# Model Predictive Control of a Sewer System

June 14, 2018

Group 1030

Jacob Naundrup Pedersen Thomas Holm Pilgaard





Group 1030

Introduktion

Kloakker og rensningsanlæg generelt

Problem formulering

System beskrivelse

Løsninger og begrænsninger

Modellering

Simulering

Struktur

Preissmann

Implementation

Control

Results

Discussion

Conclusion



# Typisk opbygning af kloak ledning

Agenda

Group 1030

Introduktion

Kloakker og rensningsanlæg generelt

Problem formuler

System beskrive

Løsninger og

begrænsning

Modellering

Simulering

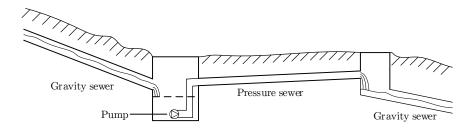
Struktur

Preissmar

Implementati

Dooult

Discussion





# Tilstande i kloakken

Agenda

Group 1030

### ntroduktion

Kloakker og rensningsanlæg generelt

Droblam formularis

### System beskrivelse

Løsninger og

### Løsninger og

begrænsning

### Modellering

## Simulering

Struktur

Preissman

Implementatio

Control

Results

Discussion

Conclusion

 $\blacktriangleright \ \mathsf{Aerob} \to \mathit{O}_2 \to \mathit{H}_2\mathit{O}$ 



# Tilstande i kloakken

Agenda

Group 1030

### ntroduktion

Kloakker og rensningsanlæg generelt

renorming damage genere

System beskrivelse

System beskine

Løsninger og

begrænsning

Modellering

Simulering

Struktur

Preissmann

Implementation

implementati

Contro

nesuit

\_.....

Conclusion

► Aerob 
$$\rightarrow$$
  $O_2$   $\rightarrow$   $H_2O$ 

► Anaerob  $\rightarrow SO_4^{-2} \rightarrow H_2S$ 



# Tilstande i kloakken

Agenda

Group 1030

Kloakker og rensningsanlæg generelt

## Modellering

► Aerob 
$$\rightarrow$$
  $O_2$   $\rightarrow$   $H_2O$ 

► Anaerob 
$$\rightarrow SO_4^{-2} \rightarrow H_2S$$

► Anoxisk  $\rightarrow NO_3^- \rightarrow N_2$ 



# Udfordringer ved spildevands rensning

Agenda

Group 1030

### ntroduktion

Kloakker og

rensningsanlæg generelt

Froblem formulem

System beskrivel:

. . .

Løsninger og

begrænsning

Modellering

\_\_\_\_\_

Struktur

Preissman

Implementation

.

COITE

- ► Virksomheds besøg ved Fredericia Spildevand og Energi A/S.
  - Større udledninger uden varsel



# Udfordringer ved spildevands rensning

Agenda

Group 1030

### ntroduktion

Kloakker og rensningsanlæg generelt

Problem formulei

System beskrive

System beskrive

Løsninger og

begrænsnin

Modellerin

Simulem

Droinomon

Implementati

Contro

Results

DISCUSSIO

- ► Virksomheds besøg ved Fredericia Spildevand og Energi A/S.
  - Større udledninger uden varsel
  - Problemer for aerobe bakterier



# Udfordringer ved spildevands rensning

Agenda

Group 1030

### ntroduktion

Kloakker og rensningsanlæg generelt

\_\_\_\_\_

System heskrivel

System beskriver

Løsninger og

Modellerin

Cimularina

Struktur

Preissman

Implementati

.

\_

Discussion

- ► Virksomheds besøg ved Fredericia Spildevand og Energi A/S.
  - ► Større udledninger uden varsel
  - ▶ Problemer for aerobe bakterier
  - Andre forstyrelser



# Problem formulering

Agenda

Group 1030

Problem formulering

How can a simulation environment be constructed, which mimic the behavior of a real sewer system, where MPC is utilized as the control scheme to obtain stable sewage output such that optimal performance can be obtained from a WWTP.



# Udgangspunkt i et virkeligt setup

### Agenda

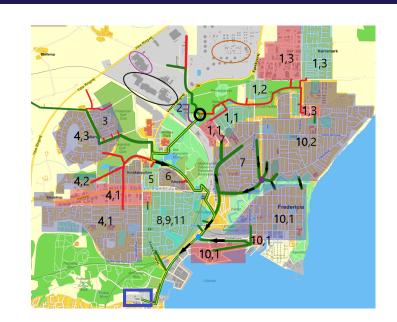
Group 1030

### System beskrivelse

### Modellering

### Simulering

Results





# Udgangspunkt i et virkeligt setup

### Agenda

Group 1030

### troduktion

Kloakker og

Droblem formularing

### System beskrivelse

Løsninger og

### bogiconorning

Modellering

### \_\_\_\_\_

Simulerin

O I UKIUI

Implementat

Control

Results

Discussion

- Data fra industri.
- Flow profiler af beboelse og mindre industri.



Group 1030

ntroduktion

Kloakker og reneningeanlæg gene

Problem formule

System beskrivelse

System beskrives

Løsninger og

begrænsninger

Modellering

....

Simulering

Struktur

Preissman

Implementation

Control

Results

Discussion

Conclusion

► Indsættelse af tank.



Group 1030

System beskrivelse

Løsninger og begrænsninger

Modellering

Simulering

Results

- Indsættelse af tank.
- ► Afgrænse simulering til enkelt kemisk component.



Group 1030

### System beskrivelse

Løsninger og

begrænsninger

### Modellering

- Indsættelse af tank.
- Afgrænse simulering til enkelt kemisk component.
- Runde kloak rør.



# 4 modeller

## Agenda

Group 1030

### ntroduktio

rensningsanlæg gene

Problem formulering

### System beskrivelse

Løsninger og

### . .

## Modellering

Simulering

Preissmann

Implementatio

### Implementatio

Control

Results

Discussion

- ► Kloak ledning.
- Transport af concentrat i kloak ledning.
- Sammenkobling af kloakledninger.
- ► Tank.



Group 1030

### stroduktion

Kloakker og rensningsanlæg gene

Problem formulering

### System beskrivels

Løsninger og

### begrænsninger

### Modellering

Simulering

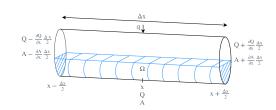
Draiceman

Implementati

### implement

Contro

Results





Group 1030

### ntroduktion

Kloakker og rensningsanlæg gene

Problem formulerin

### System beskrivels

Løsninger og

### begrænsninger

# Modellering

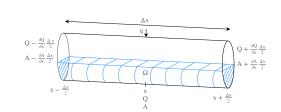
Simulering

Oli UKIUI

Preissmann

Implementa

Contro





Group 1030

### ntroduktion

Kloakker og rensningsanlæg gene

Problem formulering

### System beskrivel

Løsninger og

### begrænsninger

# Modellering

Simulering

Projesmann

Implementat

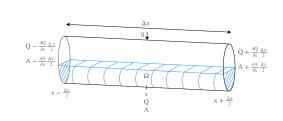
### Contro

Result

DISCUSSIO

Conclusion

Approksimationer af momentum ligningen.





# Transport af koncentrat

### Agenda

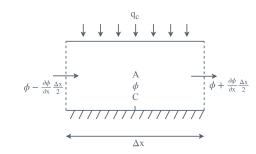
Group 1030

### System beskrivelse

## Modellering

Results

$$A \cdot \frac{\partial C}{\partial t} + Q \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = 0$$





# Transport af koncentrat

### Agenda

Group 1030

### ntroduktion

Kloakker og

Droblem formularing

### System beskrivelse

Løsninger og

### begrænsninger

## Modellering 1

riodellering

Struktur

Preissmann

### Implementation

0 . . . . . . .

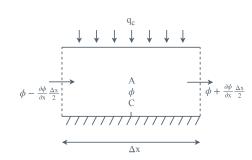
Result

Discussion

Conclusion

$$A \cdot \frac{\partial C}{\partial t} + Q \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = 0$$

ightharpoonup Afhænger af kendt A og Q.





# Sammenkobling af kloak ledninger

## Agenda

Group 1030

### ntroduktion

Kloakker og

Problem formularing

### System beskrivelse

Løsninger og

### begrænsninger

Modellering

Simulering

Preissmann

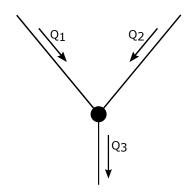
Implementatio

Control

Results

DISCUSSIO

$$\blacktriangleright Q_3 = Q_1 + Q_2$$





# Sammenkobling af kloak ledninger

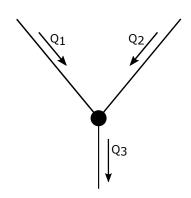
## Agenda

Group 1030

### Modellerina

$$\blacktriangleright \ Q_3 = Q_1 + Q_2$$

$$C_3 = \frac{C_1 \cdot Q_1 + C_2 \cdot Q_2}{Q_1 + Q_2}$$





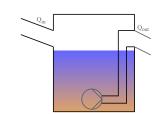
Group 1030

### System beskrivelse

### Modellering

Implementation

Results





Group 1030

### ntroduktion

rensningsanlæg gen

Problem formulering

### System beskrivels

Løsninger og

### begrænsninger

### Modellering

Struktur

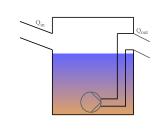
Preissmann

Implementa

Contro

Result

DISCUSSIO





Group 1030

### ntroduktio

Kloakker og

Droblom formularing

### System beskrivelse

Løsninger og

### Losiiiiger og

bogreonomi

## Modellering

# Simulering

Struktur

Implementation

Control

Results

Discussion

Conclusion

# ► Intialisering

► Opsætning af komponenter.



Group 1030

### Introduktio

rensningsanlæg gene

Problem formulering

### System beskrivelse

Løsninger og

### begrænsninger

Modellering

### Modellerii

## Simulering

### Struktur

Preissmann

Implementatio

.

- - - -

Discussion

Conclusion

# ► Intialisering

- Opsætning af komponenter.
- System i steady state.



Group 1030

### System beskrivelse

Modellering

## Simulering

### Struktur

# ► Intialisering

- Opsætning af komponenter.
- ► System i steady state.
- **▶** Simulering



Group 1030

### Introduktio

rensningsanlæg gene

Problem formulering

### System beskrivelse

Løsninger og

Modellerin

Struktur

### Struktur

Preissmann

### Implementatio

Control

Discussion

Conclusion

# ► Intialisering

- ► Opsætning af komponenter.
- ► System i steady state.
- Simulering
- ► Iterativ beregning af komponenterne



Group 1030

### Introduktio

rensningsanlæg gene

Problem formulering

### System beskrivelse

Løsninger og

Modellerin

### WOOGCHCIII

Simulering

### Struktur

Preissman

Implementation

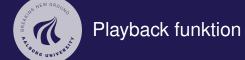
### ...pioiiioii

Discussi

Conclusion

# Intialisering

- Opsætning af komponenter.
- ► System i steady state.
- Simulering
- Iterativ beregning af komponenterne
- Gennemgang af resultat



Group 1030

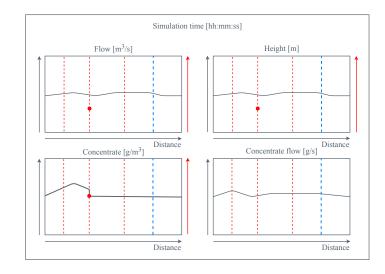
### System beskrivelse

Modellering

Struktur

### Implementation

Results





# Preissmann basic

### Agenda

Group 1030

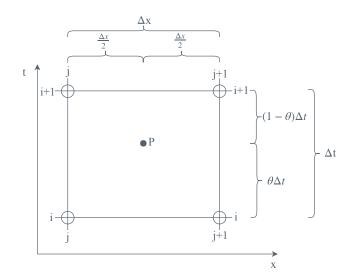
### System beskrivelse

## Modellering

Preissmann

## Implementation

Results





# Preissmann iteration

### Agenda

Group 1030

### ntroduktion

Kloakker og rensningsanlæg gene

1 Tobiom formationing

### System beskrivel

Løsninger og

### begrænsninger

Modellering

Simulem

### Preissmann

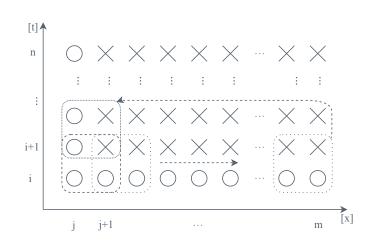
Implementation

### Implementation

Control

Results

\_\_\_\_\_\_





# Preissmann stabilitet/præcision

Agenda

Group 1030

### System beskrivelse

Modellering

Simulering

Preissmann

$$C_r = \frac{\sqrt{g \cdot \overline{H}} \cdot \Delta t}{\Delta x}$$



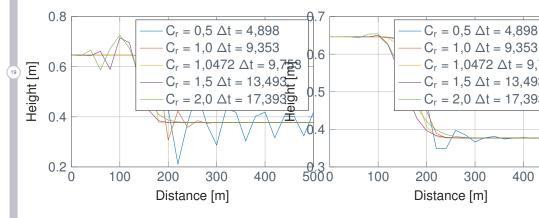
# Preissmann præcision



Group 1030

### Modellerina

Preissmann





Group 1030

### troduktion

Kloakker og

Problem formularing

### System beskrivelse

Løsninger og

### begrænsninger

Modellering

### Wodeliering

Struktur

### Implementation

•

Control

Results Discussion

Conclusion

- Implementation
- Control
- Results
- ▶ Discussion
- ► Conclusion



Group 1030

### ntroduktion

Kloakker og

Droblom formularing

### System beskrivelse

Løsninger og

### begrænsninger

Modellering

### Simularina

Struktur

Preissman

### Implementation

Results

Discussio

Conclusion

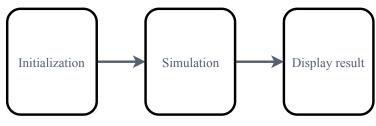


Figure: Chosen structure of simulation environment.



Group 1030

### Implementation

## 1. Pipe

- Length [m]
- Sections (Number of sections the pipe should be split in to)
- ► S<sub>b</sub> (Slope) [‰]
- $\triangle x = \text{Length/Sections [m]}$
- ▶ Diameter [meter]
- ► Theta (parameter used in Preissmann scheme)
- $ightharpoonup Q_f[m^3/s]$
- Side/lateral inflow present
- Section location in data

## 2. Tank

- ► Size [m³]
- Height [m]
- ► Area = Size / Height [m²]
- ► Maximum outflow [m³/s]
- Section location in data

Table: List of parameters for pipe and tank.



Group 1030

ntroduktion Kloakker og

rensningsanlæg genere Problem formulering

System beskrivelse Løsninger og

begrænsninger

Modellering

Struktur

Preissmann

## Implementation

Control

Result

DISCUSSIO

Conclusion

Fields	length	sections	■ Dx	<b>⊞</b> Sb	⊞ d	H Theta	■ Qf	$\coprod$ side_inflow	data_location
1	700	35	20	0.0030	0.9000	0.6500	0.9730	0	1
2	303	15	20.2000	0.0030	0.9000	0.6500	0.9730	0	3
3	27	2	13.5000	0.0030	1	0.6500	1.2843	1	4
4	155	8	19.3750	0.0041	1	0.6500	1.5014	0	5
5	295	14	21.0714	0.0122	0.8000	0.6500	1.4386	0	6
6	318	15	21.2000	0.0053	0.9000	0.6500	1.2932	1	7
7	110	5	22	0.0036	0.9000	0.6500	1.0658	1	8
8	38	2	19	0.0024	1	0.6500	1.1487	1	9
9	665	30	22.1667	0.0030	1	0.6500	1.2843	1	10
10	155	7	22.1429	8.0000e-04	1	0.6500	0.6632	0	11
11	955	47	20.3191	0.0029	1.2000	0.6500	2.0415	1	12
12	304	15	20.2667	0.0030	1.2000	0.6500	2.0764	0	13
13	116	5	23.2000	0.0021	1.2000	0.6500	1.7373	1	14
14	283	12	23.5833	0.0017	1.4000	0.6500	2.3463	1	15
15	31	2	15.5000	0.0019	1.4000	0.6500	2.4805	1	16
16	125	6	20.8333	0.0021	1.6000	0.6500	3.7075	0	17
17	94	4	23.5000	0.0013	1.5000	0.6500	2.4609	0	18
18	360	18	20	0.0046	1.6000	0.6500	5.4872	1	19
19	736	38	19.3684	0.0012	1.6000	0.6500	2.8026	0	20

Figure: Setup in MATLAB of pipe specification of the main line in Fredericia.



Group 1030

System beskrivelse

Modellering

Implementation

Field A Value size 90 height 10 area Q\_out\_max 0.9730 data\_location

Figure: Setup in MATLAB of tank specifications.



Group 1030

ntroduktio

Kloakker og rensningsanlæg gene

Problem formul

System beskrivelse

-,-----

Løsninger og

begrænsninge

Modellering

Cimularina

Struktur

Projeeman

Implementation

•

Control

Regulte

Discussio

Conclusion

Fields	type type	<b>⊞</b> component	= sections
1	'Pipe'	1	35
2	'Tank'	1	1
3	'Pipe'	18	245
4	'Total'	20	281

Figure: Display of structure showing system setup information in MATLAB.



Group 1030

Modellering

## Implementation

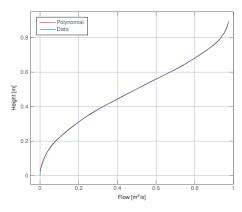


Figure: Comparison between data obtained by equation ?? and the same data curve fitted to a ninth order polynomial.



Group 1030

Introduktio

Kloakker og rensningsanlæg gene

Problem formulei

System heskrivel

Løsninger og

begrænsninger

Modellering

Simulerin

Projeeman

## Implementation

.

Results

Discussion

Conclusion

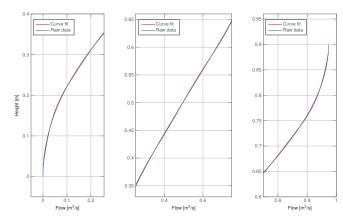


Figure: Comparison between data obtained by equation ?? and the same data curve fitted to a ninth order polynomial.



## Agenda Group 1030

ntroduktion

Kloakker og rensningsanlæg gener

System beskrivel

Løsninger og

Madelladas

Modellerin

Struktur

## Implementation

...pioinontation

Control

Discussion

Conclusio

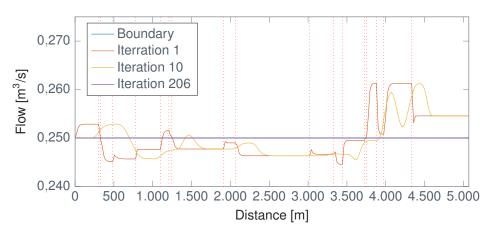


Figure: Height and flow of pipe setup from part of Fredericia where boundary conditions is found by fitted polynomial. Various amount of iterations, with constant flow input of 0,25 m<sup>3</sup>/s, is performed. The dotted line indicates pipe intersections.





ntroduktion

rensningsanlæg gener

System beskrivel

Løsninger og

Modellorine

Modellerin

Struktur

Preissmann

## Implementation

Control

.

Discussion

Conclusion

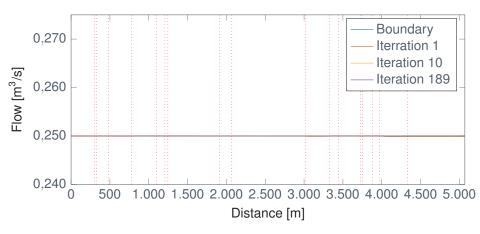


Figure: Height and flow of pipe setup from part of Fredericia where boundary conditions is found by lookup table. Various amount of iterations, with constant flow input of 0,25 m<sup>3</sup>/s, is performed. The dotted line indicates pipe intersections.



Group 1030

System beskrivelse

Modellering

Simulering

Implementation

Results

► Preissmann scheme



## Group 1030

### ntroduktion

Kloakker og rensningsanlæg gener Problem formulering

## System beskrivel

Løsninger og

## begrænsninger

# Modellering

Struktur

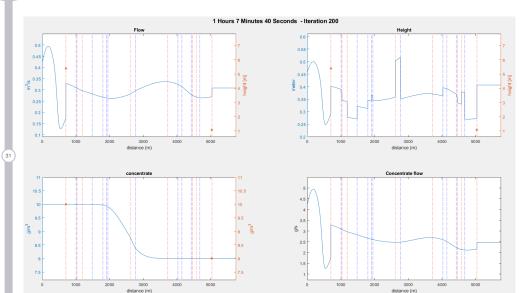
## Implementation

\_

Results

Discussio

Conclusion



Dept. of Electronic Systems Aalborg University Denmark

Figure



Group 1030

### troduktion

reneningeanlang gen

rensningsanlæg gene

## System beskrivelse

øsninger og

Modellering

Modellerini

Simulering

Struktur

Preissman

Implementation

Control

Results

. . .

Conclusion



Group 1030

## System beskrivelse

## Modellering

Simulering

Implementation

Control

Results

Dept. of Electronic Systems Aalborg University Denmark

33



Group 1030

### and the later

Kloakker og rensningsanlæg gene

Problem formularing

### System beskrivelse

Løsninger og

Modellering

### Simularina

Struktur

Preissmann

Implementation

## Control

Results

Diaguagia

Conclusion

## ► Sinus

► Flow profiles





Group 1030

# Modellering

# Control

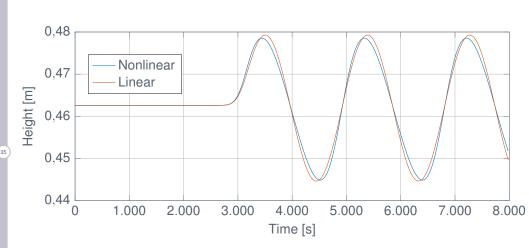


Figure: Comparison of the nonlinear and linear model at the last pipe in the setup.



Group 1030

### and the later of

Kloakker og

Droblam formularing

## System beskrivelse

Løsninger og

### begrænsninger

Modellering

### \_\_\_\_\_

Otendates

Preissmann

Implementation

## Control

Results

Discussion

Conclusion

- ► Cost function
- ► Constraints
- ► Linear model



Group 1030

### troduktion

Kloakker og

Problem formuleri

### System beskrivelse

Løsninger og

### bogranioningo

Modellering

### Simularina

Struktur

Preissmann

### Implementati

Control

\_

Discussion

Conclusion

- Bestemmelse af Prediction horizon
  - ► Flow profiler
  - Industri
- ► Begrænsning af Prediction horizon





Group 1030

## Modellering

# Control

## Results

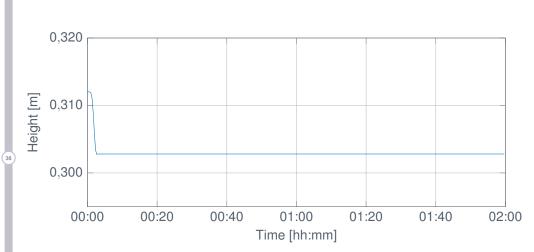


Figure: Output of the last pipe.



Group 1030

# Modellering

## Implementation

Control Results

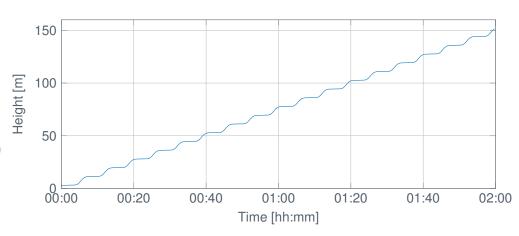


Figure: Height in the tank.



## Group 1030

### ntroduktion

Kloakker og rensningsanlæg gener

## System beskrivel

Lacoinger on

## Løsninger og

begrænsninge

## Modellering

### Simulering

Preiseman

Preissman

### impiementat

### Control

Results

DISCUSSIO

Conclusion

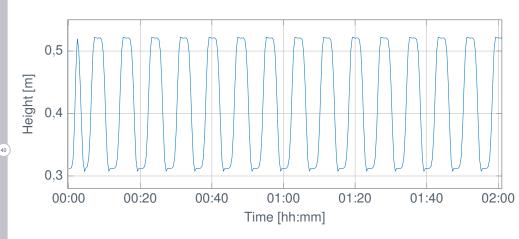


Figure: Output of the last pipe in the second simulation run.



Group 1030

### ntroduktio

Kloakker og rensningsanlæg gene

## System beskrivelse

I geninger og

### begrænsninger

Modellering

Simulerin

Droinomon

## Implementation

Contro

### Results

Discussion

Conclusion

► System setup

► Flow profiles

Type	Component	Sections
Pipe	1	35
Tank	1	1
Pipe	17	207
Tank	1	1
Pipe	1	38
Total	21	282

Table: System setup.



Group 1030

## System beskrivelse

## Modellering

Results

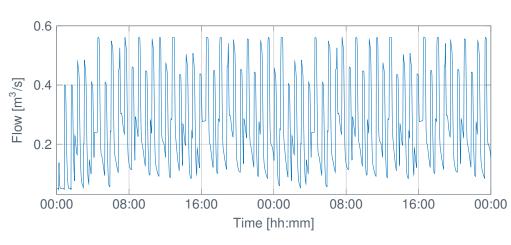


Figure: Output of the last pipe into the WWTP.





Group 1030

## Modellering

## Results

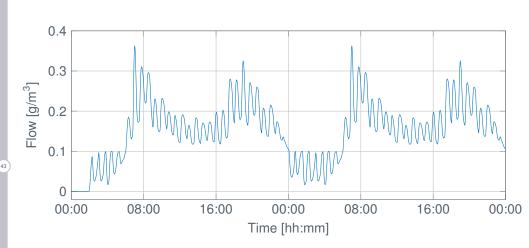


Figure: Simulation of COD output of the last pipe into the WWTP.



Group 1030

### troduktion

Kloakker og rensningsanlæg gene

## System beskrivelse

Løsninger og

### begrænsninger

Modellering

Simulering

Struktur

Preissmann

Implementation

Contro

## Results

Conclusion

Over dimensioneret tank

Konstant output af tank



Group 1030

## Modellering

## Results

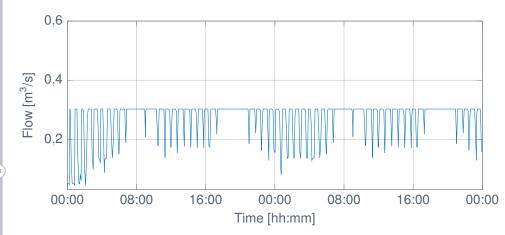


Figure: Output of the last pipe in to the WWTP, where a tank has been placed in front to reduce variation in flow into WWTP.



Group 1030

### troduktio

Kloakker og rensningsanlæg gene

## Froblem formulering

System beskrivelse Løsninger og

## Modellering

Modelielini

Simulering

Designation

Implementation

Control

Results

Discussion

Conclusion

Dept. of Electronic Systems Aalborg University

Denmark

(47

- ► Courant's number
- ▶ Model reduction



Group 1030

### and the later

Kloakker og rensningsanlæg gene

Problem formularing

### System beskrivelse

Løsninger og

Modellering

### Simulering

Struktur

Preissmann

## Implementation

Control

Results

Discussion

Conclusion

► Simulation

► MPC