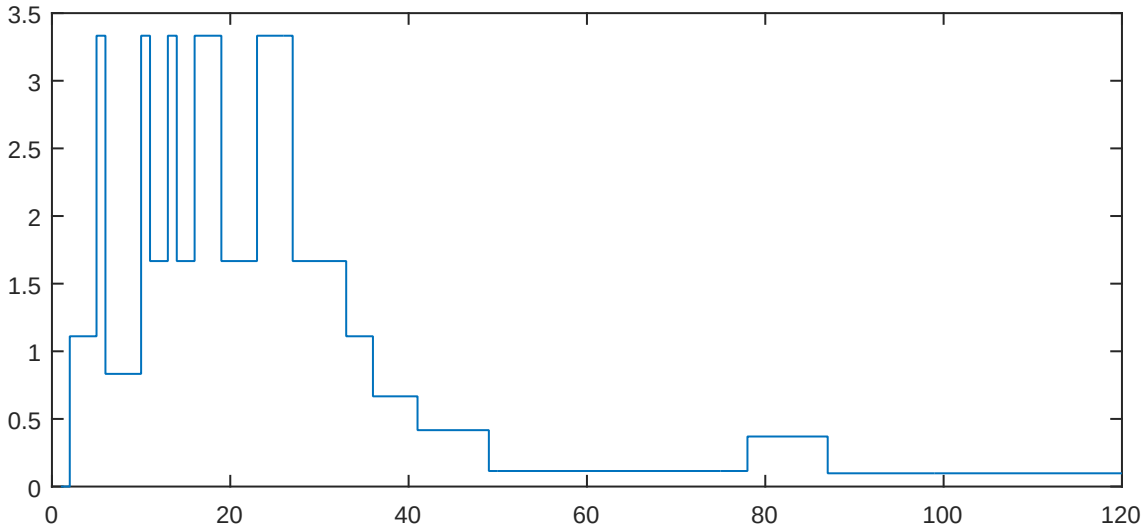
Figur K.5. Udnyttelsesgraden for de styrede bassiner ved de valgte returperioder.



Figur K.6. Udnyttelsesgraden for de styrede bassiner ved de valgte returperioder.

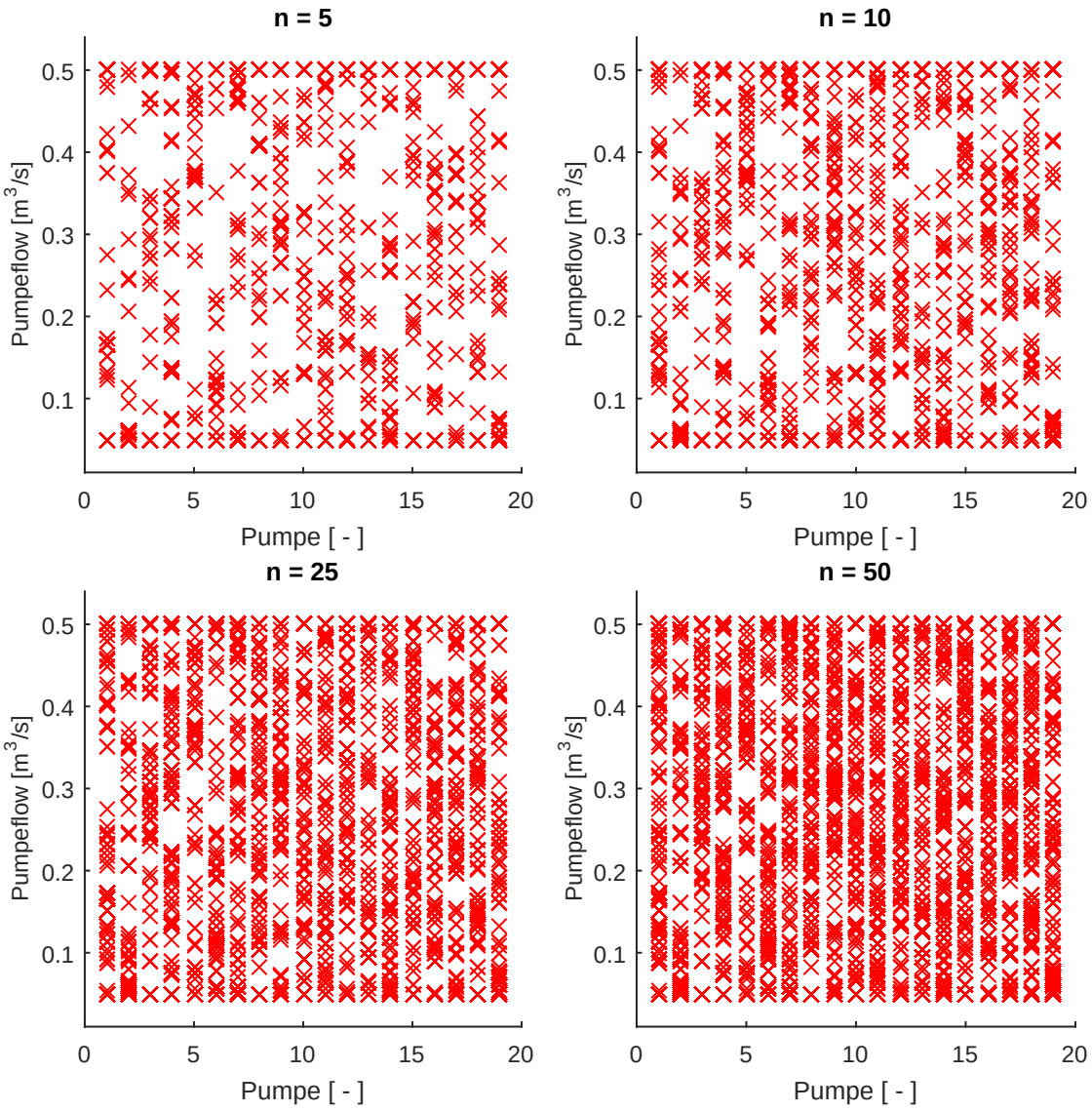
L. Parameterbestemmelse til optimeringsalgoritme

I dette kapitel undersøges populationsstørrelsen, antal generationer, skaleringsfaktor og nedskaleringsfaktorens effekt på NSGA-II algoritmen. Til analysen anvendes MOUSE-modellen præsenteret i kapitel 1 side 3, hvor parametervariationer evalueres og deres betydning vurderes. Der anvendes en regnhændelse med nedbør på 5 mm og en varighed på 120 minutter, der er illustreret i figur L.1.



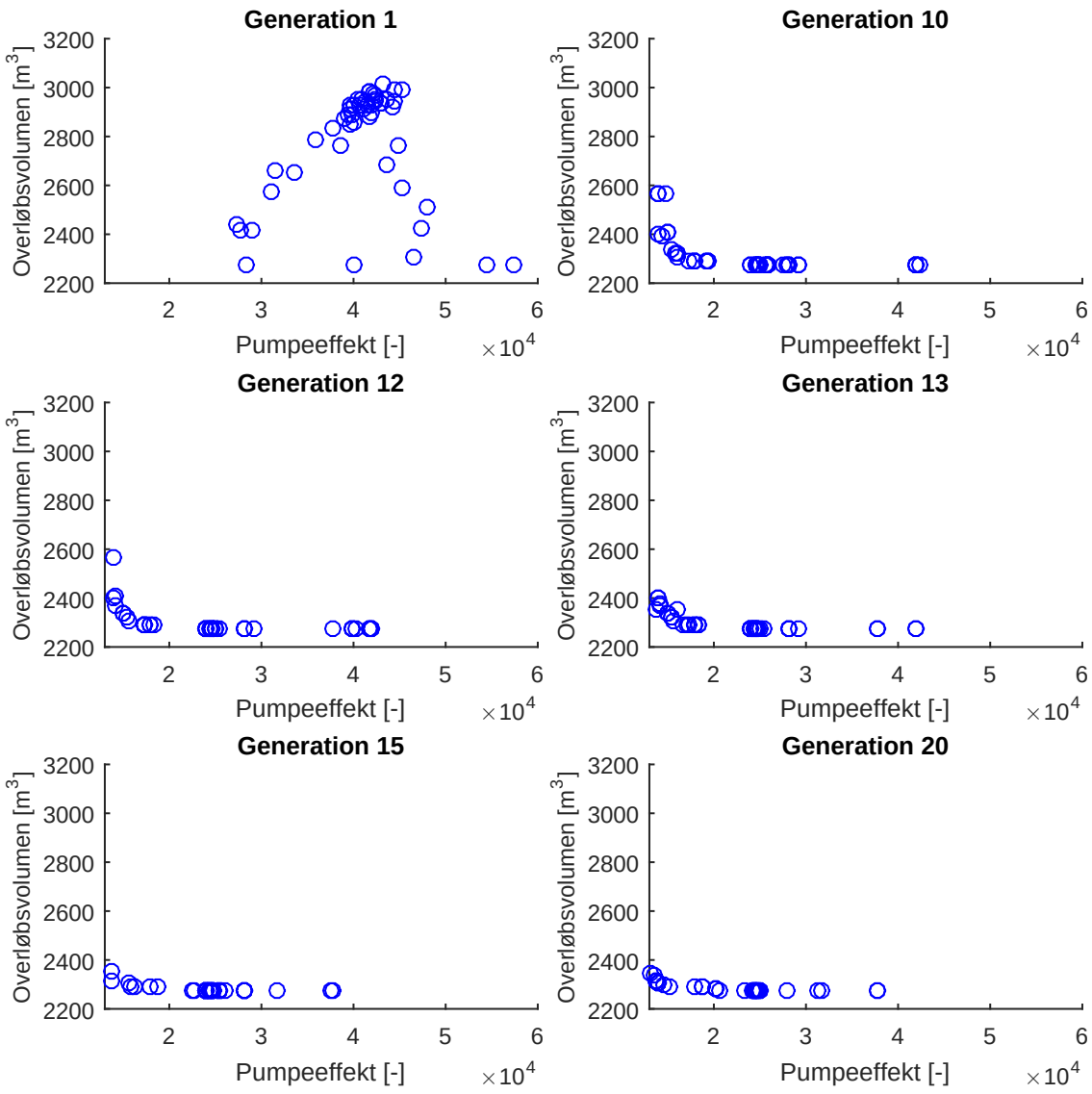
Figur L.1. Regnhændelsen anvendt til parameterbestemmelsen.

Populationsstørrelsen angiver, hvor mange parameterændringer, der skal undersøges for hver generation. Størrelsen af populationen må derfor have betydning for, hvor mange løsninger der dannes og sandsynligheden for at et optimum findes i søgningen. For at sikre, at populationsstørrelsen er stor nok, undersøges den totale population efter 20 generationer med en skaleringsfaktor på 10 og en nedskaleringsfaktor på 0,5 med populationstørrelser mellem 5, 10, 25 og 50, hvor den totale population undersøgt i modellen er illustreret i figur L.2.



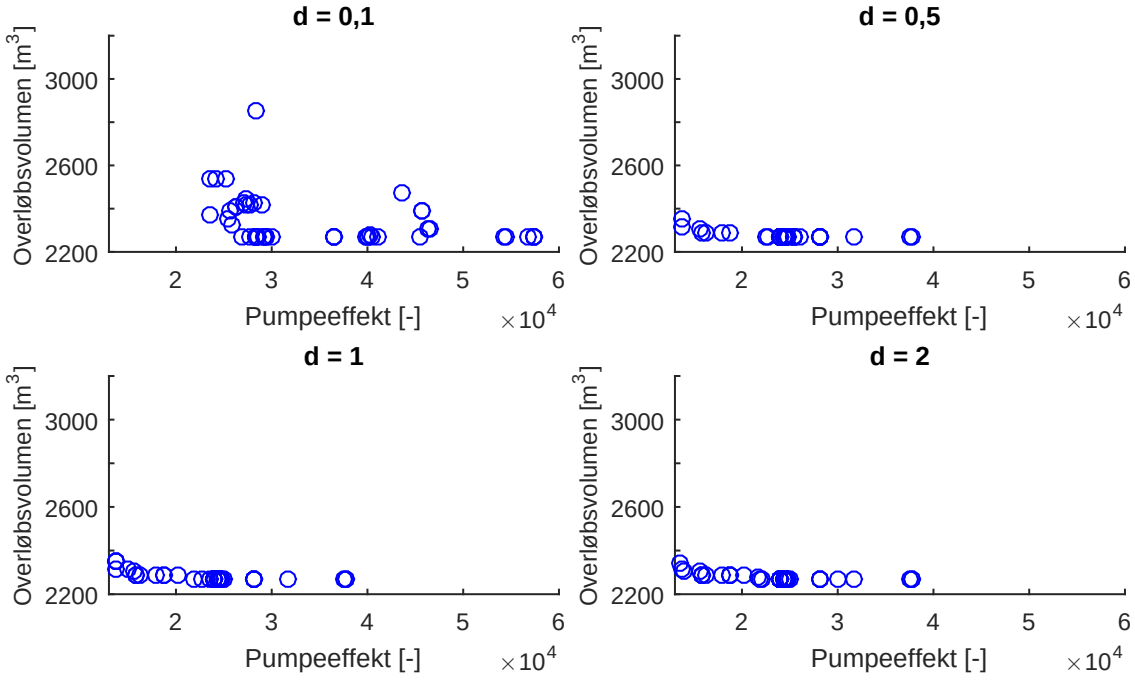
Figur L.2. Den totale population undersøgt for populationsstørrelser på hhv. 5, 10, 25 og 50.

Populationsstørrelserne for n = 5 og 10 lider af manglende intervaller, som viser sig som "huller"i figur L.2. For n = 25 og 50 er intervallerne dækket ind, hvorfor en populationsstørrelse på 50 er valgt. Det nødvendige antal af generationer er vurderet ud fra, hvornår algoritmen stabiliserer sig for MOUSE-modellen. På figur L.3 kan det observeres, at efter generation 15 er der ikke længere forandringer i Pareto-fronten, hvorfor algoritmen tilnærmer sig en stabil løsningsmængde omkring generation 12-13.



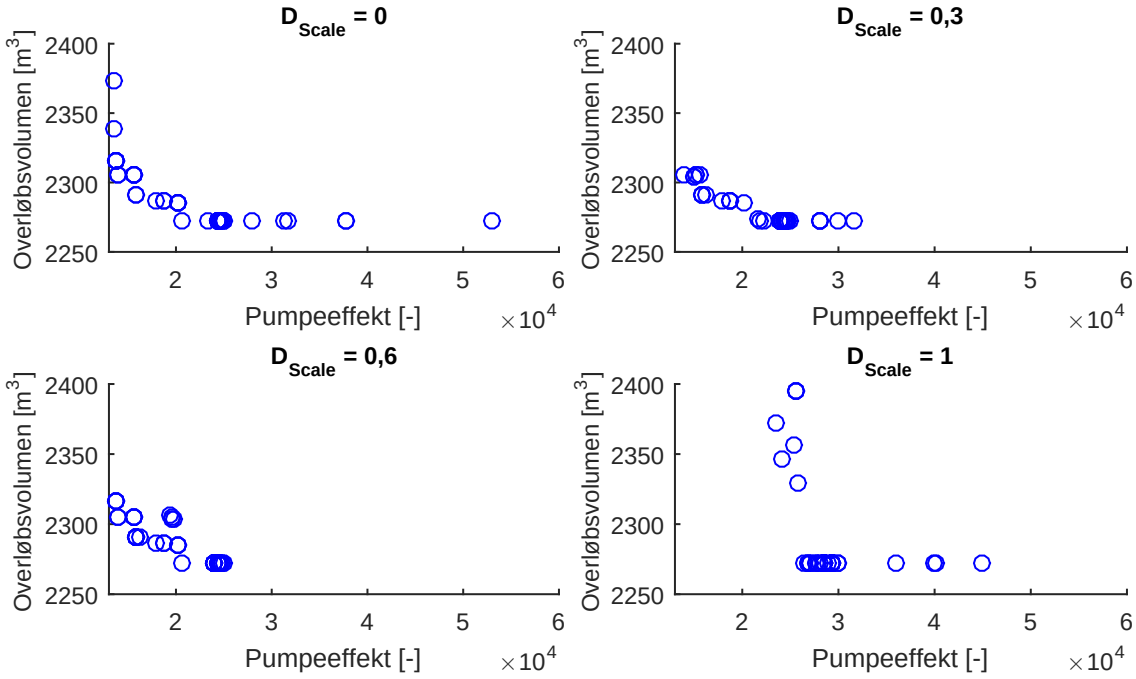
Figur L.3. Pareto-fronten ses stabiliseret omkring generation 12-13, hvorefter generation 15 er der ikke længere betydelige ændringer.

Det er valgt at anvende et antal af 15 generationer som det maksimale antal iterationer algoritmen skal foretage. Ud fra formel (8.5) er skaleringsfaktoren, d, sat til hhv. 0,1; 0,5; 1 og 2, og resultatet for generation 15 er illustreret i figur L.4.



Figur L.4. Skaleringsfaktoren kan observeres for generation 15 at have størst effekt på spredningen af søgerummet for løsningerne, hvorfor for $d > 0{,}5$ kan algoritmen ikke danne løsninger i optimum.

Skaleringsfaktoren angiver hvor stor spredningen er på muteringen, hvorfor en større skaleringsfaktor skal anvendes, når man endnu ikke har fundet et globalt optimum. Der observeres ikke en betydelig forandring i resultaterne ved at anvende en faktor over 0,5, hvorfor en skaleringsfaktor på 0,5 vil passe til Ikast Afløbssystem. Nedskaleringsfaktoren, D_{Scale}, har et spænd mellem 0 og 1, hvor 0 angiver ingen nedskalering og 1 angiver en maksimal nedskalering i sidste generation tilsvarende ingen mutation, som det kan udledes fra formel (8.5). I figur L.5 er nedskaleringsfaktoren sat til hhv. 0; 0,3; 0,6 og 1.



Figur L.5. Nedskaleringsfaktoren for generation 15.

Af figur L.5 kan det observeres, at spredningen af løsningerne er afhængigt af nedskaleringsfaktoren, hvor spredningen stiger med et fald i nedskaleringsfaktoren. Det vurderes, at for Ikast Afløbssystem er en nedskaleringsfaktor på 0 nødvendigt, da en stor spredning af løsninger er ønskeligt.

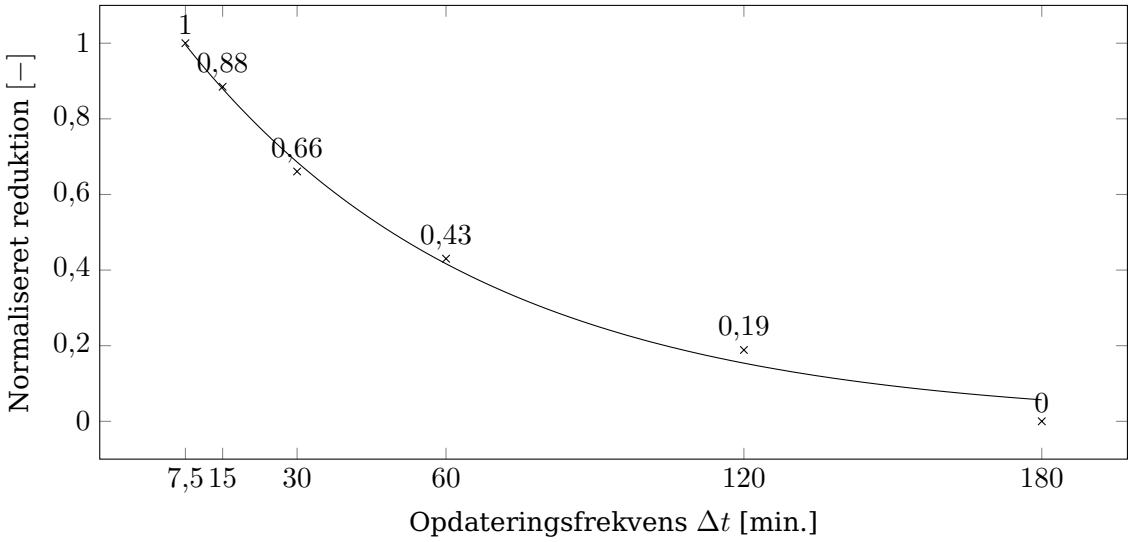
M. Parameterbestemmelse til Online-model

I dette kapitel undersøges opdateringsfrekvensens og antallet af generationers effekt på den Online-model.

M.1 Opdateringsfrekvens og antal generationer

Opdateringsfrekvensen beskriver, hvor hyppigt den Online-model opdateres i optimeringsprocessen. Frekvensen bør som udgangspunkt være så høj som muligt for at få optimeret modellen med henblik på at opnå bedre optimum. I et projektsamarbejde mellem Krüger, DHI og Aarhus Vand mfl. er der anvendt en algoritme til at styre afløbssystemet, der opdateres hvert 5. min. Beregningstiden på den simplificerede hydrauliske model over Ikast Afløbssystem er 18 sekunder for et døgn, hvilket med en opdatering hvert 5. minut vil tage ca. 1,4 timers simuleringstid for 1 generation.

Denne simuleringstid tager dog ikke forbehold for opstartstid og databehandling, hvilket tager ca. 1 minut. Opdateringsfrekvensen betydning for NSGA-II's evne til at optimere afløbssystemet er derfor undersøgt ved at variere frekvensen fra 7,5 til 180 minutter. På figur M.1 er overløbsvolumen som funktion af opdateringsfrekvensen illustreret. Til at undersøge opdateringskvensens indflydelse på NSGA-II's evne til at finde optimum er der anvendt en regnhændelse med 10 mm nedbør, hvor varighed og intensitet kan aflæses i figur 6.1 side 43.

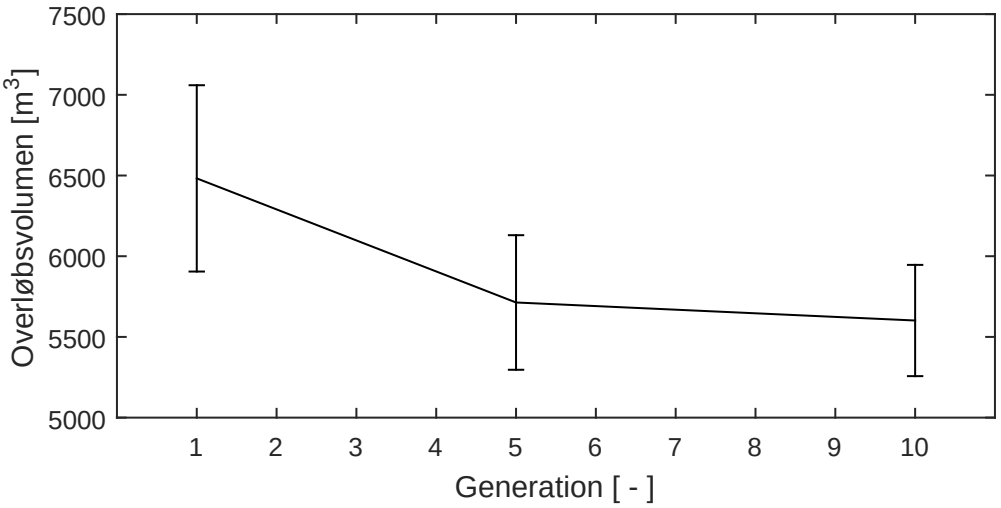


Figur M.1. Normaliseret reduktion i overløbsvolumen som funktion af opdateringsfrekvensen.

Af figur M.1 fremgår det, at den største reduktion i overløbsvolumen findes ved en opdateringsfrekvens på 7,5 minutter. Der kan observeres en tilnærmelsesvis eksponentiel forøgning af reduktionen af overløbsvolumen eftersom opdateringsfrekvensen forøges. Det kan aflæses i figur M.1, at en halvering af opdateringsfrekvensen på 7,5 til 15 minutter giver ca. 90%af reduktionen fundet ved en frekvens på 7,5 minutter.

M.2 Antal generationer

Antallet af generationer har stor indflydelse på beregningstiden og variationen for resultaterne. Et højt antal generationer giver en stor beregningstid og en lille variation, hvor det forholder sig omvendt med et lavt antal generationer. Variationen beskrives ved at simulere en regnhændelse 10 gange for 1, 5 og 10 generationer, hvor resultatet kan aflæses i figur M.2. Der anvendt en regnhændelse med 10 mm nedbør, hvor varighed og intensitet kan aflæses i figur 6.1 side 43 og Δt på 30 minutter.



Figur M.2. Variationen som funktion af antal generationer. Kurven illustrerer gennemsnittet af 10 kørsler pr. generation, og variationen er vist ved de største og mindste simulerede overløbsvolumener.

Af figur M.2 fremgår det, at overløbsvolumen falder med antallet af generationer stiger. Kurven er meget stejl ved 1 til 5 generationer, hvorefter kurvens hældning aftager fra 5 til 10 generationer. Det er værd at bemærke variationen falder på samme vis som hældningen, og at variationen ikke falder væsentligt fra 5 til 10 generationer. Ved valg af at køre NSGA-II med 1 generation er variationen så stor, at gennemsnitsoverløbsvolumen simuleret er stort set lig med den simuleret for referencesystemet. Det betyder, at med valg af en generation er der risiko for, at optimeringen giver et resultat værre end udgangspunktet.

N. Beregning af overløbsvolumen

Det er valgt at undersøge den beregnede volumens afhængighed af save interval ved beregne volumen med et save interval på hhv. 5 min., 1 min. og 10 sekunder. Resultaterne er sammenlignet med statistikken fra LTS-modulet, og den procentvise forskel kan aflæses i tabel N.1. Der er anvendt en regnhændelse med 10 mm nedbør, hvor varighed og intensitet kan aflæses i figur 6.1.

Save interval [-]	**LTS-modul** [m^3]	**Beregnet volumen** [m^3]	**Procentvise forskel** [%]
5 min.	6521	6529	0,1
1 min.	6525	6529	0,06
10 s	6523	6530	0,09

Tabel N.1. Den procentvise forskel mellem den sammenlagte overløbsvolumen i alle udløb minus udløbet på Ikast Renseanlæg. Den manglede synlige forskel i volumenerne er grundet forskellene ligger på decimalerne, hvor tallene i tabellen er rundt til nærmeste heltal.

Af tabel N.1 kan det aflæses, at der ikke sker signifikante forandringer i det beregnede volumen ved en ændring af save interval på trods af en faktor på 30 til forskel mellem største og mindste save interval. Det skyldes, at gennemsnitsværdier på op til 5 min. kan beskrive den tidslige variation af den beregnede vandføring med en tidslig diskretion på 10 s uden at miste evnen til at beregne et korrekt overløbsvolumen.

I realiteten bør save interval sættes til regnmålernes tidslige opløsning på 1 min. Dette vil dog ofte ikke nødvendigt, da afløbssystemets struktur vil resultere i forskellige afstrømningstider, der ofte vil være betydeligt større end regnmålernes opløsning og have større influens på vandføringens variation. Et mere virkelighedsnært analogi kan være vandføringen i spildevand for større byer, hvor variationen falder med størrelsen af afløbssystemet og antallet af indbyggere. På samme måde vil den tidslige diskretion fjernes fra volumen simuleret i modellen.

O. Elektronisk appendiks

O.1 Tekniske tegninger af bassin 1A12000B

O.1.1 130-revD_ Kloakplan_ Gl_ Renseanlæg

O.1.2 150-revA_ Sparebassin_ Gl-Renseanlæg

O.2 Styringspotentiale_ regnhændelse

O.3 Del II

O.3.1 Reference model

O.3.2 Styring 1A

O.3.3 Styring 1B

O.3.4 Styring 1C

O.3.5 Styring 1D

O.3.6 Styring 2A

O.3.7 Styring 2B

O.3.8 Styring 2C

O.4 Del III

O.4.1 Offline-model

O.4.2 Online-model

O.4.3 Online-model med forecast