Realtidsstyring

Kolding afløbssystem

Water and Environment - Kandidatspeciale

Klaus Jess

Forsidefoto: colourbox.com

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Fjerde semester ved Det Teknisk-naturvidenskabelig Fakultet
Institut for Byggeri og Anlæg
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Øst
http://www.byggeri.aau.dk/

Titel:

Realtidsstyring

Projekt:

Kandidatspeciale

Projektperiode:

September 2017 - Juni 2018

Deltagere:

Klaus Jess

Vejledere:

Søren Liedtke Thorndahl
Rasmus Nielsen
Luca Vezzaro (DTU)

Samarbejdspartner:

Krüger A/S

Virksomhedskontakt:

Nikolaj Mølbye (Krüger A/S)
Luca Vezzaro (DTU/Krüger A/S)

Antal sider i hovedrapport: 86
Bilag: 8
Færdiggjort: 7. juni 2018

Synopsis:

Rapporten omhandler implementering af realtidsstyring med DORA metoden, som er en model prædiktiv styring, i Kolding afløbssystem, hvor der allerede er implementeret regelbaseretstyring. Klimaændringerne øger belastningen på afløbssystemerne. Derfor undersøges det, om det er muligt at reducere aflastninger med spildevand til recipienter, ved at ændre styringsmetoden.

En screening af styringspotentialet til Kolding afløbssystem, har vist at der er potentiale for at reducere overløbsvolumen yderligere i forhold til den allerede implementerede styringsstrategi. Hvor det er fundet at der potentiale for reduktion af overløbsvolumen i systemet.

Ved implementering af DORA styring er det fundet at det er muligt at reducere overløbsvolumen i systemet med 9 % over et helt år, baseret på hændelser fra 2012. Reduktionen har samme størrelsesorden som stigning i årsmiddelnedbør frem mod år 2100 som følge af klimaændringer.

Det er forsøgt at beskytte specifikke recipienter ved brug af vægtning af overløbsbygværker i systemet. Resultaterne her er af skiftende karakter. Da vægtningsfordelingerne i projektet er lavet uden at tage hensyn til systemets opbygning, og det fører til at nogle vægtningsfordelinger fører til forværringer, sammenlignet med statussituationen.

Forord

Rapporten er udarbejdet af Klaus Jess på 3. og 4. semester af kandidatuddannelsen i Water & Environment ved Aalborg Universitet. Projektperioden strækker sig fra 1. september 2017 til 8. juni 2018. Der rettes stor tak til vejledere, Søren Thorndahl og Rasmus Nielsen, samt de eksterne samarbejdspartnere Krüger A/S, i særdeleshed Nikolaj Mølbye og Luca Vezzaro, og Blue Kolding A/S for deres hjælp og vejledning gennem projektperioden. Ydermere rettes en tak til brugerne af grupperum 1.207 på Thomas Manns Vej 23, for gensidig sparring og moralsk støtte og opbakning.

Projektarbejdet havde fokus på realtidsstyring af Kolding Afløbssystem. Til projektet er en realtidsstyrings metode kaldet DORA benyttet. Metoden er i projektet testet i flere forskellige scenarier, og sammenlignet med den styring som allerede er implementeret i Kolding Afløbssystem. Projektet er opdelt i fire dele, som angivet på nedenstående figur. Del I omhandler præsentation af projektet og projektområdet, samt DORA metoden. Del II er en analyse af den nuværende situation i afløbssystemet, og deri en screening af styringspotentialet af afløbssystemet. Del III omhandler implementeringen af DORA i Kolding Afløbssystem og analyser af effektiviteten af DORA under forskellige forudsætninger. Del IV er en opsamling og afrunding af projektet.

Der vil i løbet af rapporten optræde kildehenvisninger efter Harvard-metoden. Kilder vil fremgå som (Efternavn, År) i tekst. Bagerst i rapporten findes litteraturlisten hvor kilderne er listet i alfabetisk rækkefølge. Figurer, tabeller og formler er nummeret ud fra kapitlet de optræder i, og rækkefølgen hvor de kommer i kapitlet, så første figur i kapitel 7 er navngivet figur 7.1, mens den næste vil hedde figur 7.2 og så fremdeles. Medmindre andet er angivet er alle disse udarbejdet selv i forbindelse med projektarbejdet.

Af benyttede programmer nævnes QGis, MATLAB, Microsoft Excel, Microsoft Access og MIKE URBAN. Al kortmateriale stammer fra (Kortforsyningen, 2018), medmindre andet er angivet.

Rapporten er udarbejdet af:

Klaus Jess

Abstract

This report is about the implementation of realtime control with the DORA method, which is a model predictive control scheme, in Kolding sewer system, where a rulebased control scheme have already been implemented. Climate change increases the load on the sewer systems. Therefore this report investigates if it is possible to reduce combined sewer overflows (CSO) to the recipients, by changing the control scheme.

A screening of the potential for reducing CSO in Kolding sewer system, has shown that there is potential to reduce CSO even more than the current control scheme. Where it has been found, that there is potential for reduktion of CSO, by changing the control scheme.

By implementing the DORA control scheme it has been found that it is possible to reduce CSO volume in the system by 9 % over a whole year, based on rain events from 2012. The reduction is in the same order of magnitude as the increase in yearly mean precipitation before year 2100 as a result of climate change.

It has been attempted to protect specific recipients by using weights on CSO structures in the system. The results of this are mixed. As the weight matrices used in the project, have been made without taking the geometry of the system into account, and that means some weight matrices leads to worsenings, compared to the current situation.

Indhold

0.1 Abstract iii

I Del I - Introduktion

1 Indledning 3

1.1 Præsentation af Kolding Afløbssystem 3

2 Beskrivelse af styring af afløbssystemer 9

2.1 Præsentation af DORA 11

II Del II - Statussituation

3 Screening af styringspotentiale 17

3.1 Beregningsforudsætninger 17

3.2 Resultater 17

3.3 Opsummering 19

4 Problembeskrivelse 21

4.1 Præsentation af analyser og data 21

5 Følsomhedsanalyse af DORA 23

5.1 Udvalgte hændelser 23

5.2 Tidsskridt mellem optimeringer 24

5.3 Vandets transporttid 25

5.4 Udløbsvandføring fra bassiner med spjældudledning 26

5.5 Forecasthorisont uden forecast af regn 27

5.6 Forecasthorisont med forecast af regn 28

5.7 Håndtering af parallelkoblede bassiner i DORA 29

5.8 Opsummering 31

III Del III - Plansituation

6 Analyse af DORA styring med og uden forecast 35
6.1 Indførte regler for styring i DORA 35
6.2 Restriktion af individuel styring af pumper i pumpestationer 36
6.3 Beskrivelse af regnforecast 36
6.4 Resultater 37
6.5 Opsummering 41

7 Vægtning af overløb til beskyttelse af recipienter 43
7.1 Vægtningsfordeling ud fra økologisk tilstand 43
7.2 Vægtningsfordeling ud fra terrænhældning i oplandet 45
7.3 Vægtningsfordeling af overløb ud fra badevandssikring 45
7.4 Analyse af vægtning baseret på økologisk tilstand 49
7.5 Analyse af vægtning baseret på terrænhældning 52
7.6 Analyse af vægtning baseret på sikring af badevand 56
7.7 Opsummering 59

8 DORA styring med spatialfordeling af regn 61
8.1 Regnmålere brugt som input 61
8.2 Resultater 63
8.3 Vægtning af overløb med spatialfordeling af regn 66
8.4 Opsummering 73

IV Del IV - Afrunding

9 Diskussion og perspektivering 77
9.1 Validitet af metode til screening af styringspotentiale 77
9.2 Brugen af forecast af regn 78
9.3 Reduktion af små hændelser i forhold til total reduktion 79
9.4 Begrænsninger af DORAs effektivitet i Kolding 80
9.5 Manglende fund af globalt minimum ved brug af genetisk algoritme 80
9.6 Gode råd til brugen af DORA i Kolding 81

10 Konklusion 83

V Appendiks

A Screeningstabel 89

B Validering af reduceret model 93

B.1 Opsummering 95

C Beskrivelse af den anvendte hydrauliske model 97

C.1 Overflademodel 97

C.2 Rørafstrømningsmodel 98

D Interface mellem DORA og MOUSE 101

D.1 Opbygning af DORA i Matlab 101

D.2 Opbygning af interface 102

E Lokal minimumsanalyse 105

F Analyse af størrelsen af vægtningsparametre 107

G Tabeller til styring med vægtning 109

G.1 DORA uden spatialfordeling af regn 109

G.2 DORA med spatialfordeling af regn 112

H Korrelation mellem overløbsvolumen per bassin og regnintensitet 115

H.1 Uden forecast 115

H.2 Med forecast 123

Del I - Introduktion

1 Indledning **3**
1.1 Præsentation af Kolding Afløbssystem

2 Beskrivelse af styring af afløbssystemer **9**
2.1 Præsentation af DORA

1. Indledning

Klimaforandringer påvirker hele verden, og resulterer i ændrede vejrmønstre (IPCC, 2013). Det er forventet, at regnmængderne og regnintensiteterne vil stige i Danmark frem mod år 2100 grundet klimaforandringerne (DMI, 2014) (S. Thorndahl m.fl., 2017). Det stiller skærpede krav til afløbssystemerne, der skal håndtere større og kraftigere regnmængder. De ældre fælleskloakerede afløbssystemer er i mange tilfælde ikke dimensioneret til at kunne håndtere den øgede regnvandsmængde. Derfor vil overløb med urenset spildevand blive ledt ud i de danske vandløb og farvande i højere grad end nu, hvis ikke der gøres noget for at forøge kapaciteten af afløbssystemet.

Udledning af urenset spildevand til recipienterne er problematisk af flere årsager. Urenset spildevand kan indeholde mange forurenende stoffer, som for eksempel miljøfremmede stoffer og organisk materiale. Der kan opstå kapacitetsproblemer i recipienten, som kan føre til erosion. Alt sammen er det med til at påvirke den kemiske, økologiske og fysiske tilstand af recipienterne negativt.

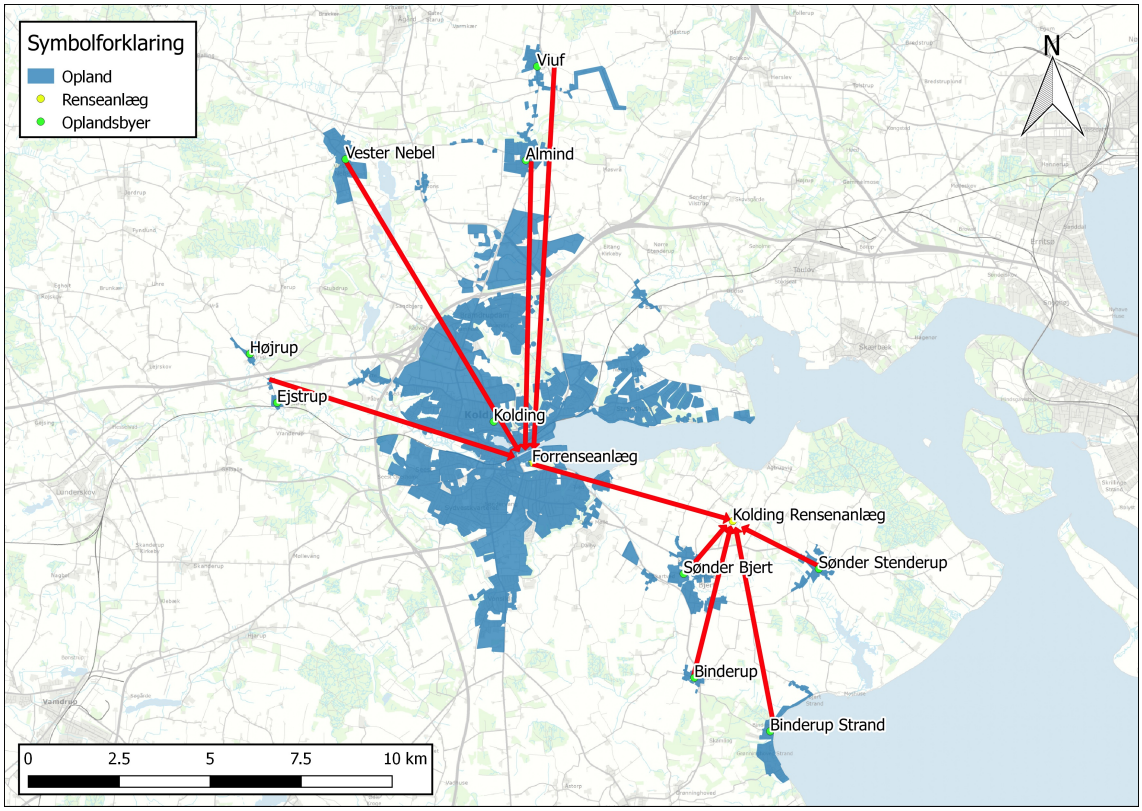
Mange steder udskiftes fælleskloakerede områder med separatkloakering, der sikrer mod, at spildevand ledes ud i naturen, og de nye anlæg kan dimensioneres efter den forventede fremtidige belastning. Men at udskifte afløbssystemet er en dyr og derfor langsommelig process, og er derfor ikke brugbar, hvis det er nødvendigt med øget kapacitet på kortsigt. På kortsigt er det muligt at anlægge nye bassiner for at forøge kapaciteten, men det er igen dyrt at lave nye anlæg. En anden mulighed er at implementere realtidsstyring af systemet, der gør det muligt at udnytte den kapacitet, der er i systemet bedst muligt (Schütze, Campisano m.fl., 2004) (Schütze, Lange m.fl., 2018).

Et af de steder hvor realtidsstyring er blevet implementeret er Kolding afløbssystem, hvor realtidsstyring har været implementeret siden 2011. Her har man oplevet en reduktion af overløbsmængden på op til 25% (Poulsen, 2015). I Kolding er der dog et yderligere ønske fra kommunens side om at reducere overløb til Kolding Fjord, for at øge badevandskvaliteten i fjorden i forbindelse med etableringen af et nyt fjordbad (Kolding Kommune, 2016). BlueKolding A/S er allerede begyndt at separatkloakere i de fjordnære dele af Kolding for at forbedre badevandskvaliteten (Fredericia Dagblad, 2016). Men da største delen af de centrale dele af Kolding stadig er fælleskloakerede er tidshorisonten for total separatkloakering stadig lang. Derfor ønsker BlueKolding A/S at opgradere deres realtidsstyring til en mere kompleks styring med DORA algoritmen (Vezzaro og Grum, 2014) i samarbejde med Krüger A/S. Afgangsprojektet vil omhandle implementeringen af den nye styring af Kolding afløbssystem. DORA har tidligere været brugt i undersøgelser af forskellige danske afløbssystemer, heriblandt Marselisborg (Vezzaro og Grum, 2014), Lynetten (Vezzaro, Löwe m.fl., 2013) (Löwe m.fl., 2016) og Lundtofte (Meneses m.fl., 2018).

1.1 Præsentation af Kolding Afløbssystem

I forbindelse med dette projekt forstås Kolding Afløbssystem, som det afløbssystem der er repræsenteret i den MOUSE model, der er udleveret af Krüger. Modellen er fuld hydrodynamisk afstrømningsmodel, der benytter tid-areal metoden til bestemmelse af overfladeafstrømning. En beskrivelse af MOUSE er lavet i appendiks C. Modellen dækker Kolding by samt flere mindre oplandsbyer, der også sender vand til Kolding Renseanlæg. Størstedelen af oplandet sender først vand til et forrenseanlæg placeret centralt i Kolding før, at det sendes til renseanlægget. Mindre dele sender vand direkte til renseanlægget. Oplandsbyerne samt renseanlægget og forrenseanlæggets placeringer er vist på figur 1.1.

Oplandet har et samlet areal på 3771 ha, og har en samlet personbelastning på 133 937 PE. Oplandet er delvist separat-, fælles- og spildevandskloakeret. Fordelingen af de tre kloakeringstyper



Figur 1.1: Placering af Kolding Renseanlæg og forrenseanlægget, samt oplandsbyerne hertil. Sønder Bjert, Sønder Stenderup, Binderup og Binderup Strand sender spildevand direkte til Kolding Renseanlæg, spildevand fra de andre oplandsbyer samles i forrenseanlægget centralt i Kolding.

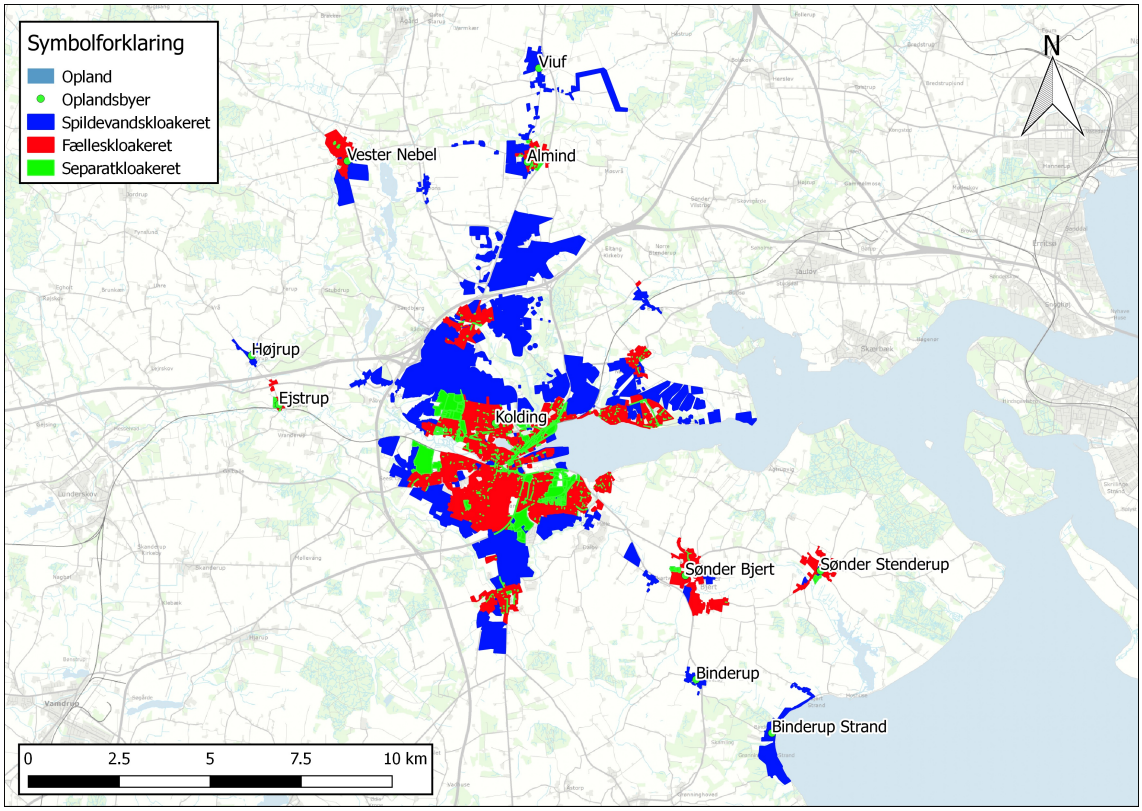
er vist på figur 1.2. Den arealmæssige fordeling mellem de tre kloakeringstyper for både samlet areal og reduceret areal er vist i tabel 1.1. Spildevandskloakering udgør klart den største del af oplandet både i samlet areal og PE, men tilfører ikke noget regnvand til kloaksystemet, da det håndteres lokalt. Kun en lille del af det samlede opland er separatkloakeret, hvilket viser, at store mængder regnvand håndteres sammen med spildevand, og derfor er de lokale recipienter under risiko for overløb med spildevand under regnhændelser.

Tabel 1.1: Fordeling af areal og PE mellem de tre kloakeringstyper.

Kloakeringstype	Samlet areal [ha]	Reduceret areal [ha]	PE
Separat	298,6	132,3	0
Fælles	1193,8	434,5	39896,6
Spildevand	2256,6	0	94033,5

Bassinerne, der er en del af den nuværende styringsstrategi i afløbssystemet, er vist på figur 1.3. De fleste af bassinerne er placeret i selve Kolding, men flere er også placeret i forstæder og oplandsbyer rundt omkring Kolding. Alle bassinerne leder vand til forrenseanlægget, herfra kan systemet anskues som bestående af 9 strenge, hvor bassinerne er indbyrdes hydraulisk afhængige. Heraf består 4 af strengene kun af et basin. Den indbyrdes afhængighed er afbilledet på figur 1.4. Strengene med mere end 1 bassin navngives således, og vil blive omtalt sådan resten af rapporten:

- S1 - Saftstationen, Vonsild, Rebæk, Rørbassin
- S2 - Riberdyb, Søndervang, Bellevuegade, Enevold Sørensens Vej

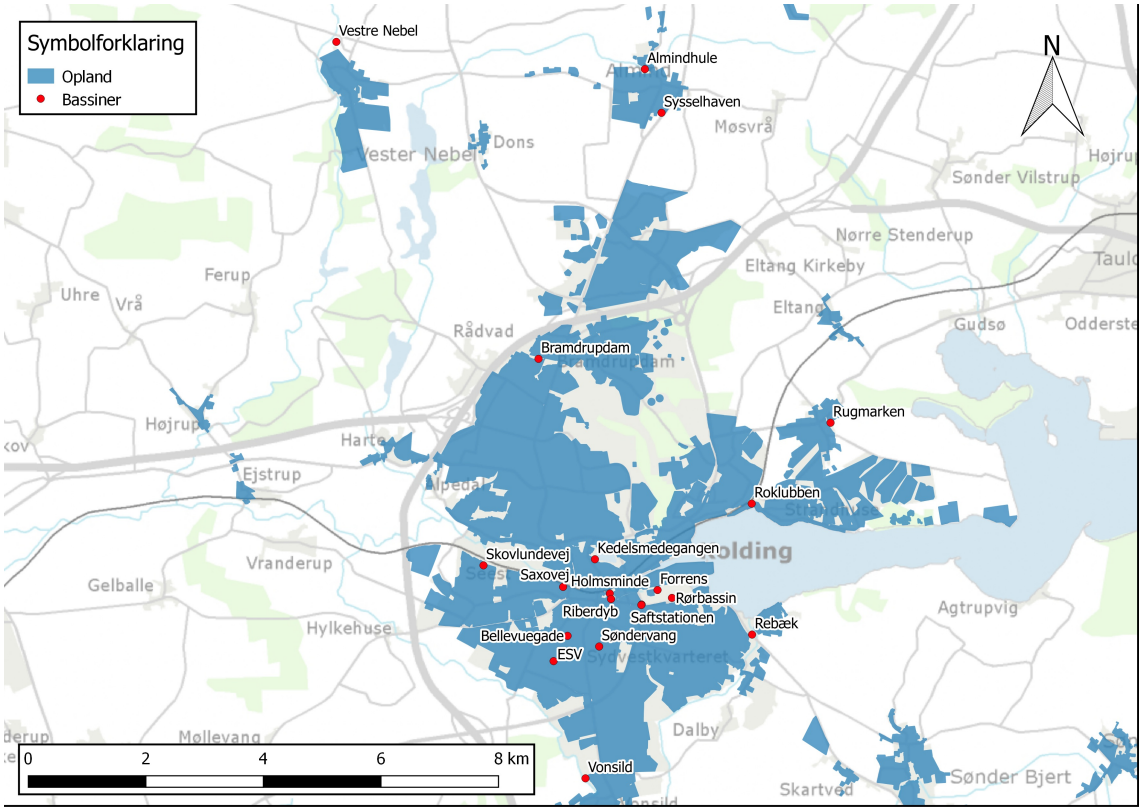


Figur 1.2: Fordelingen af separat-, fælles- og spildevandskloakering i oplandet til Kolding Renseanlæg.

- S3 - Holmsminde, Kedelsmedegangen
- S4 - Bramdrupdam, Vester Nebel
- S5 - Roklubben, Rugmarken
- S6 - Saxovej
- S7 - Skovlundevej
- S8 - Sysselhaven
- S9 - Almindhule

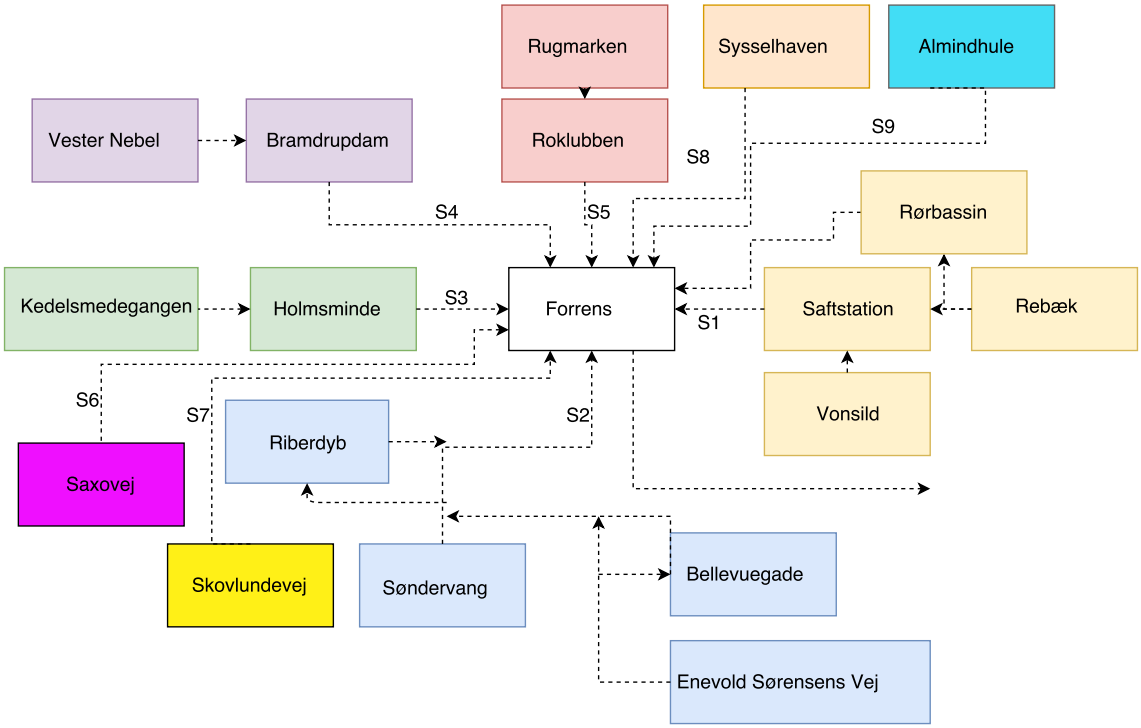
Bassinernes karakteristika er vist i tabel 1.2. Den vigtigste parameter i forhold til styring er bassinernes specifikke kapacitet ($k_{specifik} = V_{bassin}/A_{opland}$). Den specifikke kapacitet fortæller, hvor stort bassinet er i forhold til oplandsarealet, og hvor stor en regnhændelse bassinet kan håndtere uden udledning før, at det går i overløb. Jo større den specifikke kapacitet er jo mere volumen er der som kan udnyttes i forbindelse med styring. Med en lille specifik kapacitet er der ikke så meget at arbejde med, da små regnhændelser vil fylde bassinet. Ved en lille specifik kapacitet er tømmetiden af bassinerne en meget central faktor, da et bassin med et lille relativt volumen og en kort tømmetid stadig kan være relevant at styre på. Bassinerne med en lille specifik kapacitet ($k_{specifik} < 3\,\text{mm}$), har alle en relativt kort tømmetid på omkring 2 timer eller kortere. Det gør det muligt at sende en betydelig mængde vand videre under en hændelse så længe, der er kapacitet nedstrøms. Det gør, at de små bassiner også burde være gode at styre på, og ikke kun de bassiner med en stor relativ kapacitet. Bassinerne Enevold Sørensens Vej, Bellevuegade og Sønderholm er alle interne bassiner uden overløb til recipient. Derfor er det svært at udnytte deres kapacitet fuldt ud, men da de alle tre har meget stor specifik kapacitet er de stadig relevante at tage med i en styringsstrategi. Rørbassinet er også specielt. Bassinet har ikke noget opland direkte tilknyttet, og der er heller ikke overløb til recipient. Bassinet kan anskues som et aflastningsbassin placeret mellem Rebæk og Saftstationen. Her kan nogle spjæld lukkes for at lede vand over i Rørbassin fremfor til Saftstationen. Overløb fra

Rørbassin sker direkte til Forrenseanlægget.



Figur 1.3: Placering af bassinerne i styringstrategien i oplandet.

Der er blevet udleveret to modeller, en detail model og en reduceret model. Modellen er blevet reduceret ved hjælp af metoden beskrevet i (Davidsen m.fl., 2017). Metoden reducerer antallet af noder og rør i modellen for at reducere beregningstiden. At simulere et døgn tager cirka 20 minutter ved kørsel af den reducerede model og cirka 1 time ved kørsel af detailmodellen. Reduktionsmetoden er kort beskrevet i appendiks B, hvor den reducerede model også er verificeret i forhold til detailmodellen. Det er fundet, at forskellen mellem de to modeller er ubetydelig til den ønskede brug af modellen. Derfor benyttes den reducerede model til alle modelsimuleringer i projektet.



Figur 1.4: Indbyrdes hydraulisk afhængighed for bassinerne i styringsstrategien.

Tabel 1.2: Karakteristika for bassinerne i styringsstrategien.

Bassin	Volumen [m^3]	Oplandsareal [ha]	Specifik kapacitet [mm]	Pumpe/Spjæld	Q_{ud} [l/s]	Tømmetid [min]
Almindhule	220	6,1	3,6	P	40	92
Bramdrupdam	581	19,0	3,1	P	98	99
Bellevuegade	3775	17,2	21,9	P	150	419
Enevold Sørensens Vej	2814	14,9	18,9	P	150	313
Forrenseanlæg	2719	130,2	2,1	P	1100	41
Holmsminde	685	9,1	7,5	P	75	152
Kedelsmedegangen	406	7,6	5,4	P	30	226
Rebæk	478	25,0	1,9	P	70	114
Riberdyb	1751	30,7	5,7	S	800	36
Roklubben	506	36,0	1,4	P	173	49
Rugmarken	146	7,0	2,1	P	32	76
Rørbassin	1050	N/A	N/A	S	1000	18
Saftstationen	1146	56,3	2,0	S	150	127
Saxovej	622	14,5	4,3	S	48	216
Skovlundevej	336	3,2	10,7	S	33	170
Sysselhaven	402	7,9	5,1	P	22	304
Søndervang	3175	12,7	25,1	P	100	529
Vestre Nebel	684	9,5	7,2	P	18	633
Vonsild	1475	27,6	5,3	P	38	647

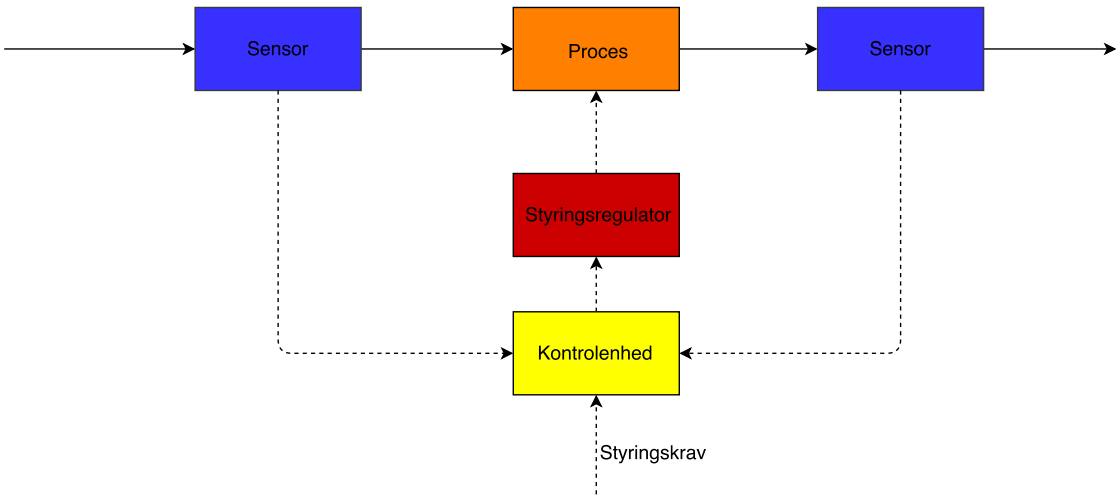
Tabel 1.3: Antallet af noder og rør i detail og reduceret model.

Model	Noder	Rør
Detail	8303	7932
Reduceret	2738	2564

2. Beskrivelse af styring af afløbssystemer

Et urbant kloaksystem er styret i realtid, hvis processer er overvåget i systemet og på samme tid bruges til at kontrollere styringsregulatorer i systemet. Styringen er reaktiv, hvis styringen reagerer på målinger fra eksempelvis regnmålere, flowmålere, vandstandsmålere eller vandkvalitetsmålere. Styringen er prædiktiv, hvis for eksempel vejrmodeller eller ekstrapolering af radarbilleder bruges til at forudse en kommende belastning på systemet (Søren Thorndahl og Ramussen, 2013) (Søren Thorndahl, Poulsen m.fl., 2013).

En styringsproces kan illustreres skematisks via kontrolloops som vist i figur 2.1, hvor sensorer måler en procesvariabel, sender data til en kontrolenhed, der sammenligner variablen med givne styringskrav for variablen om nødvendigt sender kontrolenheden signal til styringsregulatoren, der så regulerer processen. Styringsregulatorer er for eksempel spjæld, pumper, ventiler, overløb eller apparater til dosering af kemikalier. Styringen vist i figur 2.1 har en sensor både før og efter processen. Simplere styringssystemer kan konstrueres hvor den ene sensor udelades. Styring med en sensor før processen kaldes for feedforward styring, hvor for eksempel regnmåler data eller flowmålinger fra en opstrømsledning bruges til at forudse de nærtforestående belastninger på eksempelvis et overløbsbygværk eller et bassin. Mens styring med en sensor efter processen kaldes feedback styring, hvor målte ændringer fra styringskravet bruges til at regulere processen, for eksempel målinger af vandstand i et bassin eller vandkvalitetsmålinger umiddelbart nedstrøms for processen. (Schütze, Campisano m.fl., 2004)



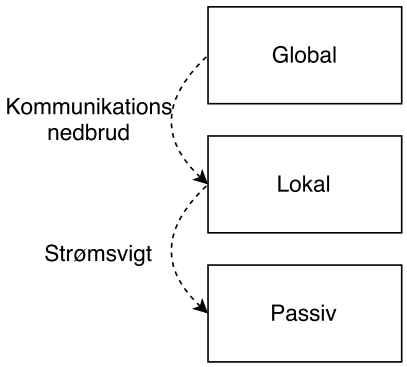
Figur 2.1: Skematisk tegning af en styringsproces. Redigeret fra (Schütze, Campisano m.fl., 2004)

Styring kan opdeles i lokal styring og global styring, og kan yderligere opdeles i passiv, reaktiv og prædiktiv styring. De forskellige typer er beskrevet i tabel 2.1. Den nuværende styring i Kolding er en semi-global regelbaseret styring. Styringen kaldes semi-global, da den ikke er helt lokal, men ej heller helt global. Reglerne der bruges til styring af styringsaktuatorer i et givent bassin, inddrager udover information om vandstanden i det givne bassin, som oftest også information om vandstand et eller flere andre steder i systemet. Dog inddrages kun information fra udvalgte steder i systemet for hver bassin, hvorfor styringen ikke kan omtales som fuldt global.

Tabel 2.1: Beskrivelse af lokal, global og passiv, reaktiv, og prædiktiv styring. (Colas m.fl., 2004)

Niveau	Beskrivelse
Passiv lokal	Systemet styres ud fra systemets geometri, f.eks. højden af en overløbskant.
Reaktiv lokal	Pumper eller spjæld i et bygværk aktiveres udelukkende på baggrund af målinger af flow eller vandstand lokalt.
Reaktiv global	Målinger fra systemet samles centralt og styring af pumper og spjæld i systemet baseres på den samlede data mængde fra systemet.
Prædiktiv global	Forudsigelser om fremtidige belastninger på systemet, og styringen tilpasses den belastning.

Når styringen stiger til et højere niveau, så kan alle de lavere niveauer være tilstede i systemet. De lavere niveauer fungerer derved som tilbagefaldsstrategier, når noget går galt i systemhierarkiet, og systemet går ned til at lavere niveau af styring. (Colas m.fl., 2004) Et højere niveau af styring har større teknologisk afhængighed, og har derfor også større risiko for nedbrud. Figur 2.2 viser hvordan teknologiske nedbrud kan tvinge styringen ned på et lavere niveau. En globalstyringsstrategi er følsom overfor kommunikationsbrist mellem målere, styringsregulatorer og den centrale styringsenhed. Her kan systemet falde tilbage til lokal styring, hvis kommunikation mellem lokalt placerede målere og styringsregulatorer stadig er aktiv. Under strømsvigt er lokal styring ikke længere muligt, og systemet er nødt til at falde tilbage til passiv styring, der er teknologisk uafhængig.



Figur 2.2: Tilbagefald sker fra et højere til et lavere niveau.

Opbygning af en styringsstrategi kan gøres på flere forskellige måder. En simpel måde er en manuel trial-and-error metode, hvor en initial styringsstrategi opsættes, herefter ændres strategien i et forsøg på at opnå en forbedring af strategien. Denne iterative proces fortsætter indtil, at det ikke længere er muligt at opnå forbedringer. Metoden er arbejdstung men simpel, og har den fordel, at designeren har fuld forståelse for strategien og ved hvordan ændringer i strategien påvirker systemet. Metoden forudsætter dog også, at designeren har et kendskab til systemet således, at det initiale gæt kan fastsættes så korrekt som muligt for at formindske arbejdstiden. Den manuelle metode er brugbar for simple systemer, men på mere komplekse systemer er den ikke praktisk, da det er noget nær umuligt for designeren at have overblik over styringsregulatorer, effekt og samspil mellem dem. Her kan en såkaldt offline optimering være fordelagtig i stedet, hvor en algoritme kan undersøge mange forskellige kombinationer af regulatorkonfigurationer. En alternativ måde at bestemme styringstrategien på er ved en online simuleringsmodel, hvor der ved hvert styringstidsskridt, for eksempel 5 min, bliver kørt en række modelkørsler med den nuværende status i afløbssytemet som input. Modelkørslerne benytter forskellige styringsstrategier, og den modelkørsel med den bedste respons, bliver så implementeret i det virkelige system. Grundet at der skal køres flere modelkørsler

på relativt kort tid, er det nødvendigt at have en simpel model hvor beregningstiden er minimeret. (Schütze, Campisano m.fl., 2004)

2.1 Præsentation af DORA

Metoden der benyttes i dette projekt er DORA (Dynamic Overflow Risk Assessment) (Vezzaro og Grum, 2014). I forbindelse med dette projekt er der opbygget et interface mellem DORA og MOUSE gennem Matlab. Opbygningen af interfacet er beskrivet i appendiks D. DORA er en global prædiktiv metode af typen model prædiktiv styring (MPC), det vil sige at metoden bruger en model til at forudsige tilstanden i systemet. DORA sigter efter at minimere den forventede risiko for overløb fra fællessystemet ved at tage hensyn til:

- Vandvolumen der lige nu er tilstede i systemet.
- Den forventede afstrømningsvolumen baseret på forecast af regnbelastningen.
- Den estimerede usikkerhed i afstrømningsforecastet.

Fordi DORA tager hensyn til usikkerheden i afstrømningsforscastet formindsker metoden ikke den forventede overløbsvolumen, men i stedet en overløbsrisikofunktion. Der er udtrykt i monetære eller montetær-proportionelle enheder ved at bruge en global cost funktion. Hvert overløb gives en værdi i forhold til omkostningerne ved overløb fra det givne overløb. Herved kan sårbare recipienter beskyttes ved at give de tilknyttede overløb en højere omkostning, eller vægtning. Derved bør metoden ikke kun sikre, at kapaciteten i systemet udnyttes bedre, og derved formindskes overløbsvolumen, men overløb der sker, sker også i højgrad de steder, hvor det er mindst uhensigtsmæssigt. Gives alle bassiner den samme vægtning, er det en såkaldt 'equal filling' opsætning, hvor styringen forsøger at have samme fyldningsgrad i alle bassinerne. En sådan styring vil resultere i den mindste samlede overløbsvolumen fra systemet. Cost funktionen består af tre dele som vist i formel 2.1.

$$Cost = \sum_{i=1}^{N_{basiner}} (C_{cr,i} + C_{F,i} - C_{hor,i}) \tag{2.1}$$

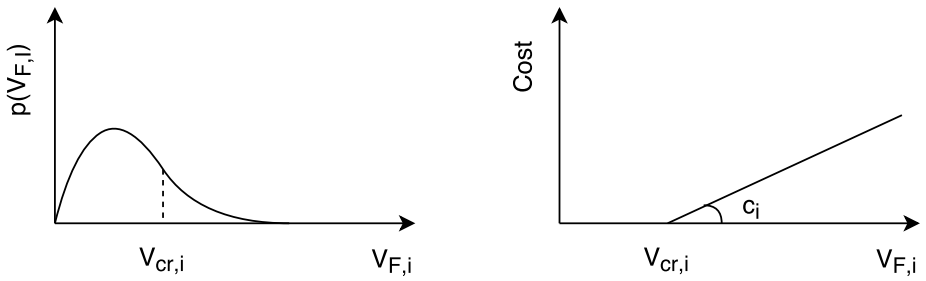
$C_{cr,i}$ (formel 2.2) udtrykket undersøger om det vand, der allerede er i systemet, vil føre til overløb i det i'te bassin, ved at se på den nuværende vandvolumen i bassinet, udløbsvandføring og indløbsvandføring over den kritiske tidshorisont, der er defineret som den tid det vil tage den forecastede afstrømning at fylde hele systemets restvolumen, hvis alt volumen var samlet et sted. Det giver en volumen V_{cr}, der er rest volumen i bassinet til tiden T_{cr}. Hvis V_{cr} er mindre end nul er der overløb fra bassinet. c_i er den gældende overløbsomkostning for overløbet i $[\mathrm{DKK/m^3}]$.

$$C_{cr,i} = \begin{cases} c_i \cdot (-V_{cr,i}) & for \quad V_{cr,i} < 0 \\ 0 & for \quad V_{cr,i} \geq 0 \end{cases} \tag{2.2}$$

$C_{F,i}$ udtrykket er omkostningen ved overløb fra den forecastede afstrømning fra det i'te opland inden for den kritiske tidshorisont, og er udtrykt ved formel 2.3.

$$C_{F,i} = \int_{V_{cr,i}}^{\infty} C(V_{F,i}) \cdot p(V_{F,i}) dV_{F,i} \tag{2.3}$$

Hvor $C(V_{F,i})$ er omkostningen som funktion af overløbsvolumen. Sandsynlighedsfordelingen for $p(V_{F,i})$ er defineret som den estimerede usikkerhed af regn-afstrømningsmodellen, og derved en



Figur 2.3: Skitsering af funktionerne for sandsynlighed og cost i Dora.

kobling af usikkerheden af forecastet, model parametre og strukturelle usikkerhed. En skitsering af de to funktioner er vist i figur 2.3. $C(V_{F,i})$ er en lineær funktion så længe omkostningen er konstant under en hændelse.

Det sidste element i formel 2.1, $C_{hor,i}$ er en discount funktion, der er med for at medtage den usikkerhed, der i afstrømningen uden for den tidshorisont, der kan forudsiges, da tømningstiden for bassinerne ofte er længere end længden af brugbare forecast. Discount funktionen er defineret ud fra følgende formel:

$$C_{hor,i} = \frac{k_{hor}}{c_i} \cdot f(\varphi_i) \cdot g(\Delta Q_{opt,i}) \tag{2.4}$$

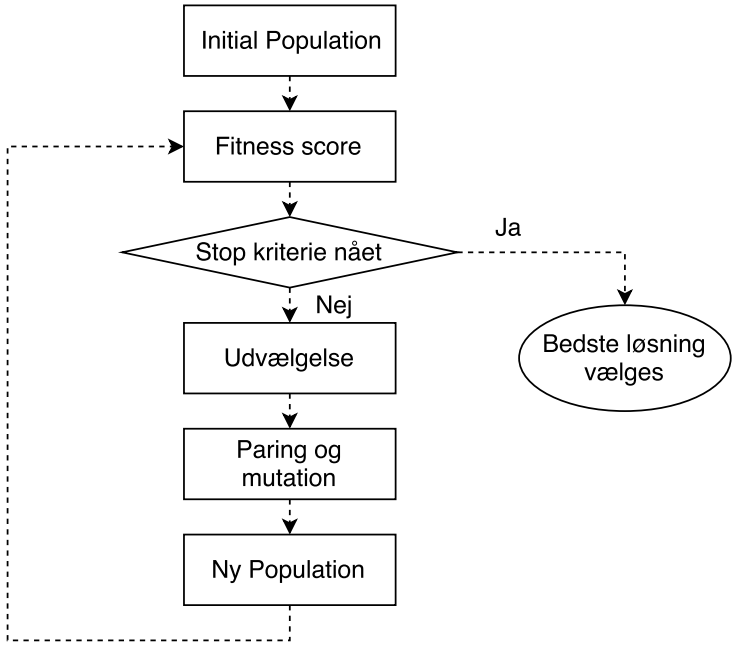
Hvor k_{hor} er discount faktoren i størrelsesordenen af $10^{-6} - 10^{-8}$, altså er $C_{hor,i}$ kun relevant når den samlede overløbsrisiko er lav. Når der kun er tørvejrsflow i systemet bliver risikoen udregnet af formel 2.3 lav, det kan lede til numerisk ustabilitet i søgealgoritmen og lede til sub-optimale løsninger. Derfor er discount funktionen indført for at identificere optimale flows i tørvejrssituationer. $f(\varphi_i)$ er en smooth switch funktion, der gør, at discount funktionen er aktiv når bassinet er næsten tomt. $g(\Delta Q_{opt,i})$ er en funktion der sørger for en hurtig tømning af bassinet. Funktionen er designet til at minimere forskellen mellem udløbsvandføringen fra bassinet og den optimale udløbsvandføring fra bassinet. Den optimale udløbsvandføring er defineret som den vandføring det er påkrævet for at lede alt vand videre, som er forventet i bassinet inden for kritiske tidshorisont, både det som allerede er i bassinet og det som er forventet tilløber bassinet. $g(\Delta Q_{opt,i})$ er beregnet som:

$$g(\Delta Q_{opt,i}) = exp\left(-\frac{\left(\frac{Q-out,i-Q_{out,opt,i}}{Q_{out,opt,i}} \right)^2}{0,5} \right) \tag{2.5}$$

Derved gives der maksimal discount når udløbsvandføringen er lig med den optimale udløbsvandføring.

Discount funktionen sikrer at systemet kan håndtere uforudsete regnhændelser udenfor forecast horisonten, ved at sigte mod hurtigere tømning af bassinerne, ved at give dem en lavere cost.

Optimale flows mellem bassinerne, der minimerer den globale cost funktion, identificeres ved brug af en genetisk algoritme. Den genetiske algoritme der benyttes er den indbyggede funktion i Matlab (Mathworks, nodate). En genetisk algoritme kan bruges til at bestemme et globalt minimum eller maksimum for en funktion med et antal input parametre. Genetiske algoritmer er inspirerede af naturlig selektion. Algoritmen er iterativ og fremgangsmåden er skitseret i figur 2.4. Algoritmen



Figur 2.4: Skitsering af fremgangsmåden i en genetisk algoritme.

starter med en tilfældig genereret population af løsningskandidater, kaldet en generation. Hver løsningskandidat har et sæt 'gener', som er de variable parametre der er i problemet der skal løses. Disse gener kan 'muteres' og ændres. For hver generation evalueres en fitness score for hvert individ i populationen. Til næste generation udvælges en del af den nuværende population som forældre. Forældrene udvælges ved at tilfældigt udvælge to individer, individet med den højeste fitness score udvælges som forælder. Herefter udvælges to tilfælde individer igen osv. Det samme individ kan udvælges flere gange. De udvalgte forældre bruges til at skabe en ny population ved at pare to forældre. Afkommet fra forældrene får gener med en tilfældig værdi mellem og omkring forældrenes. For at undgå lokale minimum bruges en mutationsfaktor til at sørge for at afkommene kan optage andre værdier end dem der ligger mellem forældrene, det er skitseret i figur 2.5. Når en ny population er genereret kan næste generation evalueres indtil stop kriteriet for algoritmen er nået.

Figur 2.5: Skitsering af paring og mutation.

Del II - Statussituation

3 Screening af styringspotentiale 17
3.1 Beregningsforudsætninger
3.2 Resultater
3.3 Opsummering

4 Problembeskrivelse 21
4.1 Præsentation af analyser og data

5 Følsomhedsanalyse af DORA 23
5.1 Udvalgte hændelser
5.2 Tidsskridt mellem optimeringer
5.3 Vandets transporttid
5.4 Udløbsvandføring fra bassiner med spjældudledning
5.5 Forecasthorisont uden forecast af regn
5.6 Forecasthorisont med forecast af regn
5.7 Håndtering af parallelkoblede bassiner i DORA
5.8 Opsummering

3. Screening af styringspotentiale

For at undersøge om der er potentiale for yderligere forbedringer i reduktion af overløbsvolumener, udføres der en screening af afløbssystemet. Screeningen er udført ved at sammenligne overløbsvolumener under hændelser med restvolumen Restvolumen vil blive analyseret både inden for en 'streng' i systemet og mellem strengene for at undersøge, om der er tilbageværende volumen andre steder i systemet, der kunne udnyttes til en hvis grad. Restvolumen er defineret som den volumen, der er tilbage i et bassin ved den maksimale fyldning under en hændelse. Restvolumen er adderet sammen under den antagelse af at den maksimale fyldning af bassinerne sker samtidigt. Det sker ikke reelt.

3.1 Beregningsforudsætninger

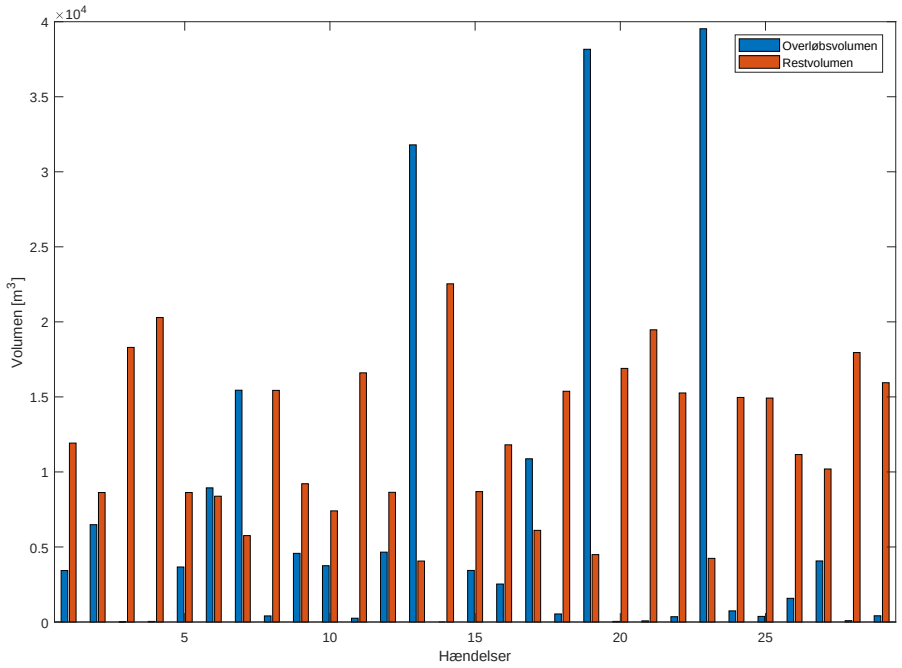
Til analysen er den udleverede reducerede model for oplandet benyttet. Der er benyttet historisk regndata fra SVK-måleren ved Kolding Forrensanlæg (måler nr. 5251) til simuleringen. Analysen er baseret på en simulering for år 2012. Regnhændelser med en dybde på under 3 mm er frasorteret, da de ikke forventes at lede til overløb uanset intensiteten. I tabel 1.2 er der flere bassiner med en specifik kapacitet på under 3 mm. Det er imidlertid ikke noget problem i forhold til at fjerne små hændelser, da de bassiner kun sjældent går i overløb, selv med de små hændelser sorteret fra. Regnhændelser der sker inden for 6 timer af hinanden anses som værende koblede. Det giver i alt 66 hændelser i løbet af året. I analysen er bassinerne, der er en del af styringen i systemet, og de tilhørende overløb brugt.

3.2 Resultater

Af de 66 hændelser, der er simuleret, er der registreret overløb i 28 af dem. Den samlede overløbsvolumen i hændelserne er i spændet $10\,m^3$ - $39\,539\,m^3$. Rådata for overløbsvolumen og restvolumen i bassinerne under hændelserne er vist i appendiks A. I tabellen er systemet opdelt i de strenge, der er defineret i kapitel 1, samt en kolonne for Forrenseanlægget og 'Resten', der dækker over de bassiner, der er det eneste bassin i deres streng. Strengene er benævnt efter den terminologi, der er præsenteret i kapitel 1. På figur 3.1 er overløbsvolumen og restvolumen i systemt vist for hver hændelse. Det ses at udover i meget kraftige hændelser er der betydeligt mere restvolumen tilbage i systemet end der er overløbsvolumen. Det tyder på at der burde være kapacitet i systemet til at tilbageholde overløbsvandet i flere af hændelserne, og undgå overløb. Det er dog muligt at dele af overløbet sker fra strenge hvor kapaciteten er fuldt opbrugt, hvorved det ikke nødvendigvis er muligt at tilbageholde alt overløbsvandet.

I figur 3.2 er overløbsvolumen og restvolumen vist hvor streng under hændelserne. Udfra figuren ses det at overløb i streng 4 er aktive under hver hændelse som den eneste streng. Der er tilmed 8 hændelser, hvor der kun er overløb fra den streng. I flere af hændelserne er der ikke restvolumen tilbage, og derved er strengen fuldt udnyttet. Der er fire mindre hændelser i strengen, hvor restvolumen er større end overløbsvolumen. De hændelser burde der være potentiale for at minimere eller helt fjerne ved bedre styring. Der er begrænset mulighed for at udnytte restvolumen andre steder i systemet, da strengen er begrænset af udløbspumpen fra Bramdrupdam. Det burde dog stadig være muligt til en hvis grad at udnytte restkapaciteten andre steder i systemet for at reducere overløb fra strengen.

Forrenseanlægget står for en stor del af den samlede overløbsvolumen i systemet, og der er relativt hyppigt overløb. Udover de hændelser hvor streng 4 er den eneste aktive streng, så er



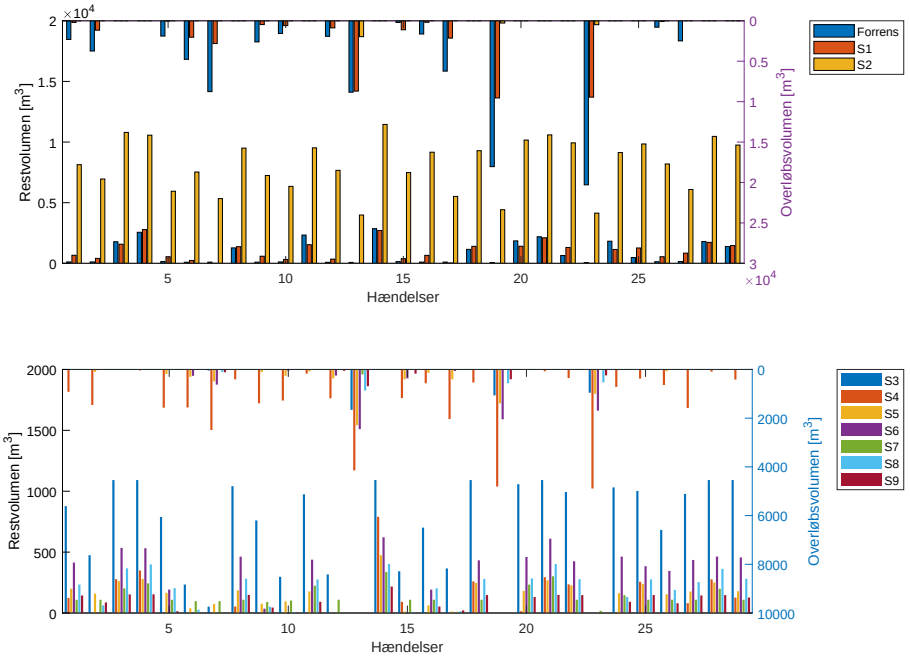
Figur 3.1: Overløbsvolumen og restvolumen i systemet for hændelser med overløb.

overløbbet fra forrenseanlægget aktivt i alle hændelser. Det er i midlertid også en forventelig opførsel fra systemetsside, da overløbsvandet fra forrenseanlægget må antages, at have gennemgået en eller anden form for rensning. Hvorfor det er fordelagtigt at have en stor del af overløbsvolumen fra systemet her.

Streng 1 og streng 5 har ens karakteristika. Der er relativt hyppigt overløb, og ofte er der lidt eller ingen restvolumen tilbage under hændelserne. Begge har dog også hændelser, hvor overløbsvolumen er moderate, og hvor restvolumen er større eller tæt at være lige så stor som overløbsvolumen. I de hændelser burde der være potentiale for at udnytte bassinerne bedre.

Streng 2 og 3 har også ens karakteristika. Der er sjældent overløb og ofte relativt stor restvolumen. Den store restvolumen kan potentielt udnyttes til at tilbageholde mere vand i strengen for at aflaste mere belastede strenge. Særligt streng 2 har stort potentiale for at reducere overløbsvolumen. I praksis burde strengen ikke have overløb udover ved ekstreme hændelser, da den specifikke kapacitet i strengen er meget højt. Men da tre af de fire bassiner i strengen ikke har overløb til recipient, er de styret meget konservativt. Bellevuegade bassinet er styret efter aldrig at blive mere end 50 % fyldt, og Enevold Sørensens Vej bassinet er styret efter ikke at have højere fyldningsgrad end Bellevuegade bassinet under regnvejr. Meget konservative begrænsninger på udnyttelsen af kapaciteten, der bør kunne udnyttes bedre uden stor risiko for 100 % fyldning af bassinerne, specielt med implementering af forecast.

På figur 3.3 er restvolumen og overløbsvolumen vist som funktion af nedbørsdybden af hændelser. Figuren viser at der selv ved relativt store nedbørshændelser på 12-13 mm er begrænsede overløbsvolumener. Det tyder på at den nuværende styring virker godt i forhold til at begrænse overløb fra mindre hændelser. Figuren viser dog også at der er meget restvolumen tilbage under de hændelser, og de fleste af de hændelser er sandsynligvis udelukkende med overløb fra Streng

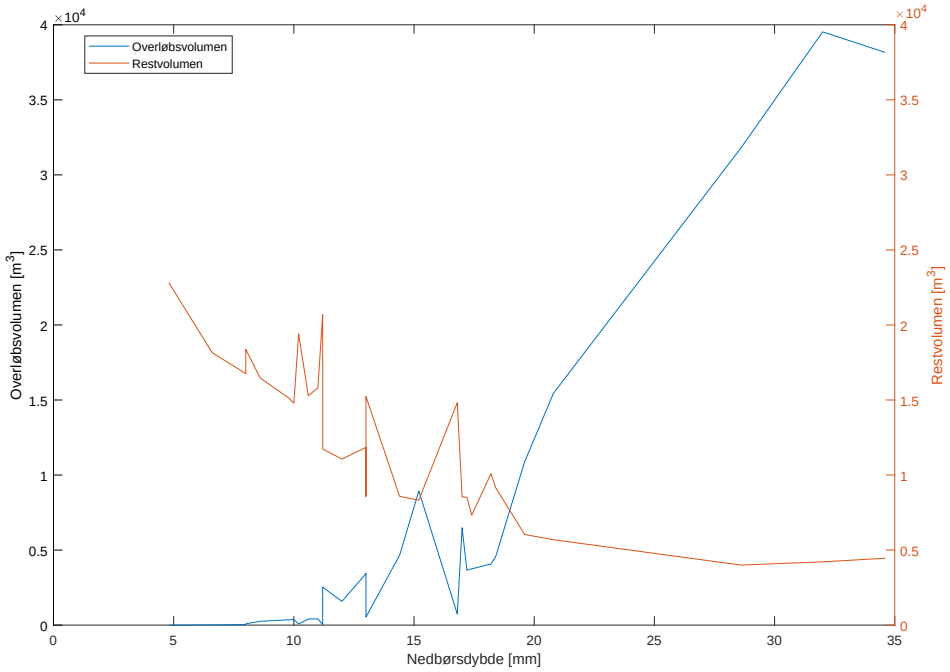


Figur 3.2: Overløbsvolumen og restvolumen for hver streng i systemet for hændelser med overløb.

4. Ved meget store hændelser er der som forventet stort overløbsvolumen og en lille restvolumen. Restvolumen er dog stadig af betydelig karakter, hvilket betyder at der er potentiale for at begrænse de store hændelser. Figuren viser også at overløbsvolumen først overstiger restvolumen ved regnhændelser på over 18 mm. Det tyder på at der er potentiale for at begrænse overløb fra hændelser på under 18 mm.

3.3 Opsummering

Der er stor spredning i udnyttelsesgraden af bassinerne i forskellige dele af systemet. Dele af systemet er hårdt belastet og oplever ofte overløb og opbrugt kapacitet, mens andre dele har stor restkapacitet og meget sjældent oplever overløb. Grundet at det ikke er muligt, at sende vand direkte mellem de forskellige strenge, er det ikke altid muligt at udnytte restkapacitet et sted i systemet 1:1 et andet sted i systemet. Men det er vurderet, at der er potentiale for at udnytte noget af den kapacitet til at reducere overløbshændelser og overløbsvolumen i systemet. Særligt hvis systemet styres i realtid, og der med forecast er mulighed for at udnytte bassinerne uden overløb til recipient mere. Resultatet af screeningen er derved, at der er grund til at forsøge at implementere en mere avanceret styringsalgoritme med henblik på at udnytte kapaciteten i systemet på bedre vis.



Figur 3.3: Overløbsvolumen og restvolumen i forhold til nedbørsmængden i en hændelse.

4. Problembeskrivelse

I dette projekt ønskes det at afdække, hvorvidt det er muligt at reducere overløbsvolumen fra et fælleskloakeret opland ved at implementere en global model prædiktiv styringsstrategi på et opland, sammenlignet med en en semi-global regelbaseret styringsstrategi der allerede er implementeret i oplandet. Screeningen foretaget i kapitel 3 har vist, at der kan være potentiale for at forbedre styringen ved at benytte en styringsstrategi der kan tage hensyn til hele systemets tilstand. Den model prædiktive styringsstrategi, der benyttes i dette projekt, kan benyttes både som reaktiv og som prædiktiv strategi. Hvorfor det også afdækkes, hvorvidt den model prædiktive styringsstrategi er bedre end den regelbaserede strategi uden brug af regnforecast, som forventes at forbedre styringen betragteligt. Den model prædiktive styringsstrategi, der benyttes i dette projekt, har mulighed for at prioritere overløb, der hvor de gør mindst skade. Derfor ønskes det at undersøge, i hvor høj grad overløb kan flyttes i systemet ved brug af vægtninger ud fra ønsker om hvilke recipienter, der skal beskyttes. En model prædiktiv styring, der kan tage højde for hele systemets tilstand, forventes at have den største gevinst i forhold til en regelbaseret styring, når regninputtet er spatialtfordelt, hvorfor det også findes interessant at undersøge, om det er korrekt.

På baggrund af ovenstående opstilles en række hypoteser omkring forholdet mellem regelbaseret styring og model prædiktiv styring, som vil danne baggrund for analyserne der foretages senere i rapporten.

- Model prædiktiv styring er bedre til at reducere overløbsvolumen fra systemet end regelbaseret styring.
- Ved spatialtfordelt regninput vil model prædiktiv styring føre til endnu større reduktioner af overløbsvolumen fra systemet relativt til regelbaseret styring.
- Ved vægtningen af overløb vil det være muligt at minimere overløb til sårbare recipienter.

4.1 Præsentation af analyser og data

I dette afsnit præsenteres hvilke analyser, der følger senere i rapporten samt det data, der benyttes i de analyser. På figur 4.1 er det vist hvordan rapporten er bygget op.

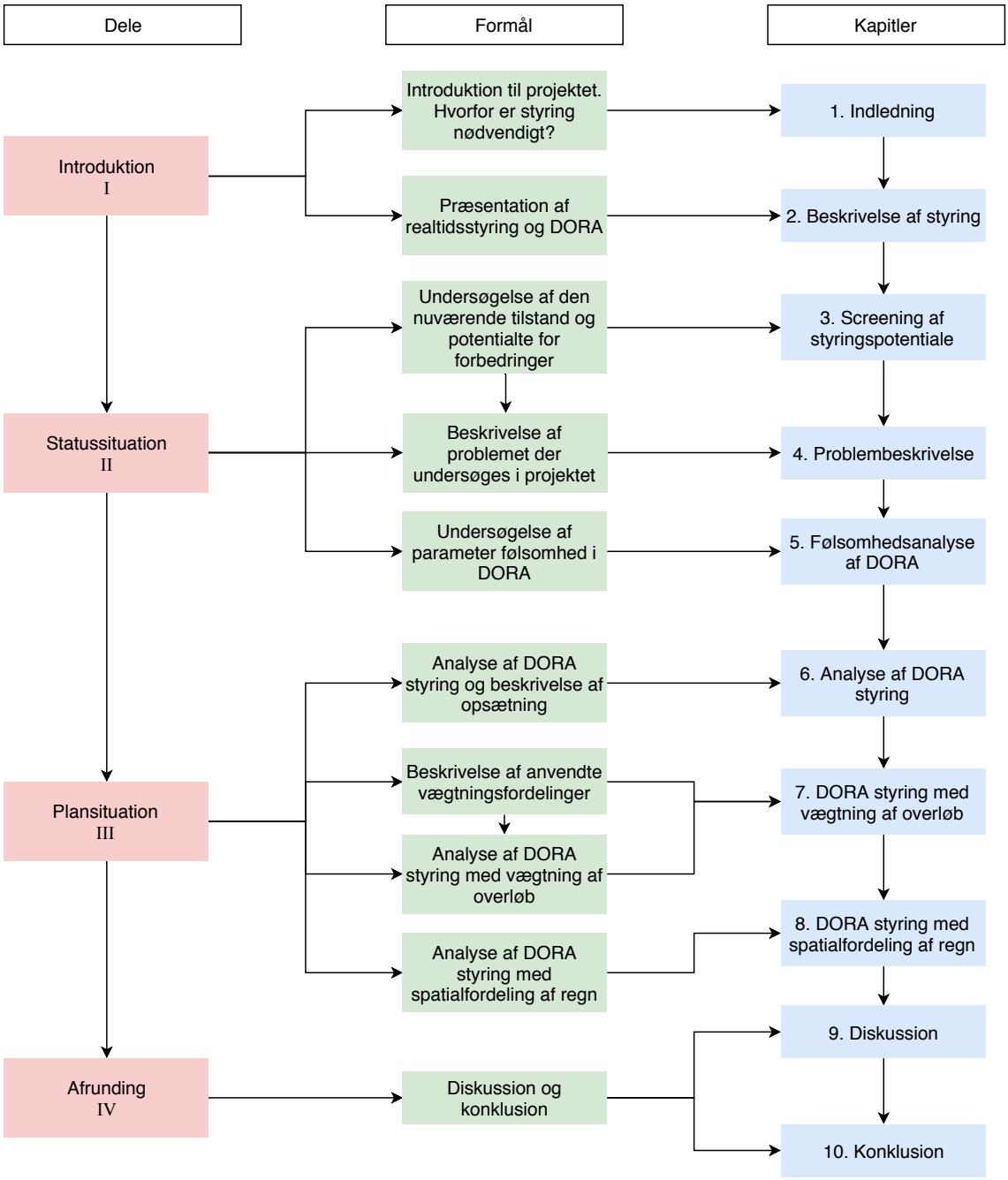
I kapitel 5 foretages en følsomhedsanalyse af den benyttede model prædiktive styring. I forbindelse med at oplandet opbygges som en del af algoritmen, så er der en række parameterindstillinger som er usikre, og flere af dem er også hændelsesafhængige. Følsomheden overfor ændringer af disse input testes for, at undersøge vigtigheden af præcision af parametrene, samt til at hjælpe med at kalibrere modellen til at give de bedst mulige resultater. Til analysen er udvalgt fire regnhændelser, der benyttes til at vurdere følsomheden af parametrene i forhold til overløbsvolumen under hændelserne.

I kapitel 6 undersøges effektiviteten af den model prædiktive styring i forhold til den regelbaserede styring vurderes på baggrund af overløbsvolumen for 28 hændelser i året 2012, hvor der i statussituationen med den regelbaserede styring er fundet overløb.

I kapitel 7 opstilles en række scenarier for, hvordan vægtningen af overløb kan inddeles ud fra forskellige kriterier. Et scenarie er vægtning ud fra den økologiske tilstand i recipienterne. Hvor den seneste vurdering af recipienternes samlede økologiske tilstand fra vandområdeplanerne er brugt til at vurdere følsomheden af recipienterne. Et andet scenarie er, hvor den gennemsnitlige terrænhældning i oplandet til bassinerne benyttes til at estimere selvrensning i ledningerne, hvilket benyttes til at vurdere den relative stofbelastning til recipienten. Et tredje scenarie er, hvor vægtningen af bassinerne er lavet for at forsøge at reducere overløb der kan føre til midlertidige lukninger af bynære badevandsmuligheder. I kapitlet undersøges også evnen til at beskytte de recipienter der

ønskes beskyttet ved brug af de forskellige vægtningsfordelinger, vurderes ved brug af de samme 28 hændelser, der tidligere er brugt til at vurdere effektiviteten af den model prædiktive styring. Der vil igen blive sammenlignet med statussituationen.

I de tidligere nævnte analyser er der kun brugt en regnmåler som regninput til den benyttede MOUSE model. I den benyttede opland er der dog seks forskellige regnmålere. Ved at benytte alle seks som regninput, vil der være spatialtfordelt regninput over oplandet. Det vil blive brugt i kapitel 8 til at vurdere om den algortimebaserede styring er bedre til at håndtere spatialtfordelt regn, der minder mere om den måde virkeligt regn falder, end statussituationen.



Figur 4.1: Oversigt over projektets opbygning.

5. Følsomhedsanalyse af DORA

Nogle faktorer der indgår i DORA, er fastsat af brugeren, og kan ikke bestemmes præcist. Fastsættelsen af disse faktorer vil have en indflydelse på optimeringen af modellen. For at undersøge modellens følsomhed overfor ændringer af disse faktorer laves der i dette kapitel en følsomhedsanalyse af faktorerne. Det er i appendiks E analyseret hvilken variation der kan forventes, når den samme hændelse køres med de samme indstillinger. Grundet at løsningen der findes ikke er et globalt minimum. Det er fundet, at variationer på op mod 7% er forventelige, og det skal tages in mente, når de følgende resultater analyseres.

De faktorer der undersøges følsomhed for er:

- Tidsskridt mellem optimeringer
- Vandets transporttid mellem bassiner
- Udløbsvandføring fra bassiner med spjældudledning
- Forecasthorisont uden regnforecast
- Forecasthorisont med regnforecast
- Korrekt bestemmelse af Q_{ud} for parallelkoblede bassiner

Tidsskridtet afgør, hvor ofte DORA beregner nye setpunkter og sender dem til modellen. I praktisk anvendelse af DORA bør tidsskridtet ikke være lavere end den tid det, tager den langsommste aktuator at indstille sig på den nye indstilling plus den lag-time, der er i forbindelse med at sende setpunkterne til aktuatorerne. Tidsskridtet bør heller ikke være lavere end den tid, det tager modellen at beregne nye setpunkter, da modellen derved ikke kan operere i realtid.

Transporttid mellem bassinerne er en variabel faktor og afhænger af mængden af vand i systemet. At fastsætte en korrekt transporttid er svært, og vil kun være gyldig under et bestemt scenarie. Ændres afstrømningsintensiteten eller afstrømningsmængden ændres transporttiden. Transporttiden er forsøgt fastsat på baggrund af en hændelse med stor afstrømningsvolumen, da det antages, at en korrekt transporttid er mere kritisk for store afstrømningsvolumener end for små, da det er de store afstrømningshændelser, der leder til overløb.

Udløbsvandføringen fra styringsbygværkerne angives i DORA ved en enkelt værdi for hver pumpe- eller spjældindstilling. At angive korrekte værdier for vandføring i pumperne er relativt simpelt, men det er mere kompliceret for spjæld, da vandføring gennem et spjæld afhænger af vandstanden opstrøms for spjældet, der er en variabel faktor.

Forecasthorisont er hvor langt ud i fremtiden DORA kigger under optimeringen. Forecasthorisonten bør i princippet ikke være kortere end den længste transporttid mellem bassiner. Da indløb hvor transporttiden er større end forecasthorisonten, ikke registreres korrekt af DORA.

5.1 Udvalgte hændelser

Der er udvalgt fire hændelser til følsomhedsanalysen der er vist i tabel 5.1. Hændelserne er udvalgt på baggrund af screeningen, hvor der er udvalgt fire hændelser med signifikante overløbsvolumener, der gør det muligt at sammenligne overløbsvolumener mellem de forskellige konfigurationer af modellen. De udvalgte hændelser er nogle af de mindste hændelser, som resulterer i overløb flere steder i systemet. Hændelser med lavere regndybde resulterer enten i intet overløb, eller kun overløb et sted i systemet. Det er ønsket, at de valgte hændelser resulterer i overløb flere steder i systemet, da det forventes at give et mere retvisende billede af følsomheden, end hvis der kun sker overløb et sted i systemet.

Tabel 5.1: Hændelser brugt i følsomhedsanalysen

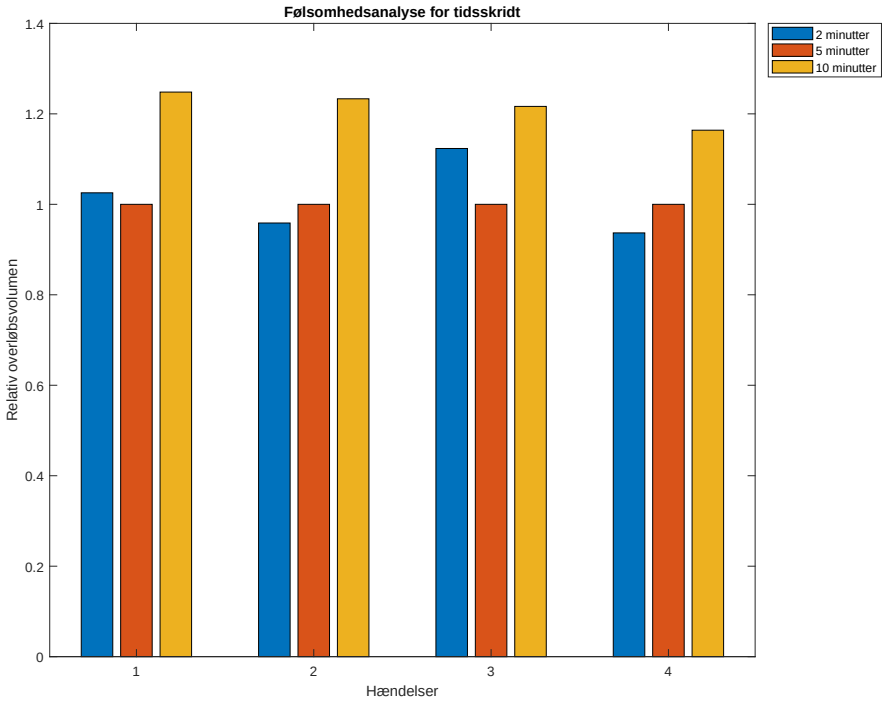
Dato	Varighed [min]	Dybde [mm]
2012-06-08	237	15,2
2012-08-04	126	14,4
2012-08-25	290	11,2
2012-08-26	390	19,6

5.2 Tidsskridt mellem optimeringer

De udvalgte hændelser er kørt med tre forskellige tidsskridt:

- 2 min
- 5 min
- 10 min

Den langsommste aktuator er 5 minutter om at indstille sig, og der er ingen lag-time i forbindelse med at sende setpunkterne til modellen, da tiden 'stopper' i MOUSE modellen, mens DORA beregner optimale setpunkter. Derved burde 5 minutter være den mindste værdi af tidsskridt, der bruges i modellen. Det er dog valgt at tage 2 minutter med for at undersøge hypotesen om, at tidsskridtet skal være mindst lig med indstillingstiden for den langsommste aktuator.



Figur 5.1: Resultatet af følsomhedsanalyse for tidsskridt.

Resultatet af følsomhedsanalysen for tidsskridtet er vist i figur 5.1, hvor overløbsvolumenerne er vist relativt til overløbsvolumen for et tidsskridt på 5 minutter. Resultatet ser ud til at bekræfte hypotesen om, at tidsskridtet bør som minimum være længere end den højeste indstillingstid. I to af de fire undersøgte hændelser, er overløbsvolumen større ved en opdateringsfrekvens på 2

minutter end ved 5 minutter. Ved nogle hændelser er en højere opdateringsfrekvens bedre, men analysen tyder på, at straffen ved at bruge en frekvens på 2 minutter er større ved de hændelser hvor det giver et dårligere resultat, end gevinsten er i de hændelser hvor en højere opdateringsfrekvens er bedre. I alle fire hændelser giver en opdateringsfrekvens på 10 minutter det dårligste resultat, hvilket bekræfter, at en højere opdateringsfrekvens giver dårligere resultater, så længe den er over indstillingstiden for den langsommste aktuator. I det indeværende projekt er det fordelagtigt at have så højt et tidsskridt som muligt uden forøget overløbsvolumen. Et højt tidsskridt er ønsket, da konvergeringen af den genetiske algoritme er den mest tidskrævende del af simuleringsprocessen. Et højere tidsskridt vil reducere antallet af konvergeringer der er nødvendige, og derved den tid det tager, at simulere en hændelse. Kortere simuleringstider vil gøre det muligt, at simulere flere hændelser, og prøve flere forskellige model konfigurationer. Ved ibrugtagning på et virkeligt system, er der også en fordel ved lavere beregningstid. Jo kortere beregningstiden er, jo tættere på realtid er styringen, da beregningstiden indfører en 'lagtime' på distribueringen af setpunkter. I praksis betyder det, at styringen styrer efter en tilstand i systemet der er beregningstiden gammel, når setpunkter sendes til aktuatorerne. Derfor bør en lavere beregningstid føre til en bedre styring. I den benyttede model opstilling med et tidsskridt på 5 minutter, er varigheden på beregning af et optimeringstidsskridt på omtrent 65 sekunder, inklusiv simulering af den hydrodynamiske model i MOUSE. Derved er beregningstiden for et tidsskridt mindre end alle de valgte tidsskridt her. På baggrund af analysen benyttes 5 minutter til de efterfølgende analyser i projektet.

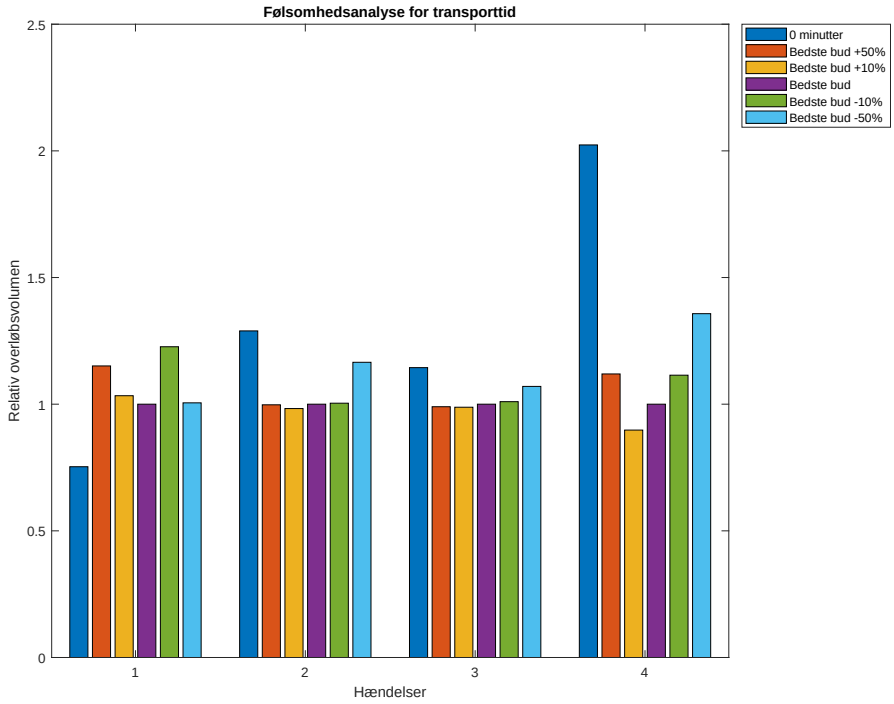
5.3 Vandets transporttid

De udvalgte hændelser er kørt seks med forskellige transporttider:

- 0 min
- Bedste bud
- Bedste bud +50%
- Bedste bud +10%
- Bedste bud -10%
- Bedste bud -50%

Transportiden på 0 min er medtaget grundet, at en tidligere iteration af DORA var sat op til at køre uden transportid mellem bassinerne, hvorfor det er fundet interessant, at undersøge følsomheden overfor slet ikke at have nogen transporttid. Bedste bud scenariet er frembragt, ved at analysere stikprøver af vandhastigheden, på rørstrækningerne mellem bassinerne, under en hændelse der antages at give et repræsentativt billede af vandhastigheden i systemet under kritiske hændelser.

Følsomhedsanalysen for transporttiden er vist i figur 5.2, med overløbsvolumener relativt til bedste bud scenariet. Analysen viser at en transporttid på 0 minutter, som forventet resulterer i større overløbsvolumen end de andre scenarier. Forværelsen som følge af en transporttid på 0 minutter, er også signifikant værre, hvorfor der er klar fordel ved at forsøge at finde en nogenlunde korrekt transporttid mellem bassinerne. Ellers er modellen relativt stabil, så længe transportiden er fastsat med en rimelig præcision. For de fleste hændelser er der ikke nogen umiddelbar forskel på bedste bud scenariet, og bedste bud +10% og bedste bud -10% scenarierne. Med en ændring i transportiden på 50% fra bedste bud scenariet, så er der en betydelig forværring i forhold til bedste bud scenariet. Der er ikke fundet nogen grund til at gå væk fra bedste bud scenariet på baggrund af følsomhedsanalysen.



Figur 5.2: Resultatet af følsomhedsanalyse for transporttid mellem bassiner.

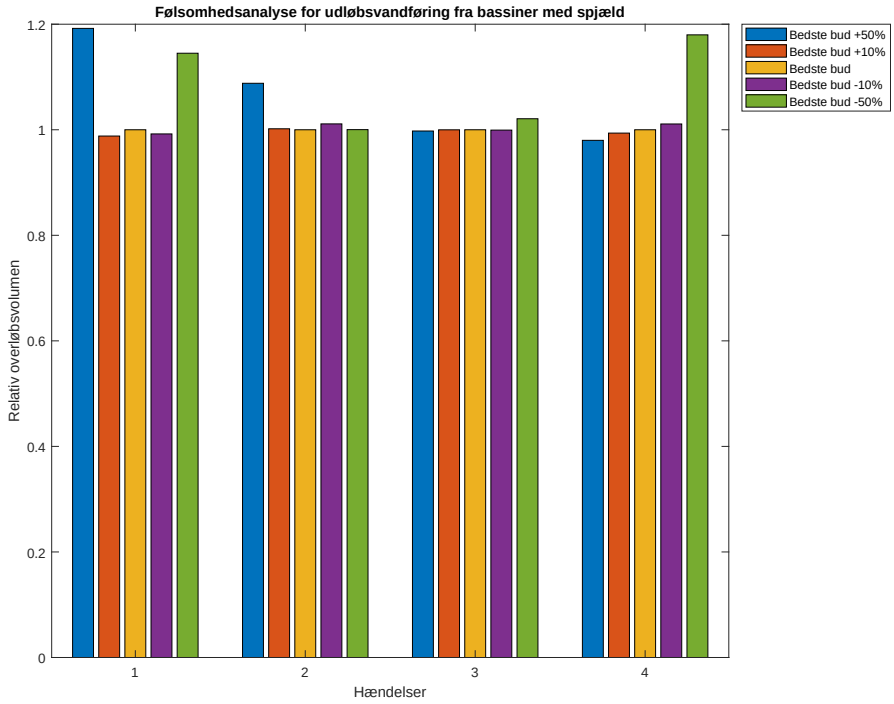
5.4 Udløbsvandføring fra bassiner med spjældudledning

Det har været forsøgt at opstille et QH udtryk for sammenhængen mellem vandstand i bassin og udløbsvandføringen gennem spjæld. Tanken værende at et QH udtryk vil være gældende under alle hændelser. Det har dog vist sig ikke at være muligt at opstille et sådant udtryk, da der under nogle hændelser er noget nedstrøms bassinet, som er styrende for udløbsvandføringen, og derved er der ingen sammenhæng mellem udløbsvandføring og vandstand i bassinet. De udvalgte hændelser er kørt med fem forskellige udledningsvandføringer for spjæld:

- Bedste bud
- Bedste bud +50%
- Bedste bud +10%
- Bedste bud -10%
- Bedste bud -50%

Bedste bud scenariet er fremkommet på baggrund af en analyse af udløbsvandføringen gennem spjældene, når bassinerne går fra at være helt fyldte til tømte.

Følsomhedsanalysen for udløbsvandføring gennem spjæld er vist i figur 5.3. Udløbsvandføringen gennem spjæld er også en faktor der er hændelsesafhængig, og som også vil variere under en hændelse. Modellen viser en lille følsomhed for variation i den angivne udløbsvandføring gennem spjæld. Kun ved store afvigelser på 50% fra bedste bud, begynder der at være følsomhed overfor ændringen. Det betyder at det er vigtigt at fastsætte udløbsvandføringen med en vis præcision. Men små afvigelser fra den reelle vandføring, er ikke problematiske. Hvilket er godt, da det som sagt er en hændelsesafhængig faktor, og modellen er mindre følsom overfor bruger input. På baggrund af analysen er der ikke fundet nogen grund til at ændre udløbsvandføringen fra bedste bud scenariet.



Figur 5.3: Resultatet af følsomhedsanalyse for udløbsvandføring for spjæld.

5.5 Forecasthorisont uden forecast af regn

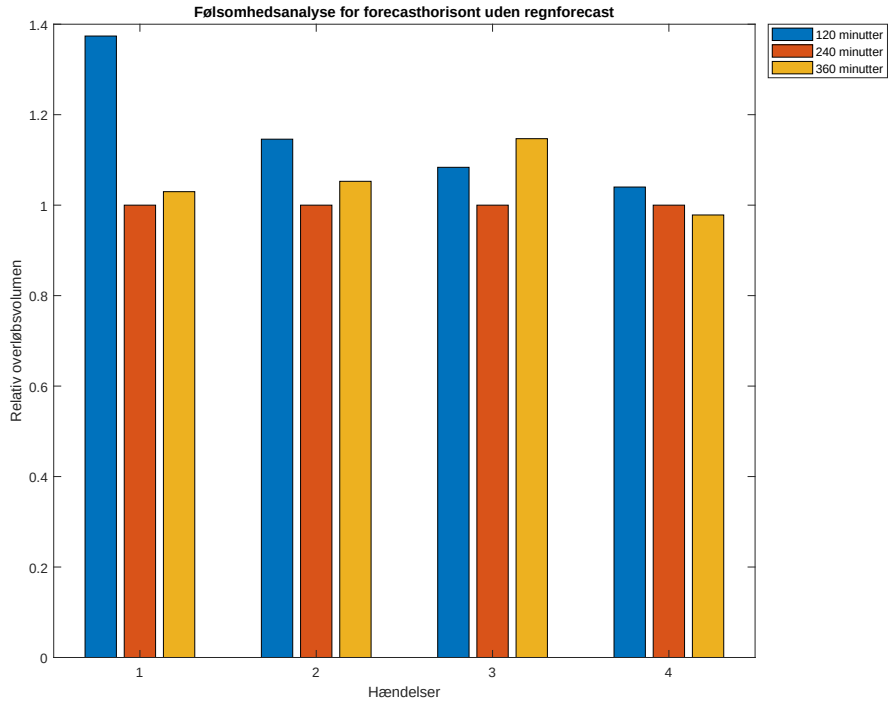
De udvalgte hændelser er kørt med tre forskellige forecasthorisonter:

- 120 min
- 240 min
- 360 min

Udover den samlede forecasthorisont, er forecasthorisonten opdelt i tre dele, hvor DORA finder optimale setpunkter for hver del af forecasthorisonten. For hver forecasthorisonten er fordelingen mellem de tre dele fastholdt på 25%, 25% og 50% af den samlede forecasthorisont. For en horisont på 120 minutter betyder det at DORA finder et sæt af setpunkter for tiden 0-30 minutter, et andet sæt for tiden 30-60 minutter og et tredje sæt for tiden 60-120 minutter. Grunden til denne opdeling er at belastningen ikke vil være ens over hele forecasthorisonten, hvorfor det at udregne et sæt setpunkter for hele forecasthorisonten, ikke nødvendigvis giver den optimale løsning. Tre sæt setpunkter vil næppe heller give den optimale løsning, og forecasthorisonten kan opdeles i et vilkårligt antal sæt af setpunkter mellem 1 og forecasthorisonten/tidsskridtet. Forøgelse af antallet af sæt setpunkter der skal findes for hvert tidsskridt, vil dog også øge beregningstiden.

Når modellen er opsat uden forecast af regn er forecasthorisonten ikke forventet at være en kritisk faktor. Det forventes dog at forecasthorisonten bør være længere end den længste transporttid mellem bassinerne, for at DORA kan forudse indløb til nedstrømsbassiner korrekt.

Følsomhedsanalysen af forecasthorisonten erf vist i figur 5.4. Det var forventet, at en forecasthorisont kortere end den længste transporttid kunne føre til suboptimale løsninger. Det ser ud til at være tilfældet, da den længste transporttid i systemet er 190 minutter, og en forecast horisont på 120 minutter giver det dårligste resultat. Der er ikke nogen stor forskel på forecasthorisonterne på 240 og 360 minutter, dog giver 240 minutter generelt set et lidt bedre resultat. Grunden til dette er



Figur 5.4: Resultatet af følsomhedsanalyse for forecasthorisont uden forecast af regn.

formentlig, at forecast horisonten på 240 minutter optimerer over finere intervaller, hvilket burde give bedre resultater.

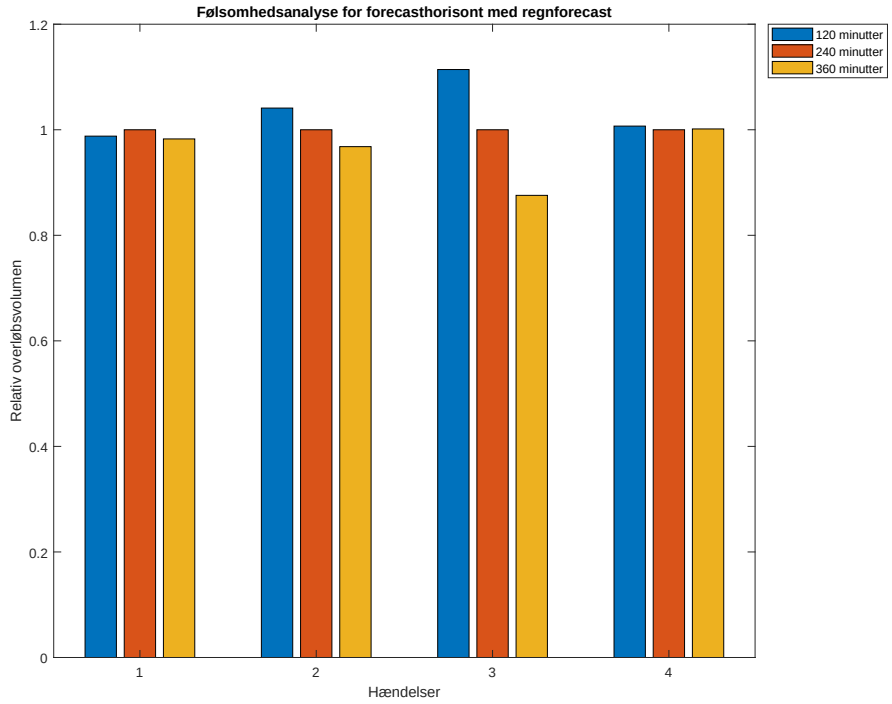
5.6 Forecasthorisont med forecast af regn

De udvalgte hændelser er kørt med tre forskellige forecasthorisonter:

- 120 min
- 240 min
- 360 min

Når der er forecast på regn forventes forecasthorisonten, at have nogen indflydelse på resultatet fra modellen, specielt når der benyttes perfekt forecast for modellen, som det er tilfældet her.

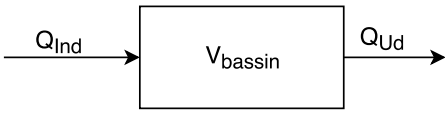
Følsomhedsanalysen af forecasthorisonten vist i figur 5.5. Analysen viser at længere forecast horisonter fører til bedre løsninger, hvis der er en forskel mellem dem. Grunden til det er, at en længere forecast horisont kan overskue en hel regnhændelse, og når regnforecastet er perfekt, burde det være muligt at finde en optimal løsning på baggrund af dette. I tre af hændelserne er der dog ikke nogen betydelig forskel mellem de tre forecasthorisonter, hvilket viser at selv kortere forecast horisonter kan give gode resultater i de fleste tilfælde. Det er vigtig viden i forhold til mulig implementering af uperfekt forecast, hvor usikkerheden stiger, jo længere forecast horisont der benyttes. Videre frem i projektet vil 240 minutters forecast horisont bliver benyttet, både når der simuleres med og uden forecast.



Figur 5.5: Resultatet af følsomhedsanalyse for forecasthorisont med forecast af regn.

5.7 Håndtering af parallelkoblede bassiner i DORA

I DORA formuleres bassiner, som en simpel massebalance, skitseret i figur 5.6. Indløbsvandføringen til bassinet, afhænger af regnen, der falder i oplandet til bassinet, og udløbsvandføringen af bassiner opstrøms.

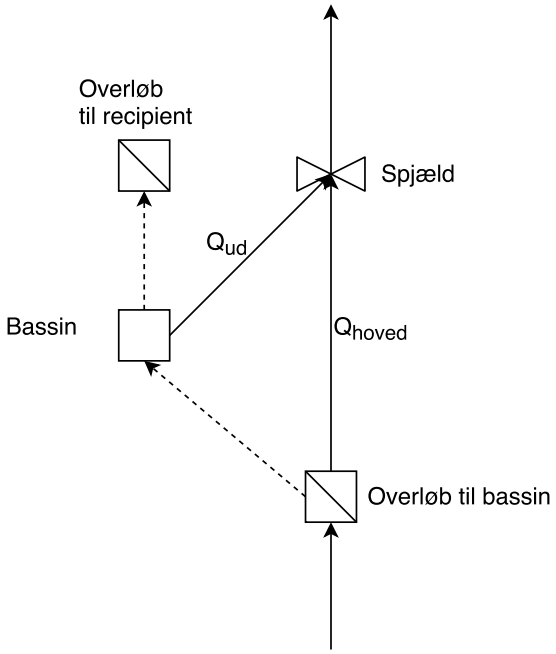


Figur 5.6: Skitsering af bassinformulering i DORA.

Den formulering holder meget godt så længe, at bassiner er seriekoblede med afløbssystemet. Formuleringen holder ikke helt så godt, når bassinerne er parallelkoblede med afløbssystemet. Kolding afløbssystem har flere bassiner, der er parallelkoblede med afløbssystemet, på måden der skitseret i figur 5.7. Når spjældet er lukket, stuver vandet op bag ved spjældet, ved tilstrækkelig opstuvning sker der overløb fra hovedledningen over i bassinet. Åbnes spjældet igen, løber der vand ud, både af hovedledningen, men også fra bassinet.

For at opnå den mest korrekte massebalance i de forecasts DORA laver af afløbssystemets tilstand, skal Q_{ud} for de relevante bassiner sættes korrekt. Både af hensyn til bassinet selv, men også af hensyn til det nedstrøms bassin. En forkert Q_{ud} vil føre til fejl i DORAs forecast af tilstanden i afløbssystemet, og derfor føre til suboptimale løsninger.

For det givne bassin, vil den korrekte Q_{ud} være den vandføring der er mellem bassinet og spjældet. For det nedstrøms bassin vil den optimale Q_{ud} være vandføringen gennem spjældet. For at tilgodese begge bassiner, er en løsning konstrueret, hvor Q_{ud} angives som vandføringen mellem



Figur 5.7: Skitsering af parallelkoblede bassiner i Kolding.

bassinet og spjældet. Mens at der ved Q_{ind} for det nedstrøms bassin, er tillagt en ekstra vandføring, svarende til Q_{hoved}. De to formuleringer er i resten af afsnittet benævnt:

- Formulering 1 - Kun vandføring mellem bassin og spjæld Q_{ud}
- Formulering 2 - Vandføring gennem spjæld $Q_{ud} + Q_{hoved}$

Sammenlignet med formulering 1, kan formulering 2 reducere overløb. Analysen er foretaget for modeller med og uden regn forecast. Resultaterne er vist i tabel 5.2.

Tabel 5.2: Resultater af sammenligningen af to metoder til formulering af parallelkoblede bassiner. Negative ændringer betyder, at overløbsvolumen er mindre i formulering 2.

Hændelser	Formulering 1 [m^3]	Formulering 2 [m^3]	forskel [%]
Model u/ regnforecast			
1	7085	7113	0,4
2	4947	4701	-5
3	2105	2135	1
4	9477	9272	-2
Model m/ Regnforecast			
1	6454	6674	3
2	4460	4451	-0,2
3	1132	1226	8
4	9877	9361	-6

Ved brug af en model uden forecast er der en forbedring ved brug af formulering 2. Der er forskel på hvor reaktive hændelserne er overfor ændringen i formuleringen. Hændelse 1 og 3 viser ikke nogen ændringer i overløbsvolumen ved ændring i formuleringen. Mens hændelse 2 og 4 viser en reduktion i overløbsvolumen ved formulering 2 på henholdsvis 2 og 5%.

Ved brug af en model med forecast, er der en forværring ved brug af formulering 2 i hændelse 1 og 3, på henholdsvis 3 og 8%. Hændelse 2 viser ikke nogen reel ændring, mens hændelse 4 viser en

reduktion på 6%. Variationerne der er vist her falder alle sammen inden for det interval der kan opstå grundet ændringer i det lokale minimum, som vist i appendiks E. Derfor er resultaterne her verificeret for at sikre, at det billede der er vist her er gældende generelt set.

Der er forskel på resultaterne for en model uden forecast og en model med forecast. Hvor modellen uden forecast viser generelle forbedringer i optimeringen. Mens at modellen med forecast ikke viser nogle forbedringer, og måske endda en mindre forværring. Grunden til forskellen mellem de to modeller er, at en model uden forecast kun har viden om det vand der er i systemet. Derfor udgør den vandføring der bliver sendt mellem bassinerne, en meget stor del af den samlede informationsmængde som DORA har til rådighed, og har derfor relativt stor indflydelse på optimeringen. Ved en model med forecast, har modellen også information omkring afstrømningen. I de kritiske situationer vil afstrømningen typisk udgøre størstedelen af den vandføring der er i systemet. Derfor udgør den vandføring der bliver sendt mellem bassinerne, en relativt mindre del af den informationsmængde som DORA har til rådighed. Derfor vil en præcisering af de datapunkter ikke have så stor indflydelse, som i en model uden forecast.

Ved brug af en model uden forecast, er der en betydeligt gevinst ved, at bruge formulering 2 for parallelkoblede bassiner. Derfor er det valgt, at benytte formulering 2 fremadrettet i projektet. Det er valgt at benytte formuleringen både med og uden forecast, selvom der ikke umiddelbart er nogen gevinst ved at bruge formuleringen, og måske endda en mindre forværring samlet set. Det er valgt for at have så meget kontinuitet mellem modellerne som muligt.

5.8 Opsummering

Den opstillede hypotese om at tidsskridtet mellem optimeringerne bør mindst være indstillingstiden for den langsommste aktuator i systemet, ser ud til at holde stik, da et tidsskridt på 2 minutter giver større overløbsvolumen end et tidsskridt på 5 minutter. Analysen viser også at et højere tidsskridt mellem optimeringer end 5 minutter giver en højere overløbsvolumen, da styringen ikke kan reagere tidsnok på ændringer i tilstanden i systemet. Derfor benyttes 5 minutter også som tidsskridtet mellem optimeringer i de videre analyser.

Gennem følsomhedsanalysen er det fundet at modellen generelt ikke er følsom overfor de usikre brugerinput der er hændelsesafhængige, altså vandets transporttid og udløbsvandføring fra spjældudledning. Så længe at de input der er givet har en nogenlunde korrekthed. Hvor der som oftest ikke forekommer nogen betydelig variation mellem de forskellige scenarier der er simuleret. Ved større afvigelser på +/-50 % fra bedste bud scenariet, så forekommer der en signifikant ændring i overløbsvolumen, men en så stor afvigelse på parametrene er større, end den variation der vil være fra hændelse til hændelse. Det er en vigtig konklusion at kunne drage, da effektiviteten af styringsmetoden ellers ville være tvivlsom. Hvis en høj præcision i vandets transporttid og udløbsvandføring fra bassiner var påkrævet, ville det være nødvendigt, at bestemme en ny værdi for hver hændelse. Det er muligt at bestemme en optimumsværdi når det er historiske hændelser der er simuleres. Men i realtid vil det være nødvendigt at klassificere hændelsen inden den er sket. Selv med gode vejrudsigter og radarforecast, vil det være en svær opgave af løse korrekt. Derfor giver lav følsomhed overfor disse parametre en større sandsynlighed for at DORA kan finde en optimal styring for en given ukendt hændelse.

Del III - Plansituation

6 Analyse af DORA styring med og uden forecast 35

6.1 Indførte regler for styring i DORA
6.2 Restriktion af individuel styring af pumper i pumpestationer
6.3 Beskrivelse af regnforecast
6.4 Resultater
6.5 Opsummering

7 Vægtning af overløb til beskyttelse af recipienter 43

7.1 Vægtningsfordeling ud fra økologisk tilstand
7.2 Vægtningsfordeling ud fra terrænhældning i oplandet
7.3 Vægtningsfordeling af overløb ud fra badevandssikring
7.4 Analyse af vægtning baseret på økologisk tilstand
7.5 Analyse af vægtning baseret på terrænhældning
7.6 Analyse af vægtning baseret på sikring af badevand
7.7 Opsummering

8 DORA styring med spatialfordeling af regn 61

8.1 Regnmålere brugt som input
8.2 Resultater
8.3 Vægtning af overløb med spatialfordeling af regn
8.4 Opsummering

6. Analyse af DORA styring med og uden forecast

I dette kapitel præsenteres opsætningen for DORA styring med og uden forecast, samt resultater fra simuleringer med denne opsætning.

6.1 Indførte regler for styring i DORA

For at forbedre styringen er det valgt at indføre regelstyring med en række hvis/ellers regler i styringen, der begrænser DORAs frihedsgrader i visse situationer. Det er valgt, da der er nogle dele af systemet, der er vurderet til at være ekstra kritiske for overløbsvolumen. Uden supplementerende regelstyring er der ikke nogen forbedring ved brug af DORA i forhold til statussituationen. Der er i stedet observeret en stigning i den gennemsnitlige overløbsvolumen per hændelse på 8%. Det er derfor undersøgt om der er bassiner hvor DORA underperformer i forhold til statussituationen, når kigges på udnyttelsesgraden. Det har ført identifikation af fire bassiner, hvor der er potentiale for at forbedre udnyttelsesgraden. Bassinerne udvalgt til, at have regelstyring er:

- Bellevuegade
- Enevold Sørensens Vej
- Indløb til Rørbassin
- Søndervang

Bellevuegade, Enevold Sørensens Vej og Søndervang er udvalgt, da det er de tre største bassiner i oplandet, målt på både fysisk volumen og på specifik kapacitet. Derfor er tilbageholdelse af vand i disse bassiner, essentielt i forhold til at reducere overløbsvolumen i systemet. De tre bassiner har ikke overløb til recipient, men risikoen for at bassiner udnyttes fuldt er yderst lille. Derfor kan en stor del af bassiner trygt udnyttes under regnhændelser. Tidligt i hændelserne, hvor udnyttelsesgraden af bassinerne i systemet stadig er lav, vil DORA gerne tømme bassinerne i systemet, for at være klar til at modtage eventuelt kommende nedbør. Det er sandsynligvis også den bedste strategi for de fleste bassiner. Men for de tre bassiner her, er den bedste strategi at tilbageholde vand indtil regnhændelsen er ovre, og først der tømmes bassinerne. Efter de fleste regnhændelser, vil der stadig være kapacitet i bassinerne, til at modstå en kommende hændelse regnhændelse, uden at de bliver fuldt udnyttet. Det vand der ledes videre fra disse bassiner under en regnhændelse der fører til overløb, vil i stor grad føre til yderligere overløb. En så kategorisk tilbageholdelse tidligt i hændelser, som det er ønsket, er svær at opnå i DORA uden supplementerende regelstyring.

Rørbassin er valgt grundet den specielle konfiguration for bassinet. Hvor bassinet kan betragtes som et nødbassin mellem Rebæk og Saftstationen bassinerne, og oplandet der i mellem. Bassinet har heller ikke overløb til recipient, der er i stedet overløb til forrenseanlægget. I hændelser hvor der er overløb fra Saftstationen bassinet, har udnyttelsesgraden af Rørbassinet en betydelig indflydelse på overløbsvolumen fra Saftstationen bassinet. Regelstyringen der er benyttet er taget fra den nuværende styring af bassinet. Den styring er designet til at udnytte bassinet mest muligt. Det er fundet at DORA ikke kan opnå samme udnyttelsesgrad af bassinet som regelstyringen. Udløb fra Rørbassin styres stadig 100% af DORA.

Regelstyringen for Bellevuegade, Enevold Sørensens Vej og Søndervang er:

Hvis γ<0,5 & γ_{Total}>0,1

    Luk Spjæld

Ellers

    DORA styring

Hvor:

γ er bassinets fyldningsgrad
γ_{Total} er den totale fyldningsgrad i hele systemet udover de tre bassiner.

Regelstyring af indløb til Rørbassin, hvor lukkede spjæld fører til indløb til Rørbassin, er:

Hvis $\gamma_{Rorbassin}$>0,9
    DORA styring
Ellers hvis $\gamma_{Forrens}$<0,76 & $\gamma_{Saftstationen}$>0,46
    Luk spjæld
Ellers hvis $\gamma_{Forrens}$<0,41 & $\gamma_{Saftstationen}$>0,38
    Luk spjæld
Ellers hvis $\gamma_{Forrens}$<0,29 & $\gamma_{Saftstationen}$>0,20
    Luk spjæld
Ellers hvis $\gamma_{Forrens}$<0,18 & $\gamma_{Saftstationen}$>0,07
    Luk spjæld
Ellers
    DORA styring

Regelstyringen for indløb til Rørbassin, er taget fra den nuværende styring af afløbssystemet.

6.2 Restriktion af individuel styring af pumper i pumpestationer

Af de ti pumpestationer i forbindelse med bassiner i oplandet har otte af dem mere end en pumpe i stationen. Oprindeligt var det valgt, at styre individuelt på alle pumper. Under tanken om at større differentiering af udløbsvandføringen vil give mulighed for bedre optimeringer af systemet. I det undersøgte år har det dog vist sig ikke at være tilfældet. Opsætningen fører til generelt dårligere løsninger på små hændelser med et overløbsvolumen under 1000 m^3. En opsætning, hvor de kritiske bassiner styres således, at pumperne i de pumpestationer styres synkront, giver generelt et bedre resultat for de små hændelser. Men lidt dårligere for de store hændelser. Hvilket resulterer i en mindre gennemsnitlig reduktion af overløbsvolumen, men en reduktion i flere hændelser. Derfor vælges det at styre pumperne i de bassiner der er kritiske for de små hændelser synkront. Grunden til at denne opsætning giver bedre resultater for de små hændelser er, at når DORA begynder tømning på disse bassiner, starter den som oftest ved at starte pumpen med mindst kapacitet. Pumpe nr. 2 startes i nogle tilfælde først når der er overløb fra bassinet. Hvilket resulterer i unødvendige overløb. Disse overløb er specielt tydelige ved små hændelser. Ved at styre pumperne synkront starter pumpestationen på fuld drift når tømning igangsættes. Derved reduceres de unødvendige overløb ved små hændelser. De bassiner der er kritiske for de små hændelser er bassiner med lav specifik kapacitet, der er her tale om bassinerne Bramdrupdam, Rebæk og Rugmarken.

6.3 Beskrivelse af regnforecast

Forecastet er beregnet ved brug af tid-areal metoden, på baggrund af regnmålerinput. I denne version af forecastet er der benyttet et perfekt forecast. Det vil sige, at regnmålerinputtet der benyttes til forecast beregningen, er det samme regnmålerinput, som benyttes i MOUSE modellen. Der er benyttet en koncentrationstid på syv minutter i forecastet, der dækker over både koncentrationstiden i oplandet og koncentrationstiden i rør. Grunden til at en koncentrationstid på syv minutter er valgt er, at størstedelen af oplandene i MOUSE modellen har en koncentrationstid på syv minutter. Derved er der ikke taget hensyn til koncentrationstiden i rørene. Men da denne koncentrationstid vil variere for hvert delopland, vil det kræve at forecastet beregnes for hvert opland i den hydrodynamiske

model, og ikke som nu, for hele oplandet til et bassin. Simplificeringen som følge af negligeringen af koncentrationstiden i oplandet vurderes ikke, at føre til nogen nævneværdig fejl.

6.4 Resultater

Alle hændelser, der i 2012 gav overløb i statussituationen, er valgt til sammenligning mellem DORA og den nuværende styring. Resultaterne af DORA er vist i tabel 6.1. I 2012 var der 28 hændelser, som gav overløb i statussituationen.

Tabel 6.1: Sammenligning af overløbsvolumener i statussituationen og med DORA styring. Negative ændringer angiver hændelser hvor overløbsvolumen er større i statussituationen end med DORA styring.

Nr.	Varighed	Nedbør	Status	u/ forecast	m/ forecast	Ændring u/ forecast		Ændring m/ forecast	
	[T]	[mm]	[m^3]	[m^3]	[m^3]	[m^3]	[%]	[m^3]	[%]
1	6,8	13,0	3428	4355	3901	927	27	473	14
2	10,7	17,0	6485	7265	6496	780	12	12	0
3	3,0	6,6	10	247	0	237	2417	-10	-100
4	15,3	11,2	40	0	0	-40	-100	-40	-100
5	12,9	17,2	3666	2624	2551	-1042	-28	-1114	-30
6	4,0	15,2	8938	8086	6226	-851	-10	-2712	-30
7	6,7	20,8	15445	17358	16652	1912	12	1206	8
8	6,2	10,6	406	1163	891	757	186	485	119
9	11,4	18,4	4575	3126	2153	-1448	-31	-2421	-52
10	5,0	17,4	3750	3393	4932	-356	-9	1181	31
11	3,3	8,6	253	457	538	204	80	285	112
12	2,1	14,4	4655	5347	3973	691	14	-681	-14
13	2,4	28,6	31793	31242	29335	-551	-2	-2457	-8
14	1,2	13,0	3436	4975	4102	1538	44	665	19
15	4,8	11,2	2530	2343	2020	-186	-7	-509	-20
16	6,5	19,6	10875	9398	9033	-1476	-13	-1841	-16
17	10,9	13,0	536	264	390	-272	-50	-145	-27
18	12,6	34,6	38163	30852	31904	-7310	-19	-6259	-16
19	3,5	8,0	41	393	336	352	856	295	719
20	8,1	10,2	75	0	0	-75	-100	-75	-100
21	5,3	9,8	352	848	983	495	140	630	178
22	8,9	32,0	39529	33871	36056	-5658	-14	-3473	-8
23	14,0	16,8	741	579	434	-162	-21	-306	-41
24	5,4	10,0	374	1333	1044	959	259	670	179
25	4,5	12,0	1579	3056	2925	1477	93	1343	85
26	14,6	18,2	4068	1872	2463	-2195	-53	-1604	-39
27	5,2	8,0	87	0	140	-87	-100	53	60
28	8,2	11,0	414	1026	475	612	147	60	14
Sum			186252	175485	169965	-10766	-6	-16286	-9
Gennemsnit			6651	6267	6070	-384	-6	-581	-9
Gns. forbedring			9958	8510	8436	-1447	-14	-1576	-16
Gns. forværring			2837	3679	3340	842	29	566	20

Af de 28 hændelser, der er analyseret, så giver DORA styringen en mindre overløbsvolumen i 15 af 28 hændelser, for tre hændelser er der ikke længere overløb, det gælder både for opsætningerne med og uden forecast. Ændringen i overløbsvolumen varierer fra en reduktion på 100 % til en stigning på 2417 % for modellen uden forecast og en stigning på 719 % med forecast. Den store procentvise stigning skal dog ses i lyset af en relativt lille overløbsvolumen i statussituationen for den hændelse. Variationen i reduktion/stigning i overløbsvolumen er grundet hændelsernes forskellige karakteristika som varighed, intensitet og variation i intensitet. Gennemsnitligt for hændelserne er der en reduktion på 6 % uden forecast og en reduktion på 9 % med foreacst. Hændelserne hvor der sker en reduktion, har en gennemsnitlig reduktion på 14 % uden forecast og 16 % med forecast, mens at hændelserne hvor der sker en stigning, har en gennemsnitlig stigning på 29 % uden forecast og 20 % med forecast. Generelt forbedres hændelserne marginalt mere med forecast, mens at de hændelser der forværres forværres betydeligt mindre med forecast end uden forecast. Det viser forecast forbedrer optimeringen for flere typer af hændelser. Hændelserne der forværres er i gennemsnit mindre end dem som forbedres. Det ses hvis hændelserne deles op efter størrelse, hvor hændelserne med overløbsvolumen på under $1000\,m^3$ i gennemsnit bliver forværret, her resulterer DORA styring i en stigning i overløbsvolumen på 89 % uden forecast og 57 % med forecast. Hændelser med en overløbsvolumen på over $10\,000\,m^3$ giver den største reduktion på 10 % både med og uden forecast. For hændelserne mellem $1000\,m^3$ og $10\,000\,m^3$ er der en stor forskel på modellerne med og uden forecast, hvor der er en reduktion på 1 % uden forecast og en reduktion på 11 % med forecast.

6.4.1 Analyse af hændelser hvor DORA ikke reducerer overløbsvolumen

For de små hændelser er det nemmere at vurdere præcist hvorfor at DORA fejler i at optimere hændelserne korrekt. Derfor bliver det her gennemgået hvorfor DORA fejler i nogle af de små hændelser. De store hændelser der underperformer forventes, at være grundet en kombination af de årsager der er fundet for de små hændelser.

Hændelse 3 har den største relative stigning i overløbsvolumen i modellen uden forecast. Det er i stor grad grundet at hændelsen i statussituationen har den mindste registrerede overløbsvolumen på $10\,m^3$. DORA underperformer i denne hændelse fordi, at styringen ikke starter pumperne i Bramdrupdam bassinet før efter at der er overløb fra bassinet. Det er den opførsel der var forsøgt formindsket, ved at tvinge pumperne til at starte synkront, men kan altså stadig ske, som det ses her. Der er tid nok tidligere i hændelsen til, at overløb helt kunne have været undgået fra bassinet, havde pumperne startet tidsnok. Med forecast er det muligt helt at fjerne overløb fra den her hændelse, hvilket var forventet efter analyse af hændelsen uden forecast.

Hændelse 8 er mere kompliceret, da der er mange ting der går galt. Uden forecast starter pumperne i Rebæk og Bramdrupdam bassinerne først når der er overløb fra bassinerne, og det resulterer i overløb som enten kunne være undgået, eller kraftigt reduceret. Der er også overløb fra Forrenseanlægget, som ikke forekommer i statussituationen, det er dog ikke helt klart præcist hvorfor det forekommer. Det er sandsynligvis grundet en kombination af en række faktorer, der tilsammen har gjort at mere vand er endt i Forrenseanlægget. Med forecast er overløb fra Rebæk og Bramdrupdam bassinerne reduceret. Der forekommer dog stadig et større overløb fra Forrens, der resulterer i en dårligere optimering end i statussituationen.

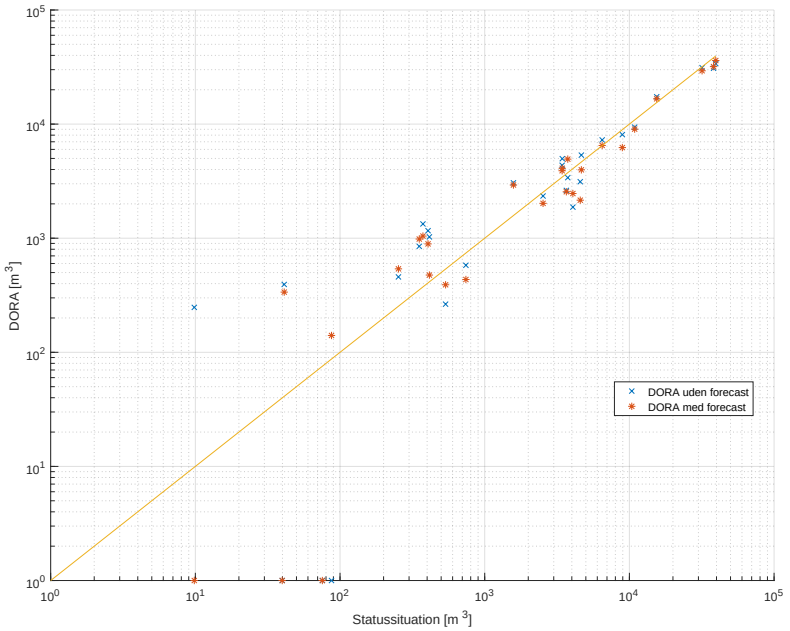
Hændelse 11 har overløb fra Rugmarken og Bramdrumpdam bassinerne både i DORA og statussituationen. Forskellen er dog at DORA har større overløb fra begge bassiner under hændelsen. I statussituationen startes pumperne i begge bassiner stort set med det samme, efter at der kommer vand i bassinerne. DORA starter også pumperne relativt tidligt i hændelsen, men der er en lag-time på henholdsvis 5 og 13 minutter fra der kommer vand i bassinet, til pumperne starter. Det er tæt på så optimalt som DORA kan komme under denne hændelse, og det er ikke muligt for DORA at

performe bedre, end en regelbaseret styring, der har et nærmest perfekt respons lige netop denne type hændelser. Hændelse 19 er samme type hændelse, og det er her heller ikke realistisk at forvente at DORA kan performe på samme niveau som statussituationen.

Hændelse 21 har i statussituationen overløb fra Bramdrupdam og Vester Nebel bassinerne. Med DORA styring er overløb fra disse bassiner stort set det samme som i statussituationen. Med DORA styring er der dog også overløb fra Rebæk og Forrenseanlægget. Rebæk bassinet går i overløb fordi, at pumperne i bassinet ikke startes før at bassinets kapacitet er næsten fuldt opbrugt, hvor overløb er uundgåeligt. Grunden til overløb fra forrenseanlægget er sværere at give en præcis grund, udover at DORA ikke formår at opmagasinere tilstrækkeligt med vand andre steder i systemet. Hændelse 24 og 28 har meget de samme karakteristika både i statussituationen og med DORA styring.

6.4.2 Grafisk præsentation af resultater

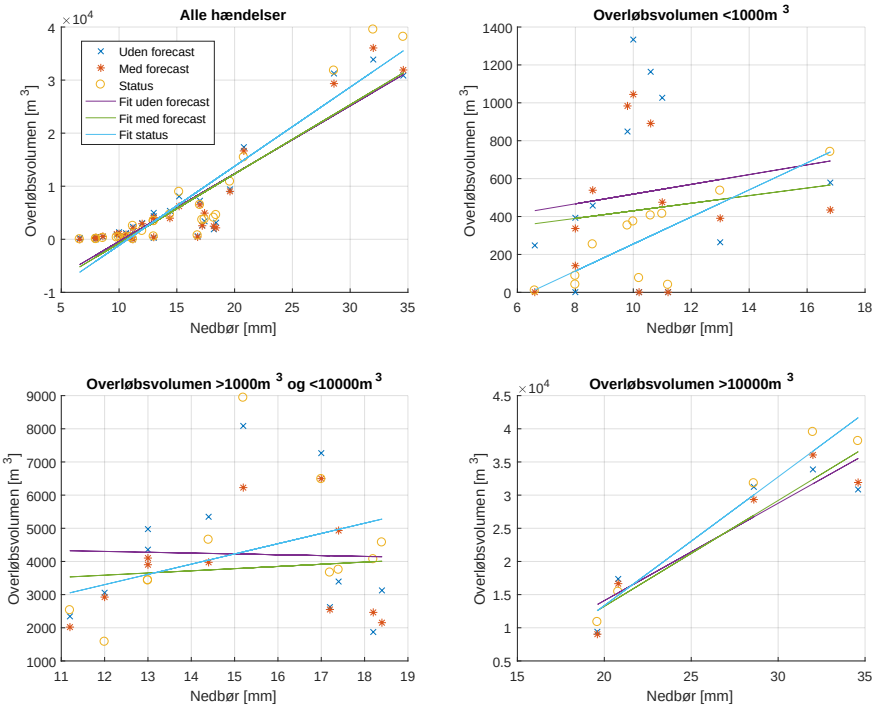
På figur 6.1 er overløbsvolumen i statussituationen vist i forhold til overløbsvolumen ved DORA styring. Figuren viser, at der for alle størrelse hændelser er en variation i, om DORA kan præstere bedre end den nuværende styring eller ej. Figuren viser også at styring med forecast generelt set resulterer i lavere overløbsvolumen i forhold til styring uden forecast. Enkelte hændelser er der dog ikke en forbedring med forecast. Grunden hertil er at hændelserne er en type, hvor der ikke er stor forbedring ved brug af forecast, og den generelle variation der er i optimeringen som vist i appendiks E, resulterer i at styring med forecast giver en dårligere optimering for den enkelte hændelse.



Figur 6.1: Sammenligning af overløbsvolumen i statussituationen og med DORA styring, vist på dobbelt logaritmisk plot. Hændelser med overløbsvolumen på $<1\,\mathrm{m}^3$ er angivet som $1\,\mathrm{m}^3$ på figuren.

Generelt set er DORA styring bedre på større hændelser, og statussituationen bedre på mindre hændelser. På figur 6.2 er et lineært fit mellem nedbørsdybde og overløbsvolumen vist, for både statussituationen og med DORA styring. Der er lavet et fit for alle hændelser, men også for tre inddelinger af hændelserne. Hændelserne er bleve inddelt i en del for hændelser på under $1000\,\mathrm{m}^3$, en del for hændelser mellem $1000\,\mathrm{m}^3$ og $10000\,\mathrm{m}^3$, og en del for hændelser over $10000\,\mathrm{m}^3$.

Inddelingen af hændelserne er baseret på overløbsvolumen i statussituationen for hændelsen. Der er lavet et fit for statussituationen og DORA styring med og uden forecast. Grafen for alle hændelserne viser meget godt forskellen mellem DORA styring og statussituationen. DORA styring giver lavere overløbsvolumener for større hændelser, mens at statussituationen er bedre på de små hændelser. Det er dog svært at se nogen umiddelbar forskel på DORA styring med og uden forecast på figuren. Skæringen med fittet for statussituationen har rykket sig lidt mellem de to. Hvor styring med forecasts evne til at håndtere de små hændelser bedre end uden forecast, er vist ved at skæringen for fittet med forecast har rykket sig til en lavere overløbsvolumen og lavere nedbørsmængde. Forskellen mellem de to DORA styringer er bedre visualiseret ved analyse af de tre inddelinger. De små hændelser løser DORA styring med forecast betydeligt bedre end styring uden forecast. De to situationer har samme tendens, men overløbsvolumen er konsekvent lavere ved styring med forecast. Det ses også at statussituationen løser disse hændelser bedre end de to DORA styringer. De mellemstore hændelser viser samme billede i forhold til DORA styringen. Forecast giver konsekvent bedre resultater, men tendens for de to styringer er den samme. For de store hændelser er meget ens for de to DORA styringer, hvilket indikerer at der ikke er meget at hente ved at bruge forecast på de helt store hændelser.



Figur 6.2: Lineært fit mellem nedbørsdybde og overløbsvolumen for statussituationen og med DORA styring.

Ved kun at korrelere styringens effektivitet med nedbørsvolumen, fanges ikke regnens dynamik, der også har en indflydelse på hvorvidt der sker overløb eller ej. For at forsøge at inddrage regnens dynamik er hændelsernes max regnintensiteter for 30 minutter, 60 minutter, 180 minutter, 360 minutter, 720 minutter, 1440 minutter og 2880 minutter, blevet korreleret med overløbsvolumen for hændelserne. På figur 6.3 er korrelation mellem overløbsvolumen for hele systemet og max regnintensiteten for 360 minutter under de forskellige hændelser.. 360 minutters intensiteten er vist, da det er den intensitet der har størst korrelation med overløbsvolumen. Korrelationen for hele

systemet er meget lig den korrelation der blev lavet for hændelsernes totale nedbørsmængde. Der er en betydelig forbedring fra statussituationen til DORA styring, men det er svært at se nogen forskel på DORA styring med og uden forecast. Derfor er der også vist korrelation for små, mellemstore og store hændelser her. For de tre opdelinger er der ingen forskel i, hvilken max intensitet de korrelerer bedst med, de korrelerer alle bedste med 720 minutters max intensitet. En ændring i forhold til det fulde system, der korrelerer bedste med 360 minutters max intensiteten. Grunden til denne forskel er at de to max intensiteter udgør toppunktet af korrelationen, og der derfor er en meget lille forskel de to i mellem.

Der er nogen forskel mellem korrelationerne med max intensitet og korrelationerne med nedbør. For de små hændelser giver brugen af forecast en betydelig forbedring ved hændelserne med lav intensitet, i forhold til DORA styring uden forecast, en forskel der dog forsvinder med stigende intensitet. DORA styring med forecast og statussituationen viser samme tendens over hændelserne.

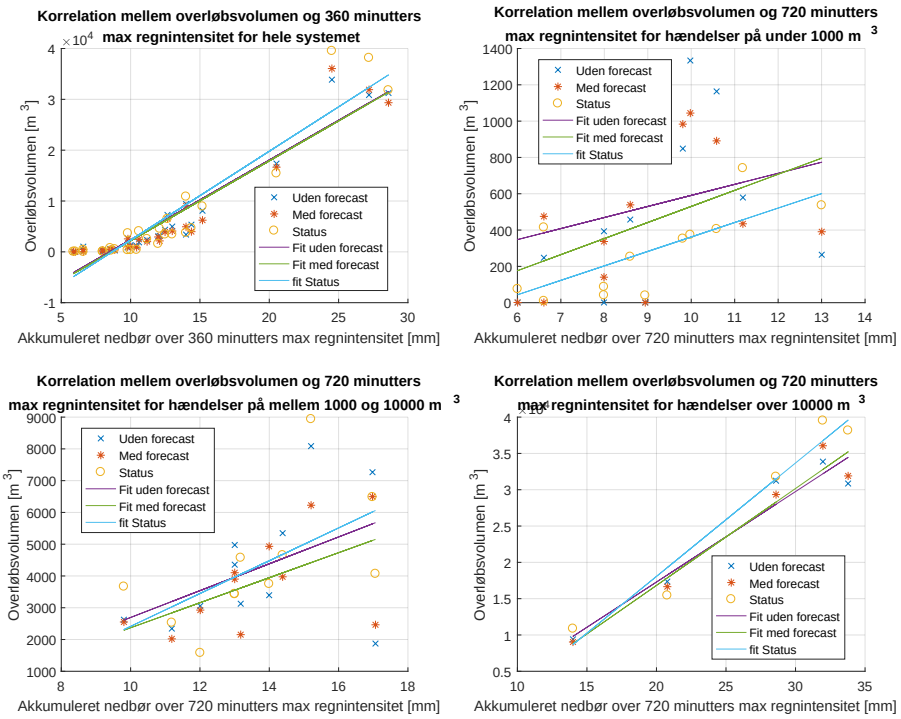
For de mellemstore hændelser er der en konstant forskel på DORA styring med og uden forecast, der ikke ændrer sig ved ændring i intensitet. Statussituationen viser dog en klart mere stigende tendens ved højere intensitet end DORA styringen gør. Sammenlignet med korrelationen for nedbørsmængden for hele hændelsen, ses der en stigende tendens ved højere intensitet for de mellemstore hændelser, hvor der ved korrelationen med nedbørsmængden var en flad tendens for de mellemstore hændelser ved ændring i den samlede nedbørsmængde. Det er et tegn på at total nedbørsmængde ikke i tilstrækkelig grad får regnens dynamik med, og at regnens dynamik har en indflydelse på overløbsvolumen.

For de store hændelser er der ikke nogen betydelig forskel mellem styring med og uden forecast, mens at statusituationen er betydeligt dårligere. Det er den tendens der også er observeret tidligere.

I appendiks H er lignende grafer vist for de individuelle bassiner. I appendikset er der lavet individuelle figurer for styring med forecast og styring uden forecast. Det er gjort da der kan være betydelig forskel på hvilken max intensitet der har den største korrelation for det givne bassin. Kun max regnintensiteten med den største korrelation er vist. På figurene er alle de analyserede hændelser markeret på figuren, også hvis overløbsvolumen har været 0 i den pågældende hændelse. Dog er korrelationen kun udført på de hændelser hvor der har været overløb fra bassinet. Figurene giver et billede af hvordan den dimensionsgivende varighed er forskellig fra bassin til bassin, da den regnintensitet med størst korrelation svinger mellem 180 minutter og 720 minutter for de fleste bassiner. I nogle tilfælde er der fundet højest korrelation med 30 minutter og 2880 minutter. Grunden til at disse max intensiteter giver størst korrelation er enten at der er få overløb fra bassinet, hvilket gør at der ikke nødvendigvis er nogen sammenhæng mellem overløbsvolumen og max regnintensitet i dataen. Det kan også være fordi at bassinet har den største korrelation med den totale nedbør for hændelserne, hvilket er indikeret ved at bassinet korrelerer med 2880 minutters max intensitet. Ydermere giver figurene et billede af hvordan den spatiale fordeling af overløb har flyttet sig mellem statussituationen og DORA styring. Hvor nogle bassiner har et fit for DORA styring der ligger under fittet for statussituationen, hvilket indikerer en mindre samlet overløbsvolumen fra bassinet med DORA styring, og andre bassiner er det omvendt.

6.5 Opsummering

DORA styring er vist som værende effektivt i forhold til at reducere overløbsvolumen i forhold til statussituationen. Det er dog ikke alle hændelser og hændelsestyper som DORA styring er bedre end statussituationen. I hændelser på under $1000\,m^3$ er DORA styring generelt dårligere end statussituationen. Analyse af forskellen mellem statussituationen og DORA styring afslører en række grunde til hvorfor DORA underperformer ved små hændelser. En grund er at regelstyringen fra statussituationen optimerer nogle hændelser næsten perfekt, hvor bare det at der er en



Figur 6.3: Korrelation mellem overløbsvolumen i hele systemet og max regnintensitet for DORA styring og statussituationen.

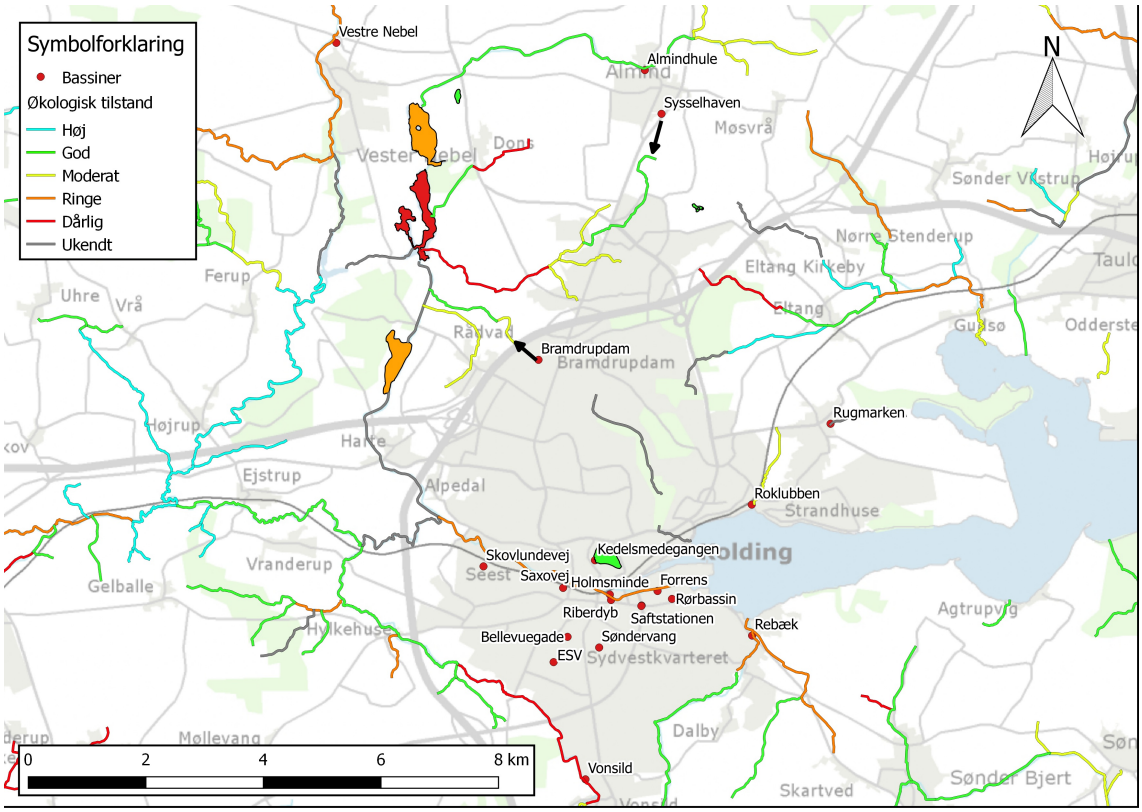
opdateringsfrekvens for DORA styring gør, at den ikke vil kunne løse hændelserne lige så godt som regelstyringen. Dette gælder for både styring med og uden forecast. En anden grund er at DORA nogle gange ikke starter pumperne i et bassin, før end at bassinet er helt fyldt. Det resulterer i overløb der kunne være undgået ved små hændelser. Det samme sker også ved større hændelser, men har ikke så stor effekt på den samlede overløbsvolumen som ved små hændelser. En trejde grund er, at DORA ikke opmagasinerer tilstrækkeligt vand i oplandet til forrenseanlægget, hvilket resulterer i overløb herfra som ikke skulle have været sket. De to sidste grunde kan virke modstridende, da den ene er grundet for meget opmagasinering i oplandet, og det andet er grundet mangel på opmagasinering. De er dog ikke nødvendigvis selvmodsigende, når man tager højde for, at den specifikke kapacitet i bassinerne i oplandet ikke er ens. Bassiner med lav specifik kapacitet bør ikke bruges til en stor grad af opmagasinering, mens at bassiner med stor specifik kapacitet i større grad kan bruges til opmagasinering, uden nogen speciel overløbsrisiko ved små hændelser. Disse to grunde bør kunne fjernes ved brug af forecast. Det har dog ikke vist sig at være tilfældet altid i den analyse der er foretaget her. Forecast fjerner fejlen med manglende pumpe start. Men fejlen med manglende opmagasinering i oplandet løses ikke i alle tilfælde, da der stadig forekommer hændelser hvor der ikke opmagasineres tilstrækkeligt i oplandet til Forrens. Det er tegn på at forecastet til Forrens ikke er lavet korrekt, da der formentlig ikke bliver forecastet den vandvolumen fra oplandet direkte til Forrens, som der i praksis forekommer.

7. Vægtning af overløb til beskyttelse af recipienter

Da DORA giver mulighed for at vægte overløb i styringsstrategien, foretages der i dette projekt en vægtning af de forskellige overløb. Der er opstillet tre scenarier for inddeling af cost, baseret på tre forskellige kriterier. Forskellige cost scenarier giver muligheden for, at se effekten af ændringer i cost, og hvordan det påvirker den spatialefordeling af overløb, og hvilken effekt forskellige scenarier har, på den samlede overløbsvolumen. Kriterierne der er valgt er:

- Økologisk tilstand i recipienten
- Terrænhældning i oplandet
- Badevandssikring

7.1 Vægtningsfordeling ud fra økologisk tilstand



Figur 7.1: Nuværende økologisk tilstand i vandløb og søer i oplandet til Kolding Fjord. (Styrelsen for Vand- og Naturforvaltning, 2016)

Den økologiske tilstand i recipienterne, som den er fastsat i den seneste vandområdeplan (Styrelsen for Vand- og Naturforvaltning, 2016), er vist på figur 7.1 sammen med bassinerne i oplandet. Bassinerne uden overløb er også vist på figuren. På figuren er samlet økologisk tilstand for vandløbene vist. Samlet økologisk tilstand, er den dårligste tilstand af faktorerne, smådyr, fisk og makrofytter. Det er et mål i vandområdeplanerne, at alle søer og vandløb skal opnå høj eller god økologisk tilstand. Fem bassiner plus forrenseanlægget har overløb direkte til Kolding Å mens den løber gennem Kolding. På den strækning er Kolding Å karakteriseret som havende ringe økologisk tilstand. Tre bassiner har overløb til en recipient med god eller høj økologisk

tilstand. Kedelsmedegangen bassinet har overløb til Kolding Slotssø, der har god økologisk tilstand. Bassinerne i Almind, Almindhule og Sysselhaven, har også begge overløb til recipienter med god økologisk tilstand. Rugmarken bassinet har som det eneste overløb til en recipient med ukendt økologisk tilstand. Rørbassin bassinet er specielt, da det ikke har overløb til recipient, men til forrenseanlægget. Derfor har bassinet i alle tilfælde samme cost som forrenseanlægget.

Tabel 7.1: Vægtning af overløb og den økologiske tilstand af recipienter. En højere vægtning betyder højere omkostning ved overløb.

Bassin	Økologisk tilstand	Vægt [DKK/m^3]
Forrens	Ringe	1
Saftstationen	Ringe	2
Rebæk	Ringe	2
Vonsild	Dårlig	1
Riberdyb	Ringe	2
Søndervang	Ingen recipient	4
Bellevuegade	Ingen recipient	4
Enevold Sørensens Vej	Ingen recipient	4
Saxovej	Ringe	2
Skovlundevej	Ringe	2
Holmsminde	Ringe	2
Kedelsmedegangen	God	4
Roklubben	Ringe	1
Rugmarken	Ukendt	3
Bramdrupdam	Moderat	3
Vester Nebel	Ringe	2
Sysselhaven	God	4
Almindhule	God	4
Rørbassin	Ingen recipient	1

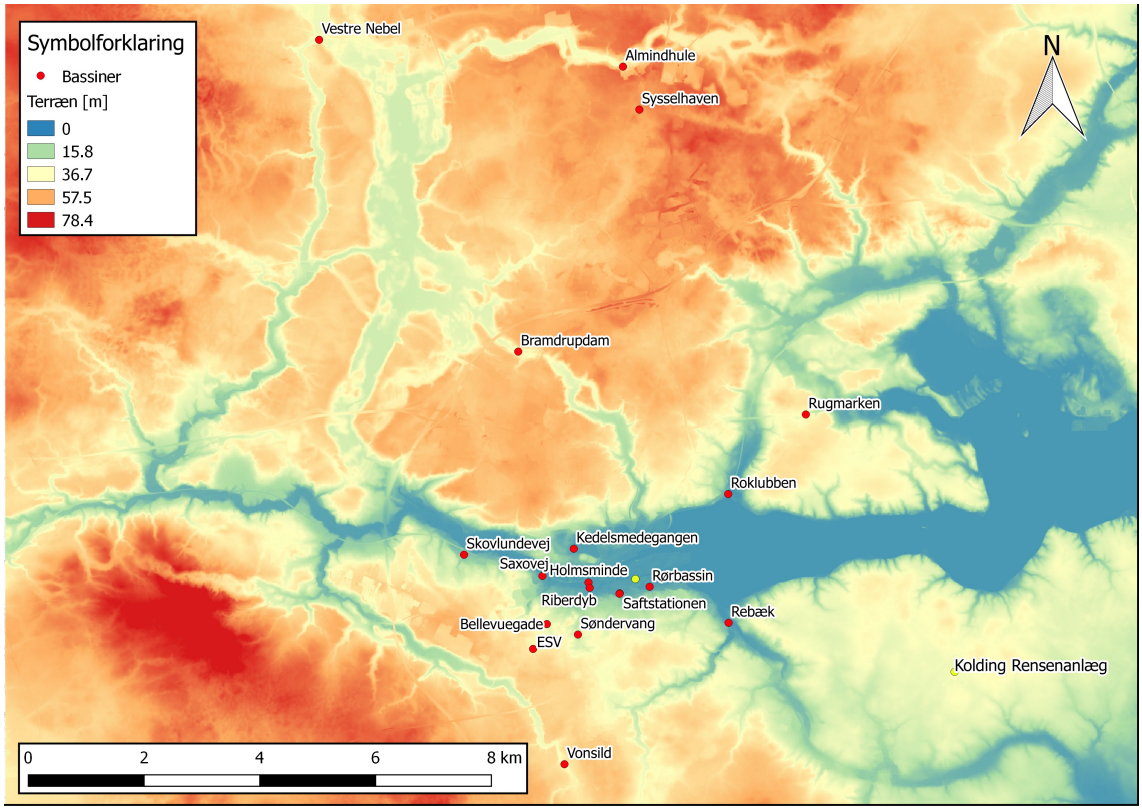
Vægtningen af de forskellige overløb er vist i tabel 7.1. I appendiks F er det undersøgt i hvilken grad den numeriske forskel mellem de fire vægtningstrin påvirker det endelige resultat. Det er fundet at der ikke umiddelbart er nogen betydelig forskel mellem de valgte vægtningstrin og vægtningstrin med større spring mellem vægtningerne. Enheden for vægtningen er angivet som [DKK/m^3]. Enheden skal ikke ses som faktiske kroner og øre. Enheden er udelukkende brugt til sammenligning mellem forskellige modeller. Hvor vægtningsfaktoren kan ganges på overløbsvolumen for det givne overløb. Hvor der så i stedet for at sammenligne total overløbsvolumen, sammenlignes i total DKK for en hændelse.

Vonsild bassinet har som det eneste en recipient med dårlig økologisk tilstand og har derfor fået vægtningen 1. Det samme har forrenseanlægget og Roklubben bassinet, på trods af at de har ringe økologisk tilstand i recipienterne. Det antages, at overløbsvandet fra forrenseanlægget har gennemgået en eller anden form for mekanisk rensning, som ikke sker ved andre overløb. Derfor vurderes overløb herfra at være mindre kritiske end andre overløb til Kolding Å. Roklubben bassinet har overløb direkte til Kolding Fjord, hvilket vurderes mindre kritisk end overløb til vandløb, grundet fortyndingen ved overløb til en marinrecipient. Andre bassiner har med overløb til en recipient med ringe økologisk tilstand har fået vægtningen 2. Overløb til recipient med moderat økologisk tilstand har fået vægtningen 3, det samme har overløbet fra Rugmarken, hvis recipient har ukendt tilstand. Bassinerne med overløb til recipienter med god økologisk tilstand har fået vægtningen 4. Bassinerne uden overløb til recipient, Søndervang, Bellevuegade og Enevold Sørensens Vej har alle den højeste vægtning på 4, for at sikre mod fuld kapacitetsudnyttelse af

bassinerne.

7.2 Vægtningsfordeling ud fra terrænhældning i oplandet

Vægtning ud fra terrænhældning i oplandet til bassinet er valgt for, at tage hensyn til den belastningen af recipienten fremfor følsomheden af recipienten. Hvis ledningerne i oplandet til et bassin er selvrensende, er der mindre materiale i overløbsvandet, som kan gøre skade på recipienten. Hvis der er stor terrænhældning i oplandet, er der forventning om selvrensning i ledningerne. Derfor bruges terrænhældning som en stand-in for en selvrensningsanalyse.



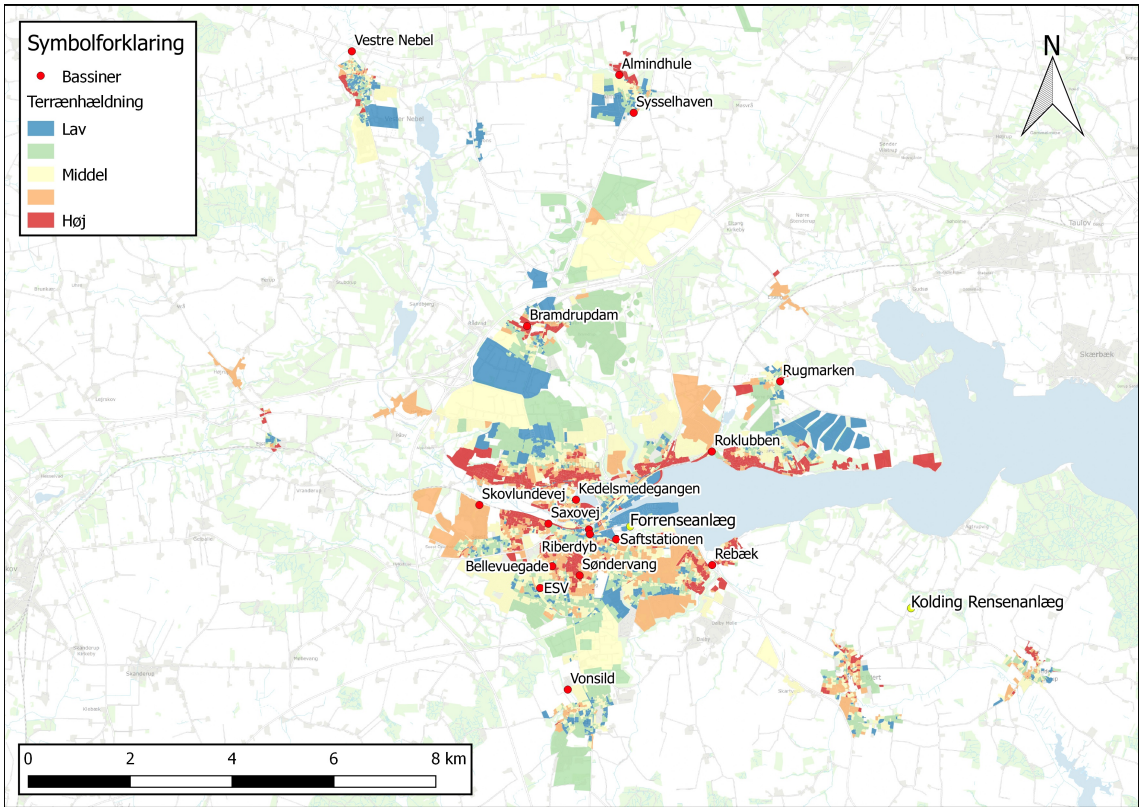
Figur 7.2: Terrænkort over Kolding og omegn

Et terrænkort af Kolding området er vist på figur 7.2. I Kolding by falder terrænet relativt kraftigt mod Kolding Å og Kolding Fjord. Uden for å- og fjorddalen er terrænet mere fladt. Terrænkortet er et rasterkort med en opløsning på 0,4m x 0,4m. I QGIS er terrænkortet omdannet til et rasterlag, hvor terrænhældningen i hver celle er beregnet. Terrænhældning er derefter omregnet til en gennemsnitlig terrænhældning for hvert MOUSE opland. Terrænhældning i oplandet er vist på figur 7.3.

Vægtningen af overløbene ud fra terrænhældningen er baseret på en subjektiv vurdering, af den relative terrænhældning, og er vist i tabel 7.2. Områderne i den nordlige del af oplandet, er generelt vægtet højest, da terrænhældningen her er lav. Modsat er oplandene centralt i Kolding vægtet lavt, da terrænhældningen her er stor. Forrenseanlægget har fået vægtningen 1, da overløbsvandet her, har gennemgået meget simpel rensning, og derfor må antages at være renere end andre steder.

7.3 Vægtningsfordeling af overløb ud fra badevandssikring

Skal badevandet beskyttes, er det nødvendigt, at begrænse overløb direkte til Kolding Fjord, eller overløb til vandløb med kort transporttid til Kolding Fjord. Bynære badevandsmuligheder i Kolding



Figur 7.3: Gennemsnitlig terrænhældning i MOUSE oplandene.

er vist på figur 7.4.

Vægtning af overløb for, at beskytte bademulighederne, er vist i tabel 7.3. Overløb til Kolding Fjord og Kolding Å, samt overløbet i Rebæk er prioriteret, da det er disse der vurderes at være potentielt kritiske i forhold til badevand. Det er antaget at transporttiden til Kolding Fjord, for overløb til Kolding Å er så lav, at coliforme bakterier ikke når at henfalde i nævneværdig grad.

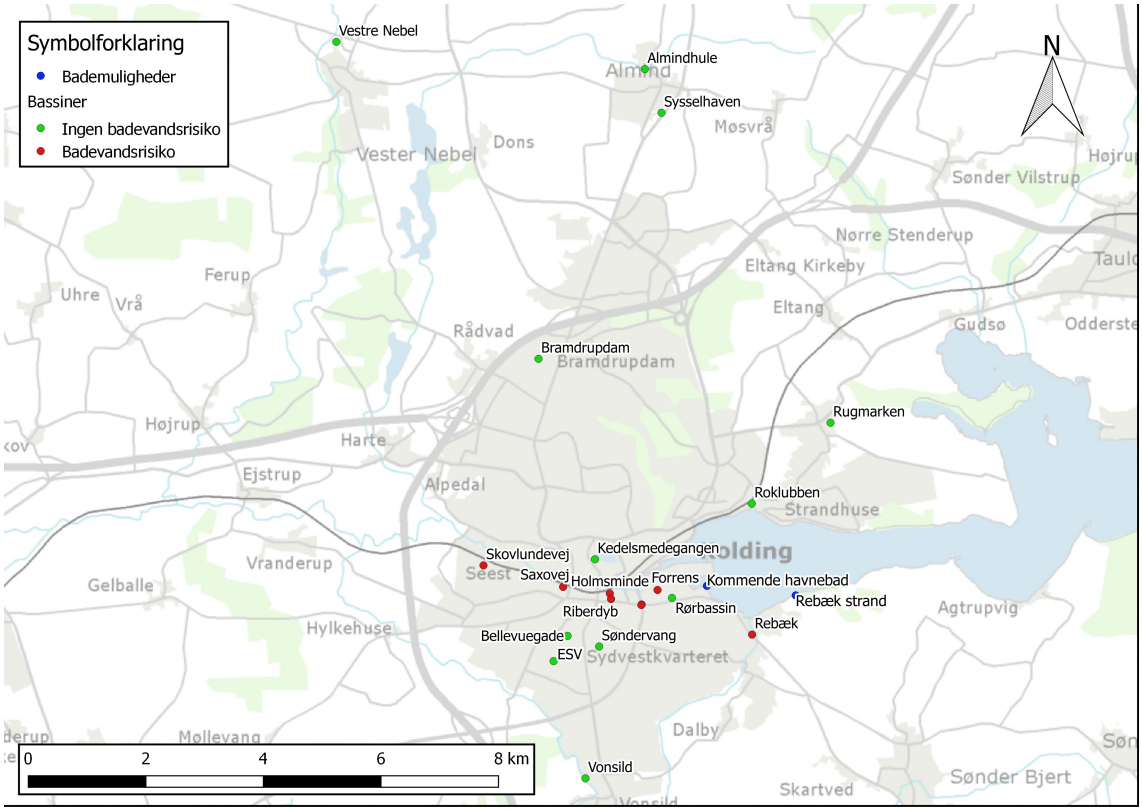
En costfordeling med henblik på at beskytte badevand. Vil ikke være aktiv hele året, men kun i perioder hvor det er ønsket, at beskytte badevandet. Costfordelingen kan benyttes i kombination med en anden costfordeling. I badevandssæsonen kan badevandsfordelingen være første prioritet. Men sker der overløb til en af de beskyttede recipienter, og badevandskvaliteten ikke længere kan garanteres. Så kan vægtningen overgå til en vægtningsfordelingen med henblik på at reducere overløbsvolumen fra systemet, da det ikke længere er nødvendigt at beskytte badevandet.

Tabel 7.2: Vægtning af overløb udfra terrænhældning i oplandet til bassinet. En højere vægtning betyder højere omkostning ved overløb.

Bassin	Vægt [DKK/m^3]	Bassin	Vægt [DKK/m^3]
Forrens	1	Holmsminde	2
Saftstationen	2	Kedelsmedegangen	1
Rebæk	1	Roklubben	1
Vonsild	3	Rugmarken	4
Riberdyb	1	Bramdrupdam	4
Søndervang	4	Vester Nebel	4
Bellevuegade	4	Sysselhaven	4
Enevold Sørensens Vej	4	Almindhule	3
Saxovej	2	Rørbassin	1
Skovlundevej	3		

Tabel 7.3: Vægtning af overløb udfra badevandssikring. En højere vægtning betyder højere omkostning ved overløb.

Bassin	Vægt [DKK/m^3]	Bassin	Vægt [DKK/m^3]
Forrens	4	Holmsminde	4
Saftstationen	4	Kedelsmedegangen	1
Rebæk	4	Roklubben	1
Vonsild	1	Rugmarken	1
Riberdyb	4	Bramdrupdam	1
Søndervang	4	Vester Nebel	1
Bellevuegade	4	Sysselhaven	1
Enevold Sørensens Vej	4	Almindhule	1
Saxovej	4	Rørbassin	4
Skovlundevej	4		



Figur 7.4: Bademuligheder i Kolding.

7.4 Analyse af vægtning baseret på økologisk tilstand

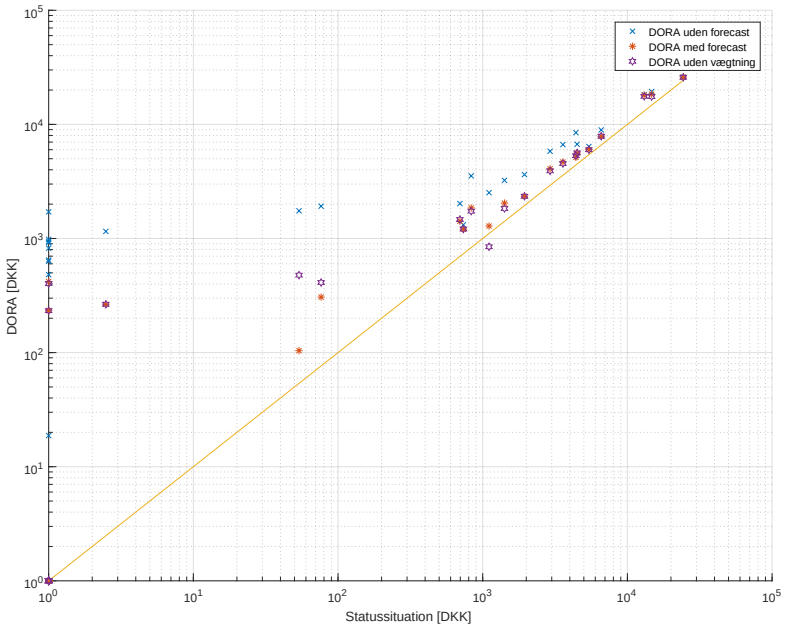
Dette vægtningsscenarie er lavet ud fra et ønske om at beskytte recipienter med god eller høj økologisk tilstand. De 28 hændelser, der er blevet analyseret i kapitel 6, er også blevet analyseret her. Resultater af den samlede cost for hele systemet er vist i tabel 7.4. Summeret cost og gennemsnitlig cost for de overløb med høj vægtning er også vist i tabellen. Høj vægtning er i dette tilfælde defineret som overløb med en vægtning på 3 eller 4. Cost er angivet i DKK, da overløbenes vægtning har enheden [DKK/m^3]. I tabellen er kun vist summerede og gennemsnitsværdier, resultater på hændelsesniveau for alle analyser præsenteret i dette kapitel er vist i appendiks G.

Tabel 7.4: Sammenligning af cost i statussituationen og med DORA styring med vægtningen ud fra økologisk tilstand. Negative ændringer angiver, at overløbsvolumen er større i statussituationen end med DORA styring. Cost er angivet i DKK.

	Status	u/ forecast	m/ forecast	Ændring u/ forecast		Ændring m/ forecast	
	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[%]	[DKK]	[%]
Sum	312695	352211	323470	39516	13	10775	3
Gennemsnit	11167	12578	11552	1411	13	384	3
Sum vægtede overløb	86368	134806	107274	48438	56	20905	24
Gns. vægtede overløb	3084	4814	3831	1729	56	746	24

Uden brug af forecast er der en forværring på 13 % i den samlede cost ved brug af DORA. Ved brug af forecast er der stadig en forværring, men forværringen er betydeligt mindre på kun 3 %. Fokuseres der kun på de overløb med høj vægtning, så er der en betydelig forværring både med og uden brug af forecast på henholdsvis 24 % og 56 %, der er dog en betydelig reduktion i overløbsvolumen ved at bruge forecast, fremfor ikke at gøre det. På figur 7.5 er cost i statussituationen og med DORA styring vist for overløbene med høj vægtning. Alle hændelser uden forecast resulterer i dårligere resultater end i statussituationen. Generelt set bliver resultaterne mere lig resultaterne fra statussituationen, når den samlede cost stiger. Med brug af forecast er det stadig alle hændelser, som er dårligere end statussituationen. Dog har hændelserne flyttet sig nærmere statussituationen i alle tilfælde. På figuren er også vist DORA uden vægtning. Det er gjort fordi det i lige så høj grad er interessant at undersøge, hvordan overløbsvolumen er flyttet rundt i systemet, og for at kunne gøre det, er det nødvendigt at have den situation med, som vægtningerne er ændret fra. Den DORA styring uden vægtning der er brugt, er DORA styringen med forecast fra kapitel 6, og det er gældende gennem hele dette kapitel, og i kapitel 8. DORA uden vægtning viser generelt set mindre cost, både generelt for hele systemet og for overløbene med høj vægtning. Uden forecast er der en forværring på 27 % sammenlignet med DORA uden vægtning. Med forecast er der en forværring på 2 % sammenlignet med DORA uden vægtning. Det fremgår af figuren at der er flere hændelser hvor der er en relativt lille forskel mellem DORA uden vægtning og DORA med forecast. Der er 7 hændelser hvor forskellen mellem de to er på under 2 %.

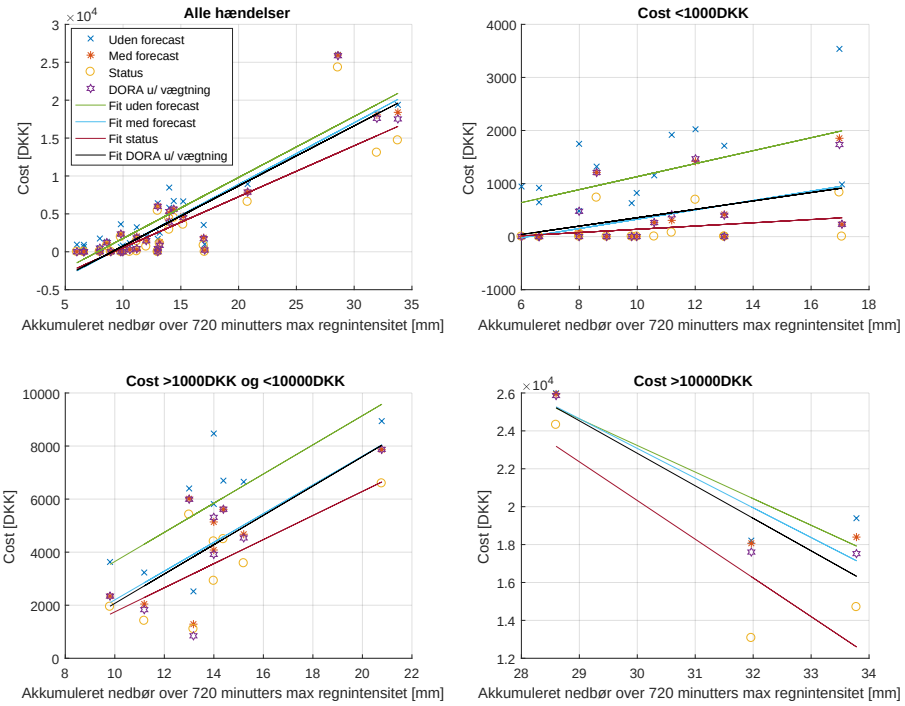
På figur 7.6 er der vist et lineært fit mellem 720 minutters maksimal regnintensitet under en hændelse, og den samlede cost for overløbene med høj vægtning. Det er gjort for statussituationen og DORA styring med og uden forecast, samt DORA styring uden vægtning. Det ses, at DORA styring uden forecast giver markant dårligere resultater uanset hændelsestypen. Kun for de store hændelser er der ikke nogen stor forskel mellem styringen med og uden forecast. DORA styring med forecast og DORA styring uden vægtning ligger for de fleste hændelser meget tæt. DORA uden vægtning er dog den bedste for de fleste hændelser. For alle hændelsestyper er det statussituationen som giver de bedste resultater.



Figur 7.5: Sammenligning af cost i statussituationen og med DORA styring for overløb med høj vægtning, vist på dobbelt logaritmisk plot. Der er inkluderet DORA styring med og uden forecast, samt DORA styring uden vægtning. Hændelser med overløbsvolumen på <1 DKK er angivet som 1 DKK på figuren.

På figur 7.7 er bassinerne i oplandet vist, hvor bassinerne er farvelagt ud fra den procentvise ændring i cost fra DORA styring uden vægtning til DORA styring med vægtning og forecast. De fleste bassiner har en større samlet cost med vægtning end uden vægtning, hvor kun 3 bassiner har en reduceret overløbsvolumen. Ingen af bassinerne med høj vægtning har fået reduceret cost ved brug af vægtningen. Det er ikke tydeligt hvorfor at der ikke er sket nogen reduktion i cost for bassinerne med høj vægtning. For eksempel har Kedelsmedegangen bassinet en mindre stigning 2 % på trods af en høj vægtning, mens at det nedstrøms bassin Holmsminde har fået en reduceret cost på 8 %. Reduktionen i Holmsminde kan være fordi at Holmsminde har en højere vægtning end dets nedstrøms bassin, Forrens. Hvorfor det samme ikke gør sig gældende for Kedelsmedegangen er lidt mere kompliceret. Holmsminde og Kedelsmedegangen er relativt robuste bassiner med få overløbshændelse, og som oftest går de i overløb sammen under hændelser. Kedelsmedegangen har også en lav udløbsvandføring sammenlignet med dets volumen. Hvilket gør at bassinet har en begrænset mulighed for at flytte vand nedstrøms. Derfor kan der være begrænset potentiale for at reducere cost, hvis under store regnhændelser, hvilket er der bassinet går i overløb. Hvis de fire hændelser hvor Kedelsmedegangen og Holmsminde går i overløb sammen analyseres, så viser det sig at de to bassiners samlede cost er reduceret i 3 af de 4 hændelser, selvom cost er en smule højere i Kedelsmedegangen.

Rugmarken bassinet er et andet bassin med høj vægtning som har fået en mindre stigning i samlet cost. Det er et bassin der ofte går i overløb grundet dets lave specifikke kapacitet. I de hændelser hvor bassinet går i overløb og der ikke er overløb nedstrøms, er der ingen forskel mellem styring med og uden vægtning. Men når der kommer overløb nedstrøms i Roklubben, så stiger cost for Rugmarken sammenlignet med DORA uden vægtning. Grunden til dette er at Roklubben har lav vægtning og derfor sørger DORA for at en større del af den samlede overløbsvolumen samles der,

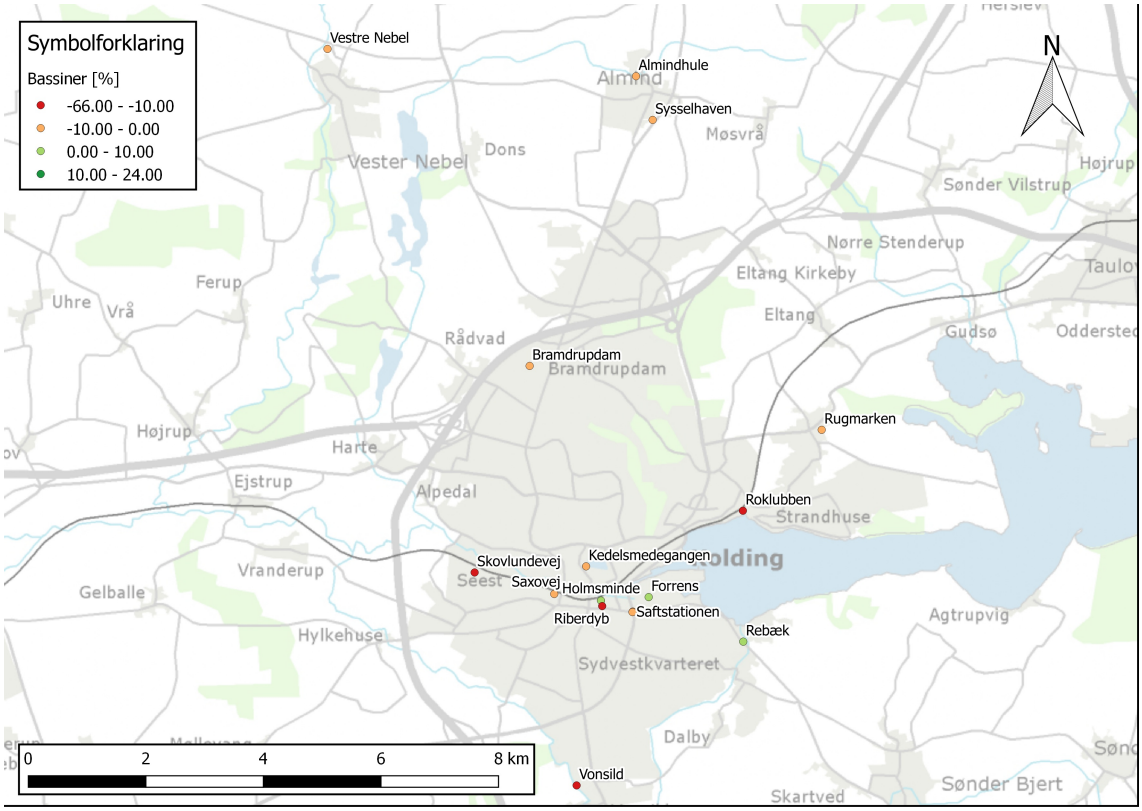


Figur 7.6: Lineært fit mellem akkumuleret nedbør over 720 minutters maksimal regnintensitet og cost for statussituationen og med DORA styring for overløb med høj vægtning.

og noget af den reduktion i overløbsvolumen fra Forrens skal blandt andet findes ved, at det i stedet er udledt ved Roklubben. Det resulterer dog i at DORA vælger at udlede mere fra Rugmarken, da der allerede er et betydeligt overløb nedstrøms.

Almindhule og Sysselhaven har begge høj vægtning og Forrens som nedstrøms bassin. Derfor burde det være muligt for DORA at prioritere lavere overløb her end i DORA styring uden vægtning. Der forekommer dog marginale stigninger i cost for de to bassiner på henholdsvis 0,2 % og 1,8 %. Grunden her til kan være, at DORA allerede har reduceret overløbsvolumen til tæt på optimum for de to bassiner, derfor er der ikke meget at optimere på i de to bassiner. Når det er tilfældet kan indførslen af vægtning på systemet føre til at DORA ikke længere kan finde det samme minimum, som det var tilfældet uden vægtning. Det kan være grunden til den marginale stigning i overløbsvolumen i de to bassiner.

Vægtning ud fra økologisk tilstand i recipienterne har vist sig ikke at være en effektiv måde at reducere overløbsbelastningen til sårbare recipienter på. Hverken hvis der sammenlignes med statussituationen eller, hvis der sammenlignes med DORA styring uden vægtning. Det er svært at komme med et entydigt svar på præcis, hvorfor der sker en forværring ved brug af vægtninger. En af grundene er, at der ikke er taget hensyn til systemets opbygning, da vægtningerne blev givet. I høj grad er fordelingen af overløb i systemet bestemt af systemets geometri. Forsøges det at fremme en opførsel, som er modsat den opførsel, som geometrien naturligt skaber, så kan det føre til, at DORA forsøger en styring som ikke er holdbar over en hel hændelse. Det fører til en situation hvor det ikke længere er muligt at opnå en optimering der er bedre end statussituationen, eller DORA styring uden vægtning. Der er altså tegn på at det er nødvendigt at tage systemets geometri in mente, hvis det ønskes at beskytte vise recipienter for overløb.



Figur 7.7: Kort over bassinerne i oplandet, og markering af den procentvise reduktion i cost fra de tilhørende overløbsbygværker, fra DORA styring uden vægtning til DORA styring med vægtning og forecast. På figuren er kun vist bassiner med overløb til recipient. Den samme symbolforklaring er brugt på denne og lignende figurer i dette kapitel, hvorfor at hele farveskalaen ikke er brugt på denne figur.

7.5 Analyse af vægtning baseret på terrænhældning

Resultater af samlet cost med vægtninger baseret på terrænhældning er vist i tabel 7.5. Vægtningen er konstrueret på baggrund af terrænhældningen i oplandet for, at beskytte recipienterne, ved at forsøge og samle overløbene de steder hvor der er stor terrænhældning, og derfor forventning om selvrensning af rørene. Steder med lav terrænhældning, og derved ikke forventning om selvrensning ønskes at få reduceret overløbsvolumen for, at formindske udledning af first flush.

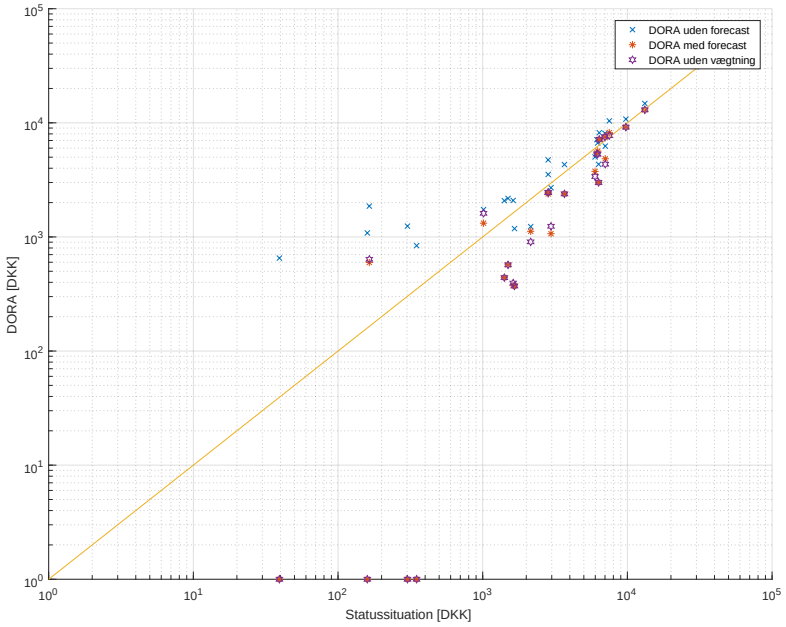
Tabel 7.5: Sammenligning af cost i statussituationen og med DORA styring med vægtningen ud fra terrænhældningen i oplandet. Negative ændringer angiver, at overløbsvolumen er større i statussituationen end med DORA styring. Cost er angivet i DKK.

	Status	u/ forecast	m/ forecast	Ændring u/ forecast		Ændring m/ forecast	
	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[%]	[DKK]	[%]
Sum	364708	375123	354613	10415	3	-10095	-3
Gennemsnit	13025	13397	12664	371	3	-360	-3
Sum vægtede overløb	188303	212166	180517	23862	13	-7786	-4
Gns. vægtede overløb	6725	7577	6447	852	13	-278	-4

Den samlede cost for hele systemet er meget lig den samlede cost i statussituationen. Uden forecast er det en forværring på 3 % og med forecast er der en forbedring på 3 %. Kigges der kun

på de overløb med høj vægtning er opsætningen uden forecast ikke specielt god, da der her er en forværring i forhold til statussituationen på 13 %. Opsætningen med forecast præsterer dog stadig fint, og reducerer cost med 4 %. I analysen i kapitel 6 var det ikke muligt at få DORA til at performe bedre end statussituationen ved små hændelser. Det er dog anderledes her, for opsætningen med forecast har 23 % lavere samlet cost på de små hændelser end statussituationen har på de samme hændelser. Grunden til dette kan være, at nogle af de bassiner, som har fået høj vægtning i dette scenarie, er tre af de bassiner som er meget kritiske for små hændelser, Rugmarken, Bramdrupdam og Vester Nebel. Hvilket resulterer i formindskede overløb herfra.

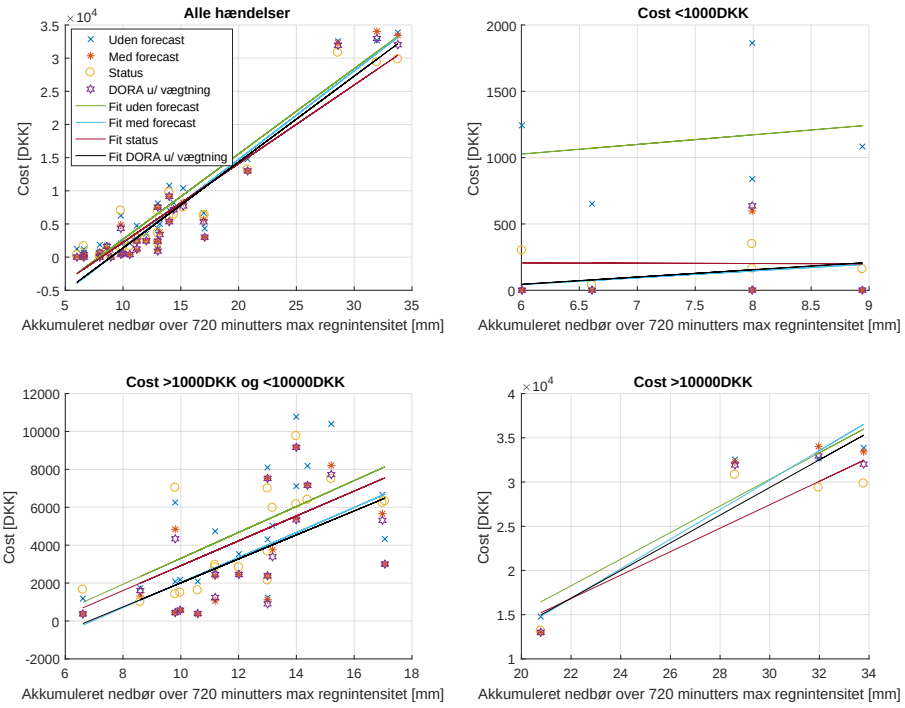
På figur 7.8 er den den samlede cost for de højt vægtede overløb vist for hver hændelse. Hvor der specielt de små hændelser resulterer i betydeligt dårligere resultater ved opsætningen uden forecast. Opsætningen med forecast og DORA styring uden vægtning giver meget ens resultater, og for flere hændelser er der praktisktalt ingen forskel mellem de to. Begge ligger for de fleste hændelser under den cost, som er i statussituationen. Hvilket viser, at det er muligt at formindske overløb fra steder, hvor det er ønsket.



Figur 7.8: Sammenligning af cost i statussituationen og med DORA styring for overløb med høj vægtning, vist på dobbelt logaritmisk plot. Der er inkluderet DORA styring med og uden forecast, samt DORA styring uden vægtning. Hændelser med overløbsvolumen på <1 DKK er angivet som 1 DKK på figuren.

På figur 7.9 er et lineært fit mellem den samlede cost for overløb med høj vægtning og 720 minutters maksimal regnintensitet under en hændelser vist. Figuren viser, at den eneste hændelsestype hvor statussituationen klarer sig bedst, er de store hændelser. Det er hændelser, som er så store, at det bliver svært at snakke om egentlig beskyttelse af en recipient længere. Da de overløbsvolumener, som forekommer, er så store, at det vil påvirke recipienten på en eller anden måde. Nogle recipienter i systemet er små vandløb, der som minimum vil blive påvirket kraftigt fysisk, af de vandmængder, der bliver udledt. Opsætningen uden forecast klarer sig dårligt ved alle typer hændelser. Der er meget lille forskel mellem opsætningen med forecast og DORA styring uden vægtning, udover for de store hændelser, som DORA styring uden vægtning optimerer bedre. For de små og mellemstore

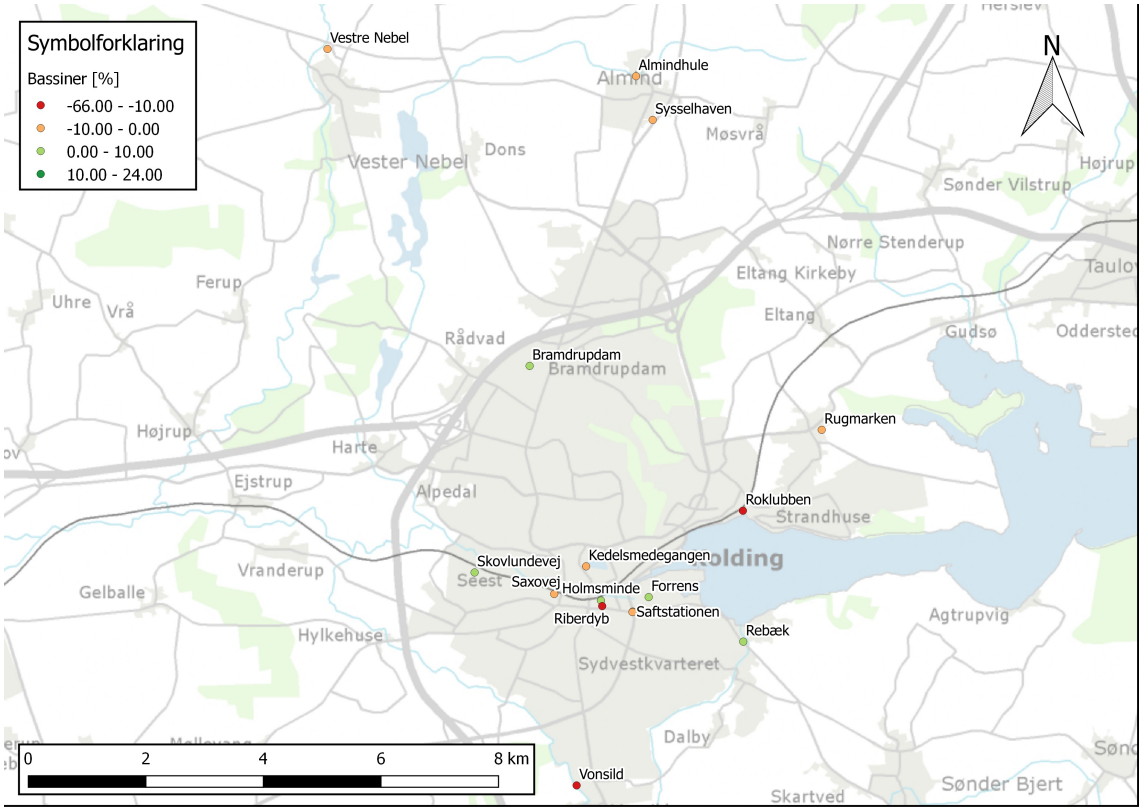
hændelser er der kun en lille forskel mellem de to, omend DORA styring uden vægtning er den med den laveste samlede cost af de to.



Figur 7.9: Lineært fit mellem akkumuleret nedbør over 720 minutters maksimal regnintensitet og cost for statussituationen og med DORA styring for overløb med høj vægtning.

På figur 7.10 er bassinerne med overløb til recipient vist, og er farvelagt ud fra den procentvise reduktion i cost for bassin ved brug af DORA med forecast, sammenlignet med DORA uden vægtning. Af bassinerne med høj vægtning, har kun 2 af dem reduceret cost ved indførelsen af vægtning, Skovlundevej og Bramdrupdam. Af de bassiner med høj vægtningen der får en reduktion, er forholdene omkring Rugmarken, Almindhule og Sysselhaven i store træk de samme som var gældende i vægtningen ud fra økologisk tilstand, og ændringerne i cost i dette scenarie er stort set de samme som det var tilfældet i det andet scenarie. Bramdupdam og Vester Nebel bassinerne skal ses et samlet system. Da en reduktion i overløbvolumen i et af bassinerne, oftest vil resulterer i, eller være grund til, en stigning i overløbsvolumen i det andet bassin, og omvendt. Da de to bassiner i dette scenarie har samme vægtning, ville det være forventet, at fordelingen af cost mellem dem, vil være den samme som i DORA styring uden vægtning. Det er dog ikke tilfældet, og reduktionen af cost i Bramdrupdam er stort set alt sammen grundet tilbageholdese af vand i Vester Nebel, og derved større cost der. Samlet set for de to bassiner er der en mindre stigning i cost på 1,5 % sammenlignet med DORA styring uden vægtning. Grunden hertil er formentlig igen, at vægtningerne gør, at det ikke er muligt at finde det samme minimum som tidligere, og derved sker der en marginal stigning i cost i bassinerne. Skovlundevej bassinet får en reduktion i cost på 5 %. Det er muligt da bassinet er i relativt simpelt system, hvor det kun er i direkte forbindelse med Forrens, der har en lavere cost. Derudover er bassinet ikke fuldt optimeret i DORA styring uden vægtning, da der i nogle hændelser er prioriteret af skabe overløb her, fremfor i Forrens, eller et af de andre bassiner der leder vand til Forrens, som nu har en lavere vægtning end Skovlundevej.

Med den brugte vægtningsfordeling har det været muligt at reducere den samlede cost for



Figur 7.10: Kort over bassinerne i oplandet, og markering af den procentvise reduktion i cost fra de tilhørende overløbsbygværker, fra DORA styring uden vægtning til DORA styring med vægtning og forecast. På figuren er kun vist bassiner med overløb til recipient. Den samme symbolforklaring er brugt på denne og lignende figurer i dette kapitel, hvorfor at hele farveskalaen ikke er brugt på denne figur.

hele systemet ved brug af forecast. Det har også været muligt at reducere cost for de overløb, som har fået høj vægtning ved at benytte forecast. Det er dog kun i forhold til statussituationen. Sammenlignes der med DORA styring uden vægtning er styringen uden vægtning faktisk bedre end styringen med vægtning og forecast samlet set. Årsagen til det kan være fordi, at DORA uden vægtning har fundet en nær optimal løsning i forhold til den valgte vægtning, hvilket vil betyde, at det er svært at optimere yderligere ved inkludering af differentieret vægtning mellem de forskellige overløb.

7.6 Analyse af vægtning baseret på sikring af badevand

Da der er bademuligheder i Kolding Fjord nært ved Kolding by, kan der være ønske om at beskytte badevandet i Kolding Fjord så vidt muligt. Det har det været forsøgt med denne vægtningsstrategi. Resultater af samlet cost er vist i tabel 7.6. Vægtningsfordelingen er konstrueret med henblik på at beskytte badevandet. Dog er alle hændelser i 2012 også benyttet til denne analyse, og ikke kun hændelser i badevandssæsonen.

Tabel 7.6: Sammenligning af cost i statussituationen og med DORA styring med vægtningen ud fra beskyttelse af badevandet. Negative ændringer angiver, at overløbsvolumen er større i statussituationen end med DORA styring. Cost er angivet i DKK.

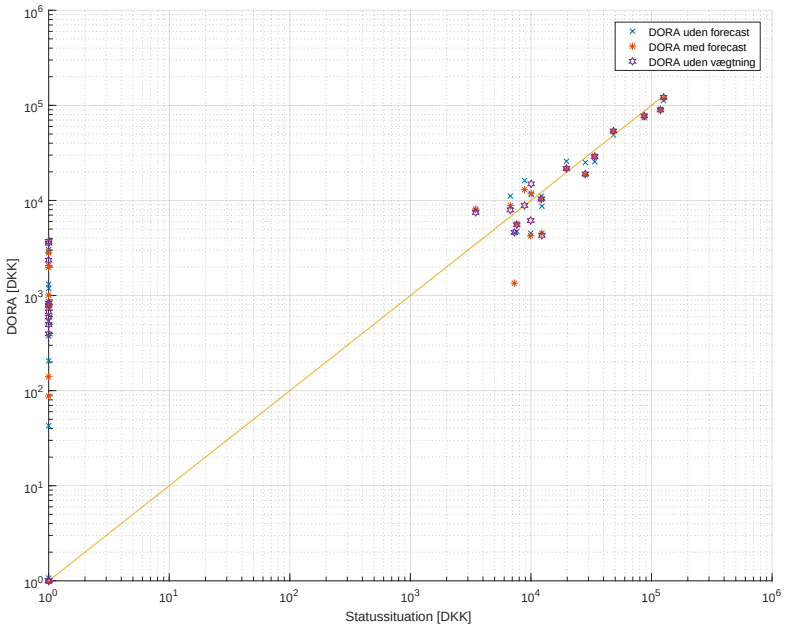
	Status	u/ forecast	m/ forecast	Ændring u/ forecast		Ændring m/ forecast	
	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[%]	[DKK]	[%]
Sum	591484	559033	537851	-32451	-5	-53633	-9
Gennemsnit	21124	19965	19208	-1158	-5	-1915	-9
Sum vægtede overløb	540309	493757	487324	-46552	-9	-52985	-10
Gns. vægtede overløb	19296	17634	17404	-1662	-9	-1892	-10

Med den anvendte vægtningsstrategi er det muligt at reducere den samlede cost for hele systemet, både ved brug af DORA styring uden forecast og DORA styring med forecast, hvor cost reduceres henholdsvis 5 % og 9 %. Forskellen mellem de to DORA opsætninger bliver kraftigt formindsket, når der kun fokuseres på de overløb, der har høj vægtning, hvor reduktionen er 9 % og 10 %. Hvilket tyder på, at de begge er næsten lige gode til at reducere overløbsvolumen fra overløbene med høj vægtning. Men det manglende forecast fører til betydeligt højere udledninger fra overløbene med lav vægtning. Det er ikke vist i tabellen, men dette er den eneste vægtningsstrategi, hvor det at indføre vægtningerne resulterer i en lavere samlet cost end DORA styring uden vægtninger. DORA styring uden forecast giver en forværring i cost på 3 % sammenlignet med DORA styring uden vægtning, og DORA styring med forecast reducerer cost med 1 %. Reduktionen i forhold til DORA styring uden vægtning er større, når der ses på overløbene med høj vægtning, fremfor hele systemet. Her er der reduktion for begge DORA styringer med vægtning, på henholdsvis 0,4 % og 2 %. Det viser, at det er muligt at flytte noget af overløbsvolumen fra de recipienter, der ønskes beskyttet til recipienter, der er mere ønskværdige af udlede til.

15 ud af 28 hændelser reduceres den samlede cost ved brug af DORA, sammenlignet med statussituationen. Det ses på figur 7.11, hvor de fleste hændelser har lavere samlet cost de overløb med høj vægtningen ved brug af DORA. Der er ikke nogen forskel i fordelingen af hændelserne, ved de forskellige DORA opsætninger. De samme tendenser ses generelt ved forskellige hændelsestyper.

At de forskellige DORA opsætningen viser de sammen tendenser ved forskellige hændelsestyper ses mere tydeligt på figur 7.12, hvor lineært fit mellem den 720 minutters maksimal regnintensitet under en hændelse og den samlede cost for overløbene med høj vægtning er vist. Fittet for de tre DORA opsætninger ligger meget ens, men en smule forskudt. I de mellemstore hændelser skiller styringen med forecast sig ud som værende den bedste, også bedre end statussituationen. Styring med forecast og styring uden vægtning ligger ret ens for de små og de store hændelser.

På figur 7.13 er bassinerne i oplandet vist, og farvelagt ud fra reduktionen i overløbsvolumen fra bassinerne ved DORA styring med forecast, i forhold til DORA styring uden vægtning. 4 af de 7 bassiner med høj vægtning har her fået reduceret den samlede cost ved brug af vægtninger. De tre bassiner som har en forhøjet cost, har alle en cost der er forhøjet med under 2 %. Riberdyb og Saftstationen bassinerne er begge bassiner der har fået forøget deres samlede cost ved brug af

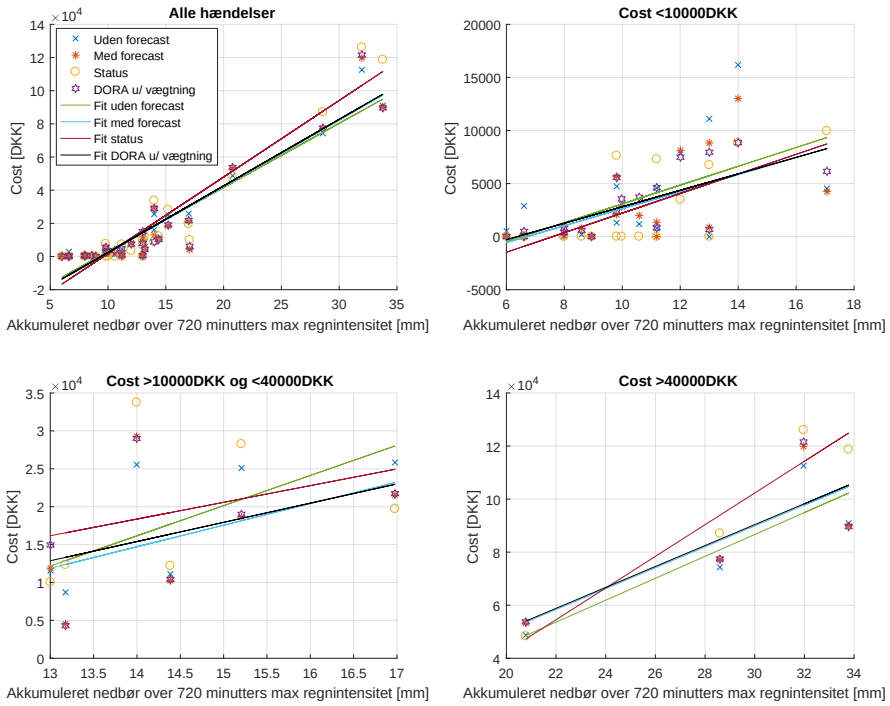


Figur 7.11: Sammenligning af cost i statussituationen og med DORA styring for overløb med høj vægtning, vist på dobbelt logaritmisk plot. Der er inkluderet DORA styring med og uden forecast, samt DORA styring uden vægtning. Hændelser med overløbsvolumen på <1 DKK er angivet som 1 DKK på figuren.

de andre to vægtningsscenarier. Riberdyb bassinet er tilmed det bassin der har oplevet den største forøgelse i begge scenarier. De to bassiner har begge fået reduceret deres cost ved brug af denne vægtningsfordeling. Skovlundevej bassinet får i dette scenarie også den største fundne reduktion for et bassin, på 24 %. Det viser at det er muligt at reducere overløbsvolumen steder hvor det er ønsket. Såfremt at den vægtningsfordeling der er benyttet, er opbygget således at den opførsel som er ønsket, kan lade sig gøre i forhold til systemets geometri.

Med denne vægtningsfordeling har det været muligt at reducere den samlede cost for systemet sammenlignet med statussituationen, og i forhold til DORA styring uden vægtning. Dog var formålet med vægtningsfordelingen at formindske påvirkningen af badevandet i Kolding Fjord. Overløbene med høj vægtning er udledninger som har så kort en transporttid til Kolding Fjord, at henfald af coliforme bakterier ikke har nogen betydende indflydelse på koncentrationen af coliforme bakterier i fjorden umiddelbart efter en regnhændelse. Derfor er den eneste faktor, der kan nedbringe koncentrationen af coliforme baktier til et niveau under badevandskravet opblanding. Opblanding i vandløbsrecipienterne antages ikke at være nok til bringe koncentrationen ned under grænseværdien. Opblanding i fjorden vil ske over en tidsperiode hvor det forurenede vand potentielt kan blive ført til badevandsmulighederne af strømningerne i fjorden. Derfor antages alle overløbshændelser fra overløbene med høj vægtning at være en potentiel kilde til korttidsforurening af badevandet. Alle 28 hændelser er taget med i denne analyse, selvom de ikke alle falder i den typiske badevandssæson. Det er gjort, da dette ikke er en statistisk undersøgelse af hvor mange dage om året der kan forventes at være lukket på strandene, men bare en sammenligning af forskellige styringsformers evne til at reducere antallet af overløbshændelser fra specifikke overløb.

I tabel 7.7 er antallet af hændelser med overløb der kan føre til lukning af bademuligheder vist. Statussituationen giver klart færrest, mens at de tre DORA styringer giver rimeligt ens

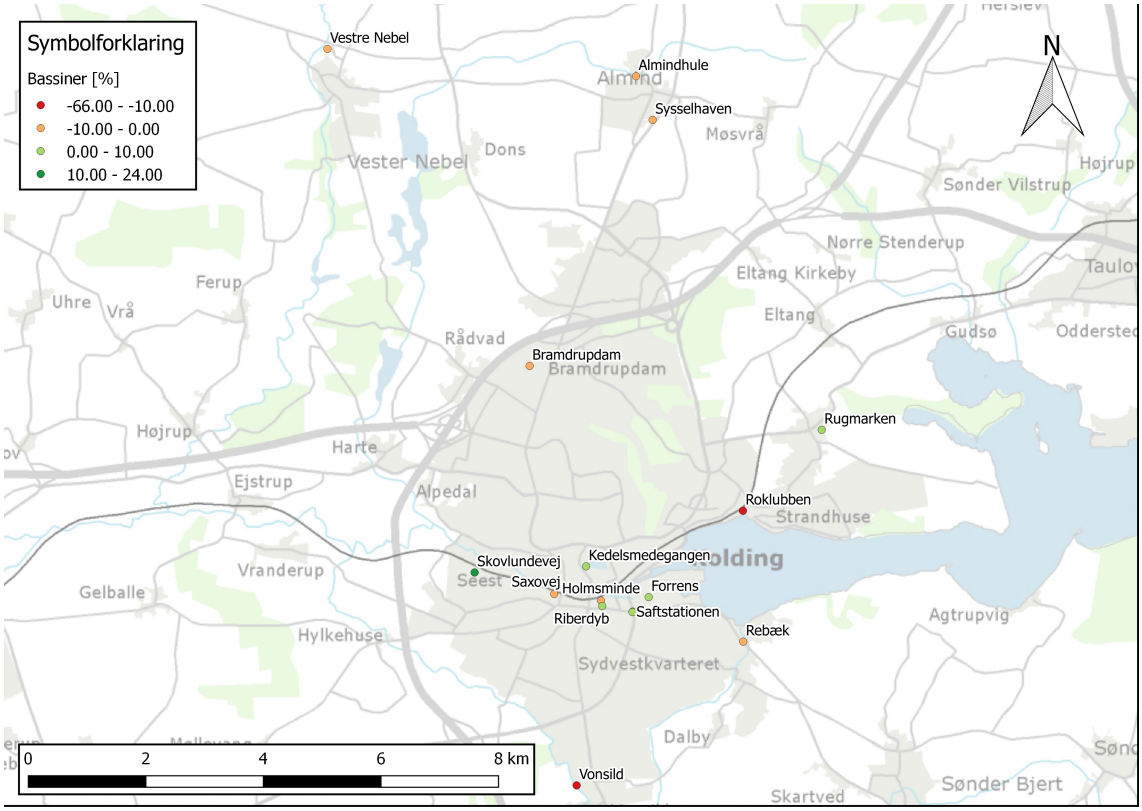


Figur 7.12: Lineært fit mellem akkumuleret nedbør over 720 minutters maksimal regnintensitet og cost for statussituationen og med DORA styring for overløb med høj vægtning.

resultater. Altså er der ikke nogen gevinst for badevandet ved at bruge DORA styring med gældende opsætninger. Forklaring på dette skal blandet andet findes i at statussituationen har klart flest overløbshændelser i Bramdrupdam og Vester Nebel bassinerne. DORA styring er generelt god til at reducere og i nogle tilfælde helt fjerne overløb fra de to bassiner, for tilgengæld at have en mindre overløb fra Forrens. Det er også tilfældet ved en højere vægtning for Forrens end de to andre bassiner. Dog kan brugen af vægtninger reducere antallet af overløb fra Forrens i forhold til DORA uden vægtning. Det er også tilfældet for DORA uden forecast, hvor de fleste overløb sker fra Rebæk bassinet. Selv med en optimal styring ud fra ønsket om at reducere overløb til badevandsrecipienter, er der begrænsninger på hvor meget overløb kan reduceres til disse recipienter. Da en stor andel af de bassiner der styres på udleder til disse recipienter, og flere af bassinerne er kun i direkte hydraulisk kontakt med andre bassiner, som udleder til den samme recipient.

Tabel 7.7: Antal hændelser med overløb der kan føre til lukning af bademuligheder.

Styring	Overløbshændelser
Statussituation	16
DORA uden forecast	26
DORA med forecast	24
DORA uden vægtning	25



Figur 7.13: Kort over bassinerne i oplandet, og markering af den procentvise reduktion i cost fra de tilhørende overløbsbygværker, fra DORA styring uden vægtning til DORA styring med vægtning og forecast. På figuren er kun vist bassiner med overløb til recipient.

7.7 Opsummering

Det er muligt at reducere den samlede cost i systemet, og reducere overløbsvolumen fra ønskede overløb. Men det kræver at vægtningsfordeling er lavet på en måde der tager systemets geometri og opbygning in mente. Hvis en vægtningsfordeling er lavet på en sådan måde, at styringen skal optimere mod nogle resultater der ikke kan opnås grundet systemets geometri og opbygning. Så kan det resultere i betydelige forværringer af styringens performance. Da styringen så at sige arbejder sig op i et hjørne, hvor selv den bedste løsning, er værre end hvad andre styringsformer kan opnå fra start af hændelsen. Det vil altid være værd at undersøge om en styringsform der forsøger at reducere den totale overløbsvolumen i hele systemet, er lige så god eller bedre til at reducere overløbsvolumen fra ønskede bassiner.

Det er vigtigt at huske, når man forsøger at flytte overløbsvolumen rundt i et system, at det er en begrænset del af overløbsvolumen som kan flyttes fra et bassin til et andet. Af den grund at geometrien af de forskellige bassiner betyder rigtigt meget for hvor og hvornår der sker overløb. Det vil i stor udstrækning være de mindre overløbshændelser som kan undgås ved at ændre på vægtningerne af overløbene. Det kan dog også være den effekt der er ønsket. Hvis det for eksempel er ønsket af forbedre eller bibeholde den økologiske tilstand i en recipient, så kan en reduktion af overløbsfrekvensen være lige så vigtig eller vigtigere end overløbsvolumen som recipienten modtager.

8. DORA styring med spatialfordeling af regn

Virkelig regn falder ikke jævnt fordelt over et område, som det har været antaget i de tidligere analyser, men vil have en spatialfordeling over oplandet. Det er forventet at en realtidsstyringsmetode, der tager højde for hele systemets tilstand på en gang, vil bedre kunne udnytte de forskellige belastninger, der vil være forskellige steder i systemet. Da hændelserne vil starte på forskellige tidspunkter forskellige steder i systemet, og have forskellige intensitet henover oplandet. Derfor undersøges i dette kapitel effektiviteten af DORA styring i forhold til styringen i statussituationen ved spatialtfordelt regn.

8.1 Regnmålere brugt som input

Til at simulere spatialtfordelt regn er der brugt en række regnmålere i Kolding området som input. Det er valgt da der i Kolding er en god dækning af regnmålere, hvorfor brugen af disse som input vil give en god fordeling af regninputtet i oplandet. På figur 8.1 er placeringen af regnmålere i oplandet vist. Der er fem regnmålere i oplandet. Målerne er spredt jævnt udover det meste af oplandet. Kun oplandene i Vester Nebel og Almind er ikke dækket af en nært placeret regnmåler. Derfor forventes de valgte regnmålere at give en god repræsentation af den faktiske spatialefordeling af regnbelastningen i oplandet. Det distribuerede regninput er koblet til MOUSE modellen ved at hvert opland i modellen, får regninput svarende til regninputtet i den nærmeste regnmåler. Det samlede areal tilkoblet hver regnmåler er vist i tabel 8.1.

Tabel 8.1: Areal tilkoblet hver regnmåler i systemet.

Bassin	5245	5247	5248	5251	5252
Areal [ha]	51,1	51,6	133,4	130,4	68,0

En mere præcis repræsentation vil kræve brugen af radarmålinger som input. Det er valgt ikke at benytte radarmålinger i dette projekt, da det er vurderet at den tid det ville tage at sætte modellen op til at kunne håndtere radarmålinger som input ikke står mål med den gevinst, der er ved at benytte radarmålinger. Da målet med denne analyse er at afklare, om der er en yderligere forbedring ved brug af DORA styring med spatialfordeling af regn, hvilket det vurderes kan belyses ved brug af regnmålerne som input. Brugen af radarinput vil også have den fordel, at det vil være muligt at lave et reelt forecast baseret på radarmålingerne, med den usikkerhed der ligger heri. Fremfor det falske forecast der benyttes i dette projekt, hvor registreret nedbør bruges til forecast.

Der er en forskel i nedbøren mellem de forskellige regnmålere. Derfor er det forsøgt at kvantificere den forskel der er mellem den målte nedbør i en måler, og den målte nedbør i de andre målere i oplandet. Metoden der er valgt er en metode hvor den totale registrerede nedbør under en hændelse sammenlignes. Til analysen er benyttet de 28 hændelser fra 2012 der tidligere er benyttet til andre analyser.

Forskellene mellem regnmålerne illustreres ved at kigge på den absolutte forskel i registreret nedbør under en hændelse, mellem en given regnmåler og de andre regnmålere i oplandet. En faktor der herefter betegnes variabiliteten. Rent matematisk findes variabiliteten ved:

$$Var_1 = \frac{|Ned_1 - Ned_2| + ... + |Ned_1 - Ned_n|}{n-1} \tag{8.1}$$

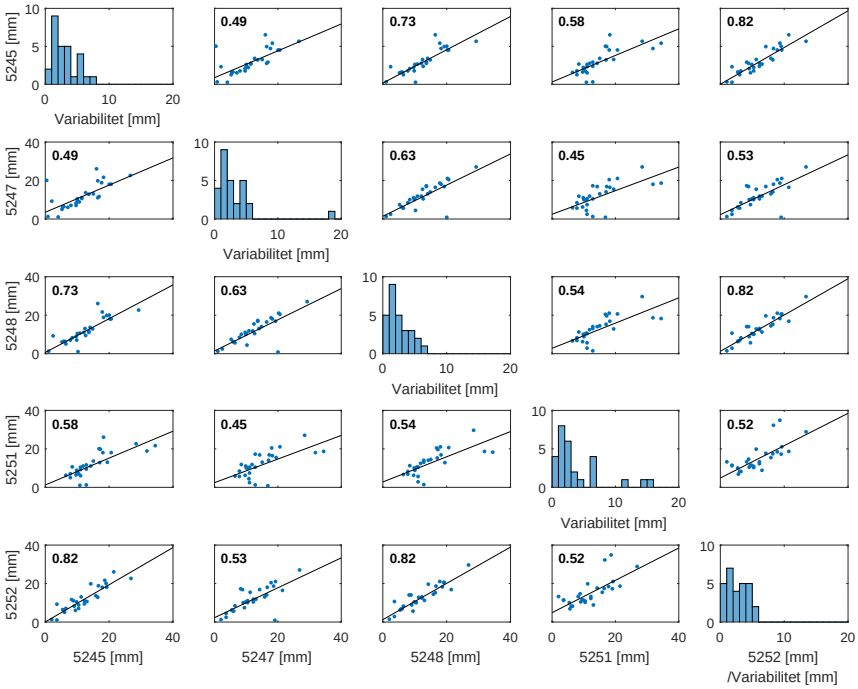
Figur 8.1: Placering af regnmålere i Kolding oplandet.

	Var_x	Variabiliteten for regnmåler x
Hvor:	Ned_x	Registreret nedbør i regnmåler x
	n	Antallet af regnmålere i oplandet

Det er undersøgt om der er en korrelation mellem variabiliteten og den registrerede nedbør. For alle regnmålerne er der fundet en stigende variabilitet med stigende nedbørsmængde. Variabiliteten til en given nedbørsmængde har dog et stort spænd. Hvilket betyder at korrelationen mellem variabilitet og nedbørsmængde for alle målerne, er meget lav. Hvilket betyder at nedbørsmængden under en hændelse er meget lidt sigende for forskellen i nedbør over oplandet.

Et histogram over variabiliteten af hændelser for hver regnmåler er vist på figur 8.2. Figuren er en korrelationsmatrice mellem regnmålerne, og på diagonalen er histogrammerne for variabiliteten vist. For alle fem regnmålere er hoveddelen af hændelserne samlet omkring relativt lave variabiliteter på under 5 mm, og de fleste, hvis ikke alle, hændelser på under 10 mm i variabilitet. At der generelt set er lav variabilitet mellem en måler og de andre målere i oplandet, er tegn på at der er en hvis korrelation mellem målerne, som det også er forventet i og med at målerne er placeret inden for et afgrænset geografisk område, hvor regnen ofte burde være relativt ens. Variabiliteten kan dog ikke vise korrelationen mellem regnmålerne, den kan kun give et praj om at korrelationen er der. Det variabiliteten kan fortælle noget om, er størrelsesordenen af forskellene i registreret nedbør mellem regnmålerne under hændelserne. Den gennemsnitlige variabilitet for målerne over de undersøgte hændelser i spændet 2,4 til 3,9 mm.

Korrelationen mellem regnmålerne er fundet ved at beregne korrelations koefficienten mellem den registrerede nedbør i to forskellige regnmålere. Den er vist i korrelationsmatricen på figur 8.2 for alle kombinationer af regnmålere. Der er generelt set god korrelation mellem målerne, hvilket også er forventet. Korrelationsanalysen viser dog også at der er en betydelig forskel mellem regnmålerne under en hændelse, også selvom det er den samme regnhændelse der rammer alle målerne. Hvilket betyder at der er en spatialfordeling af regninputtet til modellen, hvilket gør regnmålerne brugbare som input til en analyse af de forskellige styringers effektivitet ved spatialtfordelt regninput.



Figur 8.2: Korrelationsmatrice for regnmålerne i oplandet. Korrelationskoefficienten er vist for hvert plot, samt den tilhørende mindste kvadraters regressionslinje. På diagonalen er vist histogrammer over variabiliteten af hændelser for den respektive regnmåler.

8.2 Resultater

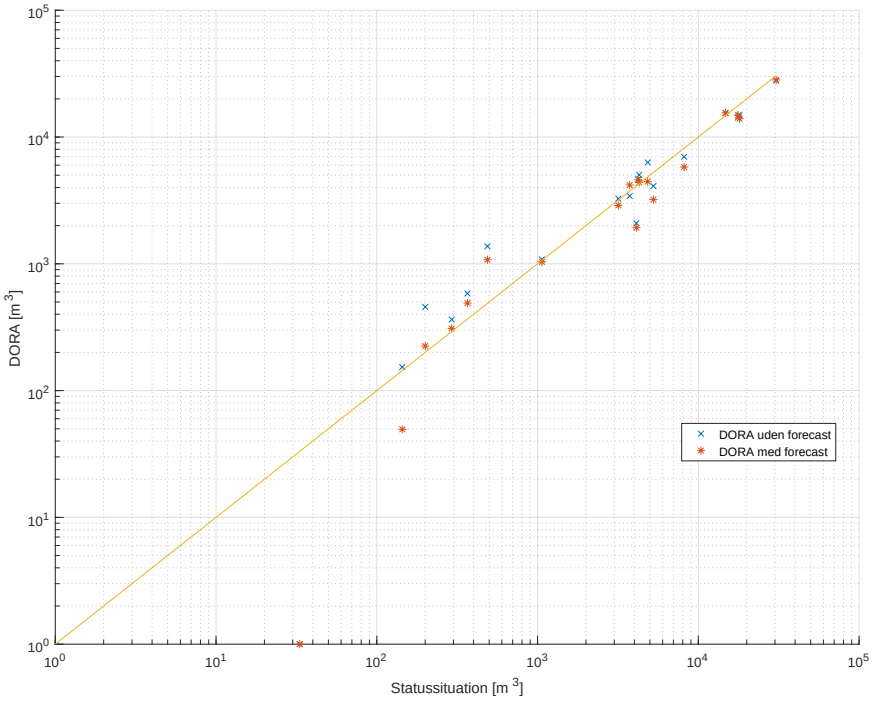
De 28 hændelser der er benyttet i tidligere analyser er også benyttet her. Hændelsernes start og slutpunkt er tilpasset efter hændelsernes start- og sluttidspunkt i de enkelte målere. Af de 28 hændelser fører 19 til overløb i enten statussituationen eller ved DORA styring. Grunden til at der er færre hændelser her med overløb end i analyserne uden spatialfordeling af regn er, at der ikke i alle hændelser er registreret nedbør i alle regnmålerne, og i andre hændelser er den registrerede nedbørsmængde lavere i de regnmålere, der ikke har været brugt til tidligere analyser. Det fører til at der ikke sker overløb i disse hændelser. De hændelser fra 2012 der tidligere er blevet forkastet grundet manglende overløb i statussituationen, er igen blevet analyseret i statussituationen, skulle det ændrede regninput føre til overløb i nogle af disse hændelser. Der er dog ikke fundet overløb i nogen af hændelserne, derfor er de ikke medtaget her. Overløbsvolumen fra hændelserne og sammenligning statussituationen og DORA styring med og uden forecast er vist i tabel 8.2. Hændelserne hvor der nu ikke længere er registeret overløb er stadig inkluderet i tabellen.

Tabel 8.2: Sammenligning af overløbsvolumener i statussituationen og med DORA styring. Negative ændringer angiver hændelser, hvor overløbsvolumen er større i statussituationen end med DORA styring.

Nr.	Varighed	Nedbør	Status	u/ forecast	m/ forecast	Ændring u/ forecast		Ændring m/ forecast	
	[T]	[mm]	[m^3]	[m^3]	[m^3]	[m^3]	[%]	[m^3]	[%]
1	6,8	4,8	0	0	0	0	0	0	0
2	10,7	16,7	0	0	0	0	0	0	0
3	3,0	6,2	0	0	0	0	0	0	0
4	15,3	6,1	0	0	0		0	0	0
5	12,9	15,4	1064	1083	1035	18	2	-28	-3
6	4,0	13,0	8164	6984	5798	-1180	-14	-2365	-29
7	6,7	19,1	14771	15426	15520	654	4	749	5
8	6,2	11,2	292	363	309	71	24	17	6
9	11,4	18,2	5255	4100	3210	-1154	-22	-2044	-39
10	5,0	17,7	4843	6312	4443	1468	30	-400	-8
11	3,3	11,1	366	583	490	216	59	123	33
12	2,1	11,2	4286	5024	4384	737	17	97	2
13	2,4	25,8	30522	27861	28227	-2660	-9	-2294	-8
14	1,2	12,7	4233	4648	4598	415	10	366	9
15	4,8	10,4	0	0	0	0	0	0	0
16	6,5	15,1	3742	3428	4182	-314	-8	440	11
17	10,9	11,7	200	457	224	257	128	24	12
18	12,6	23,2	18054	14848	13952	-3205	-18	-4101	-23
19	3,5	7,2	0	0	0	0	0	0	0
20	8,1	10,3	33	0	0	-33	-100	-33	-100
21	5,3	7,0	0	0	0	0	0	0	0
22	8,9	21,2	17638	14259	14868	-3378	-19	-2770	-16
23	14,0	10,0	0	0	0	0	0	0	0
24	5,4	10,8	487	1374	1077	887	181	590	121
25	4,5	11,8	3179	3265	2886	86	3	-293	-9
26	14,6	18,0	4119	2091	1928	-2028	-49	-2190	-53
27	5,2	8,1	143	153	49	10	7	-94	-65
28	8,2	9,6	0	0	0	0	0	0	0
Sum			121399	112266	107190	-9133	-8	-14208	-12
Gennemsnit			6389	5908	5641	-480	-8	-747	-12
Gns. forbedring			10941	9196	6945	-1744	-16	-1510	-18
Gns. forværring			3079	3517	3848	438	14	104	8

Resultaterne viser de samme tendenser som opsætningen uden spatialfordeling af regn. DORA kan i de fleste tilfælde ikke være med på de helt små hændelser sammenlignet med statussituationen mens, at DORA er god til at reducere overløbsvolumen for de helt store hændelser. Brugen af forecast har lille effekt på de helt store hændelser, men er effektivt i forhold til at reducere overløbsvolumen for de små og mellemstore hændelser. Specielt de mellemstore hændelser er forecast effektivt i forhold til at reducere overløbsvolumen yderligere. Det er undersøgt om der er en sammenhæng mellem den procentvise ændring i overløbsvolumen og variabiliteten for hændelsen. Der er ikke fundet nogen korrelation mellem de to faktorer. På figur 8.3 er overløbsvolumen for hændelserne simuleret med og uden forecast sammenlignet med overløbsvolumen i statussituationen.

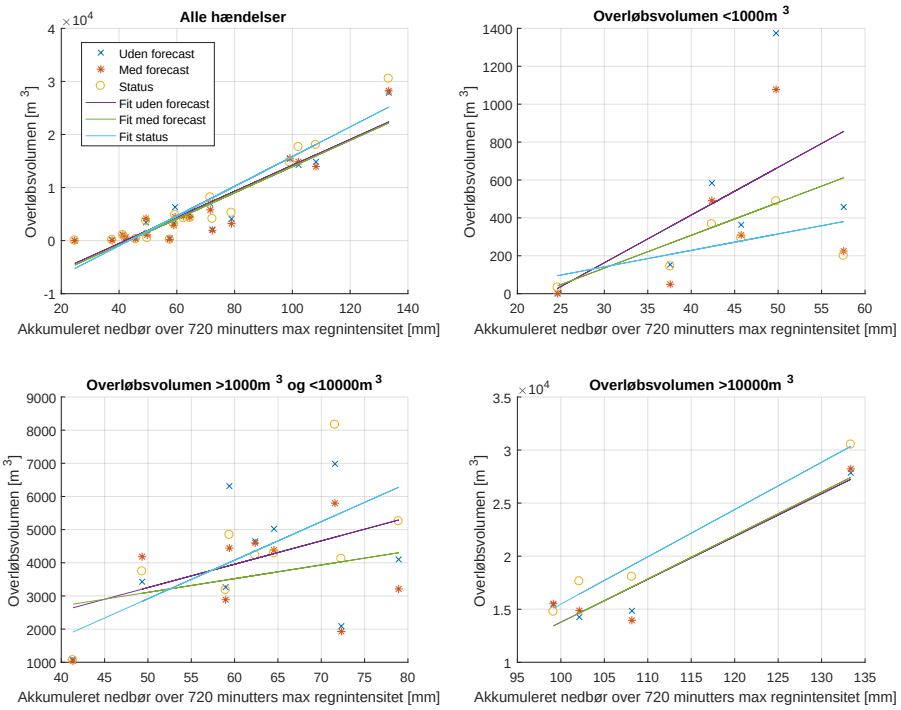
På figuren ses den overgang der er ved omkring 1000 m^3 i overløbsvolumen. Hvor DORA giver dårligere resultater for de fleste hændelser under, mens at DORA kan reducere overløbsvolumen for de fleste hændelser over 1000 m^3.



Figur 8.3: Sammenligning af overløbsvolumener i statussituationen og med DORA styring med spatialtfordelt regn.

Resultater fra analysen uden spatialfordeling af regn er ikke medtaget på figurene. Da statussituationen har ændret sig, og det derfor ikke er muligt at sammenligne hændelser før og efter spatialfordeling af regn. Det vurderes dog, at det stadig er validt at sammenligne DORAs effektivitet over et helt år for de to opsætninger.

Sammenlignet med opsætningen uden spatialfordeling af regn er der en yderligere forbedring ved brug af DORA styring ved spatialfordeling af regn. Uden forecast går den samlede reduktion i overløbsvolumen fra 6 til 8 %, mens at der med brug af forecast stiger reduktionen fra 9 til 12 %. For de store hændelser er der ikke nogen umiddelbar forskel i reduktionen med eller uden spatialfordeling af regninputtet. En stor forskel mellem de to opsætninger for de mellemstore hændelser, hvor reduktionen går fra 1 til 5 % uden forecast, og fra 11 til 17 % med forecast. På figur 8.4 er et lineært fit mellem 720 minutters maksimal regnintensitet under en hændelse og overløbsvolumen vist. Nedbørsdybden der er vist er et arealvægtet gennemsnit af de benyttede regnmålere. Figuren viser at det er på de mellemstore hændelser mellem 1000 m^3 og 10000 m^3, at DORA har sin force, og det er her der sker en betydelig forbedring i forhold til statussituationen, og det er også her at DORA vinder noget ved spatialtfordelt regninput.



Figur 8.4: Lineært fit mellem akkumuleret nedbør over 720 minutters maksimal regnintensitet og overløbsvolumen for statussituationen og med DORA styring med spatialtfordelt regn.

8.3 Vægtning af overløb med spatialfordeling af regn

Det er analyseret, hvorvidt der er en anden respons ved indføring af differentieret vægtning af bassinerne, når der er spatialfordeling af regninputtet. De samme vægtningsfordelinger som er brugt i kapitel 7, er også benyttet her.

8.3.1 Analyse af vægtning af overløb ud fra økologisk tilstand

I tabel 8.3 er summerede og gennemsnitsværdier for vægtning af overløb ud fra økologisk tilstand vist. Resultater på hændelses niveau er vist i appendiks G.

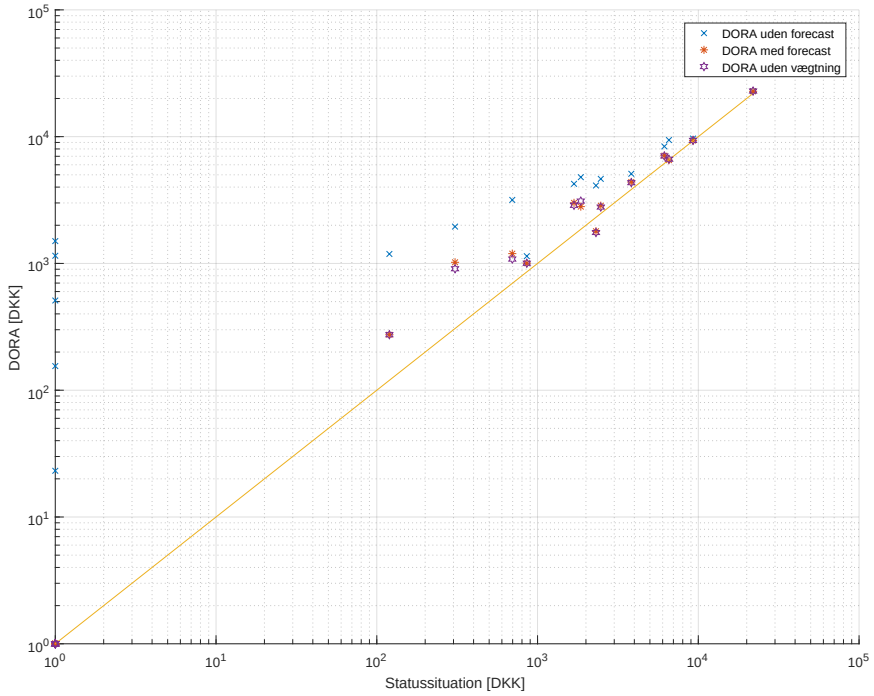
Tabel 8.3: Sammenligning af cost i statussituationen og med DORA styring med vægtningen ud fra økologisk tilstand. Negative ændringer angiver hændelser, hvor overløbsvolumen er større i statussituationen end med DORA styring. Cost er angivet i DKK.

	Status	u/ forecast	m/ forecast	Ændring u/ forecast		Ændring m/ forecast	
	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[%]	[DKK]	[%]
Sum	229255	243988	217654	14734	6	-11600	-5
Gennemsnit	8187	8713	7773	526	6	-414	-5
Sum vægtede overløb	65005	94062	71727	29057	45	6722	10
Gns. vægtede overløb	2321	3359	2561	1037	45	240	10

Uden brug af forecast er der en forværring i samlet cost sammenlignet med statussituationen på

6 %. Ved brug af forecast er der en forbedring på 5 %. For de højt vægtede overløb er resultaterne betydeligt værre. Her er der en forværring på henholdsvis 45 % og 10 % for styring uden og med forecast. Sammenlignet med opsætningen uden spatialfordeling af regn, er DORA bedre til at optimere. Uden spatialfordeling af regn er der forværringer i forhold til statussituationen både med og uden forecast, og der er også betydeligt større forværringer for de højt vægtede overløb. DORA præsterer altså bedre med spatialtfordelt regninput end med jævnt fordelt.

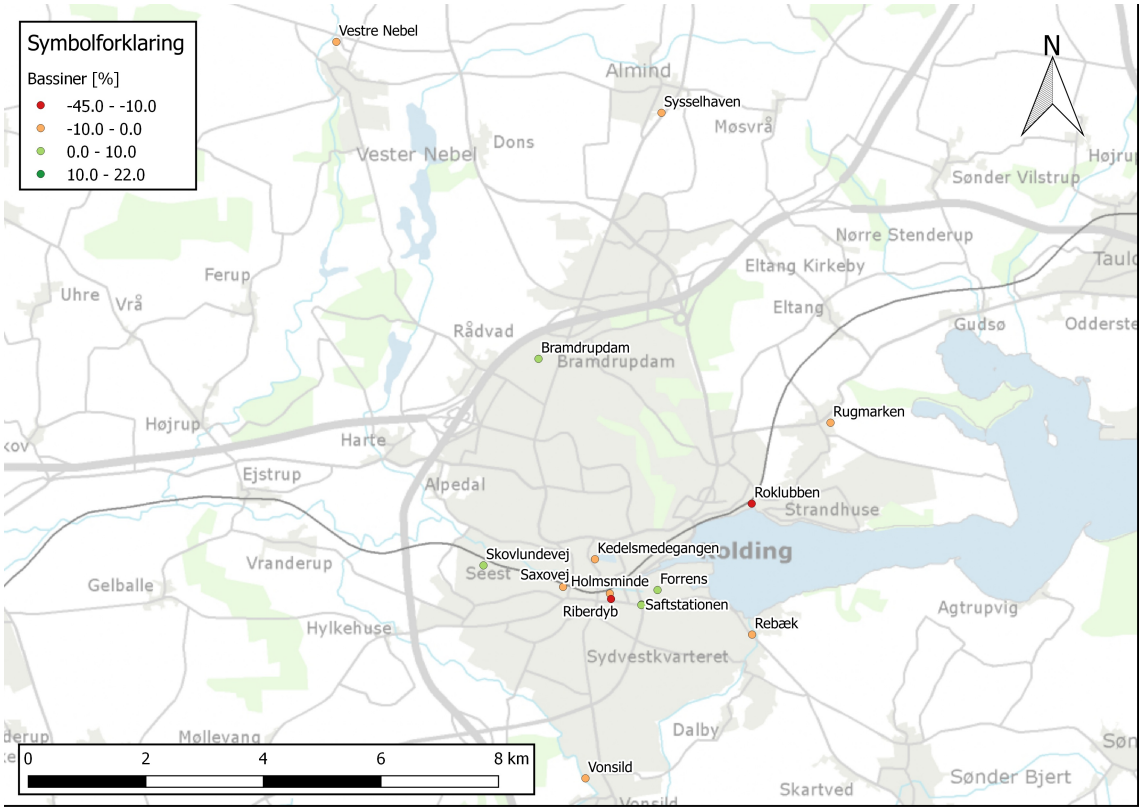
På figur 8.5 er en sammenligning af cost for de højtvægtede overløb i statussituationen og med DORA styring vist. De fleste hændelser har dårligere resultater for DORA styring end for statussituationen, hvilket også er forventet i og med at DORA præsterer betydeligt dårligere for de højt vægtede bassiner med denne vægtningsfordeling. Det ses også på figuren at DORA med forecast og DORA uden vægtning har en meget lille forskel. Flere hændelser resulterer i praktisktalt ens løsninger, mens resten har en lille forskel mellem dem. Overordnet set er der heller ikke nogen praktisk forskel mellem de to, både når hele systemet sammenlignes og når det kun er de højt vægtede overløb der sammenlignes. Det tyder på at de to opsætninger i høj grad finder de samme minima. På trods af de ændrede vægtninger af overløbene.



Figur 8.5: Sammenligning af cost for højt vægtede overløb i statussituationen og med DORA styring med spatialtfordelt regn.

På figur 8.6 er overløbsbygværkerne i systemet vist, og de er farvelagt efter ændringen i overløbsvolumen for bygværket, mellem DORA styring uden vægtning, og DORA styring med vægtning og forecast. For de fleste af bygværkerne er der en lille forskel mellem de to opsætninger. 10 ud af 15 bygværker har en forskel mellem de to opsætninger på under 2 % og 12 af 15 har en forskel på under 4 %. Altså er der generelt set ikke nogen betydelig flytning af overløbsvolumen rundt i systemet ved indføring af vægtninger. Der er tre bassiner med større ændringer. Roklubben og Riberdyb der er bassiner med lav vægtning har forøget deres overløbsvolumen med henholdsvis 17 % og 10 %. Skovlundevej der også er lavt vægtet har reduceret overløbsvolumen med 8 %.

Bassinerne med høj vægtning har ikke oplevet nogen nævneværdig reduktion eller forværring af overløbsvolumen. I store træk er der altså ikke nogen betydelig forskel mellem DORA med og uden vægtninger i dette tilfælde. Der er heller ikke sket nogen betydelig flytning af overløbsvolumen mellem forskellige overløbsbygværker i systemet. Derfor konkluderes det, at der ingen grund er til at vælge den gældende vægtningsfordeling fremfor DORA styring uden differentieret vægtning.



Figur 8.6: Kort over ændringer i cost for overløbsbygværker i systemet, mellem DORA styring uden vægtning og DORA styring med vægtning og forecast. Negative ændringer indikerer højere cost for DORA med vægtning.

8.3.2 Analyse af vægtning af overløb ud fra terrænhældning i oplandet

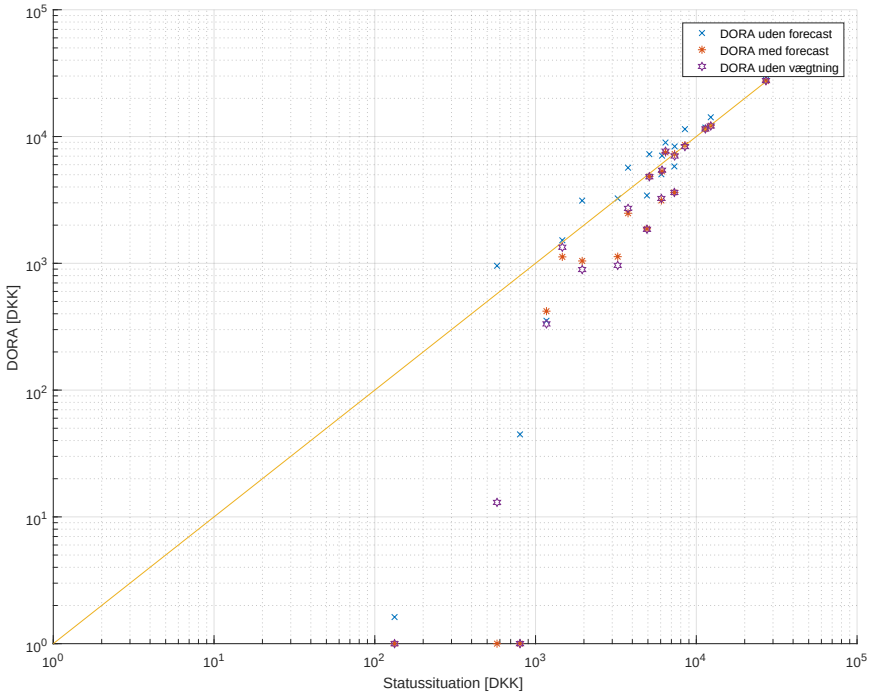
I tabel 8.4 er summerede og gennemsnitsværdier for vægtning af overløb ud fra økologisk tilstand vist. Resultater på hændelses niveau er vist i appendiks G.

Tabel 8.4: Sammenligning af cost i statussituationen og med DORA styring med vægtningen ud fra økologisk tilstand. Negative ændringer angiver hændelser, hvor overløbsvolumen er større i statussituationen end med DORA styring. Cost er angivet i DKK.

Nr.	Varighed	Nedbør	Status	u/ forecast	m/ forecast	Ændring u/ forecast		Ændring m/ forecast	
			[DKK]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[%]	[DKK]	[%]
Sum			259137	262769	234180	3631	1	-24956	-10
Gennemsnit			9254	9384	8363	130	1	-891	-10
Sum vægtede overløb			129578	141295	111221	11716	9	-18357	-14
Gns. vægtede overløb			4628	5046	3972	418	9	-656	-14

Sammenlignet med opsætningen uden spatialfordeling af regn, er der en klar yderligere forbedring ved brug af DORA når der er spatialfordeling af regninputtet. Uden spatialfordeling af regn var der en forværring med DORA uden forecast på 3 % i forhold til statussituationen, DORA med forecast gav en forbedring på 3 %. Med spatialfordeling af regn er forværringen reduceret til 1 % for DORA uden forecast. For DORA med forecast er forbedringen øget til 10 %. Også når der fokuseres på de overløb med høj vægtning, er der en forbedring. Hvor der uden spatialfordeling af regn er henholdsvis en forværring på 13 % og en forbedring på 4 % uden og med forecast. Så er det forbedret til henholdsvis en forværring på 9 % og en forbedring på 14 %, når der er spatialtfordelt regninput. Tendensen er meget den samme mellem de to opsætninger, hvilket også er forventet da vægtningsfordelingen stadig er den samme. Men DORA præsterer betydeligt bedre ved brug af spatialtfordelt regninput.

Denne vægtningsfordeling var lidt speciel da den blev analyseret uden spatialfordeling af regn. Da det er den eneste analyse, hvor DORA præsterer bedre på de små hændelser, end statussituationen gør. Det er også yderligere forbedret ved at bruge spatialfordeling af regn. Det ses på figur 8.7. Andre figurer af denne type som er vist i denne rapport har den samme klumpning omkring ligevægten mellem statussituationen og DORA styring for de større hændelser, men så er der en hale ud mod DORA styring for de små hændelser, hvilket viser at DORA styring giver større overløbsvolumener for de hændelser. På denne figur er halen modsat rettet, altså mod statussituationen, hvilket viser at DORA styring er bedre på de små hændelser her, halen er også tydeligere her end i opsætningen uden spatialfordeling af regn. Den form for hale var det håbet at finde i alle tilfælde, men det har ikke været muligt at opnå i dette projekt.



Figur 8.7: Sammenligning af cost for højt vægtede overløb i statussituationen og med DORA styring med spatialtfordelt regn.

På figur 8.7 ses det også at der i de fleste hændelser er en lille forskel mellem DORA med forecast og DORA styring uden vægtning. Det gør sig gældende både når hele systemet analyseres

og når der kun fokuseres på overløbene med høj vægtning. Der er i begge tilfælde omkring 0,1 % forskel mellem dem. På figur 8.8 er overløbsbygværkerne i oplandet vist, og de er farvet alt efter forskellen i overløbsvolumen mellem DORA styring med forecast og DORA styring uden vægtning. Der er generelt set meget lille forskel mellem de to styringer. 14 ud af 15 bassiner har en forskel på under 3 % mellem styringerne. Kun Skovlundevej skiller sig ud med en reduktion på 15 %. Skovlundevej er bygværket med den mindste overløbsvolumen i systemet, hvorfor at en lille ændring i overløbsvolumen her, resulterer i en stor procentvis ændring. Der er altså ikke nogen betydelig flytning af overløbsvolumen i systemet, ved brug af vægtningsfordelingen. Ligesom med vægtningsfordelingen baseret på økologisk tilstand, er der altså tegn til, at styringen finder frem til de samme minima for hændelserne.

Figur 8.8: Kort over ændringer i cost for overløbsbygværker i systemet, mellem DORA styring uden vægtning og DORA styring med vægtning og forecast. Negative ændringer indikerer højere cost for DORA med vægtning.

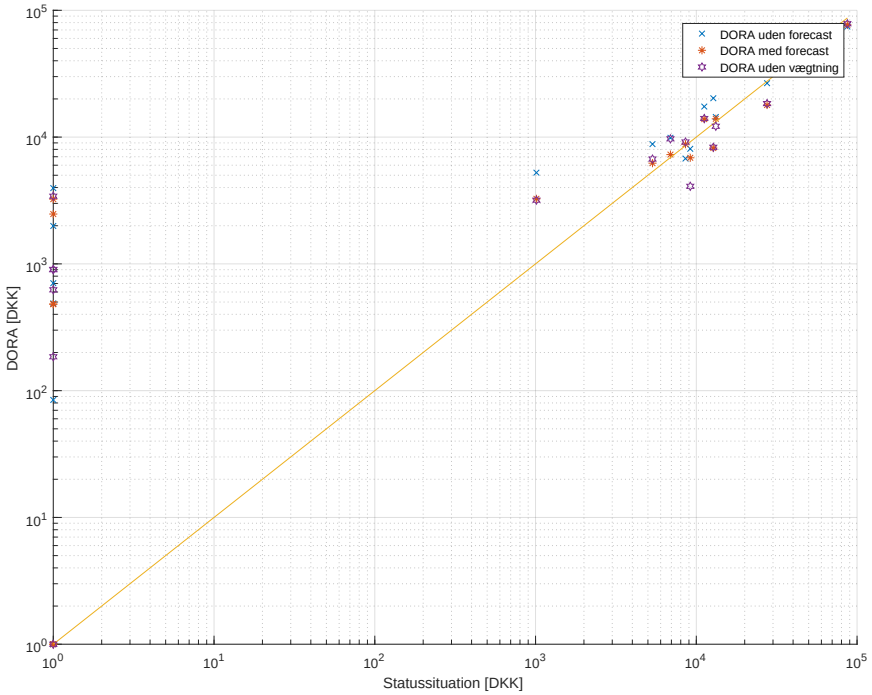
8.3.3 Analyse af vægtning af overløb ud fra badevandssikring

I tabel 8.5 er summerede og gennemsnitsværdier for vægtning af overløb ud fra økologisk tilstand vist. Resultater på hændelses niveau er vist i appendiks G.

Tabel 8.5: Sammenligning af cost i statussituationen og med DORA styring med vægtningen ud fra økologisk tilstand. Negative ændringer angiver hændelser, hvor overløbsvolumen er større i statussituationen end med DORA styring. Cost er angivet i DKK.

Nr.	Varighed	Nedbør	Status	u/ forecast	m/ forecast	Ændring u/ forecast		Ændring m/ forecast	
			[DKK]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[%]	[DKK]	[%]
Sum			437092	433916	424967	-3175	-1	-12124	-3
Gennemsnit			15610	15497	15177	-113	-1	-433	-3
Sum vægtede overløb			401498	391236	394021	-10262	-3	-7478	-2
Gns. vægtede overløb			14339	13972	14072	-366	-3	-267	-2

Af de tre vægtningsfordelinger der er benyttet i dette projekt, er dette den eneste hvor DORA præsterer dårligere i forhold til statussituationen når regninputtet er spatialtfordelt, end når regninputtet ikke er spatialtfordelt. Uden spatialtfordelt regninput er der en forbedring i forhold til statussituationen på 5 % uden brug af forecast, og 9 % med brug af forecast. Med spatialt fordelt regninput er forbedringen kun på henholdsvis 1 % og 3 %. Også for de højt vægtede overløb er opsætningen uden spatialfordeling af regn bedre, her er der en forbedring på henholdsvis 9 % og 10 %. Her med spatialfordeling af regn, er forbedringen kun på henholdsvis 3 % og 2 %. På figur 8.9 er overløbsvolumen for de højt vægtede overløb vist for statussituationen og med DORA styring. Der er fire hændelser hvor DORA styringerne giver overløb i bassinerne, men hvor statussituationen har registeret overløb.

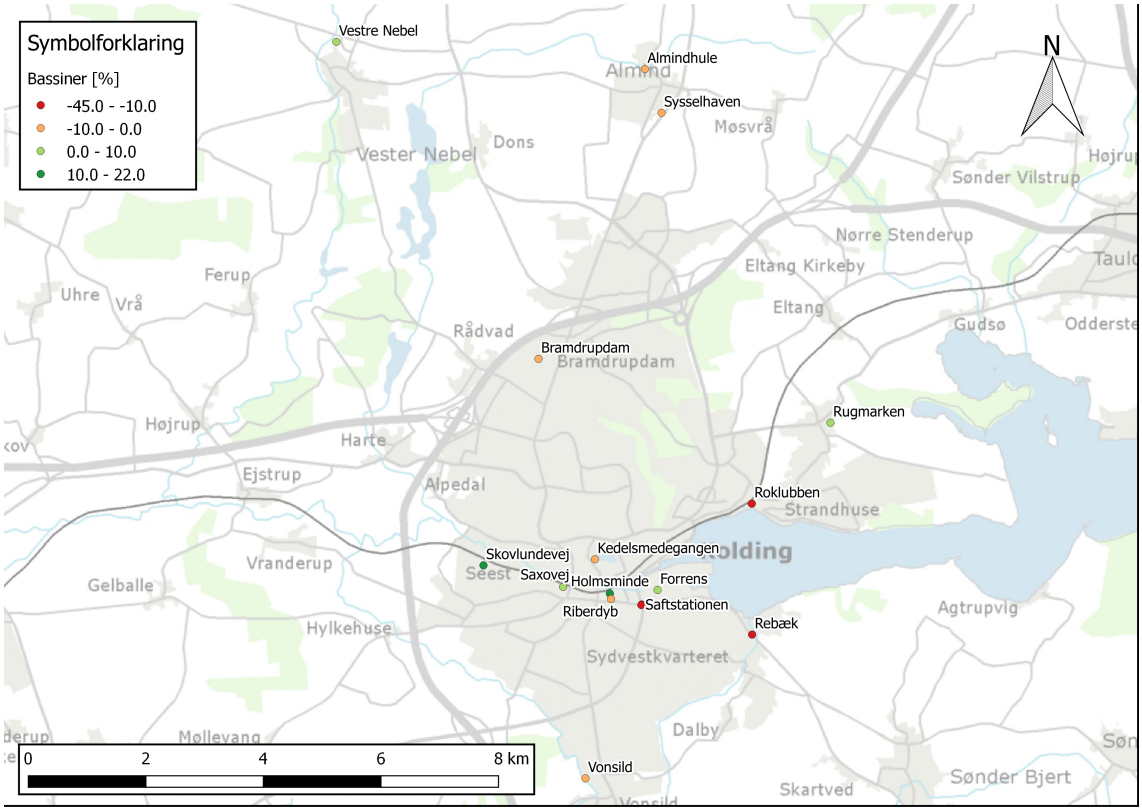


Figur 8.9: Sammenligning af cost for højt vægtede overløb i statussituationen og med DORA styring med spatialtfordelt regn.

Sammenlignes DORA styring med og uden vægtning. Så er DORA styring med vægtning bety-

deligt dårligere. Samlet cost i systemet er steget med henholdsvis 12 % og 9 % for DORA styring uden og med forecast, sammenlignet med DORA styring uden vægtning. De højt vægtede bassiner har en stigning på henholdsvis 9 % og 10 %. Altså fører indførelsen af vægtninger har til at der findes betydeligt dårligere minima, end når der ikke er nogen vægtning. Det er modsat den situation der var uden spatialfordeling af regn, hvor styring med vægtning for denne vægtningsfordeling, gav bedre resultater end DORA styring uden vægtning. Årsagen til at denne vægtningsfordeling oplever en forværring ved brug af spatialtfordelt regn, når de andre to vægtningsfordelinger oplever forbedringer, er ikke klar.

Der er en ændring i den spatialefordeling af overløbsvolumen mellem DORA styring uden vægtning til DORA styring med vægtning. På figur 8.10 er overløbsbygværkerne vist, og farvelagt efter ændringen i overløbsvolumen fra bassinet. Af de bygværker med høj vægtning, er overløbsvolumen reduceret i fire af dem. Skovlundevej, Saxovej, Holmsminde og Forrens. Skovlundevej og Holmsminde har reduceret overløbsvolumen med henholdsvis 21 % og 11 %, mens de sidste to har reduceret overløbsvolumen med 3 % hver. De sidste tre overløb med høj vægtning har alle forøget overløbsvolumen. Riberdyb har øget overløbsvolumen med 2 %, mens at Rebæk og Saftstationen har forøget overløbsvolumen med henholdsvis 20 % og 38 %. Bassinerne uden høj vægtning har alle en lille forskel mellem de to opsætninger, udover Roklubben, der har forøget overløbsvolumen med 44 %. Det betyder at den reduktion der er i overløbsvolumen i nogle af bygværkerne med høj vægtning, i høj grad ikke er flyttet til overløb med lav vægtning, men til andre overløb med høj vægtning, derudover kommer også yderligere overløb fra disse bassiner, grundet dårlige optimeringer.



Figur 8.10: Kort over ændringer i cost for overløbsbygværker i systemet, mellem DORA styring uden vægtning og DORA styring med vægtning og forecast. Negative ændringer indikerer højere cost for DORA med vægtning.

8.4 Opsummering

Ud fra analysen der er foretaget i dette kapitel er der tegn på at DORA er mere effektiv i forhold til statussituationen, når regninputtet er spatialtfordelt. Det er gældende for styring med og uden forecast. Når der indføres vægtningsfordelinger for overløbene, DORA mere effektiv i forhold til statussituationen når der er spatialtfordelt regninput, i to ud af tre undersøgte tilfælde. Er dette en generel trend, så vil DORA også få den gevinst ved brug ude i virkeligheden, hvor regninputtet er spatialt og tidsligt fordelt henover oplandet, også mere end det er tilfældet her, hvor der kun er benyttet fem regnmålere til at dække hele oplandet. Selvom fem regnmålere giver en fin spatialfordeling af regninputtet. Så dækker hver regnmåler stadig mellem 50 og 130 hektar opland til afløbssystemet. Da der også er arealer ind i mellem som ikke er tilkoblet afløbssystemet, er det faktiske areal som hver regnmåler dækker op til flere gange større end det areal som er tilkoblet afløbssystemet. Det betyder at der kan være betydelig spatialfordeling af regnen indenfor oplandet til hver regnmåler. Derfor forventes effektiviteten af DORA sammenlignet med statussituationen at stige yderligere, hvis et fuldstændigt reelt regninput benyttes, som det vil være tilfældet ved brug på et virkeligt afløbssystem.

IV

Del IV - Afrunding

9 Diskussion og perspektivering 77

9.1 Validitet af metode til screening af styringspotentiale

9.2 Brugen af forecast af regn

9.3 Reduktion af små hændelser i forhold til total reduktion

9.4 Begrænsninger af DORAs effektivitet i Kolding

9.5 Manglende fund af globalt minimum ved brug af genetisk algoritme

9.6 Gode råd til brugen af DORA i Kolding

10 Konklusion 83

9. Diskussion og perspektivering

9.1 Validitet af metode til screening af styringspotentiale

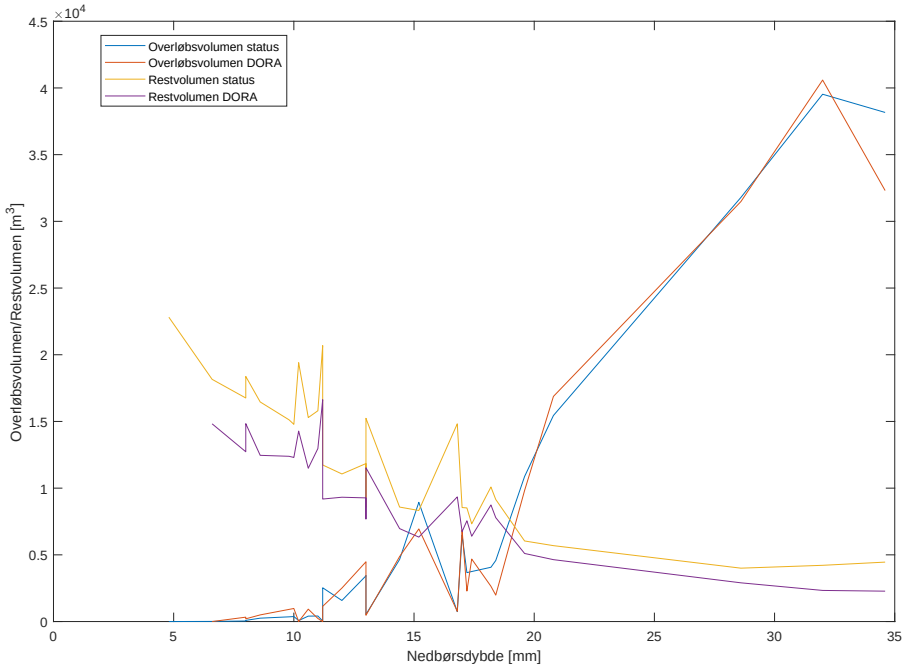
Screeningen af styringspotentialet af Kolding Afløbssystem blev foretaget på baggrund af en sammenligning af overløbsvolumen under overløbshændelser og restvolumen i systemet. Hvor restvolumen var defineret som den tilbageværende volumen i et bassin ved det maksimale fyldningsgrad i løbet af en hændelse. Overløbsvolumen og restvolumen blev analyseret for separate hydraulisk koblede oplande og som summeret volumen for det komplette afløbssystem.

En af konklusionerne fra screeningen var, at overløbsvolumenerne er meget begrænsede ved regndybder under 12 mm. Herover begynder der er være en stigende tendens i overløbsvolumen i forhold til regndybden, mens at under er der hovedsageligt en flad tendens. Hændelser med regndybder under 12 mm har altså et begrænset potentiale for at få reduceret overløbsvolumen, da den nuværende styring allerede løser disse hændelser godt. Hændelserne over 12 mm, burde dog have et vist potentiale for at få reduceret overløbsvolumen, særligt de hændelser hvor overløbsvolumen er mindre end restvolumen i systemet. Teoretisk set vil det at restvolumen er større end overløbsvolumen betyde, at der er potentiale for helt at fjerne overløb fra hændelsen. Men grundet de hydrauliske begrænsninger der er i systemet, så forholder det sig ikke sådan i virkeligheden. Da der er store dele af systemets kapacitet, der ikke kan udnyttes, selvom en mindre del af systemet er ved at blive fuldt udnyttet. Derfor kan det ikke siges, at der er potentiale for at fjerne overløb helt, men kun at der er potentiale for at formindske overløbsvolumen. Det viser også at der er potentiale for at "rerouting"af vandet, fra en del af systemet til en anden, ved indsættelse af nye rørledninger, kan føre til reduceringer i overløbsvolumen fra systemet.

Konklusionen om at der i stor grad er potentiale for at formindske overløbsvolumen for hændelser over 12 mm, og generelt set mindre potentiale for hændelser under det, holder nogenlunde stik i forhold til de resultater DORA viser. De små hændelser kan DORA generelt set ikke løse bedre end statussituationen, mens at DORA kan reducere overløbsvolumen på de større hændelser. Det er dog kun generelt set, der er stadig store hændelser, som DORA ikke løser bedre end statussituationen. Det betyder at der ikke en entydig sammenhæng mellem det potentiale for forbedringer der er fundet, og DORA styringens resultater, hvilket tyder på at screening måske har været utilstrækkelig. Det kan være grundet at DORA styringen ikke præsterer optimalt, den finder i hvert fald for nogle hændelser ikke en optimal styring, da styringen i så fald burde være tættere på den som er i statussituationen.

At DORA styringen ikke finder en optimal løsning, er ikke i sig selv tegn på at screeningen har været utilstrækkelig. Men screeningen har i vise dele været utilstrækkelig. Der er ikke lavet en direkte vurdering af hvor godt statusituationen løser de forskellige hændelser. Der hændelser som statussituationen løser optimalt, selvom der er restvolumen tilbage i systemet, og også selvom der er restvolumen tilbage i den streng af systemet hvorfra der er overløb. De hændelser viser screeningen, som værende hændelser hvor der er potentiale for forbedring, selvom det ikke er tilfældet. Spørgsmålet er dog, om det er nødvendigt at lave en individuel vurdering af effektiviteten af statussituationen, i forhold til den optimale løsning for en hændelse. Hændelser med overløb fra et enkelt bassin er relativt nemme at vurdere. Da det eneste det kræver er en vurdering af om pumper eller spjæld kunne have været aktiveret tidligere end det har været tilfældet under den pågældende hændelser. Større hændelser med overløb flere steder fra i systemet, vil kræve lang tid at analysere, og det vil næsten være umuligt at danne sig et overblik over, effektiviteten af styringen sammenlignet med den optimale styring for hændelsen. Derudover er det tvivlsomt om konklusionen af screeningen vil ændre sig, hvis screeningen havde været mere dybdegående. Resultater med DORA styring viser at det er muligt at reducere overløbsvolumen sammenlignet

med statussituationen. Derfor er det ikke grund til at tro at konklusionen på screeningen ville have været anderledes end det er tilfældet. Derfor vurderes det at screeningen har gjort det den skal, den har belyst om der er potentiale for at formindske overløbsvolumen ved implementering af realtidsstyring. Det forventes at den screeningen der er foretaget, også vil være mulig at gennemføre andre steder, og med samme resultat. Altså er der ikke umiddelbart nogen grund til at vælge en mere tidskrævende løsning.



Figur 9.1: Sammenligning af overløbsvolumen og restvolumen for hændelser i statussituationen og med DORA styring.

På figur 9.1 er overløbsvolumen og restvolumen vist for screeningen og for DORA styring. Der er ikke stor forskel fra før og efter, hvilket heller ikke var forventet, da forbedringerne med DORA styring er begrænsede. DORA styring har heller ikke rykket punktet omkring 12 mm, hvor overløbsvolumen begynder at få en stigende tendens med øget nedbørsdybde. DORA styring har en lavere restvolumen i systemet end statussituationen. Det er i de fleste tilfælde en god ting, da det betyder at DORA har opmagasineret vandet i systemet, fremfor at aflaste det. Figuren viser også at der til stadighed er potentiale for yderligere at reducere overløbsvolumen efter introduktion af DORA. Noget af potentialet er højest sandsynligt en DORA styring som finder mere optimale løsninger. En anden, og stor del er grundet de hydrauliske begrænsninger i systemet, der gør at alt volumen i systemet ikke kan udnyttes tilstrækkeligt.

9.2 Brugen af forecast af regn

Det forecast der er brugt i dette projekt, er et perfekt forecast på baggrund af den registrerede nedbør i den regnmåler der også bruges som input til MOUSE modellen. Det vil selvfølgelig ikke være muligt at benytte den form for forecast i virkeligheden, da regnmåler registreringerne først vil komme når det regner, og så er det svært at lave et forecast af regn. Et regnforecast baseret på

radarmålinger eller numeriske vejrmodeller havde givet en situation der er tættere på den situation man kunne forestille sig at systemet var i under drift. Det er dog valgt i projektet ikke at bruge radarforecast eller vejrmodeller, da det er vurderet at der ikke var tid nok til at lave fyldestgørende analyser med radarforecast eller vejrmodeller. Det er dog nogle analyser som det kunne være interessant at foretage i et senere projekt med DORA.

Det er forventet at radarforecast ikke vil føre til så store reduktioner i overløbsvolumen som det perfekte forecast, da der jo er nogle usikkerheder i forecastet. Da der ikke er store forskelle i den samlede overløbsvolumen mellem DORA med og uden forecast, er det interessant at undersøge hvor stor forbedringen vil være med radarforecast, sammenlignet med DORA uden forecast. Det er ikke usandsynligt at brug af lang leadtime, kunne føre til optimeringer der er dårligere end DORA uden forecast, grundet usikkerheden i forecastet.

Der kunne være en spændende analyse i hvad der er den optimale leadtime på forecastet for DORA, og om der vil være forskel på det, alt efter om hændelsen sker på et tomt system, eller om der simuleres flere efter hinanden sammenhængende hændelser, således at systemet ikke er tomt når et nyt regnvejr starter. Længere leadtime vil gøre det muligt at forudse en kommende regnhændelse bedre end en kort leadtime, og det kan have indflydelse på tømningen af systemet op til regnhændelsen.

DORA har forsøgt at tage hensyn til usikkerheden i regnforecastet ved, at det forecastede nedbør, spredes over en foredelingsfunktion for usikkerheden i forecastet og afstrømningen. At bruge en korrekt fordelingsfunktion for usikkerheden er dog ret vigtigt i forhold til, at få så korrekt et forecast som muligt. En dybdegående undersøgelse af hvilken fordelingsfunktionstype der bedst beskriver usikkerheden, samt hvilke formfaktorer for fordelingsfunktionen der giver det bedste resultat, kunne være interessant at foretage. Men en sådan undersøgelse vil være bedst som en hoveddel af et projekt, da det formentlig vil være en meget omfattende analyse der skal foretages. Det vurderes dog at identifikation af fordelingsfunktionen for usikkerheden, og identifikation af en metode til korrekt bestemmelse af formfaktorerne for en given lokation. Da formfaktorerne ikke vil være ens fra sted til sted. Vil være en brugbart flere steder en bare i DORA, og vil derfor kunne være en interessant måde at arbejde videre med DORA styring i et andet projekt.

9.3 Reduktion af små hændelser i forhold til total reduktion

Det er i projektet fundet, at det er muligt at reducere den samlede overløbsvolumen henover et år, ved at brug DORA. Det er umiddelbart et positivt resultat, da det viser at det er muligt at reducere overløbsvolumen sammenlignet med en regelbaseret styring. Da den nuværende styring allerede er rimeligt god, er de mulige forbedringer begrænsede, og det er også kun vist sig muligt at reducere overløbsvolumen henover et år med 9 %, der trods alt stadig er en betydelig forbedring. Men derfor er det stadig ikke sikkert, at de resultater der er fundet med DORA styring, er bedre end dem som den nuværende styring frembringer. Det skyldes at den nuværende styring er betydeligt bedre til at reducere overløbsvolumen for små hændelser.

For hændelser hvor der i statussituationen er registeret overløbsvolumen på under $1000\,m^3$, giver DORA styring et overløbsvolumen der er 47 % større end i statussituationen. Der er en værdi i at formindske den totale overløbsvolumen. Men reduktion af en hændelse fra 35000 til $30\,000\,m^3$, vejer måske ikke op for en forøgelse fra 40 til $400\,m^3$. De ekstra $5000\,m^3$ betyder formentlig ikke så meget i forhold til den skade der bliver forvoldt på recipienterne i systemet, da der allerede bliver udledt store mængder spildevand under den pågældende hændelser. Men hvis en hændelser på $40\,m^3$ bliver 10 gange så stor, så har det formentlig stor indflydelse på hvordan hændelsen påvirker recipienterne. Derfor er antallet af hændelser, og størrelsen af de små hændelser muligvis lige så vigtige som en reduktion af den totale overløbsvolumen. DORA styring fjerner overløb

helt i tre af de analyserede hændelser, det taler til DORAs fordel, da det reducerer det samlede antal overløbshændelser som recipienterne skal modstå. Hvilket har en stor effekt på den samlede belastning af recipienterne. Det vurderes at de forværringerne af recipienterne grundet større overløb fra små hændelser, bliver i værste fald opvejet af de positive effekter på recipienterne som følge af reduceret total overløbsvolumen, samt et formindsket antal totale overløbshændelser i systemet.

9.4 Begrænsninger af DORAs effektivitet i Kolding

Styringen i Kolding har nogle begrænsninger som følge af systemets opbygning. En flaskehals i systemet er Bramdrupdam og Vester Nebel bassinerne, der tilsammen har overløb i alle hændelser med overløb, både før og efter implementeringen af DORA styring. DORA styring kan reducere overløbsvolumen for de to bassiner med 14 %, og nedbringer deres andel af systemets samlede overløbsvolumen fra 19 % til 17 %. Ved analyse af de enkelte hændelser, er det vurderet, at der ikke er noget nævneværdigt potentiale for at nedbringe overløbsvolumen fra de to bassiner yderligere, uden at det vil føre til overløb andet steds i systemet. Men bassinernes udformning og tømmetiden af dem er en begrænsende faktor i systemet. Bramdrupdam bassinet er et af de mindste bassiner i systemet målt på specifik kapacitet, og det er tydelig begrænsende faktor for bassinet, der også modtager vand fra Vester Nebel bassinet, og derfor er yderligere belastet, udover det areal der er direkte tilkoblet bassinet. Forøgelse af bassinvolumen og eventuelt pumpekapaciteten ud af bassinet, kan være med til at afhjælpe flaskehalsen, som bassinet er. Det vil formentlig medføre en reduktion i det totale antal overløbshændelser i systemet, samt den totale overløbsvolumen.

En anden begrænsning i systemet er, at systemet er meget opdelt. I store træk samles systemet kun ved Forrenseanlægget. Det betyder at det kun i ringe grad er muligt at benytte tilbageværende kapacitet i en del af systemet, når en anden del er overbelastet. Det begrænser den potentielle gevinst ved brug af DORA styring. Derfor kunne anlæggelse af pumpeledninger på kryds af systemet, som kan tages i brug når en del er hårdt belastet, men en anden ikke er, føre til yderligere gevinst ved brug af DORA.

9.5 Manglende fund af globalt minimum ved brug af genetisk algoritme

Brugen af en genetisk algoritme til at bestemme en optimal styring er både en styrke og en svaghed ved DORA. Brugen af en genetisk algoritme gør at beregningstiden er lavere, da det ikke er nødvendigt at søge alle kombinationer af styring i gennem for hvert tidsskridt. Det resulterer dog også i, at det ikke er sikkert at den løsning der findes er et globalt minimum. Et alternativ til brugen af en genetisk algoritme kunne være en offline optimering. Hvor en lang række hændelser simuleres med DORA, og den optimale styring for hændelserne findes. Når en regnhændelse forecastes, kan regnen der forecastes sammenlignes med tidligere hændelser, og den optimale styring til den tidligere hændelse kan implementeres til den forecastede hændelse. Hvis en optimale styring er fundet for hændelse der i høj grad minder om den kommende hændelse, vil styringen formentlig være tæt på optimal for den kommende hændelse også. Derved har offline optimering her den fordel, at det er sikret at styringen der foretages er tæt på optimal. I hvert fald så længe at den hændelse der forecastes, minder om en hændelse der er i hændelsesbiblioteket. Er det ikke tilfældet vil styringen ikke have noget at læne sig opad, og vil skulle have en tilbagefaldsstrategi. Offline optimeringen vil heller ikke være så modstandsdygtig overfor regnhændelser der ændrer karakter undervejs. Hvis den hændelse der forecastes, ikke er den hændelse faktisk kommer, vil styringen gøre noget, som formentlig slet ikke er korrekt i forhold til at reducere overløbsvolumen. Det vil en dynamisk styring som DORA kunne reagere på.

9.6 Gode råd til brugen af DORA i Kolding

Bassinerne Søndervang, Enevold Sørensens Vej og Bellevuegade har ikke overløb til recipient og er de tre største bassiner i systemet målt på specifik kapacitet. Det betyder at de har en stor indflydelse på hvor gode styring er. Det er i projektet fundet nødvendigt at indføre regelstyring af bassinerne, for at forbedre DORA styringens effektivitet. Uden brug af den indførte regelstyring på bassinerne, giver DORA styring en forøgelse i overløbsvolumen på 8 % uden brug af forecast. Med brug af forecast kan den totale overløbsvolumen i systemet reduceres med 2 %. Det er betydeligt dårligere end resultaterne med regelstyring på bassinerne. Derfor er det essentielt for styringens effektivitet, at de tre bassiner er udnyttet bedst muligt under regnhændelser. Til det er noget regelstyring en mulighed, i forhold til at sørge for at bassinerne udnyttes i større grad, end hvad ren DORA styring vil resultere i.

Hvis yderligere separatkloakering af Kolding, skal planlægges med styring in mente. Hvorved at områder hvor den største gevinst for styringen skaffes, separeres først. Så vurderes det, at separatkloakeringen giver den største gevinst, hvis den er fokuseret på oplandene til de bassiner der har lav specifik kapacitet. Da man herved vil kunne reducere antallet af overløbshændelser i systemet. De bassiner det vil være gældende for vil være Bramdrupdam, Rebæk, Rugmarken og Forrens. Specielt ved Forrens vil der være stor gevinst for styringen, da lavere belastning på Forrens, vil øge styringens muligheder for at udnytte forskellige belastninger rundt om i systemet, da der er større volumen til rådighed i Forrens, der kan bruges i denne proces.

Det er i projektet forsøgt at beskytte recipienter ved brug af vægtninger af overløbsbygværkerne i systemet. Det er fundet, at der er nogen mulighed for at flytte overløbsvolumen rundt i systemet, men den er også begrænset. Vægtningsfordelingerne der er brugt i dette projekt, er alle konstrueret på baggrund af recipienterne, og ikke på baggrund af systemet. Det har i nogle tilfælde ført til, at DORA præsterer dårligere end statussituationen. Det er altså vigtigt at vægtningsfordelinger konstrueres på en måde, der tager hensyn til systemets opbygning og virkning, hvis optimale præstation af styringen skal opnås, både overfor det resultat der forøges at fremmes med vægtningsfordelingen, men også systemets generelle præstation.

Når DORA implementeres på et system, hvor der allerede er en omfattende styring, så kan det ikke forventes at DORA kan forbedre alle hændelser. Skal man implementere DORA styring i sådan system, er man nød til at acceptere, at ikke alle hændelser kan forbedres, og også at nogle hændelser vil blive forværret. Derfor er det nødvendigt ikke, at fokusere for meget på enkelte hændelser, men have fokus på det overordnede resultat.

10. Konklusion

I screeningen af styringspotentialet for systemet, er det fundet, at der er potentiale for at reducere overløbsvolumen yderligere fra Kolding Afløbssystem, på trods af den regelbaserede styring der allerede er implementeret. Det er i projektet fundet, at det er muligt at udnytte noget af det potentiale, der er identificeret i screeningen, ved at benytte DORA styring fremfor regelbaseret styring. Det bekræfter hypotesen om at en model prædiktiv styring er bedre til at reducere overløbsvolumen fra systemet end en regelbaseret styring, for Kolding Afløbssystem. Det er lykkedes at reducere overløbsvolumen i systemet med 6 % sammenlignet med den nuværende regelbaserede styring, når der er ikke er noget regnforecast. Når der er regnforecast i DORA er reduktionen i overløbsvolumen på 9 %. Det er en reduktion i samme størrelsesorden, som stigningen i årsnedbør grundet klimaforandringer frem mod år 2100 (S. Thorndahl m.fl., 2017). Derved bør det være muligt at opretholde et serviceniveau på det nuværende niveau, eller lavere, i en årrække frem uden at skulle investere i nyanlæg.

Benyttes spatialtfordelt regninput til den hydrodynamiske model, så er forbedringen ved brug af DORA større. Her er forbedringen på henholdsvis 8 % uden regnforecast og 12 % med regnforecast. Hvilket bekræfter hypotesen om at en styring der kan tage hensyn til hele systemets tilstand på en gang, har bedre mulighed for at håndtere at regninputtet er spatialtfordelt, og at det er forskudt tidsligt henover oplandet, og derved bliver mere effektivt sammenlignet med den regelbaserede styring.

Det er forsøgt at beskytte sårbare recipienter ved brug af vægtninger af overløbsbygværker i DORA. Det har vist sig muligt at reducere overløbsvolumen til sårbare recipienter ved brug af vægtninger, ved hvis visse vægtningsfordelinger. Effektiviteten af beskyttelsen af sårbare recipienter afhænger meget af, hvordan vægtningsfordelingen er sammensat. En effektiv beskyttelse af recipienter kræver, at vægtningsfordelingen er sammensat med systemets funktion in mente. Hvis det ikke er tilfældet, risikeres det, at det forsøges at fremme en opførsel, som er modsat den opførsel, som systemet er designet til at have. Det ses i nogle af de vægtningsfordelinger, som er brugt i dette projekt, da de er konstrueret på udelukkende på baggrund af recipienterne og ikke på baggrund af systemet.

Litteraturliste

Hubert Colas, Martin Pleau, Jean Lamarre, Geneviève Pelletier og Pierre Lavallée (2004). „Practical Perspective on Real-Time Control“. I: *Water Quality Research Journal of Canada*.

Steffen Davidsen, Roland Löwe, Cecilie Thrysøe og Karsten Arnbjerg-Nielsen (2017). „Automatic simplification of hydraulic networks for 1D/2D urban flood models“. I: *Journal of Hydroinformatics*.

DHI (2016a). *MOUSE Pipe Flow Reference Manual*.

— (2016b). *MOUSE Runoff Reference Manual*.

DMI (2014). *Fremtidige klimaforandringer i Danmark*. Tek. rap. Danmarks Meteorologiske Institut.

Fredericia Dagblad (2016). *Nu bliver badevand snart renere*. URL: https://frdb.dk/kolding/Nu-bliver-badevand-snart-renere/artikel/94375.

IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom og New York, NY, USA: Cambridge University Press, s. 1535. ISBN: ISBN 978-1-107-66182-0. DOI: 10.1017/CBO9781107415324. URL: www.climatechange2013.org.

Kolding Kommune (2016). *Kolding sætter kurs mod fjordbad og tørre kældre*. URL: https://www.kolding.dk/aktuelt-nyheder/nyhedsarkiv-2016/kolding-saetter-kurs-mod-fjordbad-og-toerre-kaeldre.

Kortforsyningen (2018). *Kortforsyningen*. URL: https://kortforsyningen.dk/.

Roland Löwe, Luca Vezzaro, Peter Steen Mikkelsen, Morten Grum og Henrik Madsen (2016). „Probabilistic runoff volume forecasting in risk-based optimization for RTC of urban drainage systems“. I: *Environmental Modelling & Software* 80, s. 143–158. ISSN: 1364-8152. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.027. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815216300470.

Mathworks (n.d.). *How the Genetic Algorithm Works*. Tek. rap. URL: https://se.mathworks.com/help/gads/how-the-genetic-algorithm-works.html.

Elbys Jose Meneses, Marion Gaussens, Carsten Jakobsen, Peter Steen Mikkelsen, Morten Grum og Luca Vezzaro (2018). „Coordinating rule-based and system-wide model predictive control strategies to reduce storage expansion of combined urban drainage systems: The case study of Lundtofte, Denmark“. I: *Water* 10.1. ISSN: 2073-4441. DOI: 10.3390/w10010076.

Troels Sander Poulsen (2015). *Miljø og badevand - Reducer investeringsomkostninger og tag vare på miljøet*.

Manfred Schütze, Alberto Campisano, Hubert Colas, Wolfgang Schilling og Peter A. Vanrolleghem (2004). „Real time control of urban wastewater systems - where do we stand today?“ I: *Journal of Hydrology*.

Manfred Schütze, Maja Lange, Michael Pabst og Ulrich Haas (2018). „Astlingen – a benchmark for real-control control (RTC)“. I: *Water Science and Technology*. ISSN: 0273-1223. DOI: 10.2166/wst.2018.172. eprint: http://iwaponline.com/content/early/2018/04/

16/wst.2018.172.full.pdf. URL: http://iwaponline.com/content/early/2018/04/16/wst.2018.172.

Styrelsen for Vand- og Naturforvaltning (2016). *Vandområdeplan 2015-2021 for Vandområdedistrik Jylland og Fyn*. Tek. rap. Miljø- og Fødevareministeriet.

S. Thorndahl, A. K. Andersen og A. B. Larsen (2017). „Event-based stochastic point rainfall resampling for statistical replication and climate projection of historical rainfall series". I: *Hydrology and Earth System Sciences* 21.9, s. 4433–4448. DOI: 10.5194/hess-21-4433-2017. URL: https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/4433/2017/.

Søren Thorndahl, Troels Sander Poulsen, Thomas Bøvith, Morten Borup, Malte Ahm, Jesper Ellerbæk Nielsen, Morten Grum, Michael R. Ramussen, Rasphall Gill og Peter Steen Mikkelsen (2013). „Comparison of short-term rainfall forecasts for model-based flow prediction in urban drainage systems". I: *Water Science and Technology*.

Søren Thorndahl og Michael R. Ramussen (2013). „Short-term forecasting of urban storm water runoff in real-time using extrapolated radar rainfall data". I: *Journal of Hydroinformatics*.

Luca Vezzaro og Morten Grum (2014). „A Generalised Dynamic Overflow Risk Assessment (DORA) for Real Time Control of urban drainage systems". I: *Journal of Hydrology*.

Luca Vezzaro, Roland Löwe, Henrik Madsen, Morten Grum og Peter Steen Mikkelsen (2013). *Investigating the use of stochastic forecast for RTC of urban drainage systems*.

V

Appendiks

A Screeningstabel 89

B Validering af reduceret model 93
B.1 Opsummering

C Beskrivelse af den anvendte hydrauliske model 97
C.1 Overflademodel
C.2 Rørafstrømningsmodel

D Interface mellem DORA og MOUSE . . 101
D.1 Opbygning af DORA i Matlab
D.2 Opbygning af interface

E Lokal minimumsanalyse 105

F Analyse af størrelsen af vægtningsparametre 107

G Tabeller til styring med vægtning 109
G.1 DORA uden spatialfordeling af regn
G.2 DORA med spatialfordeling af regn

H Korrelation mellem overløbsvolumen per bassin og regnintensitet 115
H.1 Uden forecast
H.2 Med forecast

A. Screeningstabel

Overløbsvolumen (Ovol) og restvolumen (Rvol) fra screeningshændelser.

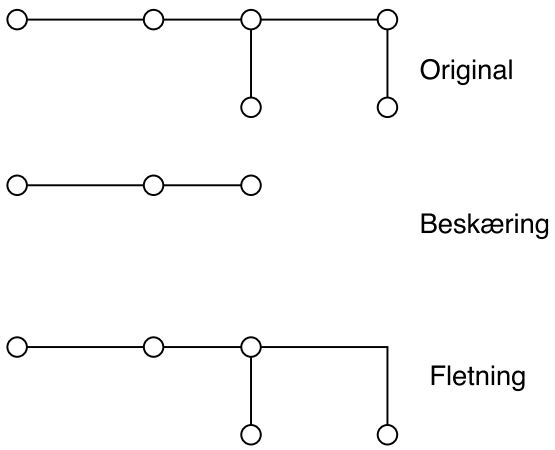
Hændelser	Total		Forrens		Streng 1		Streng 2		Streng 3		Streng 4	
	Ovol	Rvol	Ovol	Rvol	Ovol	Rvol	Ovol	Rvol	Ovol	Rvol	Ovol	Rvol
1	3428,27	11842,20	2309,94	0,00	200,12	703,42	0,00	8135,63	0,00	877,53	918,20	124,17
2	6484,65	8546,19	3739,97	0,00	1161,22	443,03	0,00	6952,98	0,00	474,51	1458,34	0,00
3	9,83	16555,04	0,00	1601,27	0,00	1615,30	0,00	10795,07	0,00	1091,69	9,83	278,09
4	39,85	18556,13	0,00	2383,51	0,00	3357,52	0,00	10567,47	0,00	1091,65	39,85	348,90
5	3666,21	8517,21	1891,62	0,00	16,16	576,94	0,00	5946,62	0,00	788,42	1570,63	0,00
6	8938,49	8325,25	4767,55	0,00	2033,56	274,73	0,00	7528,99	0,00	233,83	1561,03	0,00
7	15445,45	5689,93	8758,83	0,00	2817,86	31,33	0,00	5337,98	46,17	51,76	2485,27	0,00
8	405,87	14195,02	0,00	1096,34	0,00	1409,41	0,00	9501,45	0,00	1041,38	405,04	53,40
9	4574,77	9150,51	2611,73	0,00	468,59	621,89	0,00	7244,62	0,00	760,49	1387,48	0,00
10	3750,74	7323,45	1562,03	0,00	595,35	357,96	0,00	6347,53	0,00	297,41	1276,51	0,00
11	253,33	14332,25	0,00	2154,14	0,00	1573,74	0,00	9523,67	0,00	974,45	171,34	0,00
12	4655,23	8581,39	1918,41	0,00	880,90	375,98	0,00	7668,52	0,00	316,85	1183,44	0,00
13	31793,51	4001,53	8830,13	0,00	8696,64	17,25	1962,83	3984,28	1660,04	0,00	4146,88	0,00
14	3436,77	8577,08	209,35	0,00	1110,95	415,12	0,00	7483,12	0,00	342,78	1172,85	91,80
15	2530,48	11737,29	1635,87	0,00	186,05	694,90	0,00	9164,72	0,00	701,18	567,73	0,00
16	10875,09	6040,10	6228,62	0,00	2141,73	54,36	0,00	5517,11	0,00	366,06	2036,84	0,00
17	536,54	14262,38	0,00	974,90	0,00	1441,39	0,00	9287,10	0,00	1091,66	536,54	259,58
18	38163,10	4455,27	18039,46	0,00	9544,17	34,81	279,92	4420,46	1065,32	0,00	4806,78	0,00
19	41,14	15085,13	0,00	1673,31	0,00	1447,30	0,00	10165,38	0,00	1057,57	23,22	15,15
20	75,47	17393,30	0,00	2016,18	0,00	2222,66	0,00	10590,94	0,00	1091,67	75,47	294,16
21	352,88	14654,70	0,00	466,93	0,00	1345,18	0,00	9935,73	0,00	993,24	352,88	234,89
22	39529,43	4215,30	20292,26	0,00	9444,65	37,28	484,95	4140,57	954,89	0,00	4889,10	0,00
23	741,28	13175,18	0,00	1646,96	0,00	1179,85	0,00	9132,86	0,00	1031,42	715,82	6,30
24	374,16	14480,60	0,00	303,82	0,00	1306,34	0,00	9843,73	0,00	1002,36	374,16	256,12
25	1579,45	11063,60	792,43	0,00	77,91	585,21	0,00	8193,65	0,00	682,52	638,66	0,00
26	4068,30	10086,31	2487,47	0,00	0,00	877,65	0,00	6089,57	0,00	977,59	1580,83	80,51
27	87,31	16755,89	0,00	1618,16	0,00	2326,38	0,00	10468,01	0,00	1091,68	87,31	276,47
28	414,65	14596,79	0,00	1204,99	0,00	1501,19	0,00	9753,21	0,00	1091,67	414,65	126,59

Hændelser	Streng 5		Streng 6		Streng 7		Streng 8		Streng 9	
	Ovol	Rvol	Ovol	Rvol	Ovol	Rvol	Ovol	Rvol	Ovol	Rvol
1	0,00	199,79	0,00	414,40	0,00	108,52	0,00	234,09	0,00	143,81
2	100,16	158,69	24,97	0,00	0,00	108,54	0,00	63,22	0,00	86,72
3	0,00	262,20	0,00	534,49	0,00	202,29	0,00	366,60	0,00	152,98
4	0,00	280,35	0,00	532,01	0,00	243,66	0,00	398,88	0,00	153,31
5	187,79	165,30	0,00	192,50	0,00	108,69	0,00	204,08	0,00	14,70
6	302,63	39,38	262,75	0,00	0,00	97,39	0,00	26,77	10,96	0,00
7	493,17	73,91	622,91	0,00	0,00	97,48	106,48	0,00	114,76	0,00
8	0,83	185,95	0,00	462,55	0,00	108,98	0,00	281,44	0,00	148,74
9	106,97	76,16	0,00	35,87	0,00	90,78	0,00	52,39	0,00	44,64
10	263,57	96,08	53,29	0,00	0,00	102,43	0,00	7,86	0,00	1,95
11	81,99	177,16	0,00	437,89	0,00	224,18	0,00	275,00	0,00	91,97
12	364,40	0,00	250,64	0,00	0,00	108,98	0,00	1,03	57,43	0,00
13	2288,15	0,00	2450,60	0,00	206,11	0,00	866,06	0,00	686,07	0,00
14	405,00	12,20	367,97	0,00	0,00	108,96	0,00	7,07	170,65	0,00
15	140,82	63,07	0,00	191,80	0,00	108,98	0,00	202,76	0,00	53,16
16	403,46	12,24	64,44	0,00	0,00	9,04	0,00	14,20	0,00	21,92
17	0,00	246,83	0,00	432,37	0,00	108,92	0,00	279,45	0,00	147,17
18	1393,91	0,00	2047,37	0,00	19,04	0,00	565,21	0,00	401,92	0,00
19	17,92	181,38	0,00	460,48	0,00	233,19	0,00	284,08	0,00	131,43
20	0,00	268,73	0,00	610,31	0,00	301,42	0,00	402,15	0,00	148,70
21	0,00	227,52	0,00	424,71	0,00	108,97	0,00	278,69	0,00	146,70
22	1000,55	0,00	1690,45	0,00	0,00	18,73	529,24	0,00	243,34	0,00
23	25,46	162,43	0,00	462,86	0,00	145,75	0,00	130,73	0,00	91,82
24	0,00	237,62	0,00	384,29	0,00	109,01	0,00	276,47	0,00	147,44
25	70,45	153,48	0,00	345,79	0,00	108,80	0,00	189,55	0,00	80,23
26	0,00	176,73	0,00	435,63	0,00	108,78	0,00	253,62	0,00	144,11
27	0,00	250,50	0,00	463,22	0,00	198,80	0,00	362,59	0,00	146,82
28	0,00	179,03	0,00	456,20	0,00	108,95	0,00	280,61	0,00	126,80

B. Validering af reduceret model

Den reducerede model valideres for at bekræfte, at modellen kan bruges fremfor detailmodellen, med henblik på at reducere beregningstiden. Modellen er reduceret efter metoden beskrevet i (Davidsen m.fl., 2017).

Metoden til reduktion af lednignsnettet består af to værkøtjer, beskæring og fletning. Beskæring fjerner rør i modellen under en given diameter. Fra et udvalgt start punkt bevæger algortimen sig gennem ledningsnettet ved at gå opstrøms fra node til node. For hver node undersøges det om alle rør i en streng fra noden, har en diameter der er under grænseværdien. Hvis det er tilfældet fjernes rørene. Hvis ikke bevæger algoritmen sig videre til næste node og forsøger igen. Ved fletning bibeholdes den originale ledningslængde, metoden forsøger i stedet at begrænse antallet af noder i modellen. Til metoden benyttes en grænseværdi for rør længde. Hvis et givent rør er under grænseværdien, undersøges de tilstødende rør for om de også er under grænseværdien. Hvis to tilstødende rør er under grænseværdien, og forskellen i rørdiameter er tilstrækkeligt lille, flettes de to rør sammen. De to metoder er skitseret i figur B.1.



Figur B.1: Skitsering af beskæring og fletning af ledninger.

Tabel B.1: Information om hændelser udvalgt til validering.

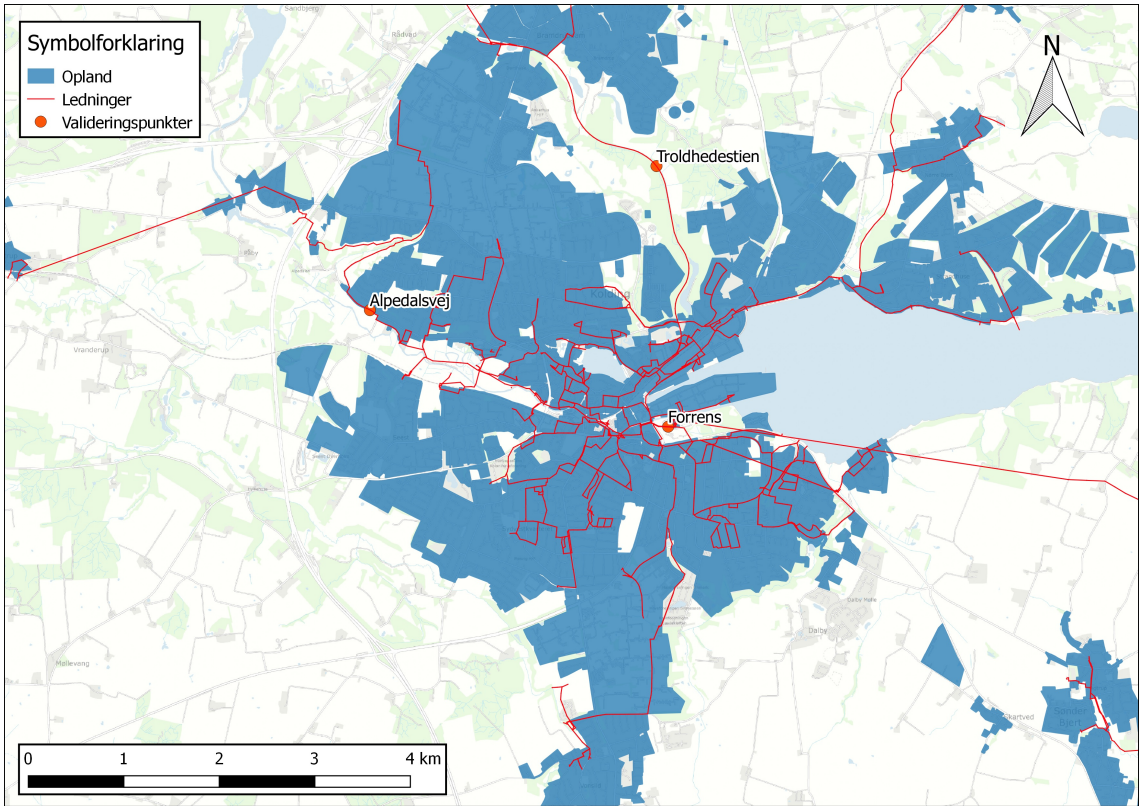
Gentagelsesperiode	Længde [min]	Dybde [mm]
5 år	286	30,8
1 år	260	18,4
0,5 år	262	15,4
0,083 år	369	9,6

Til valideringen er udvalgt fire hændelser med gentagelsesperioder for regndybden på 1 måned, 6 måneder, 1 år og 5 år. 1 måneds, 6 måneders og 1 års hændelserne er valgt da det er hændelser der opstår relativt ofte, og som det forventes leder til overløb i systemet. 5 års hændelsen er en kraftigere og sjældnere hændelse, for at undersøge om den reducerede model også har et korrekt respons på kraftigere og mere intense hændelser. Information om hændelser er vist i tabel B.1. Hændelserne benyttes til at bestemme sammenhæng mellem afstrømningsmønsteret i de to modeller, samt forskellen i overløbsvolumen mellem de to modeller. Til at vise sammenhængen i afstrømningsmønsteret er der udvalgt tre valideringspunkter, hvor det bliver undersøgt, om vandføringen og den tidslige påvirkning er ens mellem de to modeller. Derudover undersøges

Tabel B.2: Resultater af valideringsparametre.

Parameter	Min-Maks	Gennemsnit
R^2	$0,818 - 0,996$ [-]	$0,922$ [-]
$RMSE$	$0,0009 - 0,098$ [m^3/s]	$0,034$ [m^3/s]

forskellen i overløbsvolumen under hændelserne også. Valideringspunkterne placering i oplandet er vist på figur B.2.



Figur B.2: Placering af de udvalgte valideringspunkter.

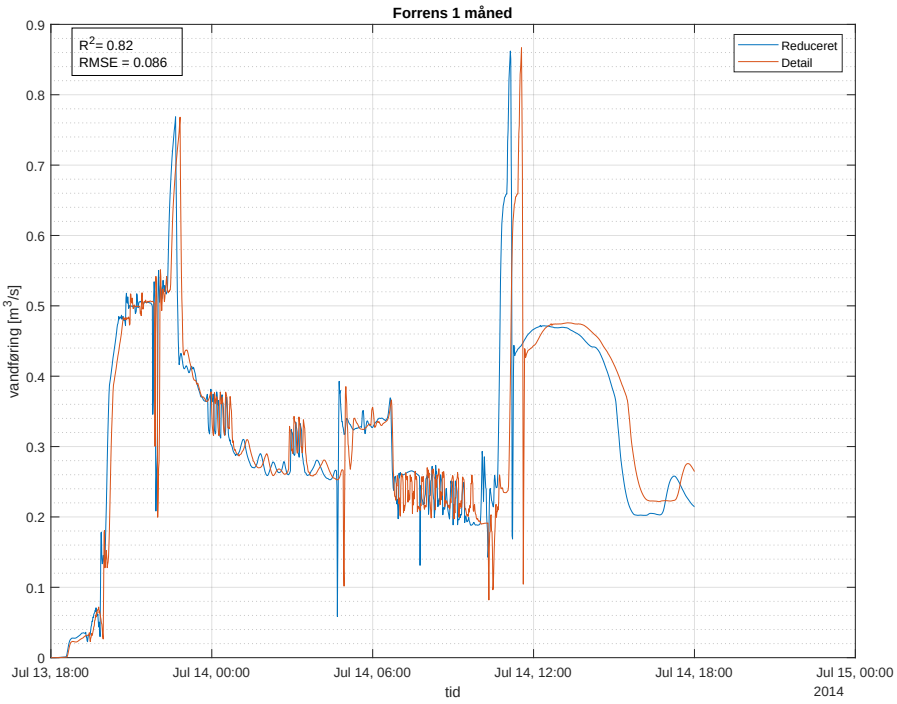
Til at bestemme korrektheden af afstrømningen fra den reducerede model benyttes korrelationskoefficienten R^2 og root-mean-square error $RMSE$. R^2 er korrelationen mellem tidsserien for detailmodellen og den reducerede model, og har en værdi fra $0-1$, hvor en værdi på 1 betyder at der er en perfekt lineær sammenhæng mellem tidsserierne. $RMSE$ svarer til standardafvigelsen for fejlen og kan have en værdi fra $0-\infty$, hvor en værdi på 0 er perfekt. Resultaterne af valideringsparametrene er vist i tabel B.2.

Den dårligste R^2 er fundet i forrens anlægget fordi, at der er en forskydning af tidsserien længere nede i systemet. Det er forventet i forhold til de resultater, der er præsenteret i (Davidsen m.fl., 2017). Forskydningen i ledningen ved forrens anlægget er fundet til at være i intervallet $4-24$ min ud fra en krydskorrelering mellem tidsserien for detailmodellen og den reducerede model. Tidsforskydningen kan ses på figur B.3, hvor hændelsen med den største forskydningen er valgt. Det ses på figuren, at størrelsen af peaks er modelleret korrekt. Det er blandt andet på grund af at ledningen er kraftigt pumpepåvirket. I mindre pumpepåvirkede ledninger er der tendens til at mindre overestimering af peaks. Det kan ses på figur B.4, hvor også en mindre forskydning af tidsserien kan ses. Forskydningen er dog minimal, da ledningen er placeret opstrøms i systemet.

Tabel B.3: Forskelle i overløbsvolumen mellem detailmodel og den reducerede model.

Simulering	Detail overløb [m^3]	Reduceret overløb [m^3]	Forskel [m^3]	Forskel [%]
2012	100180	101870	1690	1,69
5 år	21770	21928	158	0,73
1 år	6853	7077	223	3,26
0,5 år	4487	4673	186	4,15
0,083 år	721	707	14	1,93

Overestimeringen der er vist på figuren er minimal.

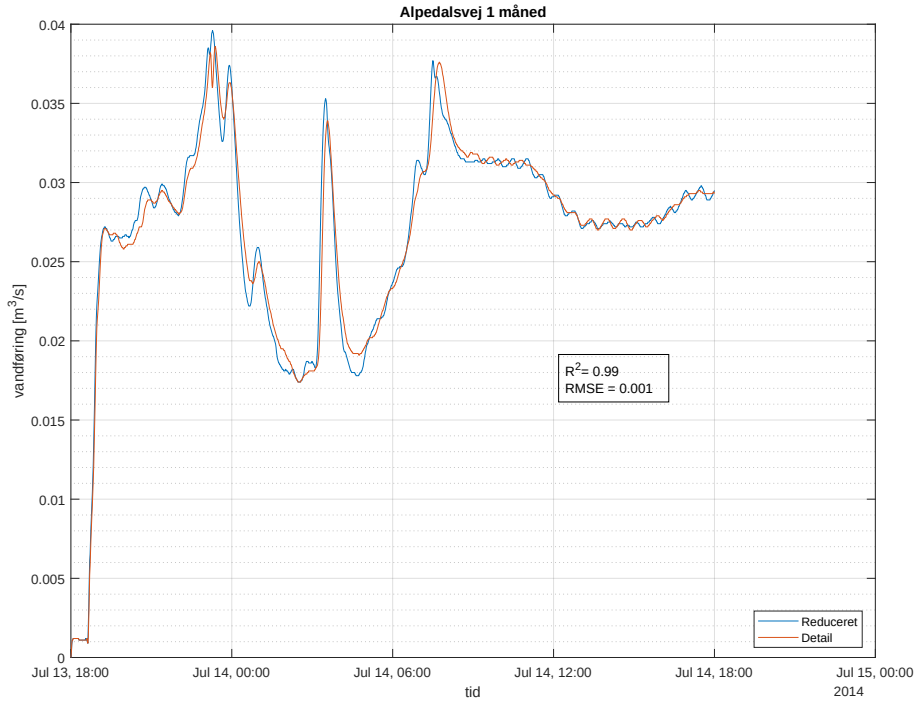


Figur B.3: Sammenligning af tidsserien for vandføring i indløbsledning til forrenseanlægget for en 1 månedshændelse.

Da overløbsvolumen er det der forsøges at formindske i dette projekt er det også relevant at undersøge forskellen i de modellerede overløbsvolumener der er mellem de to modeller. Til det benyttes et års simulering af begge modeller, i regnserien er hændelser på under 3 mm sorteret fra. Året 2012 er valgt fordi det er et år uden nedbrud i den valgte regnmåler. Resultaterne er vist i tabel B.3. Forskellen mellem modellerne er på 1,69 %, hvilket betegnes som en minimal forskel. Beregningstiden for detailmodellen var 28 timer, beregningstiden for den reducerede model var 10 timer.

B.1 Opsummering

Der er forskelle i resultaterne fra detailmodellen og den reducerede model. Der er tidsforskydning i afløbshydrograferne, særligt i de nedre dele af systemet. Peaks har en tendens til at blive

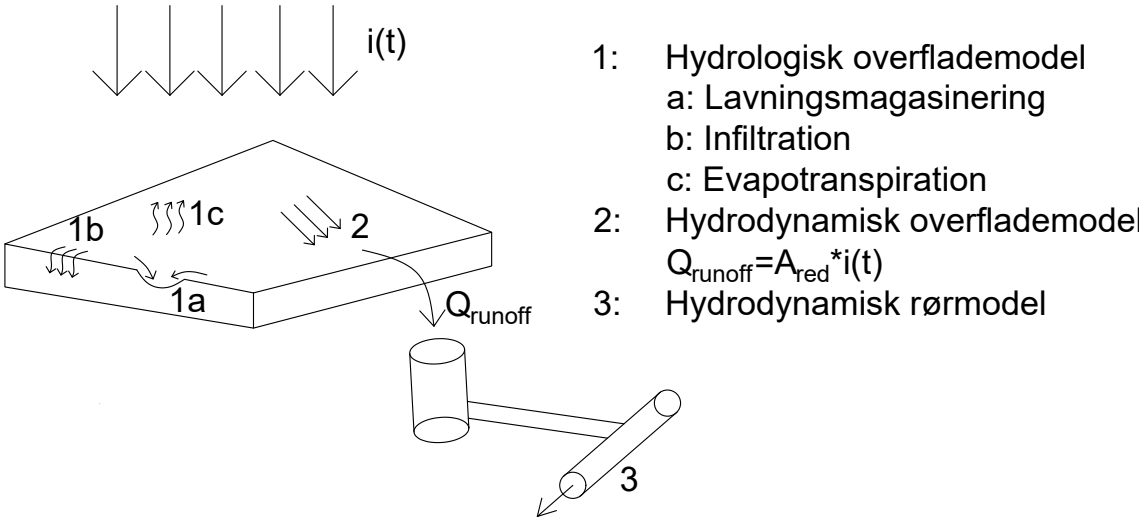


Figur B.4: Sammenligning af tidsserien for vandføring i ledning i Alpedalsvej for en 1 månedshændelse.

overestimeret og overløbsvolumen er større, formentlig som et resultat af overestimering af peaks. Forskellen er dog så lille, at det ikke vurderes, at de har en betydelig effekt på korrektheden af modellen. Derfor vurderes det som acceptabelt at benytte den reducerede model senere for at reducere beregningstiden, når modellen skal køre i realtid.

C. Beskrivelse af den anvendte hydrauliske model

Dette kapitel indeholder en beskrivelse af den hydrauliske model der benyttes, til at modellere Kolding afløbssystem. Den hydrauliske model der er benyttet i projektet er en numerisk model opbygget i MOUSE (MOdel for Urban SEwers) udviklet af DHI. Modellen er baseret på en konceptuel beskrivelse af afløbssystemet og oplandet, der er opdelt i tre forskellige modeller: En hydrologisk overflademodel der beskriver det bidragende regninput. En hydrodynamisk overflademodel der beskriver afstrømning på overfladen, og kobler det bidragende regninput til afløbssystemet. En hydrodynamisk rørmodel der beskriver vandføring og vandniveau i rørsystemet. Overflademodellen inddrager følgende faktorer til beregning af det bidragende regninput: Regnintensitet, evapotranspiration, lavningsmagasinering og infiltration. En konceptuelt opbygning af afløbssystemet, og de relevante faktorer i de tre modeller er vist på figur C.1.



Figur C.1: Konceptuel opbygning af afløbssystemet.

C.1 Overflademodel

I MOUSE er de hydrologiske og hydrodynamiske overflademodeller samlet i en model. I MOUSE er der mulighed for at vælge mellem tre forskellige overflademodeller, A, B og C. Forskellen på de tre er ikke gennemgået i denne rapport. En gennemgang af forskellen mellem dem kan findes i (DHI, 2016b). I dette projekt er overflade model A brugt. Model A bruger impermeabelt areal, initialtab, hydrologisk reduktionsfaktor, koncentrationstid og en tid-areal kurve. (DHI, 2016b)

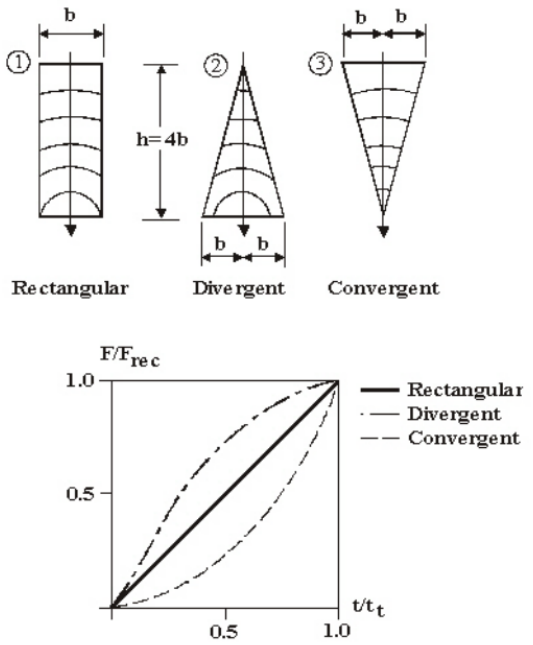
Det impermeable areal er det areal i et givent opland, der bidrager til afstrømning til kloaksystemet.

Initialtabet er den regndybde der falder i starten af en hændelse før afstrømning begynder. Initialtabet dækker over det vand der bliver magasineret i lavninger i terrænet, og som bidrager til vandmætning af semi-permeable overflader.

Hydrologisk reduktionsfaktor er en reduktionsfaktor af det impermeable areal. Faktoren tager højde for tab af vand fra blandt andet evapotranspiration og infiltration.

Koncentrationstiden beskriver hvor lang tid den længste transportid i oplandet er. Det betyder at koncentrationstiden er lige med den tid det tager, før hele oplandet bidrager med afstrømning efter starten på en regnhændelse. Og også hvor lang tid efter, at regnen er stoppet. At der stadig er

afstrømning til kloaksystemet. Tid-arealkurven beskriver forholdet mellem koncentrationstiden og det bidragende areal. De mulige tid-arealkurver i MOUSE er vist på C.2.



Figur C.2: Tid-areal kurver i MOUSE overflade model A. (DHI, 2016b)

Beregning af afstrømningen er diskritiseret i tid ved beregningstidsskridtet Δt. Antagelsen om konstant afstrømningshastighed kræver en diskritisering af oplandsarealet, i en rækker beregningsceller, der er koncentriske omkring udløbet. Antallet af celler i oplandet er lig med:

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

Hvor:

t_c	Koncentrationstid
Δt	Simuleringstidsskridt

Arealet af hver celle beregnes på baggrund af den givne tid-arealkurve. Det samlede areal for alle cellerne, er lig med det impermeable areal for oplandet.

Ved regndybder større end initialtabet påvirker overfladeafstrømningen afløbssystemet i MOUSE. Hvis en simulering i MOUSE indeholder flere hændelser, tømmes magasineringen mellem hændelser, således at initialtabet skal udfyldes igen, inden at der sker afstrømning til kloaksystemet. Tømning af lavningsmagasinering sker med en konstant hastighed, når regninputtet er 0, og der ingen afstrømning er til afløbssystemet.

C.2 Rørafstrømningsmodel

Til at modellere ikke-stationære strømninger i ledningsnettet, benyttes Saint Venant ligningerne i 1-D i MOUSE. I det følgende udledes ligningerne ikke, men implementeringen i MOUSE for ledninger med frit vandspejl beskrives. En skitsering af en ledning med frit vandspejl er vist på figur C.3. Saint Venant ligningerne for massebevarelse og momentbevarelse er givet ved formel C.2 og formel C.3. (DHI, 2016a)

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \tag{C.2}$$

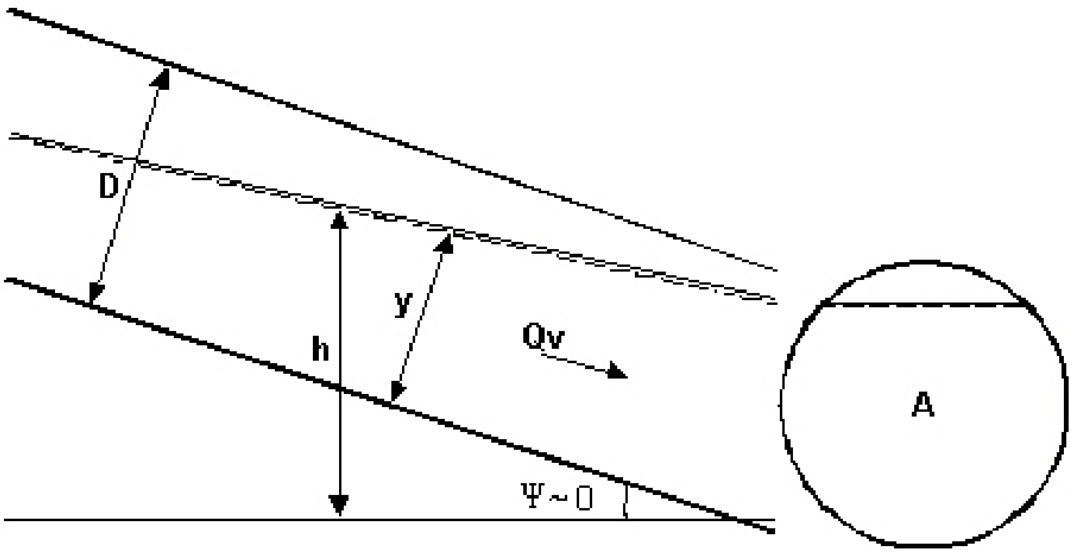
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \frac{Q^2}{A}}{\partial x} + gA\frac{\partial y}{\partial x} + gAI_f = gAI_0 \tag{C.3}$$

Hvor:

Q	Vandføring	$[m^3/s]$
A	Gennemstrømmet areal	$[m^2]$
y	Vanddybde	[m]
g	Tyngdeaccelerationen	$[m/s^2]$
x	Afstand parallelt med vandføringen	[m]
t	Tid	[s]
α	Hastighedskoefficient	$[-]$
I_0	Bundliniegradient	$[-]$
I_f	Energiliniegradient	$[-]$

For at kunne benytte Saint Venant ligningerne, er en række antagelser nødvendige:

- Vandet er usammentrykkeligt og homogent. Altså ingen variation i densitet.
- Bundliniegradient er lav, hvorfor at cosinus til vinklen med vandret antages som værende 1.
- Bølgelængderne er store i forhold til vanddybden. Det betyder at strømningen i alle punkter kan antages, at være parallel med bunden. Altså er der ingen vertikal acceleration, og hydrostatistrykfordeling kan antages.
- Strømningen er sub-kritisk.



Figur C.3: Skitsering af parametre brugt i beregning af ledning med frit vandspejl. (DHI, 2016a)

Men antagelsen om at bundliniegradienten er lav, kan I_0 beskrives som en funktion af vanddybden og vandoverfladegradienten:

$$I_0 = \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \tag{C.4}$$

Momentligningen kan derfor omskrives til:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \frac{Q^2}{A}}{\partial x} + gA\frac{\partial y}{\partial x} = -gAI_f \tag{C.5}$$

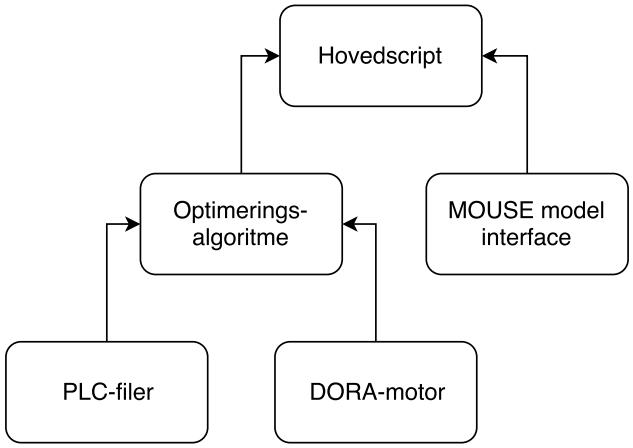
Energinilinegradienten, I_f, beregnes ved brug af Manning formlen. Saint Venant ligningerne løses ved brug af en numerisk finite difference metode. Algoritmen der benyttes til løsningen, er en såkaldt Double Sweep algoritme, som ikke er beskrevet her. Der henvises i stedet til (DHI, 2016a).

D. Interface mellem DORA og MOUSE

Til projektet er der udleveret en udgave af DORA bygget op i Matlab, lavet til at samarbejde med en model opbygget i DHIs WEST software. WEST har en anden måde at opbygge afløbssystemet på, og har en anden måde at konstruere resultatfiler og inputfiler end i MOUSE, der gør at alt kommunikation mellem DORA og modellen er blevet bygget op igen fra bunden, for at kunne hente den nødvendige data og for at kunne sende kommandoer til MOUSE. I det følgende er det beskrevet, hvordan interfacet mellem DORA og MOUSE er opbygget.

D.1 Opbygning af DORA i Matlab

Opbygningen af DORA i Matlab er blevet fastholdt. I den forstand, at den udleverede udgave består af en række filer, der snakker sammen, når modellen kører. Opbygningen er vist i figur D.1.



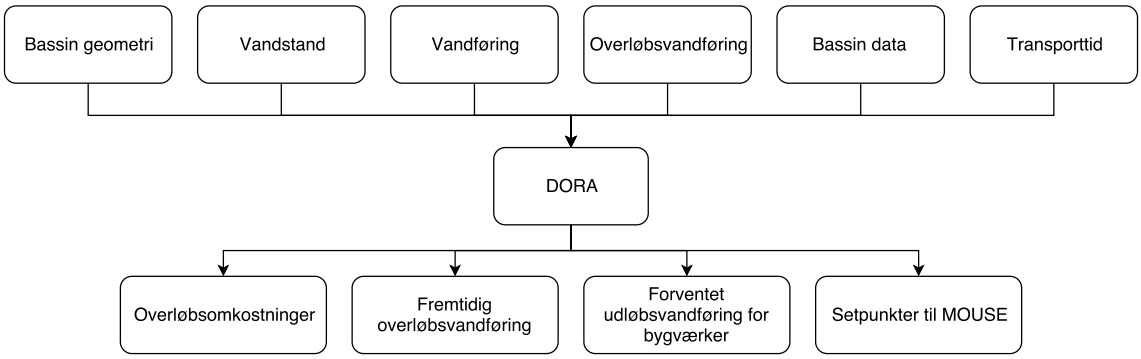
Figur D.1: Opbygningen af DORA i matlab.

- Hovedscriptet er hvor oplandet opbygges i modellen. Bassiner og deres karakteristika defineres, noder og rør hvorfra, der skal udtrækkes data, defineres og bygværker, der skal styres udpeges.
- MOUSE model interface, er hvor alt kommunikation mellem MOUSE og Matlab sker. Det er her hvor MOUSE modellen køres, resultatfiler læses ind og den nødvendige data behandling udføres, for blandt andet at omdanne registrerede vandstande i bassinerne til volumen. Det er også her, at de fundne setpunkter sendes til styringsregulatorerne.
- Optimeringsalgoritmen er hvor de optimale setpunkter findes. Filen indeholder den funktion, der benyttes i den genetiske algoritme. Bassinernes indbyrdes forhold defineres her.
- DORA-motoren kaldes af optimeringsfilen. Det er her 'DORA-beregningerne' foregår. Det vil sige beregning af indløbsvandføring, kritisk volumen og overløbsomkostninger i den forecastede periode.
- PLC-filerne er stand-ins for de PLC, der sidder i bygværkerne i virkeligheden. En PLC programmeres for hvert styringsbygværk. Optimeringsalgoritmen sender et tal mellem 0 og 1 til hver PLC-fil. Her afrundes det tal til nærmest heltal. Det heltal tolkes så som en spjæld indstilling eller pumpe start/stop af PLC-filen ,der sender en forventet udløbsvandføring tilbage til optimeringsalgoritmen. Der bruger udløbsvandføringerne til at lave en massebalance beregning over den forecastede periode, i et forsøg på at finde den optimale kombination af setpunkter. Når den optimale kombination er setpunkter er fundet sender PLC filerne spjæld

indstillinger og pumpe start/stop til hovedscriptet, der sender dem til MOUSE via MOUSE interfacet.

D.2 Opbygning af interface

For hvert styringstidsskridt køres MOUSE-modellen et givent antal minutter. Herefter forecastes et givent tidsrum frem. For at finde den optimale styringsstrategi ud fra den nuværende tilstand i modellen. Da MOUSE resultatfilerne er gemt i et kompileretformat er det ikke muligt at læse dem direkte. For at omdanne resultaterne til et læsbartformat benyttes hjælpeprogrammet m11extra, der kan skrive de ønskede data til tekstfiler, der derved kan læses i Matlab. Input og output fra DORA er vist på figur D.2.



Figur D.2: Input og output fra DORA.

- Bassingeometrien hentes fra MOUSE-database filen. Bassingeometrien bruges til at omregne vandstand i bassinerne, hentet fra resultatfilen, til volumen.
- Indløbsvandføring og overløbsvandføring er også hentet fra resultatfilerne.
- Bassindata dækker over oplandsarealet, bassinvolumen, maksimal udløbsvandføring, bindinger med andre bassiner og overløbsomkostning for bassinet. Bassindata defineres i hovedscriptet.
- Transporttid er transporttiden mellem bassinerne i DORA og er estimeret ud fra vandhastigheden i rørene under tidligere simulerede hændelser. Transporttiden defineres i forbindelse med optimeringsalgoritmen og er konstante.
- Overløbsomkostninger er de forecastede overløbsomkostninger, som DORA forsøger at minimere.
- Fremtidig overløbsvandføring er de overløb, der danner baggrund for beregningen af overløbsomkostninger.
- Forventet udløbsvandføring for bygværker er den udløbsvandføring, der er bestemt for hvert bygværk for at minimere overløbsomkostningerne.
- Setpunkterne tilhørende den ønskede udløbsvandføring sendes til MOUSE, så næste tidsskridt kan simuleres.

Ud fra tilstanden i modellen beregnes optimale setpunkter, der sendes til MOUSE-modellen. Setpunkterne sendes til modellen ved redigering af MOUSE-exportfilen tilhørende modellen. MOUSE-exportfiler indeholder alt den information, der er om modellen i plain text, hvilket gør det nemt at ændre i dem, og det er MOUSE-exportfilen, der er input til MOUSE simuleringsværktøjet, når det kaldes. Det betyder, at ændringer i MOUSE-exportfilen er lig med ændringer i den model, der simuleres. I modellen er kontrol af bassinerne, der skal styres af DORA blevet sat op på den måde, at der i praksis kun er én Control Function til hvert spjæld og pumpe. Control Functions er en del af MOUSEses realtidsstyringsmodul. For et bygværk kan der etableres flere Control Functions,

for eksempel en til pumpe start og en til pumpe stop, hvoraf en af dem af aktiv på baggrund af den målte tilstand i systemet. Den Control Function der er lavet til DORA er konstrueret på en måde således, at den altid er aktiv. Det er så disse Control Functions, der ændres for at åbne og lukke spjæld, og tænde og slukke pumper. For spjæld ændres den kote, som den givne Control Function skal indstille spjældet til, til den kote der ønskes for at spjældet enten er helt åbent eller helt lukket. For pumper ændres startkoten for pumpen. Når pumpen ønskes aktiv ændres startkoten til den normale startkote for pumpen. Når pumpen ønskes inaktiv ændres startkoten til et urealistisk højt tal, der ikke vil kunne opnås. Inden igangsætning af næste tidsskridt ændres starttidspunktet for simuleringen til tiden for det sidste resultat i det nyligt afsluttede tidsskridt, og resultatfilen sættes som hotstartfil til det næste tidsskridt.

I MOUSE er det muligt at benytte LTS-modulet til at formindske simuleringstiden for langtidssimuleringer, da det er muligt at springe tørvejrsperioder over, hvilket giver en betydelig reduktion i beregningstiden. Det er dog ikke muligt at benytte LTS-modulet sammen med hotstartfiler. Derfor er Matlab koden opbygget på en måde hvorved, at den kan udnytte LTS jobliste filer til at starte en hændelse med starttidspunktet for hændelserne i jobliste filen, og så kører DORA simuleringen indtil stoptidspunktet for hændelsen i joblistefilen er overskredet. Når en hændelse er slut gemmes ønskede resultater og Matlabs workspace inden den næste hændelse startes. På den måde kan en lang række hændelser efter hinanden simuleres uden nødvendigt input fra brugeren.

For at formindske beregningstiden er DORA koden blevet paralleliseret, med det formål at kunne flere hændelser på en gang. MOUSE benytter kun én processor kerne til en simulering, uafhængigt af hvor mange kerner computeren der laver beregningen har til rådighed. Det betyder at en computer med en multi-kerne processor ikke udnytter sin regnekraft tilstrækkeligt. Ved at parallelisere processen lokalt på computeren har det været muligt, at simulere fire hændelser ad gangen, fremfor en før. Det formindsker beregningstiden af historiske hændelser betydeligt. Formindskelsen er ikke en faktor fire mindre, da paralleliseringen giver nogle restriktioner i opbygningen af koden, hvilket har betydet at nogle processor har været nød til, at blive konstrueret på en mindre effektiv måde, hvilket gør simuleringen af de enkelte hændelser længere. Forlængelsen af beregningstiden for de enkelte hændelser, er dog minimal i forhold til besparelsen ved parallelisering. For et system der er i drift, og styres i realtid er der ikke nogen gevinst ved at parallelisere koden. Gevinsten er kun tilstede i dette projekt, fordi der fokuseres på analyse af metodens effekt på historiske hændelser.

E. Lokal minimumsanalyse

Den genetiske algoritme i DORA søger efter det globale minimum for overløbsrisikoen i systemet i den tidshorisont, som DORA kigger frem. Det er dog ikke realistisk, at det globale minimum findes hvert tidsskridt. I dette projekt styres på i alt 29 pumper og spjæld, med binære indstillinger. Det giver $2^{29} = 5,4 \cdot 10^8$ unikke kombinationer af pumpe start/stop og spjæld åben/luk. Da DORAs tidshorisont er delt op i tre dele, hvor der findes en pumpe/spjæld indstilling for hver del under hvert tidsskridt. Det betyder at det reelle antal unikke kombinationer, der findes for hvert tidsskridt er $3 \cdot 2^{29} = 1,6 \cdot 10^9$. Med 1,6 milliarder forskellige kombinationer er det ikke sandsynligt, at det globale minimum findes for hvert tidsskridt, men at der er i stedet findes et lokalt minimum. Findes et minima der er minimalt afvigende fra det globale minimum, er der ikke nødvendigvis et problem, da løsningen er tæt på optimal.

I dette appendiks forsøges det at kvantificere hvor store afvigelser, der kan forventes, hvis den samme hændelse køres flere gange med de samme indstillinger og ved forskellige populationer i den genetiske algoritme. Hvilket bør illustrere afvigelsen mellem forskellige lokale minimummer. Dog er antallet af kørsler her begrænset, hvilket betyder, at den totale variabilitet ikke er vist. Der er i analysen brugt fire hændelser, de samme fire der er brugt i følsomhedsanalysen i kapitel 5. Der er brugt to forskellige populationer for den genetiske algoritme. Hver kombination af hændelser og populationer er kørt tre gange. Resultaterne af analysen er vist i tabel E.1.

De valgte populationsstørrelser er 100 og 200. Populationsstørrelserne er valgt på baggrund af Matlab's standard værdier for populationer i en genetisk algoritme. 100 er standard størrelsen for en population, når variablerne er heltal, som det er tilfældet i dette projekt. 200 er standard størrelsen for en population, når variablerne ikke skal være heltal.

Tabel E.1: Forskelle i overløbsvolumen ved simulering af samme hændelse med samme indstillinger.

Hændelse	Kørsel 1	Kørsel 2	Kørsel 3	Maksimal forskel
Population = 100	[m^3]	[m^3]	[m^3]	[%]
1	7220	7183	7113	1,5
2	4485	5312	4701	18,4
3	2093	2229	2135	6,5
4	9232	9385	9272	1,6
Population = 200				
1	7204	7244	7075	2,3
2	5382	5358	5178	3,8
3	2204	2132	2113	4,1
4	8753	8417	8930	6,1

Ved en population på 200, er resultaterne generelt set mere stabile end ved en population på 100. Optimeringerne kan dog ikke generelt set siges at være bedre ved en population på 200 end ved 100. Hændelserne 1 og 3 er meget ens i overløbsvolumen ved begge populationer. Hændelse 4 viser generelt set bedre resultater end ved en højere population. Mærkeligt nok er der generelt set bedre resultater ved en lavere population for hændelse 2. En enkelt at kørslerne der viser en oveløbsvolumen der er meget lig den som er fundet ved den høje population. Grunden til dette er svært at forklare, men skal nok tilskrives 'held' i de to andre kørsler ved den lave population. Der er ikke vurderet nødvendigt at benytte den høje population til videre analyser, da gevinsten ikke er vurderet tilstrækkelig, i forhold til den forhøjede beregningstid. Ud fra analysen kan det konkluderes, at der kan forventes et udsving på op mod 7% i overløbsvolumener, mellem simuleringer af den

samme hændelse, med ens konfigurationer. Dog kan afvigelserne være større for enkelte hændelser. Der skal tages hensyn til dette, når andre resultater analyseres.

F. Analyse af størrelsen af vægtningsparametre

I kapitel 7 er vægtninger for de forskellige overløb bestemt. Da vægtningen skulle laves, så skulle det bestemmes om vægtene skulle laves i trapper af 1-2-3-4 eller med større spring for eksempel 1-2-5-15. Hvor bassinerne hvorfra det ønskes at begrænse overløb, får en relativt større vægt i forhold til de bassiner hvorfra det ønskes at størstedelen af aflastningerne sker. Det ønskes undersøgt om der er en betydelig forskel i fordelingen af aflastningerne, ved brug af en to forskellige vægtninger, med forskellige relativt forskel mellem bassinerne, men hvor de enkelte bassiner er på det samme vægtningstrin i begge simuleringer.

Hændelserne med overløb fra året 2012 er blevet simuleret med begge opsætninger. Der er forskelle i den spatialefordeling af overløbene mellem de to opsætninger. Forskellene er dog ret begrænsede. Der vil være forskelle mellem to simuleringer af de samme hændelser med den samme opsætningen, grundet brugen af en genetisk algoritme, hvilket vurderes at stå for en stor del af den forskel der er melllem de to simuleringer. To bassiner har store forskelle mellem de to opsætninger, men det er to bassiner der står for en lille del af den samlede overløbsvolumen, hvorfor små ændringer i overløbsvolumen vil føre til store procentvise ændringer.

Tabel F.1: Noget her

Bassin	1-2-5-15 [-]	1-2-3-4 [-]	Forskel [%]
Forrens	0,397	0,386	2,6
Saftstationen	0,115	0,124	-8,1
Rebæk	0,065	0,065	0,8
Vonsild	0,026	0,020	2,7
Riberdyb	0,014	0,015	-4,4
Saxovej	0,067	0,066	2,3
Skovlundevej	0,003	0,002	25,8
Holmsminde	0,014	0,015	-3,8
Kedelsmedegangen	0,008	0,008	-7,8
Roklubben	0,032	0,029	9,2
Rugmarken	0,036	0,037	-2,0
Bramdrupdam	0,123	0,132	-7,3
Vester Nebel	0,070	0,062	11,5
Sysselhaven	0,017	0,022	-28,8
Almindhule	0,016	0,015	4,2

G. Tabeller til styring med vægtning

G.1 DORA uden spatialfordeling af regn

G.1.1 Analyse af vægtning baseret på økologisk tilstand

Tabel G.1: Sammenligning af cost i statussituationen og med DORA styring med vægtningen ud fra økologisk tilstand. Negative ændringer angiver hændelser hvor overløbsvolumen er større i statussituationen end med DORA styring. Cost er angivet i DKK.

Nr.	Varighed	Nedbør	Status	u/ forecast	m/ forecast	Ændring u/ forecast		Ændring m/ forecast	
	[T]	[mm]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[%]	[DKK]	[%]
1	6,8	13	4547	6861	4492	2314	51	-54	-1
2	10,7	17	9507	11471	10049	1964	21	542	6
3	3	6,6	20	734	0	714	3630	-20	-100
4	15,3	11,2	80	0	0	-80	-100	-80	-100
5	12,9	17,2	6089	6187	4524	98	2	-1564	-26
6	4	15,2	14311	16652	13178	2341	16	-1133	-8
7	6,7	20,8	24310	27406	28549	3096	13	4240	17
8	6,2	10,6	813	2170	876	1358	167	64	8
9	11,4	18,4	6906	9863	3329	2957	43	-3577	-52
10	5	17,4	6913	11758	8068	4845	70	1154	17
11	3,3	8,6	752	1421	1427	670	89	675	90
12	2,1	14,4	8921	12574	10906	3653	41	1985	22
13	2,4	28,6	62180	60879	64998	-1302	-2	2817	5
14	1,2	13	8583	11339	10307	2756	32	1724	20
15	4,8	11,2	3896	6273	2427	2377	61	-1470	-38
16	6,5	19,6	16990	18176	16172	1186	7	-818	-5
17	10,9	13	1073	1832	732	759	71	-341	-32
18	12,6	34,6	62156	60385	63972	-1771	-3	1816	3
19	3,5	8	100	1930	336	1830	1826	236	236
20	8,1	10,2	151	1341	0	1190	789	-151	-100
21	5,3	9,8	706	1840	967	1134	161	261	37
22	8,9	32	62183	64965	69496	2781	4	7313	12
23	14	16,8	1508	2591	820	1083	72	-688	-46
24	5,4	10	748	1924	891	1175	157	143	19
25	4,5	12	2598	4927	3305	2329	90	707	27
26	14,6	18,2	5649	4146	3228	-1503	-27	-2421	-43
27	5,2	8	175	764	129	589	337	-46	-26
28	8,2	11	829	1805	291	976	118	-538	-65
Sum			312695	352211	323470	39516	13	10775	3
Gennemsnit			11167	12578	11552	1411	13	384	3
Sum vægtede overløb			86368	134806	107274	48438	56	20905	24
Gns. vægtede overløb			3084	4814	3831	1729	56	746	24

G.1.2 Analyse af vægtning baseret på terrænhældning

Tabel G.2: Sammenligning af cost i statussituationen og med DORA styring med vægtningen ud fra økologisk tilstand. Negative ændringer angiver hændelser hvor overløbsvolumen er større i statussituationen end med DORA styring. Cost er angivet i DKK.

Nr.	Varighed	Nedbør	Status	u/ forecast	m/ forecast	Ændring u/ forecast		Ændring m/ forecast	
	[T]	[mm]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[%]	[DKK]	[%]
1	6,8	13,0	6383	7801	6340	1418	22	-43	-1
2	10,7	17,0	12346	12812	12241	466	4	-106	-1
3	3,0	6,6	39	695	0	656	1668	-39	-100
4	15,3	11,2	159	1084	0	924	580	-159	-100
5	12,9	17,2	8941	7873	6424	-1068	-12	-2517	-28
6	4,0	15,2	16461	18132	15023	1671	10	-1438	-9
7	6,7	20,8	27898	30273	30861	2375	9	2963	11
8	6,2	10,6	1623	2673	974	1050	65	-650	-40
9	11,4	18,4	9527	7074	4921	-2453	-26	-4605	-48
10	5,0	17,4	8996	12210	7567	3214	36	-1429	-16
11	3,3	8,6	1013	1785	1404	771	76	391	39
12	2,1	14,4	10270	13163	11877	2893	28	1606	16
13	2,4	28,6	63191	62604	64298	-587	-1	1107	2
14	1,2	13,0	9789	12422	11744	2633	27	1954	20
15	4,8	11,2	4829	5940	3122	1111	23	-1706	-35
16	6,5	19,6	20054	18208	17804	-1846	-9	-2250	-11
17	10,9	13,0	2146	1462	1513	-685	-32	-633	-30
18	12,6	34,6	69855	67662	68625	-2193	-3	-1230	-2
19	3,5	8,0	165	1969	863	1805	1097	699	425
20	8,1	10,2	302	1243	0	942	312	-302	-100
21	5,3	9,8	1412	2426	1216	1014	72	-195	-14
22	8,9	32,0	70242	66067	75453	-4175	-6	5211	7
23	14,0	16,8	2965	2802	1327	-163	-6	-1638	-55
24	5,4	10,0	1497	2777	1472	1281	86	-25	-2
25	4,5	12,0	3785	5780	4390	1996	53	606	16
26	14,6	18,2	8811	5454	4783	-3357	-38	-4028	-46
27	5,2	8,0	349	839	0	490	140	-349	-100
28	8,2	11,0	1659	1891	372	232	14	-1287	-78
Sum			364708	375123	354613	10415	3	-10095	-3
Gennemsnit			13025	13397	12664	371	3	-360	-3
Sum vægtede overløb			188303	212166	180517	23862	13	-7786	-4
Gns. vægtede overløb			6725	7577	6447	852	13	-278	-4

G.1.3 Analyse af vægtning baseret på sikring af badevand

Tabel G.3: Sammenligning af cost i statussituationen og med DORA styring med vægtningen ud fra økologisk tilstand. Negative ændringer angiver hændelser hvor overløbsvolumen er større i statussituationen end med DORA styring. Cost er angivet i DKK.

Nr.	Varighed	Nedbør	Status	u/ forecast	m/ forecast	Ændring u/ forecast		Ændring m/ forecast	
	[T]	[mm]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[%]	[DKK]	[%]
1	6,8	13,0	10958	12772	12477	1813	17	1519	14
2	10,7	17,0	21263	28038	22900	6774	32	1637	8
3	3,0	6,6	10	196	0	186	1893	-10	-100
4	15,3	11,2	40	0	0	-40	-100	-40	-100
5	12,9	17,2	9390	6223	6747	-3166	-34	-2642	-28
6	4,0	15,2	30130	28312	20660	-1818	-6	-9470	-31
7	6,7	20,8	51680	53324	56741	1645	3	5062	10
8	6,2	10,6	406	1742	2077	1336	329	1672	412
9	11,4	18,4	13816	9842	5466	-3973	-29	-8350	-60
10	5,0	17,4	10383	18000	14347	7618	73	3965	38
11	3,3	8,6	253	692	1174	439	173	920	363
12	2,1	14,4	13805	13806	12063	1	0	-1742	-13
13	2,4	28,6	97072	85335	87753	-11737	-12	-9319	-10
14	1,2	13,0	8502	13495	10747	4993	59	2246	26
15	4,8	11,2	7996	5809	1947	-2188	-27	-6049	-76
16	6,5	19,6	36179	28896	31527	-7283	-20	-4652	-13
17	10,9	13,0	537	310	1093	-226	-42	556	104
18	12,6	34,6	127180	101927	99690	-25253	-20	-27490	-22
19	3,5	8,0	41	618	260	577	1402	219	532
20	8,1	10,2	75	670	2	595	788	-73	-97
21	5,3	9,8	353	1678	2206	1325	375	1853	525
22	8,9	32,0	134077	123958	129757	-10119	-8	-4320	-3
23	14,0	16,8	741	1764	280	1023	138	-461	-62
24	5,4	10,0	374	3479	2954	3105	830	2580	690
25	4,5	12,0	4190	8898	8737	4707	112	4547	109
26	14,6	18,2	11531	5662	4997	-5868	-51	-6534	-57
27	5,2	8,0	87	516	1012	429	491	925	1059
28	8,2	11,0	415	3070	233	2656	640	-181	-44
Sum			591484	559033	537851	-32451	-5	-53633	-9
Gennemsnit			21124	19965	19208	-1158	-5	-1915	-9
Sum vægtede overløb			540309	493757	487324	-46552	-9	-52985	-10
Gns. vægtede overløb			19296	17634	17404	-1662	-9	-1892	-10

G.2 DORA med spatialfordeling af regn

G.2.1 Analyse af vægtning baseret på økologisk tilstand

Tabel G.4: Sammenligning af cost i statussituationen og med DORA styring med vægtningen ud fra økologisk tilstand. Negative ændringer angiver hændelser hvor overløbsvolumen er større i statussituationen end med DORA styring. Cost er angivet i DKK.

Nr.	Varighed	Nedbør	Status	u/ forecast	m/ forecast	Ændring u/ forecast		Ændring m/ forecast	
	[T]	[mm]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[%]	[DKK]	[%]
1	6,8	4,8	0	0	0	0	0	0	0
2	10,7	16,7	0	0	0	0	0	0	0
3	3	6,2	0	0	0	0	0	0	0
4	15,3	6,1	0	0	0	0	0	0	0
5	12,9	15,4	1940	2824	1960	884	46	20	1
6	4	13,0	12547	14257	10375	1710	14	-2173	-17
7	6,7	19,1	22937	25604	25471	2667	12	2534	11
8	6,2	11,2	585	1248	202	663	113	-382	-65
9	11,4	18,2	8632	9470	5045	838	10	-3587	-42
10	5	17,7	8526	10869	8540	2343	27	14	0
11	3,3	11,1	1019	1435	1262	416	41	243	24
12	2,1	11,2	9502	12614	9734	3112	33	231	2
13	2,4	25,8	59398	57331	58545	-2067	-3	-853	-1
14	1,2	12,7	11600	13513	12484	1913	16	885	8
15	4,8	10,4	0	0	0	0	0	0	0
16	6,5	15,1	5927	7599	5522	1672	28	-405	-7
17	10,9	11,7	400	715	755	315	79	354	89
18	12,6	23,2	25642	24314	23435	-1328	-5	-2206	-9
19	3,5	7,2	0	0	0	0	0	0	0
20	8,1	10,3	66	369	0	302	456	-66	-100
21	5,3	7,0	0	0	0	0	0	0	0
22	8,9	21,2	24785	23254	23344	-1531	-6	-1442	-6
23	14	10,0	0	0	0	0	0	0	0
24	5,4	10,8	975	2452	1575	1477	151	600	62
25	4,5	11,8	3976	5456	3134	1480	37	-842	-21
26	14,6	18,0	5945	4281	2922	-1665	-28	-3023	-51
27	5,2	8,1	288	243	28	-45	-16	-259	-90
28	8,2	9,6	0	0	0	0	0	0	0
Sum			229255	243988	217654	14734	6	-11600	-5
Gennemsnit			8187	8713	7773	526	6	-414	-5
Sum vægtede overløb			65005	94062	71727	29057	45	6722	10
Gns. vægtede overløb			2321	3359	2561	1037	45	240	10

G.2.2 Analyse af vægtning baseret på terrænhældning

Tabel G.5: Sammenligning af cost i statussituationen og med DORA styring med vægtningen ud fra økologisk tilstand. Negative ændringer angiver hændelser hvor overløbsvolumen er større i statussituationen end med DORA styring. Cost er angivet i DKK.

Nr.	Varighed	Nedbør	Status	u/ forecast	m/ forecast	Ændring u/ forecast		Ændring m/ forecast	
	[T]	[mm]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[%]	[DKK]	[%]
1	6,8	4,8	0	0	0	0	0	0	0
2	10,7	16,7	0	0	0	0	0	0	0
3	3,0	6,2	0	0	0	0	0	0	0
4	15,3	6,1	0	0	0	0	0	0	0
5	12,9	15,4	3498	3570	2173	73	2	-1398	-38
6	4,0	13,0	13865	15738	11162	1873	14	-4576	-19
7	6,7	19,1	26173	28559	28703	2386	9	144	10
8	6,2	11,2	1169	491	446	-678	-58	-45	-62
9	11,4	18,2	10894	11810	6255	916	8	-5555	-43
10	5,0	17,7	10206	12083	9600	1878	18	-2483	-6
11	3,3	11,1	1467	1729	1402	262	18	-327	-4
12	2,1	11,2	11010	14975	11892	3965	36	-3083	8
13	2,4	25,8	59404	57034	57866	-2370	-4	832	-3
14	1,2	12,7	13350	14926	13554	1576	12	-1372	2
15	4,8	10,4	0	0	0	0	0	0	0
16	6,5	15,1	7314	9362	5988	2048	28	-3374	-18
17	10,9	11,7	800	1075	780	274	34	-295	-3
18	12,6	23,2	26779	23634	24327	-3145	-12	694	-9
19	3,5	7,2	0	0	0	0	0	0	0
20	8,1	10,3	133	2	0	-131	-99	-2	-100
21	5,3	7,0	0	0	0	0	0	0	0
22	8,9	21,2	26407	22480	24391	-3926	-15	1911	-8
23	14,0	10,0	0	0	0	0	0	0	0
24	5,4	10,8	1950	3632	2088	1682	86	-1544	7
25	4,5	11,8	6779	6194	4161	-585	-9	-2033	-39
26	14,6	18,0	9598	6316	4301	-3282	-34	-2015	-55
27	5,2	8,1	576	1004	0	428	74	-1004	-100
28	8,2	9,6	0	0	0	0	0	0	0
Sum			259137	262769	234180	3631	1	-24956	-10
Gennemsnit			9254	9384	8363	130	1	-891	-10
Sum vægtede overløb			129578	141295	111221	11716	9	-18357	-14
Gns. vægtede overløb			4628	5046	3972	418	9	-656	-14

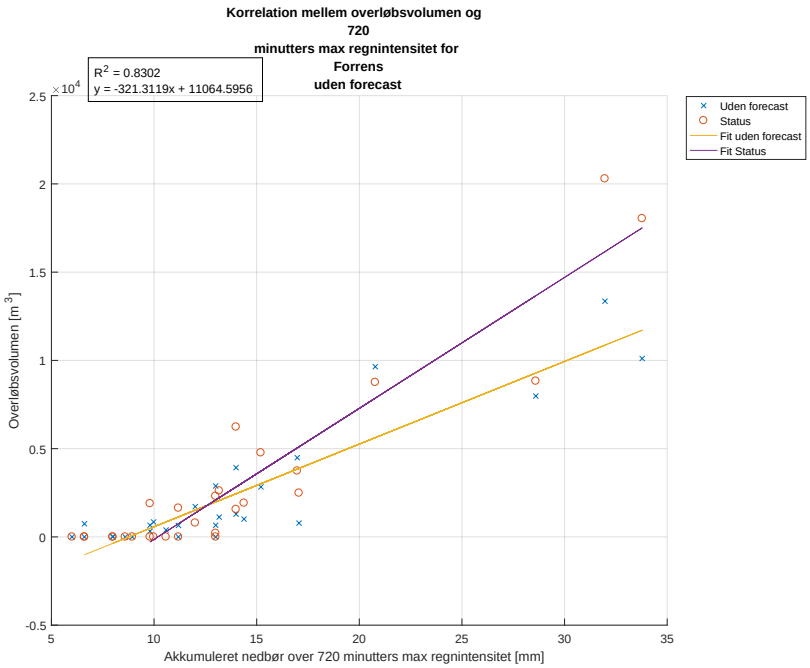
G.2.3 Analyse af vægtning baseret på sikring af badevand

Tabel G.6: Sammenligning af cost i statussituationen og med DORA styring med vægtningen ud fra økologisk tilstand. Negative ændringer angiver hændelser hvor overløbsvolumen er større i statussituationen end med DORA styring. Cost er angivet i DKK.

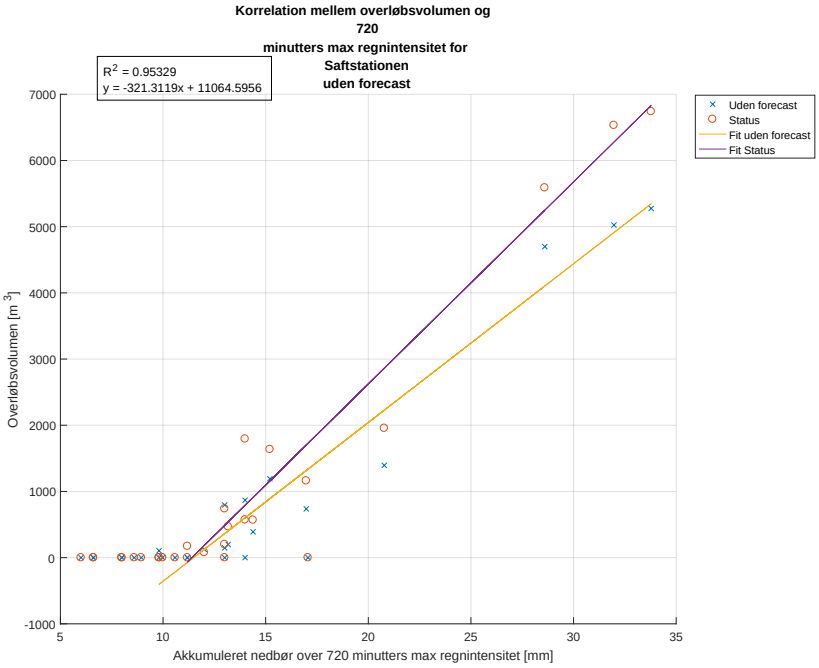
Nr.	Varighed	Nedbør	Status	u/ forecast	m/ forecast	Ændring u/ forecast		Ændring m/ forecast	
	[T]	[mm]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[DKK]	[%]	[DKK]	[%]
1	6,8	4,8	0	0	0	0	0	0	0
2	10,7	16,7	0	0	0	0	0	0	0
3	3,0	6,2	0	0	0	0	0	0	0
4	15,3	6,1	0	0	0	0	0	0	0
5	12,9	15,4	1824	5951	3511	4127	226	1688	93
6	4,0	13,0	28829	28880	19092	51	0	-9738	-34
7	6,7	19,1	49794	50023	53175	229	0	3381	7
8	6,2	11,2	292	899	582	607	208	289	99
9	11,4	18,2	14825	22787	9427	7962	54	-5398	-36
10	5,0	17,7	14761	16771	15307	2010	14	547	4
11	3,3	11,1	367	926	816	559	152	449	122
12	2,1	11,2	10711	9878	10900	-833	-8	189	2
13	2,4	25,8	95802	83864	85676	-11938	-12	-10126	-11
14	1,2	12,7	8237	11873	9186	3636	44	949	12
15	4,8	10,4	0	0	93	0	0	93	0
16	6,5	15,1	12150	18772	14449	6623	55	2300	19
17	10,9	11,7	200	3978	2472	3778	1888	2272	1136
18	12,6	23,2	67393	56430	66752	-10963	-16	-641	-1
19	3,5	7,2	0	0	0	0	0	0	0
20	8,1	10,3	33	8	0	-25	-75	-33	-100
21	5,3	7,0	0	0	0	0	0	0	0
22	8,9	21,2	65054	53147	69019	-11907	-18	3965	6
23	14,0	10,0	0	0	0	0	0	0	0
24	5,4	10,8	487	2778	3462	2290	470	2974	610
25	4,5	11,8	8358	10764	7744	2406	29	-615	-7
26	14,6	18,0	10998	9602	7771	-1396	-13	-3227	-29
27	5,2	8,1	144	94	0	-49	-34	-144	-100
28	8,2	9,6	0	0	0	0	0	0	0
Sum			437092	433916	424967	-3175	-1	-12124	-3
Gennemsnit			15610	15497	15177	-113	-1	-433	-3
Sum vægtede overløb			401498	391236	394021	-10262	-3	-7478	-2
Gns. vægtede overløb			14339	13972	14072	-366	-3	-267	-2

H. Korrelation mellem overløbsvolumen per bassin og regnin

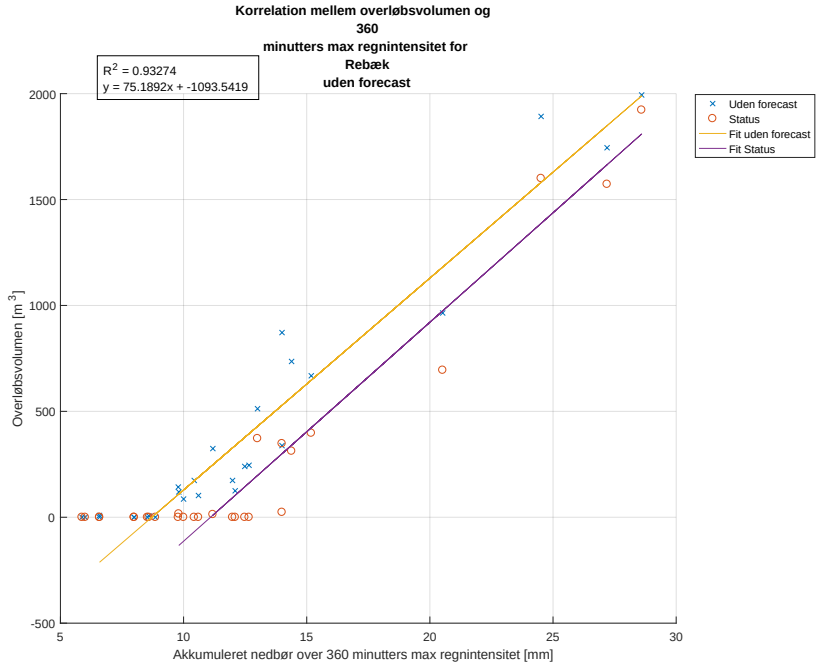
H.1 Uden forecast



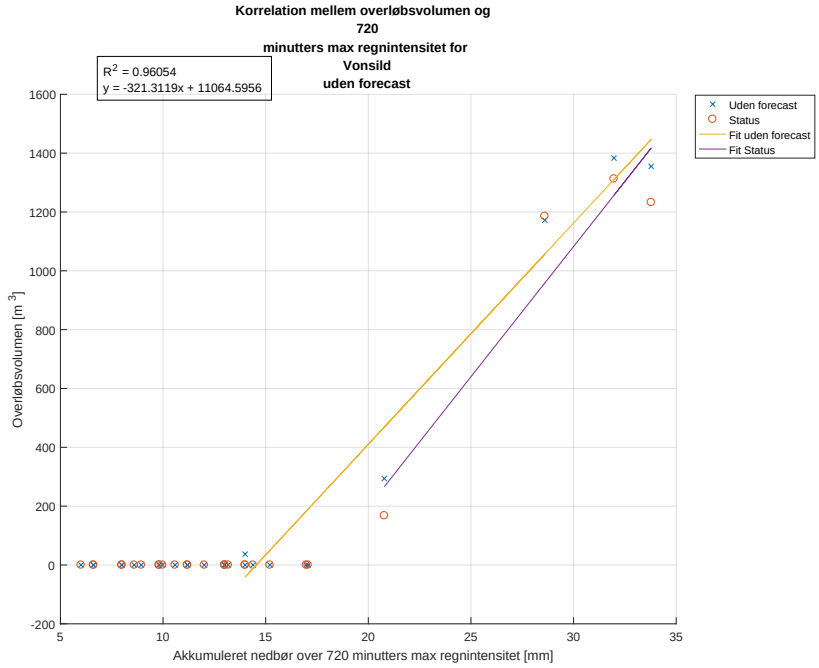
Figur H.1: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Forrens og regnintensitet for 720 minutters varighed.



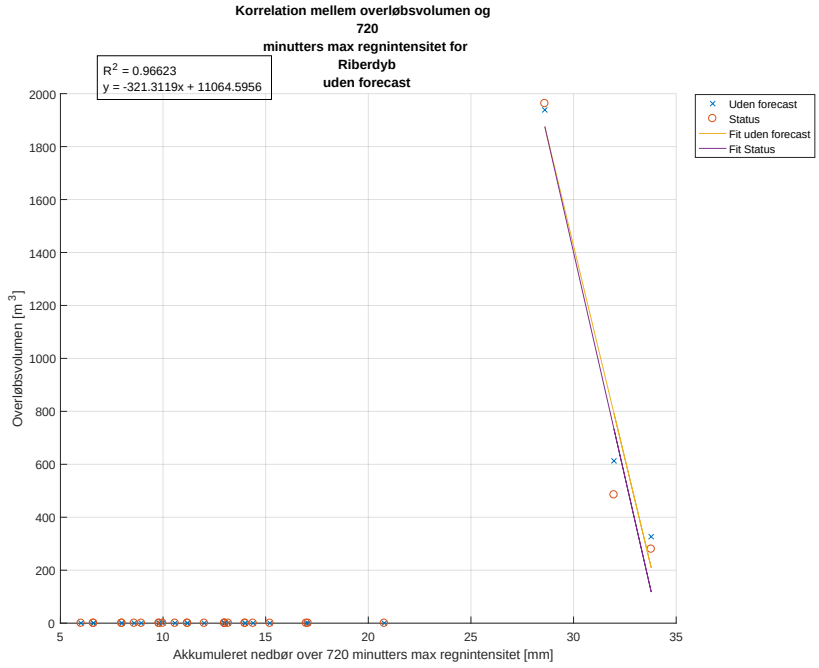
Figur H.2: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Saftstationen og regnintensitet for 720 minutters varighed.



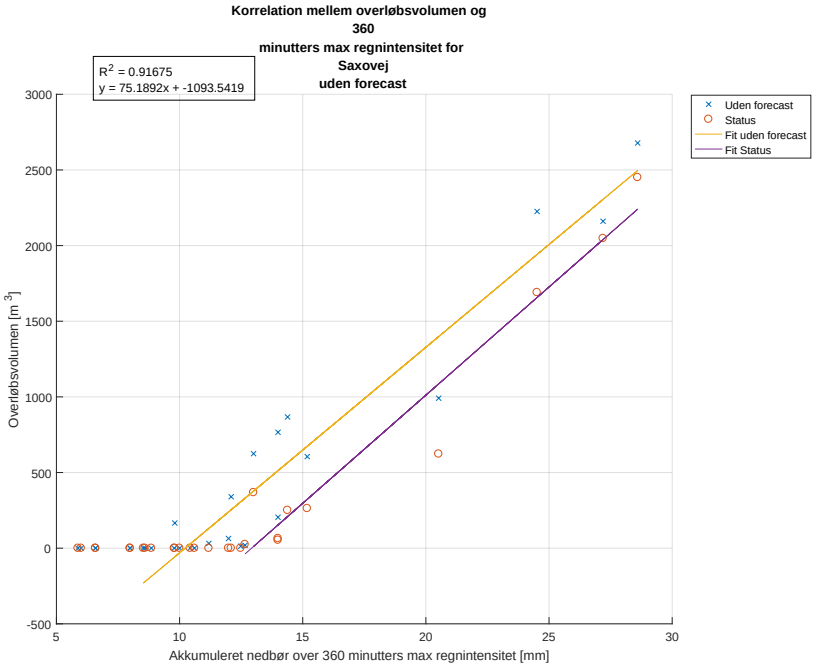
Figur H.3: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Rebæk og regnintensitet for 360 minutters varighed.



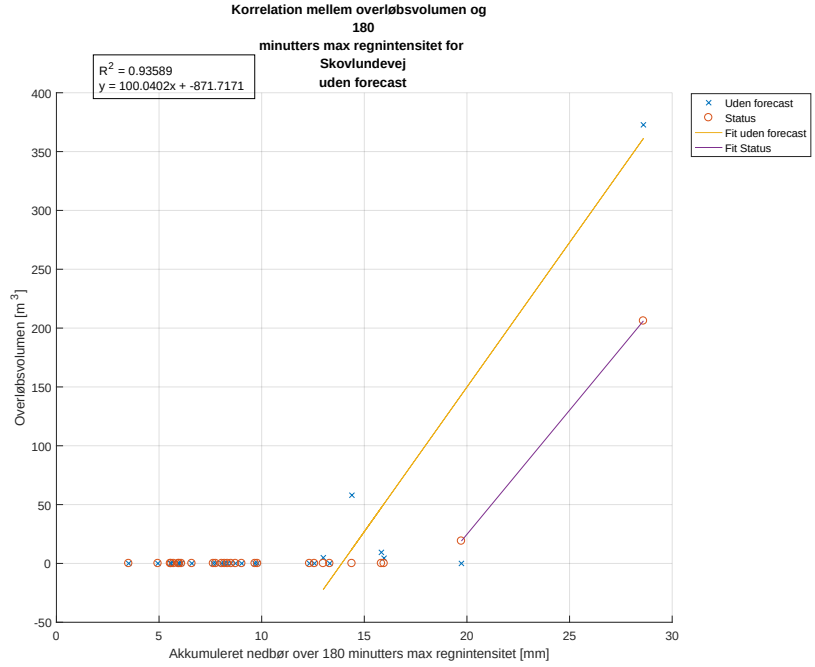
Figur H.4: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Vonsild og regnintensitet for 720 minutters varighed.



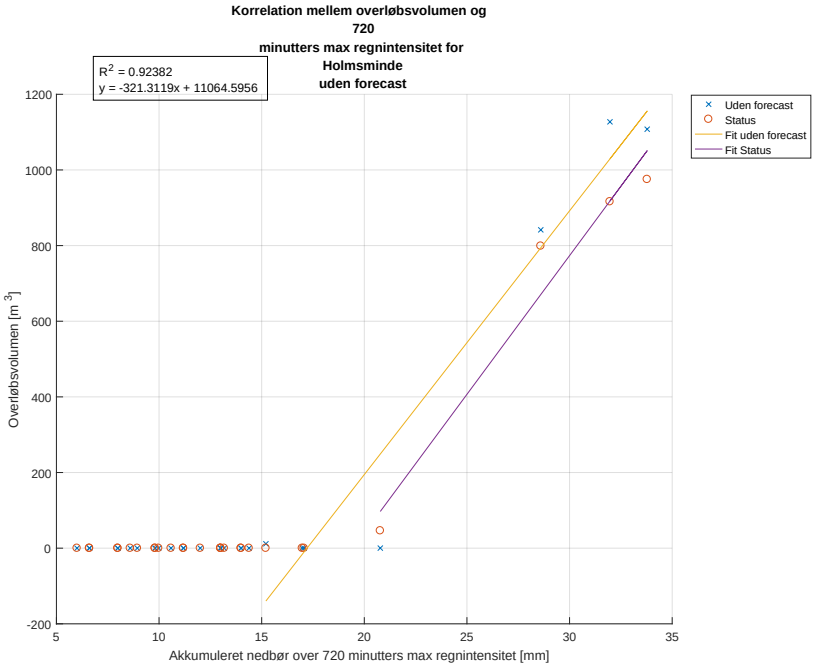
Figur H.5: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Riberdyb og regnintensitet for 1 minutters varighed.



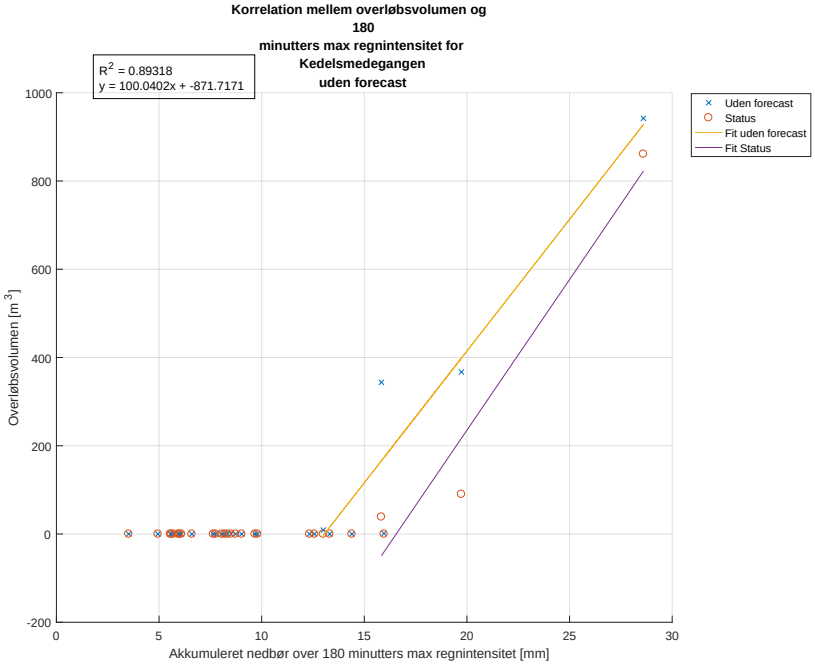
Figur H.6: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Saxovej og regnintensitet for 360 minutters varighed.



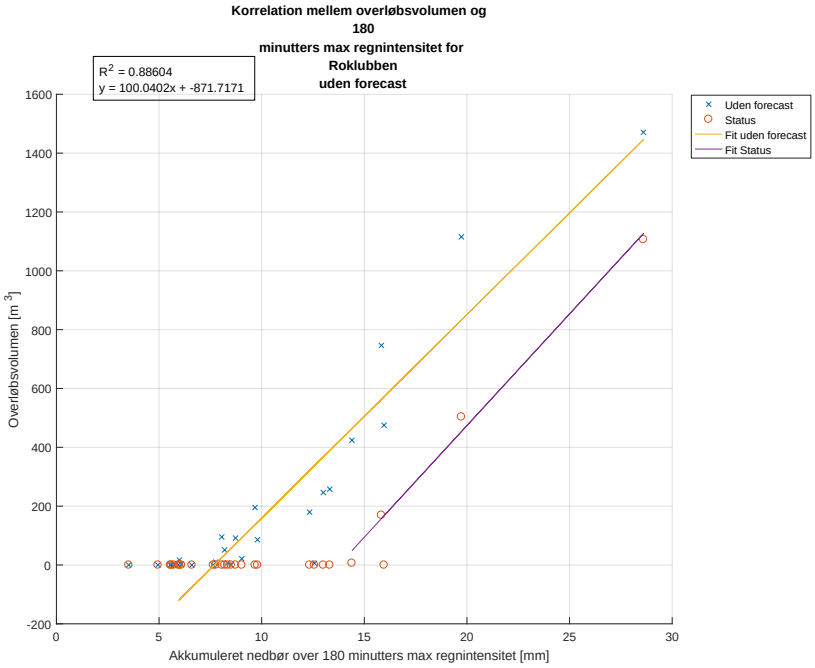
Figur H.7: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Skovlundevej og regnintensitet for 180 minutters varighed.



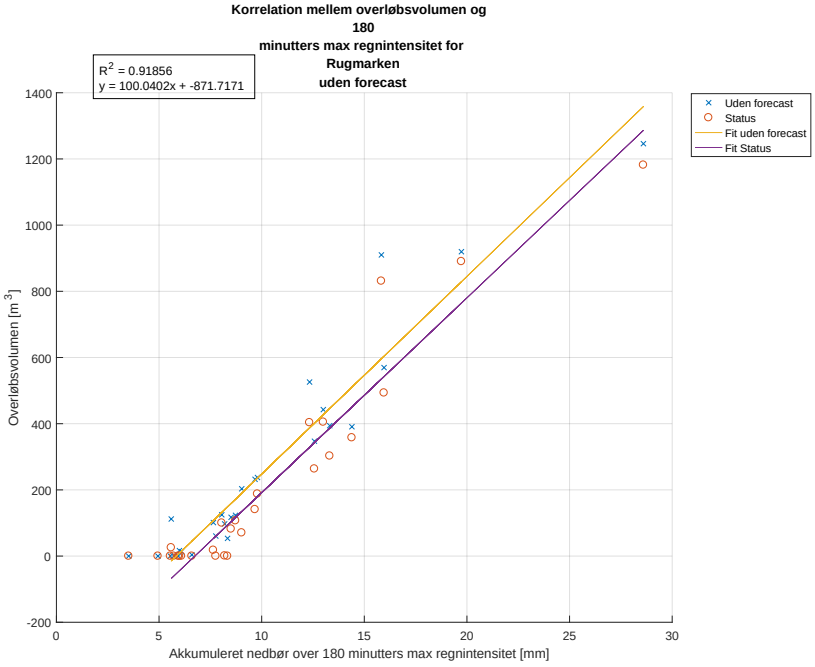
Figur H.8: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Holmsminde og regnintensitet for 720 minutters varighed.



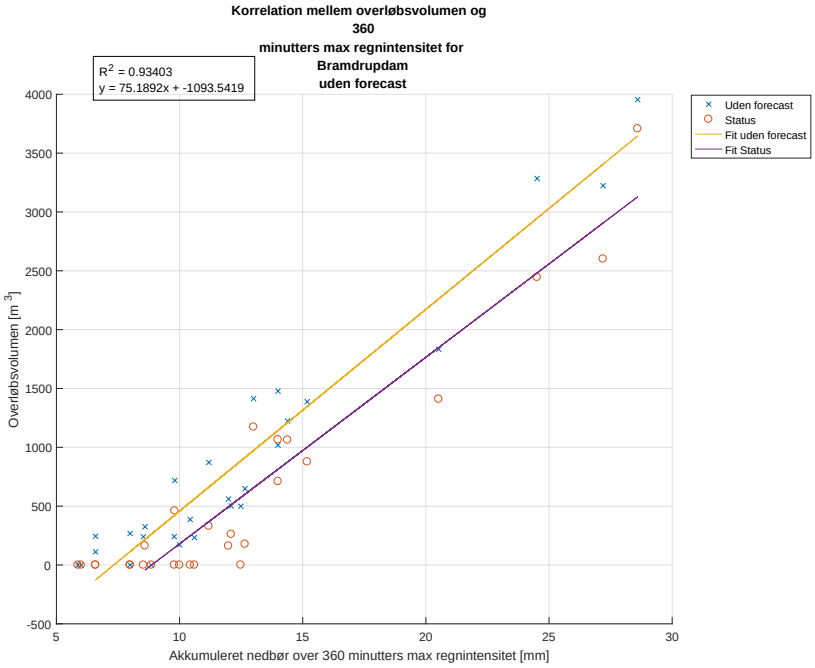
Figur H.9: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Kedelsmedegangen og regnintensitet for 180 minutters varighed.



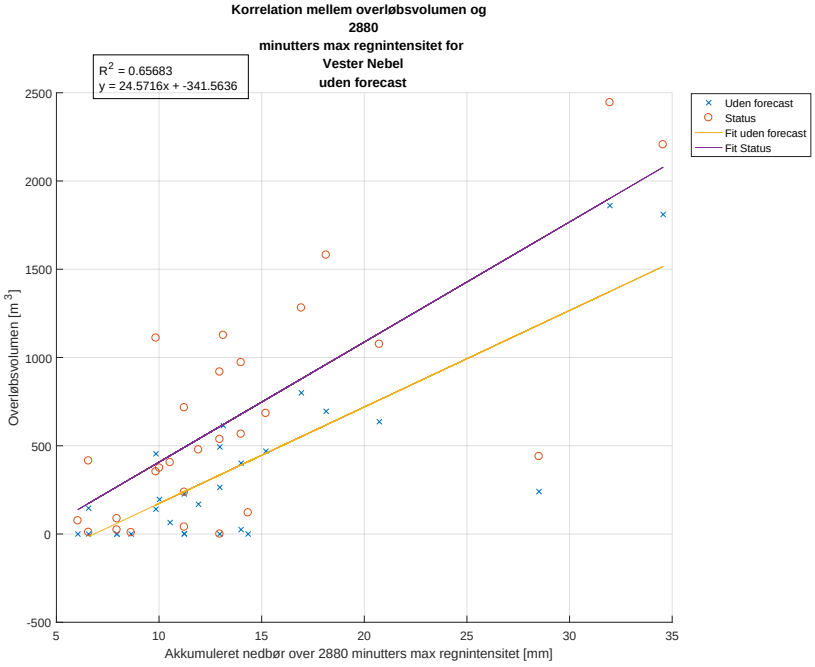
Figur H.10: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Roklubben og regnintensitet for 180 minutters varighed.



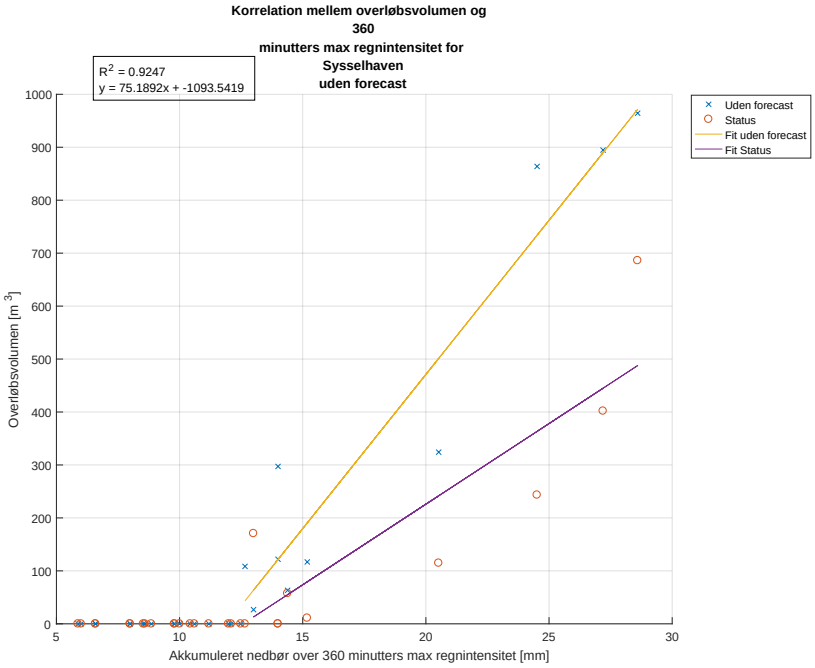
Figur H.11: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Rugmarken og regnintensitet for 180 minutters varighed.



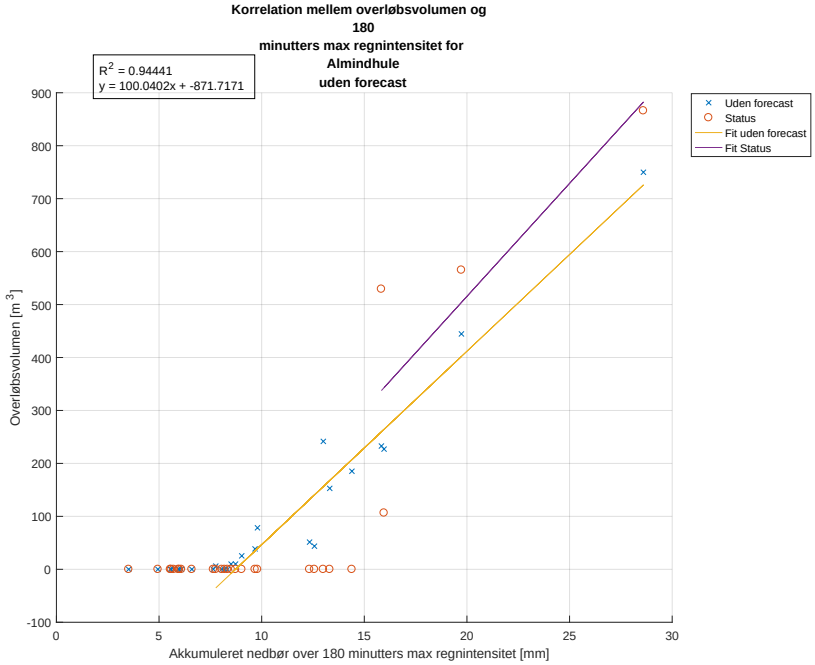
Figur H.12: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Bramdrupdam og regnintensitet for 360 minutters varighed.



Figur H.13: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Vester Nebel og regnintensitet for 2880 minutters varighed.

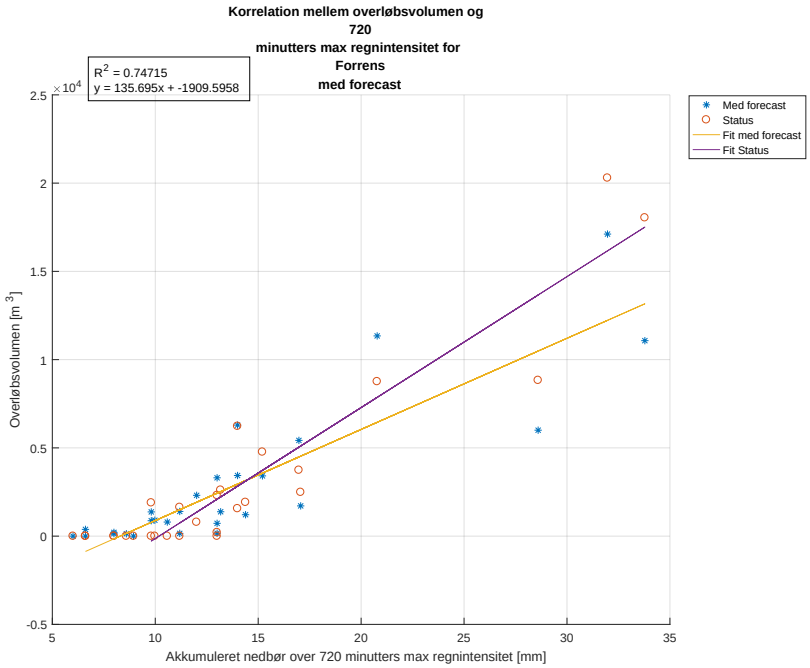


Figur H.14: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Sysselhaven og regnintensitet for 360 minutters varighed.

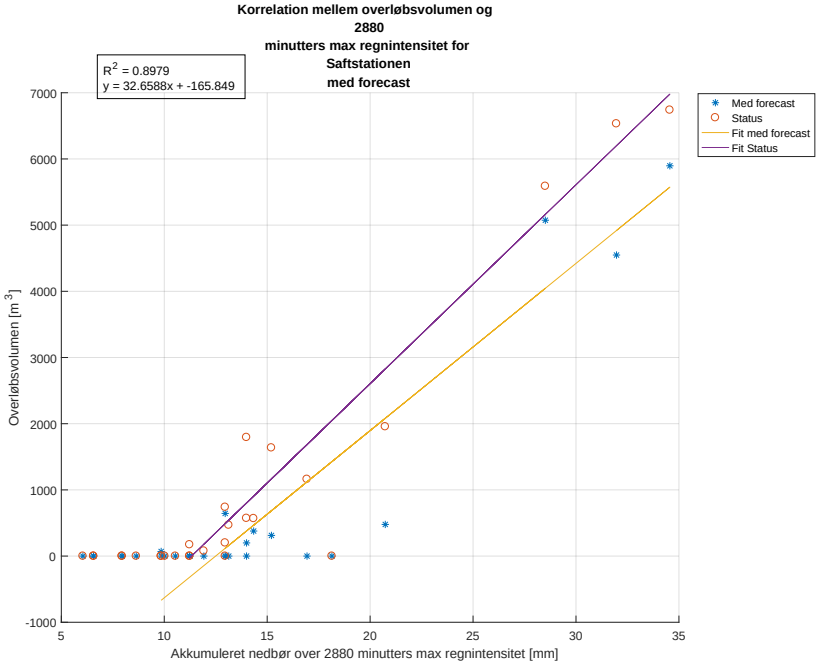


Figur H.15: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Almindhule og regnintensitet for 360 minutters varighed.

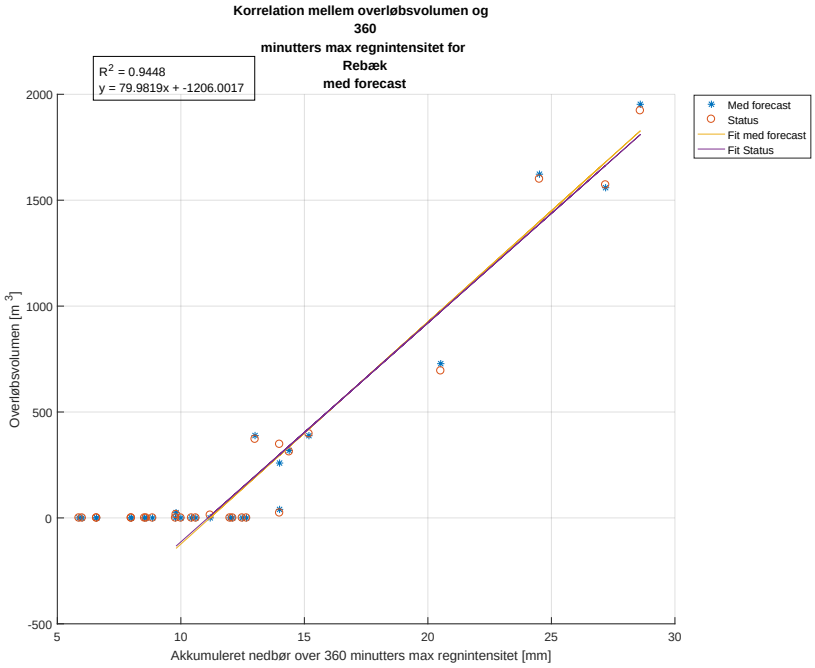
H.2 Med forecast



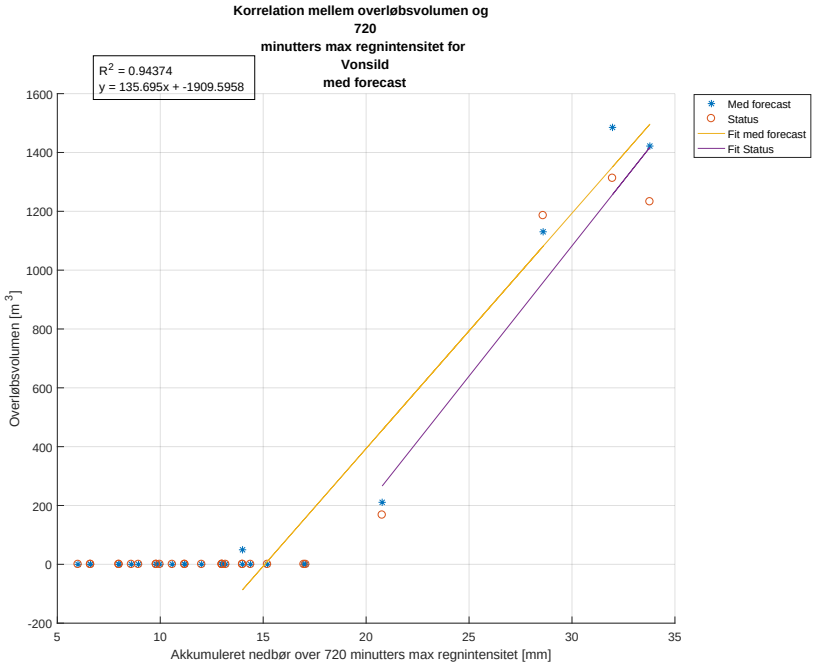
Figur H.16: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Forrens og regnintensitet for 720 minutters varighed.



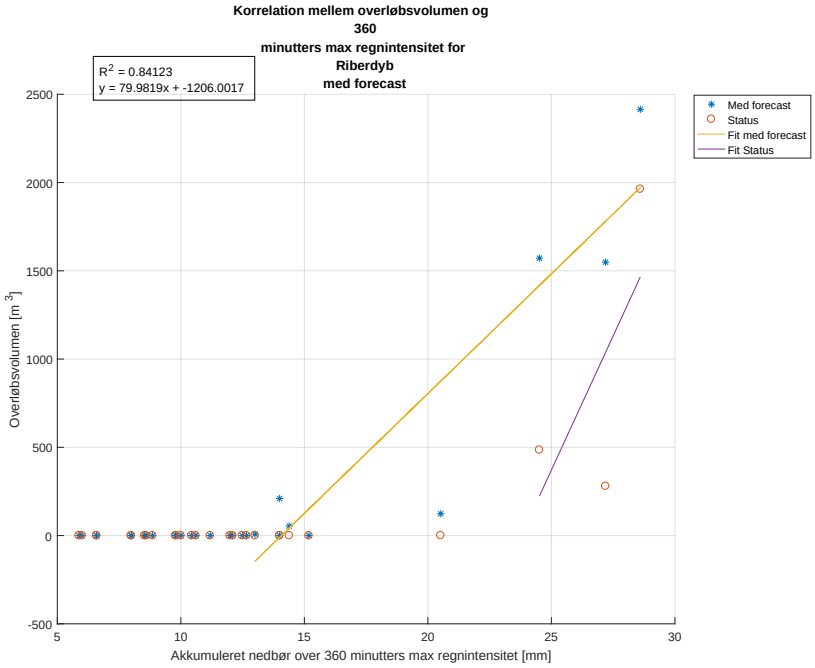
Figur H.17: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Saftstationen og regnintensitet for 2880 minutters varighed.



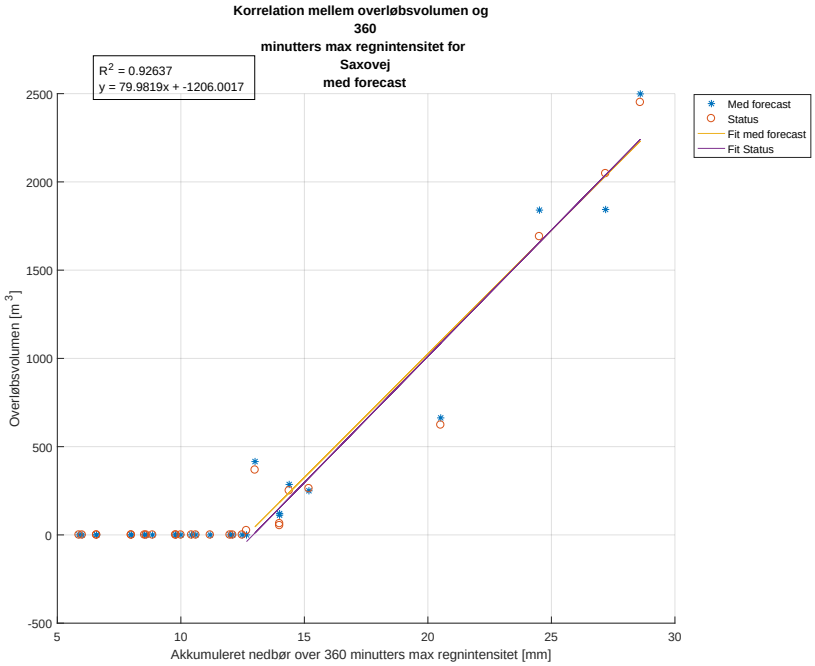
Figur H.18: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Rebæk og regnintensitet for 360 minutters varighed.



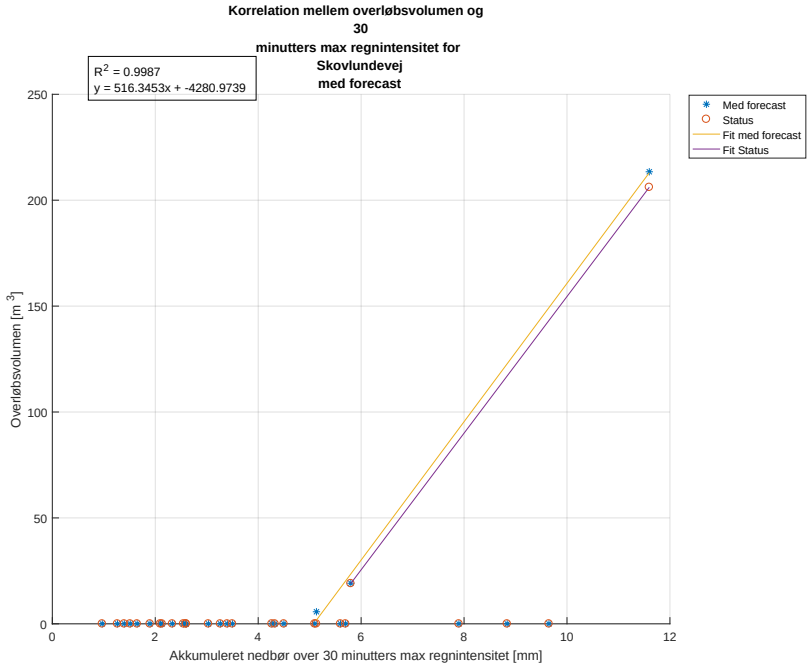
Figur H.19: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Vonsild og regnintensitet for 720 minutters varighed.



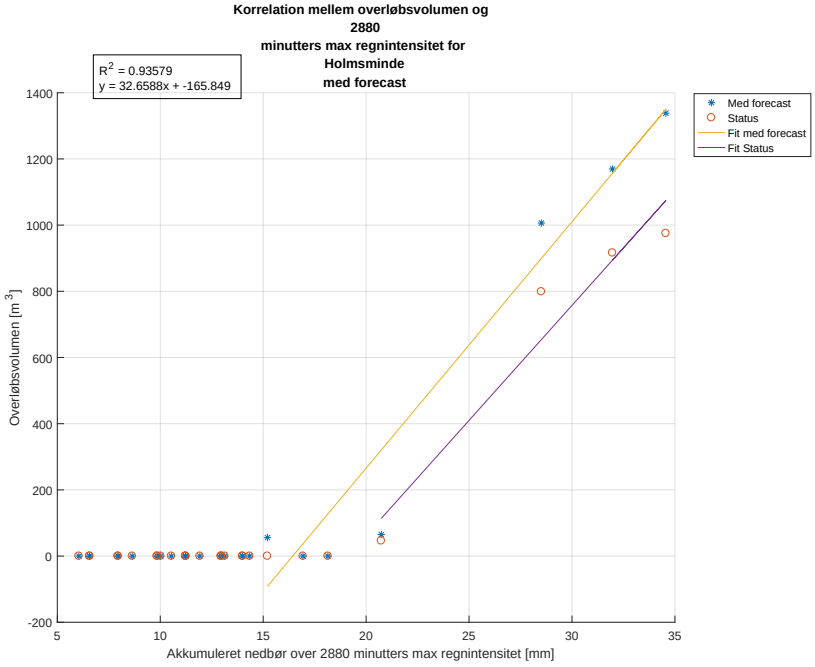
Figur H.20: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Riberdyb og regnintensitet for 360 minutters varighed.



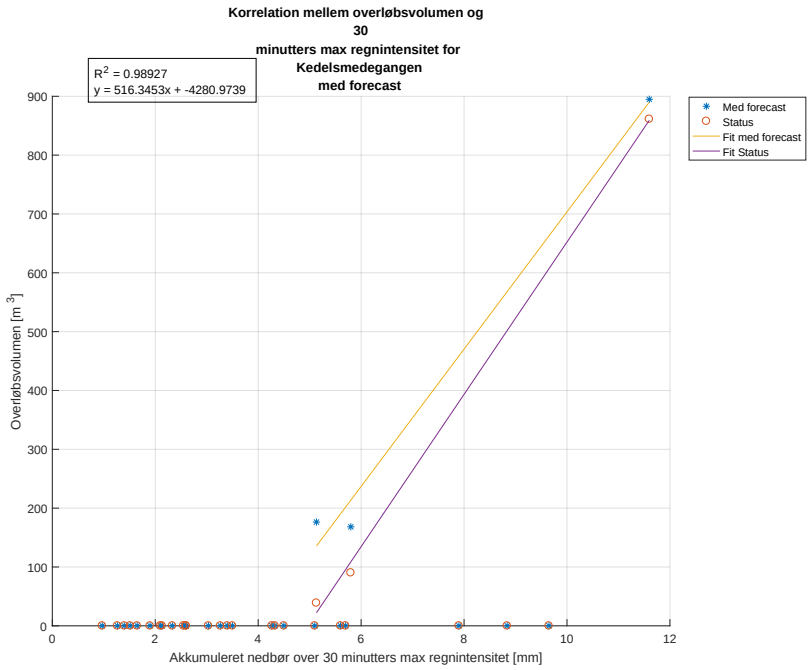
Figur H.21: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Saxovej og regnintensitet for 360 minutters varighed.



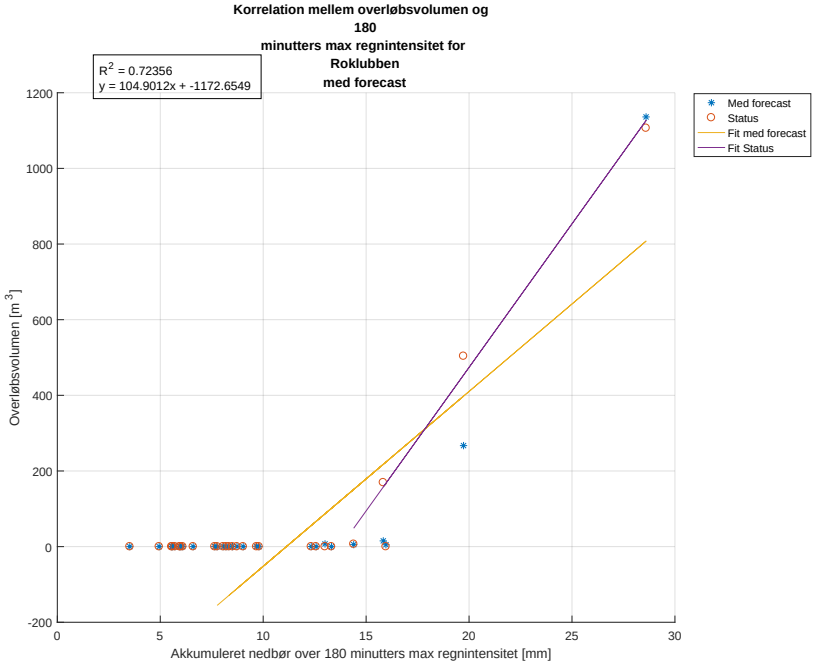
Figur H.22: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Skovlundevej og regnintensitet for 30 minutters varighed.



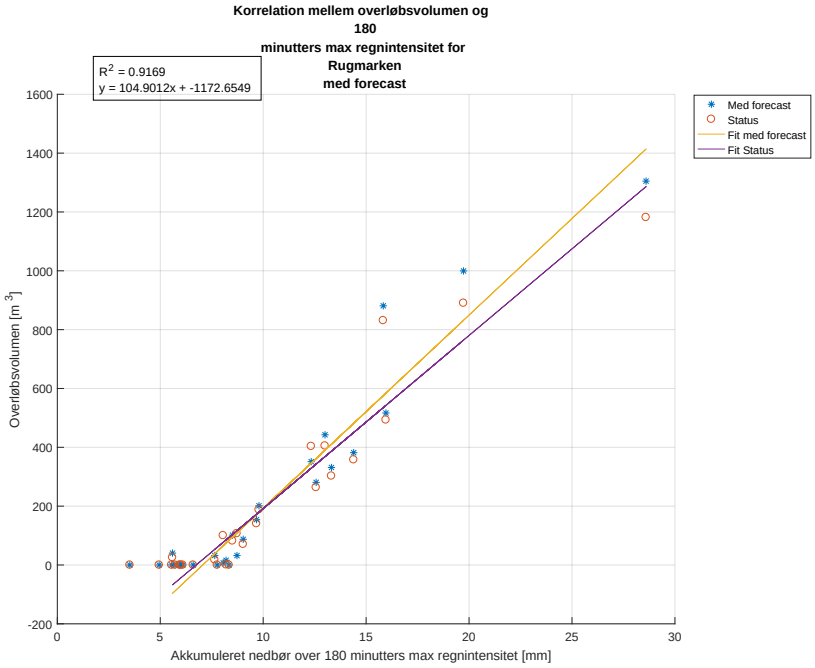
Figur H.23: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Holmsminde og regnintensitet for 2880 minutters varighed.



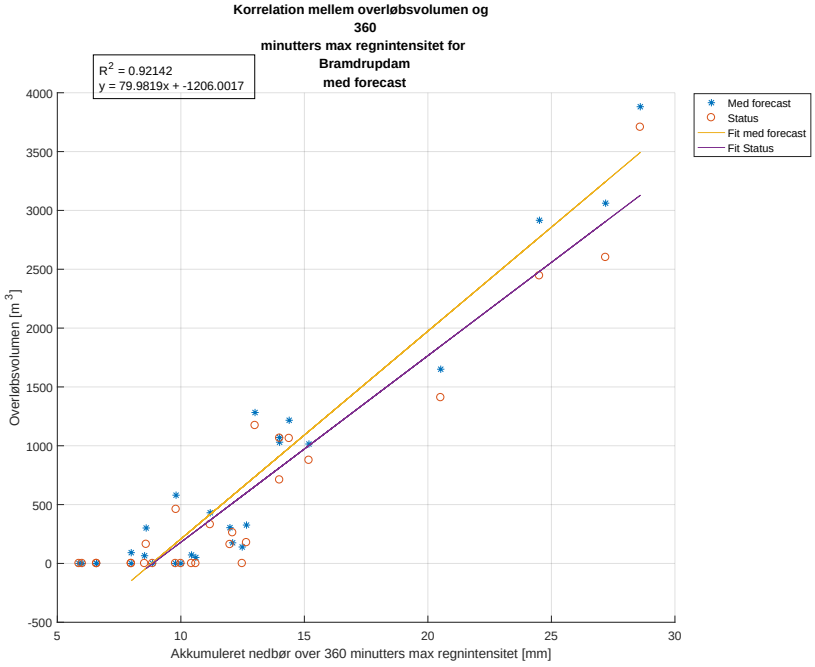
Figur H.24: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Kedelsmedegangen og regnintensitet for 1 minutters varighed.



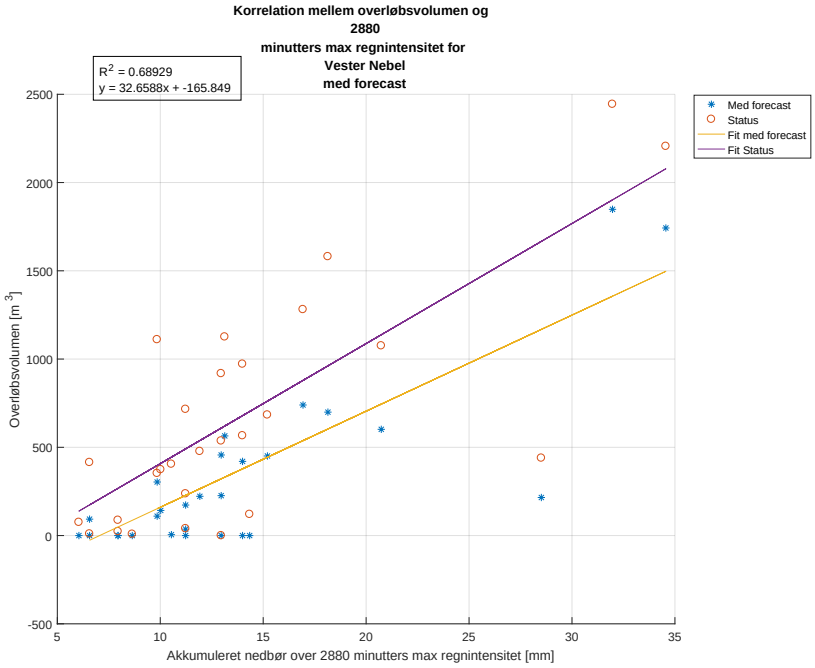
Figur H.25: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Roklubben og regnintensitet for 180 minutters varighed.



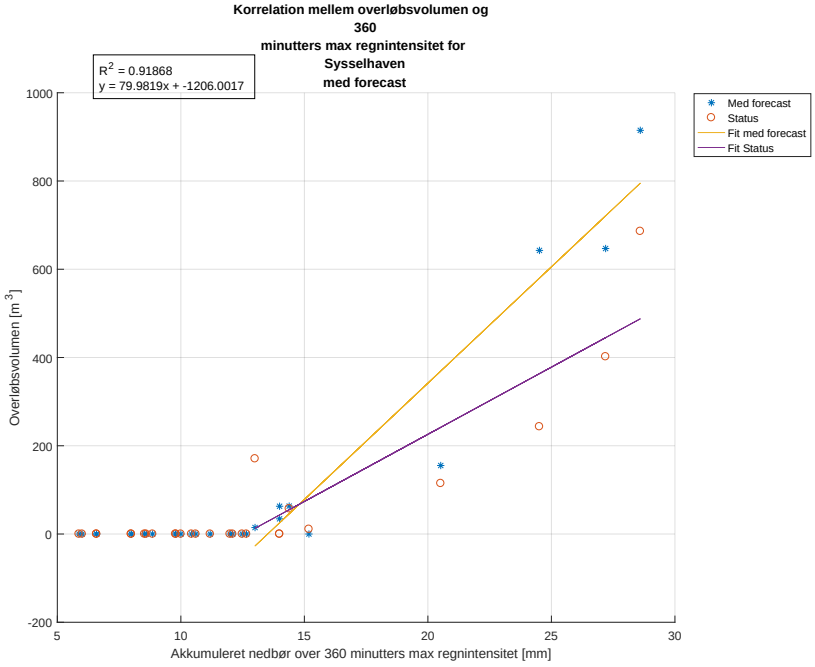
Figur H.26: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Rugmarken og regnintensitet for 180 minutters varighed.



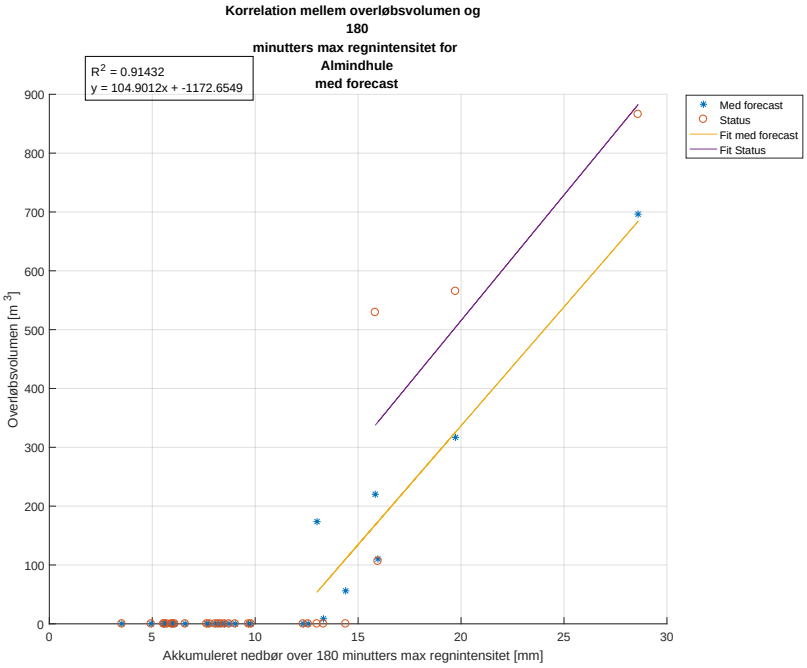
Figur H.27: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Bramdrupdam og regnintensitet for 360 minutters varighed.



Figur H.28: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Vester Nebel og regnintensitet for 2880 minutters varighed.



Figur H.29: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Sysselhaven og regnintensitet for 360 minutters varighed.



Figur H.30: Korrelation mellem overløbsvolumen fra Almindhule og regnintensitet for 180 minutters varighed.