



Miljø- og  
Fødevareministeriet  
Miljøstyrelsen

# SMART Vand Vejle

MUDP-rapport

Oktober 2018

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion: DHI v/ Morten Rungø

ISBN: 978-87-93710-89-4

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

# Indhold

<b>1.</b>	<b>Sammenfatning</b>	<b>5</b>
1.1	Introduktion til SMART Vand Vejle	5
1.2	Baggrund for projektet	5
1.3	Projektbeskrivelse	6
1.4	Projektgennemførelse	6
1.5	Projektformidling	6
<b>2.</b>	<b>Arbejdspakke 1: Modeludvikling</b>	<b>8</b>
2.1	Aktivitet 1.1 - Udvikling af integreret oplandsmodel for Vejle Å, Grejs Å og Omløbsåen	8
2.2	Aktivitet 1.2 - Operationalisering af eksisterende MIKE URBAN model til realtidsbrug	10
2.3	Aktivitet 1.3 - Kobling af MIKE URBAN data med den integrerede oplandsmodel	11
<b>3.</b>	<b>Arbejdspakke 2: Udvikling af realtids softwareplatform</b>	<b>13</b>
3.1	Aktivitet 2.1 - Installation af MIKE CUSTOMISED software	13
3.2	Aktivitet 2.2 - Konfiguration af operationelle modeller til realtidsoperation og automatisk eksekvering	14
3.3	Aktivitet 2.3 - Udvikling af data valideringsrutiner til kvalitetssikring af data	14
3.4	Aktivitet 2.4 - Opsætning af overblikrapporter	14
3.5	Aktivitet 2.5 - Udvikling af Nødstyringsmodul, Basisstyringsmodul og Avanceret styringsmodul	16
<b>4.</b>	<b>Arbejdspakke 3: Probabilistisk ensemble prognose af nedbør</b>	<b>21</b>
4.1	Aktivitet 3.1 - Etablering af realtidsradarmåling og nowcast af nedbør baseret på Verring vejrradar	21
4.2	Aktivitet 3.2 - Geolokalisering, kvalitetssikring og oprensning af vejrradardata for ikke-meteorologiske signaler	22
4.3	Aktivitet 3.3 – IT-plattform til levering af nowcast til DHI til videre hydrologisk og hydraulisk modellering	23
4.4	Aktivitet 3.4 - Etablering af datakommunikation for opsamling af data fra regnmålere samt etablering af nyt laser disdrometer	23
4.5	Aktivitet 3.5 - Online kalibrering af radar ud fra regnmålere og disdrometer	25
4.6	Aktivitet 3.6 - Generering og analyse af vejrradarbaseret probabilistisk usikkerhedsvurdering (ensembler)	25
4.7	Aktivitet 3.7 - Risk assessment map til visualisering af områder med ekstrem nedbør	26
4.8	Aktivitet 3.8 - Automatisk kvalitetssikring og overvågning af online system	27
<b>5.</b>	<b>Arbejdspakke 4: Analyse af fremtidens styringspotentiale i øvre del af Grejs Å</b>	<b>30</b>
5.1	Aktivitet 4.1 - Modelbaserede scenarie-analyser	30
5.2	Aktivitet 4.2 - Udfærdigelse af rapport	31
<b>6.</b>	<b>Arbejdspakke 5: Idriftsættelse og overdragelse</b>	<b>34</b>

6.1	Aktivitet 5.1 - Idriftsættelse og test af systemet	34
6.2	Aktivitet 5.2 - Udarbejdelse af systembeskrivelse og dokumentation	34
6.3	Aktivitet 5.3 - Træningskurser	34
6.4	Aktivitet 5.4 - Aflevering	35

# 1. Sammenfatning

## 1.1 Introduktion til SMART Vand Vejle

Nærværende rapport udgør den faglige slutrapportering af projektet "Udvikling af automatiseret realtids varslings- og styringssystem af Vejle Å, Grejs Å og Omløbsåen til klimasikring af Vejle By", som har modtaget støtte fra Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram 2014 (J.nr. NST-404-00268). Som arbejdstitel og projekttitel ved fx formidling af projektet valgte projektets parter ved projektopstart at bruge den mere mundrette projekttitel "**SMART Vand Vejle**".

## 1.2 Baggrund for projektet

Baggrunden for SMART Vand Vejle er som også beskrevet i ansøgningen:

I de seneste år har flere og flere danske byer oplevet hyppigere oversvømmelser fra hav, vandløb og afløbssystemer som følge af intensiveret byudvikling og klimaforandringer. Frekvensen af disse hændelser forventes at stige i de kommende år, hvilket øger presset på at udvikle teknologier, der kan forebygge, styre, håndtere og varsle disse hændelser til gavn for både beslutningstagere og byens borgere.

De meteorologiske/hydrologiske betingelser, der skaber de tre typer af oversvømmelse, er følgende: Stormflod, langvarige/koblede nedbørshændelser, snesmeltning over vandløbsoplandene og kortvarig intens nedbør over byen. De ovennævnte forhold kan hver især afstedkomme en oversvømmelse, men hvis to eller flere forhold gør sig gældende samtidig, vil det kunne afstedkomme en oversvømmelse, der er potentielt mere skadesvoldende. De mange meteorologiske/hydrologiske betingelser, der indgår i det komplekse samspil, som en oversvømmelse er, stiller en række krav til et realtids varslings- og /eller styringssystem. For det første stilles der store krav til forståelsen af vandkredsløbet, der formuleres med hydrologiske/hydrauliske modeller. For det andet stilles der krav til valide online måledata, som kan fortælle om systemets aktuelle tilstand. For det tredje skal de fremtidige meteorologiske/hydrologiske betingelser kunne forudsiges for at kunne levere en optimeret styringsstrategi og en varslings med tilstrækkelig tidshorisont.

Udfordringen med denne form for koblede oversvømmelser er at kunne danne et samlet overblik over et komplekst vandsystem i realtid og forudsige, hvilke hydrologiske/meteorologiske faktorer, der er betydende i den givne situation. Derudover skal forskellige hydrologiske områder (grundvand, overfladevand, havvand, og kloakvand) integreres i et samlet system for at kunne varsle og styre en kritisk hændelse. I dag er det praksis, at der kun indgår et af de hydrologiske områder (fx afløbssystemet) i et varslingsystem, og styring er normalt begrænset til afløbssystemer. Det udviklede system vil være en demonstration af, hvordan mange forskellige måledata kan indgå i et integreret vandkredsløbsvarslingsystem, som kan beskrive aktuelle og fremtidige forhold i et meget komplekst vandsystem i en aktiv klimatilpasningsløsning.

Den konkrete baggrund for projektet er Vejle By, der i de senere år har oplevet oversvømmelser i byen fra åerne, fra fjorden og som følge af kraftige regnhændelser, der resulterer i opstuvninger fra afløbssystemet. Oversvømmelserne er sket som følge af langvarige/koblede nedbørshændelser over vandløbsoplandene og/eller kortvarig intens nedbør over byen. Falder disse hændelser sammen med forhøjet vandstand i Vejle Fjord, intensiveres oversvømmelserne. Vejle Kommune har besluttet at forbedre klimasikringen af Vejle By med en række tiltag som sluser, styrbart fordeler-bygværk og pumper. Projektet her sigter mod at optimere disse anlæg vha. et automatiseret varslings- og styringssystem. Da regnvand og overløbsvand fra

byens kloakker også bidrager til det samlede vandvolumen, er det vigtigt, at den udviklede løsning kan fungere på tværs af de to organisationer: Vejle Kommune og Vejle Spildevand. Den baggrundsviden, som DHI og Aalborg Universitet har omkring hydrologisk/hydraulisk modellering, kombineret med forudsigelse af nedbør gør den beskrevne problemstilling meget velegnet til at udvikle og demonstrere, hvordan en kombineret strategi kan reducere skadevirkningerne på Vejle by.

### 1.3 Projektbeskrivelse

Det overordnede projektformål har været at udvikle og demonstrere et IT-baseret varslings- og styringssystem af kritiske flow og vandstande i søer, åer og hav for at sikre infrastruktur og boliger mod uønskede oversvømmelser. Vejle By er valgt som følge af dens placering ved bunden af Vejle Fjord, og fordi byen gennemløbes af flere åer, der historisk har forårsaget oversvømmelser. Byen er tæt bebygget og placeret i meget kuperet terræn, hvilket sikrer en bred og komplet testning og demonstration af det integrerede varslings- og styringssystem.

### 1.4 Projektgennemførelse

Gennemførelse af projektet er i sket i henhold til projektbeskrivelsen i ansøgningen, hvor følgende overordnede målsætninger og tilhørende succeskriterier alle i al væsentlig grad er blevet opfyldt. For yderligere detaljer om projektets realisering henvises til de efterfølgende kapitler om de enkelte arbejdsopgaver.

Projektets mål	Succeskriterier
Udvikle en fælles platform, der automatisk i realtid kan integrere data og modeller og derved levere en optimeret styring af sluser, pumpestationer og fordelingsbygværker samt varsle kritiske situationer,	Udviklingen vil resultere i et system, der kan implementeres og demonstreres i Vejle. Systemet skal efter projektets afslutning styre sluse, pumper og fordelingsbygværk i Vejle by.
Demonstrere realtids prognosemodel (now-caster) til forudsigelse af nedbøren over området.	Systemet har i mindst 12 måneder produceret online prognose af nedbøren, og præcisionen er dokumenteret ved hjælp af lokale regnmålere.
Installation og demonstration af systemet.	Installation, konfiguration og idriftsættelse af systemet, således at styringen af sluser, pumpestationer og fordelingsbygværker i Vejles åer sker automatisk.
Overdragelse og forankring.	Driftspersonalet ved Vejle Spildevand og Vejle Kommune har gennem træning og erfaringer opnået fuld indsigt i systemet og varetager den daglige drift.

Tabel 1. Målsætning og succeskriterier

### 1.5 Projektformidling

Projektet har dels løbende gennem projektperioden og ved projektets afslutning været formidlet ved en række lejligheder og formidlingsformer som angivet i nedenstående tabel.

Dato	Formidling
9. juni 2016	Indlæg på Natur og Miljø 2016 konferencen: Ved Kjartan Gunnarsson Ravn, Vejle Spildevand
8.-9. november 2016	Indlæg på Dansk Vandkonference 2016: <i>Automatiseret realtids varslings- og styringssystem af Vejle Å, Grejs Å og omløbsåen til klimasikring af Vejle</i> Ved Kjartan Gunnarsson Ravn, Vejle Spildevand

27. april 2017	Besøg fra forsyningsingeniør-uddannelse på VIA i Horsens, indlæg og fremvisning af slusen.
12. juni 2017	TV indslag i DR i forlængelse af skybrud
Juni 2017	Fremstilling af 5 min. film på dansk og engelsk af projektet. Filmene vil efter projektets godkendelse blive offentliggjort.
23. august 2017	Indlæg om Slusen og SMARTVand for delegation fra Luleå University of Technology
7. september 2017	Indlæg om Slusen og SMARTVand for driftsmedarbejdere fra forsyningsvirksomheder i Trekantområdet på "Driftens dag".
2. oktober 2017	Indlæg om Slusen og SMARTVand for KL's GATE 21 netværk
November 2018	Forventet indlæg på Dansk Vand konference.
December 2018	Forventet videnskabelig artikel baseret på et års driftserfaring.

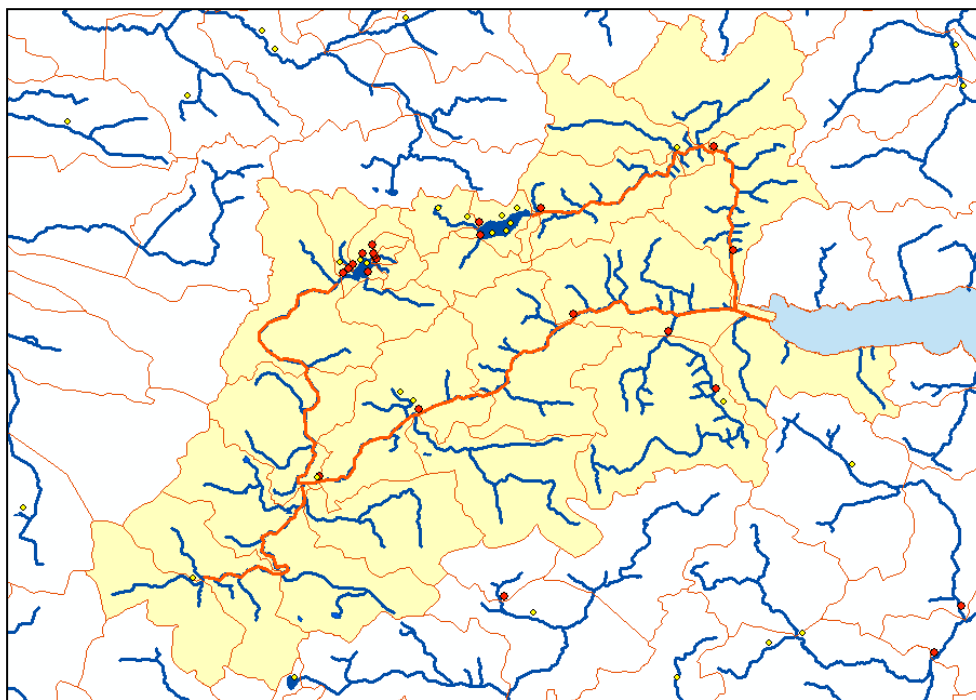
**Tabel 2. Oversigt over formidling af projektet.**

## 2. Arbejdspakke 1: Modeludvikling

I arbejdsopgave 1 blev dynamiske modeller til simulering af det hydrologiske kredsløb i vandløbsoplandene og til simulering af de hydrauliske forhold i vandløb og afløbssystem udviklet. Integration af modellerne på tværs af det samlede vandkredsløb blev udviklet ved sammenkobling af modellerne, som ligeledes blev klargjort til reeltidsanvendelse.

### 2.1 Aktivitet 1.1 - Udvikling af integreret oplandsmodel for Vejle Å, Grejs Å og Omløbsåen

Den integrerede model for de nævnte vandløbsoplande er udviklet i programpakkerne MIKE 11 og MIKE SHE som simulerer hhv. de hydrauliske forhold i vandløbene og det hydrologiske kredsløb i oplandet med inddragelse af bl.a. evapotranspiration, overfladeafstrømning, nedrivning gennem den umættede zone og grundvandsstrømning i den mættede zone samt tilstrømning til vandløb. Den dynamiske kobling mellem MIKE 11 og MIKE SHE sikrer, at fx tilstrømningen af vand til vandløbene fra grundvandet beregnes løbende gennem simuleringen som funktion af den aktuelle og lokale vandstand i vandløbene og grundvandsstanden.



Figur 1. Geografisk område for oplandsmodel

Den udviklede oplandsmodel dækker et geografisk område som vist på ovenstående figur. Det datamæssige udgangspunkt for udvikling af MIKE SHE/11 modellen er en national MIKE SHE model, der som en del af dette projekt efterfølgende er modificeret på følgende punkter:

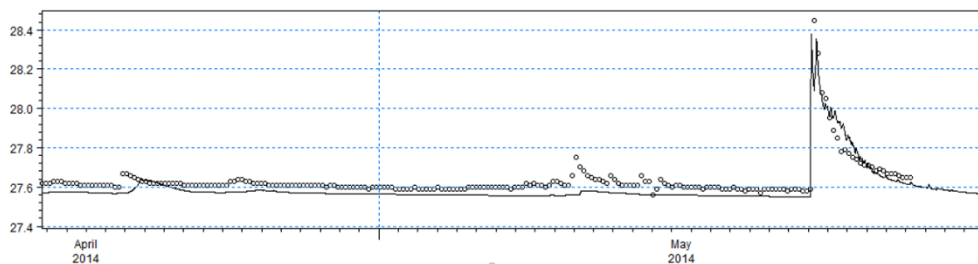
- Højdemodellen er erstattet af data fra den seneste udgave af Danmarks Højdemodel fra Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering.
- Vandløbstværsnit er erstattet af seneste opmålte tværsnit modtaget fra Orbicon. I Grejs Å, opstrøms for planteskolen, eksisterer der ikke opmålte vandløbstværsnit. På denne strækning er tværsnit opdateret ved udtrækning af tværsnit fra Danmarks Højdemodel.



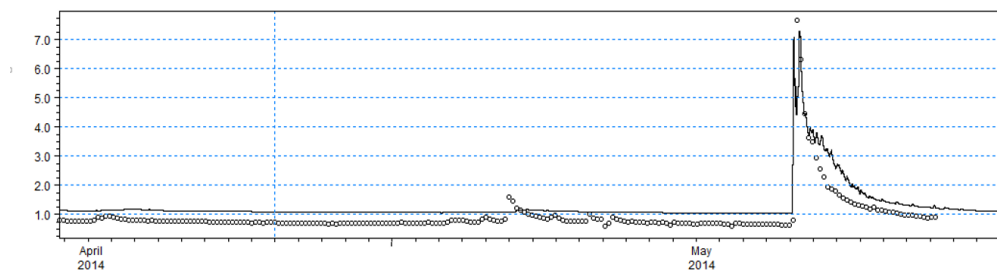
- Geolokalisering af vandløbsstrækninger er opdateret.
- Nedbørsdata bliver som en del af arbejdsplan 3 genereret som grid data. MIKE SHE modellen er tilsvarende modificeret fra at anvende stationsnedbør til at anvende grid data.
- På vandløbsmodellens nedre rand ved udløbet af Vejle Å i Vejle Fjord er der defineret en vandstandsrand svarende til vandstanden i Vejle Fjord.
- Nedskalering af modellens tidlige opløsning med henblik på mere nøjagtig modellering af i skybrudssituationer.

Det er primært informationer om geologiske forhold og arealanvendelse fra den oprindelige MIKE SHE/11 model, der ikke er blevet opdateret som en del af dette projekt. Den stedlige opløsning og kvaliteten af de anvendte eksisterende data vurderes at være fuldt tilstrækkelig til projekts formål.

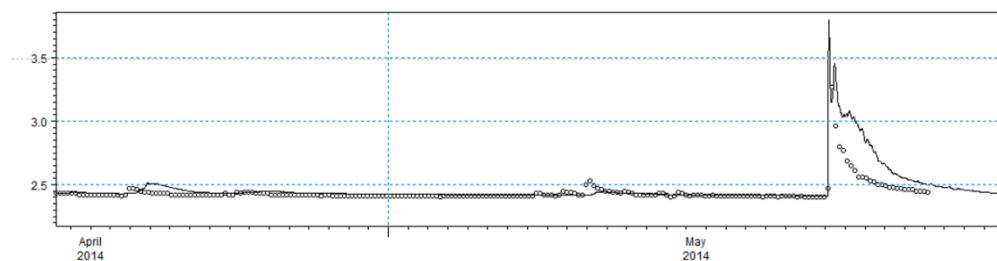
MIKE SHE/11 modellen er kalibreret mod vandføringsdata med nedbørsinput fra stationsdata bl.a. under skybruddet den 22.-23. maj 2014. Se nedenstående figurer.



**Figur 2. Målt og beregnet vandstand (m) i Grejs Å ved planteskolen under skybruddet 22.-23. maj 2014. Punkter viser målte data og linjen beregnede data.**



**Figur 3. Målt og beregnet vandføring (m<sup>3</sup>/s) i Grejs Å ved planteskolen under skybruddet 22.-23. maj 2014. Punkter viser målte data og linjen beregnede data.**



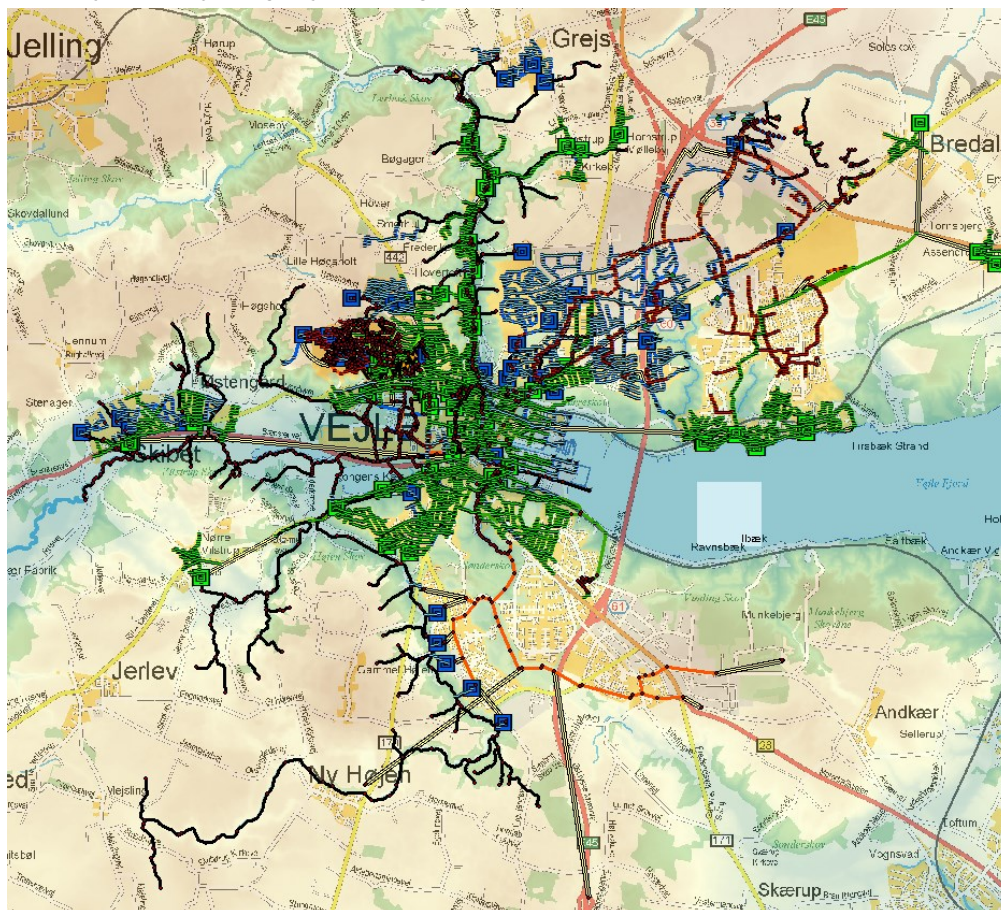
**Figur 4. Målt og beregnet vandstand (m) i Grejs Å ved Ny Grejsdalsvej under skybruddet 22.-23. maj 2014. Punkter viser målte data og linjen beregnede data.**

Anvendelse af MIKE SHE/11 modellen i dette projekt sker med brug af nedbørsdata i form af data fra DMI's Verring radar med efterfølgende processering, herunder nowcasting, se ar-

bejdspakke 3. Det har inden for projektperioden ikke været muligt baseret på radarmålinger at etablere et nedbørsdatasæt, som er tilstrækkeligt langt og sammenhængende til at dette kan danne grundlag for at simulere en længere periode i størrelsesordenen et år, som typisk er nødvendigt for at kalibrere hydrologiske modeller med lang hukommelse. Kalibreringen af MIKE SHE/11 modellen må derfor anses for at være af foreløbig karakter. Se endvidere afsnit 6.4.

## 2.2 Aktivitet 1.2 - Operationalisering af eksisterende MIKE URBAN model til realtidsbrug

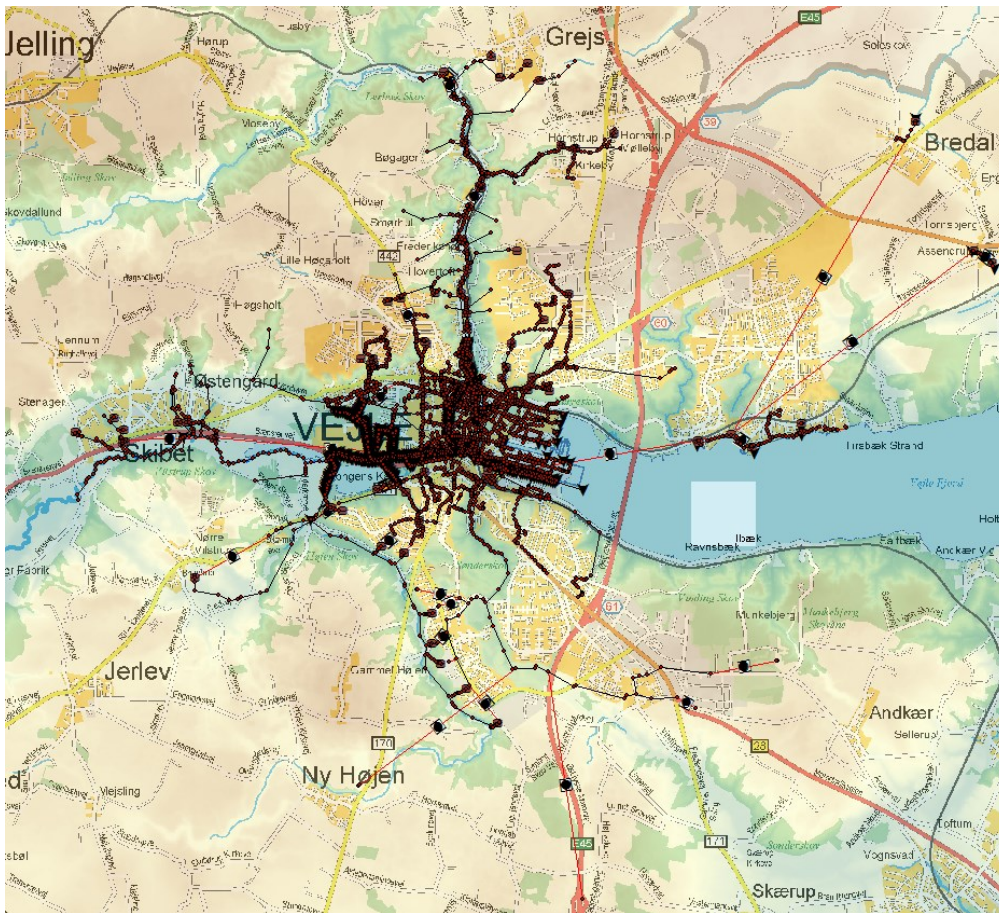
Til detaljeret beregning af vandstande og vandføringer i Vejle By anvendes MIKE URBAN modellen. Modellen dækker oplandet til Vejle Centralrenseanlæg samt separate regnvandsudløb til Højen Å, Grejs Å og Vejle Å, se figur 5.



Figur 5. MIKE URBAN model for Vejle By. Detaljeret model.

Modellen er forholdsvis omfattende, med knap 7.000 oplande, 11.500 brønde og ca. det samme antal ledninger. Ledningslængden er ca. 343 km.

For at sikre en hurtig afvikling af modelberegninger er modellen operationaliseret. Dette er gjort ved at reducere og simplificere modellen, slette de brønde og ledninger, der ikke er strengt nødvendige, og samle mange mindre oplande i få større. Den operationaliserede model ses i figur 6.



**Figur 6. Den operationaliserede MIKE URBAN model for Vejle.**

Modellen indeholder nu knap 3.000 oplande, 3.200 brønde og 3.100 ledninger. Ledningslængden er ca. 136 km, hvilket er en reduktion på 60%. Styringer, bassiner, overløb og pumpestationer er som regel bibeholdt. Modellen er også blevet mere robust, således at tidsskridtet kan sættes op.

Afviklingstiden for den operationaliserede model vil være afhængig af både software og især hardware. Ved projektets afslutning kan beregninger for 2,5 døgn gennemføres på under 15 minutter. Dette er ca. 8 gange hurtigere end udgangspunktet med den detaljerede model.

### **2.3 Aktivitet 1.3 - Kobling af MIKE URBAN data med den integrerede oplandsmodel**

Koblingen mellem MIKE URBAN modellen og oplandsmodellen sker på 4 lokaliteter, svarende til randpunkterne i vandløbene i MIKE URBAN modellen. Populært sagt er det de punkter, hvor vandløbsstrækninger i MIKE URBAN når ud til randen af modellen. Her skal der angives en vandføring i vandløbstværsnittet på randen. Denne vandføring overføres fra MIKE SHE/11 beregningen, og denne dataoverførsel udgør således koblingen mellem MIKE URBAN og MIKE SHE/11 modellerne. Sekvensen for gennemførelse af en samlet simulering af vandkredsløbet og hydraulikken i vandløb og afløbssystem er således følgende:

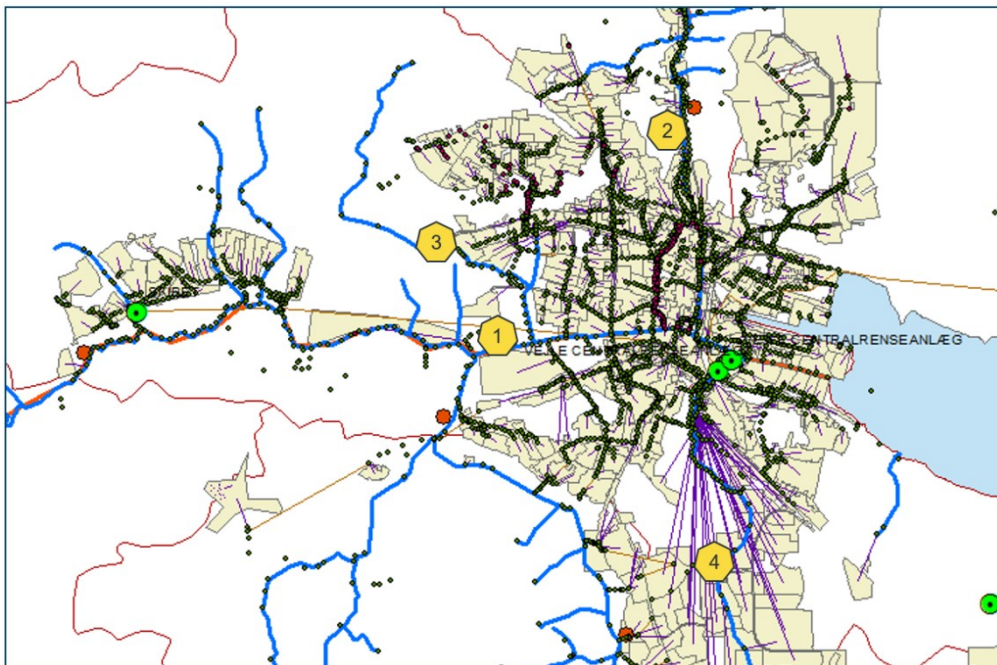
1. MIKE SHE/11 simulering gennemføres med følgende data som tidsvarierende input (også kaldet randbetingelser):
  - Nedbørsdata over hele oplandet i form af tidsvarierende grid data (se arbejdsmappe 3 for yderligere detaljer).
  - Temperaturdata i form af en tidsserie gældende for hele oplandet

- Data for potentiel evapotranspiration i form af en tidsserie gældende for hele oplandet
- Vandstandsdata ved udmundningen af Vejle Å i Vejle Fjord

De væsentligste resultater fra MIKE SHE/11 beregningen er i denne sammenhæng vandstand og vandføring i en lang række punkter i vandløbene.

2. Vandføringsdata udtrækkes fra MIKE SHE/11 beregningen på de 4 lokaliteter, hvor der kobles til MIKE URBAN modellen.
3. MIKE URBAN simulering gennemføres med følgende data som tidsvarierende input:
  - Nedbørsdata over det urbane opland i form af tidsvarierende grid data
  - Vandstandsdata ved udmundningen af Vejle Å i Vejle Fjord.
  - Vandføringsdata fra MIKE SHE/11 på de 4 koblingspunkter.

De væsentligste resultater fra MIKE URBAN beregningen er de endelige vandstande og vandføringer dels i afløbssystemet og dels i en lang række punkter i vandløbene i Vejle by. Den væsentlige forskel mellem de vandstande, der beregnes med MIKE SHE/11 og MIKE URBAN, er, at sidstnævnte medregner afstrømningen fra de urbane oplande i Vejle by. Jo mere intens og lokal en nedbørshændelse er, jo større betydning har det.

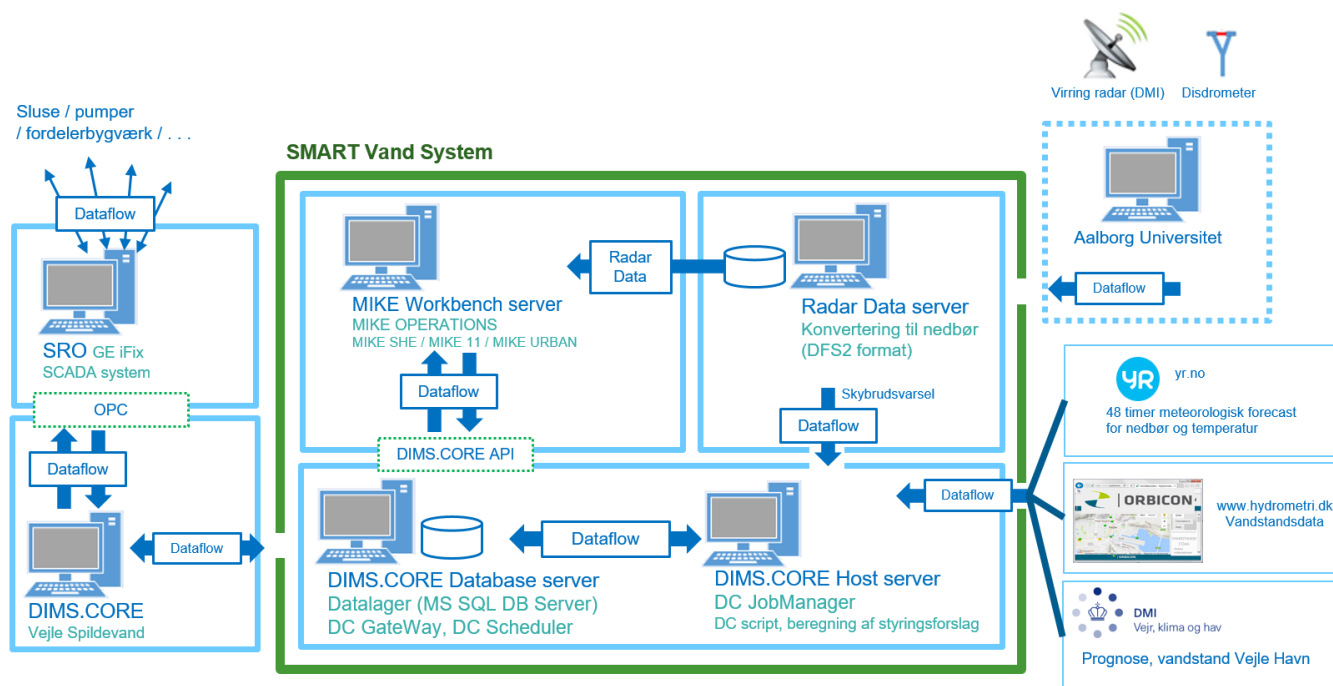


**Figur 7. Koblingspunkter mellem MIKE URBAN og MIKE SHE/11 model - 1: Vejle Å, nedstrøms Højen Å. 2: Grejs Å, Ny Grejsdalsvej. 3: Flø Bæk. 4: Mølholm Bæk.**

# 3. Arbejdspakke 2: Udvikling af reeltids softwareplatform

## 3.1 Aktivitet 2.1 - Installation af MIKE CUSTOMISED software

Etablering af de nødvendige virtuelle servere blev foretaget hos Vejle Spildevand. Samspillet med den på forhånd etablerede IT infrastruktur var af stor betydning for projektets gennemførelse. I nedenstående figur ses en overordnet skitse af serverstrukturen.



**Figur 8. Serverstruktur for SMART Vand Vejle. Den grønne ramme angiver de fire virtuelle servere etableret hos Vejle Spildevand som en del af projektet.**

Den softwarepakke, som i ansøgningen er benævnt MIKE CUSTOMISED, er i dag en fællesbetegnelse for softwareprodukterne MIKE OPERATIONS og DIMS.CORE. De installerede softwareprodukter og deres funktion på fire virtuelle servere vist i Figur 8 er som vist i følgende tabel:

Server	Software installeret	Funktion
MIKE Workbench	MIKE OPERATIONS MIKE SHE/11 MIKE URBAN	<ol style="list-style-type: none"> <li>Hente data fra <i>DIMS.CORE database</i> og <i>Radar Data</i></li> <li>Klargøre data til modelberegninger</li> <li>Afvikle modelberegninger</li> <li>Visualisere måle- og modeldata til de daglige brugere hos Vejle Kommune og Vejle Spildevand</li> </ol>
Radar Data	(ingen)	<ol style="list-style-type: none"> <li>Modtage radardata og skybrudsvarsel fra AAU</li> </ol>
DIMS.CORE Database	DIMS.CORE	<ol style="list-style-type: none"> <li>Hente SRO data fra Vejle Spildevands generelle DIMS.CORE installation</li> <li>Hente data fra Orbicons vandstandsmålere (vandløb)</li> <li>Hente data fra DMI vandstandsprognose (fjord)</li> <li>Hente skybrudsvarsel fra <i>Radar Data</i></li> <li>Hente modelresultater fra <i>MIKE Workbench</i></li> </ol>

		6. Hente meteorologisk forecast fra yr.no 7. Hente styringsforslag fra <i>DIMS.CORE Host</i> 8. Sende styringsforslag til SRO via Vejle Spildevands generelle <i>DIMS.CORE</i> installation.
DIMS.CORE Host	DIMS.CORE	1. Hente data fra <i>DIMS.CORE Database</i> til brug for beregning af styringsforslag. 2. Gennemføre beregning af styringsforslag

**Tabel 3. Oversigt over servere, software og funktion.**

### 3.2 Aktivitet 2.2 - Konfiguration af operationelle modeller til realtidsoperation og automatisk eksekvering

De i Arbejdspakke 1 udviklede og koblede modeller er installeret på *MIKE Workbench* serveren, hvor MIKE OPERATIONS er konfigureret til dels at hente de nødvendige modeldata fra andre servere og dels at eksekvere modellerne én gang hvert 60. minut. Modellernes behov for data i realtid til randbetingelser sikres med dataflows som vist i nedenstående tabel.

Model	Datatype	Dataflow
MIKE SHE/11 og MIKE URBAN	Nedbørsdata i form af tidsvarierende grid data.	Data fra AAU (se AP3) hentes fra <i>Radar Data</i> serveren.
MIKE SHE/11	Data for temperatur og potentiel evapotranspiration i form af en tidsserie gældende for hele oplandet.	Data fra yr.no hentes via <i>DIMS.CORE Database</i> serveren.
MIKE SHE/11 og MIKE URBAN	Vandstandsdata ved udmundingen af Vejle Å i Vejle Fjord.	Vejle Kommune har indgået aftale med DMI om levering af vandstandsprognose for Vejle Fjord. Data fra DMI hentes via <i>DIMS.CORE Database</i> serveren.
MIKE URBAN	Vandføringsdata fra MIKE SHE/11 på de 4 koblingspunkter.	MIKE OPERATIONS er konfigureret til at udtrække flowdata fra MIKE SHE til brug i MIKE URBAN.

**Tabel 4. Oversigt over datatyper og dataflows for operationelle modeller.**

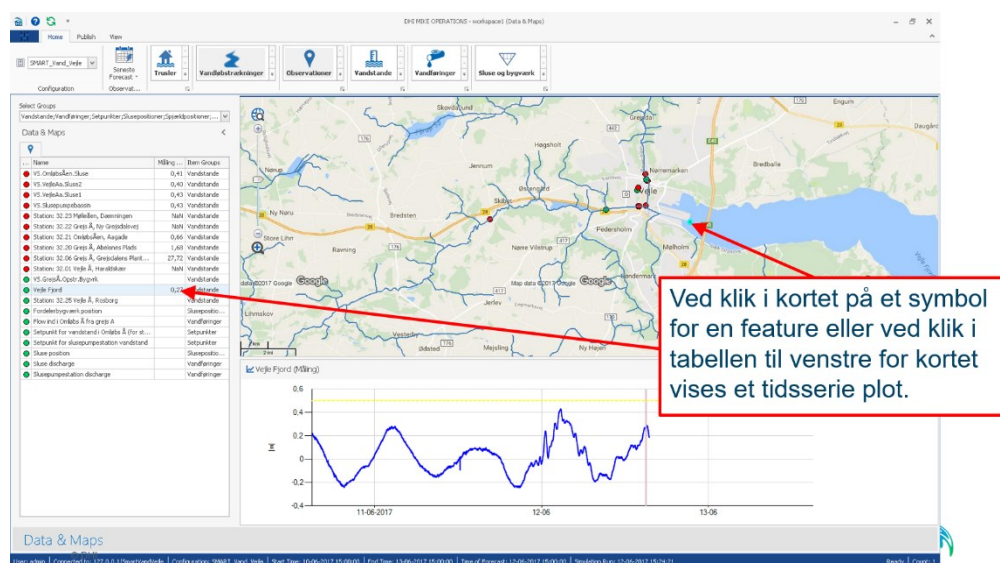
### 3.3 Aktivitet 2.3 - Udvikling af data valideringsrutiner til kvalitetssikring af data

Der er som en del af opsætningen af *DIMS.CORE* systemet implementeret et User Script Job, der udføres med en frekvens på 5 minutter døgnet rundt. Desuden er der fejlhåndtering indbygget i alle scripts, der indsamler data fra de forskellige datakilder. Beregningerne vil kun levere resultat, hvis alle nødvendige datakilder er opdaterede.

### 3.4 Aktivitet 2.4 - Opsætning af overblikrapporter

Organiseringen af beredskabet i Vejle er forankret i Vejle Kommune i det team, der hedder Højtlandsgruppen. Disse medarbejdere har brug for dels at have det nødvendige overblik over målte data og dels at kunne bruge prognoser for de kommende minutter og timer til at tage de rigtige beredskabsmæssige beslutninger, herunder at varsle borgerne i Vejle. De to primære muligheder, som Højtlandsgruppen igennem dette projekt har fået for at tilgå sådanne data, er dels den udvidede visualisering af radardata stillet til rådighed af AAU (se AP3) og dels MIKE OPERATIONS Frontend, som er den brugergrænseflade, som MIKE OPERATIONS stiller til rådighed for slutbrugeren.

Nedenstående figur viser et eksempel på MIKE OPERATIONS Frontend konfigurationen fra dette projekt:



Figur 9. Eksempel på MIKE OPERATIONS Frontend til brug af beredskabet i Vejle.

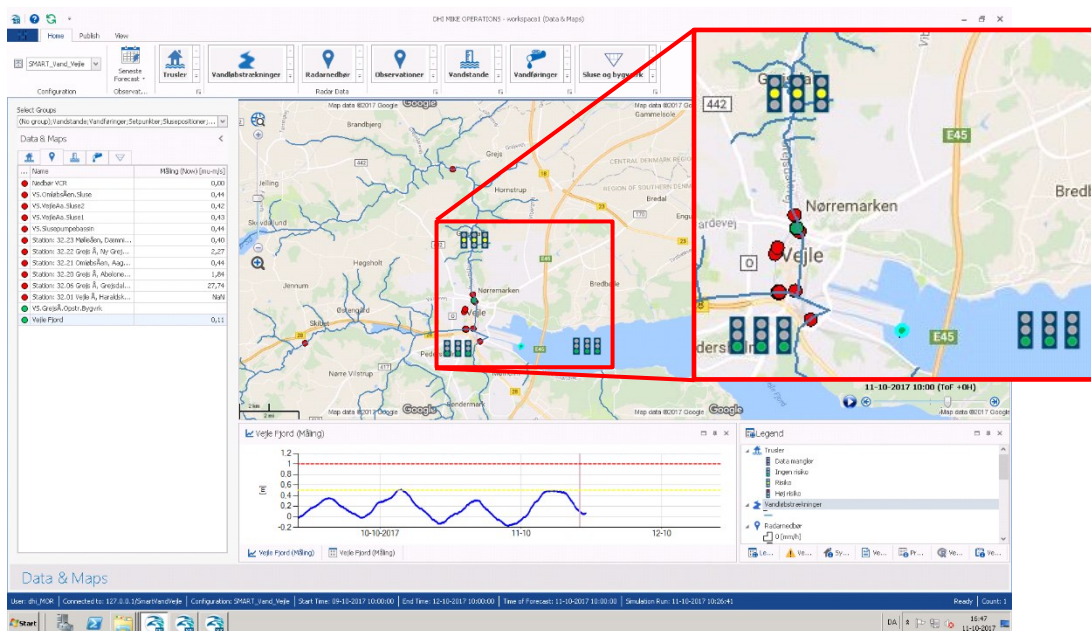
Som et vigtigt instrument for beredskabet til at danne sig et hurtigt overblik over den aktuelle trusselsituation blev der etableret følgende definition af trusler relateret til oversvømmelse fra fjord, vandløb og skybrud, som hver evalueres på tre tidshorisonter.

Trussel	Tidshorisonter	Data anvendt til vurdering af trussel
Høj vandstand i Vejle Fjord	0, 6 og 24 timer	DMI prognose for vandstand i fjorden
Høj vandføring i Grejs Å	0, 2 og 6 timer	Prognose fra MIKE 11 model for vandføring i Grejs Å ved Planteskolen
Skybrud	0, 1 og 2 timer	Radar nowcast

Tablet 5. Definition af trusler

Alle tre trusler kategoriseres som ingen risiko, risiko og høj risiko. For de to førstnævnte trusler sker kategoriseringen ved simpel konstatering af, om overskridelse af en tærskelværdi for hhv. vandstand og vandføring finder sted. For skybrudstruslen konstateres det i hver radarcelle, om radardata opfylder skybrudskriteriet (mere end 15 mm regn på 30 minutter). Hvis antallet af radarceller med skybrud overstiger en tærskelværdi for hhv. risiko og høj risiko, kategoriseres truslen tilsvarende.

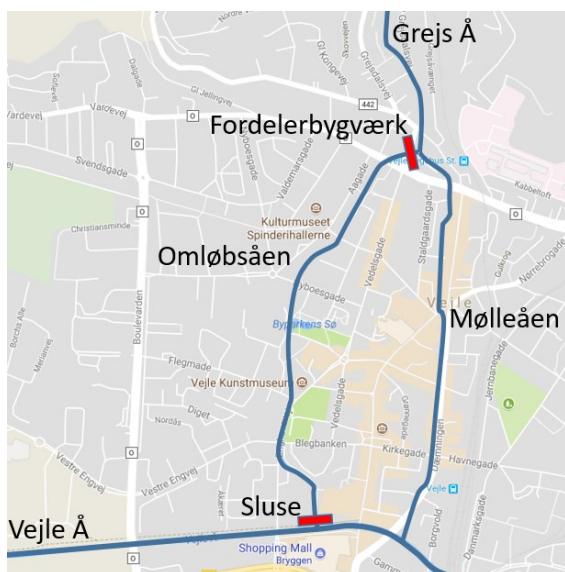
De tre trusler på de tre tidshorisonter visualiseres i MIKE OPERATIONS Frontend med 3 sæt af 3 trafiklys, som vist i nedenstående figur, hvor truslen fra fjord, vandløb og skybrud er vist som 3 trafiklys mod hhv øst, nord og sydvest. Aktuelt var der altså risiko (gult trafiklys) for oversvømmelse fra Grejs Å på alle tre tidshorisonter, men ingen risiko for oversvømmelse fra fjord og skybrud (grønne trafiklys).



Figur 10. Eksempel på udviklet funktionalitet i MIKE OPERATIONS til hurtigt overblik over aktuell trussel for oversvømmelse fra fjord, vandløb og skybrud.

### 3.5 Aktivitet 2.5 - Udvikling af Nødstyrimodul, Basisstyringsmodul og Avanceret styringsmodul

I nedenstående figur ses en kortskitse over vandløbene og de styrbare strukturer i Vejle.



Figur 11. Kortskitse over vandløb og styrbare strukturer i Vejle.

De to styrbare strukturer i Vejle er:

1. Slusen, som er placeret i nedstrøms ende af Omløbsåen, kort før denne løber ud i Vejle Å. Udover de to dobbelte sluseporte er slusen udstyret med pumper, som flytter/løfter vand fra Omløbsåen til Vejle Å, når slusen er lukket. Slusens primære formål er at forhindre en høj vandstand i Vejle Fjord/Å i at brede sig op i Omløbsåen med oversvømmelse langs åen til følge. Dernæst har lukning af slusen og opstart af pumperne den fordel, at vandstanden i specielt den nedre del af Omløbsåen sænkes, hvilket reducerer oversvømmelsesrisikoen. Slusen og pumperne kan således anvendes til at styre vandstanden i Vejle Fjord/Å og Omløbsåen.



des både i situationer, hvor der er høj vandstand i Vejle Fjord/Å, og i situationer, hvor der er høj vandføring i Omløbsåen.

2. Fordelerbygværket, som er placeret der, hvor Grejs Å deler sig i Mølleåen og Omløbsåen. Fordelerbygværket består af tre spjæld, som kan åbnes gradvist, hvorved vandføringen opstrøms fra Grejs Å kan fordeles mellem Mølleåen og Omløbsåen.

Som nævnt i afsnit 3.4 er der tre overordnede trusler i Vejle by i relation til oversvømmelse:

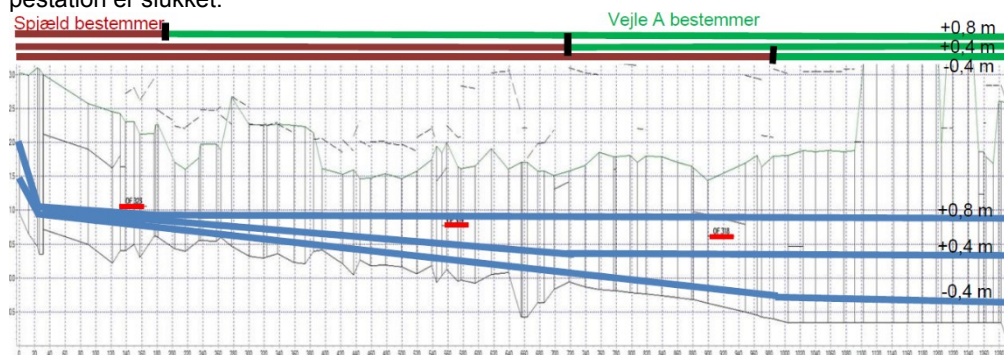
- T1: Stormflod/forhøjet vandstand i Vejle Å
- T2: Høj vandføring i Grejs Å
- T3: Skybrud over Vejle by

De udviklede strategier for styring af slusen og fordelerbygværket tager udgangspunkt i, at de tre trusler kan forekomme enkeltvist eller i kombination. Afhængigt af, hvilke trusler der er aktuelle, vælges den styringsstrategi for det samlede system, der bedst sikrer, at der ikke forekommer oversvømmelse langs Omløbsåen. Hydraulisk set har spjældene i fordelerbygværket den største effekt i den øverste halvdel af Omløbsåen, mens indstilling af sluse og pumper er dominerende i den nederste halvdel.

Ved kombineret styring af spjæld i fordelerbygværk, slusen og pumperne er følgende 6 strategier udviklet.

**Strategi 1:** Lavest mulig vandstand på øverste del af Omløbsåen (Lav øverst).

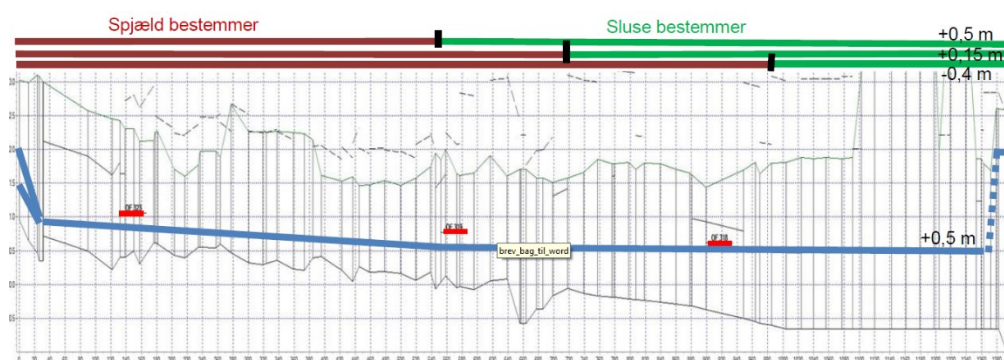
Spjældene skrues ned, således at kun minimumsvandføring passerer ned til Omløbsåen, hvor vandstanden holdes nede for at sikre bedst mulige forhold for overløb. Slusen er åben. Pumpestation er slukket.



**Figur 12. Strategi 1. "Lav øverst"**

**Strategi 2:** Lavest mulig vandstand på øverste del, middel vandstand på nederste del (Lav, Middel).

Spjældene skrues ned, således at kun minimumsvandføring passerer ned til Omløbsåen. Slusen er lukket. Pumpestation pumper ned til setpunkt i pumpeump svarende til moderat vandstand.

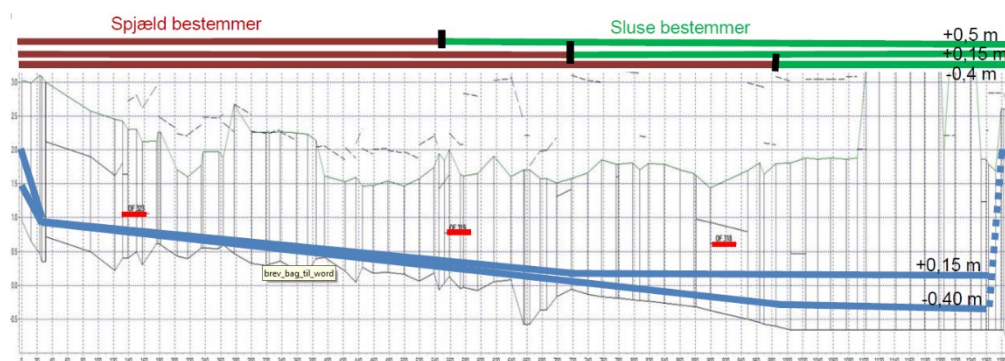


**Figur 13. Strategi 2. "Lav, Middel"**

**Strategi 3:** Lavest mulig vandstand på hele Omløbsåen (Lav, Lav).

Spjældene skrues ned, således at kun minimumsvandføring passerer ned til Omløbsåen.

Slusen er lukket. Pumpestation pumper ned til lavest mulige setpunkt i pumpeump.

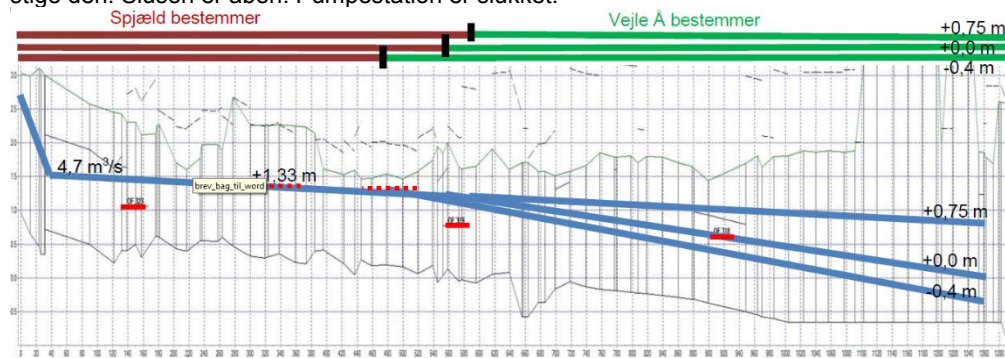


**Figur 14. Strategi 3. "Lav, Lav"**

**Strategi 4:** Maksimal kapacitet på øverste del (Maks øverst).

Spjældene skrues op, således at vandstanden ved Nyboesgade når kritisk kote uden at overstige den.

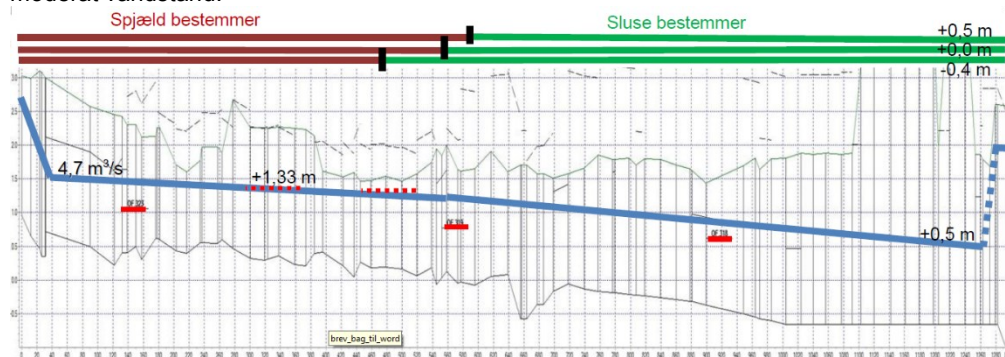
Slusen er åben. Pumpestation er slukket.



**Figur 15. Strategi 4. "Maks øverst"**

**Strategi 5:** Maksimal kapacitet på øverste del, middel kapacitet på nederste del (Maks, Middel).

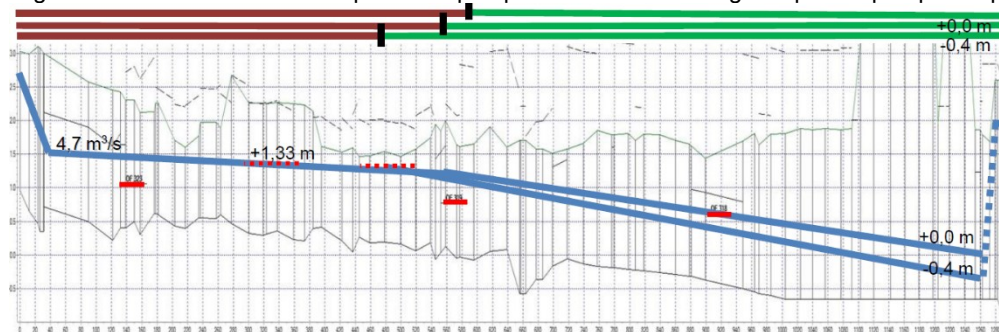
Spjældene skrues op, således at vandstanden ved Nyboesgade når kritisk kote uden at overstige den. Slusen er lukket. Pumpestation pumper ned til setpunkt i pumpeump svarende til moderat vandstand.



**Figur 16. Strategi 5. "Maks, middel"**

**Styring 6:** Maksimal kapacitet i hele Omløbsåen (Maks, Maks).

Spjældene skrues op, således at vandstanden ved Nyboesgade når kritisk kote uden at overstige den. Slusen er lukket. Pumpestation pumper ned til lavest mulige setpunkt i pumpesump.



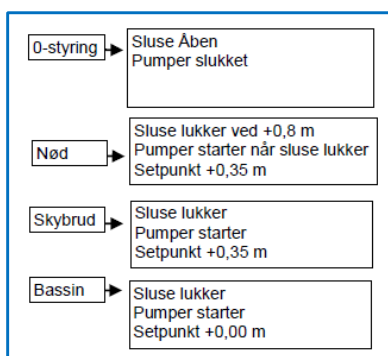
Figur 17. Strategi 6. "Maks, Maks"

Valget af styringsstrategi afhænger af det aktuelle trusselsbillede, som kan være en enkelt trussel, to trusler samtidig eller alle tre trusler samtidig. I nedenstående tabel vises en oversigt over, hvordan det udviklede system vælger styringsstrategi. Forekomsten af de tre trusler T1, T2 og T3 kan kombineres på i alt otte forskellige måder TK0-TK7 (venstre kolonne i figuren). Ud fra den aktuelle trusselskombination og den allerede aktive styringsstrategi vælges en styringsstrategi (S0-S6) (de 6 lyseblå kolonner til venstre). For nogle trusselskombinationer er der behov for at monitere fx vandstanden i Vejle Fjord/Å, og hvis en givet betingelse er opfyldt, aktiveres en anden styringsstrategi (de tre kolonner længst til højre).

Trussel-kombination	Trussel			Hvis [S0] så start med	Hvis [S1] så	Hvis [S2] så	Hvis [S3] så	Hvis [S4] så	Hvis [S5] så	Hvis [S6] så	Monitere	(hvis) betingelse	(så) aktivere
	T1	T2	T3										
TK0	-	-	-	[S0]	[S0]	[S0]	[S0]	[S0]	[S0]	[S0]			
TK1	+	-	-	[S1] "Lav, Øverst"	fortsæt [S1]	fortsæt [S2]	fortsæt [S3]	skift til [S1]	fortsæt [S5]	skift til [S5]	vandstand Vejle Fjord/ Vejle Å	vandstand Vejle Fjord / Vejle Å overstiger fx +0,8 m	[S2] "Lav, Middel"
TK2	-	+	-	[S4] "Maks, Øverst"	skift til [S4]	skift til [S4]	skift til [S5]	fortsæt [S4]	fortsæt [S5]	fortsæt [S6]	vandløb og Vejle Fjord	vandstand Vejle Å stiger byen skal tømmes for vand	[S5] "Maks, Middel" [S6] "Maks, Maks"
TK3	-	-	+	[S1] "Lav, Øverst"	fortsæt [S1]	skift til [S3]	fortsæt [S3]	skift til [S1]	skift til [S3]	fortsæt [S6]			
TK4	-	+	+	[S1] "Lav, Øverst"	fortsæt [S1]	skift til [S4]	skift til [S6]	fortsæt [S4]	skift til [S6]	fortsæt [S6]	vandløb	risiko for oversvømmelse Abelones plads byen skal tømmes for vand	[S4] "Maks, Øverst" [S6] "Maks, Maks"
TK5	+	-	+	[S1] "Lav, Øverst"	fortsæt [S1]	skift til [S3]	fortsæt [S3]	skift til [S1]	skift til [S6]	fortsæt [S6]	vandstand Vejle Fjord/ Vejle Å	vandstand Vejle Fjord / Vejle Å overstiger fx +0,8 m	[S3] "Lav, Lav"
TK6	+	+	-	[S4] "Maks, Øverst"	skift til [S4]	skift til [S6]	skift til [S6]	fortsæt [S4]	fortsæt [S5]	fortsæt [S6]	vandstand Vejle Fjord/ Vejle Å vandstand Abelone	vandstand overstiger fx +0,8 m risiko for oversvømmelse Abelones plads risiko for oversvømmelse Abelones plads	[S5] "Maks, Middel" [S6] "Maks, Maks" [S4] "Maks, Øverst"
TK7	+	+	+	[S1] "Lav, Øverst"	skift til [S4]	skift til [S6]	skift til [S6]	fortsæt [S4]	skift til [S6]	fortsæt [S6]	monitere	T1 eller T3 eller byen skal tømmes for vand (Men, T1 og T3 er opfyldt i TK7. Derfor bør der startes med [S6])	[S6] "Maks, Maks"

Tabel 6. Oversigt over valg af strategi afhængigt af kombinationen af trusler. Se tekst over figuren for uddybende forklaring.

Når styringsstrategien er valgt, skal der sendes et styringssignal til SRO systemet, hvor der opereres med fire forskellige styringssignaler, som vist i nedenstående figur.



### Figur 18. Styringssignaler til SRO system og de tilhørende styringer.

Sammenhængen mellem valg af styringsstrategi og styringssignal fremgår af nedenstående tabel.

Styringsstrategi	Styringssignal
S0, S1 og S4	0-styring
S2 og S5	Skybrudsdrift
S3 og S6	Bassindrif

### Tabel 7. Sammenhængen mellem styringsstrategi og styringssignal.

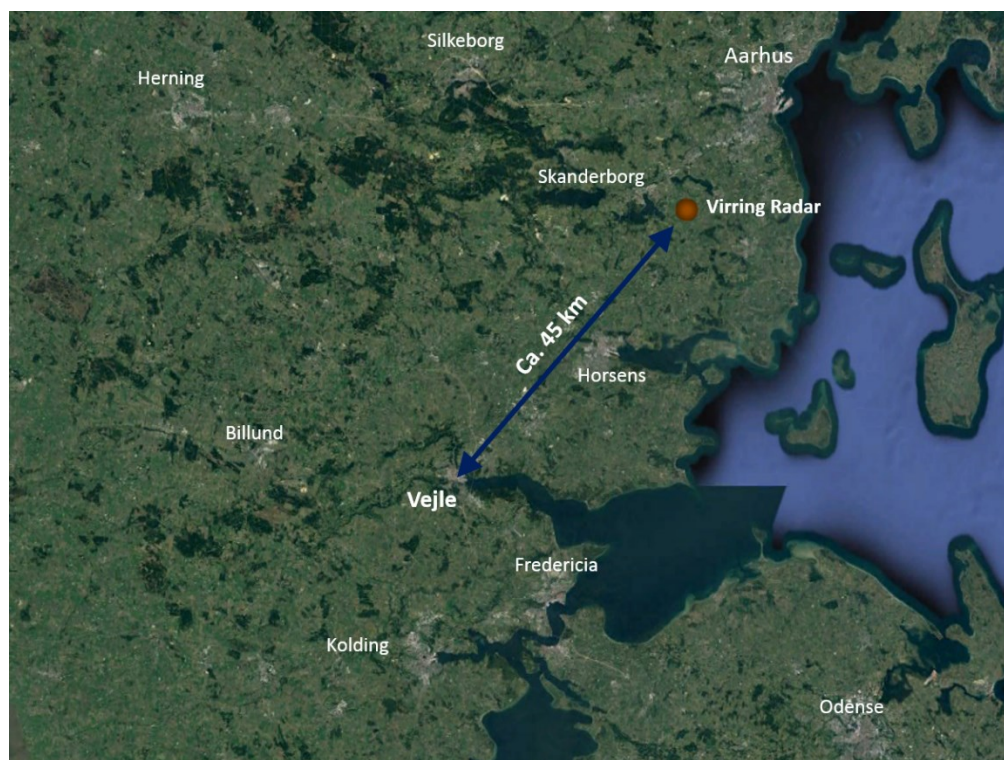
Valg af styringsstrategi og styringssignal er implementeret i DIMS.CORE på *DIMS.CORE Host* serveren, som vist i Tabel 3.

Hvis SMARTVand er sat til at køre, men af en eller anden grund ikke kører eller ikke har data nok, så vælger SRO'en at gå i Nødstyring og sender advarsel til Operatør om, at SMARTVand har afgivet kontrollen. Operatøren kan give kontrollen tilbage til SMARTVand, men SMARTVand kan ikke selv tage kontrollen tilbage af egen drift. Operatøren kan til enhver tid påtvinge systemet at skifte til enten 0-, nød-, skybruds- eller bassinstyring. Dette er valgt for at muliggøre gradvis idriftsættelse af SMARTVand systemet.

## 4. Arbejdspakke 3: Probabilistisk ensemble prognose af nedbør

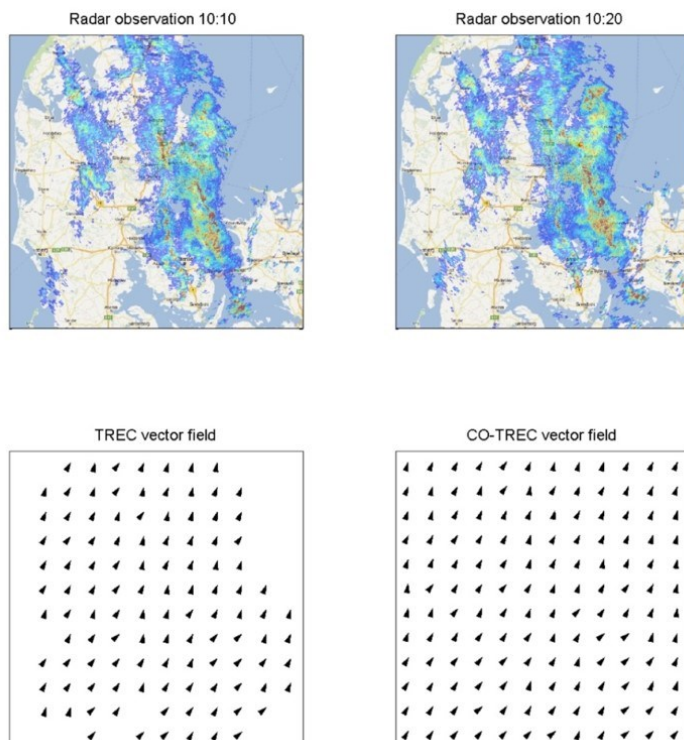
### 4.1 Aktivitet 3.1 - Etablering af realtidsradarmåling og nowcast af nedbør baseret på Virring vejrradar

I forbindelse med etablering af nowcast til systemet er der brugt data fra DMI's vejrradar ved Virring i Midtjylland – ca. 45 km fra Vejle.



**Figur 19. Placering af Virring vejrradar.**

Radaren er en såkaldt dual-pol radar og repræsenterer state-of-the-art inden for måling af nedbør med vejrradar. Data leveres automatisk fra DMI på systemets server via FTP. Data er gemt i et HDF5 format som volumendata. Det betyder, at data fremkommer som det mest rå format uden foregående behandling hos DMI. Data leveres hvert 10. minut, svarende til opdateringsfrekvensen af radarsystemet. Foruden målte radar reflektiviteter indeholder filerne også information om doppler hastigheder og dual-pol momenter (afledte parametre karakteristiske for dual-pol vejrradar). Efter en kvalitetssikring og opretning af data mod regnmålere bruges data til at generere en to-timers nowcast. Nowcasten er en fremskrivning af den målte regn. Det betyder, at det er muligt at forudsige, hvor regnen vil bevæge sig hen, og hvilke regnintensiteter man kan forvente over området. Kvaliteten af denne forudsigelse aftager med den forudsigelsehorisont, man anvender. Erfaring fra andre projekter indikerer, at det er vanskeligt at forudsige mere end ca. to timer frem med den radarbaserede nowcast model. Nowcast modellen er baseret på den såkaldte CO-TREC metode, der udnytter korrelationer i regnbygernes bevægelse til at beregne et bevægelsesfelt i hele radarens dækningsområde.



**Figur 20. Eksempel på, hvordan to radarbilleder med 10 minutters mellemrum bruges til først at etablere et vektorfelt (TREC) og derefter fordele det ud i resten af området med en kontinuitetsantagelse (CO-TREC).**

Metoden har vist sig meget anvendelig til at forudsige nedbør over urbane områder. I SMART Vand Vejle projektet dækker den radarbaserede nowcast primært oplandet til Vejle Å og Grejs Å og fungerer derfor på en væsentligt større geografisk skala end ved tidligere by-anvendelser.

#### **4.2 Aktivitet 3.2 - Geolokalisering, kvalitetssikring og oprensning af vejrradardata for ikke-meteorologiske signaler**

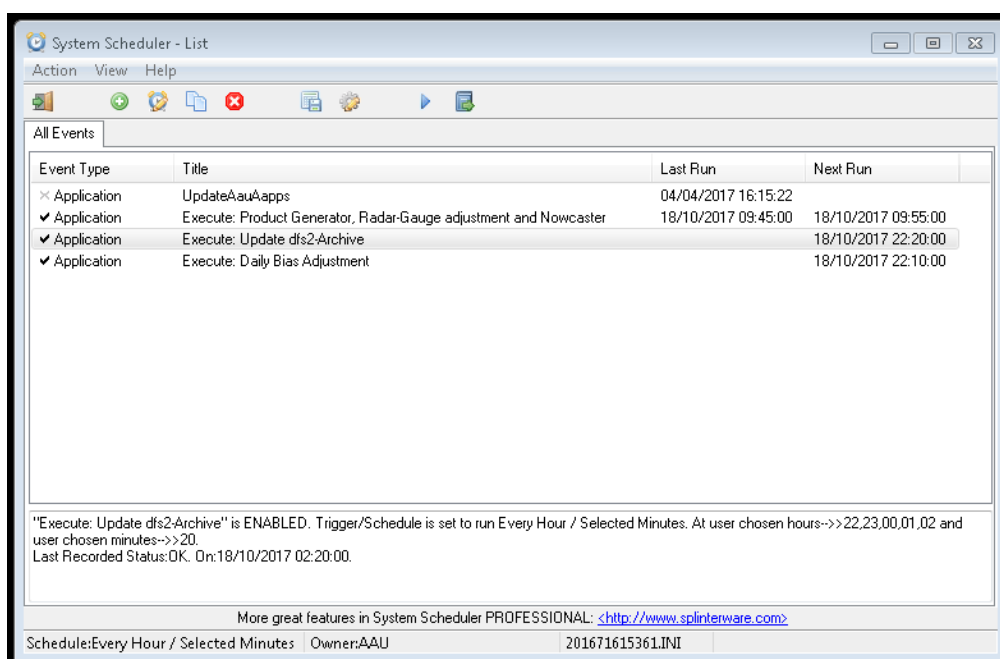
Da vejrradar anvender en indirekte metode til at måle nedbør, kan en lang række fejlkilder forekomme. Der måles i princippet på regndråbernes refleksion af mikrobølgestråling i det såkaldte C-båndsområde. Ved at antage Marshall-Palmer ligninger kan man omregne denne refleksion til en regnintensitet. Der vil ofte være andre kilder til refleksion, som kunne misfortolkes til også at være nedbør. For eksempel giver fugle og insekter refleksioner, som kan måles med en C-båndsradar. Eksterne sendere (mikrobølgekommunikationslink), andre radarer og sågar solen kan også registreres som refleksion. Dette håndteres ved at studere karakteristiske emitter linjer i de polære data og ved at studere tekstur i radarbilledet. Dette dækker over, at de fleste ikke-meteorologiske signaler har et karakteristisk udseende i de rå radardata, som er mulig at identificere med statistiske metoder. Det er derfor muligt at filtrere disse signaler væk, således at der kun er nedbør tilbage i målingerne. Det er selvsagt en omfattende procedure at justere disse filtre på en måde, hvor man ikke samtidig fjerner refleksioner, der faktisk stammer fra nedbør. Derfor kan der i de filtrerede data lejlighedsvist detekteres rester fra ikke-meteorologiske signaler. Disse er dog ofte meget kortvarige og udgør ikke en risiko for den samlede kvalitet.

Da radar bliver leveret som rå polære volumendata, er det ikke muligt direkte at overføre disse data til regnintensiteter i det hydrologiske beregningsnet. Det skyldes, at mikrobølgestråling

ikke udbreder sig i rette linjer i atmosfæren, samt at jorden krummer. Konkret betyder dette, at radarstrålens højde over jorden stiger med afstanden til radaren. Derfor anvendes der en geolokaliseringsmetode, hvor man projekterer de målte data ned på jorden med det same Datum, som den hydrologiske model anvender. De polære radardata transformeres først over til et kartesisk net, og hver celle i dette net lokaliseres med en længde og breddegrad på jordoverfladen. Det vurderes, at regnen kan fastlægges med en præcision på omkring 200 meter – afhængigt af vindhastighed og nedbørstype.

### 4.3 Aktivitet 3.3 – IT-plattform til levering af nowcast til DHI til videre hydrologisk og hydraulisk modellering

Efter at radardata er opsamlet, geolokaliseret, korrigeret for fejl, justeret mod regnmåler og nowcastet, kan de nu leveres videre til DHI's hydrologiske modeller. Dette gøres direkte på serveren ved at gemme data i en hierarkisk direktoriestruktur efter år, måned og dag. Inden data overføres, trækkes data ud for de relevante område for den hydrologiske model og gemmes som regnintensiteter i dsf-2 formatet.



Figur 21. System Scheduler, der organiserer afviklingen af de enkelte delprogrammer i nowcast systemet.

I forbindelse med døgnjusteringen (se afsnit 4.5) bliver arkivet overskrevet med mere opdaterede estimater på nedbøren. Dette gøres for at sikre den bedst mulig kalibrering af vejrradar data.

### 4.4 Aktivitet 3.4 - Etablering af datakommunikation for opsamling af data fra regnmålere samt etablering af nyt laser disdrometer

Der samles data fra i alt 13 regnmålere fordelt i oplandet for den hydrologiske model. Disse data samles i DIMS databasen og gøres tilgængelige for nowcast modellen. Disse data bruges til at justere vejrradarmålingerne på plads i forhold til jordobservationer. Som nævnt i afsnit 4.2 fortolkes radarobservationerne med Marshall-Palmer ligningerne. Disse giver et udmærket estimat på nedbørsintensiteterne. Men for at opnå den største præcision korrigeres disse estimater med en bias faktor, som er forholdet mellem nedbøren målt af en regnmåler på jorden og det vejrradarbaserede nedbørsestimat i atmosfæren over regnmåleren. På den

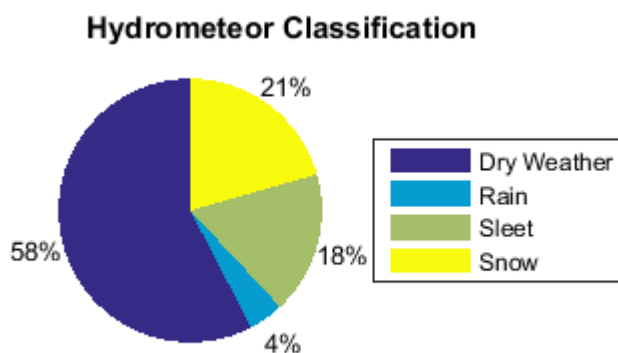
måde bruges de 13 regnmålere til at korrigere radarens nedbørsestimat alle de steder, hvor der ikke er en regnmåler.

Foruden traditionelle regnmålere er der også opstillet et laser disdrometer. Dette muliggøre at bestemme både dråbestørrelser og faldhastighed.



**Figur 22. Laser disdrometer placeret ved Vejle Spildevands renselanlæg.**

Fordelen er, at man kan sammenligne radarmålinger direkte med disdrometerets måling og få en mere nøjagtig bias justering. Instrumentet er også i stand til at bestemme nedbørstypen: Regn, slud, sne eller hagl.



**Figur 23. Eksempel på nedbørsfordeling den 8. januar 2016.**



Det kan ud fra figuren ses, at i 58% af tiden i dette døgn var det tørvejr, mens det regnede i 4% af tiden, og de resterende 39% var en blanding af sne og slud.

Dette kan være afgørende for den hydrologiske modellering, da sne kan lægge sig på jordoverfladen og først give anledning til forhøjet vandstand, hvis den smelter.

#### **4.5 Aktivitet 3.5 - Online kalibrering af radar ud fra regnmålere og disdrometer**

Det grundlæggende princip bag kalibrering af radar med regnmålere er en *mean field bias (MFB)*. Antagelsen er, at MFB er én generel faktor, der beskriver afvigelsen mellem radar nedbørsestimat og regnmåler. Det er i denne anvendelse valgt at antage, at lokale variationer i bias mellem regnmåler og radar er udtryk for måleusikkerhed og ikke en systematisk afvigelse. En systematisk afvigelse kunne teoretisk være muligt, hvis man befandt sig i et bjergigt område, hvor det regner forskelligt på bjergtoppen og i dalen. For Vejles vedkommende er vurderingen, at dette ikke er tilfældet, og at én fælles korrektionsfaktor (MFB) er det bedste at anvende.

Kalibreringen af vejrradardata foregår på to måder:

- Online, hvor regnmålerdata bruges til løbende justering under regnhændelsen.
- Offline, hvor der hvert døgn laves en samlet kalibrering for det sidste døgn.

Den første metode har den fordel, at den hele tiden optimerer kalibreringen mellem nedbør målt med radar og regnmåler. Ulempen er, at når man løbende gør dette, kan man ikke garantere, at der over et døgn er målt lige meget med radar og regnmåler. Dette kan være en udfordring for de hydrologiske modeller, da de baserer sig på overordnede massebalancer for vand i oplandet. Derfor er offline metoden udviklet til at sikre, at der er vandbalance på døgnniveau. Dette kan være særdeles nyttigt, da den hydrologiske model bruger mange dages observationer til at indkøre modellen, inden en vandstandsprognose kan beregnes. Ved at levere de bedste estimater på døgnnedbør får den hydrologiske model de bedste forudsætninger for de videre beregninger.

#### **4.6 Aktivitet 3.6 - Generering og analyse af vejrradarbaseret probabilistisk usikkerhedsvurdering (ensembler)**

En probabilistiske usikkerhedsvurdering baserer sig på princippet om, at fremtiden er usikker, og jo længere frem man forudsiger, des mere usikkert bliver nedbørsestimatet. Måden, denne usikkerhed realiseres på, er ved at generere forskellige ensemble medlemmer. Hvert medlem er et enkelt bud på, hvordan nedbøren vil udvikle sig i fremtiden. Når man har fx 100 ensemble medlemmer, kan man gennemregne disse scenarier med den hydrologiske model og se, hvilken usikkerhed på fx vandstand, der opstår.

Et fornuftigt antal ensembler, der skal beregnes i realtid, er mellem 100 og 1000 for at opnå en god statistisk usikkerhedsvurdering. Da den anvendte hydrologiske model er omfattende, er det ikke realistisk at gennemføre denne beregning i realtid. Det vil kræve et større antal kraftige computere, som skal afvikle modellerne parallelt for at kunne gøre dette. Det har vist sig ikke at være praktisk realiserbart i dette projekt.

For at vurdere dette er der lavet en forundersøgelse af betydningen ved at erstatte en ensemble-baseret usikkerhedsvurdering med en deterministisk nowcast. Dette er gjort ved at sammenligne variationer i retning og regnintensitet fra *Hydrocast* ensemble generatoren (system udviklet i Hydrocast projektet, <http://hydrocast.dhigroup.com/>), hvor både DHI og AAU deltog. Vurderingen er, at de enkelte ensemble medlemmer vil variere så lidt for hele det hydrologiske

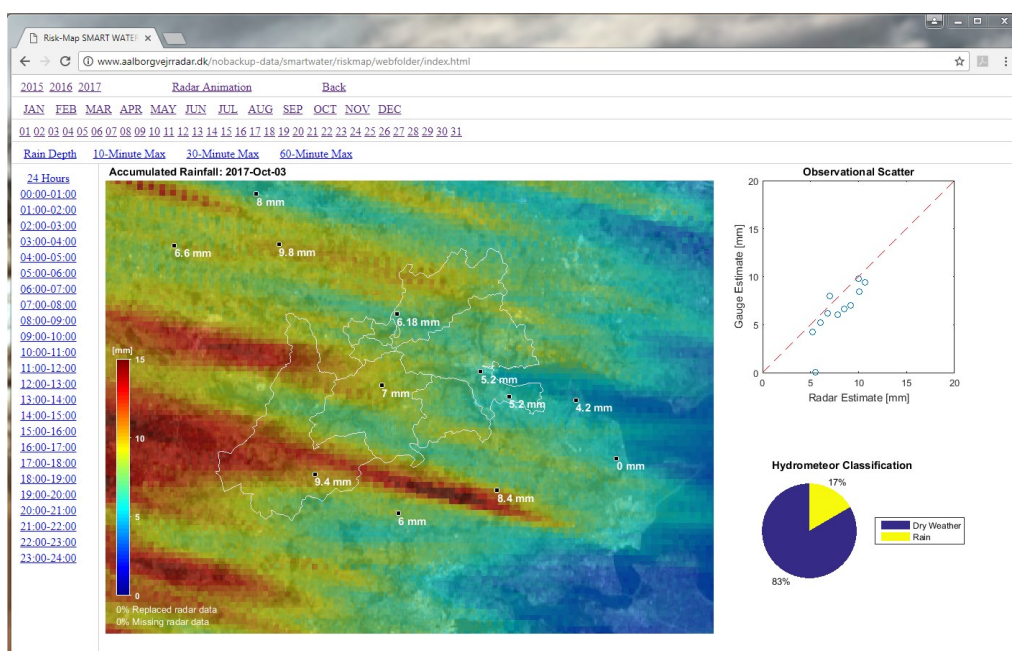
opland, at usikkerheden vil være mindre end usikkerheden omkring kalibrering af vejrradar mod regnmåler (se afsnit 4.2 og 4.5).

Usikkerheden på nedbørsestimatet varetages derfor primært gennem Risk assessment map, beskrevet i afsnit 4.7.

#### 4.7 Aktivitet 3.7 - Risk assessment map til visualisering af områder med ekstrem nedbør

Til vurdering af risikoen for ekstrem nedbør er der udviklet et såkaldt risk map. Det samler alle de målte data og visualiserer dem på én intern hjemmeside. Da DMI har rettighederne til de rå radardata, kan disse data ikke lægges frit ud på internettet, men der er direkte adgang for Vejle Kommune og Vejle Spildevand.

På hovedsiden kan man altid se det igangværende døgn, hvor systemet akkumulerer nedbøren en time ad gangen. Man kan vælge år, måned og dag og ved at flytte musen henover tidspunkterne vil billedet opdatere med akkumuleret timenedbør. Samtidig kan man se typen af nedbør målt med laser disdrometer, samt hvor godt regnmåler og vejrradar stemmer overens i den time. Man kan også vælge at se for hele døgnet på én gang.

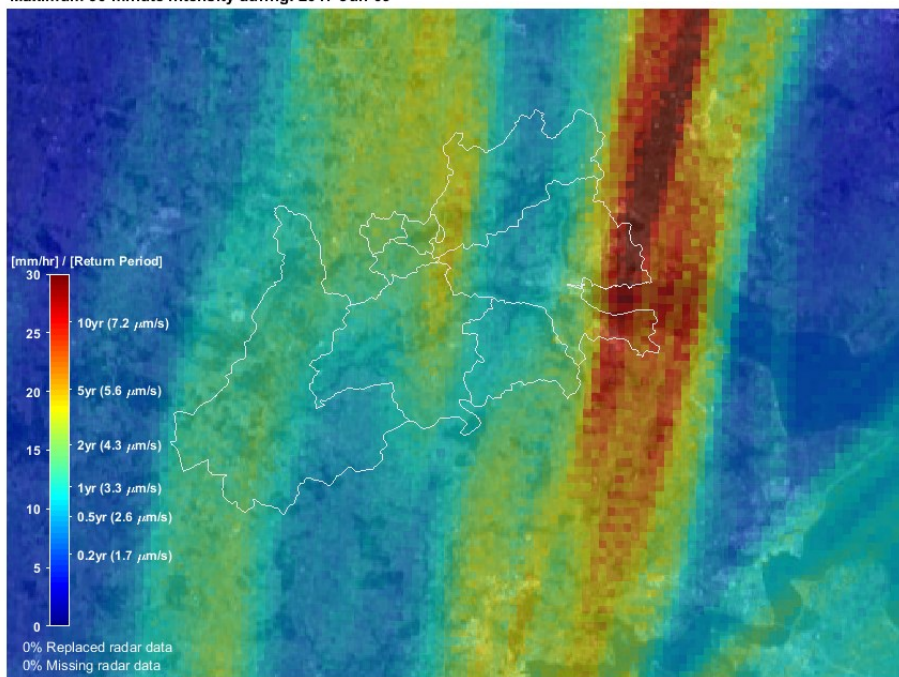


Figur 24. Hovedmenu for Risk Map.

Den akkumulerede nedbør giver et udmærket indtryk af hændelsens risiko. Derudover er det muligt på baggrund af hhv. 10 minutters, 30 minutters og 60 minutters middelintensitet at estimere gentagelsesperioden for en given regn. Denne vurdering er baseret på mange års regnmålerdata fra SVK regnmålersystemet.

Som eksempel vises der her en 60 minutters middelintensitet fra den 9/6–2017.

Maximum 60-minute intensity during: 2017-Jun-09

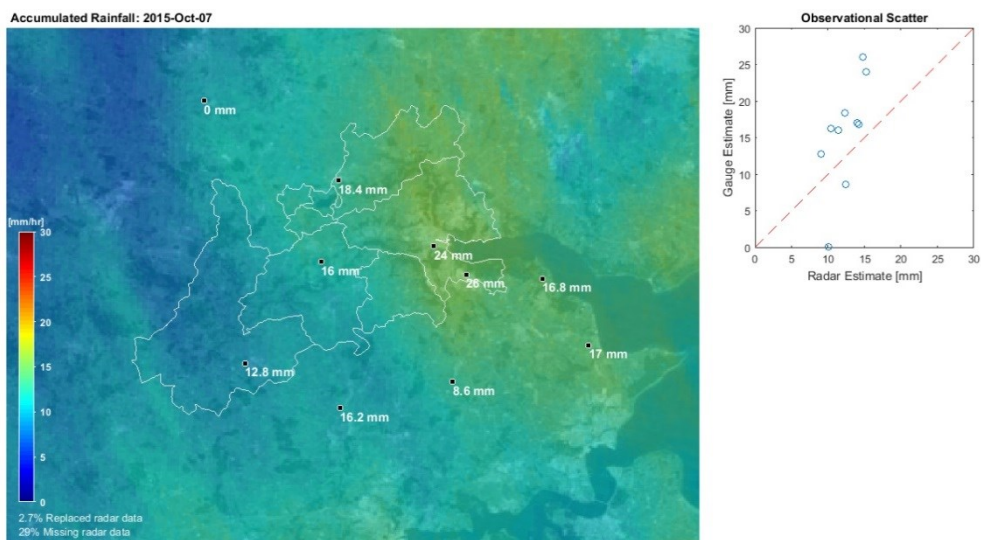


Figur 25. Eksempel på gentagelsesperiode for 60 minutters middelintensitet.

Som det kan ses af resultaterne, ligger gentagelsesperioden for denne hændelse mellem 1 og 2 år for langt det meste af Vejle Å's og Grejs Å's opland. I området nær Vejle by når regnen en gentagelsesperiode, der er tæt på 20 år. Det betyder, at den samme regnhændelse, der er forholdsvis harmløs i det meste af området, kunne true Vejle by. Dette illustrerer potentialet ved at bruge vejrradar til denne form for risikoanalyse.

#### 4.8 Aktivitet 3.8 - Automatisk kvalitetssikring og overvågning af online system

Foruden at beskrive mængden af nedbør og risikoen kan Risk Map også bruge til løbende at overvåge kvaliteten af data. I nedenstående eksempel fra den 7/10–2015 er det muligt at se, at der mangler 29% af dette døgn's radardata. Det skyldes typisk, at der ikke er leveret data fra DMI's radar. Nowcast systemet vil være i stand til at erstatte enkeltstående radarmålinger (udfald), så længe det er mindre end tre på hinanden følgende observationer. Dette gøres ved at erstatte en manglende måling med en forudsat nedbør fra nowcast systemet. Da nowcast'en kun regner to timer frem, vil et længerevarende udfald være umuligt at erstatte. I det konkrete eksempel er det lykkedes at erstatte 2,7% af data på denne måde.

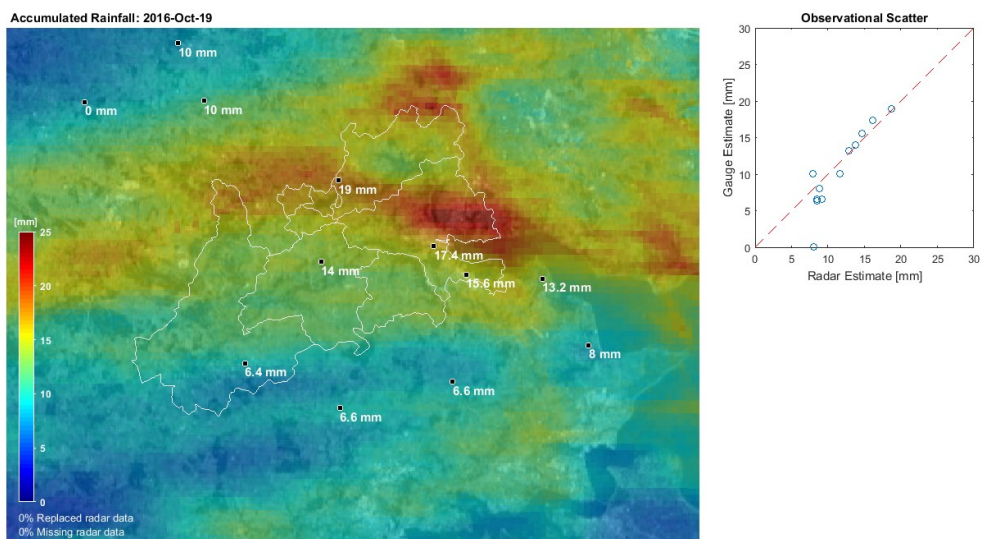


**Figur 26. Eksempel på et mindre godt datasæt.**

Ud fra samme eksempel kan det også observeres, at der er en enkelt regnmåler i den nordøstlige del af området, der ikke har registreret regn, selv om radaren antyder, at det har regnet ca. 10 mm. I disse tilfælde indgår denne regnmåler ikke i kalibreringen af radaren.

Skatter plottet til højre angiver, hvor tæt regnmåler og vejrradar er i forhold til nedbørsestimat. Set over korte tidsintervaller (timer) vil der altid være en forskel mellem de to observationer. I det konkrete eksempel er der en tendens til underestimering af nedbøren med vejrradar.

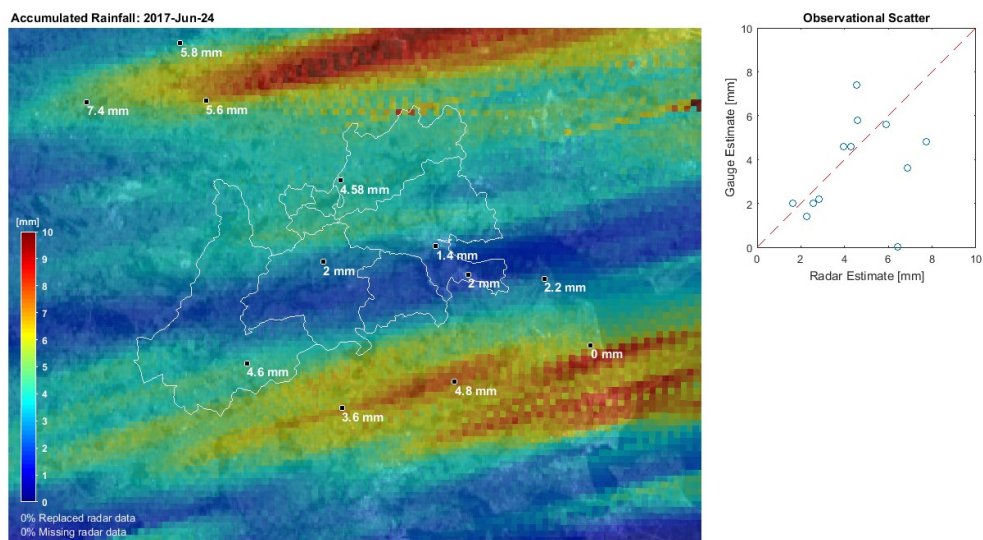
Den 19/10-2016 er et eksempel på, at radar og regnmåler har en god overensstemmelse, selvom regnen varierer med en faktor 3 mellem højest og lavest målte nedbør i oplandet.



**Figur 27. Eksempel på et meget godt datasæt.**

En enkelt regnmåler har et udfald og er antaget at være defekt i denne periode.

Omvendt kan der være perioder, hvor regnmåler og vejrradar afviger mere fra hinanden. Et eksempel er den 24/6-2015. Her angiver regnmålerne generelt den samme nedbør som vejrradaren.



**Figur 28. Eksempel på et acceptabelt datasæt.**

Igen er der en regnmåler, der har udfald og ikke er medtaget i kalibreringen. Men hvor eksemplet fra figur 24 viser en ensidig bias, har dette eksempel en bias tæt på 1. Det betyder, at nedbøren i gennemsnit er korrekt bestemt. Det er også muligt at se, at nedbøren inden for det hydrologiske opland varierer mellem 2 og 4,6 mm. I dette område er der en meget god sammenhæng mellem regnmåler og vejrradar.

Samlet set er der dog god overensstemmelse mellem radar og regnmåler. Radarens evne til at måle nedbør mellem regnmålere er uovertruffen og er et stærkt værktøj til at estimere fladenedbør over et større område.

# 5. Arbejdspakke 4: Analyse af fremtidens styringspotentiale i øvre del af Grejs Å

## 5.1 Aktivitet 4.1 - Modelbaserede scenarie-analyser

Potentialet for styring i den øvre del af Grejs Å er dels modelleret med de etablerede modeller, og dels blev der draget nytte af den erfaring og viden, som Orbicon og Krüger har på området. De to nævnte rådgivere deltog således i en workshop, hvor der var fokus på styring dels i oplandet og dels i Vejle by. Programmet for workshoppen afholdt den 7/1-2016 var følgende:

10:00-10:15	<i>Kort velkomst og præsentation af rammerne for workshoppen v/ Lisbeth Birch Pedersen, DHI</i>
10:15-12:30	<i>Styringspotentiale af vand i oplandet (opstrøms Grejs Planteskole)</i> <ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Identifikation og udpegning af potentielle områder til forsinkelse af vandet opstrøms Grejs Planteskole v/ Bo Klinkvort Kempel, Orbicon</i></li><li>• <i>Fælles workshop med fokus på identifikation af tre mest sandsynlige scenarier, der kan medvirke til at reducere/forhindre oversvømmelse i Vejle by</i></li></ul>
12:30-13:00	<i>Frokost</i>
13:00-15:00	<i>Styringspotentiale af vandet i byen</i> <ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Kort præsentation af tidligere modelanalyser v/ Nikolaj Mølbye, Krüger (20 min.)</i></li><li>• <i>Kort præsentation af styringsmulighederne v/ Vejle Spildevand (10 min.)</i></li><li>• <i>Introduktion til styring v/ Lisbeth Birch Pedersen, DHI (10 min.)</i></li><li>• <i>Fælles workshop med fokus på styring i tre niveauer, og hvorledes dataudfald skal håndteres i praksis, så der opnås et robust system.</i><ul style="list-style-type: none"><li>○ <i>Avanceret styring (radar forecast, modeller og online sensordata)</i></li><li>○ <i>Basis styring (online sensordata)</i></li><li>○ <i>Nødstyring</i></li></ul></li></ul>
15:00-15:30	<i>Opsamling og afsluttende diskussion</i>

De væsentligste resultater af workshoppen var:

1. Oversvømmelser i Vejle midtby vil kunne undgås/reduceres ved at sikre, at vandføringen ved Grejs Planteskole ikke overstiger ca. 6 m<sup>3</sup>/s
2. Det er muligt at tilbageholde store vandmængder opstrøms Grejs Planteskole
3. Der skal arbejdes videre med de 5 udpegede lokaliteter for at undersøge det fulde potentiale af de udpegede områder.
4. Der forventes størst reduktion i oversvømmelse pr. investeret krone ved at investere i oplandsløsninger frem for tiltag lokalt i Vejle midtby (gælder kun oversvømmelse relateret til Grejs Å).

## 5.2 Aktivitet 4.2 - Udfærdigelse af rapport

Rapportering af denne aktivitet foreligger i form af et referat af workshoppen. Referat fra workshoppen er som følger:

# Referat af workshop d. 7/1 2016

## Styr på vandet i Vejle

**Lokalitet: Vejle Spildevand, Toldbodvej 20, 7100 Vejle**

### Deltagere:

Vejle Kommune: Ulla-Pia Geertsen, Morten Smith, Paul Landsfeldt, Claus W. Petersen

Vejle Spildevand: Gitte Bisgaard, Kjartan Gunnarsson Ravn

Aalborg Universitet: Michael Rasmussen, Jesper Ellerbæk Nielsen

Krüger: Nikolaj Mølbye

Orbicon: Henrik Vest Sørensen, Bo Klinkvort Kempel, Lene Smith Riis, Anja Thomsen

DHI: Morten Rungø, Torsten Vammen Jacobsen, Lisbeth Birch Pedersen (referent)

## Styringspotentiale af vand i oplandet (opstrøms Grejs Planteskole)

- Præsentation af Orbicons analyser af muligheder for tilbageholdelse af vandet opstrøms Grejs Planteskole v/ Bo K. Kempel (vedhæftet som pdf).
  - Tilbageholdelsesbehov analyseret for tre forskellige maks. flowgrænser:
    - ca. 60.000 m<sup>3</sup>, hvis der maksimalt må strømme 8 m<sup>3</sup>/s ved Grejs Planteskole.
    - ca. 160.000 m<sup>3</sup>, hvis der maksimalt må strømme 6 m<sup>3</sup>/s ved Grejs Planteskole.
    - ca. 350.000 m<sup>3</sup>, hvis der maksimalt må strømme 4 m<sup>3</sup>/s ved Grejs Planteskole.
  - Fire områder udpeget som mulige overfladebassiner, idet det oplagte centrale volumen langs med jernbanen og Lerbæk Østre Skovvej er beskyttet rigkær<sup>1</sup> med habitat status.
  - Muligt at tilbageholde ca. 380.000 m<sup>3</sup> opstrøms Grejs Planteskole, hvilket vil betyde en signifikant reduktion i peak belastninger baseret på historiske hændelser ved både planteskolen (fra 11 m<sup>3</sup>/s → 5 m<sup>3</sup>/s) og ved indløb til Vejle by (Abelones Plads) (fra 17 m<sup>3</sup>/s → 10 m<sup>3</sup>/s).
  - Estimeret overfladebassin volumen (ca. 380.000 m<sup>3</sup>) vil friholde Vejle midtby for oversvømmelser forårsaget af Grejs Å for den analyserede hændelse (september 2015).
- Deltagerne deltes derefter i to grupper til diskussion af mulige løsninger omkring tilbageholdelse af vand opstrøms Grejs Planteskole:
  - Der blev udpeget et ekstra muligt område (umiddelbart opstrøms planteskolen). Anvendelse af dette område vil kræve ekspropriering af et antal ejendomme. Ved ekstra udgravning af området vurderes det at kunne fungere som primær bassin og samtidig være rekreativt område.
  - Områderne skal fyldes i en prioriteret rækkefølge ud fra sårbarhed, nedbør og tømningseffektivitet.
  - Dybe bassiner vil være at foretrække frem for flade

<sup>1</sup> Rigkær er en naturtype, der består af moser og enge med vandmættet jordbund med mere eller mindre kalkholdigt grundvand. Hvor engen afgræsses eller slås, er vegetationen åben og lavtvoksende med små stararter og mosser. En sjælden variant er ekstremrigkær, som findes på særligt kalkrig bund.

- Muligheden for at genetablere regulering ved Fårup Sø bør undersøges nærmere
  - Effekten vurderes at være begrænset, da afstrømningsarealet til Fårup Sø udgør en begrænset del af det samlede areal.
- Oplandsbassiner skal være integreret i den urbane styring
  - Skalaforskellen mellem oplandet og byen i afstrømningstid og påkrævet varslingsstid kræver forskellige input
    - Oplandsstyring kræver forecast data af nedbør (baseret på data fra Numerical Weather Prediction Models - NWP) og ikke kun nowcast data fra radar, da dennes prognoseperiode er for kort
  - Generel diskussion af forskellige typer styring, herunder adaptiv og prædiktiv, og vigtigheden af at inkludere usikkerhederne i valget af styringsmetoder.
  - Det blev påpeget at indtænke nødoverløb i design af styringer.

#### **Sammenfatning af Styringspotentiale af vand i oplandet:**

1. Oversvømmelser i Vejle midtby vil kunne undgås/reduceres ved at sikre, at vandføringen ved Grejs Planteskole ikke overstiger ca. 6 m<sup>3</sup>/s
2. Det er muligt at tilbageholde store vandmængder opstrøms Grejs Planteskole
3. Der skal arbejdes videre med de fem udpegede lokaliteter for at undersøge det fulde potentiale af de udpegede områder.
4. Der forventes størst reduktion i oversvømmelse pr. investeret krone ved at investere i oplandsløsninger frem for tiltag lokalt i Vejle midtby (gælder kun oversvømmelse relateret til Grejs Å).

#### **Styringspotentiale af vandet i byen:**

- Præsentation af oversvømmelsesanalyser i Vejle by v/ Nicolaj Mølbye, Krüger (vedhæftet som pdf)
  - Analysen er baseret på en MIKE URBAN model, hvor Vejle Å, Grejs Å, Omløbsåen og Mølleåen er inkluderet ved hjælp af åbne tværsnitsprofiler.
    - Analysen er udført uden nedbør over byen – kun nedbør fordelt over oplandet
    - Manningtal anvendt for Mølleåen er behæftet med stor usikkerhed
    - Flow er +40% ved Abelones Plads ift. flow ved. Planteskolen
- Generel diskussion omkring analyseresultaterne og de anvendte forudsætninger:
  - Sandsynlighed for sammenfald mellem ekstrem regn, forøget afstrømning i åerne og forhøjet vandstand i fjorden estimeret til 1:10.000 år af COWI
  - Udvidelse af kapaciteten under Dæmningen (Mølleåen) med et 3. rør har kun begrænset effekt til at reducere oversvømmelse
  - Ønsker om måling af flow og vandstand i Mølleåen og Omløbsåen til bestemmelse af Manningtal og dermed minimering af modelusikkerheder
    - Det blev påpeget, at energimåling på pumperne vil kunne bruges til estimering af flow i Omløbsåen, når slusen er lukket.

#### **Sammenfatning af styringspotentiale af vandet i byen:**

1. Slusen er et kloakprojekt med det formål at sikre bedre afløbsforhold i Vejle
2. Styringen skal tage hensyn til følgende:
  - Slusestyring skal sigte efter mindst mulig lukketid af hensyn til faunapassage
  - Der skal være minimum 10 cm åbning under stigbordet v. Abelones Plads, hvis slusen er lukket af hensyn til faunapassagen.
  - Styringen ved Abelones Plads skal tage højde for strømningshastigheden under stigbordet for at sikre faunapassagen.
3. Styringsprioriteringen er en politisk beslutning, der skal afklares i samarbejde mellem Vejle Kommune og Vejle Spildevand
  - Der skal prioriteres ift. faunapassage, oversvømmelse og aflastninger fra afløbssystemet.



## Sammenfatning af workshop:

Følgende tiltag blev i fællesskab identificeret som essentielle opgaver:

- Udarbejdelse af styringsbeskrivelser
- Fortsættelse af arbejdet med at styre vandet i oplandet og udarbejdelse af business case for opstrøms løsning
  - Afklare, hvor meget tilbageholdelsen af 1 m<sup>3</sup> vand koster
- Undersøgelse af manningtallet i Mølleåen
- Effekten af brinkforhøjelsesprojektet skal afklares – og om en evt. forlængelse af kanten vil have større effekt.

## 6. Arbejdspakke 5: Idriftsættelse og overdragelse

### 6.1 Aktivitet 5.1 - Idriftsættelse og test af systemet

Efter afslutning af udviklingen af SMART Vand Vejle systemet er dette sat i drift hos Vejle Spildevand med adgang for udvalgte medarbejdere fra Vejle Kommune. Systemet muliggør, at idriftsættelsen sker gradvist, blandt andet hvad angår graden af automatisering af styringen af sluse og fordelerbygværk. Således var der i den første fase af idriftsættelsen specielt fokus på at opnå fortrolighed med systemet og på at få opbygget en tillid hos de daglige brugere til, at nowcasting metoder og hydrologiske/hydrauliske modeller leverer forecasts med god overensstemmelse med observationer. Pga. af en række forhold, som lå uden for dette projekts kontrol, fandt idriftsættelsen først sted få uger før projektets afslutning. Der har derfor ikke inden for projektperioden været reel mulighed for at opbygge tilstrækkelig erfaring og fortrolighed med systemet til, at fuld automatiseret styring er sat i daglig drift. SMART Vand Vejle systemet er fuldt implementeret og alle dataflows, nowcasts, modelberegninger og styringsbeslutninger er idriftsat og fungerer fuldt ud i realtid, men ikke alle styringsbeslutninger var ved projektafslutningen sat i fuld automatiseret drift. I takt med, at der opbygges yderligere erfaring, vil graden af fuld automatiseret styring blive øget.

### 6.2 Aktivitet 5.2 - Udarbejdelse af systembeskrivelse og dokumentation

Løbende gennem projektperioden er der udarbejdet dels dokumenter med kravspecifikation og dels beskrivelser af systemets konfiguration og funktion. De vigtigste dokumenter er følgende:

Dato	Dokument
22. okt 2016	Styringer sluse, pumpestation, spjæld. Styringer – overordnet strategi
Juni 2017	Dokumentation for konfiguration af DIMS.CORE og MIKE OPERATIONS
7. juni 2017	Træningsmateriale fra kursus om drift af systemet
13. juni 2017	Træningsmateriale fra kursus om daglig brug af systemet

### 6.3 Aktivitet 5.3 - Træningskurser

I forbindelse med idriftsættelse og overdragelse er der afholdt følgende to træningskurser:

Dato	Indhold	Deltagere	Instruktører
7. juni 2017	Kursus om drift af systemet	Kjartan Gunnarsson Ravn, VS Claus D. Christensen, VS Michael Rottbøll Rosenberg, VS Henrik Pedersen, VS	Arne Møller, DHI Morten Rungø, DHI
13. juni 2017	Kursus om daglig brug af systemet	Ulla Pia Geertsen, VK Paul Landsfeldt, VK Annette Holm Bonde, VK Finn Toft Jensen, VK Laila Thomsen, VK Kjartan Gunnarsson Ravn, VS Claus D. Christensen, VS	Jacob Karmann Larsen, DHI Morten Rungø, DHI

		Michael Rottbøll Rosenberg, VS Henrik Pedersen, VS	
--	--	---	--

#### **6.4 Aktivitet 5.4 - Aflevering**

Den formelle aflevering af systemet fandt sted i juni 2017 i forbindelse med idriftsættelse som nævnt i afsnit 6.1. Efterfølgende har de daglige brugere af systemet hos Vejle Kommune og Vejle Spildevand konstateret, at kalibreringen af oplandsmodellen MIKE SHE/11 ikke er fuldt tilstrækkelig. Som omtalt i afsnit 2.1 skyldes det, at det inden for projektperioden ikke har været muligt baseret på radarmålinger at etablere et nedbørsdatasæt, som er tilstrækkeligt langt og sammenhængende til, at dette kan danne grundlag for at simulere en længere periode i størrelsesordenen et år, som typisk er nødvendig for at kalibrere hydrologiske modeller med den relativt lange hukommelse, de typisk har.

Med henblik på dels at forbedre systemets robusthed over for radarudfald og dels at forbedre grundlaget for beslutning om idriftsættelse af fuldt automatiseret styring har projekts parter indgået aftale om at gennemføre følgende aktiviteter i 4. kvartal 2017 – altså efter MUDP projektets formelle afslutning:

1. AAU: Der skal genereres en et år lang vejrradar dataserie, som er kalibreret mod regnmålere – i det omfang data er tilgængelig.
2. AAU: Der skal udvikles og implementeres en metode, der kan erstatte vejrradar data med interpolerede eller midlede punktmålinger, således at den samlede model kan afvikles i tilfælde af udfald af vejrradar.
3. DHI: På baggrund af den et år lange vejrradar dataserie gennemføres en re-kalibrering af MIKE SHE & MIKE 11 modellerne.
4. DHI: Der introduceres data assimilation for vandstand i MIKE 11 modellen på op til 5 lokaliteter. Data assimilation indebærer, at modellen i de udvalgte punkter løbende og i realtid korrigeres med henblik på at minimere differencen mellem målt og beregnet vandstand.

## SMART Vand Vejle

Nærværende rapport udgør den faglige slutrapportering af projektet "Udvikling af automatiseret realtids varslings- og styringssystem af Vejle Å, Grejs Å og Omløbsåen til klimasikring af Vejle By", også benævnt 'SMART Vand Vejle'. Det overordnede projektformål har været at udvikle og demonstrere et IT-baseret varslings- og styringssystem af kritiske flow og vandstande i søer, åer og hav for at sikre infrastruktur og boliger mod uønskede oversvømmelser. Vejle By er valgt som følge af dens placering ved bunden af Vejle Fjord, og fordi byen gennemløbes af flere åer, der historisk har forårsaget oversvømmelser. Byen er tæt bebygget og placeret i meget kuperet terræn, hvilket sikrer en bred og komplet testning og demonstration af det integrerede varslings- og styringssystem.



Miljøstyrelsen  
Haraldsgade 53  
2100 København Ø

[www.mst.dk](http://www.mst.dk)