



# Afløbssystem i Svenstrup

Vand & Miljø, Bachelorprojekt

Gruppe: F10-3-19



# **Summary**

---

This project is regarding the sewer system in Svenstrup and its effects on the stream, Guldbækken. The sewer system is analysed. This analysis includes a study of the self-cleansing ability of the combined sewer system and a study of the capacity of the sewer system. The frequency of flooding from manholes and the return period of usage of the weirs and maximum flow from the weirs are also studied. The capacity, erosion and oxygen issues in Guldbækken are also analysed.

This project documents issues with self-cleansing and discharge from weirs to Guldbækken and capacity in the sewer system. Flooding occurs in the river stream from the cause of discharge from weirs. Erosion also occurs in the river stream during dry weather conditions.

This project suggests a range of short termed solutions to the before mentioned issues and design a long term solution. The long term solution is a complete separate sewer system in Svenstrup that is currently a partly combined, partly separate sewer system. The new separate sewer system is designed for a selected area in Svenstrup to study the effects of separation. A detention basin for the storm drain is also designed to reduce the discharge to the river stream. Additionally a range of solutions are suggested to increase the quality of Guldbækken. The solution is expected to eliminate the issues with both the sewer system and Guldbækken.



**Titel:**

Afløbssystem i Svenstrup

**Title in English:**

Sewer system in Svenstrup

**Projekt:**

Bachelorprojekt

**Projektperiode:**

Februar 2015 - Maj 2015

**Projektgruppe:**

F10-3-19

**Deltagere:**

Niels Fræhr  
Claus Liltorp  
Victor G. Ludvigsen  
Emil Nielsen

**Vejledere:**

Søren Thorndahl  
Michael Rasmussen

**Synopsis:**

Projektet omhandler Svenstrups afløbssystem og dets påvirkning af Guldbækken. Der er foretaget en analyse af Svenstrups afløbssystem. Analysen indebærer en undersøgelse af systemets selvrensningsevne, samt en undersøgelse af afløbssystemets kapacitet, herunder hyppigheden af opstuvning, og gentagelsesperioder for udnyttelse af og den maksimale vandføring i overløbene. Guldbækken undersøges for kapacitets-, erosions- og iltproblemer. I afløbssystemet er der konstateret problemer med selvrensning, aflastning i Guldbækken og kapacitet. I Guldbækken er der problemer med kapacitet ved regnbetingede udledninger samt erosion i tørvejr. Der er fremlagt en række forslag til kortsigtede løsninger til afhjælpning af problemerne, samt dimensioneret en langsigtet løsning bestående af separatkloakering af et udvalgt område, hvortil der er dimensioneret et forsinkelsesbassin til regnvandsnettet. Endvidere foreslås løsninger til forbedringer af Guldbækvens kvalitet. Løsningerne vurderes både at afhjælpe afløbsystemets og Guldbækvens problemer.

**Oplagstal: 7**

**Sidetal: 158**

**Bilags-CD er vedlagt rapporten.**

**Afsluttet: 29-05-2015**

# Forord

---

Denne rapport er udarbejdet af en gruppe studerende på 6. semester på bacheloruddannelsen i Vand og Miljø på Aalborg Universitet, hvor *Afledning af regn- og spildevand i og fra byer* er det overordnede tema for bachelorprojektet. Rapporten omhandler redegørelse og analyse af afløbssystemet og Guldbækken i Svenstrup, herunder en analyse af kloaksystemets funktion under hhv. tør- og regnvejr. Guldbækken analyseres ift. kapacitet, erosion og ilt. Efterfølgende bestemmes mulige løsninger til forbedring af afløbssystemet og Guldbækken. Når der i rapporten skrives *Svenstrup* menes der *Svenstrup og Godthåb* i sammenhæng, da de tilnærmedesvisst hænger sammen og har fælles afløbssystem.

Alt benyttet til kortmateriale og figurer kommer fra Kortforsyningen [2015] og [Geodatabiblioteket, 2014], medmindre andet er angivet.

Der rettes stor tak til vejlederne Søren Thorndahl og Michael Rasmussen for inspirerende vejledning og konstruktiv kritik.

## Læsevejledning

Der er igennem rapporten henvisninger til kilder, som er samlet i litteraturlisten bagerst i rapporten. Til referencer er Harvard-metoden benyttet. I teksten refereres der til kilder med enten "[Forfatter, År]" eller "Forfatter [År]", og hvor det er relevant også en specifik henvisning til en side eller en tabel/figur. Litteratur angives i litteraturlisten med forfatter, titel og dato. Rapporten indeholder figurer og tabeller, som er nummereret ift. det kapitel de står i. Fx har den første figur i kapitel 6 referencenummer 6.1, den anden har referencenummer 6.2 etc.

Bilag findes på en vedlagt CD. Der vil igennem rapporten blive refereret til filer på CD'en med "[Bilags-CD, navn på bilag]" .

---

Niels Fræhr

---

Claus Liltorp

---

Victor G. Ludvigsen

---

Emil Nielsen

# Indholdsfortegnelse

---

<b>Summary</b>	<b>III</b>
<b>Kapitel 1 Indledning</b>	<b>1</b>
<b>I Redegørelse for afløbssystemet og Guldbækken i Svenstrup</b>	<b>3</b>
<b>Kapitel 2 Afløbssystemet i Svenstrup</b>	<b>4</b>
2.1 Svenstrups afløbssystem . . . . .	4
<b>Kapitel 3 Guldbækken</b>	<b>11</b>
3.1 Naturbeskyttede områder . . . . .	11
3.2 Miljømål . . . . .	12
3.3 Guldbækken - billeder og beskrivelse . . . . .	14
<b>II Analyse af afløbssystem og recipientbelastning</b>	<b>17</b>
<b>Kapitel 4 Analyse af afløbssystem i en tørvejrssituation</b>	<b>18</b>
4.1 Selvrensning . . . . .	18
4.2 Forudsætninger for beregning af selvrensningsevne . . . . .	20
4.3 Kritisk spildevandsmængde . . . . .	21
4.4 Bestemmelse af maksimal spildevandsføring . . . . .	23
4.5 Resultater for selvrensning . . . . .	24
4.6 Følsomhedsanalyse . . . . .	25
4.7 Sammenligning med TV-inspektion . . . . .	26
4.8 Yderligere problemer i Svenstrups afløbssystem . . . . .	27
4.9 Usikkerheder ved beregning af selvrensning . . . . .	28
4.10 Opsummering . . . . .	29
<b>Kapitel 5 Analyse af afløbssystem i en regnvejrssituation</b>	<b>31</b>
5.1 Kalibrering af Mike Urban-model . . . . .	31
5.2 Opstuvning og overløb . . . . .	40
5.3 Klimaforandringers påvirkning på afløbssystemet i Svenstrup . . . . .	47
5.4 Oversvømmelsesrisiko . . . . .	49
5.5 Usikkerheder for analyse i regnvejrssituations . . . . .	58
5.6 Opsummering . . . . .	60
<b>Kapitel 6 Hydraulisk analyse af Guldbækken</b>	<b>62</b>
6.1 Diffusiv bølgemodel . . . . .	62
6.2 Vandføring i Guldbækken . . . . .	66
6.3 Opmåling af Guldbækken . . . . .	68
6.4 Kontrol af forudsætning om hydrostatisk trykfordeling . . . . .	71
6.5 Kalibrering af diffusiv bølgemodel . . . . .	72
6.6 Kapacitetsanalyse af Guldbækken vha. diffusiv bølgemodel . . . . .	77

6.7 Kapacitetsanalyse vha. hydraulisk model i Mike Urban . . . . .	84
6.8 Erosion i Guldbækken . . . . .	87
6.9 Usikkerheder . . . . .	91
6.10 Opsummering . . . . .	92
<b>Kapitel 7 Iltforhold i Guldbækken</b>	<b>93</b>
7.1 Iltmålinger i Guldbækken . . . . .	93
7.2 Beregning af iltparametre . . . . .	95
7.3 Iltforbrug i vandfasen . . . . .	98
7.4 Iltforbrug ved bunden . . . . .	102
7.5 Usikkerheder ved analyse af iltforhold . . . . .	106
7.6 Opsummering . . . . .	106
<b>Kapitel 8 Problemformulering</b>	<b>108</b>
<b>III Løsningsforslag</b>	<b>109</b>
<b>Kapitel 9 Kortsigtede løsninger</b>	<b>110</b>
9.1 Renspuling . . . . .	110
9.2 LAR . . . . .	110
9.3 Undersøgelse og forbedring af overløb . . . . .	112
9.4 Afvikling af oversvømmelse . . . . .	113
<b>Kapitel 10 Langsigtede løsninger</b>	<b>114</b>
10.1 Separat regnvand . . . . .	114
10.2 Separat spildevand . . . . .	120
10.3 Anlæggelse af separat ledningsnet . . . . .	123
10.4 Opsummering . . . . .	123
<b>Kapitel 11 Løsninger for Guldbækken</b>	<b>124</b>
<b>Kapitel 12 Konklusion</b>	<b>126</b>
<b>Kapitel 13 Perspektivering</b>	<b>127</b>
<b>Litteratur</b>	<b>129</b>
<b>IV Appendiks og bilag</b>	<b>A1</b>
<b>Appendiks A Bilagsliste</b>	<b>A2</b>
<b>Appendiks B Mike Urban-model</b>	<b>A3</b>
<b>Appendiks C Kort over opstuvning med klimafaktorer</b>	<b>A5</b>
<b>Appendiks D Beregning af vandføring i Guldbækken</b>	<b>A6</b>
D.1 Usikkerheder ved vandføringsmålinger . . . . .	A8

<b>Appendiks E Test af hydraulisk model</b>	<b>A9</b>
E.1 Naturlig dybde . . . . .	A9
E.2 Opstuvning . . . . .	A10
E.3 Bølge . . . . .	A12
<b>Appendiks F Kapacitetsanalyse af Guldbækken med CDS-regn</b>	<b>A14</b>
<b>Appendiks G Hydraulisk model i Mike Urban</b>	<b>A16</b>



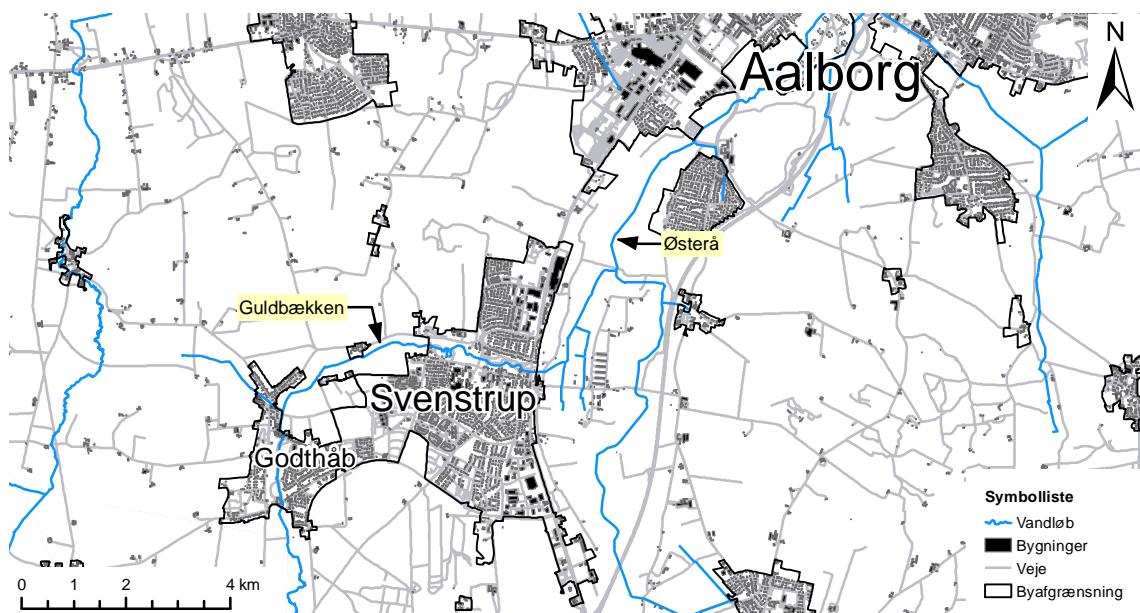
# Indledning 1

Igennem 1900-tallet er spildevand ledt urensset ud til recipenter, som fx vandløb og i sidste ende havet [Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2009]. Denne forurening af vandløb har sænket den økologiske tilstand. Derfor bliver det meste spildevand nu sendt til rensningsanlæg, før det udledes til recipenterne. Men ved regnhændelser kan systemet overbelastes, således at rensningsanlæggene samt de dertilhørende ledninger ikke har tilstrækkelig kapacitet til at aflede vandet. Ved sådanne hændelser aflastes de fælleskloakerede afløbsystemer ved overløbsbygværker, hvor urensset regn- og spildevand ledes direkte ud i recipenter, som ikke er ønsket ift. vandløbets kvalitet.

I fremtiden forventes nedbøren at stige grundet klimaforandringer, hvorved antallet af ekstremregnshændelser og mængden af vand øges. Frem mod år 2100 stiger den ekstreme sommernedbør med 10% -20% ift. år 2000, hvilket kan skabe flere opstuvninger i afløbs-systemerne. [Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2009]

For at mindske forurening af recipenter er der i Aalborg Kommune opsat et mål om, at hele kommunen skal være separatkloakeret inden år 2100 [Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2009, side 21]. Kloakeringen dimensioneres efter et fremtidigt behov ved en omlægning fra fælles- til separatkloakering. Såfremt der opstår en nedbørshændelse, der oversvømmer kloaksystemet, påvirker dette ikke spildevandssystemet i et separatkloakeret opland, hvorved recipenter ikke forurennes med spildevand.

I det nærværende projekt er Svenstrup valgt som projektlokalitet. Byen har omkring 7000 indbyggere og ligger sydøst for Aalborg, jf. figur 1.1 [Aalborg Kommune, 2014b]. Guldbækken løber igennem byen Godthåb, som Svenstrup er ved at vokse sammen med, dernæst videre gennem Svenstrup for til sidst at udmunde i Østerå.



Figur 1.1. Oversigt over Svenstrup.

I Svenstrup består afløbssystemet af en kombination af fælles- og separatkloakering. Dette konflikter med Aalborg Kommunes mål om separatkloakkering i hele kommunen. Fra afløbssystemet er der overløbsbygværker med udløb til Guldbækken. For at forbedre kvaliteten af Guldbækken er den blevet omlagt og lagt udenom en række sører. Dette er gjort for at skabe en bedre faunapassage for dyrelivet i søen [Aalborg Kommune, 2011]. Der udledes dog stadig fællesvand til Guldbækken fra overløb, hvilket har indflydelse på vandløbets økologiske, kemiske og hydrologiske forhold. Derfor analyseres afløbssystemet i Svenstrup og Guldbækken.

## Del I

# Redegørelse for afløbssystemet og Guldbækken i Svenstrup

*I denne del redegøres der for opbygningen af Svenstrups afløbssystem, de fremtidige planer herfor og Guldbækken på baggrund af lovgivningen og vejledninger indenfor området.*

# Afløbssystemet i Svenstrup

2

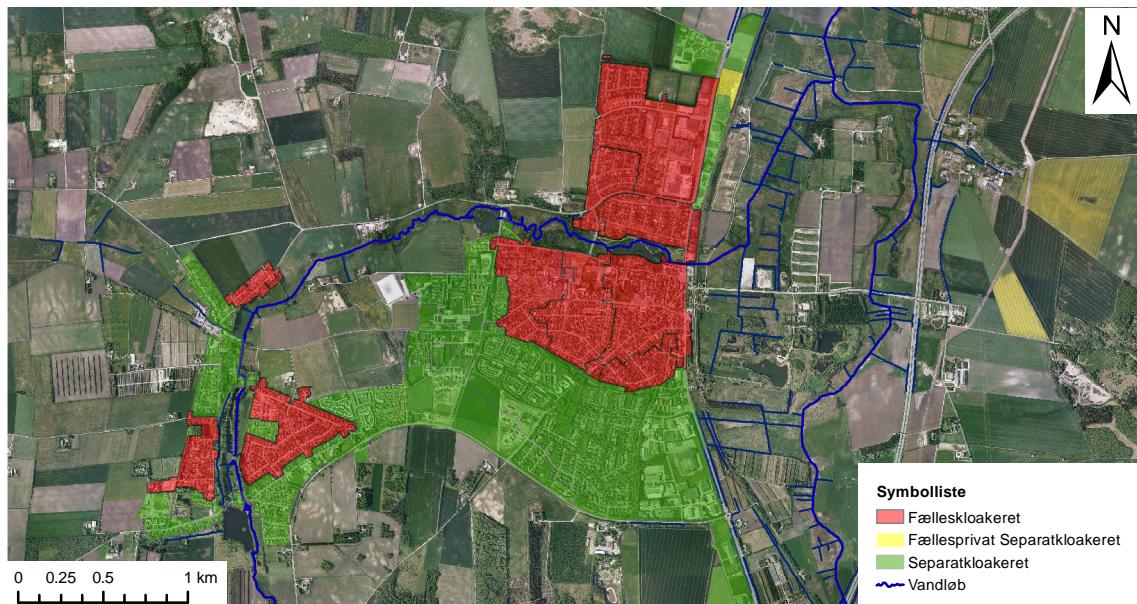
I dette kapitel beskrives Svenstrups eksisterende afløbssystems håndtering af spilde- og regnvand.

## 2.1 Svenstrups afløbssystem

Afløbssystemet i Svenstrup afleder spildevand og regnvand fra både industri og boliger samt afstrømning af regnvand fra de infrastrukturelle anlæg. Byens håndtering af spilde- og regnvand er udlagt i Aalborg Kommunes Spildevandsplan 2008-2019. Planen danner administrationsgrundlag for alle Aalborg Forsyning, Kloak A/S' opgaver.

Svenstrup indeholder både et separatkloakeret og et fælleskloakeret afløbssystem. Spildevand i det separatkloakerede og regn- og spildevand i det fælleskloakerede opland afledes til Renseanlæg Vest, hvor det behandles og udledes til Limfjorden. Der er endvidere etableret overløbsbygværker, hvor regn- og spildevand udledes ud til Guldbækken i tilfælde af regnhændelser, hvor afløbssystemet ikke kan aflede overløbsvandet til renseanlægget tilstrækkelig hurtigt. Regnvand i separatkloaksystemet udledes også til Guldbækken.

Afløbssystemet består af ca. 223 ha separatkloakeret og ca. 138 ha fælleskloakeret opland, samt mindre fællesprivate separat- og fælleskloaksystemer. Oplandene fremgår af figur 2.1.



**Figur 2.1.** Afløbssystem i Svenstrup. [Aalborg Kommune og Forsyningsvirksomhederne, 2008, Bydelsplaner for Svenstrup Nord og Svenstrup Syd]

### 2.1.1 Udledninger til Guldbækken

Aalborg Kommune har fremsat en række vilkår, som skal følges ved udledningerne til vådområder.

1. *Tilladelsen gives på baggrund af forudsætningerne i skema 1 - 6.*
2. *Udledningerne må ikke være til hinder for at målsætningen kan opfyldes for de vandområder, der modtager spildevandet, jvf. afsnit 3.3.*
3. *Der må ikke udledes sand- og/eller slam der giver anledning til aflejringer i vandområdet.*
4. *Udledningerne må ikke medføre uæstetiske forhold i vandløbet eller på vandløbsbrinker eller omkring udløbet i marine vandområder.*
5. *Udledningerne må ikke give anledning til oversvømmelse af arealerne omkring vandløbene.*

[Aalborg Kommune og Nordjyllands Amt, 2004, side 2]

I skemaerne, som omtales i punkt 1, er udledningstilladelserne for alle udløb i Aalborg Kommune angivet. De økologiske målsætninger for Guldbækken er beskrevet i kapitel 3.

Miljøministeriet har samtidig følgende krav for korttidsudledning af overløbsvand:

*§ 6. Ved korttidsudledning forstås udledning af højst 24 timers varighed, som må forekomme i gennemsnit højst 1 gang om måneden, dog med intervaller på mindst 6 dage mellem hver udledning.*

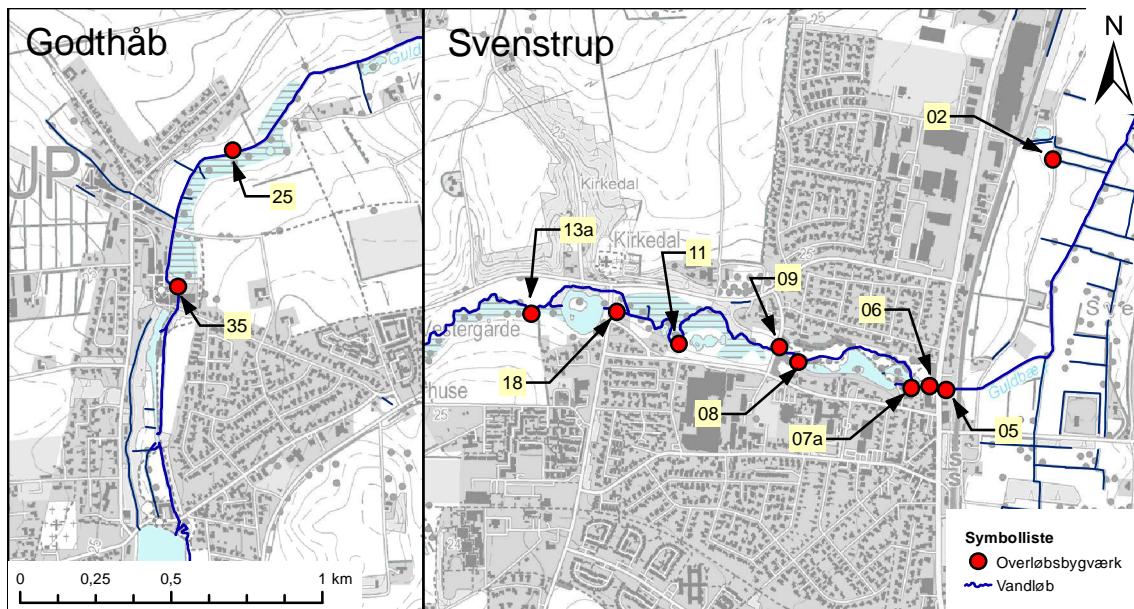
[Miljøministeriet, 2010]

Disse krav for udledninger fra overløbsbygværker skal overholdes, hvilket undersøges i kapitel 5.

Der er 10 overløbsbygværker for overløbsvand fra Svenstrup by til Guldbækken, som har tilladelse til udledning af sammenlagt 11 350 l/s. De tilhørende oplandsarealer og individuelle overløbs tilladelige udledninger ses i tabel 2.1. Overløbsbygværkernes placering fremgår af figur 2.2. Overløb og oplandsarealer vil fremefter i rapporten blive betegnet med indeks, altså fx 02 for overløb U4.0.02.

Udløbsnr.	Oplandsareal (bef.) [ha]	Maksimal tilladelig udledning [l/s]
U4.0.02	18,4	1700
U4.0.05	3,6	2200
U4.0.06	4,1	900
U4.0.07a	13,2	1800
U4.0.08	11,5	1500
U4.0.09	5,4	600
U4.0.11	4,7	900
U4.0.13a	-	10
U4.0.25	1,3	165
U4.0.35	12,8	1575

**Tabel 2.1.** Udledningstilladelser for opspædt spildevand. [Aalborg Kommune og Nordjyllands Amt, 2004, skema 1]

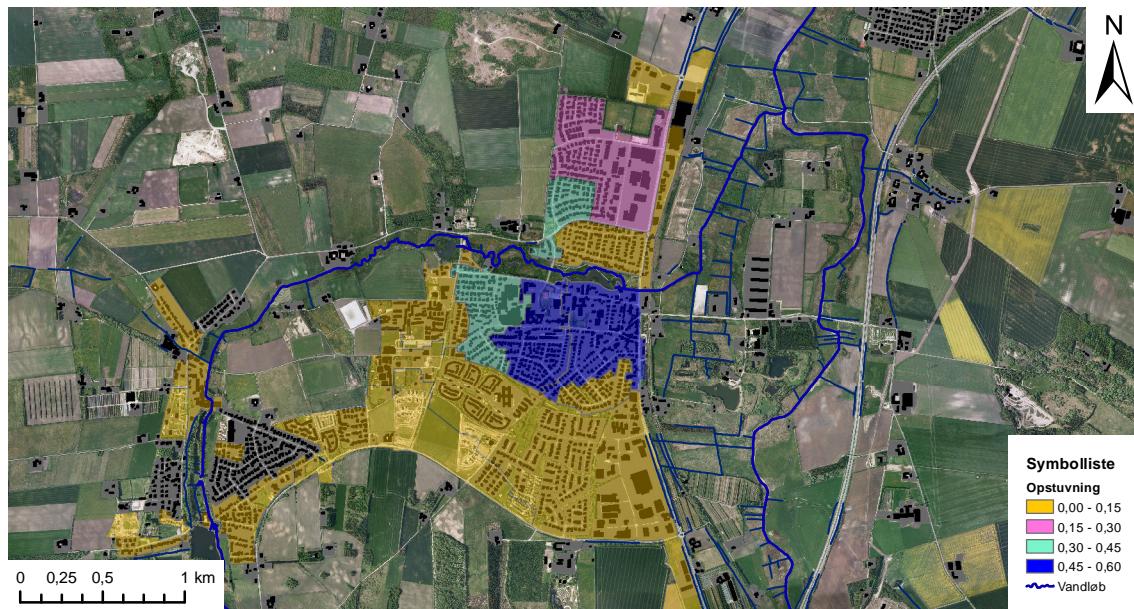


**Figur 2.2.** Overløbsbygværker i Svenstrup.

Udledning 18 er separatkloakeret. Overløbsbygværkerne samt det separatkloakerede oplands udledninger bidrager til både en hydraulisk og stofmæssig belastning af vandløbet.

### 2.1.2 Afløbssystemets opstuvninger

Der er registreret opstuvninger i afløbssystemet i Svenstrup i perioden 2002-2009 indhentet fra skadeservicefirmaer. Det er uvidst, hvorvidt opstuvningerne er i kælder eller på terræn. På figur 2.3 fremgår det gennemsnitlige antal registrerede opstuvninger pr. år pr. kilometer ledning.

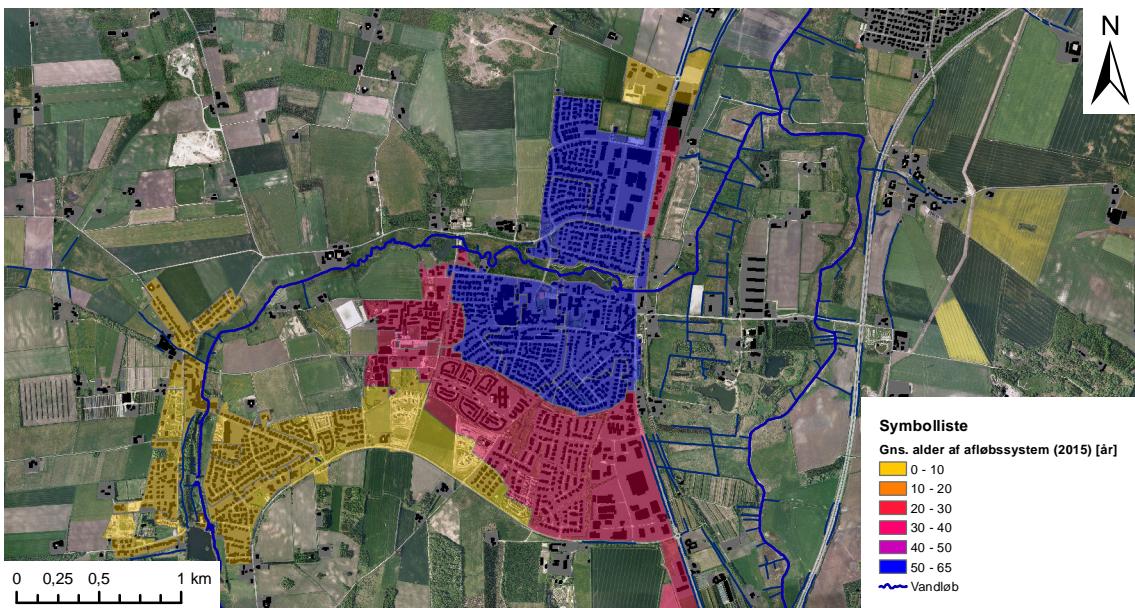


**Figur 2.3.** Opstuvning i Svenstrups afløbssystem. [Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2010]

For fælleskloakerede oplande accepteres normalt en gentagelsesperiode på 10 år for opst-

uvning til kritisk kote og 2 år for fuld udnyttelse af rør. For regnvandsledninger i separatkloakerede oplande er det hhv. 5 år og 1 år [IDA Spildevandskomiteen, 2005, tabel 1]. Disse funktionskrav kan imidlertid ikke sammenlignes med de registrerede data, eftersom dataene fra skadeservicefirmaerne er angivet pr. kilometer ledning, hvorved der er forskel i enhederne. Det undersøges i kapitel 5, om funktionskravet overholdes.

Det fælleskloakerede afløbssystem er ældre end det separatkloakerede afløbssystem, jf. figur 2.4. Alderen af afløbssystemet kan i kombination med, at systemet er fælleskloakeret, forklare opstuvningerne i oplandene nær Guldbækken, eftersom et ældre afløbssystem muligvis ikke er dimensioneret til at klare tilvæksten i byens befolkning, klimaforandringer og er dimensioneret med en ældre dimensionspraksis.



**Figur 2.4.** Den gennemsnitlige alder af Svenstrups afløbssystem. [Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2010]

### 2.1.3 Fremtidige planer for Svenstrups afløbssystem

De opgaver, der skal arbejdes på fremover for Aalborg Kommunes afløbssystem, herunder Svenstrup, er angivet i spildevandsplanen. Aalborg Kommunes vision for afløbssystemet er:

- a. *Opnå et rent vandmiljø i kommunens vandløb og søger samt i Limfjorden gennem opsamling, transport og rensning af spildevand.*
- b. *Sikre drikkevandet mod udsivning fra kloaksystemet.*
- c. *Sikre en høj driftssikkerhed af kloaksystem og renseanlæg.*
- d. *Anvende løsninger, hvor et godt og sikkert arbejdsmiljø er prioritert højt.*
- e. *Opnå den bedst mulige samlede økonomi.*

[Aalborg Kommune og Forsyningsvirksomhederne, 2008, side 28]

Aalborg Forsyning, Kloak A/S har til opgave at anlægge, drive, administrere, forbedre og udbygge kloakanlæg og renseanlæg i takt med udviklingen i Aalborg Kommune. Afledt af

Aalborg Kommunes vision har selskabet fremsat en vision, der danner grundlaget for den retning, som selskabet arbejder hen imod for at sikre miljøet i relation til spildevand og regnvand. Visionen hedder Vision 2100. [Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2009]

Selskabet har også fremsat en række konkrete mål, som skal nås inden år 2100:

- a. *Rense for min. 95 % kvælstof og 95 % fosfor.*
- b. *Alle byområder er separatkloakeret.*
- c. *Ingen aflastede vandmængder.*
- d. *Ingen overløbsbygværker.*
- e. *2 sammenhængende renseanlæg mhp. driftssikkerhed.*
- f. *Dække hele energibehovet med vedvarende energi.*

[Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2009, side 29]

Her er særligt punkt b. og d. relevante for Svenstrups afløbssystem. Et fuldstændig separatkloakeret afløbssystem samt ingen benyttelse af byens overløbsbygværker medfører formentlig en reduktion i den hydrauliske og stofmæssige belastning af Guldbækken. Idet der også hyppigt opstår opstuvninger i den fælleskloakerede del af afløbssystemet, reduceres hyppigheden af opstuvninger formentlig også.

For at sikre, at målene i Vision 2100 opfyldes, udarbejdes der løbende udviklingsplaner for kloakeringen i Aalborg Kommune. Udviklingsplan 2015 opsætter delmål, som skal nås inden år 2025, og skal hjælpe til at gøre Vision 2100-målene mere overskuelige. Følgende er de konkrete krav, der skal opfyldes inden år 2025:

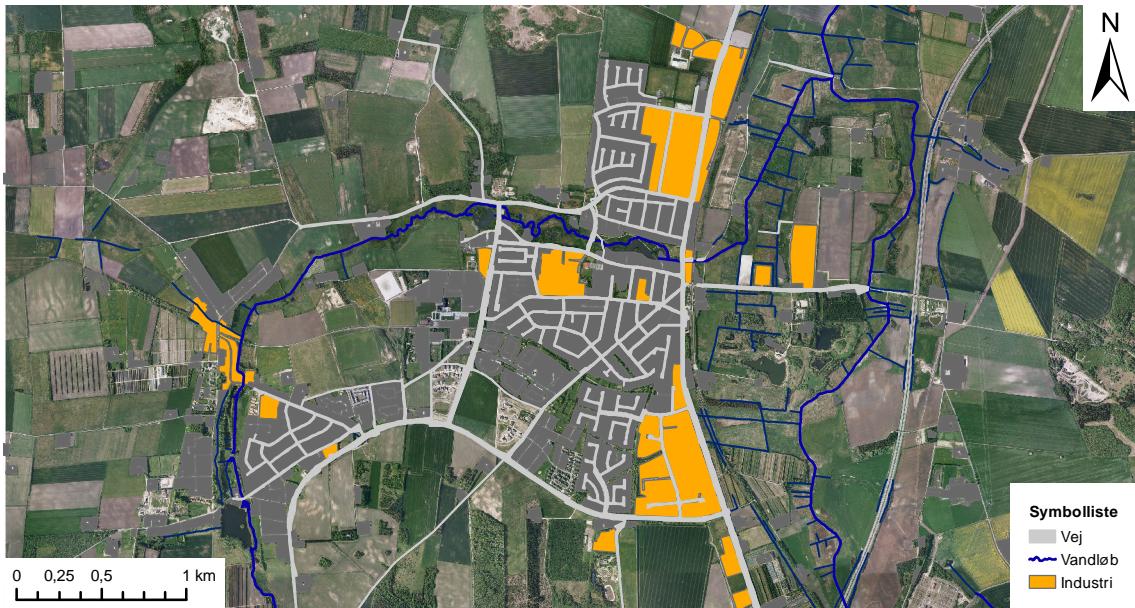
- a. *Rense for min. 85 % kvælstof og 90 % fosfor.*
- b. *Den separatkloakerede andel øges fra 62 % i 2010 til 69 % i 2025.*
- c. *De aflastede vandmængder reduceres fra 2,3 mio. m<sup>3</sup> i 2010 til 1,6 mio. m<sup>3</sup> i 2025.*
- d. *Reducere antal overløbsbygværker fra 141 i 2010 til 118 i 2025.*
- e. *Reduktion fra 7 i 2010 til 2 renseanlæg i 2025.*
- f. *El-besparelse på 25 % og dermed være energineutral.*

[Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2009, side 29]

I udviklingsplanen er opgivet, hvor meget af delmålene, der skal være nået hvert eneste år. Det ses, at delmålene er en afspejling af Vision 2100-målene.

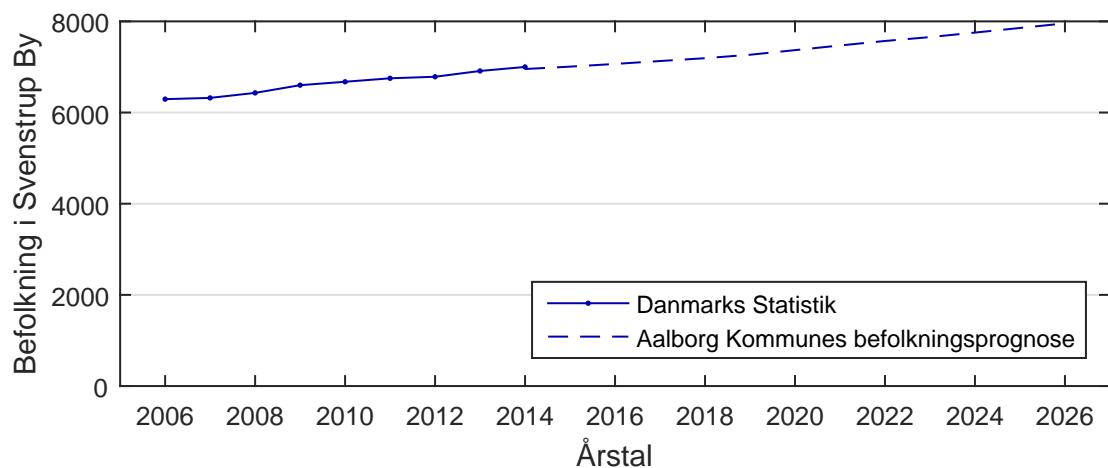
#### 2.1.4 Kilder til spildevand

I Svenstrup er kilderne til spildevand bolig- og industriområder, jf. figur 2.5.



**Figur 2.5.** Arealanvendelsen i Svenstrup.

Spildevandet fra boliger forventes at stige i fremtiden, eftersom befolkningstallet i Svenstrup og Godthåb er steget siden 2006 og denne udvikling forventes at fortsætte i fremtiden, jf. figur 2.6. Et nyt separat afløbssystem skal således dimensioneres ift. den forventede befolkningstilvækst.



**Figur 2.6.** Befolkningen i Svenstrup historisk og i fremtiden. [Danmarks Statistik, 2015; Aalborg Kommune, 2014a]

### 2.1.5 Kilder til regnvand

I byer afledes der regnvand fra befæstede arealer, hvilket afløbssystemet skal være dimensioneret til.

I fremtiden forventes det endvidere, at nedbørsmængden og derved regnvandskilderne vil stige som følge af klimaforandringer. Aalborg Forsyning angiver i Vision 2100, hvilke ændringer de forventer i fremtiden.

Temperaturstigning	+	3-5°C
Sommernedbør	-	10-25%
Ekstrem sommernedbør	+	10-20%
Vinternedbør	+	20-40%
Vinternedbør som sne	-	70-90%
Vandstandsstigning	+	0,5 m
Stormaktivitet	Moderat	stigning

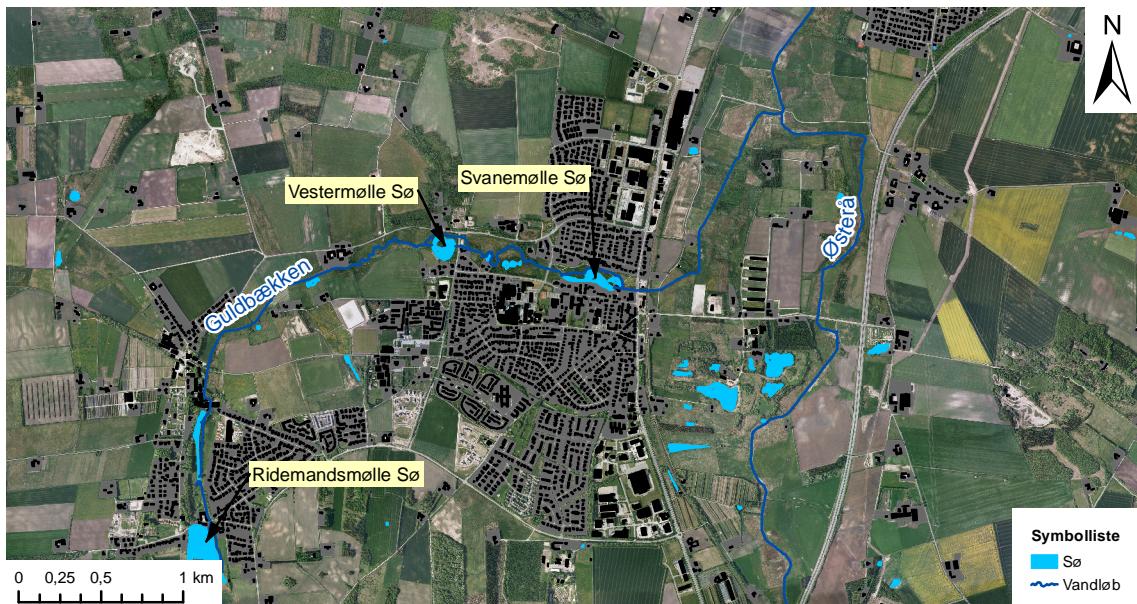
[Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2009, side 15, red.]

Den øgede nedbør vil belaste afløbssystemet, hvorfor det skal undersøges, hvorvidt Svenstrups afløbssystem er dimensioneret ift. de nuværende forhold samt de forventede fremtidige ændringer. Dette undersøges i kapitel 5.

# Guldbækken 3

I dette kapitel præsenteres og beskrives Guldbækken, som er et 13 km langt vandløb, der strømmer fra vest mod øst igennem Svenstrup, hvor den munder ud i Østerå. Desuden redegøres for beskyttet natur og miljømål for Guldbækken.

Guldbækken er blevet restaureret, så vandløbet strømmer udenom Ridemandsmølle Sø, Vesterø Sø og Svanemølle Sø, jf. figur 3.1. Formålet med restaureringen var at forbedre faunapassagen for fisk og smådyr i Guldbækken [Aalborg Kommune, 2011].



*Figur 3.1.* Placeringen af Ridemandsmølle Sø, Vesterø Sø og Svanemølle Sø.

## 3.1 Naturbeskyttede områder

Guldbækken, samt en del af naturen omkring vandløbet, er beskyttet af naturbeskyttelseslovens § 3 [Miljøministeriet, 2013c]. Denne beskyttelse omfatter moser og enge, jf. figur 3.2, hvilket betyder, at der ikke må foretages ændringer i tilstanden. Det kan derfor være nødvendigt at søge om dispensation, hvis en ændring af afløbssystemet har en effekt på naturtypens tilstand.



**Figur 3.2.** § 3 natur i nærheden af Svenstrup. [Miljøportalen, 2014]

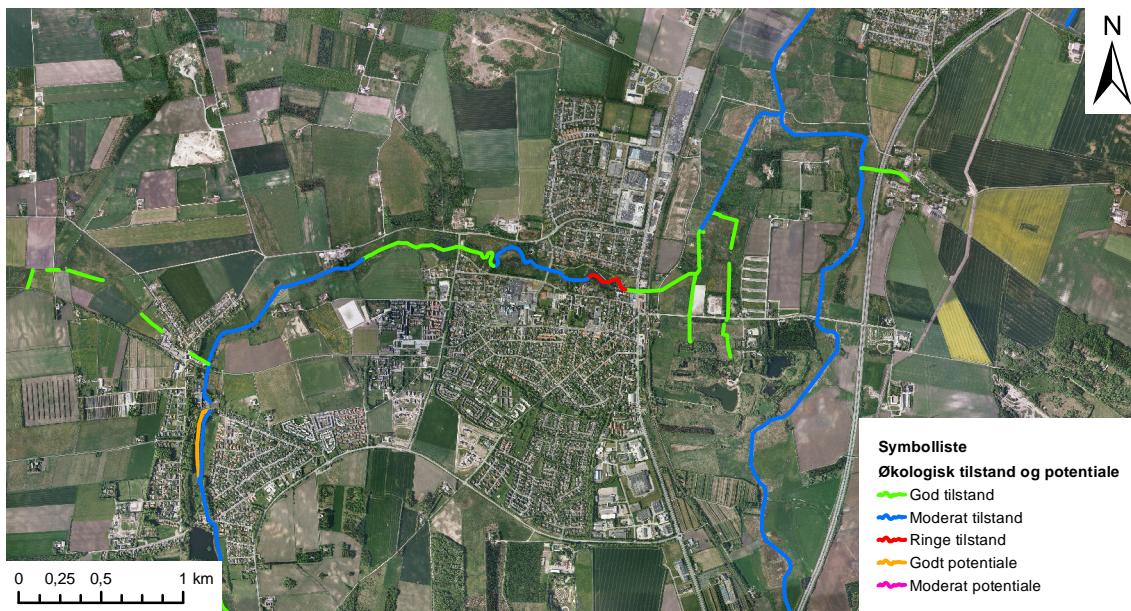
## 3.2 Miljømål

For Svenstrup og Guldbækken gælder Vandplan 2010-2015 Limfjorden. Vandplanen har til formål at opfylde målet om god tilstand i alle sører og vandløb inden 2015. Dette mål er fremsat i Vandrammedirektivet og implementeret i den danske lovgivning i form af Lov om vandplanlægning. [Europa-Parlamentet og Rådet, 2014; Miljøministeriet, 2013b; Miljøministeren, 2011]

Den gode tilstand er opnået, når vandløbet har opnået både en god økologisk tilstand og en god kemisk tilstand. Den økologiske tilstand beskriver afvigelsen fra reference-tilstanden, som er en tilstand upåvirket af menneskelig aktivitet.

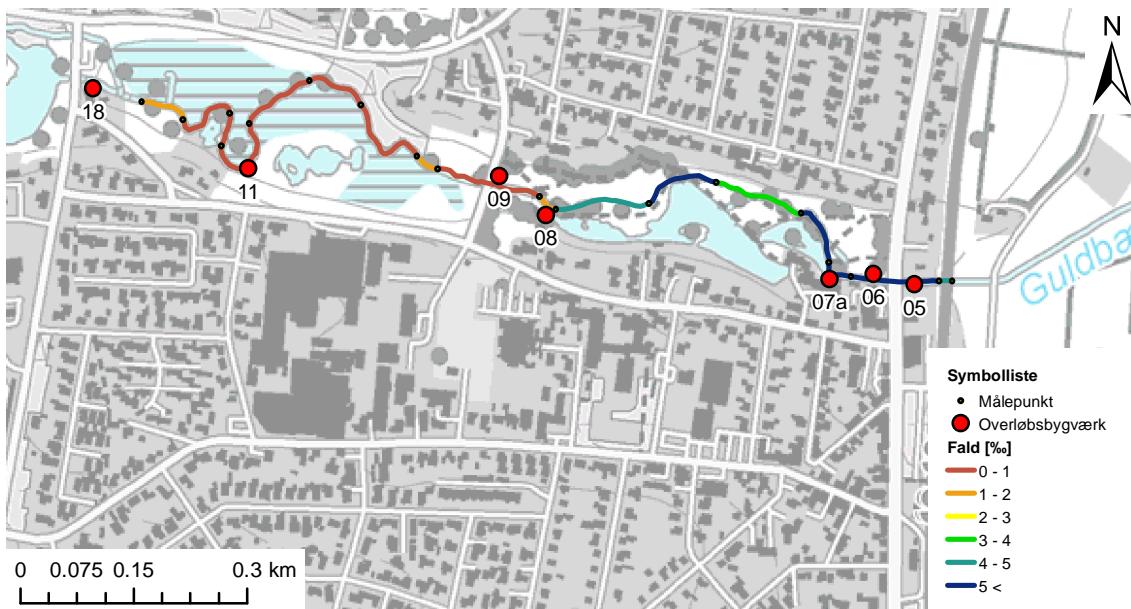
I vandplanen for Limfjorden fastsættes den økologiske tilstand på baggrund af smådyrsfaunaen, der er til stede i vandløbet. Smådyrsfauna-klassen angives i en kvalitetsskala fra 1 til 7. For vandløb, der er blevet stærkt modificerede eller er kunstige, benyttes i stedet et godt økologisk potentiale som mål. Målene for et godt økologisk potentiale afspejler referencetilstanden for den mest sammenlignelige type overfladevand. [Miljøministeren, 2011, side 15-19]

Den økologiske tilstand i Guldbækken spænder fra ringe til god økologisk tilstand, jf. figur 3.3. Ved Svenstrup er den økologiske tilstand moderat og ringe, hvilket skal forbedres, så der opnås en god tilstand i hele vandløbets strækning. Den kemiske tilstand vurderes vha. indholdet af en række prioriterede stoffer, der er bestemt igennem vandrammedirektivet. Den kemiske tilstand i Guldbækken er ikke vurderet. [Miljøministeriet, 2011]



**Figur 3.3.** Økologisk tilstand og potentiale for delstrækninger af Guldbækken . [Miljøministeriet, 2011]

Faldet igennem Guldbækken samt overløbsbygværkernes placering fremgår af figur 3.4. Faldet er bestemt på baggrund af feltforsøg, hvor vandspejlskoten er målt, jf. afsnit 6.3.



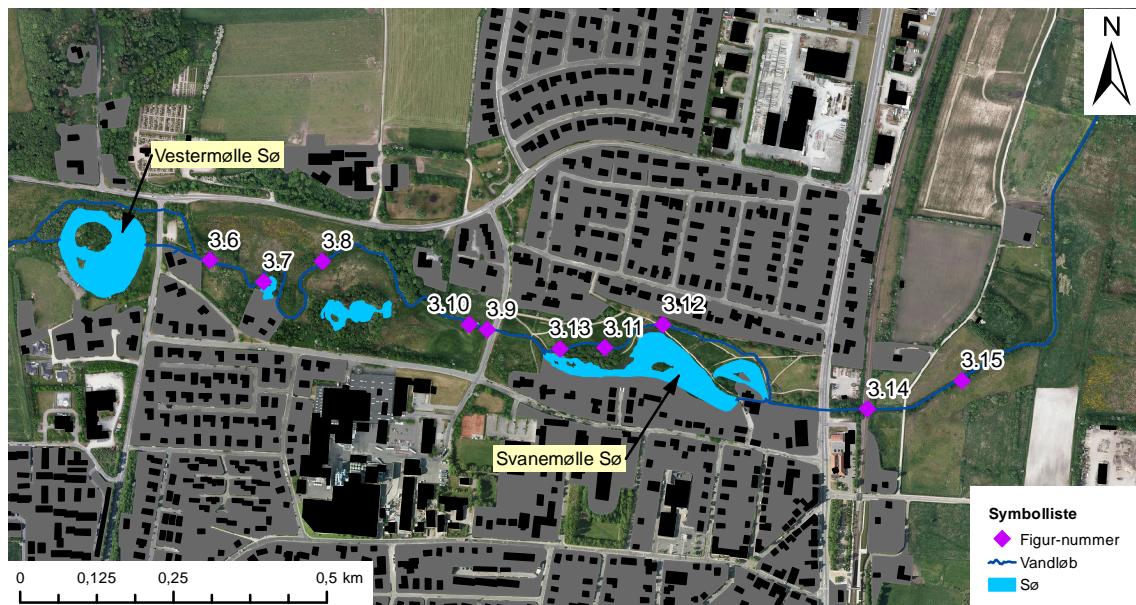
**Figur 3.4.** Faldet igennem Guldbækken mellem målte tværsnit på den undersøgte strækning.

Ved sammenligning mellem den økologiske tilstand og overløbsbygværkernes placering, jf. figur 3.3 og 3.4, ses det, at der muligvis er en sammenhæng mellem placeringerne af overløbene og den økologiske tilstand. Nedstrøms for overløb 09 og 08 har vandløbet ringe kvalitet. Dette kan indikere, at udledningerne er skyld i den ringe kvalitet af vandløbet. Sammenhængen mellem placering af overløb og den økologiske kvalitet er dog ikke gennemgående, da vandløbet har god økologisk kvalitet nedstrøms for udløbene 05, 06 og 07a.

Der, hvor faldet er lavest (0 % - 1 %), har vandløbet moderat kvalitet. Efterfølgende øges faldet mellem udløb 08 og 07a, men kvaliteten falder til ringe kvalitet. Der vurderes derfor ingen umiddelbar sammenhæng mellem faldet og den økologiske kvalitet.

### 3.3 Guldbækken - billeder og beskrivelse

Som en del af kortlægningen af Guldbækken er der taget billeder. Ti billeder er udvalgt til at repræsentere forskellige forhold og tværsnitsudformninger. Billederne fremgår af figur 3.6 til 3.15, hvor det er markeret på figur 3.5, hvor billedeerne er taget.



**Figur 3.5.** Placering af billeder taget ved Guldbækken.

Efter Vestermølle Sø strømmer Guldbækken med lav hastighed på et lige stykke med smalt tværsnit, jf. figur 3.6. Den lave strømningshastighed gør, at der ikke forventes stor biodiversitet, idet bundsediment og strømningsforhold ikke varierer over korte strækninger. Der er tæt bevoksning omkring vandløbet, som i sommerhalvåret skaber meget skygge, hvorved denne del af vandløbet forventes at have ringe iltforhold, da skyggen skaber ringe forhold for primærproduktion i vandløbet. På figur 3.7 ses det, at vandløbet meanderer på forløbet med det snævre tværsnit. [Sand-Jensen og Lindegaard, 2004, side 38]

**Figur 3.6.****Figur 3.7.**

På figur 3.8 er et skift i vandløbstværsnittet, hvormed vandløbets tværsnit bliver bredere. Strømningshastigheden er meget lav nederst på figuren i rørskoven. Det åbne areal og indsnævringen efterfølgende på figur 3.9, giver mulighed for primærproduktion til forbedring af iltforholdene. Både på figur 3.8 og 3.9 er området omkring vandløbet lavt og sumpet, hvorved det kan blive oversvømmet i en regnvejs situation.

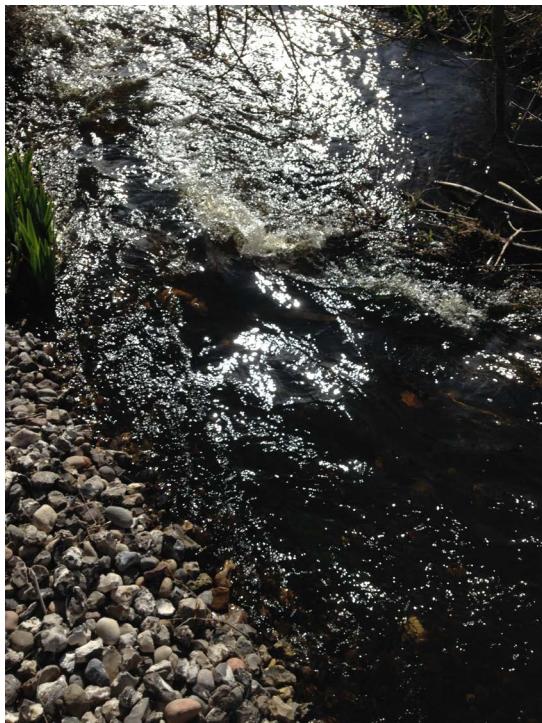
**Figur 3.8.****Figur 3.9.**

Det forventes at Guldbækken har en sandbund, som på figur 3.10, for den del af vandløbet fra figur 3.6-3.10 på figur 3.5 og nedstrøms for billede 10. Her forventes vandhastigheden at være lav hvormed fine sedimenter, som fx sand og lerpartikler, ikke eroderes bort og transportereres i vandløbet.

**Figur 3.10.** Billede 5.**Figur 3.11.** Billede 6.

*Figur 3.12.**Figur 3.13.*

Den oprørte vandoverflade på hhv. figur 3.12 og 3.13, er udtryk for at strømningshastigheden og faldet af Guldbækken er steget. Dermed opnås gode geniltningsforhold. Dette på trods af generel tilvoksning på begge sider, der i sommerhalvåret skaber skygge. Krusningerne, som på figur 3.14, betyder, at bundforholdende er som figur 3.11, med større korn og grovere sedimenter som grus og sten. Dette giver mulighed for, at andre plantearter kan eksistere i Guldbækken end opstrøms, hvor bundsedimentet har en finere karakter.

*Figur 3.14.**Figur 3.15.*

Ved billede 10 på figur 3.5 er faldet af Guldbækken igen lavt, hvormed krusninger forsvinder jf. figur 3.15. Det betyder også, at geniltningen igen reduceres, samt bundsedimentet er finere.

Såfremt Guldbækken's tilstand skal bibeholdes eller forbedres, bør afløbssystemet samt dets påvirkning på Guldbækken analyseres. Derfor udføres en analyse af Svenstrups afløbssy-

stem og dets påvirkning på Guldbækken.

## Del II

# Analyse af afløbssystem og recipientbelastning

*I denne del analyseres afløbssystemet i Svenstrup i en tør- og regnvejrs situation vha. programmet Mike Urban. Derudover undersøges det, hvor robust Guldbækken er ift. udledninger fra overløb vha. en analyse af kapacitet, erosion og iltforhold.*

# Analyse af afløbssystem i en tørvejrssituations

---

4

Afløbssystemet i Svenstrup analyseres for en tørvejrssituations, for at undersøge problemer med selvrensningsevnen i det fælleskloakerede afløbssystem. Selvrensningsevnen undersøges for at vurdere om der opphobes sediment i rørene, som kan øge belastningen ved regnbetingede udledninger og mindske kapaciteten. I kapitlet gennemgås metoden for selvrensning, samt forudsætningerne for beregningerne, resultaterne og usikkerheden heraf. Resultaterne valideres ift. en TV-inspektion. Endvidere redegøres der for de generelle problemer med spildevand i et afløbssystem.

Der undersøges ikke for kapacitetsproblemer i afløbssystemet, idet dette er usandsynligt for fællesledninger i en tørvejrssituations. Der kan dog være problemer med kapaciteten i de separate spildevandsledninger, men undersøges ikke, idet der ikke er tilgængelige afløbsdata herfor. På grund af den manglende data antages det endvidere, at der er tilstrækkelig selvrensning i de seperatkloakerede oplande.

Vandbalancen under en tørvejrssituations består af et spildevandsbidrag fra bolig og industri samt indsvivning af grundvand og dræn til rørstrækningerne. Da det er en tørvejrssituations, udnyttes overløbene formentlig ikke, hvorfor den totale vandmængde sendes til et renseanlæg.

Der er udleveret en Mike Urban-model over Svenstrup afløbssystem, som fremgår af appendiks B. Denne benyttes i resten af projektet for alle simuleringer af afløbssystemet.

Afløbssystemet funktion i tørvejr simuleres vha. Mike Urban, hvorefter selvrensningsevnen beregnes vha. Matlab. Systemet analyseres for en spildevandsmængde svarende til den maksimale vandføring for døgnet med minimumsvandføring. Beregninger kan findes på [Bilags-CD, SvenstrupMU, TorSystem]

## 4.1 Selvrensning

Selvrensningsevnen vurderes på baggrund af bundforskydningsspændingen i rørene, jf. formel (4.1). Denne bestemmes vha. formel (4.2). [Winther et al., 2011, side 221]

$$\tau > \tau_{krit} \quad (4.1)$$

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot I \quad (4.2)$$

Hvor

$\tau$	Bundforskydningsspænding [Pa]
$\tau_{krit}$	Selvrensningeskriterie [Pa]
$\rho$	Densitet for vand - 1000 kg/m <sup>3</sup>
$g$	Tyngdeacceleration - 9,82 m/s <sup>2</sup>
$R$	Hydraulisk radius [m]
$I$	Energilinjegradien [m/m]

Energilinjegradien er lig med rørets hældning, da der forudsættes ensformig stationær strømning i et rør med frit vandspejl under en tørvejrssituations. Den hydrauliske radius afhænger af vanddybden i røret og beregnes med formel (4.3) for et delvist fyldt rør. [Brorsen og Larsen, 2009, side 141]

$$R = \frac{1}{4} \left( 1 - \frac{\sin \theta}{\theta} \right) \cdot D_i \quad (4.3)$$

$$\theta = 2 \cdot \cos^{-1} \left( 1 - \frac{2 \cdot y}{D_i} \right) \quad (4.4)$$

Hvor

$\theta$	Vinkel med vandspejl [°]
$D_i$	Indvendig diameter [m]
$y$	Vanddybde [m]

Vanddybden i det delvist fyldte rør kan bestemmes vha. Brettings formel, jf. formel (4.5), hvor den kritiske spildevandsmængde er vandføringen, som det ønskes at kontrollere selvrensning for. [Winther et al., 2011, side 205]

$$\frac{Q_{krit}}{Q_f} = 0,46 - 0,5 \cdot \cos \left( \pi \cdot \frac{y}{D_i} \right) + 0,04 \cdot \cos \left( 2 \cdot \pi \cdot \frac{y}{D_i} \right) \quad (4.5)$$

Hvor

$Q_{krit}$	Kritisk spildevandsmængde [m <sup>3</sup> /s]
$Q_f$	Fuldtløbende vandføring [m <sup>3</sup> /s]

Den fuldtløbende vandføring i røret kan bestemmes vha. modstandsformlen, jf. formel (4.6). [Brorsen og Larsen, 2009, side 88, 92]

$$I = f \cdot \frac{(Q_f/A)^2}{2 \cdot g \cdot R_f} \Leftrightarrow Q_f = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot I \cdot R_f \cdot A^2}{f}} \quad (4.6)$$

$$R_f = \frac{D_i}{4} \quad (4.7)$$

Hvor

$f$	Friktionstallet [-]
$A$	Tvæsnitsareal af fuldtløbende rør [m <sup>3</sup> /s]
$R_f$	Fuldtløbende hydraulisk radius [m]

Friktionstallet bestemmes vha. iteration af Colebrook og Whites formel, jf. formel (4.8). [Brorsen og Larsen, 2009, side 88, 94]

$$\sqrt{\frac{2}{f}} = 6,4 - 2,45 \cdot \ln \left( \frac{k}{R_f} + \frac{4,7}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (4.8)$$

$$Re = \frac{V \cdot R_f}{\nu} \quad (4.9)$$

Hvor

$k$	Ækvivalent sandruhed [m]
$Re$	Reynolds' tal [-]
$V$	Gennemsnitlig vandhastighed [m/s]
$\nu$	Kinematisk viskositet - Vand ved 10°C = $1,308 \cdot 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s [Brorsen og Larsen, 2009, tabel B.1]

Forskydningsspændingen kan således beregnes i alle rør i Svenstrup, hvorved det kan vurderes, hvorvidt der er selvrensning.

## 4.2 Forudsætninger for beregning af selvrensningsevne

Der forudsættes følgende for bestemmelse af selvrensningsevne:

- Der anvendes et selvrensningskriterie på 1,5 Pa. [Thorndahl og Nielsen, 2015]
- Minimums-døgnfaktor  $f_d^{\min} = 0,7$ . [Winther et al., 2011, side 73]
- Middeldøgnvandføringen fra borgere er 100l/PE/d.
- Middeldøgnvandføringen fra industri er 5 m<sup>3</sup>/ha/d.
- Den maksimale spildevandsføring på et døgn fremgår af døgnvariationerne for bolig- og industriområder i afsnit 4.3.
- Det antages, at byens vandforbrug er repræsentativ for dens spildevandsudledning.
- Der benyttes rørdata opgivet i Mike Urban modellen udleveret af Aalborg Forsyning, Kloak A/S.
- Der benyttes en minimumsvandføring på 1 l/s for alle rør. Dette vurderes at svare til et toiletskyl, som forventes at optræde mindst en gang i døgnet.
- Alle rør antages cirkulære.

Den kritiske forskydningsspænding, selvrensningskriteriet, er valgt til 1,5 Pa, da det vurderes, at der er selvrensning ved forskydningsspændinger over det. Winther et al. [2011] foreslår et kriterium for forskydningsspænding for regnvands- og fællesledninger på 3-4 Pa, uafhængigt af rørmaterialer og 2-3 Pa for plastrør. Ifølge Dansk Standard [2009] skal der regnes med selvrensning ved 2,5 Pa for spildevands- og fællesledninger. Der undersøges derfor også selvrensningsevnen ved de anbefalede værdier.

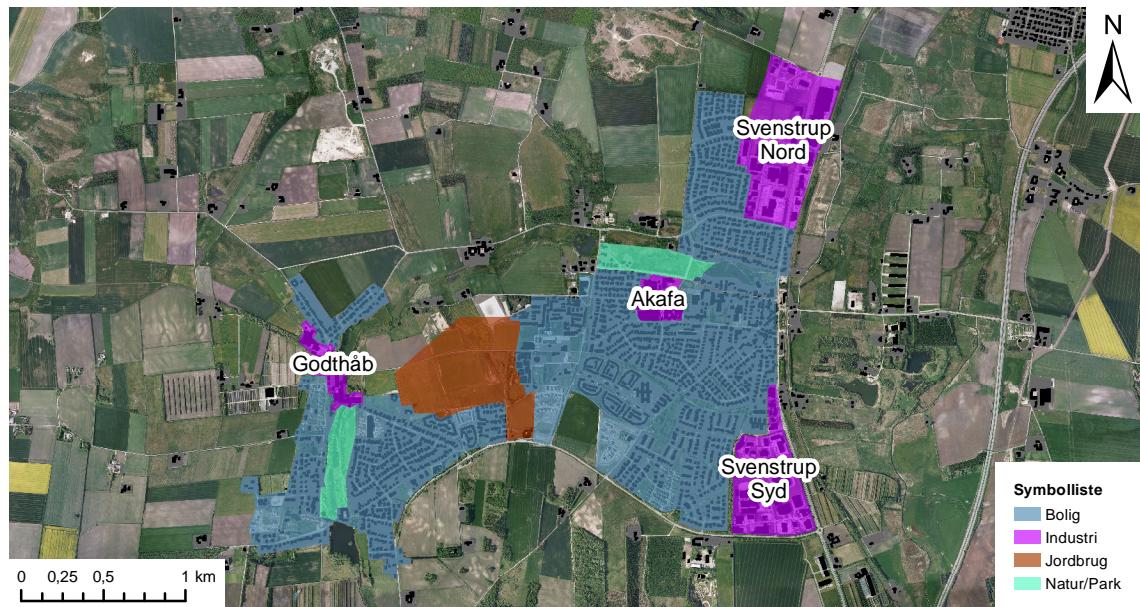
Døgnfaktoren er valgt på baggrund af, at Svenstrup vurderes til mindre bebyggelse med overvejende boligområder.

Mike Urban modellen, udleveret af Aalborg Forsyning, Kloak A/S over afløbssystemet i Svenstrup og Godthåb samt de tilhørende byer, indeholder både afløbssystemet samt

antallet af personer, der forventes at være koblet til brøndene. Rør- og persondata vurderes at være korrekte i denne model og benyttes derfor videre i dette projekt.

### 4.3 Kritisk spildevandsmængde

Den kritiske spildevandsmængde for Svenstrup afhænger af arealanvendelsen. Der er en forskel på spildevandsmængden for bebyggelsestyperne boligområde, industriområde og jordbrug. Det ses på figur 4.1, hvordan Svenstrup er inddelt i bebyggelsestyper.



**Figur 4.1.** Bebyggelsestyper i Svenstrup. [Kommune, 2009]

Det vurderes, at der ikke er spildevandsafstrømning fra jordbrug og natur/park-områder til afløbssystemet.

Den kritiske vandføring for bolig og industri bestemmes i det følgende.

#### 4.3.1 Boligområders spildevandsføring

Det daglige vandforbrug pr. døgn pr. person vurderes til 100l/PE/d. Denne vurdering sker på baggrund af, at Svenstrup er en mindre by, hvor der benyttes 100l/PE/d -130l/PE/d, jf. Winther et al. [2011, tabel 4.5], hvorved 100l/PE/d vurderes mest kritisk ift. selvrensning.

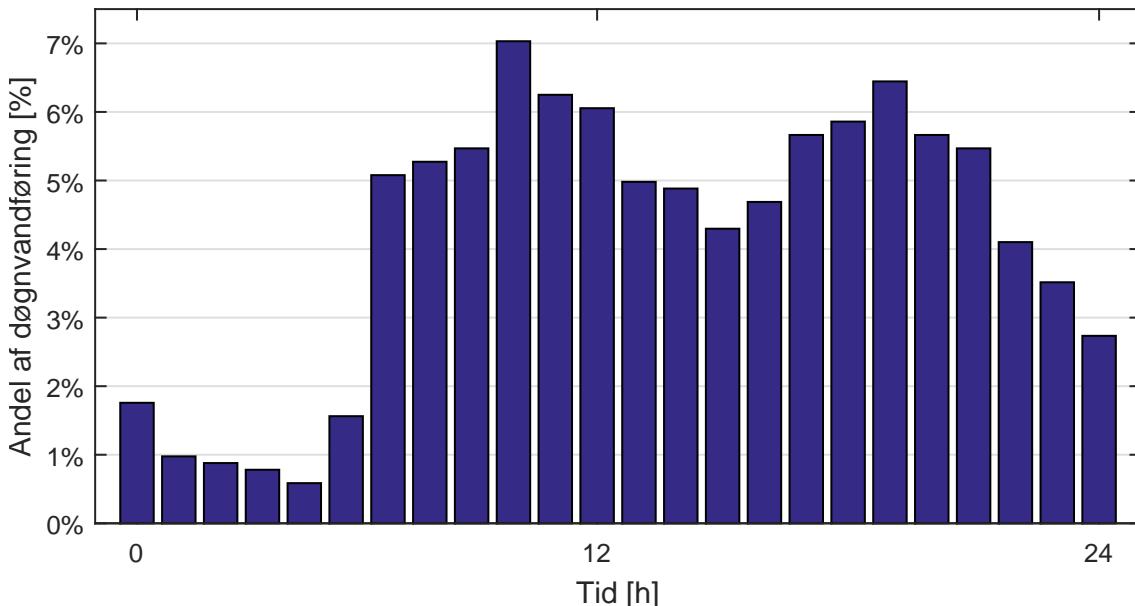
Til at beregne selvrensning benyttes maksimum vandføringen i minimumsdøgnet, da der i så fald er selvrensning minimum én gang i døgnet. Vandføringen på minimumsdøgnet bestemmes vha. formel (4.10).

$$Q_{d,\min} = f_d^{\min} \cdot Q_m \quad (4.10)$$

Hvor

$Q_{d,\min}$	Middel vandføring i minimumsdøgn [ $\text{m}^3/\text{PE/d}$ ]
$f_d^{\min}$	Minimum døgnfaktor [-]
$Q_m$	Middelvandføring [ $\text{m}^3/\text{PE/d}$ ]

Middelvandføringen i minimumsdøgnet er den gennemsnitlige vandføring over hele døgnet og er bestemt til  $0,07 \text{ m}^3/\text{PE/d}$ . Der bør derfor tages forbehold for variationen i vandføring henover døgnet. Det vurderes, at Svenstrup er sammenlignelig med byen Frejlev, som ligger nord for Svenstrup. I Frejlev er fordelingen af vandføringen over døgnet som det fremgår af figur 4.2.



**Figur 4.2.** Døgnvariation af vandføring i Frejlev. [Thorndahl og Nielsen, 2015]

Den største vandføring, der forekommer, svarer til en makstimerfaktor på 1,7. Dette er indenfor intervallet på 1,5-2,5, der er normalt for mindre samlede bebyggelser med overvejende byerhverv [Winther et al., 2011, tabel 4.9]. Denne vandføring kan således indføres i Mike Urban-modellen vha. døgnvariationen.

### 4.3.2 Industriens spildevandsføring

I Svenstrup fylder industrien 83 ha af byens samlede område på 447 ha. Arealerne af industrien vist på figur 4.1 er fordelt på 4 områder. Akafa håndterer selv spildevandet, og industrien i Svenstrup Syd og Godthåb er koblet på det separatkloakeret afløbssystem, hvorfor de ikke medtages i simuleringen.

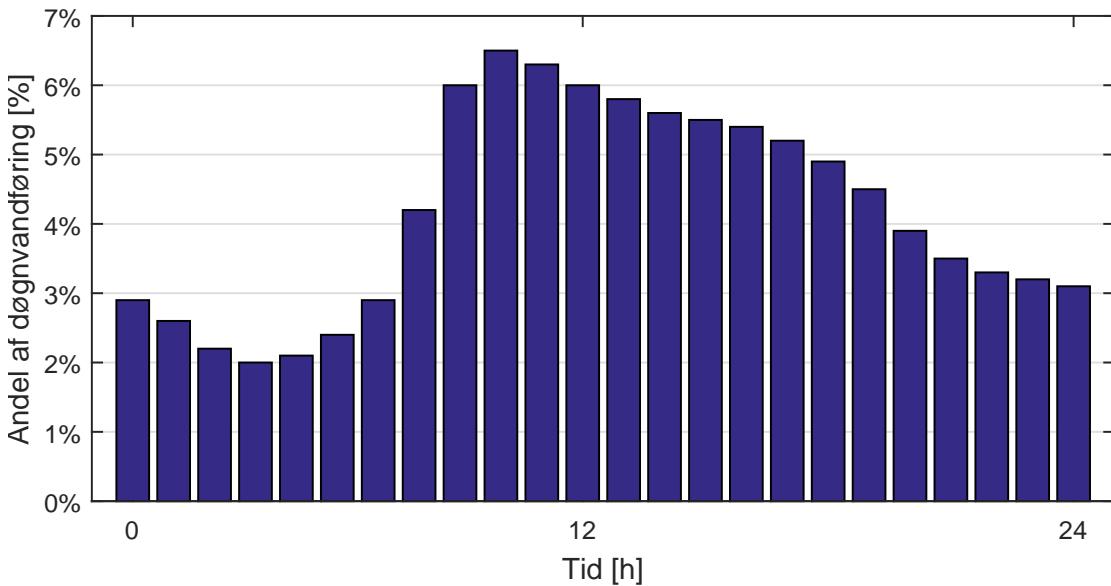
Den laveste vandføring for industrien er kritisk i beregningen af selvrensning. For industri vælges en spildevandsføring på  $5 \text{ m}^3/\text{d}/\text{ha}$ , som er mindst ifølge Dansk Standard [1988].

Det mest kritiske er en periode uden spildevandsproduktion. Dette kunne fx være i weekender uden vandforbrug, hvormed makstimen i minimumsdøgnet antager en værdi på  $0 \text{ m}^3/\text{d}/\text{ha}$ . Dette negligeres, da Svenstrup Nord indeholder virksomheder, som også er i

brug i weekender, hvorved industrien i Svenstrup altid producerer en hvis spildevandsmængde.

Middelvandføringen i minimumsdøgnet er for industri bestemt til  $3,5 \text{ m}^3/\text{ha/d}$ , jf. formel (4.10).

Det antages, at industriområderne har en variation over døgnet i udledning af spildevandsmængde svarende til en middelstor by med industriandel, som fremgår af figur 4.3. I fordelingen er der altså både boliger og industri.



**Figur 4.3.** Døgnvariation i forbrug for middelstor by med industriandel. [Winther et al., 2011, s. 75, figur 4.3D, red.]

Industriens spildevandsføring indføres i Mike Urban vha. døgnvariationen.

#### 4.4 Bestemmelse af maksimal spildevandsføring

Spildevandsmængden i ledningerne simuleres igennem den udleverede Mike Urban-model. Der anvendes en døgnvariation for spildevand fra boliger og industri som vist i figur 4.2 og 4.3.

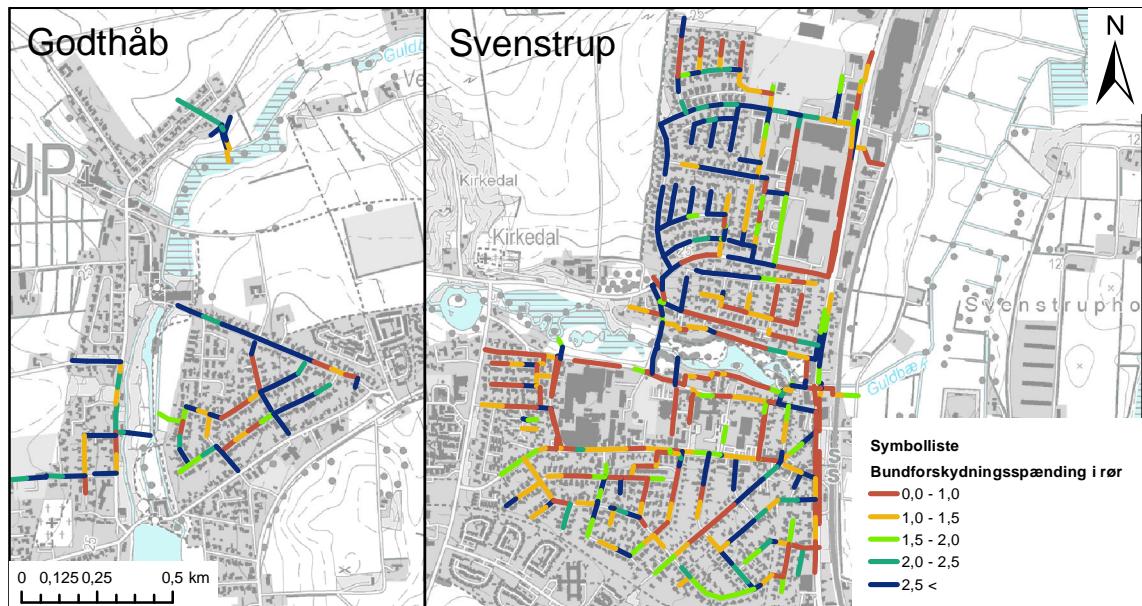
Følgende indstillinger anvendes i simuleringen:

- Dynamisk bølgemodel.
  - Tidsskridt mellem 10 til 60 sekunder.
- Simulering over 25 timer.
- Driftsruhed på betonrør 3 mm.
- Driftsruhed på PVC-rør 1 mm.

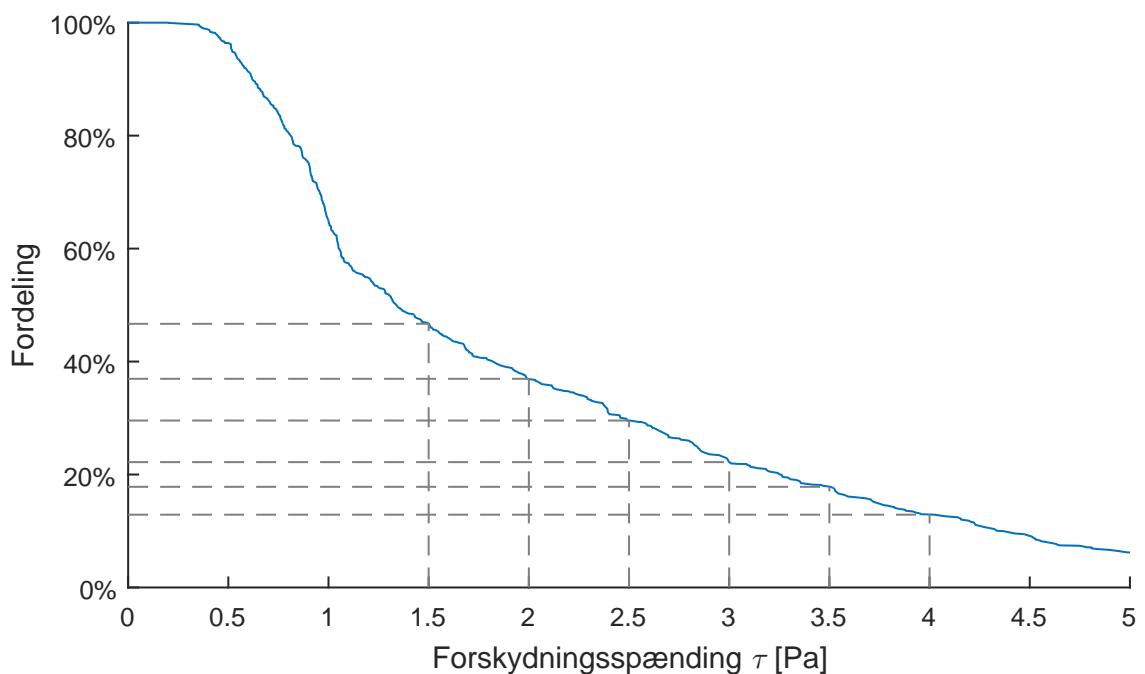
Selvrensningsevnen for Svenstrups afløbssystem undersøges ud fra Mike Urbans resultater for maksimal spildevandsmængde i rørstrækningerne over den simulerede periode. Bundforskydningsspændingen i rørene beregnes ud fra metoden beskrevet i afsnit 4.1.

## 4.5 Resultater for selvrensning

Bundforskydningsspændingen i de fælleskloakerede oplande i Svenstrup og Godthåb er vist på figur 4.4. Det bemærkes, at størstedelen af Svenstrup og Godthåb ikke opnår en bundforskydningsspænding over 1,5 Pa ved maksimal vandføring i minimumsdøgnet. Andelen af rørlængde, der opnår en given bundforskydningsspænding, kan aflæses på figur 4.5.



**Figur 4.4.** Bundforskydningsspænding i rørstrækningerne i de fælleskloakerede oplande.



**Figur 4.5.** Fordelingskurve over forskydningsspænding.

For fælleskloakerede afløbssystemer gælder det, at rørene er dimensioneret ift. afledning

af regnvand. Det er derfor sværere at opnå selvrensning i tørperioder uden regn. Som det fremgår af figur 4.5 er det lidt under halvdelen, 47 %, af den fælleskloakerede del af byen, som har selvrensning med en bundforskydningsspænding over 1,5 Pa.

I henhold til anbefalingerne nævnt i afsnit 4.2 ses det, at der opnås væsentligt mindre selvrensning i afløbssystemet. Anvendes den mest kritiske anbefaling,  $\tau = 3 \text{ Pa} - 4 \text{ Pa}$ , opnår mellem 14 % og 22 % af byen tilstrækkelig selvrensning.

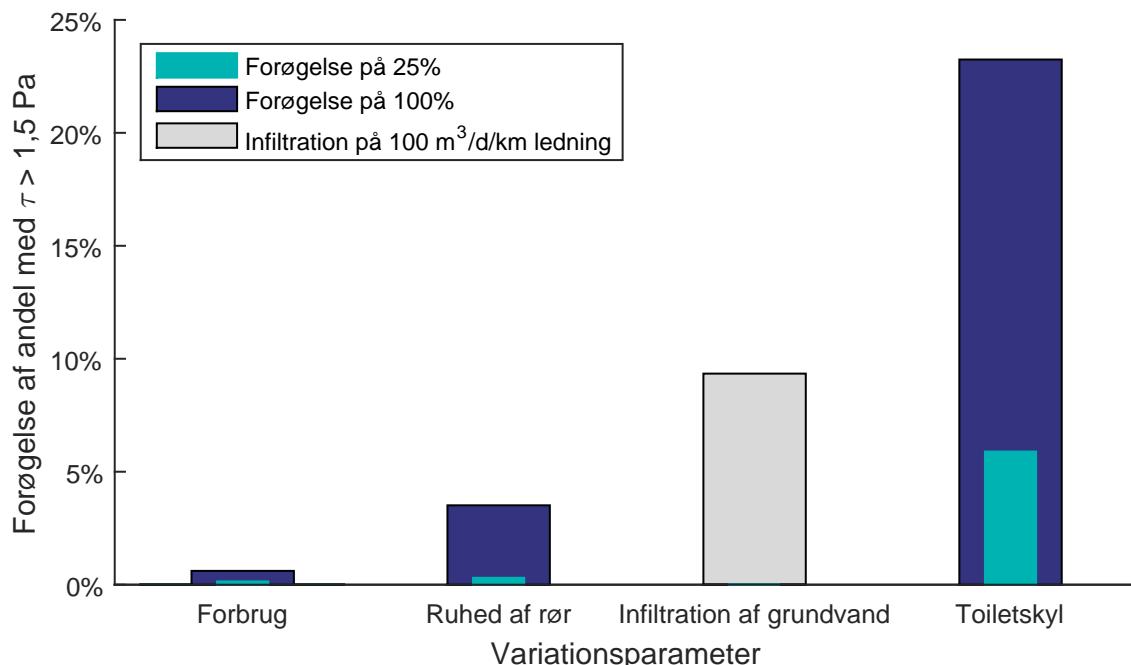
## 4.6 Følsomhedsanalyse

Der udføres en følsomhedsanalyse på parametrene, der indgår i tørvejrsanalysen, for at vurdere de enkelte parametres indflydelse på resultaterne.

Paremtere, der varieres, er følgende:

- Spildevandsudledning fra bolig og industri.
- Ruhed af rør.
- Størrelsen af et toiletskyl.
- Indsivning af grundvand og regnvand til rør.

Hver af de tre første parametre øges med henholdsvis 25 % og 100 %, hvor de andre fastholdes, for at se betydningen en ændring vil have. Ændringen i andelen af afløbssystemet, der opnår en bundforskydningsspænding højere end 1,5 Pa, udregnes for hver af parameterændringerne. Samtidig undersøges der med en forudsat infiltration på  $100 \text{ m}^3/\text{d}/\text{km}$  ledning. Ændringerne fremgår af figur 4.6. Det ses, at selv ved en 100% forøgelse opnås der ikke en ændring i resultater over 3,5% for hverken ruhed af rør eller forbrug.



**Figur 4.6.** Ændringer i resultater som følge af parametervariation.

Toiletskyllet, som er forudsat at være 11/s, har størst indflydelse på systemets selvrensningsevne. Næsten 97% af rørstrækningerne opnår ikke en vandføring over 11/s, hvorfor det forudsatte toiletskyl har en væsentlig påvirkning på selvrensningsevnen.

Når der medtages infiltration, består 83 % af alt vand i afløbssystemet af infiltration, hvilket vurderes at være usandsynligt. Ud fra estimeret foretaget med flere forskellige metoder, anslås infiltrationen at udgøre 20 % af alt vand i rørene i en tørvejrsperiode [Bénédittis og Bertrand-Krajewski, 2005]. Idet infiltrationen bl.a. er afhængig af kloaksystemets alder, tilstand samt placeringen af grundvandsspejlet, er infiltrationsmængden hverken konstant eller ens for alle afløbssystemer. Såfremt infiltrationen blot udgør 20 % af alt vand i rørene, forøges andelen af afløbssystemet med en forskydningsspænding over 1,5 Pa med under 1 %.

## 4.7 Sammenligning med TV-inspektion

For at undersøge, om den teoretiske beregning af selvrensningsevnen afspejler den virkelige selvrensningsevne, sammenlignes beregningsresultatet med observationer fra en TV-inspektion. TV-inspektionen, som benyttes, er udført i et boligområde i den nordlige del af Svenstrup mellem brønd Q063300 og Q063400, jf. figur 4.7.



**Figur 4.7.** Placeringen af rørstrækningen, som sammenlinges med en TV-inspektion.

Røret er lavet af beton og er 50 m langt. De forskellige dimensioner og parametre, som anvendes til beregningen af forskydningsspændingen, er vist i tabel 4.1.

Diameter [mm]	Hældning [-]	Manningtal [ $m^{1/3}/s$ ]	Forskydningsspænding [Pa]
350	0,0063	67	1,05

**Tabel 4.1.** Forskydningsspænding samt parametre til vurdering af selvrensning mellem brønd Q063300 og Q063400.

Forskydningsspændingen for røret er lavere end den kritiske forskydningsspænding på 1,5 Pa. Det vurderes derfor på baggrund af beregningerne, at rørstrækningen mellem brønd Q063300 og Q063400 ikke er selvrensende.

TV-inspektionen viser, at der i store dele af røret samler sig sediment på bunden, jf. figur 4.8. Dette indikerer, at den ønskede selvrensningsevne ikke er opnået på den undersøgte strækning. Foruden tyder TV-inspektionen på, at dele af rørstrækningen har sat sig, hvilket har resulteret i et reduceret fald på dele af strækningen. [NKI A/S, 2013]



**Figur 4.8.** Billede fra TV-inspektionen hvor strækningens manglende selvrensningsevne illustreres.  
[NKI A/S, 2013]

På baggrund af beregningerne og TV-inspektionen konkluderes det, at der ikke er selvrensning på rørstrækningen mellem brønd Q063300 og Q063400. Det kan derfor være nødvendigt at spule ledningen regelmæssigt for at rense ledningen, hvorved mindst muligt sediment udledes til Guldbækken. Den teoretiske beregning af selvrensningsevnen stemmer altså overens med den virkelige i dette tilfælde. Der skal flere TV-inspektioner til for at vurdere om dette er generelt gældende, men dette undersøges ikke yderligere i dette projekt.

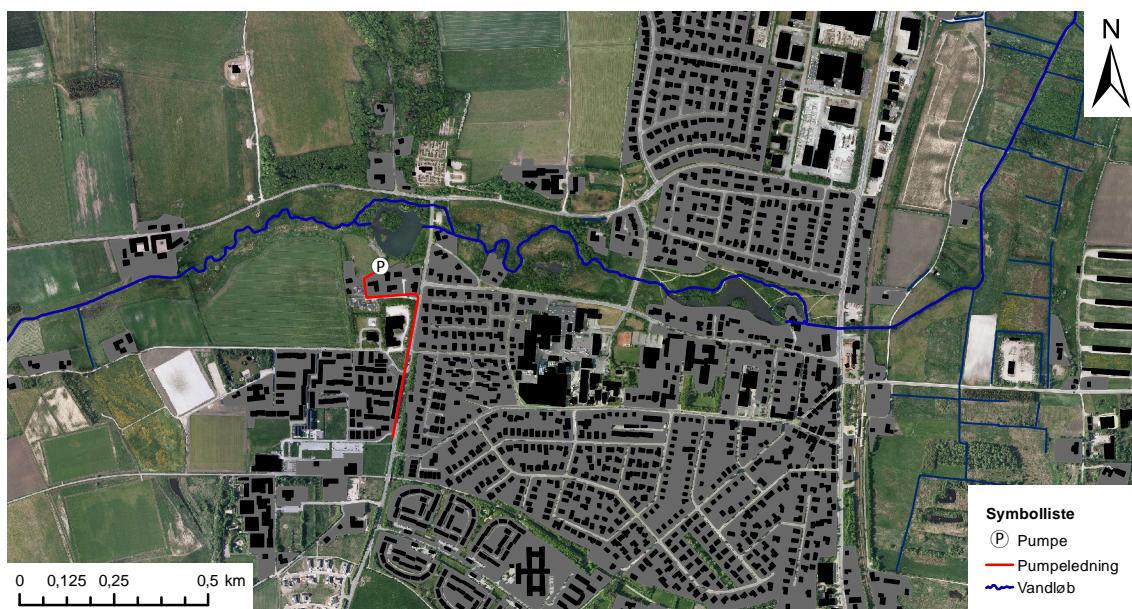
## 4.8 Yderlige problemer i Svenstrups afløbssystem

I separate såvel som fælleskloakerede afløbssystemer kan der opstå problemer med driften af disse. Dette er både ift. recipientbelastningen ved overløb under regnhændelser og tæring på rør som følge af gasudvikling.

I fælleskloakerede afløbssystemer kan der ophobe sig sedimenter i tørvejrsperioder, hvis spildevandsføringen ikke yder tilstrækkelig selvrensning, som det fremgår af figur 4.8. Når det efter en længere tørvejrsperiode regner, kan overvandet løsribe sediment og ved over-

løbshændelser udlede det til Guldbækken. Fænomenet kaldes *first flush*, idet sedimenterne løsrides ved det første skyld, for dermed at øge koncentrationen af forurenende stoffer i overløbsvandet i starten af overløbshændelsen. Guldbækken lider da større overlast, end hvis regnvandet er opblandet med den daglige spildevandsmængde. [Hvitved-Jacobsen et al., 2010, side 43]

I ledninger med lange opholdstider kan der forekomme anaerobe forhold, da bakterier i biofilmen i røret opbruger al ilten i vandet. Dette kan forekomme i Svenstrup i pumpeledningen som fremgår af figur 4.9. Typisk er pumperne ikke aktive hele tiden, hvorefter vandet opnår lange opholdstider i ledningerne. Når alt ilten i vandet er opbrugt, kan bakterierne udnytte ilten i sulfat, og der kan dannes svovlbrinte. Svovlbrinten kan friges fra vandet som gas, hvis vandet løber i et delfyldt rør. Svovlbrinte i gasfasen afsættes på fugtig beton som svovlsyre og tærer på betonrøret. Over år resulterer dette i en svækket styrke af røret, som forøger risikoen for kollaps. Endvidere er svovlbrinte giftig for mennesker og er livstruende ved atmosfæriske koncentrationer over 300 ppm. [Hvitved-Jacobsen et al., 2013, kapitel 4 og 6]



**Figur 4.9.** Pumpeledningens placering i Svenstrup.

Problemer med first flush kan løses ved regelmæssig renskylling af ledninger med dårlig selvrensning eller ved at sørge for bedre selvrensning, når der dimensioneres nye fælles-systemer. Udviklingen af svovlbrinte i ledninger med lang opholdstid kan forhindres ved tilslætning af fx ilt eller nitrat til spildevandet [Hvitved-Jacobsen et al., 2013, kapitel 7]. Hvis det ikke er muligt at dosere ilt eller nitrat i ledningen, kan der laves et betonrør med større godstykkelse, som er beregnet til langsomt at tærre væk og dermed fjerne svovlbrinten. Ydermere kan røret, hvori tæringen foregår, med fordel lægges tæt på terræn koten, hvormed røret lettere kan udskiftes, når der ved en TV-inspektion er konstateret for stor tæring [Thorndahl og Nielsen, 2015].

## 4.9 Usikkerheder ved beregning af selvrensning

Der er en række usikkerheder i forbindelse med beregning af bundforskydningsspændingen, både i valg af parametre, usikkerheden på diameter og hældning, vandmængden samt Mike Urbans beregningsmetode.

Rørenes ruhed er forudsat at være ens for alle rør, opgjort i to materialer: Beton og plastik. Idet ruheden afhænger af bl.a. biofilm, sedimenter, materiale og alder er der risiko for fejl, som kan medføre en driftsruhed forskellig fra de forudsatte værdier. Jf. følsomhedsanalysen afsnit 4.6 har rørgeometrien dog lille indflydelse på selvrensningsevnen.

Vandmængden, der simuleres i Svenstrup afløbssystem, hidrører fra spildevand fra boliger og industri. Mængden af spildevand fra boliger er litteraturværdier fra år 2011. Den anvendte værdi for middelvandføringen på 100l/PE/d er mindre end vandforbruget målt i år 2013 på ca. 107l/PE/d. [DANVA, 2014, side 4] Dette har dog lille betydning for byens selvrensningsevne, jf. afsnit 4.6.

Samtidig er døgnvariationen i boligområderne bestemt på baggrund af data fra Frejlev og er derfor ikke nødvendigvis repræsentativ for Svenstrup.

Spildevandsmængden fra industri er fra litteraturværdier fra år 1988 og kan derfor være forældet. Idet der igennem de sidste årtier har været en tendens i industrien til at nedsætte vandforbruget som følge af indførelsen af afgifter og bedre teknologi, er litteraturens værdi for spildevandsmængde sandsynligvis større end industriens aktuelle. [DANVA, 2014, side 4] & [Karlby og Sørensen, 2014, side 322] Der tages samtidig ikke forbehold for den enkelte industriel frem for ren industri. Dette kan også forventes at variere for typen af industri.

Industrien er ikke lige aktiv hele året rundt, bl.a. i weekender og helligdage. Spildevandsmængder som følge af dette simuleres ikke i modellen. Samtidig er døgnvariationen i industrien bestemt på baggrund af et eksempel på en forbrugskurve for middelstor by med stor industriel frem for ren industri. Dette kan også forventes at variere for typen af industri.

Minimumdøgnfaktoren kan variere alt efter bolig- og industrietypen, hvor der i denne undersøgelse ikke er valgt at differentiere, da der benyttes en fast faktor på 0,7. Det fremgår dog af følsomhedsanalysen, jf. afsnit 4.6, at selv en fordobling af forbruget ikke har særlig stor betydning for systemets selvrensningsevne.

Såfremt et afløbssystem ligger under grundvandsspejlet, kan der være indsvinring af regn- og grundvand samt dræn fra bygninger [Winther et al., 2011, side 80]. Dette bidrag til vandføringen i rørene er ikke medregnet, hvorfor selvrensningen i rørene formentlig er større end beregningsresultaterne.

Infiltrationen kan bidrage til systemets selvrensningsevne, jf. følsomhedsanalysen, afsnit 4.6. Det vurderes dog, at det anvendte estimat for infiltrationen er større end virkeligheden, og at en mere sandsynlig infiltrationsmængde, svarende til 20 % af spildevandsmængden, har tilnærmedesvis ingen betydning for selvrensningsevnen i systemet.

## 4.10 Opsummering

På baggrund af tørvejrsanalysen kan det konkluderes, at store dele af det fælleskloakerede system ikke opnår en tilstrækkelig selvrensningsevne i tørvejr. Beregningerne viser, at 47 % af fælleskloaksystemet har en forskydningsspænding, som er større end den kritiske værdi på 1,5 Pa og har derfor tilstrækkelig selvrensning.

For de resterende 53 %, hvor der ikke opnås tilstrækkelig selvrensning, kan der opstå problemer med kapaciteten. Dette vurderes dog at være af lille risiko for fællesledningerne, grundet deres allerede store kapacitet i tørvejrssituationer. Idet der ikke opnås selvrensning i ledningerne, øges den kemiske og biologiske belastning væsentligt for Guldbækken og Østerå, hvis sedimenterne resuspenderes under en regnvejrs situation og strømmer med ud ved overløbene. Det bør derfor undersøges, hvorvidt dette sænker kvaliteten i vandløbene. Overløbenes påvirkning på Guldbækken undersøges i kapitel 6 og 7.

# Analyse af afløbssystem i en regnvejrssituations

5

Afløbssystemet i Svenstrup analyseres for en regnvejrssituations. Der undersøges for problemer med hensyn til opstuvning på til terræn og kælder, samt mængden af overløbsvand, der udledes til Guldbækken fra afløbssystemet. I kapitlet gennemgås kalibreringen af Mike Urban modellen, jf. appendiks B, resultaterne for opstuvning og overløb. Det undersøges, hvor der sker oversvømmelse ved ekstreme regnhændelser, samt hvor robust afløbssystemet er overfor fremtidige klimaforandringer. I forbindelse med aflastning under regn bestemmes et iltbehov ved udledninger af overløbsvand til Guldbækken.

I regnvejrssituationsen består vandet i rørene af et regnvejrsbidrag og et bidrag fra spildevand, som også er brugt i kapitel 4. Der benyttes i regnvejrssituationsen en døgnmiddelværdi for spildevandet, eftersom det antages, at den maksimale spildevandssituations ikke opstår samtidig med en regnhændelse.

Det undersøges, om udnyttelsen af overløbene er i overensstemmelse med gældende krav, jf. afsnit 2.1.1. Før afløbssystemet analyseres, kalibreres modellen i Mike Urban. Forudsætningerne for kalibrering gennemgås i det følgende afsnit. Alle beregninger i Mike Urban kan findes på [Bilags-CD, SvenstrupMU].

## 5.1 Kalibrering af Mike Urban-model

Fællessystemet i Mike Urban-modellen for Svenstrup kalibreres med henblik på at opnå varigheder for overløbshændelser i overløbsbygværkerne så tæt på virkeligheden som muligt.

Der foretages en simulering, hvor overløbstiderne i modellen sammenlignes med de målte overløbstider for den enkelte regn. Målet med kalibreringen er at opnå en samlet afvigelse mellem modelresultater og målte tider på under 30 %. Kalibreringsparametre varieres, til dette opnås. Den hydrologiske reduktionsfaktor fastholdes på 0,8 for de separatkloakerede oplande, samt for oplande, som ikke er direkte tilkoblet et overløb, jf. figur 5.4. Beregninger kan findes på [Bilags-CD, Kalibrering].

En regn kan godt give mere end ét overløb, da den kan variere i intensitet. Alle overløbstiderne i modellen for hver regn summeres således, at den samlede overløbstid for hver regn bestemmes. Herved medtages selv de mindste overløb. Dette vurderes korrekt, eftersom de målte overløbstider er angivet som en tid for en hel dag, hvorved det ikke vides, om der er tale om et langt overløb eller flere mindre efter hinanden.

Når Mike Urban-modellen kalibreres, opstilles der følgende forudsætninger:

- Afløbssystemet er opdelt i oplande efter spildevandsplanen for Aalborg Kommune. Hvert opland er knyttet til et overløb, hvor hvert opland antages at have en samlet

hydrologisk reduktionsfaktor.

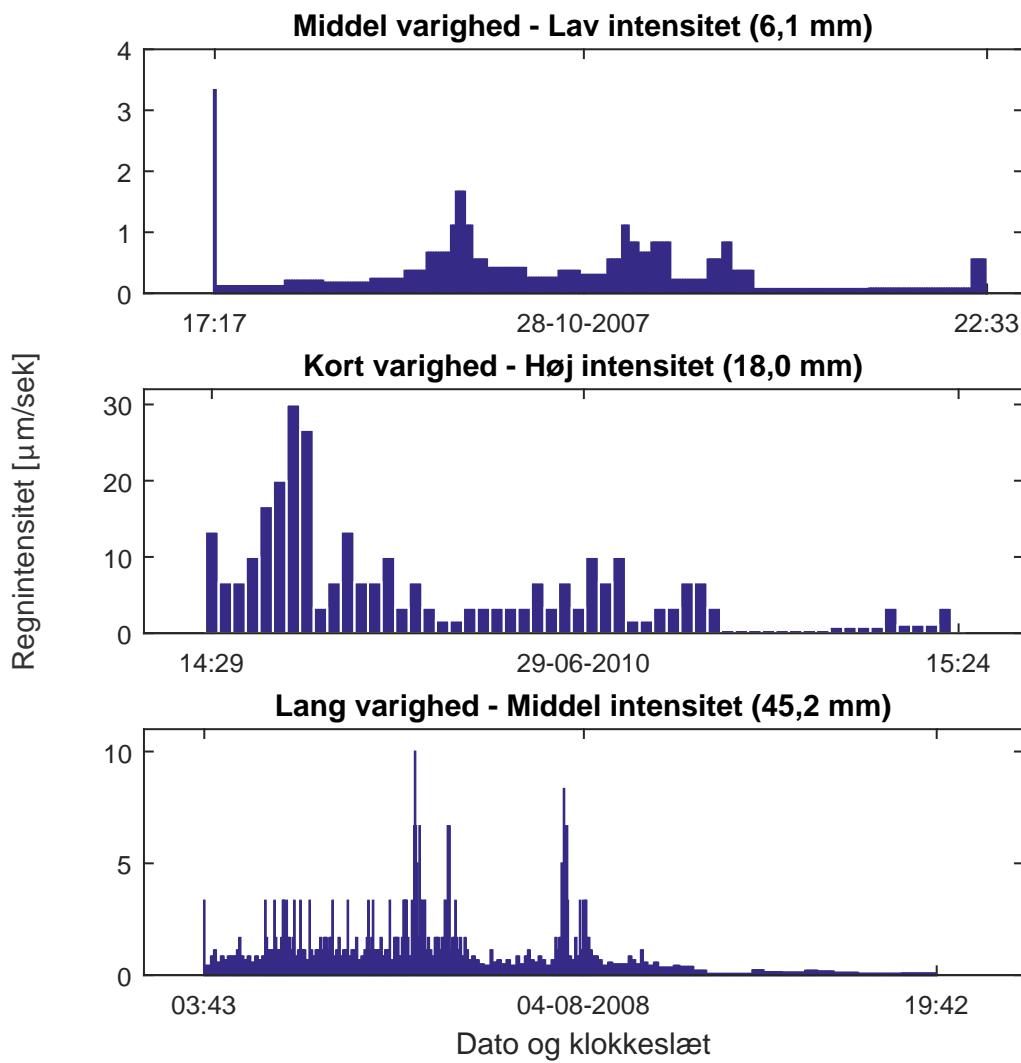
- Der kalibreres for en samlet vandmængde bestående af både regnvand og spildevand.
- Der benyttes de befæstelsesgrader, rørdata og koter for overløbskanter som angivet i Mike Urban modellen.
  - Der benyttes 3 karakteristiske regnhændelser fra en regnserie i Svenstrup.
  - Det antages, at regn falder med ens intensitet over hele området, da der ikke findes mere præcise målinger. Herved varierer regnintensiteten kun ift. tiden.
  - Spildevandsmængden vurderes så lille ift. regnvandet, at variationen i spildevandsmængden over døgnet vurderes ubetydelig ift. hvornår regnhændelsen forekommer.
  - Der benyttes en middel spildevandsføring for bolig og industri på hhv.  $0,1 \text{ m}^3/\text{PE/d}$  og  $5 \text{ m}^3/\text{ha/d}$ .
- Alle oplande antages rektangulære, hvorved tid-areal koefficienten i Mike Urban er 1,0.
- Dynamisk bølgemodel
  - Tidsskridt mellem 1 og 30 sekunder.

Befæstelsesgraden regulerer afløbskoefficienten ligesom den hydrologiske reduktionsfaktor, hvorved en kalibrering kan foregå ved kun at kalibrere hydrologisk reduktionsfaktor og fastholde befæstelsesgraden. Rørgeometrien og koterne for overløbskanterne anfægtes ikke, da de bør være i overensstemmelse med Aalborg Forsyning, Kloak A/S' data og kortmateriale.

### 5.1.1 Udvælgelse af regnhændelser til kalibrering

Der benyttes tre forskellige regnhændelser til kalibrering af modellen. Alle tre regnhændelser vægtes ens. De to vælges som ekstremhændelser; en med kort varighed og høj intensitet, samt en med lang varighed og middel intensitet. Den sidste af de tre regnhændelser er valgt som en kontrolregn med middel varighed og lav intensitet. Det vurderes, at disse tre regnhændelser er repræsentative til brug i en kalibrering.

Der benyttes data fra regnmåler 20461 i Svenstrup, som har regnvejrsdata fra 1979 - 2015. I 1990 d. 11/3 stoppede målingerne og blev genoptaget i 1998 d. 29/3. Måleperioden strækker sig derfor over 28 år. Regnserien er vedlagt på [Bilags-CD, Svenstrup\_regn]. De tre regnhændelser, der kalibreres efter, er i perioden fra år 2003 til 2010 tilsvarende overløbsdataene, jf. afsnit 5.1.4. Regnintensiteten for de tre regnhændelser kan ses på figur 5.1.



**Figur 5.1.** Regnintensitet ved de tre udvalgte regnhændelser.

De tre regnhændelser indsættes som en samlet regnserie i Mike Urban, hvor der imellem hver regnhændelse er indsat en periode på 6 timer uden regn, hvor afløbssystemet kan afstrømme og dermed vende tilbage til udgangspunktet, tørvejrssituacionen, før næste regnhændelse. Denne sammensatte regn kan findes på [Bilags-CD, sammensatregn].

### 5.1.2 Kalibreringsparametre

I analysen af Svenstrups afløbssystem anvendes overflademodel A. Indgangsparametrene i overflademodel A er initialtab, hydrologisk reduktionsfaktor og koncentrationstid.

Litteraturværdier for den hydrologiske reduktionsfaktor og initialtabet fremgår af tabel 5.1.

	Hydrologisk reduk- tionsfaktor [-]	Initialtab [mm]
Miljøstyrelsen [1990, side 13]	0,7 - 0,9	-
Winther et al. [2011, side 118]	0,7 - 0,8	0,5 - 1,0
DHI Water & Environment [2003, side 11]	0,9	0,6

**Tabel 5.1.** Litteraturværdier for den hydrologiske reduktionsfaktor og initialtab.

Igennem undersøgelser af forholdet mellem nedbør og afstrømning er der fundet hydrologiske reduktionsfaktorer mellem 0,42 og 0,60, vurderet på baggrund af fire danske byer [Thorndahl et al., 2006]. I samme undersøgelser er der beregnet et initialtab mellem 0,4 mm og 0,7 mm.

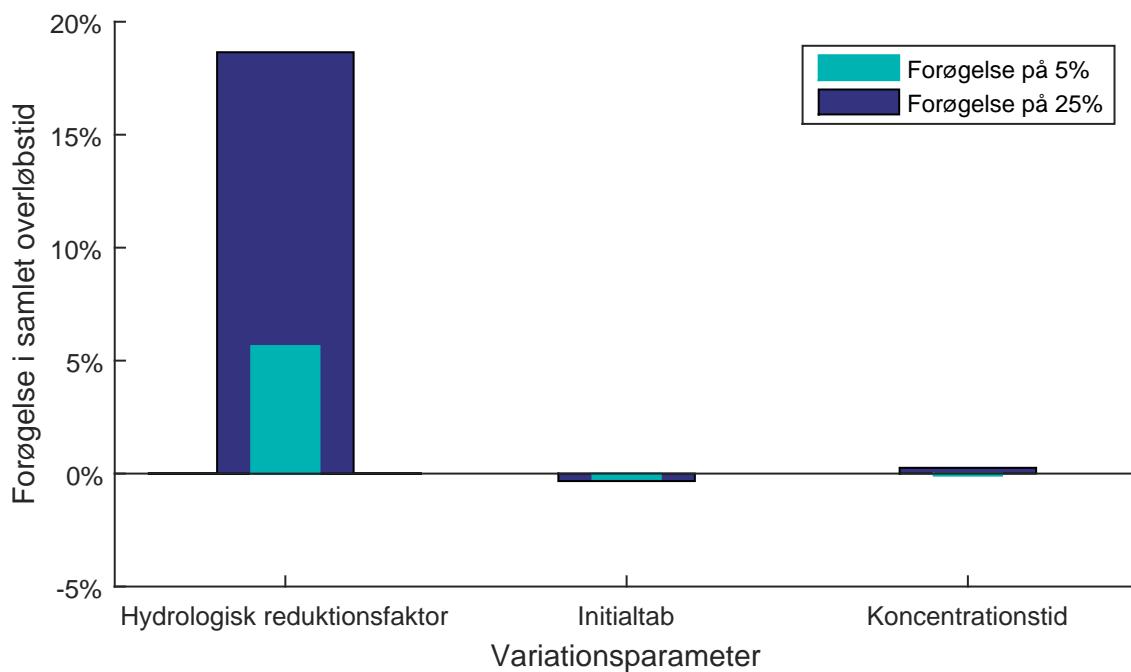
Koncentrationstiden er afhængig af oplandets uformning samt en række egenskaber, der påvirker hastigheden for overfladeafstrømningen. Idet der ikke er tilstrækkelig data til at bestemme koncentrationstiden for de enkelte oplande, fastsættes den til 7 min for alle oplande, som er standard i Mike Urban. Den hydrologiske reduktionsfaktor og initialtab afhænger også af oplandet og dets opbygning, dog er 0,6 mm for initialtab standard i Mike Urban. Den hydrologiske reduktionsfaktor er valgt til 0,8 for at have et fast udgangspunkt for alle oplande Winther et al. [2011, side 118].

### 5.1.3 Følsomhedsanalyse for kalibreringsparametre

Der udføres en følsomhedsanalyse på modellen for at undersøge modellens indgangsparametres indflydelse på overløbstiderne og bestemme det bedste parameter at kalibrere på. Følgende parametre varieres:

- Hydrologisk reduktionsfaktor.
- Initialtab.
- Koncentrationstid.

Der ændres således både på indgangsparametrene for overflademodel A samt tid-arealmетодen. Hver af parametrene ændres enkeltvis, hvorefter afløbssystemet simuleres i en regnvejrssituation. Der benyttes de tre kalibreringsregn, jf. figur 5.1, hvor der udføres en forøgelse af parametrene på henholdsvis 5 % og 25 % for de tre udvalgte regnhændelser. Resultaterne ved variation af parametrene ses på figur 5.2.



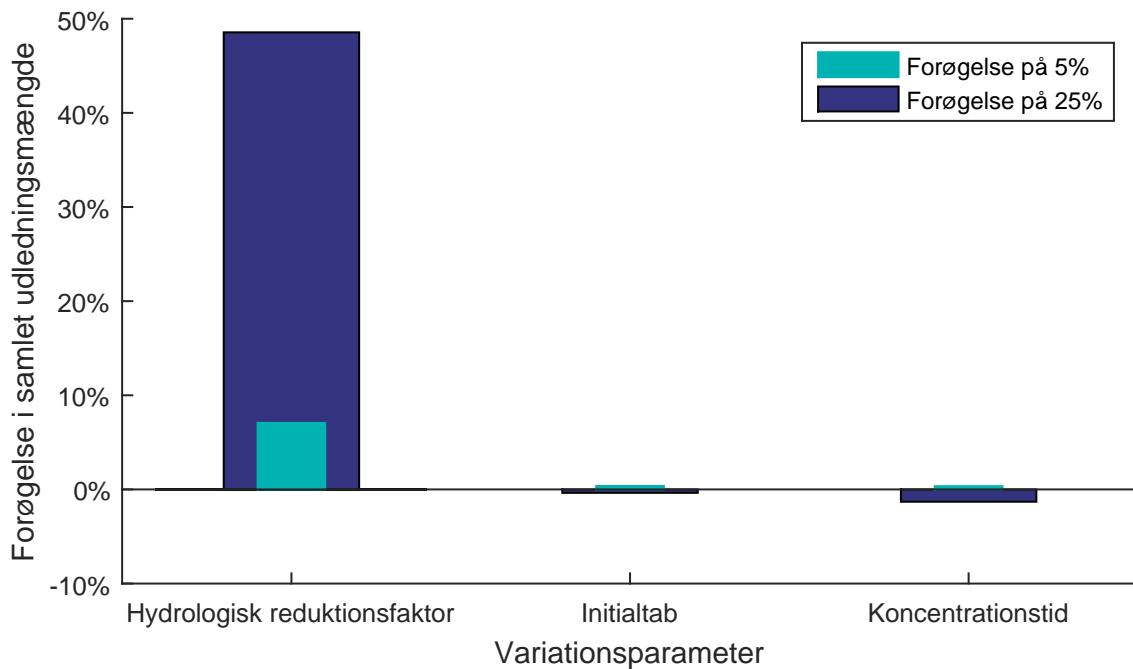
**Figur 5.2.** Følsomhedsanalyse på de tre parametre i forhold til samlet overløbstid.

Det ses, at en ændring af den hydrologiske reduktionsfaktor har størst indflydelse på den samlede overløbstid i afløbssystemet. Idet den hydrologiske reduktionsfaktor direkte påvirker mængden af vand, der indgår i afløbssystemet, forventes også en sammenhæng mellem den hydrologiske reduktionsfaktor og overløbstiden, hvilket også ses i figur 5.2.

En forøgelse af hhv. initialtab og koncentrationstid på 25 % medfører ændringer i den samlede overløbstid på under 1 %. De har derfor en væsentligt mindre indflydelse på overløbstiderne i afløbssystemet.

Idet der ønskes at fastlægge både varigheden af overløb samt den samlede udledningsmængde igennem overløbene vha. modellen, udføres der også en parametervariation, hvor der observeres ændringen i udledningsmængde, jf. figur 5.3. Det ses, at forøgelsen i udledningsmængde er ca. dobbelt så stor som forøgelsen i overløbstider, men med samme forhold mellem de enkelte parametre.

Det vurderes derfor, at overløbstiderne er et acceptabelt udtryk for udledningsmængden. Det accepteres derfor, at det ikke er muligt at kalibrere efter udledningsvandføringen, jf. afsnit 5.1.5.

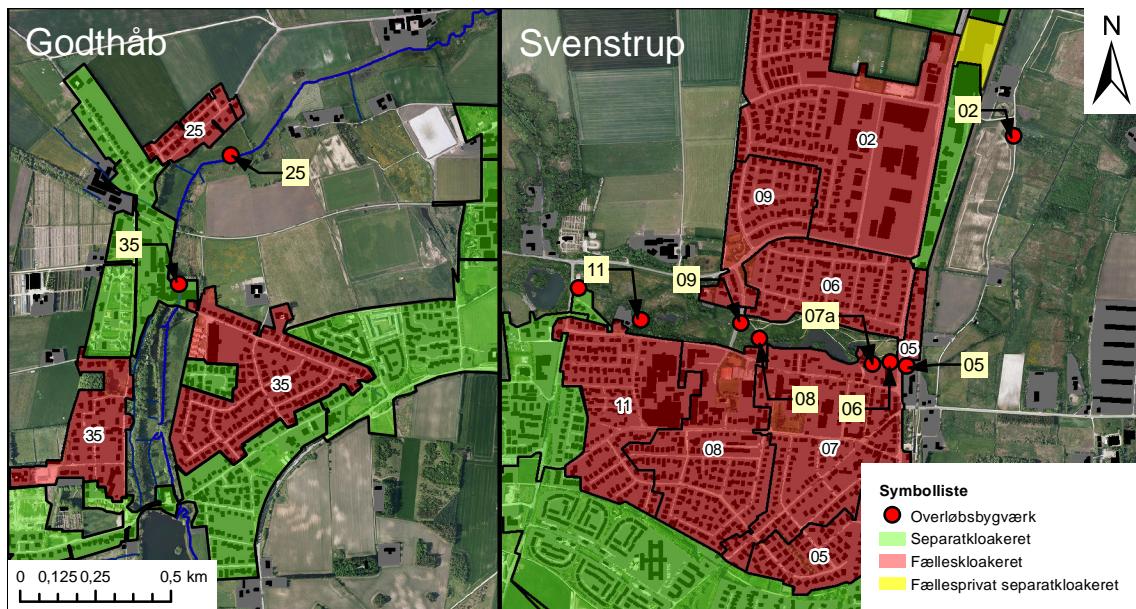


**Figur 5.3.** Følsomhedsanalyse på de tre parametre i forhold til samlet udledningsmængde.

Den hydrologiske reduktionsfaktor anvendes som eneste kalibreringsparameter, idet parameteret har størst indflydelse på overløbstiden og er et parameter, der kan variere væsentligt mellem oplande. Idet initialtab og koncentrationstid har væsentlig mindre indflydelse, vurderes det, at værdierne fra afsnit 5.1.2 er tilstrækkelige.

#### 5.1.4 Overløbsbygværker og oplande

Overløbsbygværkerne, som modellen kalibreres efter, fremgår af figur 5.4. Der er data for overløb i perioden fra 2003 til 2010 [Bilags-CD, Overløbsdata]. Der kalibreres ikke efter overløbsbygværk nr. 13a, jf. afsnit 2.1.1, idet der ikke forefindes data herfor.



**Figur 5.4.** Overløbsbygværker med tilhørende fælleskloakerede oplande.

### 5.1.5 Overløbsregistreringer

Overløbshændelserne er registreret vha. en SRO-måler (Styring, Regulering og Overvågning), bestående af to sensorer i overløbene. Overløbsvandet skaber en ledende kontakt mellem sensorerne, hvor overløbstiden er den tid, der er kontakt mellem sensorerne. Der registreres hvert fjerde minut om der er overløb. Endvidere kan der sætte sig toiletartikler fast på sensorerne og skabe en kontakt, selvom der ikke er overløb. [Rasmussen et al., 2008] Et eksempel på en SRO-måler fremgår af figur 5.5.



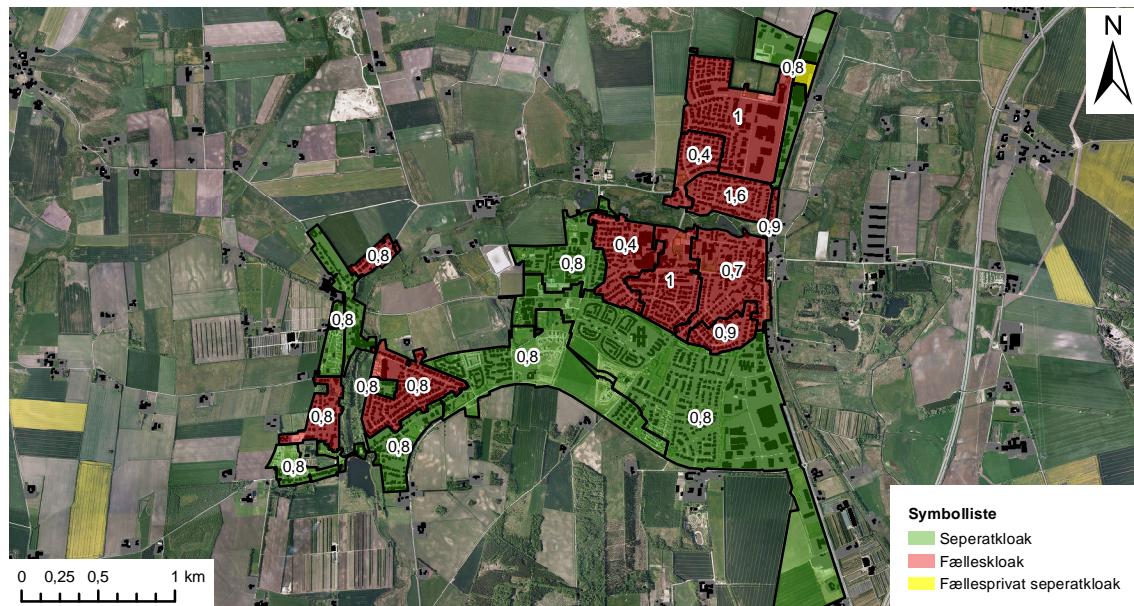
**Figur 5.5.** SRO-måler til registrering af overløb. [Rasmussen et al., 2008]

Hvert døgn er antallet af overløb og den samlede overløbstid registreret. Hvis der er mere end ét overløb på en dag, er overløbstiden for hvert overløb eller tiden mellem de to overløbshændelser således ikke opgivet. Det vurderes ifølge Rasmussen et al. [2008], at modellen kan kalibreres tilstrækkeligt udelukkende vha. overløbsvarighederne, men at én

hydrologisk reduktionsfaktor ikke kan anvendes for alle regnhændelser. Der vælges dog at bruge én hydrologisk reduktionsfaktor for hvert opland.

### 5.1.6 Resultater

Efter kalibrering er der bestemt en hydrologisk reduktionsfaktor for alle opplande, jf. figur 5.6 og tabel 5.2. Da de tre regnhændelser vægtes ens, bestemmes den hydrologiske reduktionsfaktor, som passer bedst totalt ift. alle tre regnhændelser.



**Figur 5.6.** Hydrologiske reduktionsfaktorer for de tilhørende fælleskloakerede opplande.

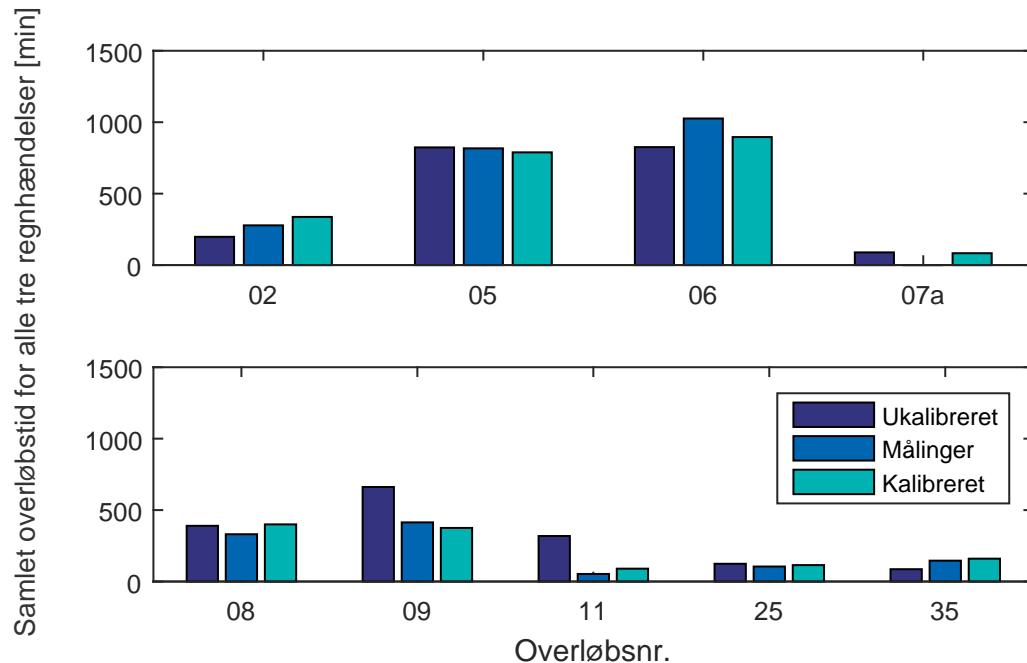
Opland	Middel	Kort	Lang	Hyd. red. faktor [-]	Middel	Kort	Lang	Afvigelse
	Målte tider [min]				Model tider [min]			[min]
02	0	0	278	1,0	0	53	287	63
05	105	106	606	0,9	117	74	606	43
06	181	102	743	1,6	160	87	653	127
07a	0	0	0	0,7	0	42	31	73
08	0	0	331	1,0	0	58	324	65
09	0	56	358	0,4	0	55	310	49
11	0	0	53	0,4	0	43	37	59
25	0	37	68	0,8	0	40	82	17
35	0	46	100	1,0	0	71	56	68

**Tabel 5.2.** Målte og model overløbstider med tilhørende hydrologisk reduktionsfaktor for de tre regn, jf. figur 5.1, samt samlet afvigelse imellem målte tider og tider i modellen.

Det ses, at den hydrologiske reduktionsfaktor varierer fra 0,4 til 1,6. Dette kan skyldes, at den udleverede Mike Urban model er sammensat af mindre delmodeller. I hver delmodel kan der således have været forskel på, hvordan de forskellige parametre er blevet defineret for at beskrive oplandet [Thorndahl].

Den gennemsnitlige reduktionsfaktor for Svenstrup er 0,83, vægtet ift. oplandenes arealer. Dette er indenfor intervallet af de anbefalede litteraturværdier, men dog er dette højere end de erfarede værdier for fire danske byer, jf. afsnit 5.1.2.

De samlede overløbstider før og efter kalibrering sammenlignet med målingerne fremgår af figur 5.7. Det ses, at de kalibrerede overløbstider samlet set er tættere på målingerne end overløbstiderne før kalibrering.

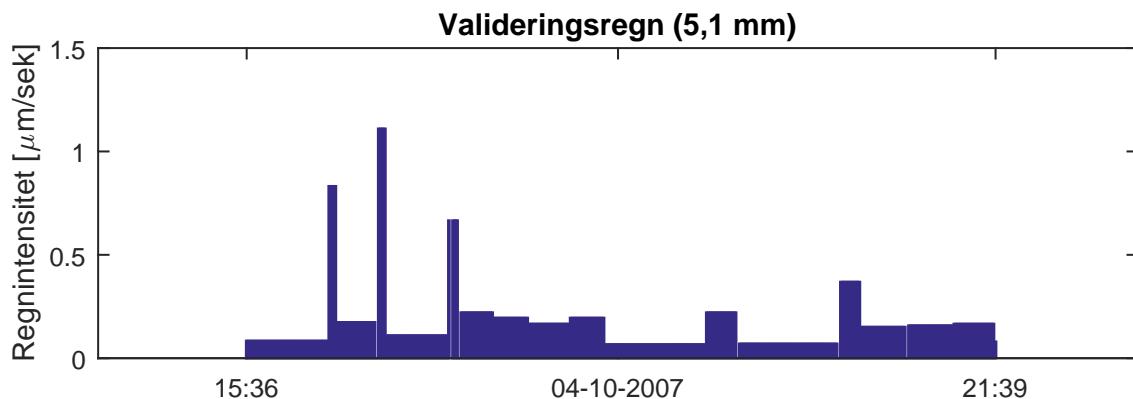


**Figur 5.7.** Overløbstiderne for alle tre regnhændelser før og efter kalibrering i forhold til målte overløbstider.

Som det fremgår af figur 5.7, passer modellen ikke fuldstændig med dataene for overløbene, men det vurderes, at det ikke er muligt at opnå bedre overensstemmelse mellem model og virkelighed ved kalibrering ift. overløbstiderne og justering af den hydrologiske reduktionsfaktor. Dette skyldes, at en ændring af den hydrologiske reduktionsfaktor for et opland vil have negativ indflydelse på overløbstiderne for et andet. Kalibreringen vurderes således at være tilstrækkelig, da den samlede afvigelse mellem simuleringsresultater og målte tider er reduceret til 16 %, hvorved kalibreringskriteriet er opfyldt, jf. afsnit 5.1.

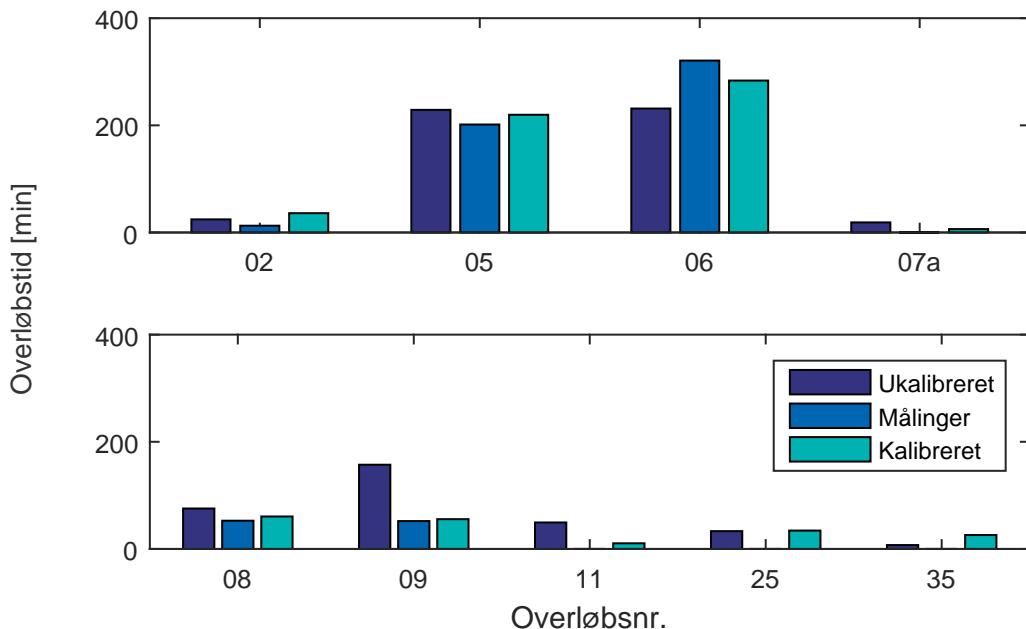
### 5.1.7 Validering af kalibreret model

Den kalibrerede model simuleres med en regnhændelse forskellig fra de tre hændelser, modellen er kalibreret efter, for at vurdere modellens evne til at simulere andre regnhændelser. Regnen, der anvendes, er fra d. 4/10 2007 og fremgår af figur 5.8. Overløbstiderne simuleres igennem den kalibrerede Mike Urban-model, og resultaterne sammenlignes med målingerne for overløbstiderne. Sammenligningen ses på figur 5.9.



**Figur 5.8.** Regnintensitet ved valideringsregnen.

Det ses ud fra figur 5.9, at den kalibrerede model opnår mindre afvigelse fra målingerne i forhold til den ukalibrerede model. Sammenlagt opnås en afvigelse på 26 % for den kalibrerede model og 57 % for den ukalibrerede.



**Figur 5.9.** Overløbstiderne for valideringsregnen før og efter kalibrering i forhold til målte overløbstider.

Idet modellen opnår afigelser under kalibreringskriteriet, vurderes det, at modellen er kalibreret tilstrækkeligt. Det vurderes derfor, at modellen kan benyttes til videre analyse af Svenstrups afløbssystem under andre regnhændelser.

## 5.2 Opstuvning og overløb

For at analysere Svenstrups afløbssystem i regnvejrssituationer mht. opstuvning og udnyttelse af overløb, anvendes den historiske regnserie fra Svenstrup, jf. afsnit 5.1.1.

Til analysen benyttes Long Term Statistics funktionen, LTS, i Mike Urban. I LTS simuler-

ringen simuleres kun regnhændelser udvalgt på baggrund af et kriterium. Undersøgelserne for opstuvning samt vandføring fra overløb simuleres i alle 28 år, som regnserien dækker.

28-års-simuleringen inkluderer kun de regnhændelser med højest intensitet, idet der ønskes at simulere kritiske regnhændelser.

Kriterierne for 28-års-simuleringen, som afgrænsner hvilke regnhændelser, der udvælges fra den historiske regnserie, er følgende:

- Start: Når tilstrømningen i systemet overskrider  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  i mere end 10 min, hvilket svarer til en regndybde på 5,41 mm.
- Stop: Når tilstrømningen i systemet kommer under  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$  i mere end 30 min, hvilket svarer til en regndybde på 0,33 mm.
- Resultat: 54 regnhændelser på 28 år.

Start-kriteriet vurderes at medtage de kritiske regnhændelser, som giver anledning til opstuvning fra afløbssystemet. Stopkriteriet er sat lavt, for at sikre at hele regnhændelsen medtages i simuleringen.

Der benyttes en tre-års-simulering til bestemmelse af overløbsfrekvens, da der skal bruges flere regnhændelser pr. år, for at undersøge om antallet af udledninger overskrider kravet på én gang om måneden, jf. afsnit 2.1.1. Simuleringsperioden er d. 15/4 2012 til d. 15/4 2015 for 3 års simuleringen.

Tre-års-simuleringsperioden inkluderer tilnærmelsesvis alle regn i perioden, idet der ønskes at simulere hyppighed og årlige udledningsmængder.

Kriterierne for tre-års-simuleringen er følgende:

- Start: Når tilstrømningen i systemet overskrider  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$  i mere end 1 min, hvilket svarer til en regndybde på 0,01 mm.
- Stop: Når tilstrømningen i systemet kommer under  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$  i mere end 30 min, hvilket svarer til en regndybde på 0,33 mm.
- Resultat: 697 regnhændelser på 3 år.

### 5.2.1 Ændringer foretaget efter kalibrering

Ved simulering af den udleverede Mike Urban-model i kombination med de kalibrerede hydrologiske reduktionsfaktorer samt de kritiske regnhændelser opstår der simuleringsfejl i overløb nr. 02 og en pumpe i den nordlige del af modellen, jf. appendiks B. Derfor foretages en række ændringer i modellen:

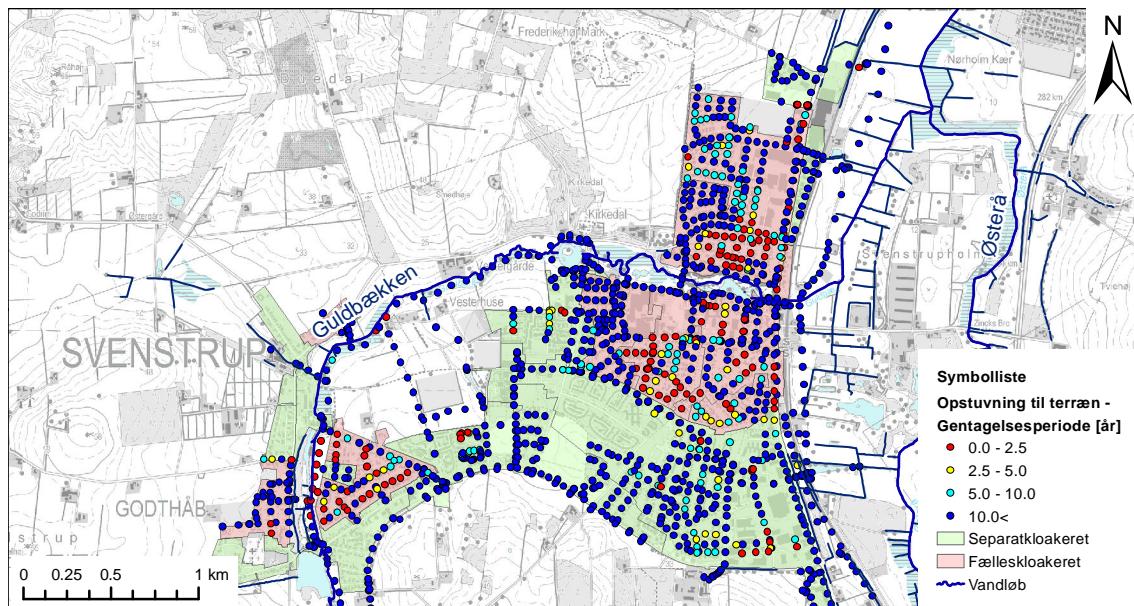
- Spilde- og regnvandsbidrag fra oplandene syd for Svenstrup fjernes.
- For overløb nr. 02 ændres overløbskantens bredde fra 10 m til 3,14 m, som svarer til omkredsen af brønddækslet ved overløbsbygværket. Dette er den anbefalede standardværdi for overløbskantens bredde, såfremt der ikke er tilgængelige mål for overløbet [DHI, 2011a, side 201].

Foruden benyttes en dynamisk bølgemodel med et tidsskridt i intervallet 1 til 60 sekunder, da modellen bliver ustabil med mindre tidsskridt.

### 5.2.2 Opstuvning til kritisk kote

I analysen undersøges systemet for, hvor ofte der sker opstuvning til to forskellige kritiske niveauer. De kritiske koter, der anvendes, er terrænniveau og kælderniveau.

For de definerede kritiske koter gælder, at der højest må forekomme opstuvning hver 10. og 5. år for hhv. fælles- og separate afløbssystemer, jf. afsnit 2.1.2 [IDA Spildevandskomiteen, 2005, tabel 1]. Gentagelsesperioden for opstuvning til terrænniveau er illustreret på figur 5.10.

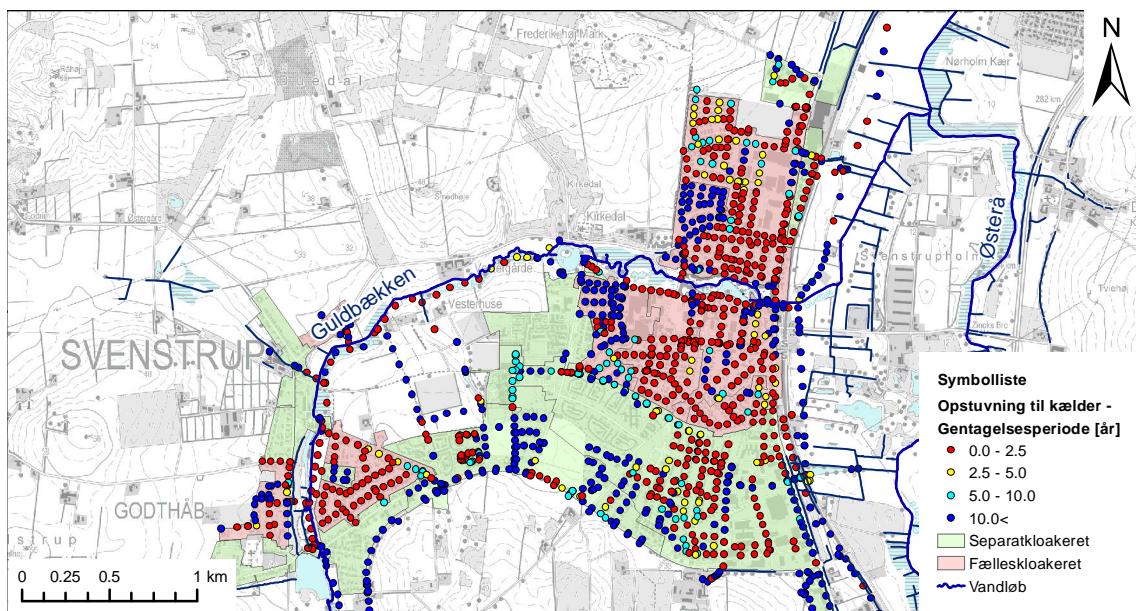


**Figur 5.10.** Gentagelsesperiode for opstuvning til terrænniveau.

Figur 5.10 viser, at det primært er i de fælleskloakerede oplande, der er problemer med opstuvning til terrænniveau. 52 % af brøndene overholder ikke kravet om vand på terræn maksimum hvert 10. år. I de separatkloakerede oplande er der 8 % af brøndene, som ikke overholder kravet om en gentagelsesperiode på 5 år. Dette kan skyldes, at fællessystemerne er ældre jf. figur 2.4. Det er derfor sandsynligt, at fællessystemet ikke er dimensioneret til et øget indbyggertal og forøgelse af befæstelsesgraden som følge her af.

Der ses ikke nogen gennemgående sammenhæng mellem de indrapportererde opstuvninger til skadeservicefirmaer, jf. figur 2.3, og den simulerede opstuvning i Mike Urban. Dette kan skyldes, at de indrapportererde data er angivet pr. meter ledning. Opstuvningerne kan således være fordelt på et længere ledningsnet i de oplande, som er kritisk i simuleringen, men ikke i de indrapportererde data. Derudover er det muligt, at nogle opstuvninger ikke er blevet indrapporteret.

Kælderniveauet antages at befinde sig 1,5 m under terrænniveau. Kælderniveau antages at være kritisk, da der kan være opstuvning i huse. Det kan dog være svært at vurdere problematikken ved opstuvning til kælderniveau, da der ikke foreligger noget data for andelen af hustante, som har kælder. Figur 5.11 viser gentagelsesperioden for opstuvning til kælderniveau.

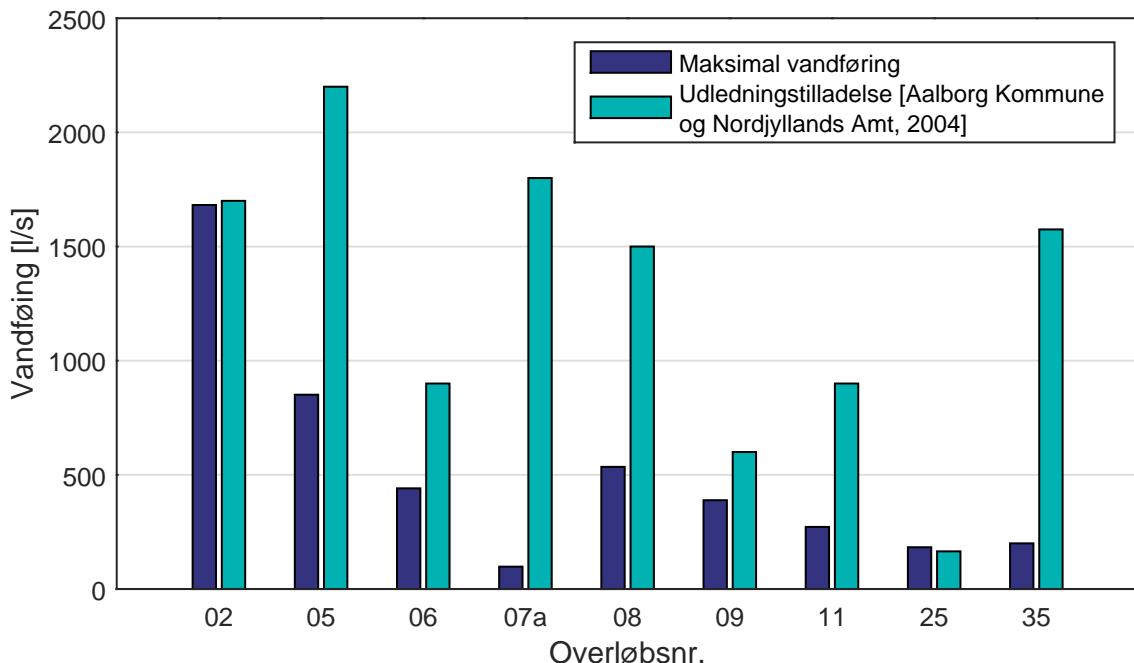


**Figur 5.11.** Gentagelsesperiode for opstuvning til kælderniveau.

I de fælleskloakerede oplande overskrides gentagelsesperioden i 71% af brøndene mht. opstuvning til kælder.

### 5.2.3 Vandføring fra overløb

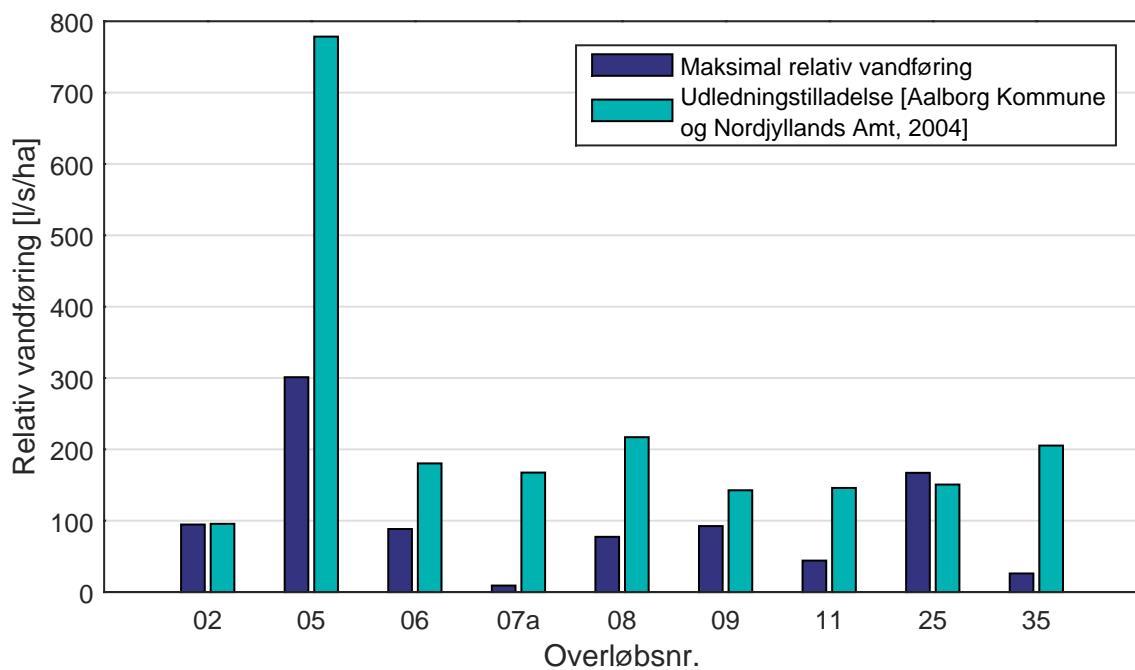
På baggrund af simuleringen på 28 år er de maksimale vandføringer bestemt for de enkelte overløb, jf. figur 5.12. De maksimale vandføringer bliver sammenholdt med udledningstilladelserne opstillet i tabel 2.2.



**Figur 5.12.** Maksimal vandføring og udledningstilladelse for overløb.

For otte ud af de ni overløb overskrider den maksimale vandføring ikke kravet opstillet i udledningstilladelserne. For overløb nr. 02 udnyttes 98 % af den tilladte vandføring, mens resten, der overholder kravet, udnytter mindre end 50 %. Overløb nr. 25 overskrider kravet med 11 %. Udledningstilladelsen overskrides to gange i simuleringsperioden, hvorfor gentagelsesperioden vurderes at være 14 år for overskridelse af udledningstilladelsen, hvilket skal løses.

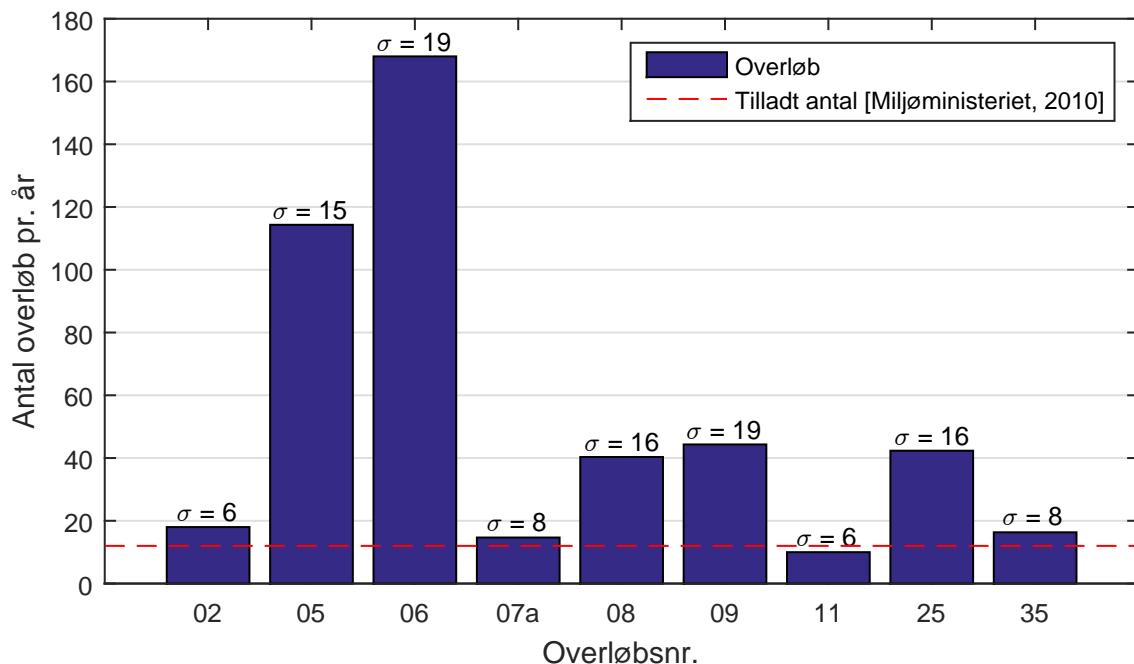
Figur 5.13 illustrerer den relative vandføring ift. det befæstede oplandsareal. Det kan ses, at overløb nr. 05 opnår den største vandføring ift. oplandsarealet. Dette kan skyldes, at oplandet er et af de mindste, samt at det ligger tæt på Hobrovej, som er en større vej i Svenstrup, hvor oplandet muligvis modtager vand fra. Forskellen i vandføringen mellem overløbsbygværkerne kan skyldes størrelsen på bygværket, opbygningen af det tilhørende afløbssystem samt det tilhørende oplands størrelse.



**Figur 5.13.** Maksimal vandføring og udledningstilladelse pr. hektar befæstet areal.

#### 5.2.4 Overløbsfrekvens

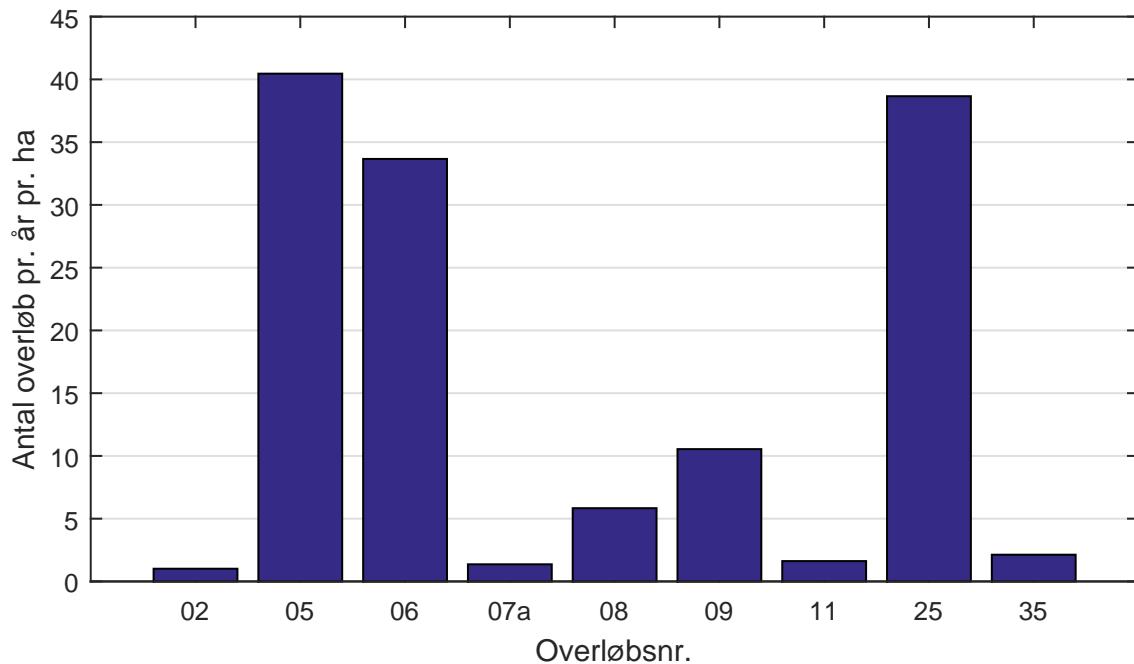
På baggrund af den tre-årige LTS-simulering analyseres antallet af udledninger fra overløbene. Det gennemsnitlig antal af overløb pr. år er vist på figur 5.14. Det antages at årene 2012 og 2015, som ikke er fuldt simulerede, har den samme overløbsfrekvens resten af året. Overløbsfrekvensen sammenlignes med kravet for frekvens af udledninger, jf. afsnit 2.1.1. Der tillades korttidsudledninger, der forekommer i gennemsnit højest én gang om måneden, dvs. 12 gange per år [Miljøministeriet, 2010].



**Figur 5.14.** Antal overløb pr. år.

Det ses, at kun overløb 11 overholder kravet. De otte andre overløb, der er analyseret, overskrider til forskellig grad. Endvidere er der beregnet en spredning for hvert overløb årene imellem, jf. figur 5.14. Det ses, at spredningen er størst for de overløb, der også har den største overløbsfrekvens.

Figur 5.15 viser antallet af overløb pr. år pr. hektar befæstet areal. Det er overløb nr. 05, 06 og 25, som har den største overløbsfrekvens ift. befæstet areal.

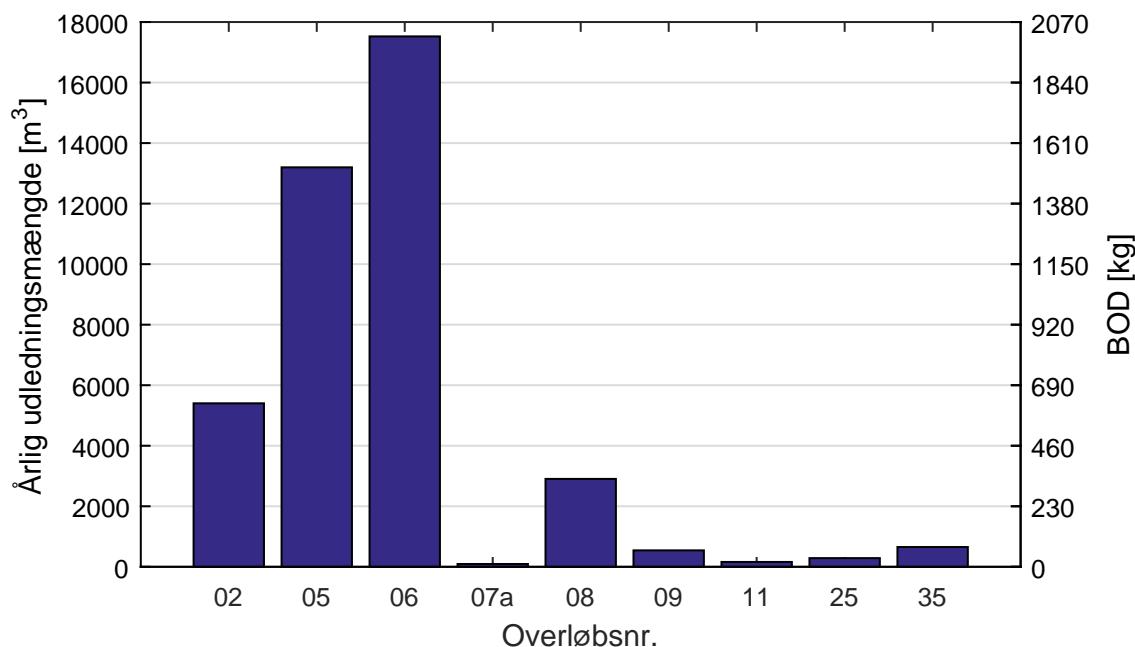


**Figur 5.15.** Antal overløb pr. år pr. hektar befæstet areal.

### 5.2.5 Overløbsvolumen og iltbehov

Grundet den ringe selvrensningsevne i de fælleskloakerede oplande, risikeres der en ophobning af sedimenter i afløbsrørene, som kan udledes ved regn. Det undersøges, hvor store mængder overløbsvand, der aflastes pr. år på baggrund af den tre år lange simulering.

Der benyttes en middel BOD<sub>5</sub>-værdi (biological oxygen demand) på 115 g/m<sup>3</sup> for overløbsvandet [Hvitved-Jacobsen et al., 2010, tabel 5.3]. BOD<sub>5</sub>-værdien er iltmængden, der anvendes ved oxidation af organisk stof ved aerobe forhold over fem døgn og en temperatur på 20 °C [Winther et al., 2011, side 67]. Figur 5.16 viser den årlige udledning af overløbsvand samt indholdet af BOD<sub>5</sub>. Det kemiske iltbehov bliver ikke undersøgt i denne rapport.



**Figur 5.16.** Årlig udledning af overløbsvand og BOD<sub>5</sub>.

De kritiske overløbsbygværker er primært overløb nr. 02, 05 og 06. De udleder den største mængde overløbsvand og derfor også den største mængde BOD<sub>5</sub> årligt. Der kan derfor være risiko for at iltforholdene nedstrøms for disse overløb bliver påvirket.

## 5.3 Klimaforandringers påvirkning på afløbssystemet i Svenstrup

Der udføres en analyse af afløbssystemet, hvor der tages forbehold for fremtidige klimaforandringer, for at undersøge mulige fremtidige problemer for afløbssystemet. Her tages der udgangspunkt i en tidshorisont på 100 år.

I Spildevandskomiteens Skrift nr. 29 undersøges klimaforandringerernes indflydelse på ekstremregn på baggrund af historiske målinger samt klimasimuleringer udført igennem

HIRHAM4-modellen, hvilket er en klimamodel, der indeholder primært Nordvesteuropa.

På baggrund af undersøgelserne forslås en forøgelse af regnintensiteten for ekstremregn, som er vist i tabel 5.3. Det anbefales samtidigt at undlade klimaforandringerne indflydelse på regnhændelsernes varighed, idet dette er vanskeligt at håndtere i praksis og vurderes mindre betydningsfuldt end intensiteten. [IDA Spildevandskomiteen, 2008]

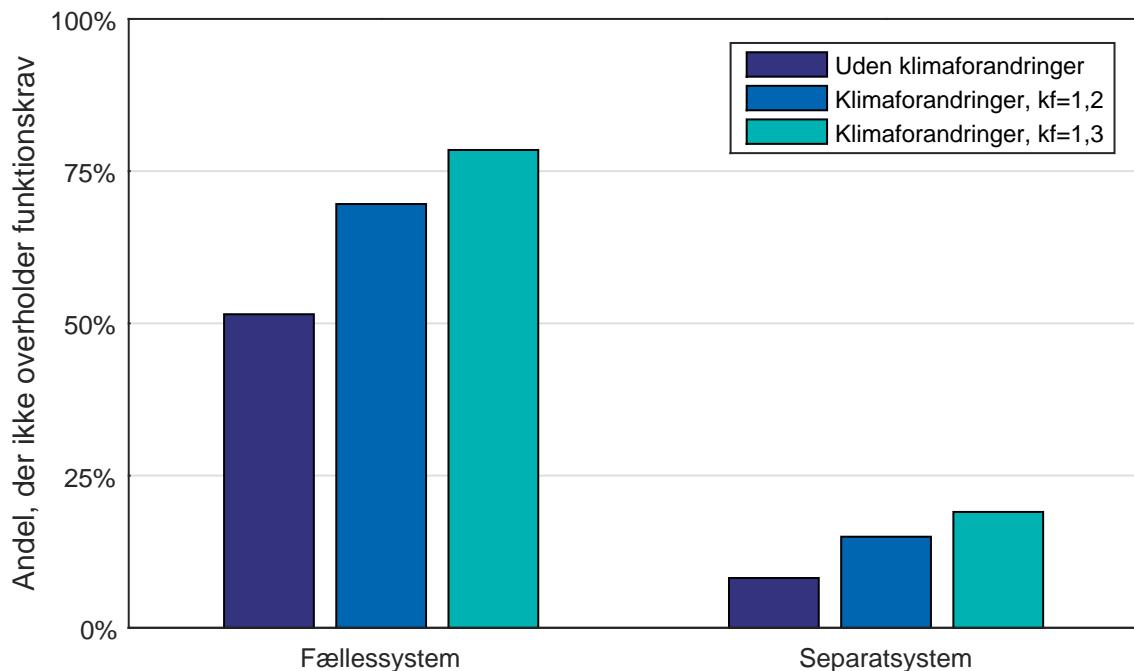
Gentagelsesperiode	2 år	10 år	100 år
Alle varigheder	1,2	1,3	1,4

**Tabel 5.3.** Forslag til klimafaktorer til forøgelse af regnintensitet for ekstremregn. [IDA Spildevandskomiteen, 2008]

Klimaforandringerne simuleres på samme vis som beskrevet i afsnit 5.2. Der anvendes regnserien fra Svenstrup, som dækker årrække 1979-2015. Regnintensiteten hæves med klimafaktorerne angivet i tabel 5.3. Der hæves med faktorer for hhv. 2 år og 10 år, idet regnserien sandsynligvis ikke indeholder regnhændelser med en gentagelsesperiode på 100 år.

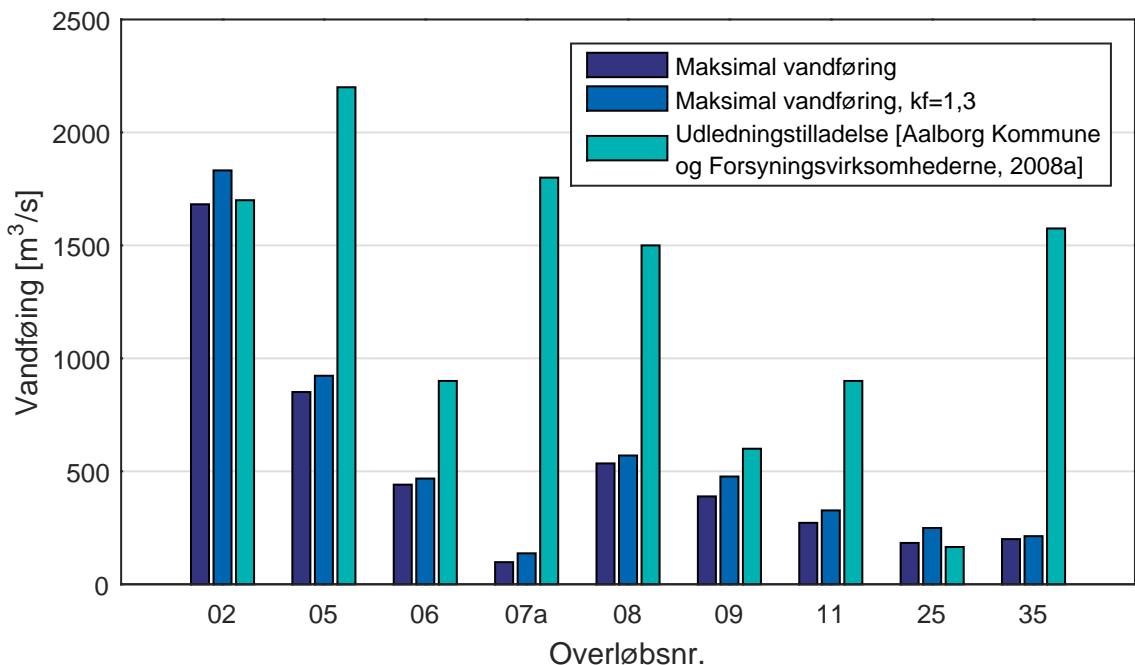
Der simuleres overløbsvandføring samt opstuvning til terræn. Opstuvning til terræn, når der anvendes en klimafaktor på hhv. 1,2 og 1,3, fremgår af appendiks C. Sammenlignet med figur 5.10 ses det, at der er væsentligt hyppigere opstuvning til terrænniveau, når der tages forbehold for klimaforandringer. Andelen af fælless- og separatsystemet der overholder funktionskravet beskrevet i afsnit 2.1.2, fremgår af figur 5.17.

Det bemærkes, at klimafaktorerne kun er gældende for en gentagelsesperiode på hhv. 2 og 10 år, hvormed der burde benyttes andre klimafaktorer på regnhændelserne med andre gentagelsesperioder.



**Figur 5.17.** Andelen af fællessystemet og separatsystemet, der ikke overholder funktionskravet omkring opstuvning til terræn.

Den maksimale udledning fra overløb, når der anvendes en klimafaktor på 1,3 samt uden klimaforandringer, sammenlignet med udledningstilladelserne, ses på figur 5.18. Der angives kun for en klimafaktor på 1,3, idet der søges maksimale udledninger for 28-års-simuleringen.



**Figur 5.18.** Maksimal vandføring når der anvendes en klimafaktor på 1,3 ift. udledningstilladelserne for overløbene.

Det ses, at overløb nr. 02 nu overskridt udledningstilladelserne, når der medregnes klimaforandringer. Bemærkelsesværdigt er det, at en klimafaktor på 1,3, hvilket hæver regnintensiteten med 30 %, kun hæver den maksimale vandføring i overløbene med gennemsnitligt 11 %. Dette kan skyldes forsinkelser i afløbssystemet grundet den øgede vandmængde.

## 5.4 Oversvømmelsesrisiko

Idet der er registreret opstuvning til terræn i Svenstrup, undersøges det, hvor Svenstrup oversvømmes og til hvilken grad ved ekstremregn. Der udføres derfor en oversvømmelses-simulering med brug af Mike Urban.

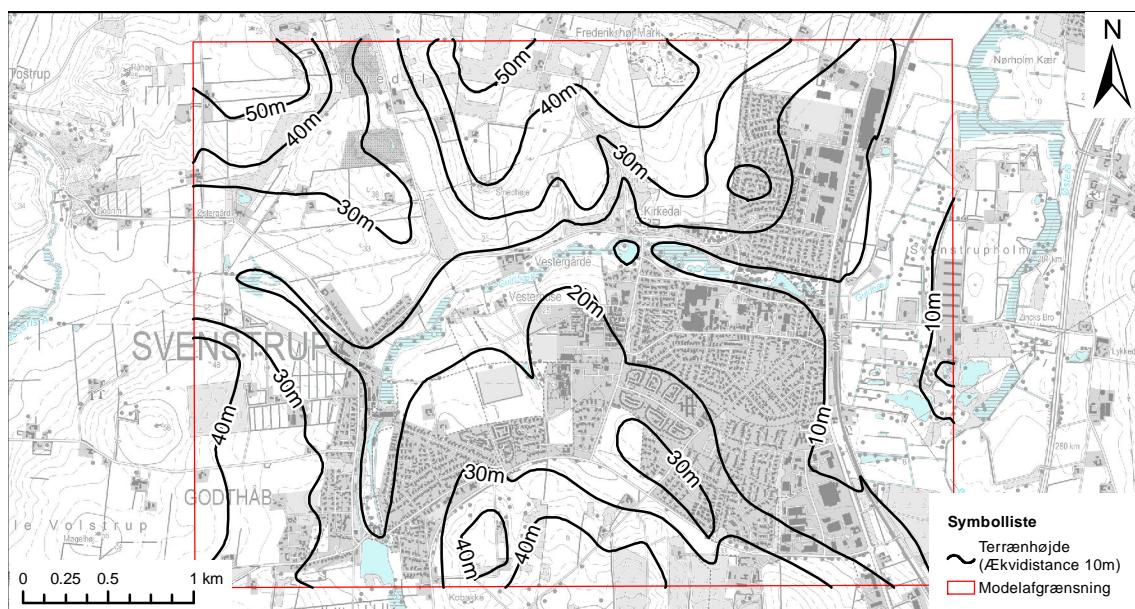
Ifølge Miljøministeriet [2012, kapitel 3 og 4, § 7a] skal oversvømmelseskortet som følge af kapacitetsproblemer beregnes ud fra estimerede regnhændelser i år 2050 med 5-, 10-, 20-, 50-, og 100-års gentagelsesperiode. I projektet udarbejdes et oversvømmelseskort med en tidshorisont på 100 år og en gentagelsesperiode på 100 år, idet projektgruppen ikke har kendskab til 2050 klimafaktorer.

Der anvendes en højdemodel med opløsning på  $1,6 \times 1,6$  m. Højdemodellen er et terrænkort, dvs. bygninger, træer og lign. er ekskluderet fra modellen.

Bygninger hæves med 5 m. Det er usikkert, hvorvidt kantsten o.l. er repræsenteret i

terrænkortet, hvorfor veje sænkes med 20 cm i højdemodellen for at repræsentere dem. Formålet med begge ændringer er at repræsentere overfladestrømninger og strømningsveje i Svenstrup mest virkelighedsnær.

Modellen afgrænses, så yderområderne omkring Svenstrup ikke medtages, hvilket sænker beregningstiden. Terrænkortet samt modelafgrænsning fremgår af figur 5.19.



**Figur 5.19.** Terrænkort samt modellafgrænsning, som anvendes til oversvømmelsessimulering.

Oversvømmelsessimuleringen foretages for kasseregn af varigheden 2 timer, 3 timer, 4 timer og 6 timer. Det har ikke været muligt at simulere for kasseregn af varigheder under 2 timer grundet instabilitet i modellen uden at sænke tidsstep til under 0,3 s. Idet simuleringen med en kasseregn af varighed på 2 timer med tidsstep på 0,3 s har en simuleringstid på 12 timer, vælges der ikke at kontrollere for kortere varigheder. Overflademodellens oplosning på  $1,6 \times 1,6$  m nødvendiggører det lave tidsskridt. Derfor kan modellens oplosning sænkes for at løse problemerne med instabilitet, men dette udføres ikke i dette projekt.

Kasseregnene har en gentagelsesperiode på 100 år og beregnes ud fra en års middelnedbør på 690 mm. Års middelnedbøren er beregnet på baggrund af de 28 års regndata for Svenstrup.

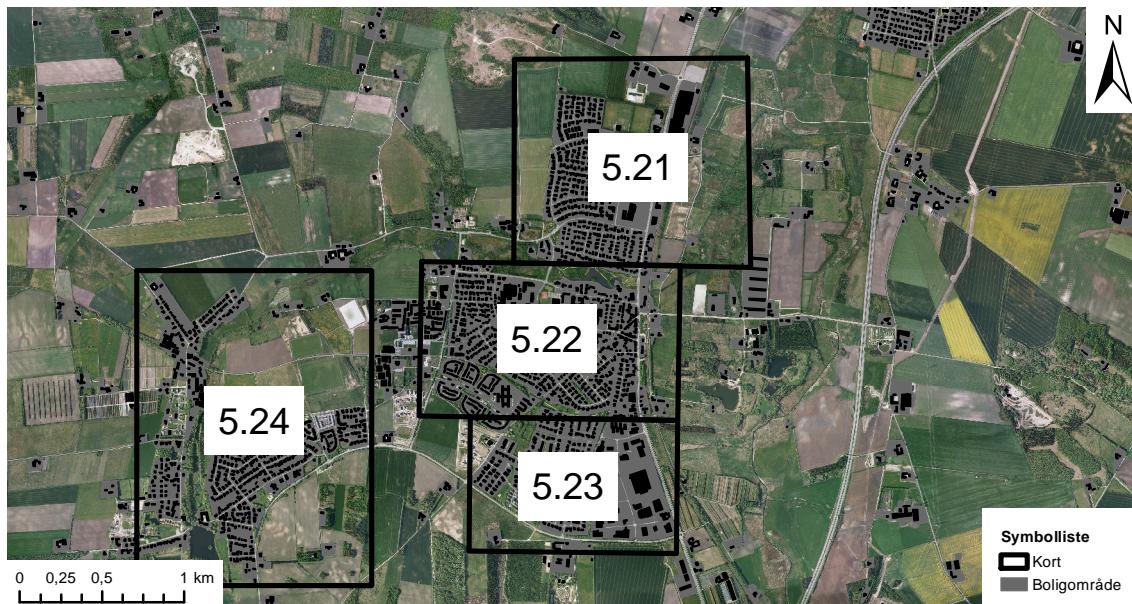
Simuleringen kombinerer en 1D-model for rørsystemet med en 2D-model for strømninger på terræn. Følgende forudsættes for simuleringen af strømninger på terræn:

- Beregningsnet med cellestørrelse på  $1,6 \times 1,6$  m.
- Der simuleres i hele kasseregnens varighed.
- Beregningscellerne medtages i overfladesimuleringen, såfremt der opnås opstuvning over 3 mm over terræn, indtil opstuvning falder til 2 mm over terræn - Standardværdi [DHI Water & Environment, 2003].
- Konstant ruhed for overfladen i hele Svenstrup svarende til et manningtal på  $M = 32,0 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  - Standardværdi [DHI Water & Environment, 2003].
- Eddy viscosity, hvirvel viskositeten, regnes flux-baseret,  $E = 0,02 \cdot dx \cdot dy/dt$  - Standardværdi, [DHI Water & Environment, 2003].
- Der benyttes en klimafaktor på 1,4.

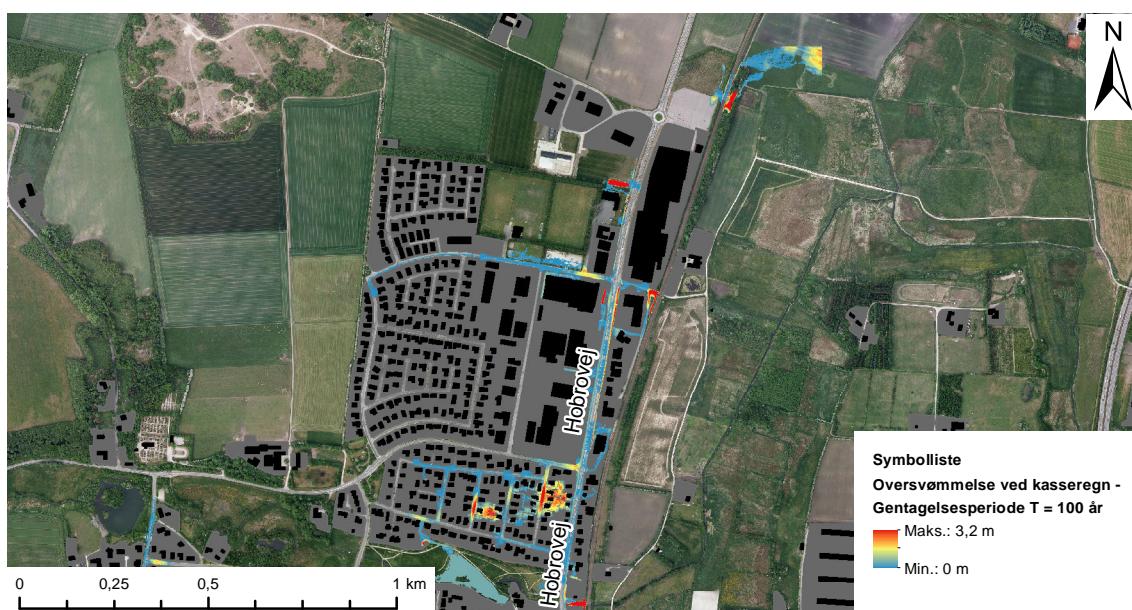
- Der benyttes statistisk usikkerhed på 1,2.
- Ændret arealanvendelse vælges til 1,0.
- Ingen vand på terræn ved start af simulering.
- Ingen bidrag fra afkoblede oplande.

Klimafaktoren er valgt for en 100 års regn. Der forventes ingen forøgelse i arealanvendelsen i fremtiden. Den statistiske usikkerhed er valgt grundet usikkerheden på parametrene. Dette giver en samlet sikkerhedsfaktor på 1,68.

Oversvømmelserne fra kasseregnene fremgår af figur 5.21, 5.22, 5.23 og 5.24. En oversigt over områderne, kortene viser, ses på figur 5.20. Der angives ikke oversvømmelse for de fire kasseregn hver for sig, men kun den maksimale værdi ud af de 4 regnhændelser for hver beregningscelle, hvorved et billede kan være sammensat af flere regn.



*Figur 5.20.* Oversigt over oversvømmelseskortene.



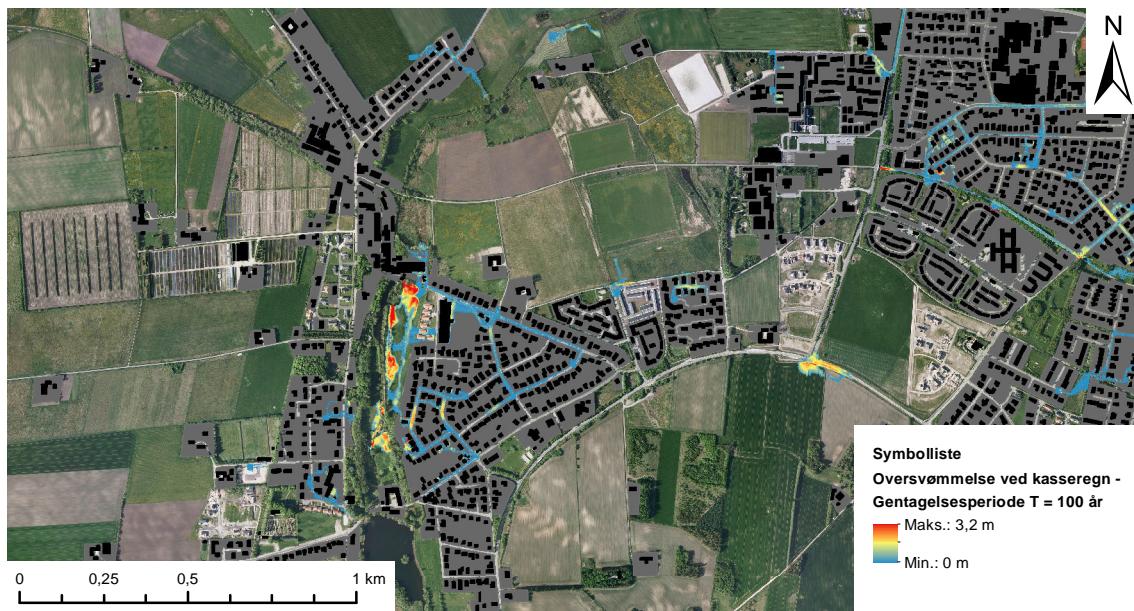
*Figur 5.21.*



Figur 5.22.



Figur 5.23.

*Figur 5.24.*

Generelt befinner hoveddelen af oversvømmelsen sig på vejene. Dette kan skyldes, at vejene er sænket med 20 cm, hvorfor kantstenen ved veje er overrepræsenteret, såfremt kantstenen allerede er inkluderet i terrænkortet.

Oversvømmelserne inddeltes i grupper, alt efter hvor kritiske problemer disse skaber:

Meget kritiske områder:

- Veje, der håndterer hoveddelen af byens trafik
- Industriområder
- Parcelhuse m. kælder
- Skole

Kritiske områder:

- Mindre veje til boligområder
- Landbrugsområder

Ikke-kritiske områder:

- Grønne arealer i boligområder
- Rekreative områder
- Parkeringsarealer
- Landbrugsområder

De kritiske samt meget kritiske områder er områder, hvor en eventuel oversvømmelse påvirker mange mennesker, boliger eller medfører en stor økonomisk udgift for industri. De ikke-kritiske områder er områder, hvor oversvømmelse kun medfører minimal skade eller påvirker få mennesker, samt semipermeable eller permeable arealer. Landbrugsområder kan både være kritiske og ikke-kritiske, men dette er enkeltsagsbehandling og afhænger af afgrøden.

Idet der forekommer oversvømmelser, eftertragtes det at udføre tiltag således, at oversvømmelsesvandet transportereres til de ikke-kritiske områder.

### 5.4.1 Oversvømmelse på kritiske områder

På figur 5.26-5.31 ses de områder, der vurderes at være udsat for mest kritisk oversvømmelse. En oversigt over kortene ses på figur 5.25.



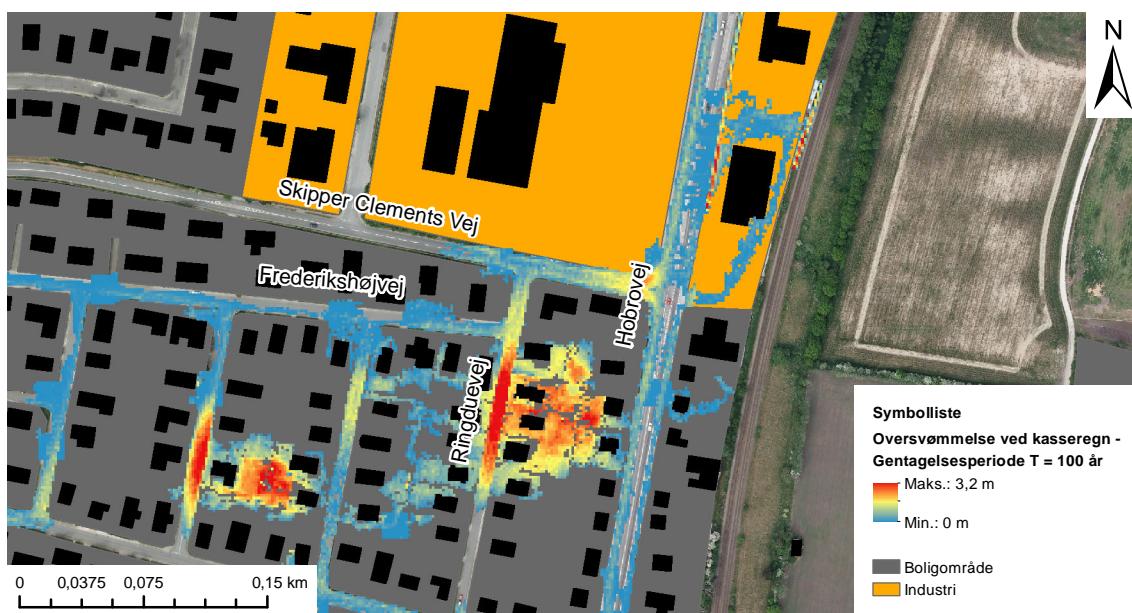
**Figur 5.25.** Oversigtskort over problemkortene.

På figur 5.26 forekommer der oversvømmelse på vejen, der vender vest fra Hobrovej. Der forekommer samtidig oversvømmelse i siderne af Hobrovej. Idet Hobrovej er den største nordsydgående vej, vurderes det, at denne vej er udsat for den største trafikale belastning i Svenstrup. Idet der er simuleret oversvømmelse på denne vej, jf. figur 5.26, 5.27 og 5.29, er dette særlig kritisk.

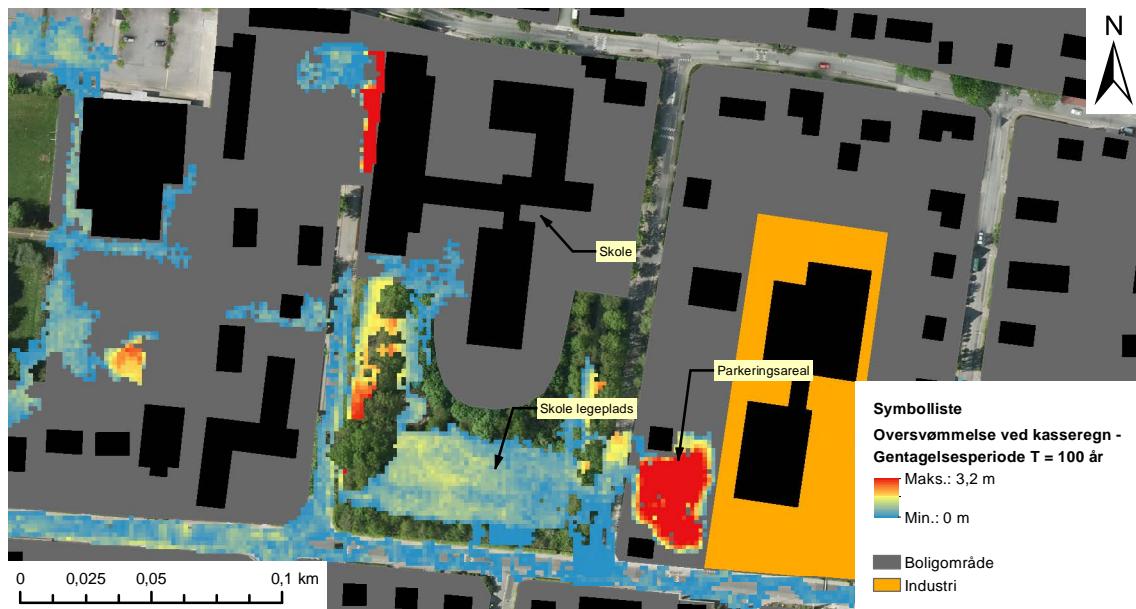
Der er samtidig simuleret oversvømmelse i industriområderne, jf. figur 5.26, hvor der både er oversvømmelse på industriarealerne samt Marathonvej og Mosevangen, der giver adgang til både parkeringsområdet og tilgang til en del af industriområderne.

*Figur 5.26.*

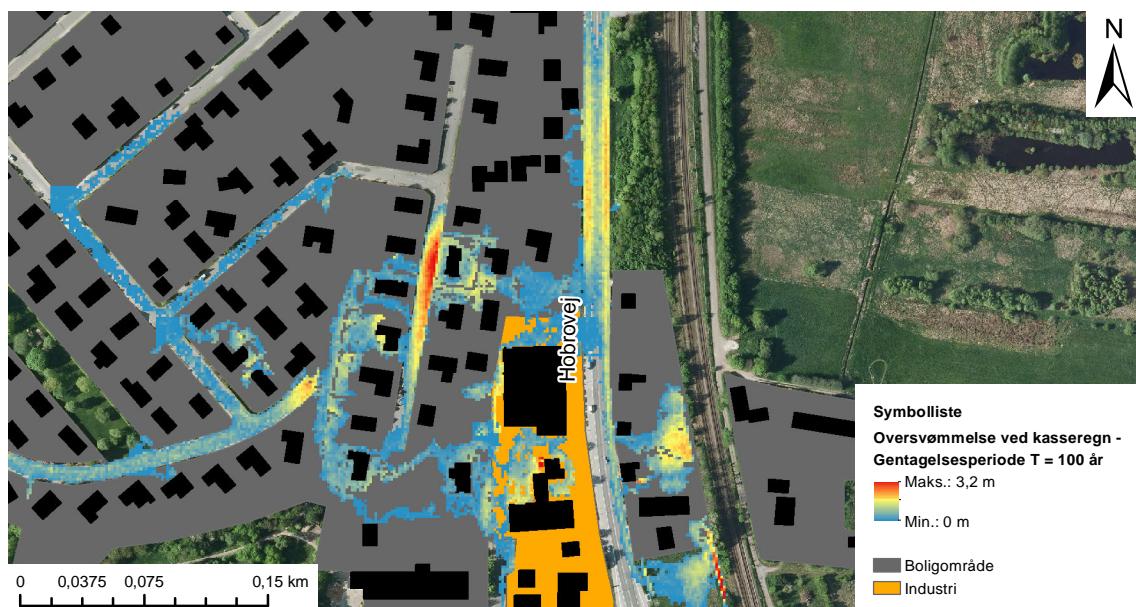
På figur 5.27 er der oversvømmelse i boligområderne. Her er der både vand på Skipper Clements Vej, Frederikshøjvej og Ringduevej samt vand i haverne. Dette kan både gøre tilgang til boligerne umuligt, og såfremt vandet indsiver, kan det medføre skade på boligen indvendigt, foruden øges risikoen for oversvømmelse af kældre. Der er samtidig oversvømmelse i den sydlige del af industriområdet samt den vestgående vej fra Hobrovej. Idet der er en vestgående vej syd for området med mindre oversvømmelse, vurderes det, at tilgang til boligområdet stadig er muligt.

*Figur 5.27.*

På figur 5.28 ses oversvømmelsen omkring Svenstrup skole. Det ses, at der er oversvømmelse på skolens legeplads og parkeringsarealet, dvs. ikke-kritiske områder. Der er dog oversvømmelse i den nordvestlige del af skolen, omkring én af blokkene, hvilket kan skade bygningen.

**Figur 5.28.**

På figur 5.29 er der simuleret oversvømmelse både i boligområdet samt industriområdet, hvilket kan have økonomiske konsekvenser for borgere og firmaer.

**Figur 5.29.**

Figur 5.30 illustrerer oversvømmelse i industriområdet. Dette kan både forårsage skade samt besværliggøre tilgang til fabrikken via Zincksvej.

*Figur 5.30.*

På figur 5.31 ses oversvømmelse nær et industriområde. Vejene Hellekisten og Langdyssen, der skaber tilgang til fabrikken, er oversvømmet.

*Figur 5.31.*

Som det ses er der en række problemer med oversvømmelse i Svenstrup. En række industriområder samt boligområder er utsat for oversvømmelse. Samtidig er Hobrovej, som vurderes at være mest trafikalt belastet, utsat for oversvømmelse.

Idet en række grønne arealer grænser op til Hobrovej, kan oversvømmelsen fra vejen eventuelt aflastes på disse arealer. Der benyttes en kasseregn med en gentagelsesperiode på 100 år og tidshorisont på 100 år. En gentagelsesperiode på 100 år betyder, der er langt mellem regnene, hvorved oversvømmelsen ikke sker så ofte, hvorfor der accepteres oversvømmelse på visse arealer. Der bør undersøges for mindre gentagelsesperioder for at

tilstrækkeligt vurdere, hvor ofte der opstår oversvømmelse og hvor.

## 5.5 Usikkerheder for analyse i regnvejrssituation

Usikkerhederne for analysen af Svenstrups afløbssystem under påvirkning af historiske regnhændelser redegøres og vurderes ift. deres indflydelse på resultaterne. De samme usikkerheder, som er nævnt i afsnit 4.9, er gældende for regnvejrsanalysen.

### 5.5.1 Overflademodel og bølgemodel

Da der anvendes en overflademodel A tages der ikke forbehold for bidrag fra permeable og semipermeable flader. Dette bidrager til en usikkerhed i simuleringen.

Der er benyttet en dynamisk bølgemodel, hvori der indgår:

- Vandføring.
- Tidsskridt.
- Stedsskridt.
- Rørruhed i form af manningtal.
- Enkelttab.
- Bundhældning.

Beregningen af vandføringen kan medvirke til usikkerheder, da Mike Urban ved for lav vandføring indsætter en minimums delfyldningsgrad for på 2 % eller som minimums vanddybde på 20 mm ved store rør [DHI, 2011b, side 82]. Dette medvirker til problemer med vandbalance i systemet og dermed en usikkerhed.

Tidskridt og stedsskridt bestemmer diskretiseringen af beregningerne af vandføring. Tidskridtet kan varieres, mens stedsskridtet minimum kan være 10 m og afhænger af rørlængden, hvorved der opstår en usikkerhed på ledninger kortere end 10 m [Thorndahl og Nielsen, 2015].

Friktionstab, som indgår vha. Manningtallet, er usikkert. Det samme gælder for ledningers bundhældninger, der er inddateret på forhånd. Samlet er det usikkert, hvor stor en indflydelse disse parametre har på modelresultaterne.

### 5.5.2 Kalibrering af model

Der kalibreres kun på parametret hydrologisk reduktionsfaktor, og ikke initialtab, koncentrationstid og rørets ruhed. De tre parametre, der ikke kalibreres efter, vurderes at have større indflydelse på, hvornår overløbet finder sted, frem for hvor lang tid det varer.

Endvidere ses det at den hydrologiske reduktionsfaktor for opland 06 er på 1,6, hvilket er højere end litteraturværdierne, jf. tabel 5.1. Grunden til det er nødvendigt med en hydrologisk reduktionsfaktor i modellen over 1 kan skyldes, at der ikke er ændret på de befæstede arealer, da det er antaget, dataene fra Aalborg Kloakforsyning, som er angivet i

modellen, er korrekte. Det kan således være, at det befæstede areal er større i virkeligheden, end hvad der er angivet i modellen, hvorved der vil ske en større afstrømning fra arealet. Det samme kan være gældende for opland 02 og 08, som har en hydrologisk reduktionsfaktor på 1.

Det er ikke sikkert, at koterne på overløbskanterne, opgivet i Mike Urban modellen fra Aalborg Forsyning, Kloak A/S, er korrekte. Det kan skabe en afvigelse mellem model og virkelighed.

Overløb registreres hver fjerde minut. Derfor opnår hver overløbsregistrering en usikkerhed på varigheden på +/- 8 minutter, jf. afsnit 5.1.5. Samtidig kan toiletartikler m.v. sætte sig fast i SRO-måleren, hvorfor der kan registreres overløb, når der ikke er det.

På baggrund af valideringsafsnit 5.1.7 vurderes det, at usikkerhederne på de enkelte overløbsregistreringer ikke har tilstrækkelig indflydelse til at invalidere kalibreringen.

Idet der stadig er en afvigelse mellem de målte overløbstider samt modellens simulerede overløbstider vil dette også have en indflydelse på resultaterne.

### 5.5.3 Gentagelsesperiode for opstuvning

Den historiske regnserie fra Svenstrup er baseret på målinger fra en enkelt regnmåler, så der tages ikke forbehold for Svenstrups geografiske variation i nedbør.

Idet der anvendes LTS-simuleringer, undersøges der kun for regnhændelser, som vurderes at være kritiske. De kritiske regnhændelser er udvalgt på baggrund af en given tilstrømning i en given varighed. Det er derfor usikkert, hvorvidt regnhændelserne er kritiske iht. overløb og opstuvning.

De kritiske regnhændelser afgrænses af perioder med lav tilstrømning. Den regnvolumen, der falder uden for afgrænsningen medtages derfor ikke i simuleringen, da der ikke er vand i systemet ved påbegyndelse af regnhændelserne. Idet langtidsvarende regnhændelser ofte er kritiske for opstuvning, skaber LTS-simuleringen en usikkerhed ift. gentagelsesperioden for opstuvning.

### 5.5.4 Aflastning til Guldbækken

I modellen forudsættes det at den fulde overløbsvolumen kan aflastes i Guldbækken, men aflastningen er afhængig af Guldbækvens udnyttelse og dermed kapacitet. Dette tages der ikke forbehold for, idet der ikke modelleres med tilbagestuvning i afløbssystemet fra Guldbækken, hvorved der opstår usikkerhed omkring modelresultaterne.

### 5.5.5 Model for strømninger på overflade

Simuleringen for oversvømmelseskortene medtager ikke regn, der falder på ubefæstede arealer. Idet de arealer kan bidrage til oversvømmelse, såfremt jorden opnår fuld vandmætning, kan dette lede til forværrelse af oversvømmelserne ift. det simulerede.

Når vandet opstuver fra brøndene, kan det strømme til permeable og semipermeable arealer, men det kan ikke nedsive eller fordampne. Idet de semipermeable og permeable arealer ikke er kritiske arealer for oversvømmelse, har oversvømmelse på disse arealer ikke væsentlig betydning, men de ville kunne aflaste nogle kritiske områder.

I modellen anvendes kun kasseregn af forskellig varighed. Kasseregnen med en varighed på to timer opnår de største oversvømmelsesmængder i Svenstrup. Når der ikke er undersøgt oversvømmelse for varigheder under to timer, er det muligt, at der forekommer mere oversvømmelse for kortere varigheder. Dette kan eventuelt løses ved at simulere for historiske regnhændelser eller CDS, men udføres ikke i dette projekt, grundet manglende regnekraft.

Det udjævnede terrænkort, hvor bygninger og veje er hhv. hævet og sænket, har en oplosning på  $1,6 \times 1,6$  m. På grund af udjævningen er små forhindringer for strømning på overfladerne måske fjernet. Derfor er det muligt, at overfladeafstrømningerne ikke er repræsentativ for den virkelige afstrømning. Alle veje er sænket med 20 cm grundet hensyn til kantsten, selvom cellestørrelsen på terrænkortet gør, at denne detalje muligvis er medtaget. Derudover er det ikke alle veje, der har kantsten, såsom landeveje, hvormed oversvømmelse på disse veje kan være overestimeret.

Nogle steder er oversvømmelser på 3 m, hvor det ikke vurderes muligt, fx på figur 5.28 på parkeringsarealet. Disse fejl kan skyldes fejl i højdemodellen eller at simuleringen har været ustabil, uden der har været kendskab til det.

Der er forudsat en overfladeruhed, som er ens for hele Svenstrup. I virkeligheden har forskellige materialer, såsom asfalt og fliser, forskellig ruhed, hvilket kan styre hastigheden for afstrømning. Det vurderes dog, at dette har lille betydning for oversvømmelseskortene, idet det ikke er så vigtigt, hvor hurtigt vandet strømmer, ift. hvor vandet ender.

Alle vurderinger angående kritiske oversvømmelser er foretaget på baggrund af ortofoto, hvorved det er usikkert, hvor benyttede de kritiske områder er. Oversvømmelseskort burde fortolkes af en person med detaljeret kendskab til området.

## 5.6 Opsummering

På baggrund af analysen af afløbssystemet under regnvejrssituationer er der konstateret både problemer med opstuvning, udnyttelse af overløbsbygværker og oversvømmelse.

52 % af brøndene i fællessystemet overholder ikke funktionskravet med hensyn til opstuvning til terræn, hvorimod kun 8 % af separatsystemet ikke overholder funktionskravet. Når der tages forbehold for klimaforandringer med en tidshorisont på 100 år stiger andelen, der ikke overholder kravet, til hhv. 79 % og 19 %.

Den maksimale vandføring fra overløbsbygværkerne overskridt udledningstilladelsen for overløb nr. 25 med en gentagelsesperiode på 14 år. Samtidig overskridt otte ud af ni overløbsbygværker den tilladte hyppighed for udnyttelse. Når der tages forbehold for klimaforandringer falder gentagelsesperioden til ca. 5 år, og overløb nr. 02 overskridt udledningstilladelsen med en gentagelsesperiode på ca. 9 år.

Der er simuleret oversvømmelsesproblemer ved industriområder, boligområder samt Hobrovej i Svenstrup. Dette kan forårsage skade både på industrien og boliger, samt umuliggøre tilgang disse. Dette er dog kun undersøgt for en gentagelsesperiode på 100 år, hvorfor der kan accepteres visse problemer.

Det vurderes, at der bør foretages tiltag, der afhjælper opstuvnings- og oversvømmelsesproblemerne, specielt for fællessystemet, samt afhjælper problemerne med maksimal vandføring og udledningshyppighed fra overløbsbygværker.

# Hydraulisk analyse af Guldbækken 6

---

I dette kapitel opstilles en hydraulisk model for Guldbækken. Når modellen er kalibreret tilstrækkeligt, undersøges Guldbækken for kapacitetsproblemer. Guldbækken undersøges desuden for erosionsproblemer. Guldbækkens tværsnit, vandspejlskote og vandføring kortlægges gennem feltmålinger.

Kapaciteten af Guldbækken undersøges, idet vandløbet slynger sig gennem Svenstrup by, hvorved der ved oversvømmelse af vandløbet kan være konflikter med bygninger. Foruden må udledninger i vandløbet ikke medføre oversvømmelser af omkringliggende arealer eller påvirke § 3 beskyttede naturtyper ved vandløbet, jf. afsnit 2.1.1 og 3.1.

Erosionen i Guldbækken undersøges, med henblik på at kortlægge om og hvor sedimenter i vandløbet transporteres. Sedimenttransport kan resultere i uæstetiske forhold i vandløbet, hvilket ikke er tilladt ifølge vilkårene i udledningstilladelsen, jf. afsnit 2.1.1.

## 6.1 Diffusiv bølgemodel

Der benyttes en diffusiv bølgemodel til at bestemme hydraulikken i Guldbækken. Metoden beskrives i det følgende. Der antages følgende forudsætninger for brug af en diffusiv bølgemodel [Vestergaard, 1989, side 41]:

- Vandet er homogent og usammentrykkeligt.
- Friktion kan bestemmes som for stationær strømning.
- Strømningen er endimensional.
- Der antages hydrostatisk trykfordeling.
- Middel bundhældningen antages at være lille.

Til beregningerne anvendes Saint Venant-ligningerne. Dette indebærer kontinuitetsligningen og impulslingen. Disse bliver uddybet i de næste afsnit.

### 6.1.1 Kontinuitetsligningen

Til at beregne trykniveaueret benyttes kontinuitetsligningen, jf. formel (6.1). [Vestergaard, 1989, side 64]

$$b \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (6.1)$$

Hvor

$b$	Bredde af vandspejl [m]
$h$	Trykniveau [mVS]
$t$	Tid [s]
$Q$	Vandføring [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$x$	Sted [m]
$q$	Lateral vandføring [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ]

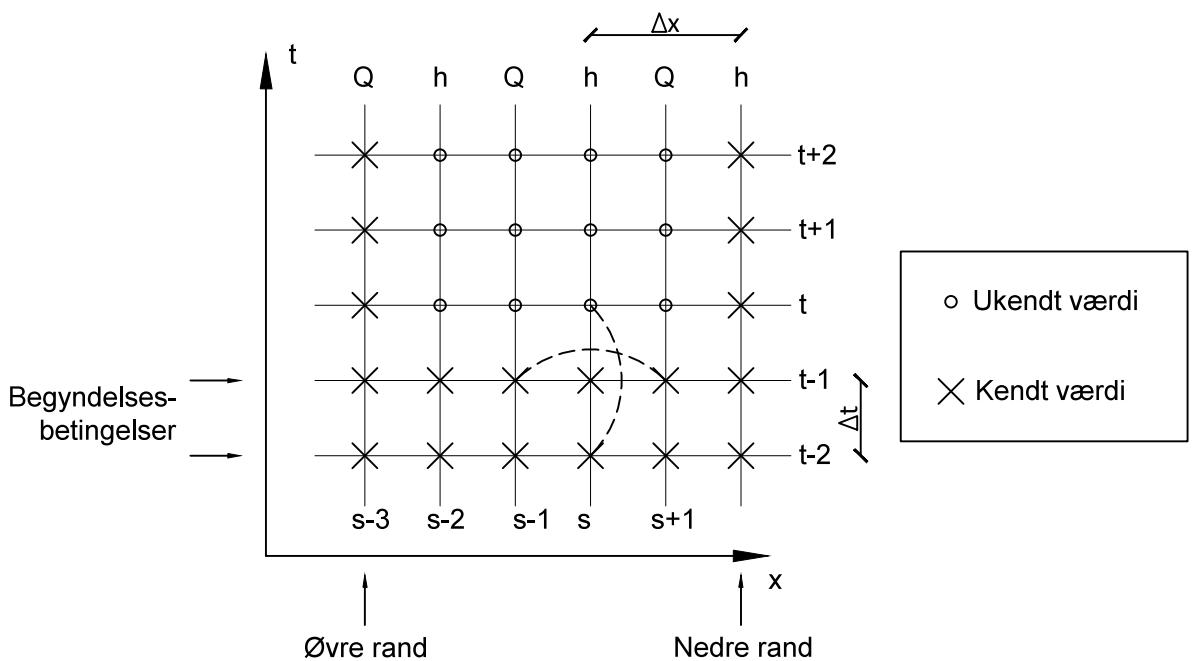
Der anvendes en eksplisit diskretisering af kontinuitetsligningen til beregning af trykniveauet, jf. formel (6.2) [Vestergaard, 1989, side 65].

$$h_s^n = h_s^{t-2} + \frac{2 \cdot \Delta t \cdot q}{b_s^{t-1}} - \frac{2 \cdot \Delta t (Q_{s+1}^{t-1} - Q_{s-1}^{t-1})}{\Delta x \cdot b_s^{t-1}} \quad (6.2)$$

Hvor

$t$	Indeks for tid [-]
$s$	Indeks for sted [-]
$\Delta t$	Tidsskridt [s]
$\Delta x$	Stedsskridt [m]

I beregningen indgår kendte værdier for vandføring, trykniveau og vandløbsbredde fra de forgående tidsskridt til beregning af trykniveau til nye tidsskridt. Disse benyttes til at beregne vanddybden. Metoden for beregningen er illustreret på figur 6.1.



**Figur 6.1.** Metode for at bestemme vanddybden i et givet punkt.

Når trykniveauet for tidsskridtet er bestemt, anvendes det til at beregne vandføringen vha. impulsiligningen.

### 6.1.2 Impulslingen

Vandføringen i Guldbækken bestemmes på baggrund af impulslingen jf. formel (6.3). [Vestergaard, 1989, side 42]

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \frac{\partial h}{\partial x} + g \cdot A \cdot I = q \cdot u_q \quad (6.3)$$

Hvor

$\alpha$	Hastighedskoefficient [-]
$g$	Tyngdeaccelerationen [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]
$A$	Gennemstrømmet tværsnitsareal [ $\text{m}^2$ ]
$I$	Energilinjegradien [-]
$u_q$	Hastighed af lateral vandføring [ $\text{m}/\text{s}$ ]

I diffusiv bølgeteori negligeres de to første led i formel (6.3). Der arbejdes derfor videre med formel (6.4). [Vestergaard, 1989, side 45]

$$g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + g \cdot A \cdot I = q \cdot u_q \quad (6.4)$$

Manningformlen indsættes som udtryk for energilinjegradien og ligningen diskretiseres. Den modificerede impulsling fremgår af formel (6.5). Her anvendes en midling af hydraulisk radius og det gennemstrømmede tværsnitsareal. [Vestergaard, 1989, side 65]

$$Q_s^t = -M \cdot \overline{R}^{\frac{2}{3}} \cdot \overline{A} \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \Delta x}} \cdot (h_{s+1}^t - h_{s-1}^t + h_{s+1}^{t-1} - h_{s-1}^{t-1}) \cdot |h_{s+1}^t - h_{s-1}^t + h_{s+1}^{t-1} - h_{s-1}^{t-1}|^{\frac{-1}{2}} \quad (6.5)$$

Hvor

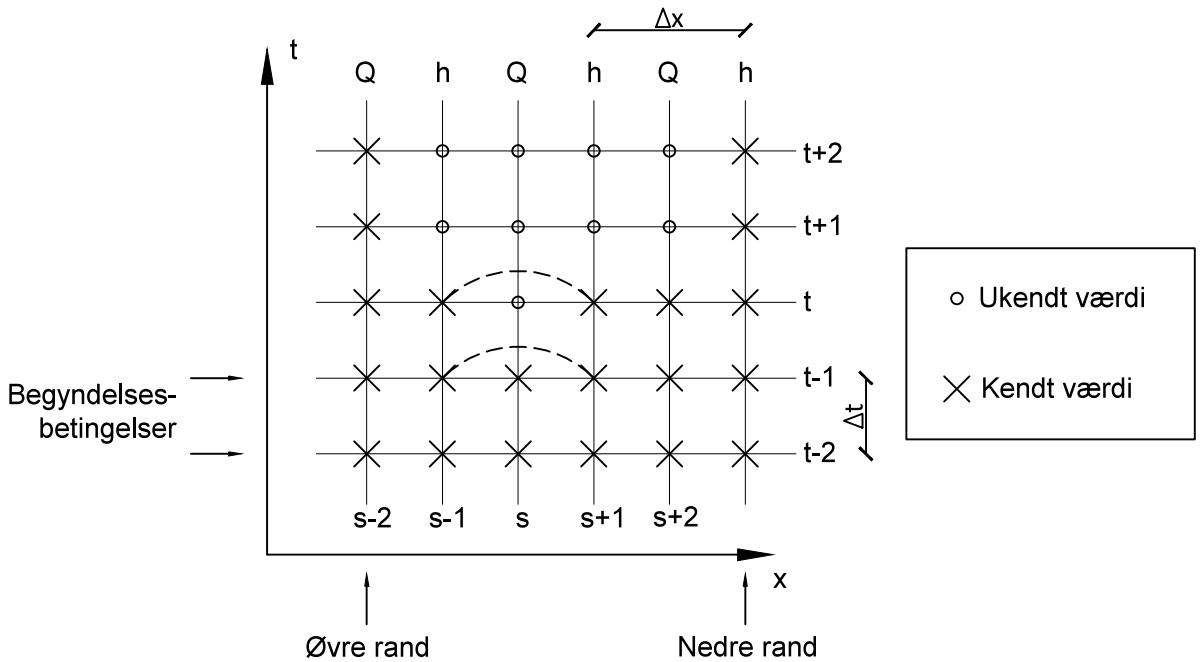
$Q_s^t$	Vandføring i punkt [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$M$	Manningtal for vandløb [ $\text{m}^{\frac{1}{3}}/\text{s}$ ]
$\overline{R}$	Middel af hydraulisk radius [m]
$\overline{A}$	Middel af tværsnitsareal [ $\text{m}^2$ ]
$\Delta x$	Længde af stedsskrift [m]

Den midlede hydrauliske radius og det midlede gennemstrømmede areal beregnes med formel (6.6) og formel (6.7).

$$\overline{A} = \frac{1}{4} \cdot (A_{s+1}^t + A_{s-1}^t + A_{s+1}^{t-1} + A_{s-1}^{t-1}) \quad (6.6)$$

$$\overline{R} = \frac{1}{4} \cdot (R_{s+1}^t + R_{s-1}^t + R_{s+1}^{t-1} + R_{s-1}^{t-1}) \quad (6.7)$$

Metoden for at anvende impulslingen i et beregningsnet er illustreret på figur 6.2. Her benyttes kendt vandstand opstrøms og nedstrøms, samt til det aktuelle tidsindeks og ét tidsskrift tilbage.



**Figur 6.2.** Metode for at bestemme vandføringen i et givent punkt.

Det ses både for figur 6.1 og 6.2, at der skal kendes en vandføring som en øvre randbetningelse og et trykniveau som nedre randbetningelse. Derudover skal trykniveauer og vandføringer kendes til alle stedsskridt mindst to forudgående tidsskridt fra det tidsskridt, som beregnes.

### 6.1.3 Stabilitet af diffusiv bølgemodel

Modellen kan blive ustabil, hvis der sker hurtige ændringer, altså hvis vandet bevæger sig for hurtigt ift. det valgte stedsskridt og tidsskridt.

Stabiliteten af modellen er givet ved Courant-tallet, som afhænger af tids- og stedskridtet, jf. formel (6.8).

$$Cr = \frac{\Delta t}{\Delta x} \sqrt{g \cdot y_{\max}} \leq 1 \quad (6.8)$$

Hvor

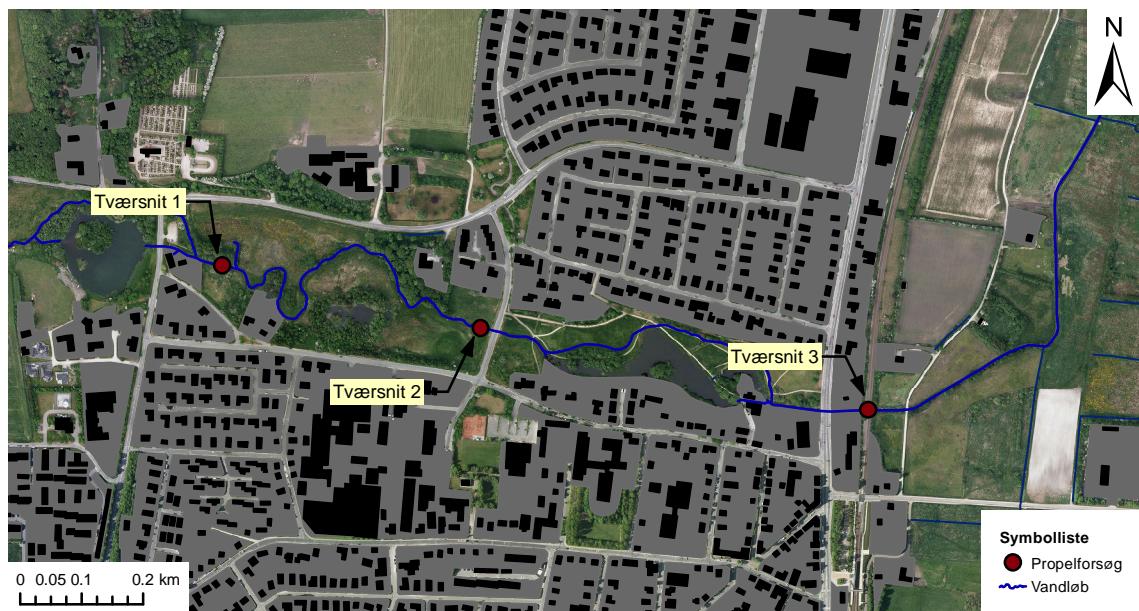
$Cr$	Couranttal [-]
$y_{\max}$	Maksimal vanddybde [m]

Det ses, at desto længere stedsskridt eller mindre tidsskridt, der benyttes, desto mindre risiko er der for instabilitet. Modellen skal altid være stabil for at beregningerne er korrekte.

## 6.2 Vandføring i Guldbækken

Til bestemmelse af vandføringen ved den øvre rand, samt den laterale vandføring i den diffusive bølgemodel er vandhastigheden målt i punkter i tre tværsnit i Guldbækken, jf.

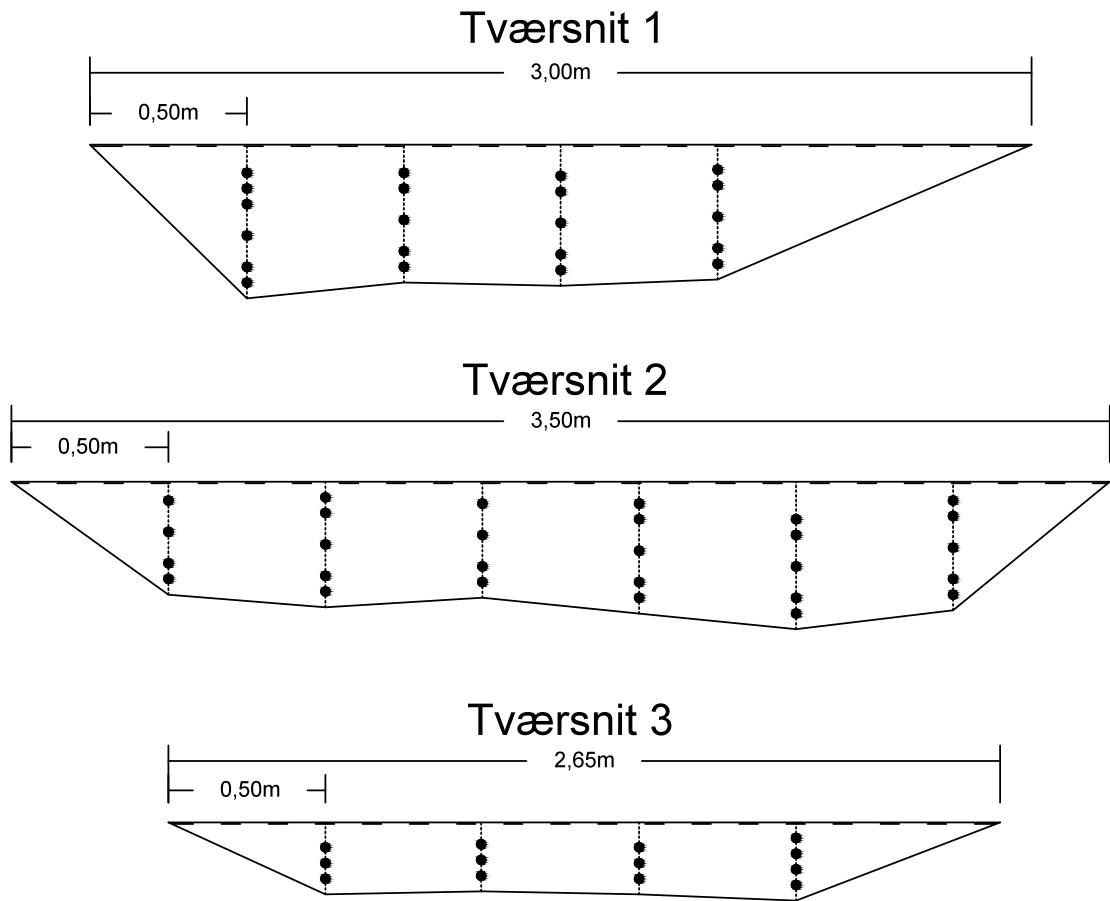
figur 6.3.

**Figur 6.3.** Placering af tværsnit hvor vandføringen bestemmes.

Vandføringen bestemmes på baggrund af et propelforsøg. I forsøget sættes propellen i vandet, hvilket ses på figur 6.4.

**Figur 6.4.** Måling i propelforsøget.

Antallet af omdrejninger af propellen måles i punkter i tværsnittet over tid, jf. figur 6.5. Målingerne er foretaget i tørvejr for at bestemme tørvejrsvandføringen. På baggrund af propelomdrejningerne beregnes en vandhastighed i punkterne i tværsnittet. Metodikken for beregning af vandføring gennemgås i appendiks D. Beregningerne fremgår af [Bilags-CD, Flow]. I tabel 6.1 fremgår vandføringerne og middel vandhastighederne i de tre tværsnit.



**Figur 6.5.** Flowmålingspunkter for tværsnit 1, 2 og 3. Målepunkterne er markeret med sorte punkter.

	Tværsnit 1	Tværsnit 2	Tværsnit 3
Vandføring [l/s]	291	295	241
Middel vandhastighed [m/s]	0,286	0,242	0,499

**Tabel 6.1.** Vandføring og vandhastighed i Guldbækken, som er beregnet på baggrund af propelforsøget.

Det forventelige resultat for vandføringsmålingerne er, at den er stigende ned gennem Guldbækkens forløb grundet lateral vandføring eller tilstrømmende vandløb. [Sand-Jensen et al., 2006, side 18]

Dette er dog ikke tilfældet jf. resultaterne i tabel 6.1, hvor det ses, at vandføringen reduceres nedstrøms gennem vandløbet. Resultaternes afvigelse i forhold til det, der forventes, kan skyldes fejl i målinger. Det er projektgruppens første målinger af denne art, hvilket kan skabe usikkerhed i forsøgsresultaterne. Afvigelsen mellem tværsnit 3 og hhv. tværsnit 1 og 2 er 17,2 % og 18,3 %, hvorved det vurderes, at flere målinger bør foretages. Fejlen kan også skyldes en variation i vandføringen over døgnet, men denne variation anses ikke for være af denne størrelsesorden. Den reducerede vandføring i tværsnit 3 kan også skyldes en lateral afstrømning fra vandløbet grundet et lavt grundvandsspejl. Dette vurderes dog usandsynligt, da der normalvis strømmer vand til et vandløb og ikke fra det.

Middelvandhastigheden jf. tabel 6.1 viser, at vandhastigheden stiger til ca. det dobbelte i

tværsnit 3 ift. tværsnit 1 og 2. Vandhastigheden er højest i tværsnit 3, hvilket er forventeligt, da tværsnitsarealet er mindst jf. figur 6.5.

Når vandhastigheden stiger, forventes kornstørrelsen af bundsedimenterne også at stige. Bundsedimentet observeret i Guldbækken, jf. afsnit 3.3, stemmer overens med dette, jf. vandhastighederne i tabel 6.1.

Selvom middevandhastigheden afspejler det, der er observeret i Svenstrup jf. afsnit 3.3, vurderes det alligevel, at flowmålingerne burde have været gentaget, idet vandføringen ikke var i overensstemmelse med det, der forventes. Dog er dette ikke gjort grundet mangel på tid.

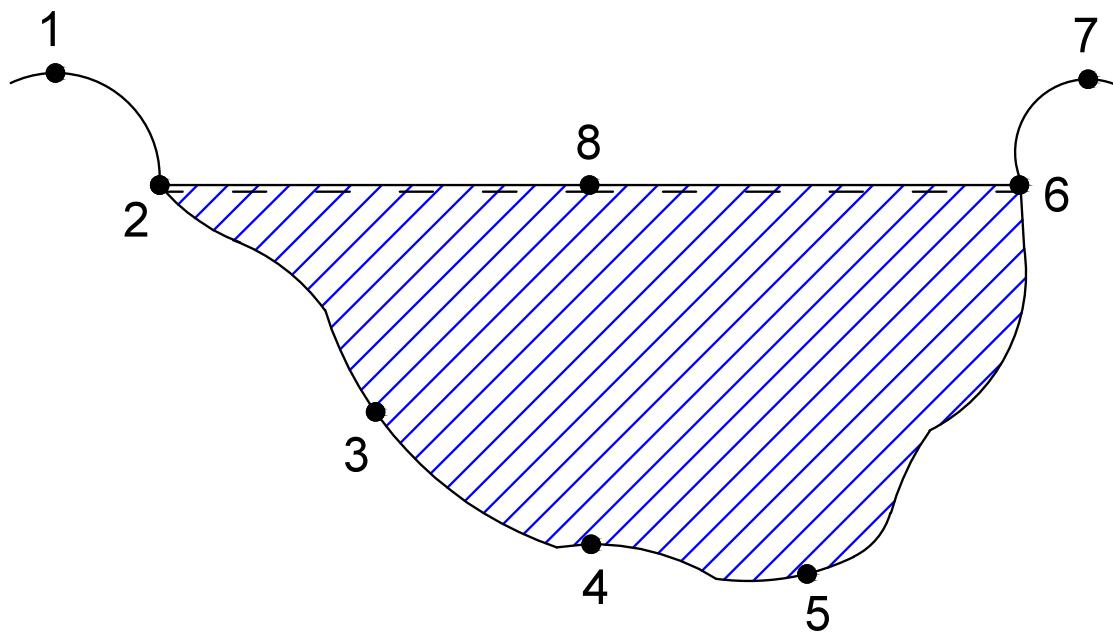
### 6.3 Opmåling af Guldbækken

For at bestemme trykniveauet ved den nedre rand og få kendskab til tværsnittet af Guldbækken, er der foretaget en opmåling af tværsnit og vandspejlskoter. Dette er gjort vha. en Leica GPS1200, jf. figur 6.6. Måleren har en præcision ned til få millimeter både horisontalt og vertikalt. Målinger findes på [Bilags-CD, maaling\_svenstrup\_red].



**Figur 6.6.** Opmåling af tværsnit vha. GPS.

Opmålingen er foretaget d. 30/4 2015, hvor der blev målt i alt 8 punkter for hvert tværsnit. På figur 6.7 ses en principskitse af, hvordan punkterne er placeret i et tværsnit.

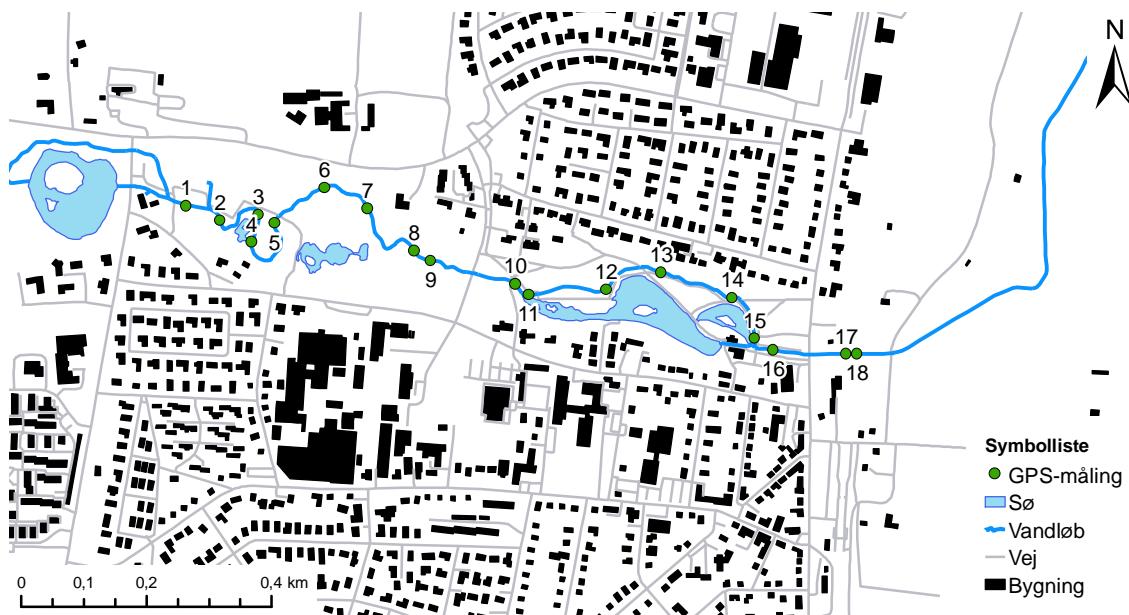


**Figur 6.7.** Skitse af tværsnitsmålepunkter.

Metode og anvendelse for målingerne:

- Punkt 1 og 7, på hver breds toppunkt.  
Benyttes til at vurdere, hvorvidt der er kapacitetsproblemer i vandløbet, da en vandstand over dette niveau vil give anledning til oversvømmelser.
- Punkt 2-6, i tværsnittet af vandløbet.  
Benyttes til at beskrive tværsnittets opbygning.
- Punkt 8, i vandspejlet.  
Energilinjegradienget bestemmes på baggrund af hældningen af vandspejlet, da disse vurderes lig med hinanden.

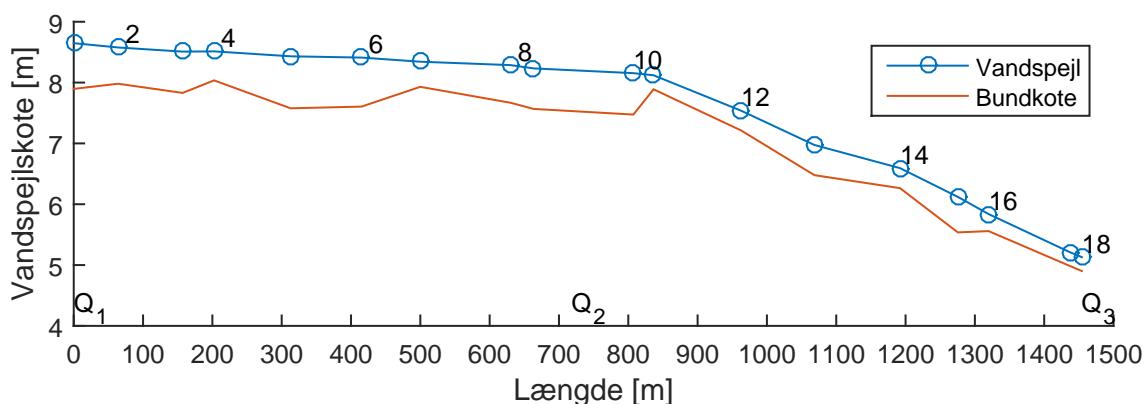
På figur 6.8 fremgår de steder, hvor der er målt tværsnit i Guldbækken. Der er målt 18 tværsnit over en afstand på 1454 m, hvor første og sidste opmåling er foretaget samme sted som første og sidste måling af vandføring, jf. afsnit 6.2.



**Figur 6.8.** Lokationer for tværsnitsopmålinger i Guldbækken.

Det ses på figur 6.8, at der ikke er foretaget målinger med ens stationering imellem. I stedet er der foretaget målinger hver gang, der er observeret tydelig ændring i tværsnit, vanddybde eller sedimentstørrelse. Dette har nogle steder ikke været muligt, grundet træer langs vandløbet, som blokerer signalet for GPS'en, og derved gør målingerne upræcise, samt at vandløbet var dybere end foden på GPS'en, hvorved der ikke kunne foretages målinger. Ydermere er det valgt ikke at tage målinger på steder med mange siv og sump pga. dårlig fremkommelighed. Der stoppes med opmålinger efter 18 tværsnit grundet vel defineret sluttværsnit.

Udformningen af vandløbet ændrer sig undervejs. Dette kan skyldes, at vandløbet er ledt udenom Svanemøllesø, hvorved en del af vandet strømmer gennem søen og en anden del gennem vandløbet, samt at der er forskel i hældningen af vandløbet, jf. figur 6.9.

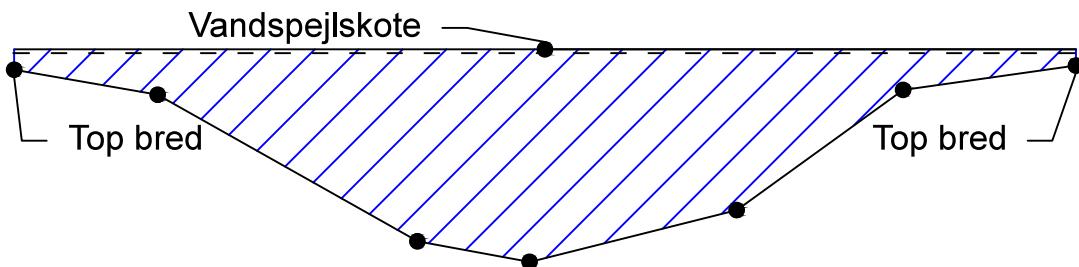


**Figur 6.9.** Sammenhørende målinger af vandspejl og bundkote.

På figur 6.9 ses det, at hældningen øges, og vanddybden falder efter ca. 800 m, hvilket er stedet, hvor Guldbækken ledes udenom Svanemøllesø. Desuden ses der også en sammenhængen mellem vandhastighed og tværsnitsareal, som også fremgår af figurene i afsnit 3.3 og figur 6.5.

### 6.3.1 Fejl i GPS-målinger

Ved undersøgelse af målingerne er det fastlagt, at der er fejl i dem. Dette skyldes, at den målte vanddybde i nogle tværsnit er højere end toppunktet på bredderne i vandløbet, hvorved der vil være oversvømmelse. Der er tale om tværsnittene 3, 5, 6 og 8, som er i den første halvdel af målingerne, jf. figur 6.8. Her er der mudret og sumpet, hvorved bredden er i næsten samme højde som vandstanden. Hvis GPS'en er blevet stukket lidt ned i jorden eller ikke er holdt præcis i vandspejlet, kan der ske fejl i målingerne. Derudover kan GPS'en have målt upræcist grundet et træ eller andet, som kan have blokeret signalet. På figur 6.10 er tværsnit 5 givet som eksempel på denne fejl. Vandspejlet er over toppunktet for bredderne. Andre fejl som denne fremgår af tabel 6.2.



**Figur 6.10.** Tværsnit 5, hvor der er detekteret fejl, da vandspejlskoten er over bredderne.

Måling	Afstand fra 1. måling [m]	Målt vanddybde [m]	Fejl [m]
3		157	0,68
5		313	0,86
6		415	0,81
8		630	0,62

**Tabel 6.2.** Fejl ved GPS-målinger. Fejlene angiver forskellen mellem breddens højde og vandspejlet.

Der kan ikke undersøges kapaciteten for disse tværsnit, men da området er sumpet med vand på terræn og vandspejlet næsten i ens kote med bredderne vurderes det, at området altid er oversvømmet.

Endvidere var det nogle steder ikke muligt at måle helt op til toppen af bredden grundet stejle skråninger.

## 6.4 Kontrol af forudsætning om hydrostatisk trykfordeling

Det kontrolleres, hvorvidt forudsætningen om hydrostatisk trykfordeling er korrekt. Vandet i Guldbækken kan både være strømmende og strygende. Hvis det er strømmende, vil bølgehastigheden være større end vandets hastighed, og omvendt vil bølgehastigheden være mindre end vandhastigheden, hvis vandet har en strygende bevægelse [Winther et al., 2011, side 148-149]. I overgangsområdet mellem de to strømningsformer er der ikke hydrostatisk trykfordeling, hvilket er en antagelse, der skal være gældende ved brug af en diffusiv

bølgemodel [Vestergaard, 1989, side 40]. For at undersøge, hvorvidt der er strømmende eller strygende bevægelse, benyttes Froudes tal.

- $Fr > 1$  - Strygende bevægelse.
- $Fr = 1$  - Kritisk strømning.
- $Fr < 1$  - Strømmende bevægelse.

Froudes tal bestemmes vha. formel (6.9).

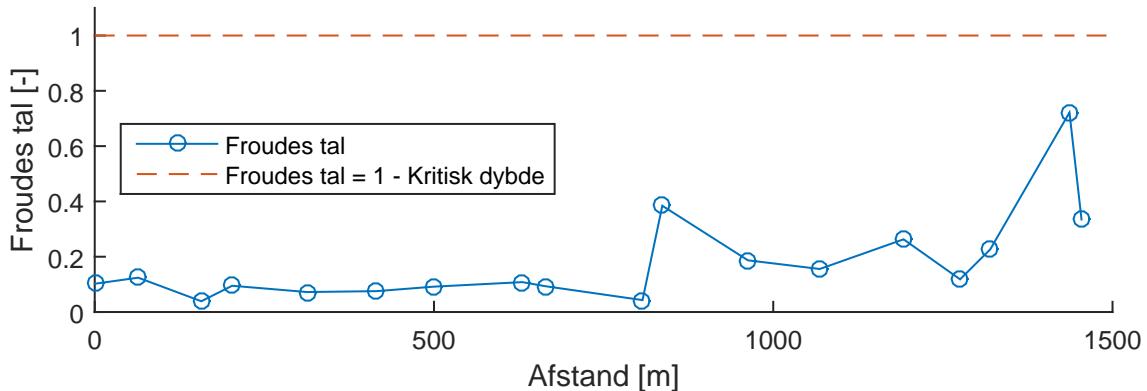
$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}} \quad (6.9)$$

$$D = \frac{A}{b} \quad (6.10)$$

Hvor

$Fr$	Froudes tal [-]
$V$	Middel vandhastighed [m/s]
$D$	Middel vanddybde [m]

Froudes tal er bestemt på baggrund af de målte data, jf. figur 6.11. Der er brugt den første målte vandføring på  $0,291 \text{ m}^3/\text{s}$  til bestemmelse af middel vandhastigheden i tværsnittene, da denne anvendes som øvre randbetingelse i kalibreringen. Beregningerne kan findes på [Bilags-CD, Froudes\_tal].



**Figur 6.11.** Froudes tal beregnet på baggrund af målte data.

Froudes tal er under 1 i hele den opmålte strækning af vandløbet, hvorved der er strømmende bevægelse overalt, og forudsætningen om hydrostatisk trykfordeling verificeres.

## 6.5 Kalibrering af diffusiv bølgemodel

Den diffusive bølgemodel, opstillet på baggrund af teorien i afsnit 6.1, kalibreres, så modellen beskriver virkeligheden så præcis som muligt. Kalibreringen foretages på baggrund af feltforsøgene, hvor der er målt tværsnit, jf. 6.3. Beregningerne kan findes på [Bilags-CD, bølgemodel].

Før kalibreringen påbegyndes, testes modellen for, hvorvidt den kan beregne naturlig dybde, en stuvning og håndtere en bølge. Testene udføres, da det er nødvendigt, at modellen er i stand til dette for at vurdere kapacitetsproblemer. Alle testene er succesfulde og fremgår af appendiks E.

Der kalibreres til der opnås en maksimal afvigelse på 5 % for vanddybden i den diffusive bølgemodel ift. de målte vanddybder med de valgte rand- og begyndelsesbetingelser. Kalibreringen foregår ved at ændre på Manningtallet til afvigelsen er under kalibreringskriteriet.

Til kalibreringen benyttes følgende forudsætninger:

- Stedsskridt vælges til 100 m.
- Tidsskridt vælges til 2 s.
- Der interpoleres lineært imellem de målte tværsnit.
- Modellen kalibreres efter målte vanddybder som interpoleres lineært.
- Øvre randbetingelse er den målte vandføring på  $0,291 \text{ m}^3/\text{s}$  jf. afsnit 6.2.
- Trykniveauet ved den nedre randbetingelse sættes lig med det målte vandspejl på 5,13 mVS i det sidste opmålte tværsnit.
- I begge begyndelsesbetingelserne benyttes den målte vandføring ved den øvre rand og de målte vanddybder, som interpoleres, så de passer med stedsskridtets størrelse.
- Manningstallet vælges som kalibreringsparameter.

Den øvre randbetingelse vælges lig med vandføringen i første målepunkt, hvor modellen også starter. Trykniveauet for det sidste målte vandspejl er 5,13 mVS, hvilket er i afstanden 1454 m fra første målepunkt. I modellen er den nedre randbetingelse 1450 m fra den øvre randbetingelse, hvorved forskellen mellem model og virkelighed vurderes minimal for de to randbetingelser.

For at gøre modellen mere generel for vandløbet og altså ikke kun i stand til at beskrive én årstid, kan den kalibreres vha. vandføringer og vanddybder målt forskellige tider på året. Det har dog ikke været muligt i dette projekt grundet manglende datagrundlag. Interpolation af de målte vanddybder, jf. afsnit 6.3, vurderes derfor til at være det bedste tilgængelige datagrundlag til kalibrering af modellen.

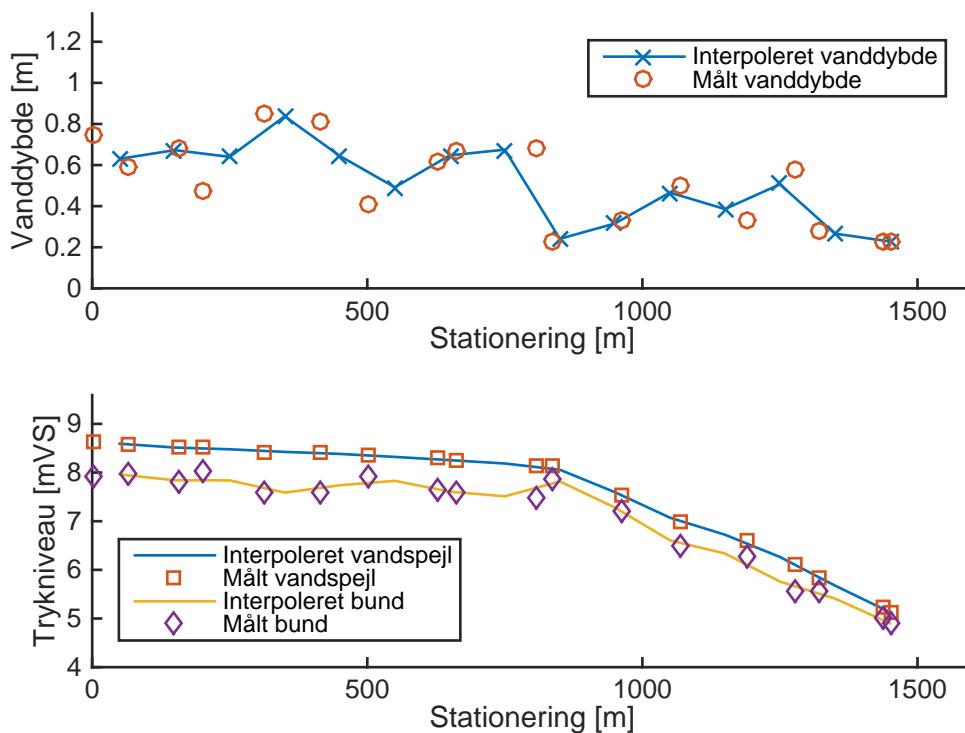
### 6.5.1 Interpolation af opmålte tværsnit

Der er målt 18 tværsnit i Guldbækken på en 1454 m strækning. Disse tværsnit kan således ikke beskrive Guldbækvens opbygning på hele den 1454 m lange strækning, der modelleres. Derfor benyttes der lineær interpolation imellem de målte tværsnit, så der kan bestemmes en vanddybde, som modellen kan kalibreres efter overalt på strækningen.

Ved et stedsskridt på 100 m bestemmes trykniveauet første gang i station 50 m, hvorfor det første interpolerede tværsnit også bestemmes der. Den første tværsnitsopmåling er foretaget i station 0 m og den næste i station 64 m, hvorved det første interpolerede tværsnit er 50 m fra det første opmålte tværsnit og 14 m fra det næste. Et tværsnit, hvor trykniveauet beregnes, bestemmes således ift. de to opmålte tværsnit, som beregningspunktet ligger imellem. Der interpoleres imellem alle 2 gange 8 punkter målt i de to opmålte tværsnit.

Interpolation af de målte tværsnitsdata benyttes som begyndelsesbetegelse, da det vurderes, at disse er beskrivende for vandløbet. Det ønskes, at modellen stabiliseres hurtigst muligt, hvorfed begyndelsesbetegelser vælges ens.

Længdeprofilen ved interpolation med et stedsskridt på 100 m fremgår af figur 6.12. Der er i alt 15 interpolerede tværsnit.

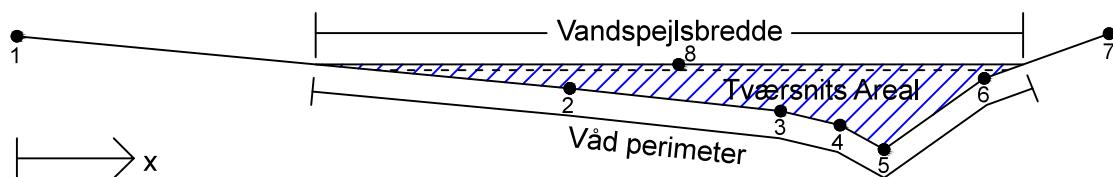


**Figur 6.12.** Interpoleret længdeprofil ved  $\Delta x = 100$  m.

Det interpolerede længdeprofil er ikke helt ens med det målte, men det vurderes, at ved en diskretisering på 100 m beskriver modellen vandløbets opbygning tilstrækkeligt.

### 6.5.2 Tværsnitsparametre

Det gennemstrømmede areal, hydraulisk radius og vandspejlsbredden bestemmes på baggrund af vanddybden, som er fra det laveste punkt i tværsnittet til vandspejlet. På figur 6.13 fremgår en principstegning af et tværsnit, og de parametre, som bestemmes på baggrund af det.



**Figur 6.13.** Principstegning for tværsnit og tværsnitsparametre.

Det gennemstrømmede tværsnitsareal er bestemt ved integralet mellem vandspejlet og vandløbets bund, jf. formel (6.11). Den hydrauliske radius bestemmes vha. det våde perimenter og det gennemstrømmede tværsnitsareal, jf. formel (6.12).

$$A = \int_0^b y(x) dx \quad (6.11)$$

$$R = \frac{A}{P} \quad (6.12)$$

Hvor

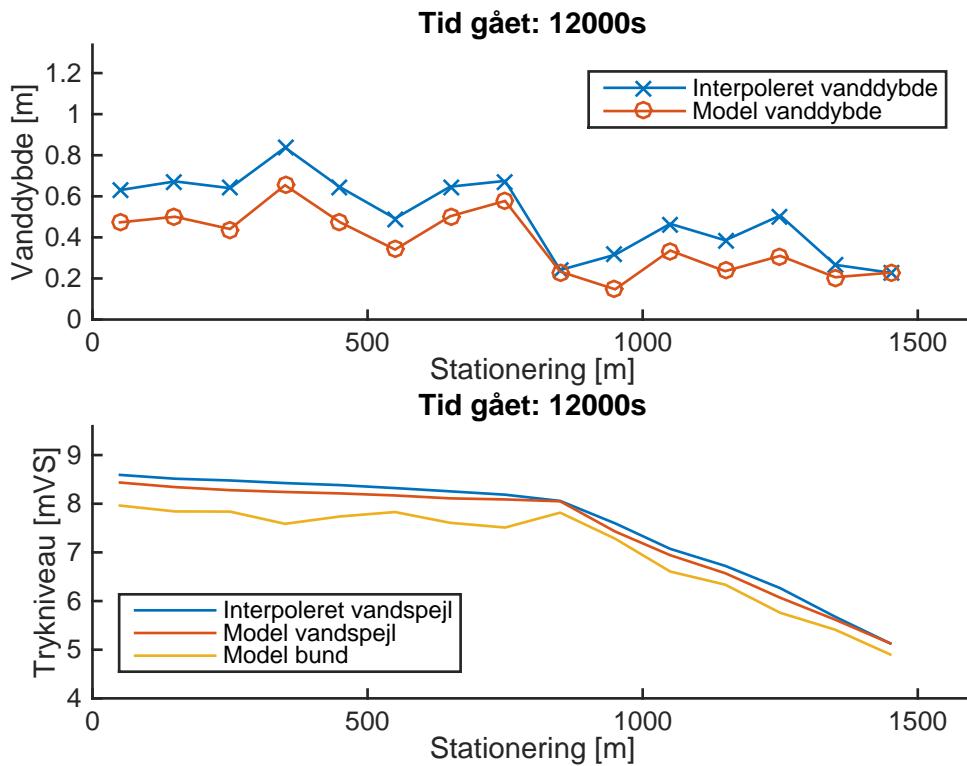
$R$	Hydraulisk radius [m]
$A$	Gennemstrømmet areal [ $\text{m}^2$ ]
$P$	Våd perimenter [m]
$x$	Vandspejlsbredde [m]
$y$	Vanddybde [m]

### 6.5.3 Kalibreringsparametre for diffusiv bølgemodel

Der er to parametre til kalibrering af model. Det er den laterale vandføring og Manningtallet. Den laterale vandføring kan både være negativ og positiv. Grundet usikkerheden omkring vandføringen i de forskellige tversnit og dermed den laterale vandføring, vælges det at have konstant vandføring i hele vandløbet lig med den, som er målt ved den øvre rand på  $0,291 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Manningtallet kan også variere over den modellerede strækning. Manningtallet i den diffusive bølgemodel beskriver modstanden i vandløbet som følge af friktionstab og enkelttab, fx mængden af grøde i vandløbet og tværsnittets opbygning. For vandløb kan det variere fra  $8 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  -  $55 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  [Brorsen og Larsen, 2009, tabel B.3]. Desto højere Manningtal, desto mindre vanddybde, hvorved Manningtallet kan benyttes til kalibreringen af modellen ift. vanddybder. Som udgangspunkt vælges Manningtallet til  $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ .

Udgangspunktet før kalibreringen fremgår af figur 6.14.

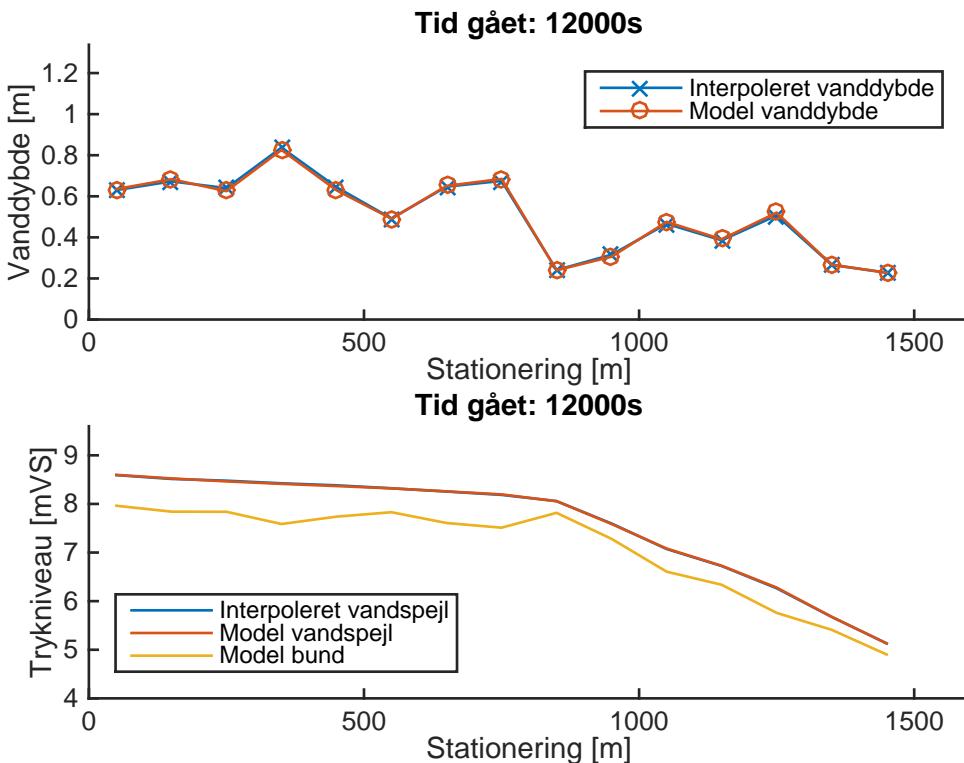


**Figur 6.14.** Længdeprofil af ukalibreret diffusiv bølgemodel med Manningtal på  $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  og ingen lateral vandføring.

Når modellen er stabil med de valgte kriterier, er der forskel mellem de interpolerede vanddybder og de modellerede vanddybder. Modellen er stabil efter 12000 sekunder, da vandføringen er stabil og ens i alle beregningspunkter. Den maksimale afvigelse er på 53,3 %, og det er altså nødvendigt at kalibrere på Manningtallet for at opnå bedre overensstemmelse mellem målte og modellerede data. Manningtallet indgår i beregningen af vandføringen, jf. formel (6.5), hvorved Manningtallet kalibreres individuelt for alle beregningspunkter, hvor vandføringen bestemmes.

#### 6.5.4 Kalibreringsresultater

Efter kalibreringen er den maksimale afvigelse mellem model og interpolerede vanddybder 3 %, hvilket opfylder kalibreringskriteriet på maksimum 5 % afvigelse. På figur 6.15 fremgår den færdigt kalibrerede diffusiv bølgemodel.



**Figur 6.15.** Længdeprofil af kalibreret diffusiv bølgemodel.

Efter kalibreringen er der konstateret kapacitetsproblemer tre steder i den diffusive bølgemodel: 150 m, 350 m og 650 m fra start. Dette kan skyldes målefejlene, som er omtalt i afsnit 6.3.1. Afstandene for kapacitetsproblemerne i den diffusive bølgemodel stemmer nogenlunde overens med afstandene for fejlene i GPS-målingerne, jf. tabel 6.2. Disse berregningspunkter kan ikke medtages i en kapacitetsanalyse.

Manningtallet varierer fra  $10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ - $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , hvilket er i den lave ende af, hvad manningtallet normalt er for vandløb, jf. afsnit 6.5.3. Manningtallet benyttes til at beskrive energitab som følge af friktion og enkeltab. Energitabene varierer ned gennem vandløbet. Hvis vandføringen er konstant, vil energitabet fra en sten mindskes, hvis vanddybden øges. Dette skyldes, at vandhastigheden falder. Manningtallet varierer altså fra sted til sted i et vandløb og fra vandløb til vandløb. Der er dog god overensstemmelse mellem model og virkelighed, og det vurderes derfor, at modellen er kalibreret tilstrækkeligt.

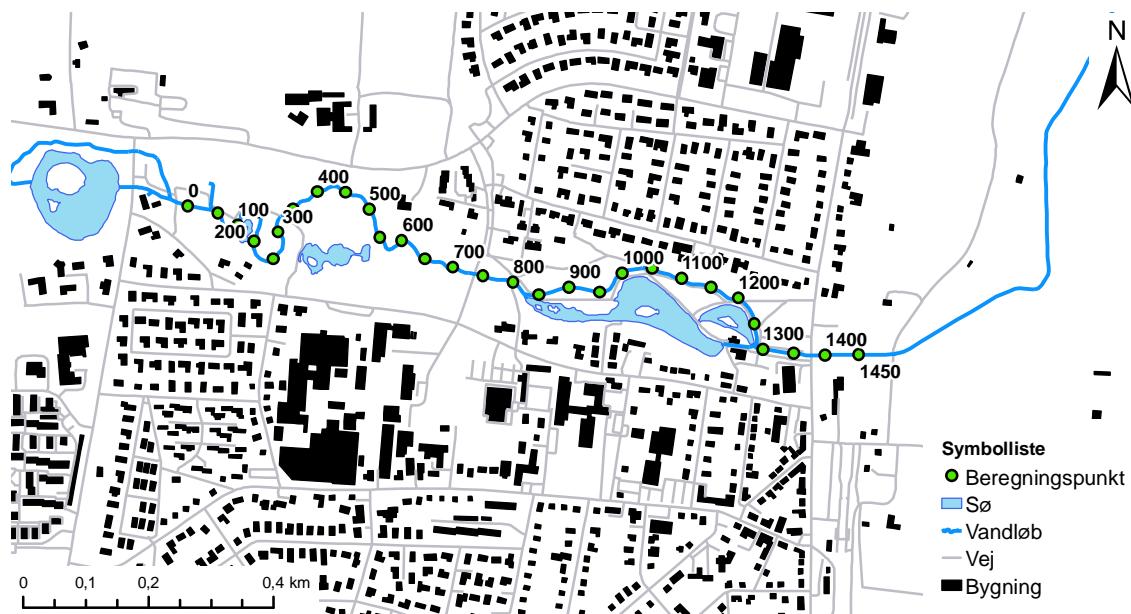
## 6.6 Kapacitetsanalyse af Guldbækken vha. diffusiv bølgemodel

I dette afsnit undersøges kapaciteten af Guldbækken, og hvor meget vandføringen i vandløbet kan hæves, før der forekommer kapacitetsproblemer. Analysen udføres med henblik på at undersøge, hvor store vandføringer fra regnhændelser og udløb, der må forekomme, før vandløbet løber over sine bredder. Der udføres en risikovurdering, for at fastlægge omfanget af skader under oversvømmelser. Beregningerne kan findes på [Bilags-CD, bolgemodel].

### 6.6.1 Risikovurdering

Risikoen for påvirkning af borgene i Svenstrup ved oversvømmelse vurderes.

De første ca. 750 m er området fladt og sumpet, hvor der ikke ligger nogle bygninger i nærheden af vandløbet, jf. figur 6.16. En oversvømmelse i denne del af vandløbet vil derfor ikke have konsekvenser for beboerne i Svenstrup og deres huse, men området langs vandløbet vil blive svære fremkommeligt.



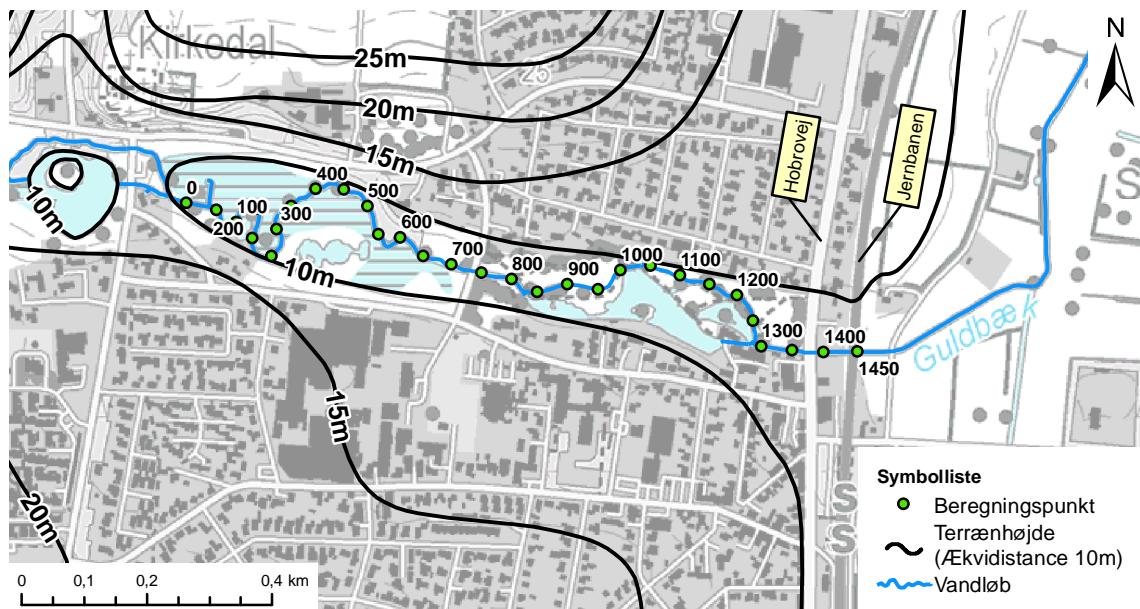
**Figur 6.16.** Beregningspunkter og afstand fra start.

De sidste ca. 700 m af den opmalte strækning øges hældningen af terrænet, og der er en park og huse i nærheden. De bygninger, som ligger nærmest vandløbet, ligger dog minimum ca. 2 m over vandspejlet af vandløbet, jf. figur 6.17.



**Figur 6.17.** Bebyggelse nærmest vandløbet på de sidste 700 m af den del af Guldbækken som undersøges. Placeringen af fotoet er markeret på figur 6.16.

Hele terrænet hælder samme vej som vandløbet, altså ud mod Østerå, jf. figur 6.18. I en oversvømmelsessituation vil vandet oversvømme parken og strømme ned mod Hobrovej, gennem viadukterne under vejen og jernbanen og videre ud på den anden side, hvor det er markeret, som kan påvirkes.



**Figur 6.18.** Terrænkort for Svenstrup.

Det vurderes, at problemer ift. kapacitet i Guldbækken ikke vil være til gene for borgerne

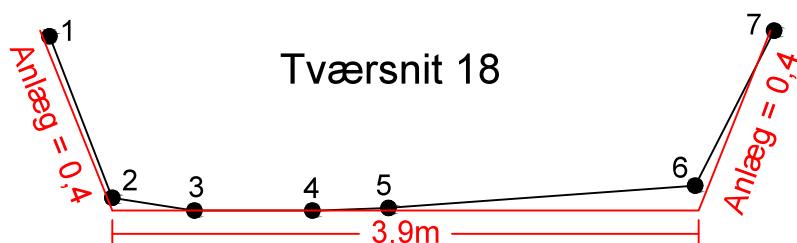
i Svenstrup, da vandet ikke vil påvirke boliger, eftersom de nærmeste boliger vurderes at ligge for højt ift. opstuvning fra vandløbet. Dog kan en oversvømmelse af parken ved Guldbækken være til gene for borgerne i Svenstrup. Foruden kan der forekomme tilbagestuvning i overløbsbygvarer langs vandløbet, da disse ligger tæt ved vandspejlet. Dette undersøges dog ikke yderligere i dette projekt.

### 6.6.2 Forøgelse af vandføring ved den øvre rand

Vandføringen øges ved den øvre rand fra start, og det undersøges, hvor der er oversvømmelse, når vandføringen er stabil i hele modellen. Herved undersøges hvilke områder der først oversvømmes. Forudsætninger for beregninger er følgende:

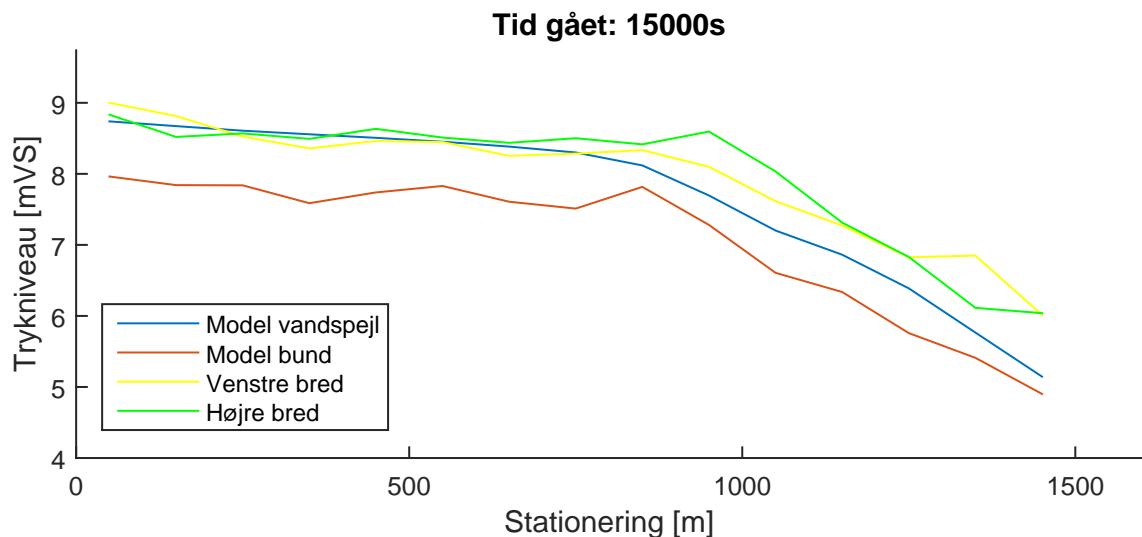
- Beregningspunkterne ved 150 m, 350 m og 650 m medtages ikke, da der er konstateret kapacitetsproblemer i den hydrauliske model allerede med den målte vandføring ved øvre rand i disse beregningspunkter, jf. afsnit 6.5.4.
- Tidsskridt vælges til 2 s.
- Stedsskridtet vælges til 100 m.
- På den nedre rand vælges der at benytte den naturlige dybde ift. vandføringen på den øvre rand.

Ved at benytte naturlig dybde ved den nedre rand hæves vanddybden ved en øget vandføring, hvilket den også vil i virkeligheden. Den sidste opmåling af tværsnit, tværsnit 18, er foretaget under jernbanebroen, jf. figur 6.18, hvor tværsnittet vurderes tilnærmelsesvis trapezformet, og fremgår af figur 6.19. Den naturlige dybde beregnes derfor for et trapezformet tværsnit med et anlæg på 0,4 og en bundbredde på 3,9 m. Metoden til beregning af naturlig dybde er forklaret i appendiks E.1.



**Figur 6.19.** Tværsnit 18, hvor der er beregnes naturlig dybde. Med sort er markeret det målte tværsnits punkter, og med rødt er det tilnærmende trapezformede tværsnit.

Det første sted, hvor der forekommer kapacitetsproblemer, er 250 m fra start med en vandføring på  $0,37 \text{ m}^3/\text{s}$ , som er i det sumpede område i starten. Generelt er de første steder, hvor der forekommer oversvømmelse, på de første 750 m, hvor der med en vandføring på  $0,49 \text{ m}^3/\text{s}$  er kapacitetsproblemer overalt mut. af beregningspunktet 50 m fra start, jf. figur 6.20. Der simuleres i 15000 sekunder, så vandføringen er stabil og ens i alle beregningspunkter.



**Figur 6.20.** Kapacitetsanalyse med vandføring på  $0,49 \text{ m}^3/\text{s}$ .

På de nedre 700 m, hvor faldet og afstanden til bredderne er størst, kommer der ikke kapacitetsproblemer ved en vandføring på  $0,49 \text{ m}^3/\text{s}$ .

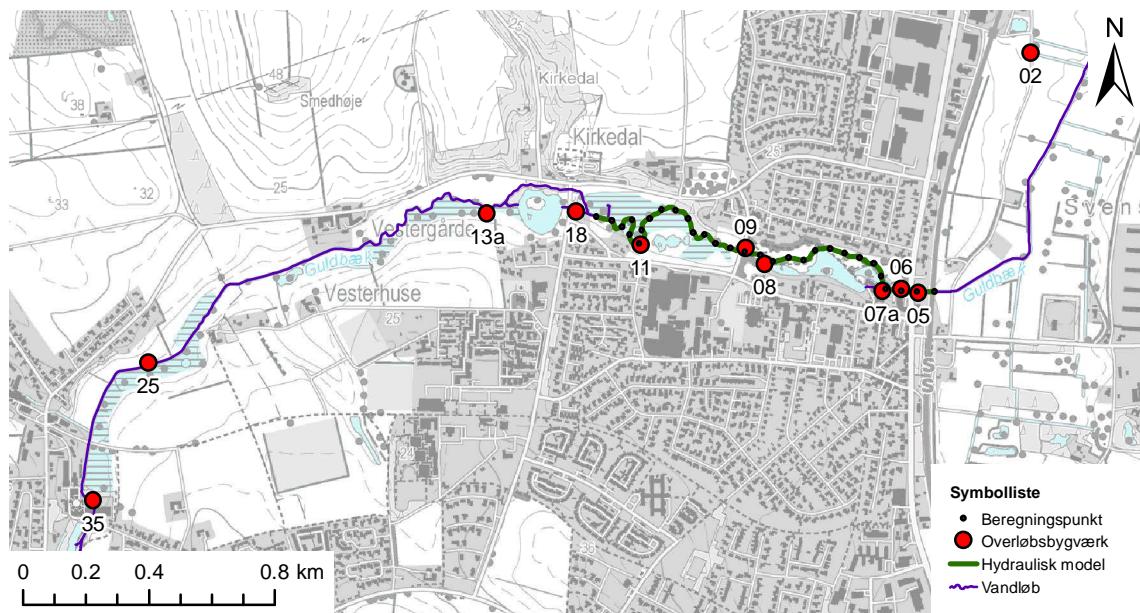
### 6.6.3 Kapacitet under overløbshændelser

For at analysere, hvordan vandløbet reagerer ved aflastninger fra overløb, indsættes der hydrografer fra overløbene i den diffuse bølgemodel. Overløbshydrograferne bestemmes vha. simulering i Mike Urban-modellen.

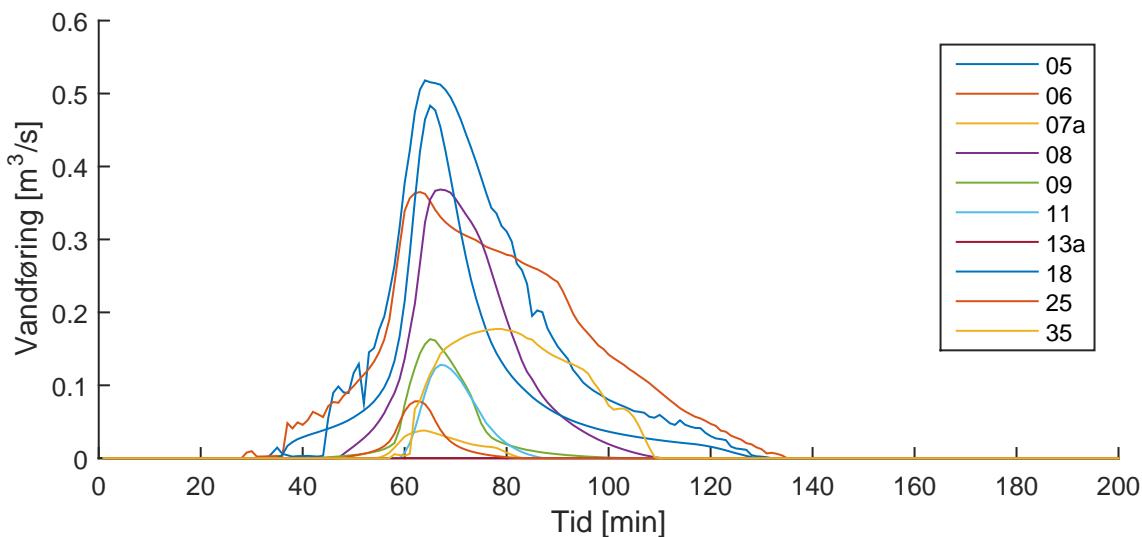
Overløbene aflaster forskellige steder i Guldbækken, hvorved vandføringen fra hver vil påvirke den modellede strækning tidsmæssig forskudt, men denne forskydning bestemmes ikke, da det vurderes mest kritisk, hvis alle aflastninger påvirker vandløbet samtidig.

Vandføringen vil naturligt øges under regn, men det er usikkert, hvor stor den naturlige tilstrømning til vandløbet er, hvorved denne ikke medregnes, og der benyttes derfor den målte vandføring som øvre rand, når der ikke er afstrømning fra overløbene.

Der benyttes en CDS-regn på 120 min med en årsmiddelnedbør på 690 mm og gentagelsesperiode på 1 år, som simuleres i Mike Urban-modellen. På figur 6.21 fremgår overløbsbygværkerne ift. den modellerede strækning i den diffuse bølgemodel, og på figur 6.22 ses overløbshydrograferne for alle overløb, som enten aflaster i Guldbækken opstrøms den modellerede strækning eller undervejs på strækningen. Der medtages både fælles- og separatkloakerede overløb, da begge vil påvirke vandføringen i Guldbækken. Mike Urban-modellen er dog ikke kalibreret for overløbene nr. 13a og 18, men det vurderes, at de stadig kan medtages i kapacitetsanalysen.



**Figur 6.21.** Overløbsplaceringer ift. den modellerede strækning.



**Figur 6.22.** Hydrografer for overløb.

Overløb nr. 02 medtages ikke, da det aflaster nedstrøms for den modellerede del af Guldbækken, jf. figur 6.21.

Hydrograferne omregnes, så tidsskridtet er tilpasset den diffuse bølgemodel. Overløbene nr. 35, 25, 13a og 18 lægges til den målte vandføring ved den øvre randbetingelse. Vandføringen fra overløbene 11, 09 og 08 indsættes i modellen som lateral vandtilførsel i de beregningspunkter, hvor vandstanden beregnes, som er tættest på udløbene. Dette skyldes, den laterale vandtilførsel kun indgår i formlen til bestemmelse af trykniveauet og ikke vandføringen, jf. afsnit 6.1.

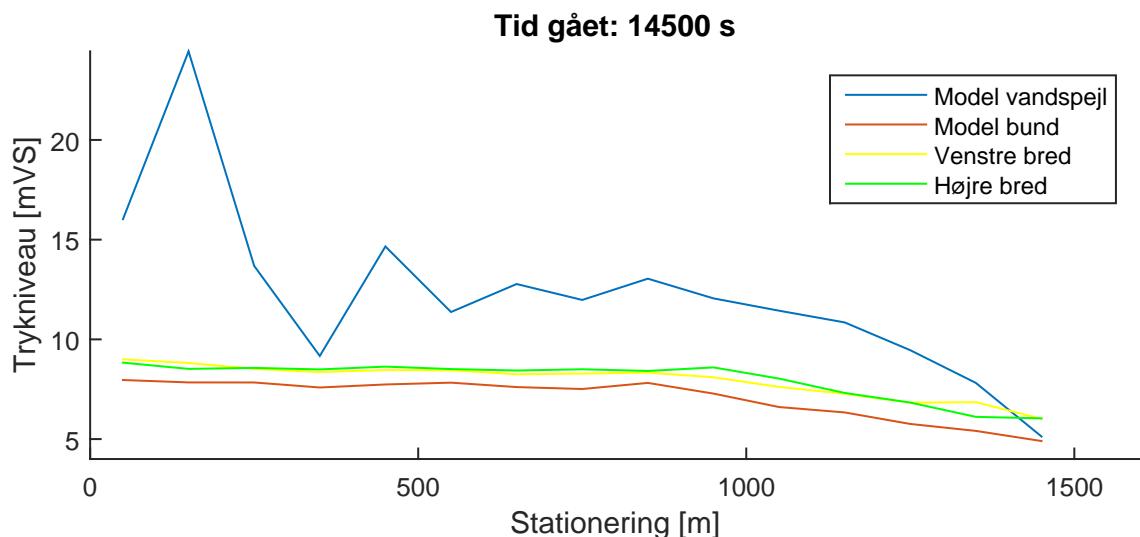
Det vurderes, at overløbene nr. 05, 06 og 07a ligger for tæt på den nedre rand, hvorved disse ikke medtages i simuleringen, da den nedre rand vil fastholde vandstanden uanset vandføringen fra overløbene.

Der benyttes de samme forudsætninger som i afsnit 6.6.2, samt de følgende forudsætninger:

- I Mike Urban benyttes en dynamisk bølgemodel til rørafstrømningen.  
– Tidsskridt mellem 1 og 30 sekunder.
- Overløbshydrograferne forskydes ikke tidsmæssigt ift. afstanden fra den øvre rand.
- Overløbshændelserne varer maksimalt 6900 sekunder.
- Hydrograferne fra overløbene indsættes i den diffuse bølgemodel efter 12 000 sekunder, hvor modellen er stabil med den målte vandføring på  $0,291 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Der simuleres over en periode på 25 000 sekunder, så modellen kan stabilisere sig igen efter overløbshændelserne.
- Der medregnes ikke naturlig tilstrømning til vandløbet.
- Der benyttes naturlig dybde som nedre randbetingelse ift. den gennemsnitlige vandføring ved den øvre rand.

På baggrund af risikovurderingen vælges en CDS-regn med en gentagelsesperiode på 1 år og en varighed på 120 min, da kapacitetsproblemer hvert år vurderes at skabe problemer for befolkningen i Svenstrup, som vil benytte parken. Kapacitetsproblemer med en længere gentagelsesperiode vurderes acceptable. Varigheden af regnen er valgt af hensyn til beregningstiden.

Ved simulering bliver modellen ustabil. På figur 6.23 fremgår modellen, som er ustabil ved et tidsskridt på 1 s og et stedsskridt på 100 m.



**Figur 6.23.** Ustabil model ved indsættelse af overløbshydrografer.

Modellen bliver fortsat ustabil selvom tidsskridtet sænkes til 0,5 s, hvorved det vurderes, at det er nødvendigt at øge stedsskridtet.

Det er forsøgt at øge stedsskridtet til 200 m og sænke tidsskridtet 0,1 s. Ved forøgelse af stedsskridtet er modellen ikke kalibreret, men der er valgt et fast manningtal på  $14 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , for blot at teste, hvorvidt modellen bliver stabil ved længere stedsskridt.

Modellen bliver fortsat ustabil, hvorved det vurderes, at ved yderligere forøgelse af stedsskridtet, vil modellen beskrive Guldbækken for upræcist til en vurdering af kapacitetsproblemer. Tidsskridtet sænkes ikke yderligere grundet længden af beregningstiden. Det er

altså ikke muligt at undersøge kapaciteten af Guldbækken med den hydrauliske model. Derfor opstilles en hydraulisk model i Mike Urban til vurdering af kapaciteten, jf. afsnit 6.7.

## 6.7 Kapacitetsanalyse vha. hydraulisk model i Mike Urban

Idet den diffusive bølgemodel bliver ustabil, når vandløbet simuleres under påvirkning af overløb, simuleres vandløbet igennem Mike Urban istedet.

I Mike Urban opbygges en fuldt dynamisk hydraulisk model med åbne ledningsstræknin-  
ger. Strækningerne adskilles af fiktive brønde, hvor strækningerne mellem brøndene er lig  
med afstanden mellem de målte tværsnit. Tværsnittet i strækningerne er lig det foregående  
målte tværsnit. Overløbshydrograferne indsættes i den brønd nærmest overløbet. Tørvej-  
rvandføringen på  $0,291 \text{ m}^3/\text{s}$  er indsat som en overfladeafstrømning ved første brønd, og  
sidste brønd er et udløb. Da Mike Urban ikke kan simulere strømninger i åbne tværsnit,  
når vandet er over kanterne, dvs. ved oversvømmelse, udvides vandløbet med kanter med  
anlæg på 0,5.

Idet der anvendes andre stedskridt i den hydrauliske model i Mike Urban end for den dif-  
fusiv bølgemodel, kalibreres Manningtallet igen. Der kalibreres således, at den beregnede  
naturlige dybde for hver tværsnit er tilsvarende den målte vanddybde i hver tværsnit. Man-  
ningtallet kan derfor udregnes med brug af Manningformlen. For de tværsnit, hvor der er  
konstateret målefejl, anvendes et Manningtal på  $13 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , svarende til medianen af de re-  
sterende, kalibrerede Manningtal. Modellen uden påvirkning af regnbetingede udledninger  
ses i appendiks G.

Til simuleringerne benyttes Hot-Start med begyndelsesvandstande svarende til vanddyb-  
den med tørvejrvandføringen uden regnbetingede udledninger. Guldbækken simuleres for  
både historiske regnhændelser og CDS-regn.

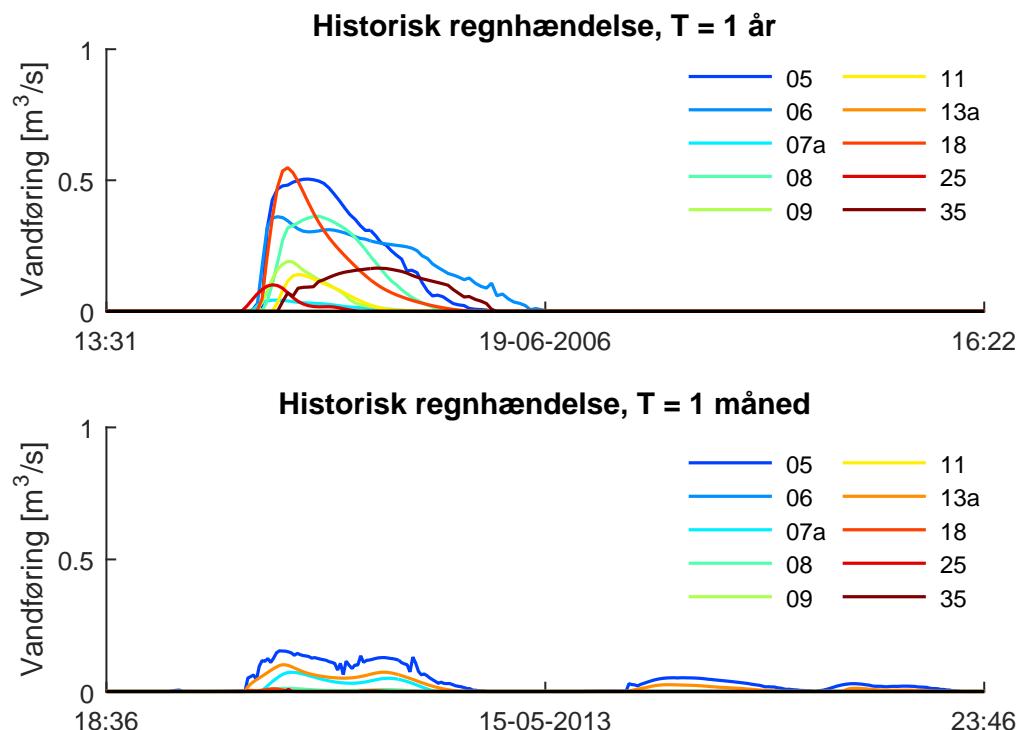
Følgende forudsætninger anvendes for den hydrauliske model i Mike Urban:

- Dynamisk bølgemodel for vandløbet.
  - Tidsskridt på 1 s.
- Dynamisk bølgemodel for afløbssystem.
  - Tidsskridt mellem 10 og 60 sekunder.
- Der foretages simulering med CDS-regn med gentagelsesperiode på hhv. 1 år og 1  
måned med en årsmiddelnedbør på 690 mm og varighed på 120 min.
- De historiske regnhændelser, der simuleres for, er udvalgt vha. den maksimale vand-  
føring for alle overløb ud fra 28-års simuleringen med en gentagelsesperiode på 1 år  
og 3-års simuleringen med en gentagelsesperiode på 1 måned.
  - Regnhændelsen med en gentagelsesperiode på 1 år er fra d. 19/6 2006.
  - Regnhændelsen med en gentagelsesperiode på 1 måned er fra d. 15/5 2013.
- Ingen bidrag udover overløbshydrografer i vandløbet.
- Der anvendes de målte tværsnit jf. afsnit 6.3.
- Der anvendes de målte vandspejlshældninger som hældning for vandløb.
- Overløbshydrografer indsættes på nærmeste målte tværsnit.

- Alle overløb, mut. af overløb 02, inkluderes i modellen, inklusiv de ukalibrerede overløb fra det separate afløbssystem.
- Brønde mellem hvert tværsnit har en diameter på 0,1 m og tryktab simuleres uden forbehold for tværsnitsændringer.

Idet CDS-regnene opnår tilnærmedesvis ens resultater for Guldbækens kapacitet, findes resultaterne for beregning med CDS-regn i bilag F.

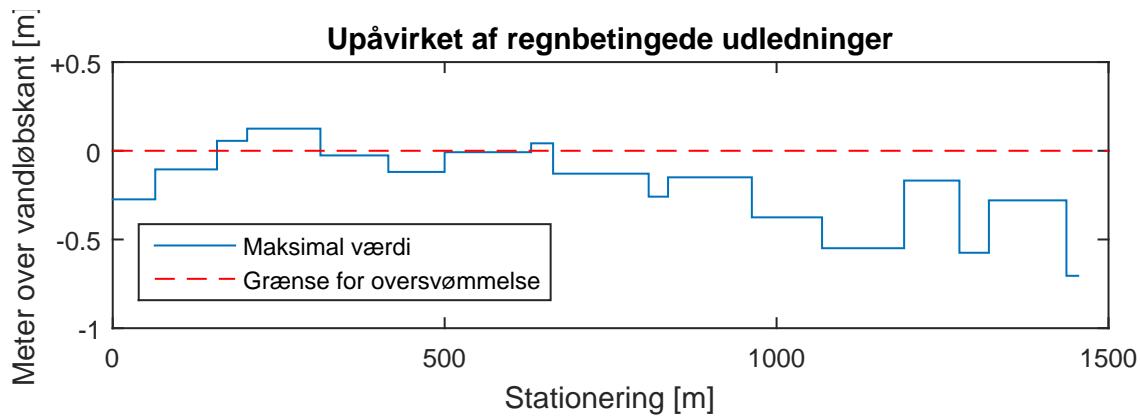
Overløbshydrograferne for de historiske regnhændelser fremgår af figur 6.24.



**Figur 6.24.** Overløbshydrograf for de historiske regnhændelser.

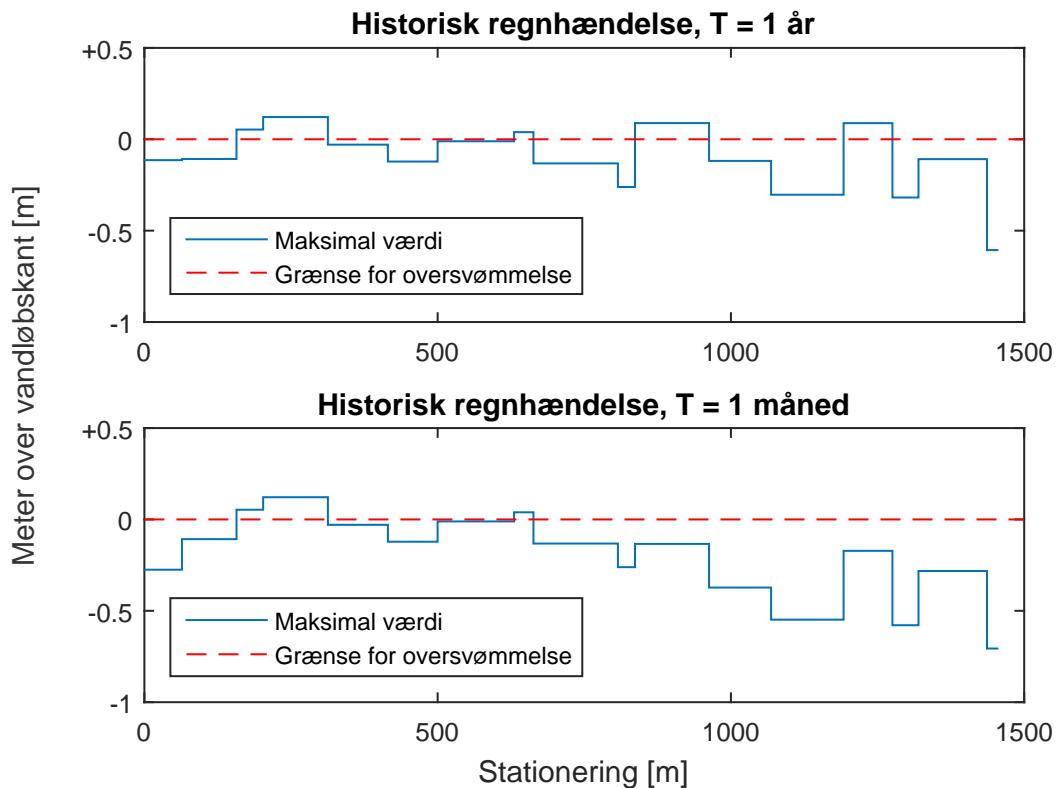
Den maksimale vanddybde i forhold til vandløbskanten ses på figur 6.25 for vandløbet, når det er upåvirket af regnbetingede udledninger. En negativ værdi betyder, at vandspejlet er under vandløbskanten, hvorfor der ikke er kapacitetsproblemer. En positiv værdi betyder, at vandspejlet er over de målte vandløbskanter, hvorfor der er oversvømmelse. Da mængden af oversvømmelsen er direkte afhængig af anlægget på de fiktive kanter, kan modellen ikke beskrive oversvømmelsesdybden, men kun bestemme, hvorvidt der er oversvømmelse eller ej.

189 m af de i alt 1454 m allerede er oversvømmet, når vandløbet er upåvirket. Den del af vandløbet, der er oversvømmet, er der, hvor der er målt et vandspejl højere end vandløbskanten.



**Figur 6.25.** Meter vand over vandløbskant, når vandløbet ikke er påvirket af regnbetingede udledninger.

Resultaterne for de historiske regnhændelser fremgår af figur 6.26. Der er oversvømmelse i på 398 m af den fulde strækning, når der anvendes en 1-års regn og på 189 m, når der anvendes regnhændelser med en gentagelsesperiode på 1 måned. På den første halvdel af strækningen er oversvømmelserne ens med oversvømmelserne kun ved brug af tørvejrsvandføringen.



**Figur 6.26.** Meter vand over vandløbskant ved historiske regnhændelser.

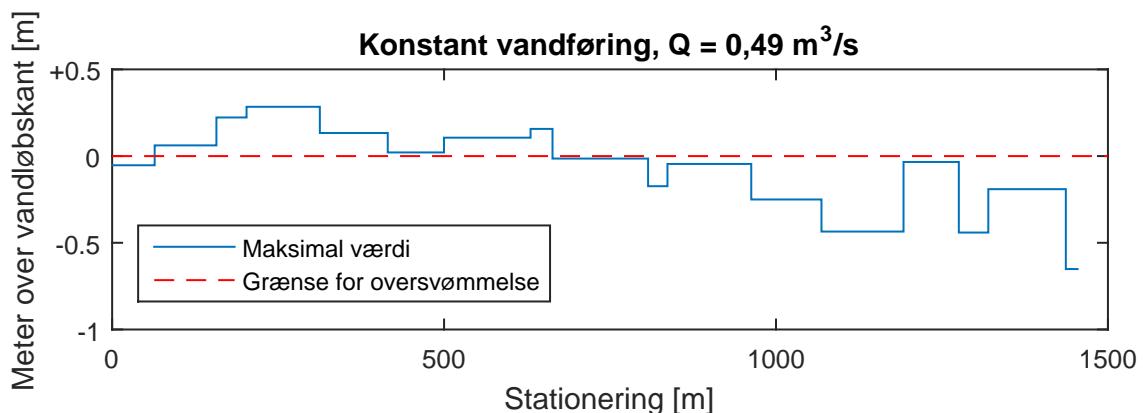
Oversvømmelserne på den sidste halvdel af strækningen er placeret ved overløbsbygværkerne, som aflaster der. Det er dog muligt, at oversvømmelserne på denne halvdel kan skyldes at vandløbskanterne ikke er målt helt til toppen af bredderne grundet stejle skråninger, jf. afsnit 6.3.1.

Ydermere vurderes det, at oversvømmelserne kun påvirker de grønne arealer omkring vand-

løbet og ikke forårsager skade på de nærliggende bygninger, idet de ligger mindst 2 m højere end vandløbskanten. Oversvømmelserne vurderes dog at forværres ved regnhændelser med højere gentagelsesperiode, og da der ikke må være oversvømmelse grundet regnbetingede udledninger, jf. afsnit 2.1.1, skal dette løses.

### 6.7.1 Sammenligning af hydrauliske modeller

Den hydrauliske model fra Mike Urban sammenlignes med den diffusive bølgemodel. Sammenligningen benyttes til at validere resultaterne ved en øget vandføring på  $0,49 \text{ m}^3/\text{s}$  i den diffusive bølgemodel. Vandføringen indsættes i den første brønd i den hydrauliske model i Mike Urban. Resultaterne er vist på figur 6.27.



**Figur 6.27.** Konstant vandføring på  $0,49 \text{ m}^3/\text{s}$  i hydraulisk model i Mike Urban.

Begge modeller viser, at der opstår kapacitetsproblemer på de første 750 m mut. af de første ca. 50 m. På den sidste strækning af Guldbækken opstår der ikke kapacitetsproblemer ifølge beregningerne. Da de to modellers resultater afspejler hinanden, vurderes det, at den diffusive bølgemodells resultater er korrekte.

Grunden til den fuldt dynamiske model i Mike Urban er stabil ved regnbetingede udledninger fra overløb, i modsætning til den diffusive bølgemodel konstrueret i Matlab kan skyldes forskellen i løsningsmetoden. Modellen i Mike Urban er løst implicit og den diffusive bølgemodel er løst explicit.

## 6.8 Erosion i Guldbækken

I dette afsnit undersøges Guldbækken for erosion, så det kan vurderes, hvorvidt der transportereres bundsediment i vandløbet, som kan ændre vandløbets opbygning og de æstetiske forhold.

Et sedimentkorn vil transportereres ned gennem vandløbet, hvis tyngdekraften er mindre end de igangsættende kræfter fra vandløbet. De igangsættende kræfter består af en løftekraft, som følge af et undertryk lige over kornet, og strømmens kraft virkende på kornet. Hvorvidt et sediment transportereres et bestemt sted i vandløbet afhænger altså af kornstørrelsen på sedimentet. Løftekraften vurderes så lille, den kan negligeres. [Rasmussen et al., 2015]

Strømmens kraft virkende på kornet afhænger af bundforskydningsspændingen, og tyngdekraften afhænger af densiteten, jf. formel (6.13) og (6.14). [Rasmussen et al., 2015, kursusgang 2]

$$F_d = \tau_0 \cdot d^2 \quad (6.13)$$

$$F_g = (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d^3 \quad (6.14)$$

Hvor

$F_d$	Strømningskraft [N]
$\tau_0$	Bundforskydningsspænding [N/m <sup>2</sup> ]
$d$	Korndiameter [m <sup>2</sup> ]
$F_g$	Tyngdekraft [N]
$\rho_s$	Densitet af sediment [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho$	Densitet af vand [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	Tyngdeacceleration [m/s <sup>2</sup> ]

Forholdet mellem tyngdekraften og strømningskraften betegnes Shields parameter, jf. formel (6.15).

$$\Theta = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d} \quad (6.15)$$

Hvor

$$\Theta \mid \text{Shields parameter [-]}$$

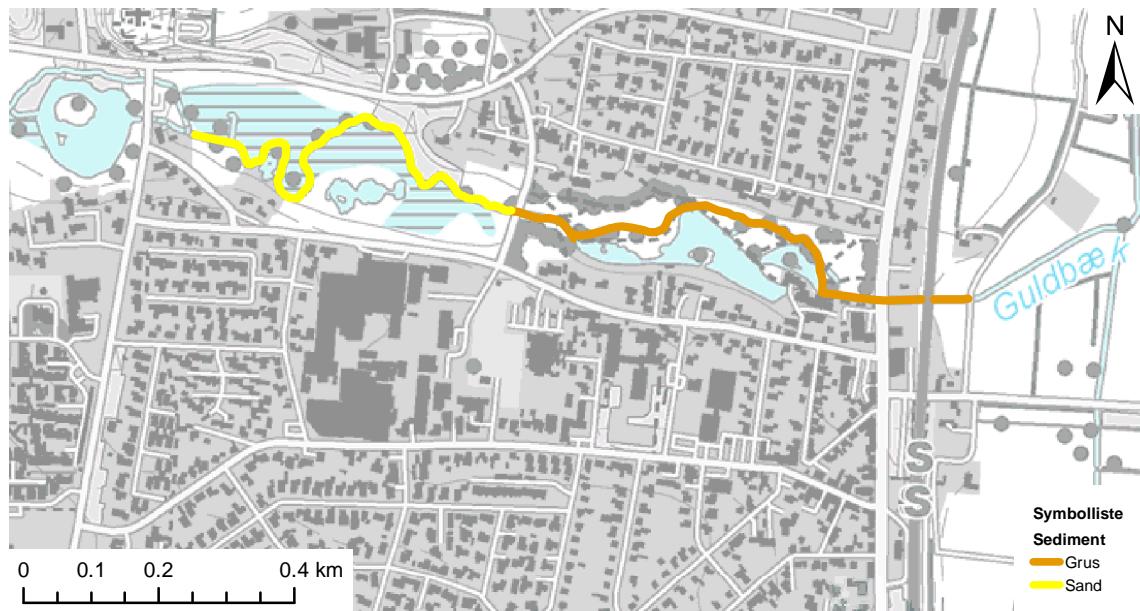
Når Shields parameter er bestemt, kan denne aflæses på figur 6.29 vha. korndiametren, for at vurdere hvorvidt der er sedimenttransport.

Der regnes sedimenttransport for de målte data. Dette skyldes den diffusive bølgemodel bliver ustabil ved indsættelse af overløbshydrografer fra en regnvejrssituations og tvær-snitsdata er usikre for den hydrauliske model i Mike Urban, når der er oversvømmelse. Beregninger kan findes på [Bilags-CD, ErosionGuldbak].

Der forudsættes følgende:

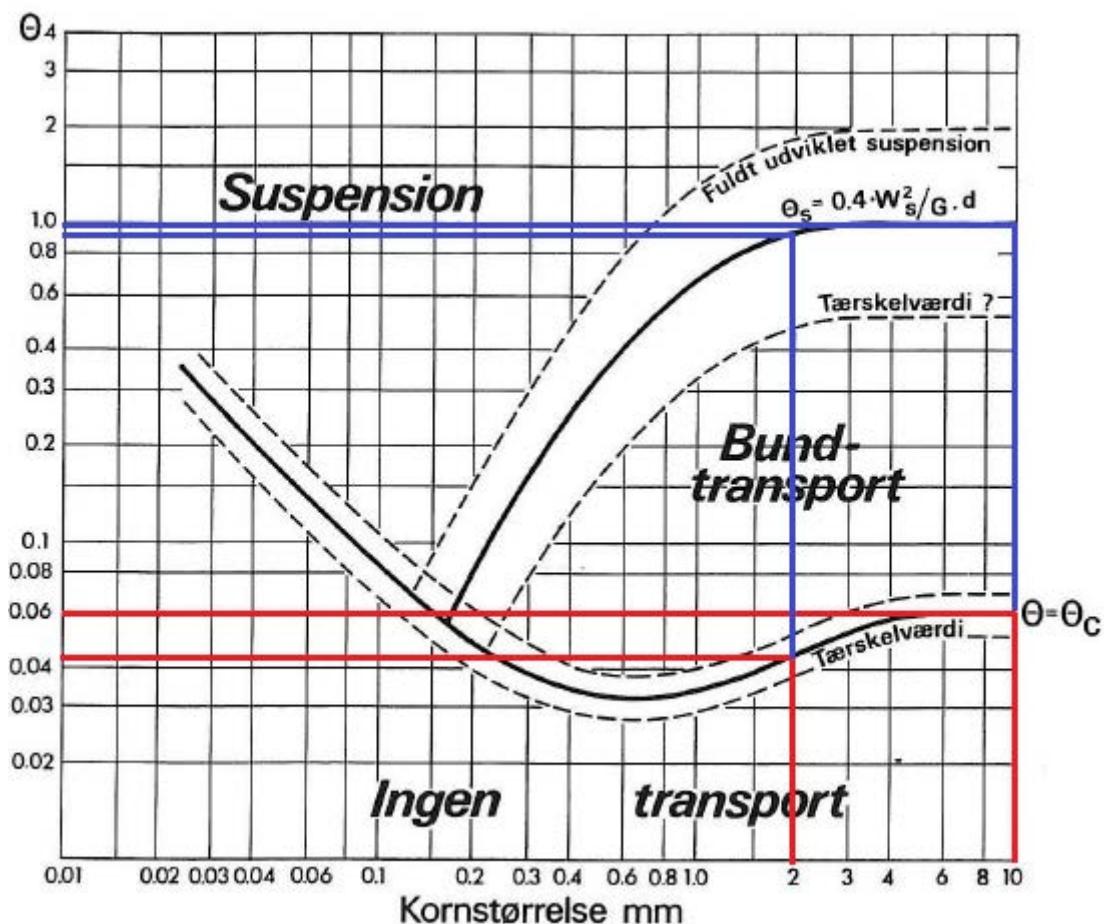
- Densiteten af sedimentkornet er lig kvarts på 2650 kg/m<sup>3</sup>. [Engineering Toolbox, n.d.]
- Diameteren af sand er 2 mm. [Ovesen et al., 2012, side 23]
- Diameteren af grus er 15 mm. [Ovesen et al., 2012, side 23]
- Densiteten af vand er 1000 kg/m<sup>3</sup>.

Sedimentet er estimeret i vandløbet på den opmålte strækning vha. observationerne i afsnit 3.3. Resultatet fremgår af figur 6.28.



*Figur 6.28.* Sedimenttyper i vandløb.

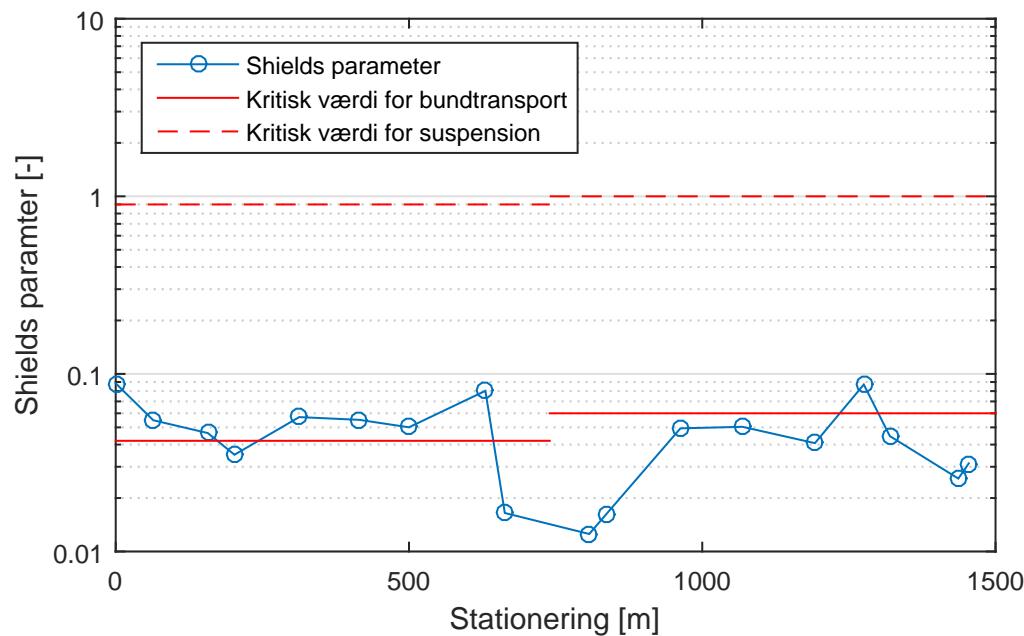
På figur 6.29 kan den kritiske værdi for Shields parameter aflæses for de to estimerede korndiametre.



*Figur 6.29.* Diagram over hvorvidt der er sedimenttransport ift. Shields parameter og kornstørrelsen. De blå steges aflæser transport ved suspension og de røde streger ved bundtransport. [Rasmussen et al., 2015, red.]

På figuren fremgår der ikke kritiske værdier for Shields parametre for korn med større diameter end 10 mm, men det vurderes, at grænseværdierne ikke ændres ved større korndiameter. De kritiske værdier for Shields parameter aflæses til 0,042 og 0,06 for bundtransport af hhv. sand og grus og til 0,9 og 1,0 for suspension. Disse værdier benyttes som grænse for, hvornår der er risiko for sedimenttransport i Guldbækken.

Resultaterne af erosionsberegninger er vist på figur 6.30.



**Figur 6.30.** Bundtransport og suspension for de målte data.

Figur 6.30 viser, at der på den første strækning, til ca. station 800 m, vil opstå transport af sedimenterne på bunden bestående af sand i en tørvejrssituatie. Den sidste strækning af Guldbækken overstiges den kritiske værdi for Shields parameter ét sted, hvilket kan skyldes en kort ændring i vandløbets tværsnit og negligeres derfor. Der vurderes således ikke at være erosion på de sidste ca. 700 m.

Den mindste diameter, som kornene kan have, for at der ikke opstår sedimenttransport er 3,4 mm på de første 700 m. Dette betyder, at bunden på denne strækning vil bestå primært af en fint grus [Ovesen et al., 2012, side 23].

Hvis resultaterne sammenlignes med observationerne, som er foretaget af Guldbækken, kan det konkluderes, at de ikke stemmer overens med det synlige.

Dette kan dog skyldes, at der er bundtransport, hvor en mindre mængde af sedimentet transportereres ved bunden uden at være suspenderet i vandfasen. På den måde transportereres sedimentet, som beregningerne viser, men med en hastighed, hvor det ikke er synligt. Hvis sandet bliver transporteret, vil det sandsynligvis sedimentere nedstrøms for jernbanebroen grundet det lave fald på strækningen, jf. afsnit 3.3.

Såfremt der ikke er bundtransport kan afvigelsen mellem beregninger og observationen skyldes fejl i estimeringen af, hvilken sedimentstørrelse Guldbækkens bund består af. Det

kan derfor ikke entydigt konkluderes, om der er risiko for erosion i Guldbækken på baggrund af beregningsresultaterne.

Det vurderes, at erosionen forværres ved regnbetingede overløb til Guldbækken.

## 6.9 Usikkerheder

Ved brug af den diffusive bølgemodel ekskluderes accelerationsledene fra Saint-Venant-ligningerne. Det er usikkert, hvor meget dette har indflydelse på resultaterne, men den diffusive bølgemodel er dog ofte tilstrækkelig til at beskrive hydraulikken i vandløb [Fan og Li, 2004, side 1].

Guldbækken er opmålt 18 forskellige steder igennem vandløbet, hvor der er forsøgt at foretage en måling, hver gang tværsnittet ændrer sig væsentligt. Derfor vurderes det, at bredden og middeldybden for vandløbet er repræsenteret i målingerne. Mindre ændringer i tværsnittet, bl.a som følge af sten, træer i vandet o.l. er dog ikke inkluderet i målingerne. Usikkerheden omkring tværsnittet kan påvirke resultaterne for Guldbækvens kapacitet og erosion.

Når det regner tilstrækkeligt, til der forekommer overløb til Guldbækken, er Guldbækken utsat for både bidrag fra overløbene samt de separatkloakerede oplande, og den naturlige tilstrømning af vand fra grønne arealer omkring vandløbet. Idet der ikke tages forbehold for den naturlige tilstrømning under kapacitetsanalysen, er den hydrauliske kapacitet for Guldbækken sandsynligvis overestimeret.

Endvidere indsættes overløbshydrograferne ikke på deres rigtige placering i de to hydrauliske modeller eller forskydes ift. afstanden opstrøms fra starten af modellen.

Modellerne er afgrænset nedstrøms før jernbanebroen. Der er derfor ikke undersøgt, hvorvidt strækningen efter broen samt Østerå har tilstrækkelig kapacitet under overløbshændelser. Idet Guldbækken udmunder i Østerå, har dette vandløb en større vandføring, hvorfor det vurderes, at overløbsvolumenerne har mindre relativ påvirkning ift. den naturlige vandføring, hvorfor kapaciteten kan være tilstrækkelig.

Manningtallet beskriver almindeligvis friktionstab i rør. For vandløb er der dog, foruden tab som følge af friktion med vandløbets bund og side, enkelttab. Idet Manningtallet kalibreres i de hydrauliske modeller, vurderes det, at enkelttabene er repræsenteret igennem det kalibrerede Manningtal. Enkelttabene er derfor inkluderet som én modstand over en strækning, svarende til diskretiseringen.

Som følge af diskretiseringen er interpolerede tværsnit også anvendt, som jf. figur 6.12 ikke er ens med de målte tværsnit, hvilket medfører en usikkerhed på tværsnittet. Ved brug af den fuldt dynamiske model i Mike Urban er der også usikkerhed på tværsnittene imellem de opmålte tværsnit.

## 6.10 Opsummering

På baggrund af kapacitetsanalysen af Guldbækken konkluderes det, at der er kapacitetsproblemer i Guldbækken, og at der er oversvømmelse af Guldbækken med en gentagelsesperiode på 1 år. Regnbetingede udledninger må ikke give anledning til oversvømmelse [Aalborg Kommune og Nordjyllands Amt, 2004, Vilkår for udledningstilladelser]. Dette er dermed ikke overholdt for Svenstrups afløbssystem. Det vurderes dog usandsynligt, at der vil være tilstrækkelig oversvømmelse i Guldbækken til at forårsage skade på de nærliggende bygninger.

Der er undersøgt for erosion i Guldbækken, hvorfaf det konkluderes, at der på de første 800 m af den modellerede strækning kan være sedimenttransport af sand med en kornstørrelse på 2 mm. Dog er sedimentsammensætningen på bunden blot estimeret, hvilket betyder, at resultatet kan være misvisende.

# Iltforhold i Guldbækken

7

Guldbækkens følsomhed overfor ændring i iltforhold som følge af udledninger fra overløb undersøges gennem en analyse. I dette kapitel redegøres der for Single Curve-metoden til beregning af iltparametre i Guldbækken på baggrund af iltmålinger foretaget i vandløbet. Herefter gives en vurdering af, hvor robust Guldbækken er overfor udledninger af overløbsvand ved både at beregne iltforbruget i vandfasen samt iltforbruget ved bunden.

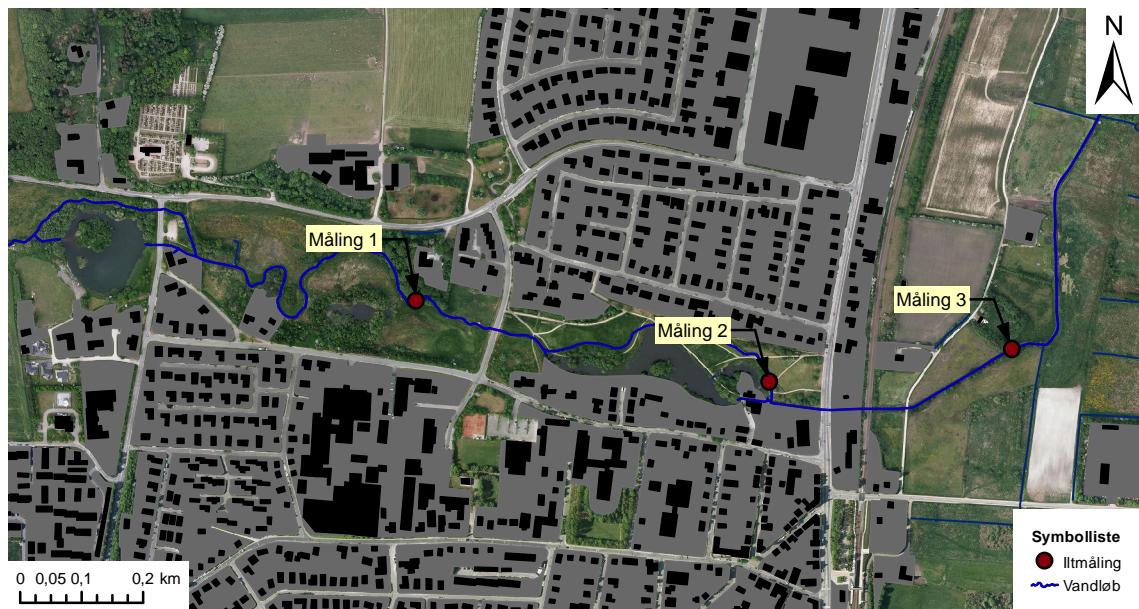
Guldbækken er klassificeret som et B1-vandløb [Miljøministeriet, 2011]. Dette betyder, at Guldbækken er gyde- og yngelopvækstvand for laksefisk.

I regionplanen for Nordjyllands amt er der knyttet en vejledende grænseværdi for døgnminimumskoncentrationen for B1-vandløb på 6 mg/L. [Region Norjylland, 2005, tabel 6.2.1]

I SVK skrift nr. 22 er de vejledende minimums grænseværdier for ilt niveau i vandløb angivet i relation til gentagelsesperiode samt eksponeringstid. For en gentagelsesperiode på 0,1 år er grænseværdien 8 mg/L og 9 mg/L for en eksponeringstid på hhv. 1 time og 12 timer [IDA Spildevandskomiteen, 1985, tabel 4.5.1]. Ydermere er der angivet grænseværdier for alle gentagelsesperioder mellem 0,1 og 16 år for begge eksponeringstider.

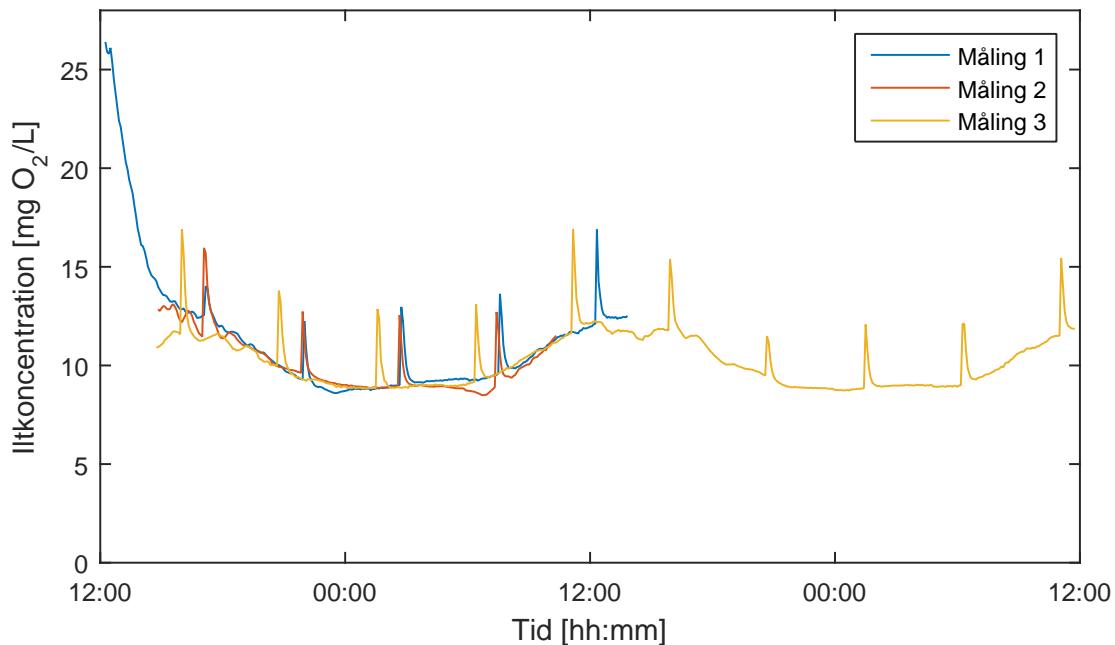
## 7.1 Iltmålinger i Guldbækken

Der er udført tre målinger af ilt og temperatur i Guldbækken over tre døgn. Deres placering ses på figur 7.1. Måling 1 fra d. 28/4 til d. 29/4, måling 2 fra d. 29/4 til 30/4, og måling 3 fra d. 30/4 til 2/5. Ingen af målingerne dækker samme tidsrum, hvorfor Single Curve-metoden anvendes, da der skal bruges to simultane målinger forskellige steder i vandløbet, hvis det ønskes at benytte en Twin Curve-metode. Målingerne er ikke foretaget af projektgruppen, hvorved der ikke er kendskab til fremgangsmåde og kalibrering af udstyr.



**Figur 7.1.** Placeringer af iltmåleren i Guldbækken.

Iltkoncentrationen i alle tre målinger er vist på figur 7.2. Det ses, at der opstår små “peaks” ca. hver fjerde time. Det vurderes, at dette er fejl i måleudstyret. Derfor frasorteres disse “peaks” fra datasættene. Samtidig anvendes et glidende gennemsnit med 16 værdier for iltkoncentrationen for at udjævne kurven. Det ses også, at måling 1 starter ved ca. 26 mg O<sub>2</sub>/L, hvilket vurderes at være en fejl i målingen. Dette er dog i dagstimerne og har derfor ingen effekt på beregningerne.



**Figur 7.2.** Iltkoncentrationen i alle målepunkterne.

De tre målinger er tilnærmedesvis sammenfaldende. “Peaks” på måling 1 og måling 2 forekommer næsten samtidig. Måling 3 har eventuelt et forkert noteret startstidspunkt, hvorfor det kan være, at “peaks” i denne måling er sammenfaldende med måling 1 og 2.

## 7.2 Beregning af iltparametre

Der benyttes som tidligere nævnt Single Curve-metoden til beregning af iltforhold i Guldbækken. Metoden benytter sig af én målestation med observationer af iltkoncentration og temperatur til beregning af hhv. geniltningen, primærproduktionen og respirationen. Disse parametre fremgår af vandløbets iltbalance, jf. formel (7.1). Beregningerne kan findes på [Bilags-CD, SingleCurve].

$$B = P + G - R \quad (7.1)$$

Hvor

$B$	Iltkoncentrationsændring over tid [mg O/L/min]
$P$	Primærproduktion [mg O/L/min]
$G$	Geniltning [mg O/L/min]
$R$	Respiration [mg O/L/min]

Følgende forudsættes for brug af Single Curve-metoden [Jensen, 2004]:

- Guldbækvens hydrauliske parametre antages at være tilnærmelsesvis konstante over strækningen, hvor metoden benyttes.
- Der er ingen variation i vandføringen.
- Der er ingen udveksling med grundvandet fra vandløbet.
- Der er ingen dispersion i strømningsretningen.
- Respiration og geniltningskonstanten er konstant.
- Ingen tidslig ændring i bidrag til iltbalancen i vandløbet opstrøms for målestasjonen.

Vandløbets primærproduktion er afhængig af sollys, hvorfor der ikke er primærproduktion om natten. Dette udnyttes, når parametrene fra formel (7.1) beregnes. Geniltningen beregnes med formel (7.2), hvorved viden om den aktuelle iltkoncentration i vandløbet ved beregningspunktet benyttes i sammenhæng med en mættet iltkoncentration, som beregnes med formel (7.3) [Benson og Krause, 1984].

$$G = K_2 \cdot (C_m - C) \quad (7.2)$$

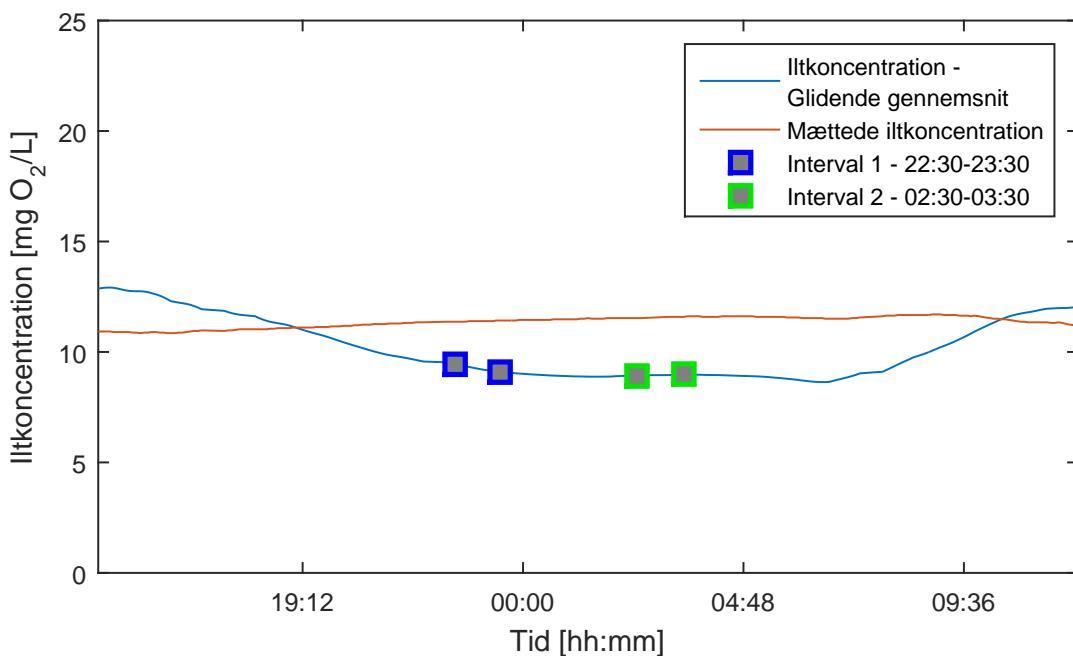
$$C_m(T) = \exp\left(-139,34411 + \frac{1,575701 \cdot 10^5}{T} - \frac{6,642308 \cdot 10^7}{T^2} \dots + \frac{1,2438 \cdot 10^{10}}{T^3} - \frac{8,621949 \cdot 10^{11}}{T^4}\right) \quad (7.3)$$

Hvor

$K_2$	Geniltningskonstant [ $\text{min}^{-1}$ ]
$C_m$	Den temperaturafhængige iltmættede koncentration [mg O/L]
$C$	Målt iltkoncentration [mg O/L]
$T$	Temperatur [K]

Ved hjælp af observationerne for iltkoncentrationer og temperaturer i Guldbækken konstrueres en graf for hver måling, hvilket fremgår af figur 7.3. Der er valgt to intervaller, som geniltning og respiration beregnes efter. Intervallerne er valgt således, at det første

interval dækker den tidlige del af natten, og det andet interval dækker den sene del af natten. Intervallerne ses på figur 7.3. Tiden mellem solnedgang og solopgang er markeret med ”Nat”.



**Figur 7.3.** Iltkoncentrationen, den mættede iltkoncentration, samt de to intervaller, der regnes ud fra for målepunkt 2.

Ændringen i iltkoncentration i begge intervaller anvendes til at beregne geniltningskonstanten samt respirationen i vandløbet. Formel (7.1) kombineres med formel (7.2), hvilket resultere i formel (7.4) [Frier, 2006, side 97]. Primærproduktionen udgår, idet begge intervaller er om natten. Det ønskes at beregne respiration og geniltningskonstant til 20 °C for at have ens temperatur i de to intervaller. Temperaturkorrektionskonstanterne  $i$  og  $j$  for hhv. respiration og geniltning introduceres. Disse benyttes til at omregne til 20 °C fra middeltemperaturen i intervallerne. [Frier, 2006]

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = K_2(20) \cdot j^{(\bar{T}-20)} \cdot (C_m - \bar{C}) - R(20) \cdot i^{(\bar{T}-20)} \quad (7.4)$$

Hvor

$\frac{\Delta C}{\Delta t}$	Ændringen i iltkoncentration over et tidsinterval [mg O <sub>2</sub> /L/min]
$K_2(20)$	Geniltningskontant ved 20 °C [min <sup>-1</sup> ]
$R(20)$	Respiration ved 20 °C [mg O <sub>2</sub> /L/min]
$j$	Temperaturkorrektionskonstant for geniltning - 1,015
$i$	Temperaturkorrektionskonstant for respiration - 1,07

Med formel (7.4) dannes to ligninger med to ubekendte ved udnyttelse af de to intervaller. Respirationen og geniltningskontanten ved 20 °C kan derefter beregnes, idet temperaturen, den iltmættede koncentration, samt ændringen i ilt over tid kendes.

### 7.2.1 Resultater for iltparametre

Resultaterne for geniltningskonstanten og respirationen ses i tabel 7.1 for alle tre målinger.

	Måling 1	Måling 2	Måling 3
Geniltningskonstant $[h^{-1}]$	1,50	0,787	0,534
Respiration $[mg O/L/h]$	6,89	3,61	2,50

**Tabel 7.1.** Geniltningskonstant og respiration i Guldbækken for de tre målinger.

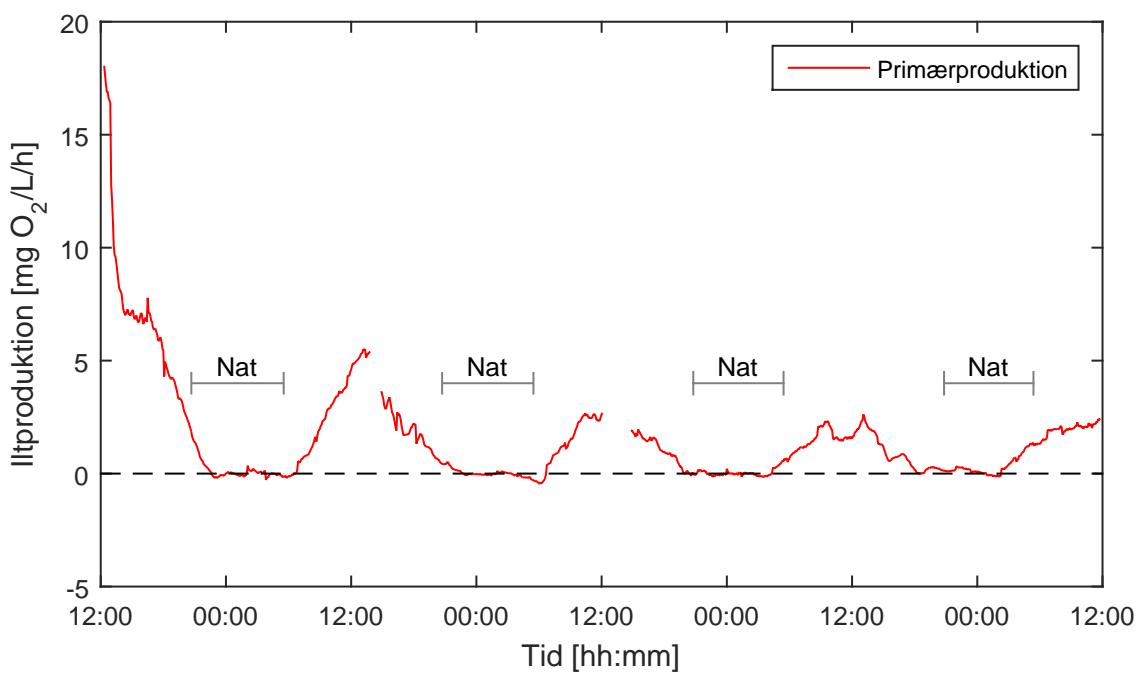
Resultaterne for geniltningskonstanten og respirationen sammenlignes med resultater fra tidligere projektrapporter, jf. tabel 7.2.

Gruppe, år - Metode	Geniltningskonstant $[h^{-1}]$	Respiration $[mg O/L/h]$
B111, 2012 - Propanforsøg	0,663/0,866	0,333/0,280
B124, 2013 - Twin-curve	0,320	1,210
B124, 2013 - Propanforsøg	1,146	-
B203, 2014 - Single-curve	0,072	0,132

**Tabel 7.2.** Geniltningskonstanter og respiration fra tidligere projektrapporter. [B111, 2012; B124, 2013; B203, 2014]

Generelt er værdierne fra propanforsøgene højest, mens single-curve og twin-curve resultaterne er lave. Konstanterne i dette projekt er beregnet vha. af single-curve metoden, men er dog stadig højere for måling 1 end resultaterne for propanforsøg fra de tidligere rapporter. Måling 2 og 3 er dog højere end Single Curve og Twin Curve-metoderne fra de tidligere projekter. Der arbejdes videre med geniltningskonstanterne beregnet i denne rapport. Ved brug af en høj geniltningskonstant kan geniltningsproblemer i vandløbet underestimeres, da den hurtigt vil bringe iltniveaet tilbage til udgangspunktet.

Primærproduktion bestemmes vha. de beregnede værdier for geniltningen og respiration, samt ændringen i iltkoncentrationen ift. tiden, jf. formel (7.1), og fremgår af figur 7.4.



**Figur 7.4.** Primærproduktion i Guldbækken for alle målinger. Fra venstre måling 1,2,3.

Primærproduktionen er negativ om natten. Dette er i praksis ikke muligt, men skyldes, at den afhænger af geniltningskonstanten og respirationen som antages konstant, hvilket ikke afspejler virkeligheden.

Geniltningskonstanten, respirationen og primærproduktionen er bestemt for Guldbækken. Iltforbruget i vandfasen og bunden undersøges herefter for at kontrollere for iltsvind, som følge af overløb fra afløbssystemet i Svenstrup.

### 7.3 Iltforbrug i vandfasen

En del af det opløste organiske stof fra regnbetingede udledninger af overløbsvand omdannes i vandfasen. Derfor beregnes dette iltforbrug med henblik på at bestemme reduktionen i tilgængeligt ilt i vandløbet som følge af overløb, der indeholder biologiske stoffer, der omdannes med brug af ilt i vandløbet. Beregningerne fremgår af [Bilags-CD, Iltforbrug1, Iltforbrug2].

For at beregne iltsvindsforløbet benyttes en kombination af massebalance for ilt og en massebalance for organisk materiales iltforbrug, hvilket er betegnet Streeter-Phelps ligning, jf. formel (7.5) [Frier, 2006, side 89].

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C_m - C) - K_1 L_0 e^{-K_1 t} \quad (7.5)$$

Hvor

$K_1$	Nedbrydningskonstant [ $d^{-1}$ ]
$L_0$	Begyndelseskonzentration af organisk stof [mg/l]

Nedbrydningskonstanten beskriver hastigheden for nedbrydningen af det organiske stof. Begyndelseskonzentration er koncentrationen af organisk stof ved starten af beregningen og beregnes vha. formel (7.6) [Frier, 2006, side 89].

$$L_0 = \frac{Q_i L_i + Q_s L_s}{Q_i + Q_s} \quad (7.6)$$

Hvor

$Q_i$	Vandløbets vandføring [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$L_i$	Vandløbets koncentration af organisk stof [ $\text{mg/l}$ ]
$Q_s$	Overløbsvandføring [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$L_s$	Overløbsvands koncentration af organisk stof [ $\text{mg/l}$ ]

Til beregningerne benyttes et fuldstændigt iltforbrug svarende til, når alt stof er omdannet. Til bestemmelse af det fuldstændige iltforbrug, omregnes  $BOD_5$ -værdien vha. formel (7.7) [Frier, 2006, side 89].

$$L_s = BOD_{\infty} = \frac{BOD_t}{1 - e^{-K_1 t}} \quad (7.7)$$

Hvor

$BOD_{\infty}$	Fuldstændigt iltforbrug [ $\text{mg/L}$ ]
$BOD_t$	Iltforbrug over tiden $t$ [ $\text{mg/L}$ ]
$t$	Tidsperioden, hvor $BOD_t$ omsættes i [ $\text{mg/L}$ ]

Der benyttes en tid på fem døgn, da  $BOD_5$ -værdien beskriver iltforbruget over fem døgn.

Formel (7.5) omskrives, så den bliver enhedsløs, jf. formel (7.8) [Frier, 2006, side 87].

$$m = 1 - \frac{l_0}{f - 1} (e^{-\tau} - e^{-f\tau}) - (1 - m_0) e^{-f\tau} \quad (7.8)$$

Hvor

$m$	Mætningsgrad [-]
$f$	Selvrensningssforholdet [-]
$l_0$	Relativ belastning [-]
$\tau$	Relativ tid [-]
$m_0$	Start mætningsgrad [-]

Mætningsgraden, selvrensningssforholdet, den relative belastning og den relative tid beregnes hhv. ved formel (7.9), (7.10), (7.11) og (7.12) [Frier, 2006, side 90].

$$m = \frac{C}{C_m} \quad (7.9)$$

$$f = \frac{K_2}{K_1} \quad (7.10)$$

$$l_0 = \frac{L_0}{C_m} \quad (7.11)$$

$$\tau = K_1 t \quad (7.12)$$

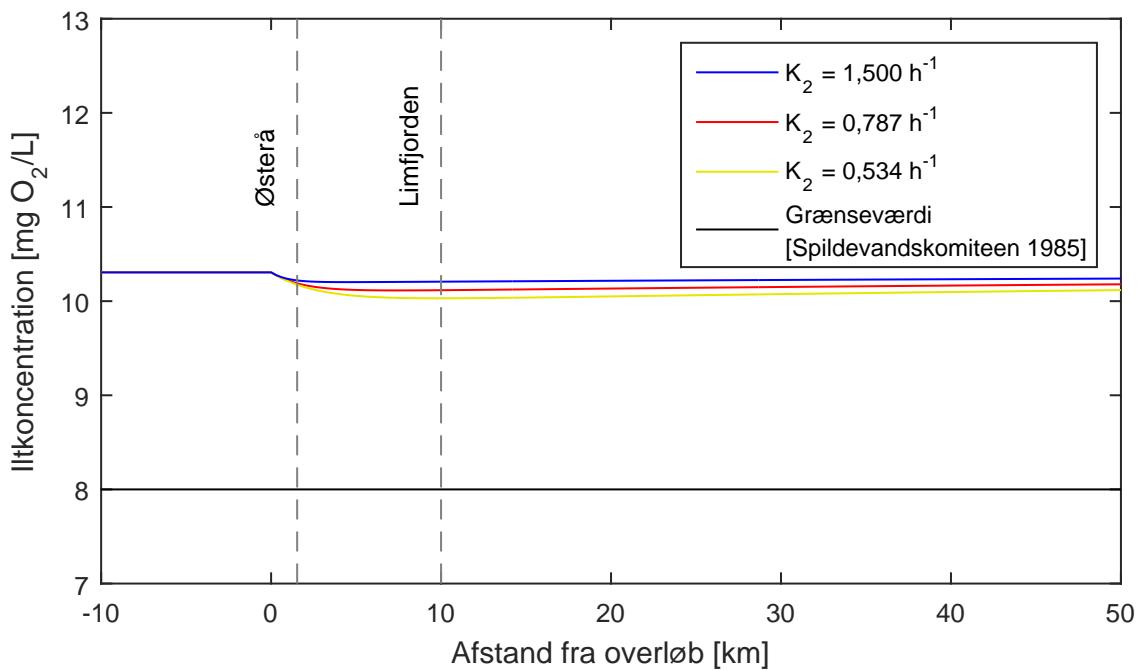
Mætningsgraden i vandløbet beregnes for tidspunktet for overløb og frem. Iltkoncentrationen beregnes derefter ved at multiplicere med iltmætningskoncentrationen jf. formel (7.9). Overløbsvandføringen med gentagelsesperiode på 0,1 år er bestemt ud fra tre-års-simuleringen igennem Mike Urban. Vandføringen til en given eksponeringstid er den maksimale vandføring, som bibeholdes eller overskrides igennem hele eksponeringstiden. Der er ikke simuleret overløbshændelser i de tre år, der varede 12 timer, hvorfor det antages, at grænseværdien for en eksponeringstid på 12 timer er overholdt.

Til beregningerne for iltforbruget i vandfasen benyttes følgende forudsætninger:

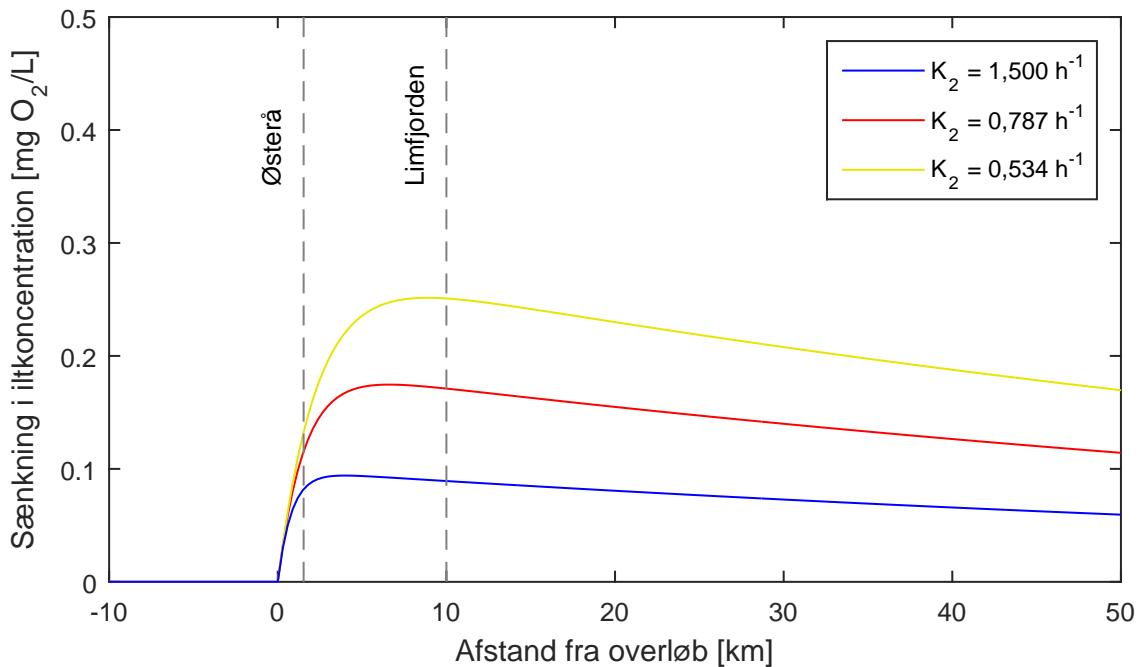
- Stationær og ensformig strømning i vandløbet.
- Der anvendes en nedbrydningskonstant på  $0,3 \text{ d}^{-1}$ . [Frier, 2006, side 9-6]
- Koncentrationen af det organiske stof antages at være 0 mg/l for vandet i vandløbet.
- Start mætningsgrad ved tilførsel af overløbsvand antages at være fuldt mættet, altså  $m_0 = 1$ .
- Der benyttes en  $BOD_{5\text{-}}\text{-værdi}$  på 115 mg/l, jf. afsnit 5.2.5.
- 50% af BOD er opløst stof.
- Den målte vandføring i tværsnit 1 på  $0,291 \text{ m}^3/\text{s}$  benyttes som vandløbets vandføringen.
- Vandføringen for overløbsvandet er den summerede vandføring for alle ni overløb.
- Alle overløb udleder samtidigt i samme punkt ved jernbanebroen, jf. figur 6.18.
- Konstant geniltningskonstant og vandføring igennem Guldbækken.
- Ingen respiration eller primærproduktion.
- Der regnes fuld iltmætning ved  $14^\circ\text{C}$ .

Nedbrydningskonstanten ligger normalt i intervallet 0,2 - 0,3. Idet der ikke er tilstrækkelig datagrundlag for at bestemme nedbrydningskonstanten i Guldbækken, antages en værdi på 0,3, hvilket er mest kritisk ift. de typiske værdier [Frier, 2006, side 9-6].

Forløbet for iltkoncentration igennem vandløbet for en regnhændelse i tre-års simuleringen med en gentagelsesperiode på 0,1 år fremgår af figur 7.5 med de tre forskellige geniltningskonstanter, som beregnes ud fra formel (7.9). Koncentrationen er angivet i henhold til afstanden fra overløb, idet der forudsættes en konstant hastighed i vandløbet svarende til en middel vandhastighed beregnet vha. propelmålingerne, jf. tabel 6.1. Iltforbruget i vandfasen ses på figur 7.6.



**Figur 7.5.** Iltkoncentrationen igennem Guldbækken efter overløb for 1 times eksponering.



**Figur 7.6.** Iltforbrug i vandfasen.

Det ses, at iltkoncentrationen ikke underskridt grænseværdien med anvendelse af nogen af de tre genitningskonstanter. Udmundingen til Østerå og derefter Limfjorden er markeret på figur 7.5. Det ses, at den laveste iltkoncentration opstår i Østerå. Idet vandføringen i Østerå er større end Guldbækken, vil iltforbruget have mindre indflydelse på iltniveauet i Østerå. Det er usikkert, hvad vandhastigheden i Østerå er, hvorved genitningskonstanten sandsynligvis ikke er lig Guldbækkens. Derfor er det usikkert, hvorvidt iltkoncentrationen i figur 7.5 for Østerås strækning er virkelighedsnær. Dette er også gældende for Limfjorden.

Ved udmundingen til Limfjorden er vandføringen tilstrækkelig stor, til de iltforbrugende stoffer fra overløbsvandet ikke har nogen betydning. Derimod kan stofbelastninger end BOD have indflydelse på Limfjordens kvalitet, men det undersøges dog ikke i dette projekt.

## 7.4 Iltforbrug ved bunden

I bunden af vandløbet omdannes ofte mere organisk stof end i vandfasen [Frier, 2006]. Dette iltforbrug bør derfor undersøges for at sikre, at sedimenteringen af BOD-partiklerne ikke medfører et tilstrækkelig højt iltforbrug til at skabe iltsvind.

Iltforbruget i bunden bestemmes med en “Dissolved Oxygen Stream Model” (DOSMO). Den fulde DOSMO kombinerer en hydrodynamisk model med en model for transport-dispersion. Den simplificerede udgave, DOSMOSIM, antager ensformig og stationær vandføring samt ens og konstant vandddybde i vandløbet.

Det vurderes jf. Schaarup-Jensen og Hvitved-Jacobsen [1990], at en simplificeret DOSMO for små vandløb med næsten ens og stationær vandføring resulterer i iltkoncentrationer tilsvarende den fulde DOSMO, når det umiddelbare iltforbrug i vandfasen negligeres. Det anbefales derfor jf. Schaarup-Jensen og Hvitved-Jacobsen [1990], at den fulde DOSMO bør anvendes til analyse af enkelte regnhændelser, og den simplificerede model bør anvendes for ekstrem-statistik. Beregningstiden stiger desuden med ca. en faktor 1000 for en fuld DOSMO [Schaarup-Jensen og Hvitved-Jacobsen, 1990]. Derfor vurderes det, at en simplificeret DOSMO er tilstrækkelig i dette projekt.

Iltforbruget ved bunden beregnes isoleret med brug af DOSMOSIM. Derfor udelades iltforbrug i vandfasen fra DOSMOSIM. Beregningerne fremgår af [Bilags-CD, Iltforbrug1, Iltforbrug2]. Der anvendes den udvidede Streeter-Phelps ligning, jf. formel 7.13, hvor nedbrydning af sedimenteret stof er introduceret, jf. formel (7.13) [Schaarup-Jensen og Hvitved-Jacobsen, 1990, side 5].

$$\frac{dC}{dt} = K_2 \cdot (C_s - C) + P - R - K_1 \cdot L_1 - K_4 \cdot \frac{L_b}{h} \quad (7.13)$$

Hvor

$K_4$	1' ordens nedbrydningskonstant ved bunden [ $\text{d}^{-1}$ ]
$L_b$	Mængde sedimenteret organisk stof på bunden [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]
$h$	Vandddybde [m]

Idet umiddelbar og forsinket iltsvind ikke forekommer samtidig, negligeres nedbrydning i vandfasen, dvs. iltforbrug ved bunden bestemmes isoleret. Løsningen til den udvidede Streeter-Phelps er formel (7.14), når der ses bort fra nedbrydning af stof i vandfasen [Schaarup-Jensen og Hvitved-Jacobsen, 1990, side 5]:

$$C(x, t) = \begin{cases} C_m + \Delta C \cdot \frac{\beta}{2 \cdot \beta'} & \text{for } t \leq \frac{x-x_0}{V} + t_\alpha \\ C_m + \Delta C \cdot \frac{\beta}{2 \cdot \beta'} - \\ L'_0(t) \cdot \left( \frac{K_2}{K'} - 1 \right)^{-1} \cdot (\exp(-K' \cdot \frac{x-x_0}{V}) - \exp(-K_2 \cdot \frac{x-x_0}{V})) & \text{for } t > \frac{x-x_0}{V} + t_\alpha \end{cases} \quad (7.14)$$

Hvor

$\beta$	Faktor, der tager højde for den relative ilt-fluktuation igennem et døgn [-]
$L'_0$	Koncentration af partikulært organisk stof ved overløbets stationering efter udledning [-]
$K'$	1' ordens fjernelseskonstant for partikulære organiske stoffer i vandfasen [ $d^{-1}$ ]
$x$	Stationering [m]
$x_0$	Overløbets stationering [m]
$t_\alpha$	Overløbets varighed [min]
$V$	Middel vandhastighed [ $m^3/s$ ]
$t$	Tiden efter overløbshændelse [s]

$L'_0$  bestemmes for hvert tidsskridt med formel (7.15) [Schaarup-Jensen og Hvitved-Jacobsen, 1990, side 6]:

$$L'_0(t) = K_4 \cdot \frac{P}{Q_0 + Q_b} \cdot \exp(-K_4 \cdot t) \quad (7.15)$$

Hvor

$P$	Total partikulært organisk stofindhold i overløbshændelse [g]
$Q_0$	Overløbsvandføring [ $m^3/s$ ]
$Q_b$	Vandføring i vandløb [ $m^3/s$ ]

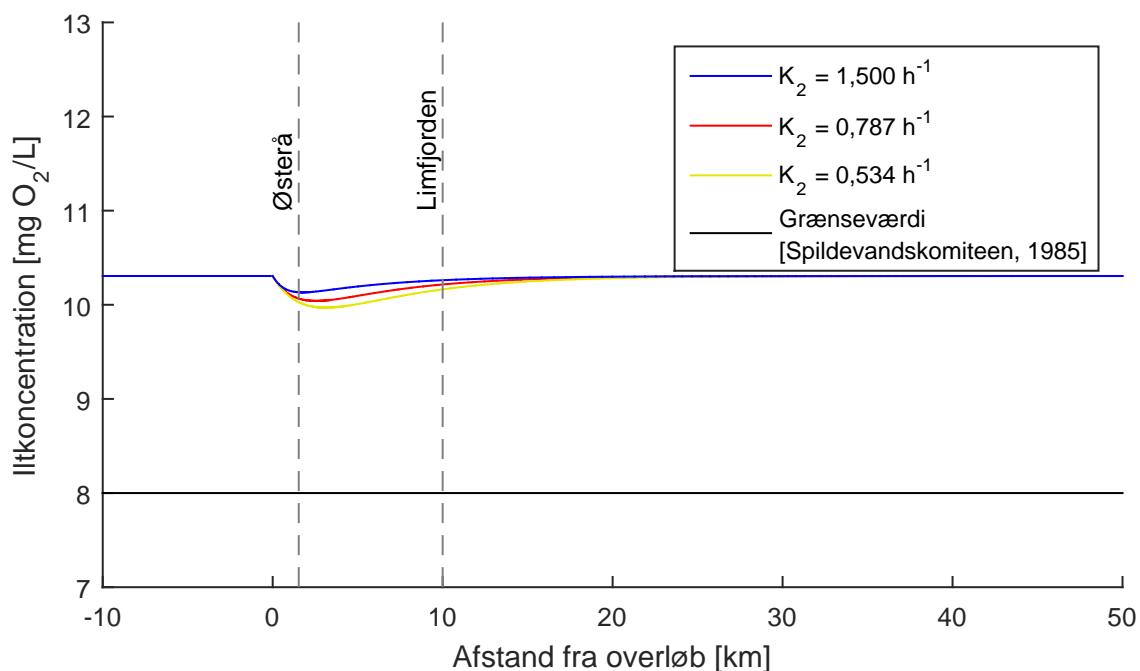
Der ses bort fra den naturlige variation i iltkoncentrationen i vandløbet som følge af respiration og primærproduktion, hvorfor  $\Delta C \cdot \frac{\beta}{2 \cdot \beta'} = 0$ . Det negligerede led danner en faktor, som beskriver, hvad iltkoncentrationen i det upåvirkede vandløb er. Det danner derfor en kurve med en periodelængde på 24 timer. For at bruge dette led i simuleringen, bør der være kendskab til dagslængden, tiden på døgnet og variationen i iltkoncentration over døgnet. Idet der derfor bør være kendskab til starten af overløbshændelsen, eller evt. vælge det mest kritiske tidspunkt på døgnet som starten på overløbshændelsen, vælges det at se bort fra den naturlige variation. Dette betyder, at alle overløbshændelser simuleres således, at de starter ved fuld iltmætning. Dette kan både over- og underestimere resultaterne.

Forudsætningerne fra afsnit 7.3 benyttes sammen med følgende forudsætninger:

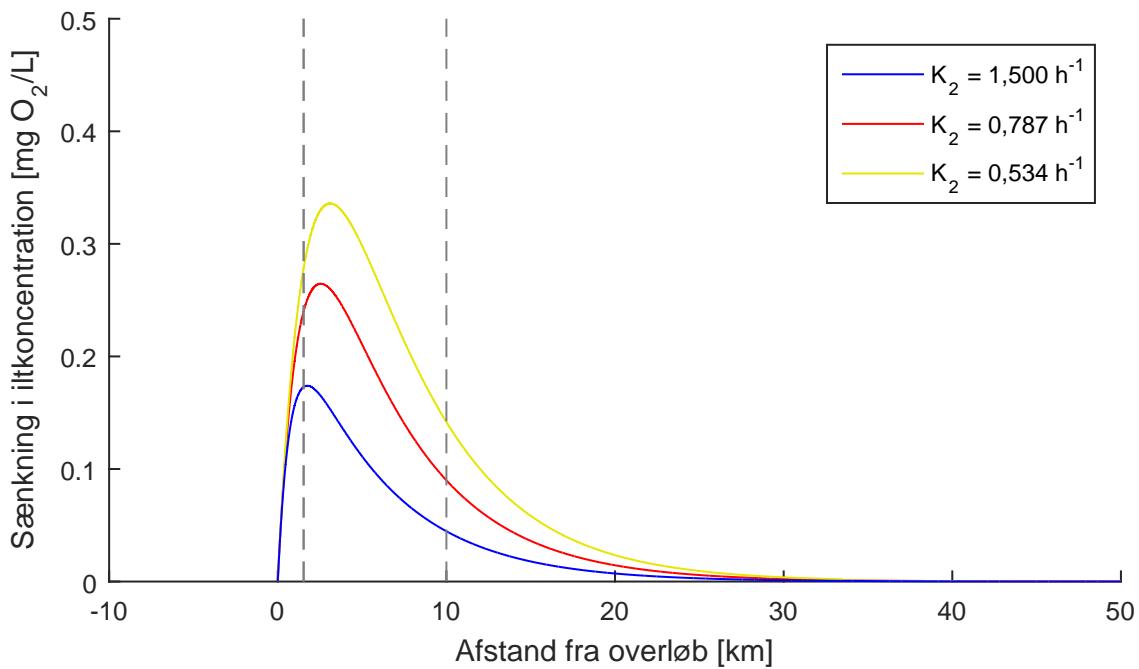
- Konstant og ens vanddybde for hele vandløbet på 0,5 m i hele vandløbet svarende til gennemsnitlig målt vanddybde.
- 50% af BOD er partikulært stof.
- Der regnes kun på en eksponeringstid på 1 time grundet regnekraft.

- Fjernelseskonstant er  $k = 1,5 \text{ m/d}$ , er typisk  $1 \text{ m/d} - 2 \text{ m/d}$  ved  $20^\circ\text{C}$ . [Hvitved-Jacobsen et al., 2010]
- Nedbrydningskonstant ved bunden er  $K_4 = 2,5 \text{ d}^{-1}$ , typisk  $1 \text{ d}^{-1} - 2,5 \text{ d}^{-1}$ . [Hvitved-Jacobsen et al., 2010]
- Middel vandhastighed er  $0,276 \text{ m/s}$ , svarende til gennemsnit af vandhastighed bestemt på baggrund af flowmålinger.

Med dette kan iltkoncentrationen igennem Guldbækken beregnes. Der regnes for en regnhændelse i tre-års simuleringen, jf. afsnit 5.2, med en gentagelsesperiode på 0,1 år for den samlede overløbsvandføring. Iltkoncentrationen efter overløbshændelse beregnes med formel (7.14) og ses på figur 7.7, og sænkningen ses på figur 7.8.

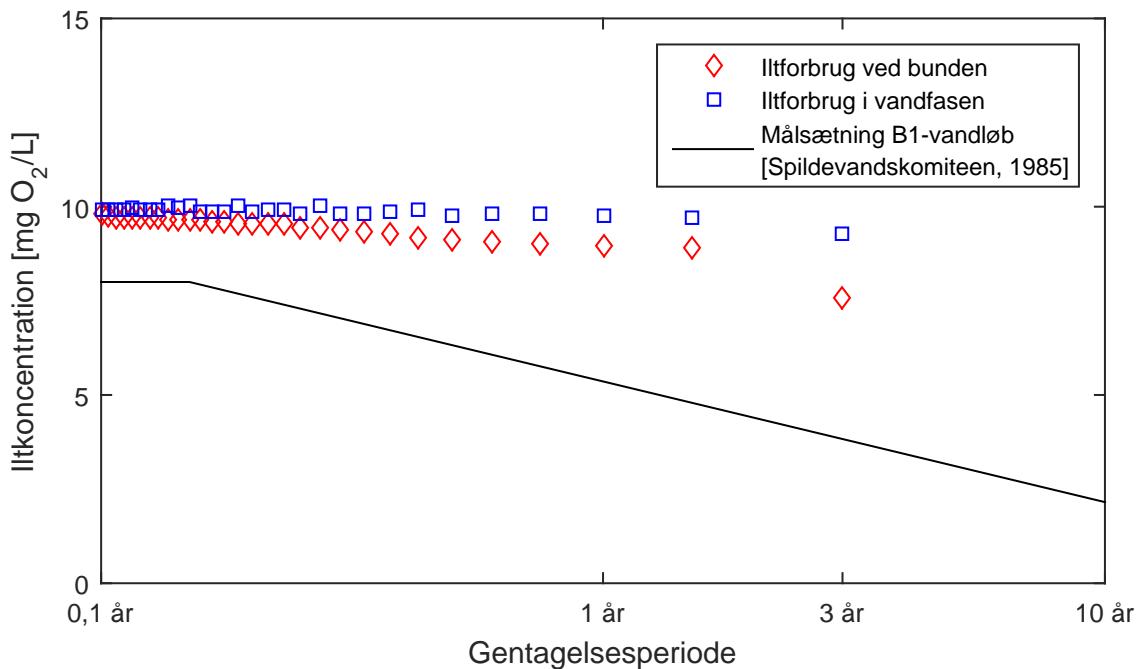


**Figur 7.7.** Iltkoncentrationen, når der tages forbehold for iltforbrug i bunden og 1 times eksponering.



**Figur 7.8.** Iltforbrug ved bunden.

Der udregnes den laveste iltkoncentrationen, når der tages forbehold for iltforbrug hhv. i vandfasen og bunden til alle regnhændelser i tre-års simuleringen. Her undersøges kun for den laveste geniltningskonstant på  $0,534 \text{ h}^{-1}$ , idet den er den mest kritiske mht. iltkoncentration. Dette ses på figur 7.9.



**Figur 7.9.** Minimums iltkoncentration ved alle regnhændelserne med en eksponeringstid på 1 time.

Det ses, at iltforbruget ved bunden medfører en lavere iltkoncentration end iltforbruget i vandfasen, og at målsætningen ikke overskrides for nogen af gentagelsesperioderne.

Andelen af opløst BOD i forhold til sedimentererende BOD er baseret på en antagelse om en ligelig fordeling. Det har ikke været muligt at finde data for fordelingen. Der er dog undersøgt for en fuld fordeling, dvs. hhv. 100 % opløst og 100 % partikulært, hvor der stadig ikke forekommer iltsvind.

## 7.5 Usikkerheder ved analyse af iltforhold

Usikkerhederne ved beregning af iltforholdene under regnbetingede udledninger gennemgås.

Forskellen mellem den laveste beregnede geniltningskonstant og den højeste er ca. en faktor 3. Idet geniltningskontanten har væsentlig påvirkning på iltkoncentrationen i vandløbet, jf. figur 7.5 og 7.7, er der usikkerhed på resultaterne.

Nedbrydnings- og fjernelseskonstanterne, som danner grundlag for iltforbruget som følge af overløbshændelser, er baseret på tabelopslag. Der er derfor ikke udført feltforsøg for at bestemme parametrene.

Den simplificerede DOSMO forudsætter en stationær og ensformig strømning igennem vandløbet. Som vist i den hydrauliske analyse, jf. kapitel 6, varierer tværsnit, vanddybde og vandføring. Dette medfører en usikkerhed. Guldbækken udmunder i Østerå, hvor der både sker en ændring i tværprofil samt vandføring. Idet der ikke tages forbehold for denne ændring, er modellen uegnet til at beskrive iltforholdene i Østerå. Da geniltningskonstanten heller ikke er bestemt for Østerå, medfører dette usikkerhed på iltkoncentrationen i Østerå. Iltforholdene er heller ikke bestemt i Limfjorden, men udledningen hertil vurderes ubetydelig grundet den store skala.

Idet der ved analysen af iltforbrug i vandfasen samt iltforbrug ved bunden ses bort fra respiration og primærproduktion, underestimeres iltkoncentrationen i dagstimerne og overestimeres i nattimerne. Det er derfor muligt, at iltkoncentrationen underskridt grænseværdien om natten. Dog er den største forskel mellem iltmætningskoncentrationen og iltkoncentrationen om natten ud fra iltmålingerne ca. 1,5 g/m<sup>3</sup>, hvilket, såfremt det summeres på iltkoncentrationen på figur 7.9, ikke er tilstrækkeligt til at skabe iltsvind.

## 7.6 Opsummering

Ud fra resultaterne konkluderes det, at der ikke opstår iltsvind som følge af overløb i Guldbækken. Det er dog usikkert, hvorvidt Østerå udsættes for iltsvind, idet vandløbets karakteristik ikke er undersøgt, selvom den kritiske iltkoncentration opstår i Østerå. Der bør derfor foretages yderligere målinger for Østerå, før det kan vurderes, hvorvidt udledningerne medfører iltsvind. Det ses endvidere, at døgnminimumskoncentrationen ikke kommer under 6 mg/l, som er kravet for et B1-vandløb iht. regionplanen.

I kapitel 3 fremgår det, at der er flere strækninger af Guldbækken, hvor der ikke opnås god økologisk tilstand. Idet det er vurderet, at der ikke er problemer med iltsvind i Guldbækken, er der andre forhold, som forårsager den lave vandløbskvalitet. Idet strækningen

ved Svenstrup har et stort fald og er et lige stykke, kan det være årsagen til den lave kvalitet, da levevilkårene for organismerne i vandløbet kan være nedsatte grundet den høje strømningshastighed.

Samtidig er der simuleret en utilstrækkelig selvrensningsevne i en stor del af afløbssystemet, jf. analysen af Svenstrups afløbssystem i kapitel 4. Derfor kan der forventes resuspension af stoffer, der har sedimenteret, som følge af tørperioden, hvilket vil forøge stofbelastningen i Guldbækken.

# Problemformulering 8

---

På baggrund af de foregående analyser af Svenstrups afløbssystem og Guldbækken er der fastlagt en række problemer, som skal løses.

Tørvejrsanalysen af Svenstrups afløbssystem viser, at 53 % af fællessystemet ikke opnår selvrensning. Dette vurderes at medføre, at en større mængder organisk stof udledes til Guldbækken grundet resuspension under regn herunder first flush.

I analysen af Svenstrups afløbssystem under regn er der observeret opstuvningsproblemer. Problemerne er primært i den fælleskloakerede del af oplandet, hvor 52 % af brøndene opstuper til terræn oftere end hver 10. år. Foruden opstuvningsproblemer er der problemer med udnyttelsen af overløbsbygværkerne. Et enkelt overløbsbygværks maksimale vandføring overskridt dens udledningstilladelse. Ydermere overskridt otte ud af de ni overløbsbygværker kravet omkring hyppighed for udledninger. Derudover er der modelleret problemer ift. oversvømmelse ved kasseregn med en gentagelsesperiode på 100 år, hvor specielt vand nær boliger, industri og på Hobrovej kan skabe problemer.

I den hydrauliske analyse af Guldbækken er der konstateret erosion i Guldbækken på de første 800 m af den undersøgte strækning, som består hovedsageligt af sand. Endvidere er der kapacitetsproblemer ved regnbetingede udledninger fra overløb med en gentagelsesperiode på 1 år.

Derudover vurderes det i analysen af iltforholdene i vandløbet, at der ikke er problemer i Guldbækken mht. iltsvind, men der kan være problemer i det videre system, her især Østerå, hvor det laveste iltniveau vurderes at optræde ved udledninger fra overløb. Der er dog stadig problemer ift. den økologiske tilstand, som skal løses.

Ovenstående problemer skal løses, hvorfor der opstilles en problemformulering.

***Hvordan forbedres Svenstrups afløbssystem, så funktionskravene for opstuvning samt gentagelsesperiode og maksimal udledning for overløbsbygværkerne overholderes, så kapacitets- og erosionsproblemer i Guldbækken mindskes?***

## Del III

# Løsningsforslag

*I denne del af rapporten redegøres der for en række kortsigtede løsninger til afhjælpning af problemerne i Svenstrups afløbssystem. Som langsigtet løsning dimensioneres et separat afløbssystem til afhjælpning af problemerne. I Guldbækken foreslås løsninger til forbedring af de i projektet konstaterede problemer.*

# Kortsigtede løsninger 9

---

I analysen af Guldbækken og afløbssystemet i Svenstrup er der konstateret problemer med opstuvning til terræn og udledning til Guldbækken. Derudover er der i tørvejrsanalyse konstateret problemer med selvrensning flere steder i Svenstrup, jf. kapitel 4. For at afhjælpe disse problemer beskrives der i dette kapitel en række kortsigtede løsninger for afløbssystemet i tør- og regnvejr. For afløbssystemet i tørvejr beskrives renspuling af ledninger, og for afløbssystemet under regnvejr gennemgås muligheder med Lokal Afledning af Regnvand (LAR), forsinkelsesbassiner og vedligeholdelse samt forbedring af overløbsbygværker. Desuden beskrives hvordan oversvømmelse på kritiske områder kan afvikles.

De kortsigtede løsninger skal kunne implementeres uden at konflikte med Aalborg Forsyning, Kloak A/S' Vision 2100 om at separatkloakere hele afløbssystemet. Der foreslås derfor ikke at etablere omkostningstunge kortsigtede løsninger, som ikke kan benyttes, når afløbssystemet separatkloakeres.

## 9.1 Renspuling

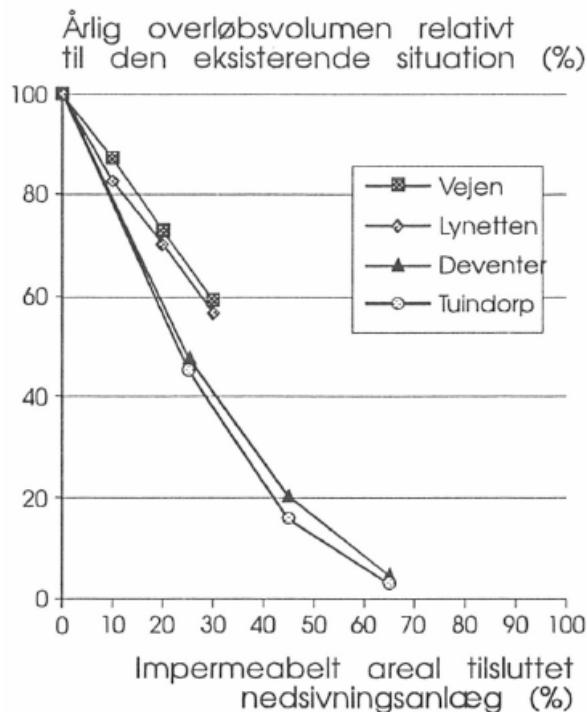
For at undgå udledning af store mængder sediment til Guldbækken, især ved fænomenet first flush, jf. afsnit 4.8, kan ledninger, hvor der er problemer med selvrensningen, renspules [Winther et al., 2011]. Herved fjernes det aflejrede sediment og kan derfor ikke udledes til Guldbækken ved en regnhændelse. Endvidere er der en rist i overløbsbygværkerne, jf. figur 5.5. Denne rist skal sørge for de største sedimenter, såsom toiletartikler ikke udledes til Guldbækken. Denne rist kan stoppes til, hvorved funktionen af overløbsbygværket ned sættes. Overløbsbygværket kan således også renspules for at forbedre overløbsbygværkets kapacitet. Da der løbende ophobes sediment, bør rensningen af rør og overløbsbygværker ske regelmæssigt.

## 9.2 LAR

For at mindske hyppigheden, maksimale vandføring og total udledningsvolumen af udledningerne til Guldbækken kan der benyttes LAR. Ved brug af LAR vil overvandet i mindre grad påvirke afløbssystemet og i sidste ende Guldbækken. Regnvandet kan afledes lokalt fra impermeable overflader ved brug af nedsivning, fordampning og forsinkelse.

Regnvand fra impermeable overflader kan nedsives gennem en faskine, hvis grundvands spejlet ligger under faskinens bund. Afstrømning fra impermeable overflader kan være forurenset med olieprodukter og tungmetaller, men det vurderes, at dette ikke forurener grundvandet i større omfang. Endvidere kan der opnås en reduktion i overløbsvolumen til 45 % -70 % af udgangspunktet ved nedsivning af 25 % af regnvandet fra de befæstede arealer, jf. figur 9.1. Undersøgelsen er lavet for fire byer og afspejler derfor muligvis ikke

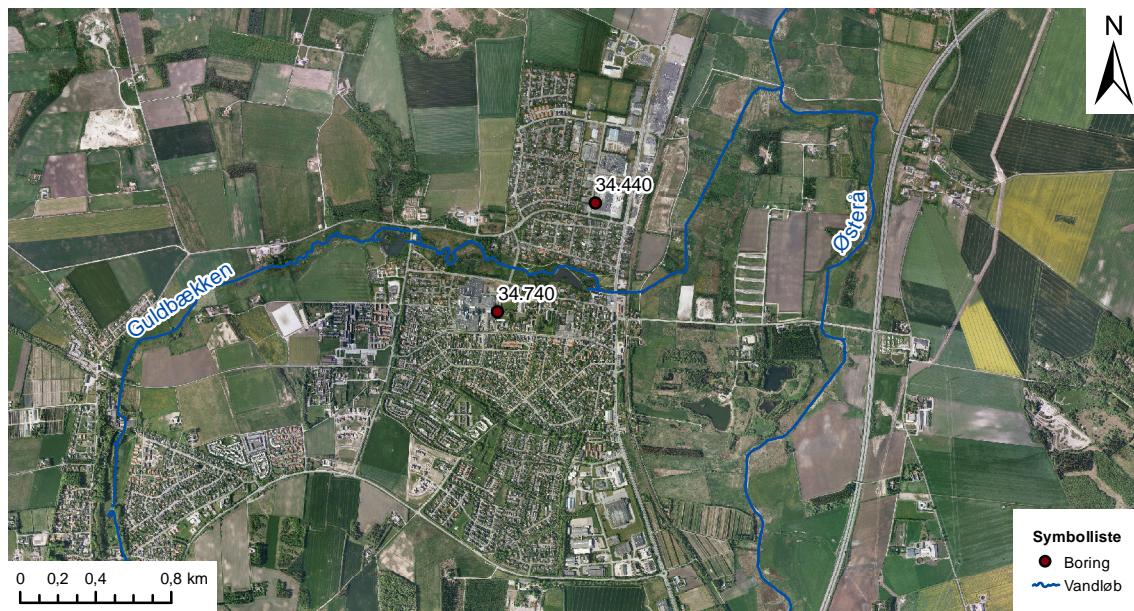
nedsivningspotentialet i Svenstrup. Nedsivningssystemerne kan også benyttes, når der seperatkloakeres, da det også der vil mindske belastningen af recipienten. [Winther et al., 2011, side 168-173]



**Figur 9.1.** Overløbsvolumen ved brug af nedsivning i forskellige byer. [IDA Spildevandskomitéen, 1994]

For at vurdere anvendeligheden af nedsivningsanlæg i Svenstrup vurderes potentialet for nedsivning. Nedsivningspotentialet vurderes på baggrund af grundvandsspejlets højde samt permeabiliteten af den underliggende jordtype. Jordtyperne i Svenstrup den første meter under terræn er vurderet på baggrund af kort på [Geus, 2011]. Det viser at den primære sammensætning af de øvre jordlag består af grus og sand, som vurderes at give mulighed for nedsivning af regnvand.

Grundvandsstanden i Svenstrup undersøges også til vurdering af nedsivningspotentiale. Undersøgelsen foretages på baggrund af to borer med målt grundvandsspejl foretaget i Svenstrup, jf. figur 9.2. Borerne, som benyttes, har nr. 34.440 (17/9 1965) og 34.740 (1/5 1968) og et grundvandsspejl i hhv. 8,5 m og 7 m under terræn. [Geus, n.d.]



**Figur 9.2.** Boringerne, som benyttes til at undersøge vandstanden. [Geus, n.d.]

Med disse dybder af grundvandsspejlet og jordtyperne vurderes det, at der er et potentielt for nedsivning af regnvand i Svenstrup, på trods af de få tilgængelige borer med målt grundvandsspejl. Det vurderes dog også, at nedsivningsanlæggene skal placeres med en tilstrækkelig afstand til Guldbækken, da grundvandsspejlet nær vandløbet forventes at have en mindre afstand til terræn.

I kombination med nedsivningen eller som alternativ kan der benyttes forsinkelsesbassiner. Et forsinkelsesbassin kan være med til at mindske antallet af overløb og den maksimale udledning, da bassinvolumenet skal fyldes op, før der kommer overløb. I den fælleskloakerede del skal bassinerne etableres som lukkede bassiner, så det ikke er muligt at komme i kontakt med overløbsvandet. Når afløbssystemet separatkloakeres, kan bassinerne modificeres, så de kan benyttes til regnvand, og mindske recipientbelastningen af Guldbækken. I den separatkloakerede del af Svenstrup kan bassinerne etableres som åbne.

### 9.3 Undersøgelse og forbedring af overløb

I otte af de ni overløb fra det fælleskloakerede opland sker der overløb oftere end tilladt. For at imødekomme dette problem kan overløbsbygværkerne undersøges for fejl. Det kan således være bygværkerne er i stykker, og der derved forekommer overløb oftere, end overløbene er dimensioneret til. Endvidere kan overløbskanterne hæves, hvilket kan afhjælpe problemerne med hyppigheden af overløbshændelserne, men samtidig kan dette give tilbagestuvningsproblemer i systemet, hvorfor det ikke anses for en løsning.

## 9.4 Afvikling af oversvømmelse

Når der er oversvømmelse, kan vandet ligge sig på kritiske områder, som kan skades. For at dette undgås, kan der benyttes pumper som placeres strategisk ift. hvor der, på baggrund af oversvømmelsesanalysen, vurderes at opstå problemer. Der kan endvidere foretages ændringer i terræn ved at sænke ikke-kritiske områder, så vandet samles der. Der er dog ikke foretaget tilstrækkelige undersøgelse til at vurdere hvorvidt disse løsninger er nødvendige.

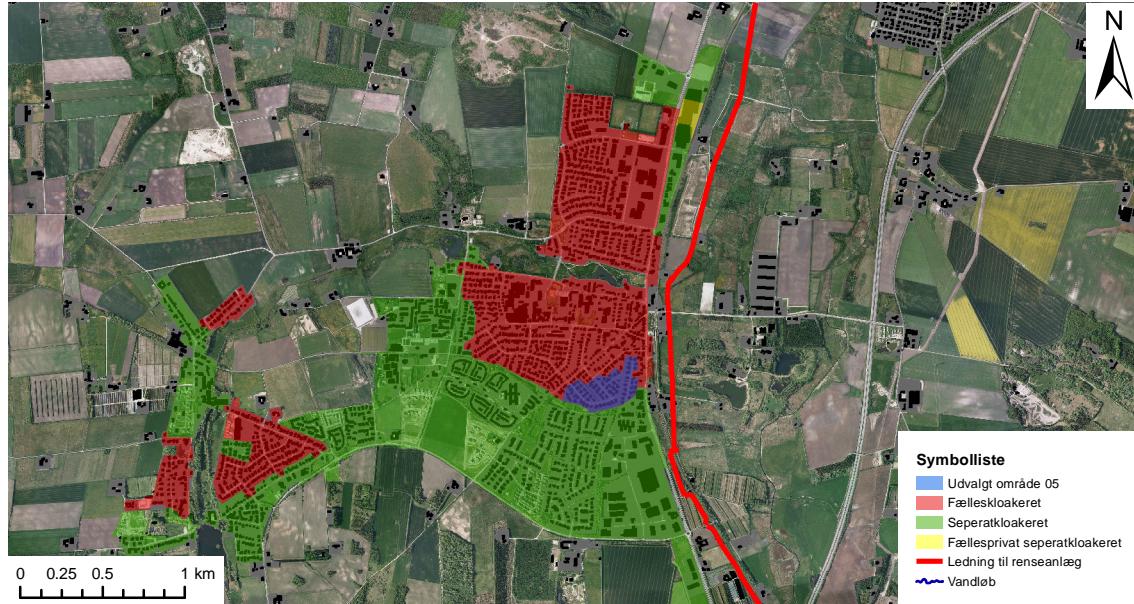
# Langsigtede løsninger

# 10

I dette kapitel fokuseres på den langsigtede løsning, hvis formål er at løse problemerne med afløbssystemet og Guldbækken i Svenstrup, jf. kapitel 8.

Den langsigtede løsning skal være i overensstemmelse med Aalborg Forsyningss Vision 2100 og fremtidssikker ift. klimaforandringer. Der vælges at separatkloakere et fælleskloakeret opland. Ved separatkloakering er der mindre vand, som sendes til rensningsanlægget, og der udledes udelukkende regnvand til Guldbækken. Derved udledes der ikke organisk materiale samt toiletartikler fra spildevandet, hvorved dette også vurderes at forbedre vandløbets kvalitet. Der udledes mindre vand til Guldbækken, ved separatkloakering af afløbssystemet, hvorved denne løsning også vurderes at løse problemerne med kapacitet som følge af regnbetingede udledninger. Der vælges at separatkloakere et opland, men det anbefales at separatkloakere hele Svenstrup.

Der vælges at separatkloakere opland 05 på 8,49 ha, jf. figur 10.1. I separatkloakeringen dimensioneres separate spilde- og regnvandsledninger samt et regnvandsbassin. Opland 05 ligger op til de separatkloakerede oplande og er et opland med problemer ift. opstuvning, samt det opland, hvor der udledes hyppigst og med størst vandføring fra overløbet ift. oplandets størrelse, jf. kapitel 5, hvorfor dette opland vælges.



**Figur 10.1.** Område 05 udvalgt til separatkloakering.

## 10.1 Separat regnvand

Der dimensioneres regnvandsledninger som en del af separatkloakeringen. Regnvandsledningerne anlægges i samme tracé som det eksisterende ledningsnet.

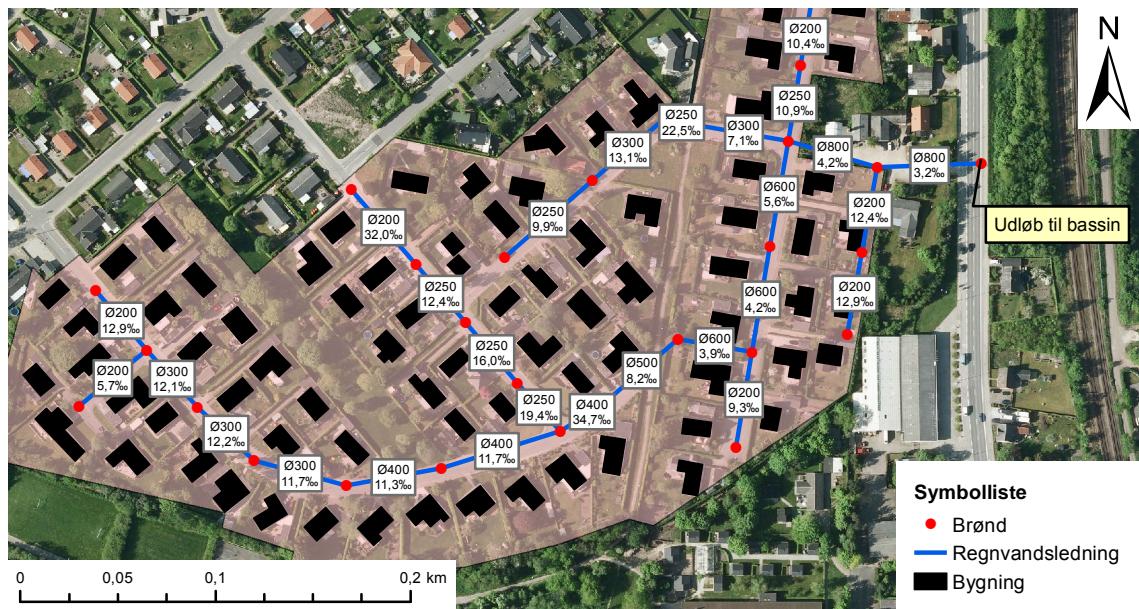
I Mike Urban simuleres rørafstrømningen som følge af en CDS-regn med en gentagelsesperiode på 1 år. Den maksimale rørafstrømning beregnes, idet der indsættes en rørdimension på 1000 mm. Herefter itereres med rørdiameter, hvor delfyldningsgraden beregnes vha. Brettings formel, jf. formel (4.5). Dette er gjort, til rørdiameteren passer med, at der sker opstuvning til rørstop 1 gang årligt, som er funktionspraksis [IDA Spildevandskomiteen, 2005, side 6]. Beregningerne til dimensioneringen findes på [Bilags-CD, SeparatVaad].

Følgende forudsætninger for dimensioneringen benyttes:

- Der benyttes CDS-regn for en gentagelsesperiode på 1 år med årsmiddelnedbør på 690 mm.
- Der benyttes en klimafaktor på 1,2 på CDS regnen med en tidshorisont på 100 år. [IDA Spildevandskomiteen, 2008, side 32]
- Der benyttes en sikkerhedsfaktor for statistisk usikkerhed på 1,2. [Winther et al., 2011, side 277]
- Der benyttes sikkerhedsfaktor for ændret arealanvendelse på 1,0. [Winther et al., 2011, side 277]
- Der benyttes kun rørdimensioner, der er i standardhandel.
- Der benyttes en ækvivalent sandruhed for PP-rør på 1 mm.
- Der antages stationær og ensformig strømning, hvorved energilinjegradianten er lig med hældningen.
- Der benyttes terrænniveau som kritisk kote ved opstuvningsberegninger.
- Regnvandsledningerne anlægges 0,4 m over tracéet for fællesledninger, men med samme hældning. Ledningerne er stadig i frostfri dybde, altså mere end 0,75 m under terræn [Winther et al., 2011, side 42].

Klimafaktoren, der benyttes, er valgt for en regn med 2 års gentagelsesperiode, idet anbefalinger for en gentagelsesperiode kortere end 2 år ikke er tilgængelig. Klimafaktoren er valgt med en tidshorisont på 100 år, svarende til den forventede levetid af rørene. Sikkerhedsfaktoren for statistisk usikkerhed er valgt på baggrund af usikkerhed i parametre. Det vurderes, at opland 05 ikke ændres væsentligt i fremtiden hvad angår befæstelse, da det er et indsluttet villaområde. Derved vælges sikkerhedsfaktoren for ændret arealanvendelse til 1,0. Den samlede sikkerhedsfaktor for dimensionering af separatkloakeringen er 1,44.

Resultatet af dimensioneringen fremgår af figur 10.2.



**Figur 10.2.** Dimensioner af regnvandsledninger i opland 05. [Wavin, 2015a]

### 10.1.1 Dimensionering af regnvandsbassin

Inden regnvandet fra opland 05 kan udledes til en recipient, vælges der at lede det gennem et forsinkelsesbassin. Bassinets formål er at forsinke regnvandet tilstrækkeligt, så recipienten ved ekstremregn ikke oplever kraftig erosion eller kapacitetsproblemer.

#### Dimensionering vha. overslagsberegning

Bassinet dimensioneres for en gentagelsesperiode på 5 år, for fuld udnyttelse af bassinvolumenet [Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2011]. Der benyttes overslagsberegninger, idet koncentrationstiden for regnhændelsen udelades og regnen antages at falde direkte i bassinet. En kasseregn svarende til gentagelsesperioden benyttes i dimensioneringen. Det maksimale volumen af bassinet bestemmes vha formel (10.1) [Bentzen, 2006, side 9].

$$V_{maks} = (\gamma \cdot c \cdot t_r^{-\alpha} \cdot F_r - Q_{ud}) \cdot t_r \quad (10.1)$$

Hvor

$V_{maks}$	Maksimalt bassinvolumen [l]
$\gamma$	Samlet sikkerhedsfaktor [-]
$c$	Regnkonstant [-]
$t_r$	Regnhændelsens varighed [s]
$\alpha$	Regnkonstant [-]
$F_r$	Reduceret oplandsareal [ha]
$Q_{ud}$	Afstrømning fra bassinet [l/s]

Varigheden af netop den regnhændelse, der giver det største bassinvolumen ved gentagel-

sesperiode på 5 år, beregnes med formel (10.2). [Bentzen, 2006, side 10]

$$t_{r,maks} = \left( \frac{-\gamma \cdot c \cdot (\alpha - 1) \cdot F_r}{Q_{ud}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (10.2)$$

Beregningerne til bassindimensionering findes på [Bilags-CD, HandberegnBassin].

Der benyttes følgende forudsætninger til overslagsberegningen:

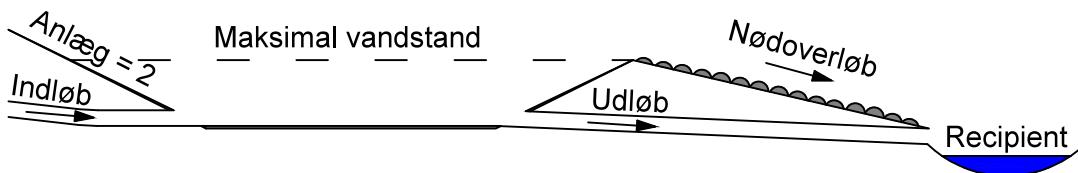
- Bassinet dimensioneres som et åbent tørbassin. [Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2011]
- Brutto-oplandsarealet af 05 er 8,49 ha, hvoraf det reducerede oplandsareal er 2,42 ha, beregnet med data fra Mike Urban.
- Uldeling fra bassinet dimensioneres til 1,01/s/ha. Dette opgøres på baggrund af bruttoareal, således at bassinet for opland 05 må have en afledning på 8,49 l/s. [Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2011]
- Der vælges at udlede til Svenstrupgrøften, som antages at have tilstrækkelig kapacitet.
- Der benyttes samme klima- og sikkerhedsfaktorer som i dimensioneringen af det separate regnvandssystem på samlet 1,44.
- Regnkonstanter for kasseregn med gentagelsesperiode 5 år er hhv.  $\alpha = 0,76$  og  $c = 28\,070$ . [Winther et al., 2011, side 101]

Resultatet af beregningen er en regnhændelse med varighed på 9,38 timer, som giver et bassinvolumen på 908,0 m<sup>3</sup>.

Bassinet udformes med maksimal stuvning fra bunden på 1,5 m, et længde/bredde forhold på 3 og bassinkantsanlæg på 2. Der konstrueres et nødoverløb, som kan komme i brug ved ekstremhændelser. [Winther et al., 2011, side 309]

Det vurderes, at opholdstiden vha. længde/bredde forholdet er tilstrækkelig til tungmetaller og andre forurenninger har mulighed for at bundfælde, inden regnvandet udledes til recipienten. Dette betyder desuden, at bassinbunden skal renses, når stuvningsvolumen er reduceret med 10% - 15%. [Hvitved-Jacobsen et al., 2010, side 278]

På figur 10.3 ses en skitse af bassinet, hvoraf det fremgår, hvor indløb, udløb og nødoverløb er placeret.



**Figur 10.3.** Principskitse af tør bassinudformning.

### Dimensionering vha. Mike Urban

I Mike Urban undersøges, om det ved overslagsberegninger dimensionerede bassinvolumen er tilstrækkeligt. Det netop dimensionerede bassin inddates i Mike Urban, hvorefter der

laves LTS-simulering. Der simuleres for følgende:

- Start: Når tilstrømning i systemet overskrider  $0,015 \text{ m}^3/\text{s}$  i mere end 90 min, hvilket svarer til en regndybde på 3,3 mm.
- Stop: Når tilstrømningen i systemet er under  $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$  i mere end 30 min, hvilket svarer til en regndybde på 0,7 mm.

Disse kriterier betyder, at der simuleres 168 regnhændelser på 28 år. Det kan derfor undersøges, om bassinets dimensioneringskriterie, med overløb fra bassinet med en gentagelsesperiode på 5 år, overholdes.

Resultatet af LTS-simuleringen viser, at bassinet ved en gentagelsesperiode på 5 år kun maksimalt har stuvning i bassinet på 0,82 m. Dette er ca. halvdelen af den maksimale vanddybde, på 1,5 m, som bassinet er dimensioneret til. Derfor vurderes det, at overslagsberegningerne overdimensionerer bassinet, i modsætning til Mike Urban, hvor tid-areal metoden benyttes.

Der vælges det bassinvolumen, som oversvømmes med en gentagelsesperiode på 5 år i Mike Urban. Bassinvolumen bliver da  $496,0 \text{ m}^3$ . Hvis bassinet konstrueres som det fremgår af figur 10.3, vil bassinet have dimensionerne som fremgår af tabel 10.1.

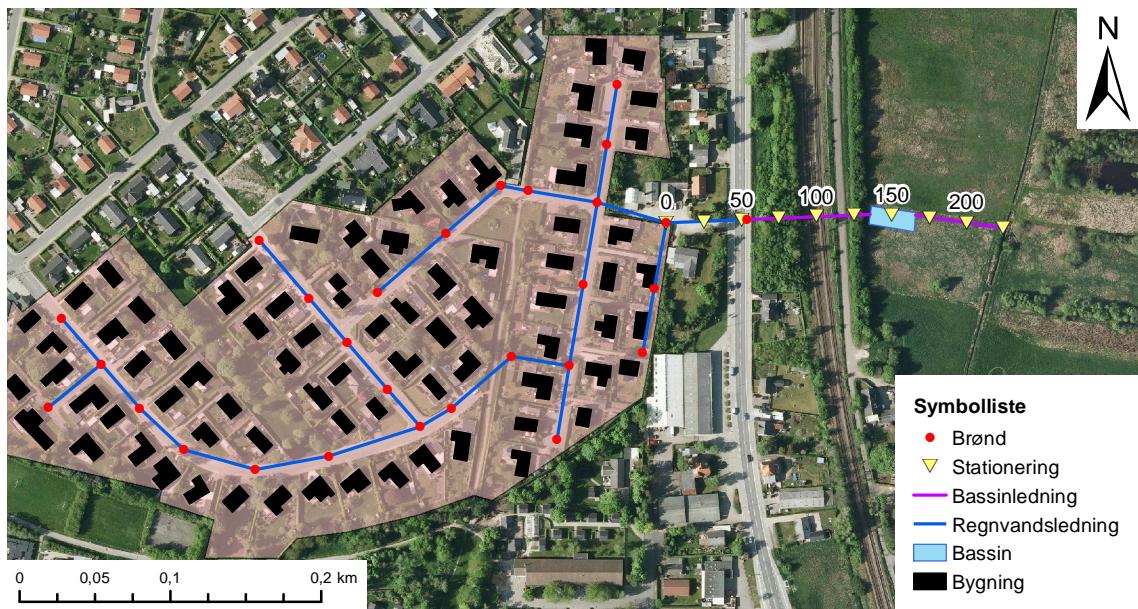
Volumen [ $\text{m}^3$ ]	Bundareal [ $\text{m}^2$ ]	Dybde [m]	Længde [m]	Bredde [m]	Anlæg [-]
496,0	227,1	1,5	26,1	8,7	2

**Tabel 10.1.** Det færdig dimensionerede bassins dimensioner.

### 10.1.2 Placering af bassin

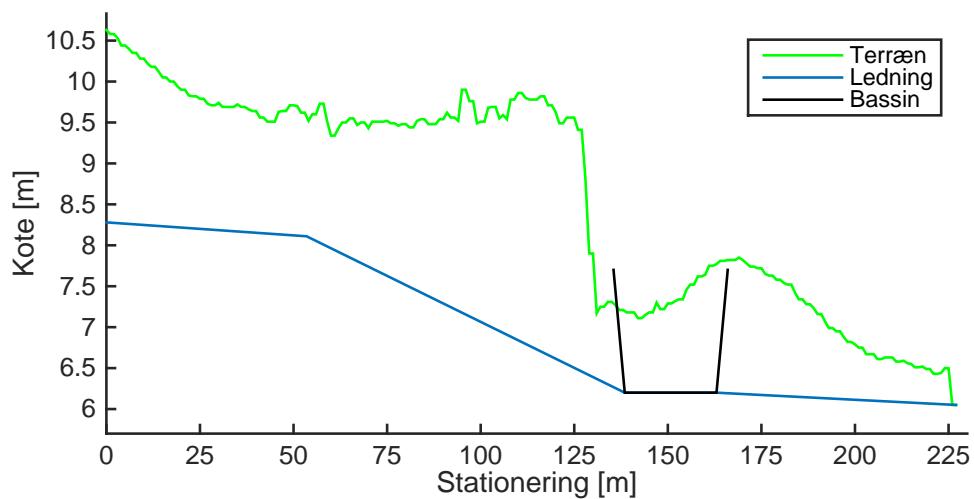
Regnvandsbassinet placeres, jf. figur 10.4, umiddelbart udenfor opland 05. De topografiske forhold gør, at regnvandet kan løbe til bassinet udelukkende vha. gravitation. Beboere bør ikke have direkte adgang til bassinet, da det konstrueres med bassinkantsanlæg på 2, hvorved der kræves hegnet. Desuden må beplantning større end græs kun ske udenfor indhegningen. Ledningen, der går fra oplandet og til bassinet, vil have samme dimensioner som sidste ledning fra oplandet, altså Ø800, hvilket nødvendiggør en rist på indløbet til bassinet. [Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2011]

Placeringen er lavet med henblik på at anlægge så få meter ledning som muligt. Samtidig giver placeringen mulighed for, at der kan ske oversvømmelse af bassinet uden risiko for, at bebyggelse bliver påvirket af det.



**Figur 10.4.** Placering af regnvandsbassin for opland 05.

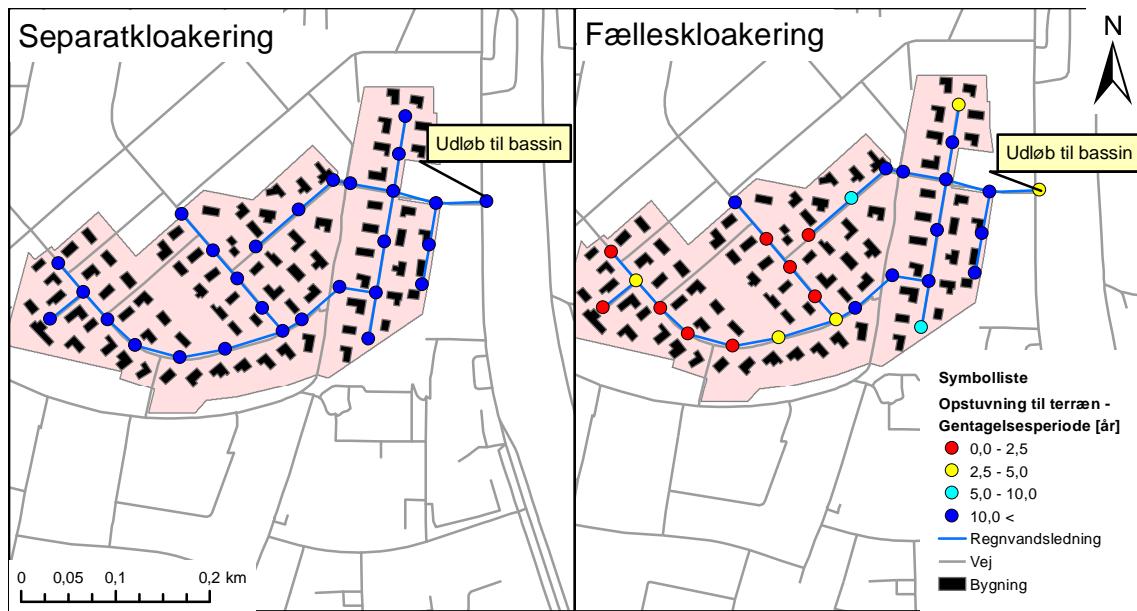
Det undersøges, om ledningen fra boligområdet kan ledes under jernbanen, vha. et længdeprofil. Længdeprofilet ses på figur 10.5, hvoraf tilhørende stationeringer fremgår af figur 10.4. Det vurderes, jf. figur 10.5, at ledningen til bassinet uden problemer kan anlægges under jernbanen ved station 100. Desuden fastslås også, at når bassinet oversvømmes med regnvand fra boligområdet, bliver boligområdet ikke påvirket.



**Figur 10.5.** Længdeprofil af ledninger fra område 05 til bassin og videre til Svenstrup grøften.

### 10.1.3 Resultat af separat regnkloakering

Resultatet af separatkloakeringen fremgår af figur 10.6.



**Figur 10.6.** Ændring i gentagelsesperiode for opstuvning til terrænniveau før og efter separatkloakeringen, der er benyttes klimafaktor på 1,2 ved begge.

Gentagelsesperioden for opstuvning til kritisk kote ved terrænniveau forlænges og overholder anbefalingerne om gentagelsesperiode fra IDA Spildevandskomiteen [2005, tabel 1] om opstuvning til kritisk kote. Det er ikke valgt at vise opstuvning til kælderniveau, som i afsnit 5.2.2, da der ved separatkloakeringen ikke er problemer med dette, medmindre der er lavet fejlkoblinger.

Der gælder samme usikkerheder for dimensioneringen af det separate regnvandssystem, som for analysen af afløbssystemet, afsnit 5.5.

## 10.2 Separat spildevand

Spildevandsledningerne dimensioneres som en del af separatkloakeringen af opland 05. Ledningerne placeres i samme tracé som de eksisterende fællesledninger.

For at dimensionere rørene undersøges først den maksimale spildevandsmængde i alle rør. Dette gøres vha. Mike Urban, hvor der foretages en simulering udelukkende for opland 05. Der simuleres efter samme forudsætninger som i afsnit 4.4. Delfyldningsgraden i rørene skal således være 50 % eller mindre, da rørene dimensioneres halvfylde, og bestemmes vha. Brettings formel, jf. formel (4.5).

Derefter undersøges selvrensningsevnen i rørene. Her benyttes samme metode som beskrevet i afsnit 4.1. Beregningerne findes på [Bilags-CD, TorSystem].

Ledningsnettet for spildevand dimensioneres vha. følgende forudsætninger:

- Maksimum døgnfaktor  $f_d^{\max} = 2,0$ . [Winther et al., 2011, tabel 4.9]
- Minimum døgnfaktor  $f_d^{\min} = 0,8$ . [Winther et al., 2011, side 73]
- Den største vandføring i maksimumsdøgnet er 2001/PE/d.
- Minimumsvandføringen er 801/PE/d.

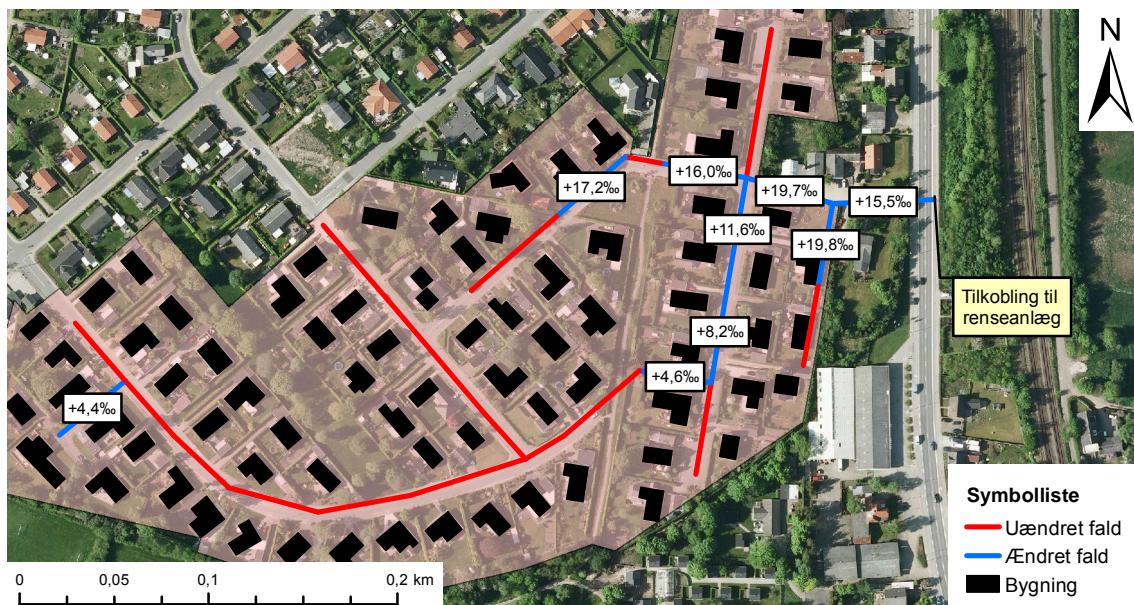
- Den dimensionerende spildevandsføring er minimum 1 l/s svarende til et toiletskyl.
- Der anvendes en kritisk forskydningsspænding på 1,5 Pa, da det antages rørene anlægges præcist [Winther et al., 2011, side 221].
- Ledningerne dimensioneres halvfyldte, så der tages højde for usikkerheder omkring antallet af personer tilkoblet og en fremtidig forøgelse heraf, samt indsvivning og fejlkoblinger. [Winther et al., 2011, side 273]
- Der benyttes PVC-rør med en ækvivalent sandruhed på 1 mm.
- Der antages stationær og ensformig strømning, hvorved energilinjegradianten er lig med hældningen.
- Rørene anlægges i samme ledningstracé og med samme hældning som de nuværende fællesledninger, såfremt der opnås tilstrækkelig selvrensning og kapacitet.
- Der benyttes persondata tilkoblet hver brønd, som angivet i Mike Urban modellen fra Aalborg Forsyning, Kloak A/S.

Spildevandsføringen i den maksimale time i døgnet bestemmes vha. døgnvariationen i Mike Urban og forudsætninger herfor, som er beskrevet i kapitel 4.

Den maksimale vandføring i alle rørene er mindre end et toiletskyl, hvorved der benyttes 1 l/s som kritisk spildevandsmængde.

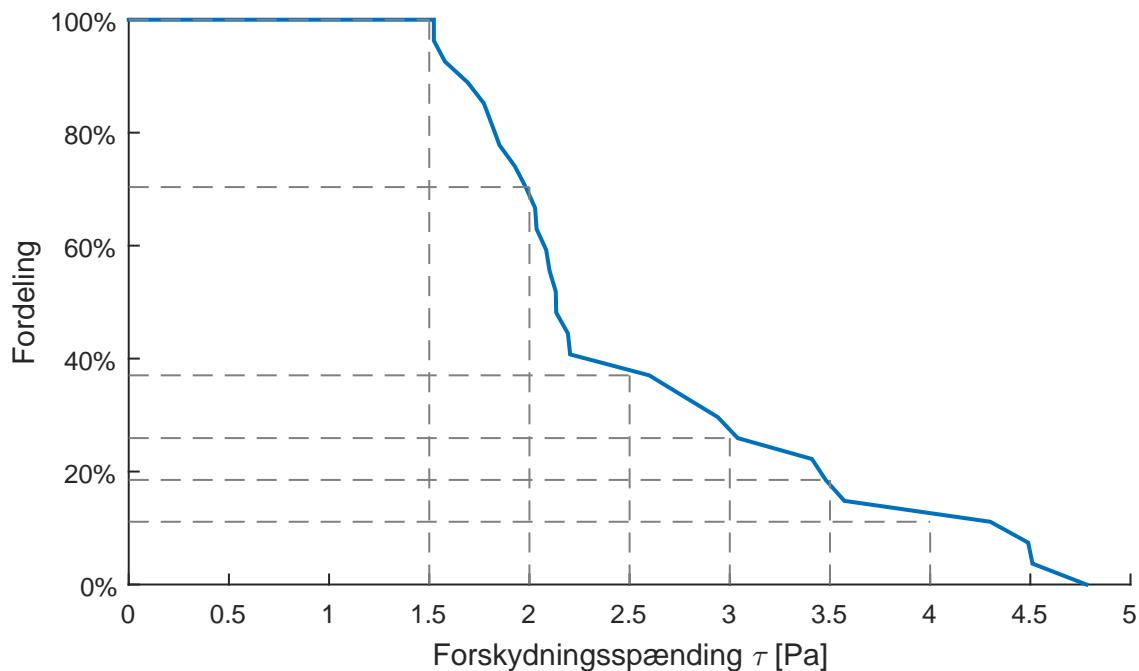
Der er valgt et  $110\text{ mm} \times 3,2\text{ mm}$  SN4 PVC rør for alle rørstrækninger [Wavin, 2015b]. Dette er den mindste handelsstørrelse til anlægning i vej, hvorved denne rørdimension vælges, selvom alle rørene er under halvfyldte, som de ellers dimensioneres efter at være. Der anlægges i alt 1206 m spildevandsledninger.

Efter ledningsdimensionerne er valgt, kan selvrensningsevnen bestemmes. I 74 % af rørene er der en forskydningsspænding over 1,5 Pa og dermed selvrensning. Da der ikke er selvrensning i alle rør, ændres hældningen på udvalgte strækninger ved at sænke bunden af brøndene, så der opnås selvrensning på alle rørstrækninger. På figur 10.7 ses forskellen efter ændring af hældninger.



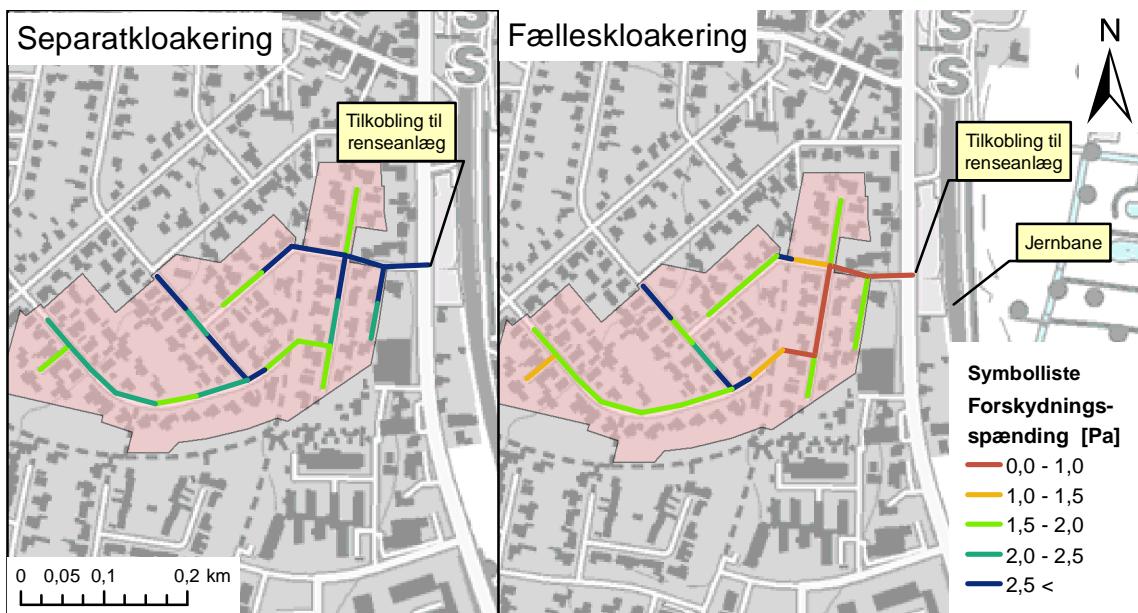
**Figur 10.7.** Forskel i hældning for separate spildevandsledninger ift. fællesledninger.

På figur 10.8 fremgår fordelingen for forskydningsspændingen i spildevandsrørene efter hældningerne er blevet ændret. Den dybeste ledning er placeret 2,91 m under terræn, hvilket ikke vurderes for dybt ift. nedgravning af ledningerne.



**Figur 10.8.** Fordelingskurve over selvrensning i separatkloakerede spildevandsledninger. Punkter markerer den beregnede forskydningsspænding et rør.

Forskellen i forskydningsspændingen mellem separat og fælleskloakering fremgår af figur 10.9. Det ses, at selvrensningen er opnået i alle rør, efter separatkloakeringen er anlagt. I fællessystemet opnåede 70 % af rørene selvrensning. Det separate spildevandsnet tilsluttes gravitationsledningen øst for jernbanen, der fører spildevandet til Renseanlæg Vest, jf. figur 10.1. Ledningen, som sammenkobler det separate spildevandsnet med gravitationsledningen til renseanlægget, er også selvrensende.

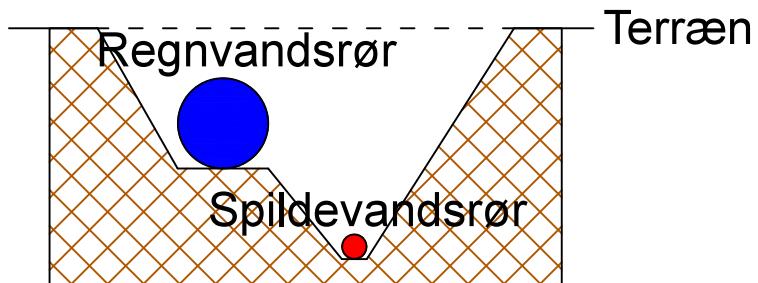


**Figur 10.9.** Forskydningsspænding i fælles og separatkloakering.

Der gælder samme usikkerheder for dimensioneringen af det separate spildevandssystem som for analysen af afløbssystem, jf. afsnit 4.9.

### 10.3 Anlæggelse af separat ledningsnet

Spilde- og regnvandsledningerne anlægges i samme tracé som fællessystemet efter princippet angivet på figur 10.10.



**Figur 10.10.** Anlæggelse af spilde- og regnvandsledninger i jord. [Winther et al., 2011, figur 2.11, red.]

Regnvandsledningerne anlægges med samme hældning som fællesledningerne, hvorimod spildevandsledningerne er lagt med øget fald for at sikre selvrensning. Det vurderes, at det er muligt at anlægge ledningerne i samme tracé med forskelligt fald, såfremt anlægningsprocessen foregår med stor præcision.

## 10.4 Opsummering

Separatkloakeringen løser problemerne med opstuvning og selvrensning. Desuden løses problemet med aflastning fra overløbsbygværker, idet spildevandet ledes til rensningsanlæg og der benyttes et forsinkelsesbassin, før det afstrømmede regnvand udledes til Svenstrupgrøften. Det vurderes, at afledningen fra bassinet er tilstrækkelig lav til ikke at undgå erosion og kapacitetsproblemer i Guldbækken.

# Løsninger for Guldbækken

---

11

Der søges løsninger for iltforhold, erosion og den økologiske tilstand i Guldbækken.

Det forventes at separatkloakeringen af afløbssystemet i Svenstrup, jf. kapitel 10, løser kapacitetsproblemerne i vandløbet, eftersom der dimensioneres et bassin, som forsinket regnvandet, og derved mindske vandføringen.

## 11.0.1 Ilt-problematikker

Iltforholdene i Guldbækken overholder grænseværdierne jf. undersøgelserne i kapitel 7. Dog ses det på figur 7.5 og 7.7, at det hovedsageligt er i Østerå, problemerne formentlig vil opstå. Dette lagt sammen med, at det ikke er undersøgt, hvordan iltforholdene er i Østerå, betyder, at aflastningerne i Guldbækken kan være udslagsgivende for iltforholdene i Østerå. Det vurderes, at separatkloakering vil have inddirekte virkning på iltforholdene længere nedstrøms for Guldbækken.

Det er pålagt kommunen at vedligeholde vandløb, så vandføringen ikke forringes, hvilket indebærer at grødeskære [Miljøministeriet, 2013a, § 27]. Metoden for grødeskæring i vandløb betyder, at slam og sedimenter resuspenderes til vandfasen. Det betyder, at den akkumulerede mængde letomsættelige organiske stof, som er bundfaeldet i Guldbækken og det videre system efter fx aflastning fra afløbssystemet i Svenstrup til Guldbækken, kan resultere i en periode med lavere iltkoncentrationer. I værste konsekvens kan der forekomme iltsvind som resultat af resuspensionen. [Miljøministeriet, 2008, kapitel 9]

De eventuelle problemer med grødeskæring kan afhjælpes med kunstig bundbeluftning under vedligeholdelsen, hvorved iltkoncentrationen i vandfasen og ved bunden under grødeskæring holdes oppe. Gøres dette fra maskinen, kan ”proppen” med resuspended organisk materiale gøres fuldt iltmættet, inden den sendes nedstrøms. På denne måde mindskes iltsvindet ned gennem systemet. Metoden er økonomisk i den forstand, at der ikke er driftsomkostninger ved den, idet omkostningerne for beluftningen er en del af omkostningen ved grødeskæring.

Det er en tænkt løsning, som ikke er dokumenteret. Derved kendes den egentlige virkning ikke, og det kan dermed ikke konkluderes, om løsningen vil have nogen effekt på problemet ved grødeskæring. Løsningen afhjælper kun problemer på kort sigt, idet der fortsat vil ophobes sedimenter i vandløbet som følge af regnbetingede udledninger, så der skal beluftes næste gang der grødeskæres.

### 11.0.2 Erosionsbekæmpelse

Der er jf. afsnit 6.8 beregnet risiko for erosion i en del af Guldbækken. Derfor skal der foretages flere observationer af sedimentet i vandløbet, så fordelingen af kornstørrelsen kan bestemmes mere præcist. Samtidig bør det observeres, om der er sedimenttransport på strækningen. Hvis der observeres sedimenttransport, skal der udlægges materiale af tilstrækkelig størrelse til at undgå erosion. Der er i andre restaureringsprojekter udlagt gydegrus, endog udføres dette normalt ikke som enkeltstående projekt. Men ved udførelse vil løsningen være af bekostning på 10000 kr. eller mere vurderet udfra Madsen og Debois [2006].

Udlægning af materialer med en kornstørrelse, der afhjælper erosionsproblemer, har den fordel, at det kan gøres i flere etaper, og at omkostningerne for løsningen er acceptable. Desuden vil virkningen være tydelig allerede kort efter indgrebet.

### 11.0.3 Økologisk tilstand

Guldbækken er jf. afsnit 3.3 et opsplittet vandløb i sektioner med forskellige tværsnitsudformninger. Hvert stykke af Guldbækken er ensformigt mht. strømningsforhold, hvorved der ikke forventes varierende biodiversitet på de forskellige strækninger. Dette er udtrykt ved den ringe og moderate økologiske tilstand. En løsning kan derfor være at restaurere Guldbækken ved genslyngning, så den igen bliver mæandrerende. Dermed opnås langsomt og hurtigt strømmende samt stillestående vand på samme strækning, som kan øge biodiversiteten og forbedre den økologiske tilstand. Såfremt det undersøgte vandløb mæandreres, vil det fylde mere i landskabet, hvilket kan skabe konflikt med arealanvendelse eller naturbeskyttelse, herunder §3-beskyttet natur. Det forventes, at genslyngningen vil forbedre den økologiske tilstand, hvorved der kan søges dispensation fra § 3 naturbeskyttelsen, jf. afsnit 3.1.

Genslyngning af vandløb er en bekostelig løsning, men det forventes at være en langtids-holdbar løsning, og samtidig en løsning, der ikke skaber flere problemer, end den løser. Et lignende projekt med omtrent samme længde koster 800 000 kr [Madsen og Debois, 2006, side 63].

Det vurderes således, at genslyngning kan forbedre den økologiske tilstand, men dette er en langsigtet og omkostningstung løsning.

# Konklusion 12

---

I nærværende projekt er afløbssystemet og Guldbækken i Svenstrup analyseret for problemer, hvorefter der er fundet løsninger på de dokumenterede problemer.

Ved en analyse af afløbssystemet kan det konkluderes, at 53 % af fællesledningerne ikke er selvrensende. Endvidere overholder 52 % af det fælleskloakerede og 8 % af det separat-kloakerede ikke funktionskravene for opstuvning til terræn, hvilket forværres i fremtiden. Med en klimafremskrivning på 100 år er der konstateret oversvømmelsesproblemer på flere kritiske områder i Svenstrup ved brug af en regn med gentagelsesperiode på 100 år.

For overløbsbygværkerne overskrides udledningstilladelsen for overløb nr. 25 med en gentagelsesperiode på 14 år og alle overløbsbygværker undtagen nr. 11 aflaster til Guldbækken oftere end tilladt. Også disse problemer forværres ved en klimafremskrivning.

Som løsning på problemerne for afløbssystemet kan der på kort sigt vælges at benytte LAR-systemer, renspuling af ledninger og forbedring af overløb. På længere sigt er der valgt at separatkloakere. Som eksempel er der i dette projekt valgt at separatkloakere opland 05, som udleder med den største vandføring ift. oplandsarealet. Herved imødekommes Aalborg Kommunes mål om, at hele kommunen skal være separatkloakeret inden år 2100. Ved separatkloakering er der 100 % selvrensning i spildevandsnettet, og funktionskravene overholdes i regnvandssystemet ved brug af et bassin.

Der er oversvømmelse i Guldbækken, hvilket strider imod vilkårene for udledningstilladelserne, men vurderes ikke at påvirke boligområder. Ifølge beregninger er der bundtransport af sedimenter i vandløbet uden udledninger fra overløbsbygværker, men dette stemmer ikke overens med observationerne fra området, hvorved erosionsrisikoen bør undersøges nærmere.

Derudover opstår der ikke iltkoncentrationer under grænseværdierne i Guldbækken, men det er muligt, der er problemer ift. iltsvind i Østerå nedstrøms for Guldbækken, da det laveste iltniveau optræder der. Der er dog ikke tilstrækkeligt kendskab til Østerå til præcist at bestemme iltforholdene, hvorfor det bør undersøges nærmere.

Som kortsigtet løsning for vandløbet kan der tilføjes materiale af tilstrækkelig kornstørrelse til det ikke transporteres, og der kan benyttes kunstig beluftning under grødeskæring til at sikre, der ikke opstår iltsvind. Endvidere kan vandløbet genslynges for at forbedre den økologiske tilstand.

Det vurderes, at separatkloakering af afløbssystemet også er en langsigtet løsning for Guldbækken, da der i så fald ikke vil blive udledt spildevand til vandløbet. Derudover reduceres vandføringen fra regnbetingede udledninger idet der anvendes forsinkelsesbassiner. Såfremt de valgte løsninger implementeres forventes det at problemerne i afløbssystemet i Svenstrup og i Guldbækken løses.

# Perspektivering 13

---

I dette kapitel gennemgås en række forslag til emner, der kan arbejdes videre med, for at analysere Svenstrups afløbssystem og dets påvirkning af Guldbækken.

Der bør undersøges for kapacitet og selvrensning i de allerede separatkloakerede oplande, jf. figur 2.1, da det ikke har været muligt grundet datamangel. Kapacitet bør undersøges blot for at have vished om, hvorvidt systemet har tilstrækkelig kapacitet. Selvrensning i separatkloakerede områder skal undersøges, idet tilstopning nødvendiggør renspuling. Dette kunne undersøges i forbindelse med TV-inspektioner af flere brønde end blot den ene, der er undersøgt i dette projekt. Derved kan det også fastslås, om det valgte selvrensningskriterium er tilstrækkeligt, idet der ved TV-inspektion kan undersøges strækninger, der overholder kriteriet. Hvis disse strækninger ikke er selvrensende, kan det tyde på, at selvrensningskriteriet er valgt for lavt.

Oversvømmelseskort som følge af kapacitetsproblemer skal beregnes ud fra estimerede regnhændelser i år 2050 med gentagelsesperioder på 5-, 10-, 20-, 50-, og 100-år. I nærværende projekt er der dannet oversvømmelseskort på baggrund af regnhændelser i år 2100 med en gentagelsesperiode på 100 år. Flere kritiske områder i Svenstrup oversvømmes ved den simulerede regnhændelse, hvorfor det er særlig vigtigt at beregne, hvor ofte disse områder bliver oversvømmet, for at vurdere, hvorvidt det er nødvendigt at foretage tiltag for at afhjælpe problemet.

Oversvømmelseskortene er kun simuleret ud fra kasseregn af varigheder på to timer og over. Idet den to timer lange regnhændelse medfører den største mængde oversvømmelse, vurderes det sandsynligt, at regn med en varighed kortere end to timer medfører endnu større oversvømmelse. Alternativt kan oversvømmelseskortene simuleres på baggrund af CDS eller historiske regnhændelser. Idet simuleringen er ustabil ved regn med højere intensitet, bør modellens opløsning sænkes, idet dette afhjælper problemer med instabilitet uden at medføre ressourcetunge beregninger.

Over året varierer grøden og vandføringen i Guldbækken, hvorved der kan foretages flere målinger af vandføring og tværsnit, således resultaterne af undersøgelserne for kapacitet og erosion kan variere ift. andre tidspunkter på året. Når der udledes til Guldbækken, stiger vandstanden, hvorved det bør undersøges, hvilke problemer dette kan skabe for afløbssystemet. Endvidere er kapaciteten af vandløbet nedstrøms for den undersøgte strækning efter jernbanebroen ved Svenstrup ikke undersøgt, hvorved det ikke vides, hvilke problemer de regnbetingede udledninger kan give. Da erosionen i vandløbet er undersøgt i en tørvejrssituation bør det undersøges, hvorvidt denne forværres, og hvor der er erosion som følge af udledninger fra overløb.

Foruden undersøgelsen omkring udledningen af  $BOD_5$ , kan det undersøges, hvilke andre stoffer, som aflastes i Guldbækken under overløbshændelser. I forbindelse med denne undersøgelse kan der udføres et sporstofforsøg, for at vurdere hvor langt nedstrøms stofferne

påvirker Guldbækken.

Det forventes, at der kan forekomme problemer med iltforholdene i Østerå, grundet udledninger til Guldbækken. For at vurdere de problemer, som opstår i Østerå, skal iltforholdene i dette vandløb undersøges nærmere.

# Litteratur

---

**Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2011.** Aalborg Forsyning, Kloak A/S. *Tekniske bestemmelser om Etablering mv. af bassiner i kloaksystemet*, 2011.

**Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2010.** Aalborg Forsyning, Kloak A/S. *Helhedsplan for Svenstrup*, 2010.

**Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2009.** Aalborg Forsyning, Kloak A/S. *Vision 2100 - samt udviklingsplan frem til år 2025*, 2009.

**Aalborg Kommune, 2014a.** Aalborg Kommune. *Befolkningsprognose 2015 - 2026 fordelt på Bydel*, 2014. URL <http://apps aalborgkommune.dk/statistik/webaarbog/prognose2009/struktur/Bydele/indexlevel1/BydeleIalt.html>.

**Aalborg Kommune, 2014b.** Aalborg Kommune. *Befolkningen pr. 31. december 2013.*, 2014. URL <http://apps aalborgkommune.dk/statistik/webaarbog/Folketal2014/struktur/Bydele/indexlevel1/Bydele5aarsaldersklasser.html>.

**Aalborg Kommune, 2011.** Aalborg Kommune. *Guldbækken og Godthåb Hammerværk*. [http://www aalborg.dk/media/390507/Godthaab\\_folder\\_2011-internet.pdf](http://www aalborg.dk/media/390507/Godthaab_folder_2011-internet.pdf), 2011. Besøgt: 18-02-2015.

**Aalborg Kommune og Forsyningsvirksomhederne, 2008.** Aalborg Kommune og Forsyningsvirksomhederne. *Spildevandsplan 2009-19*, 2008.

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

**B111, 2012.** B111. *Aftøbssystemet i Svenstrup og Guldbæk*, 2012.

**B124, 2013.** B124. *Afledning af regn- og spildevand i Svenstrup*, 2013.

**B203, 2014.** B203. *BESKYTTELSE AF GULDBÆKKEN VED HÅNDTERING AF REGN- OG SPILDEVAND I SVENSTRUP*, 2014.

**Benson og Krause, 1984.** Bruce B. Benson og Daniel Krause. *The Concentration and isotopic fractionation of oxygen dissolved in freshwater and seawater in equilibrium with atmosphere*, 1984.

**Bentzen, 2006.** Thomas Ruby Bentzen. *Notat vedr. regn-, rørdimensionering og bassindimensionering*, 2006.

**Bilags-CD.** Bilags-CD. *CD med bilag til denne rapport. Vedlagt*.

**Bénédittis og Bertrand-Krajewski, 2005.** J. De Bénédittis og J.-L. Bertrand-Krajewski. *Infiltration in sewer systems: comparison of measurement methods*, 2005. URL [http://apuss.insa-lyon.fr/nrl\\_030\\_infiltration\\_comparison\\_of\\_methods\\_SPN1.pdf](http://apuss.insa-lyon.fr/nrl_030_infiltration_comparison_of_methods_SPN1.pdf).

**Brorsen og Larsen, 2009.** Michael Brorsen og Torben Larsen. *Lærebog i hydraulik*. ISBN: 978-87-7307-978-2, 2. udgave, 2. oplag. Aalborg Universitetsforlag, 2009.

**Danmarks Statistik, 2015.** Danmarks Statistik. *BEF44: Folketal 1. januar efter byområde*. <http://www.statistikbanken.dk/BEF44>, 2015. Besøgt: 10-02-2015.

**Dansk Standard, 2009.** Dansk Standard. *Norm for aftøbsinstallationer*, 2009.

**Dansk Standard, 1988.** Dansk Standard. *Norm for almene vandforsyningasanlæg*, 1988.

**DANVA, 2014.** DANVA. *Vand i tal 2014*, 2014. URL <http://reader.livedition.dk/danva/145/>.

**DHI, 2011a.** DHI. *Mike Urban Collection System*, 2011.

- DHI, 2011b.** DHI. *Mike Urban Pipe Flow Reference Manual*, 2011.
- DHI Water & Environment, 2003.** DHI Water & Environment. *MOUSE surface runoff models, reference manual*, 2003.
- Engineering Toolbox, n.d.** Engineering Toolbox. *Densities of Miscellaneous Solids*, n.d.
- Europa-Parlamentet og Rådet, 2014.** Europa-Parlamentet og Rådet. *EUROPA-PARLAMENTETS OG RÅDETS DIREKTIV 2000/60/EF af 23. oktober 2000 om fastlæggelse af en ramme for Fællesskabets vandpolitiske foranstaltninger*, 2014.
- Fan og Li, 2004.** P. Fan og J.C. Li. *Diffusive wave solutions for open channel flows with uniform and concentrated lateral inflow*, 2004.
- Frier, 2006.** Jens-Ole Frier. *Noter til vandløbslære*, 2006.
- Geodatabiblioteket, 2014.** Geodatabiblioteket. *AAUs server med geodatabiblioteket*, 2014.
- Geus, n.d.** Geus. *Boringsdatabasen*, n.d.
- Geus, 2011.** Geus. *Jordartskort*, 2011.
- Hvitved-Jacobsen et al., 2010.** Thorkild Hvitved-Jacobsen, Jes Vollertsen og Asbjørn Haaning Nielsen. *Urban and Highway Stormwater Pollution - Concepts and engineering*. ISBN: 978-1-4398-2685-0. CRS Press, 2010.
- Hvitved-Jacobsen et al., 2013.** Thorkild Hvitved-Jacobsen, Jes Vollertsen og Asbjørn Haaning Nielsen. *Sewer processes - Microbial and chemical process Engineering of sewer networks*. ISBN: 978-1-4398-8178-1, 2. udgave. CRS Press, 2013.
- IDA Spildevandskomiteen, 2008.** IDA Spildevandskomiteen. *Forventede ændringer i ekstremregn som følge af klimaændringer*, 2008.
- IDA Spildevandskomiteen, 1985.** IDA Spildevandskomiteen. *Forurening af vandløb fra overløbsbygværker*, 1985.
- IDA Spildevandskomiteen, 2005.** IDA Spildevandskomiteen. *Funktionspraksis for afløbssystemer under regn*, 2005.
- IDA Spildevandskomitéen, 1994.** IDA Spildevandskomitéen. *Nedsivning af regnvand - dimensionering*, 1994.
- Jensen, 2004.** Bjarne Jensen. *Twin-curve metoden*, 2004.
- Karlby og Sørensen, 2014.** Henning Karlby og Inga Sørensen. *Vandforsyning*. ISBN: 978-87-571-2799-7, 3. udgave. Nyt Teknisk Forlag, 2014.
- Kommune, 2009.** Aalborg Kommune. *Svenstrup Kommuneplan*, 2009.
- Kortforsyningen, 2015.** Kortforsyningen. *Geodatastyrelsen*. <http://kortforsyningen.dk>, 2015. Besøgt: 12-03-2015.
- Madsen og Debois, 2006.** Søren Madsen og Paul Debois. *Vandløbsrestaurering i Danmark - 24 eksempler*. [http://naturstyrelsen.dk/media/nst/66797/Vandloebsbog\\_DK.pdf](http://naturstyrelsen.dk/media/nst/66797/Vandloebsbog_DK.pdf), 2006. Besøgt: 21-05-2015.
- Messtechnik, 2000.** Messtechnik. *Propeller: 3-164310, diameter (mm): 50*, 2000.
- Miljøministeren, 2011.** Miljøministeren. *Vandplan 2010-2015, Limfjorden, Hovedvandoplant 1.2, Vanddistrikt Jylland og Fyn*, 2011.

- Miljøministeriet, 2008.** Miljøministeriet. *Grødeskæring i vandløb - Erfaringsopsamling af metoder, praksis og effekter*, 2008. URL <http://www2.blst.dk/udgiv/Publikationer/2008/978-87-7279-794-6/pdf/978-87-7279-794-6.pdf>.
- Miljøministeriet, 2013a.** Miljøministeriet. *Bekendtgørelse af lov om vandløb*, 2013. URL <https://www.retsinformation.dk/Forms/r0710.aspx?id=145855#Kap17>.
- Miljøministeriet, 2010.** Miljøministeriet. *Bekendtgørelse om miljøkvalitetskrav for vandområder og krav til udledning af forurenende stoffer til vandløb, sører eller havet*.  
<https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=132956>, 2010. Besøgt: 20-03-2015.
- Miljøministeriet, 2013b.** Miljøministeriet. *Lov om vandplanlægning*.  
<https://www.retsinformation.dk/FORMS/r0710.aspx?id=161126>, 2013. Besøgt: 16-02-2014.
- Miljøministeriet, 2013c.** Miljøministeriet. *Naturbeskyttelsesloven*.  
<https://www.retsinformation.dk/Forms/r0710.aspx?id=155609>, 2013. Besøgt: 28-05-2015.
- Miljøministeriet, 2012.** Miljøministeriet. *Bekendtgørelse om ændring af bekendtgørelse om spildevandstilladelser m.v. efter miljøbeskyttelseslovens kapitel 3 og 4*.  
<https://www.retsinformation.dk/forms/r0710.aspx?id=144550>, 2012. Besøgt: 19-05-2015.
- Miljøministeriet, 2011.** Miljøministeriet. *WebGIS*.  
[http://miljoegis.mim.dk/cbkort?profile=miljoegis\\_vandrammedirektiv2011](http://miljoegis.mim.dk/cbkort?profile=miljoegis_vandrammedirektiv2011), 2011. Besøgt: 18-02-2015.
- Miljøportalen, 2014.** Miljøportalen. *Danmarks arealinformation*.  
<http://arealinformation.miljoeportal.dk/distribution/>, 2014. Besøgt: 18-02-2015.
- Miljøstyrelsen, 1990.** Miljøstyrelsen. *Spildevandsforskning fra miljøstyrelsen: Bestemmelse af befæstet areal*, Nr. 43 1992, 1990.
- NKI A/S, 2013.** NKI A/S. *Q063300-Q063400-1-140313*, 2013.
- Ovesen et al., 2012.** Niels Krebs Ovesen, Leif Fuglsang, Gunnar Bagge og Anette Krogsbøll. *Lærebog i Geoteknik*. ISBN: 978-87-502-1042-9, 2. udgave, 1. opdag. Polyteknisk Forlag, 2012.
- Rasmussen et al., 2008.** M. R. Rasmussen, S. Thorndahl og K. Schaarup-Jensen. *A low cost calibration method for urban drainage models*, 2008.
- Rasmussen, 1985.** Michael R. Rasmussen. *Måling af vandføring i åbne kanaler*, 1985.
- Rasmussen et al., 2015.** Michael Robdrup Rasmussen, Peter Roslev, Niels Iversen og Morten Lauge Pedersen. *Kursus i Vandløb og sører*, 2015.
- Region Norjylland, 2005.** Region Norjylland. *Regionplan 2005*, 2005. URL <http://naturstyrelsen.dk/media/nst/Attachments/Regionplan2005Kapitel6.pdf>.
- Sand-Jensen og Lindegaard, 2004.** Kaj Sand-Jensen og Claus Lindegaard. *Ferskvandsøkologi*. ISBN: 978-87-02-02921-5, 2. udgave, 3. opdag. Gyldendal, 2004.
- Sand-Jensen et al., 2006.** Kaj Sand-Jensen, Nikolai Friberg og John Murphy. *Running Waters*. ISBN: 978-87-7772-929-4, 1. udgave. National Environmental Research Institute, Denmark, 2006.
- Schaarup-Jensen og Hvitved-Jacobsen, 1990.** K. Schaarup-Jensen og T. Hvitved-Jacobsen. *Dissolved Oxygen Stream Model for Combined Sewer Overflows*, 1990.
- Thorndahl et al., 2006.** S. Thorndahl, C. Johansen og K. Schaarup-Jensen. *Assessment of runoff contributing catchment areas in rainfall runoff modelling*, 2006.
- Thorndahl og Nielsen, 2015.** Søren Thorndahl og Asbjørn Haaning Nielsen. *Kursus i Urban regn- og spildevandsafstrømning*, 2015.

**Thorndahl.** Søren Liedtke Thorndahl. *Ph.D, Vand og Miljø.*

**Vestergaard, 1989.** Kristian Vestergaard. *Numerical Modelling of Streams.* ISBN: 87-90034-12-0. 1989.

**Wavin, 2015a.** Wavin. *Dobbeltvæggede rør - X-Stream.* <http://dk.wavin.com/web/produktkatalog/regnvand/transport-og-drning/dobbeltvæggede-rør-xstream.htm>, 2015. Besøgt: 06-05-2015.

**Wavin, 2015b.** Wavin. *110x3,2mm rød PVC-ML afl.rør SN4 mf 3m.*  
<http://dk.wavin.com/web/produktkatalog/spildevand/gravitation/upvc-multilayer/110x32mm-rod-pvcml-afl.ror-sn4-mf-3m.htm>, 2015. Besøgt: 01-05-2015.

**Winther et al., 2011.** Leif Winther, Jens Jørgen Linde, H. Thorkild Jensen, Leo Lund Mathiasen og Niels Bent Johansen. *Afløbsteknik.* ISBN: 978-87-502-1015-3, 6. udgave, 1. opdag. Polyteknisk Forlag, 2011.

# Del IV

## Appendiks og bilag

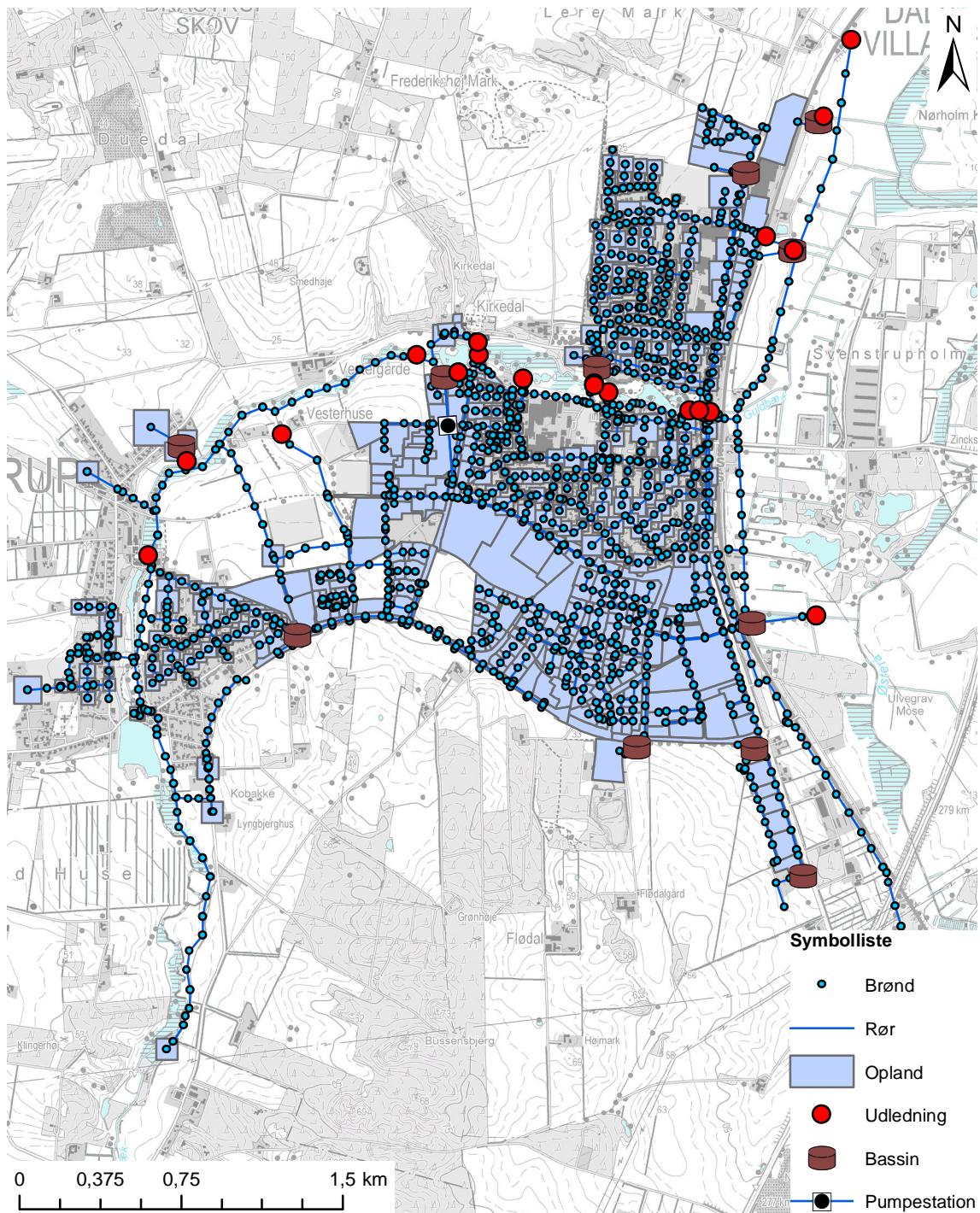
# Bilagsliste A

Oversigt over bilag vedlagt rapporten på en Bilags-CD.

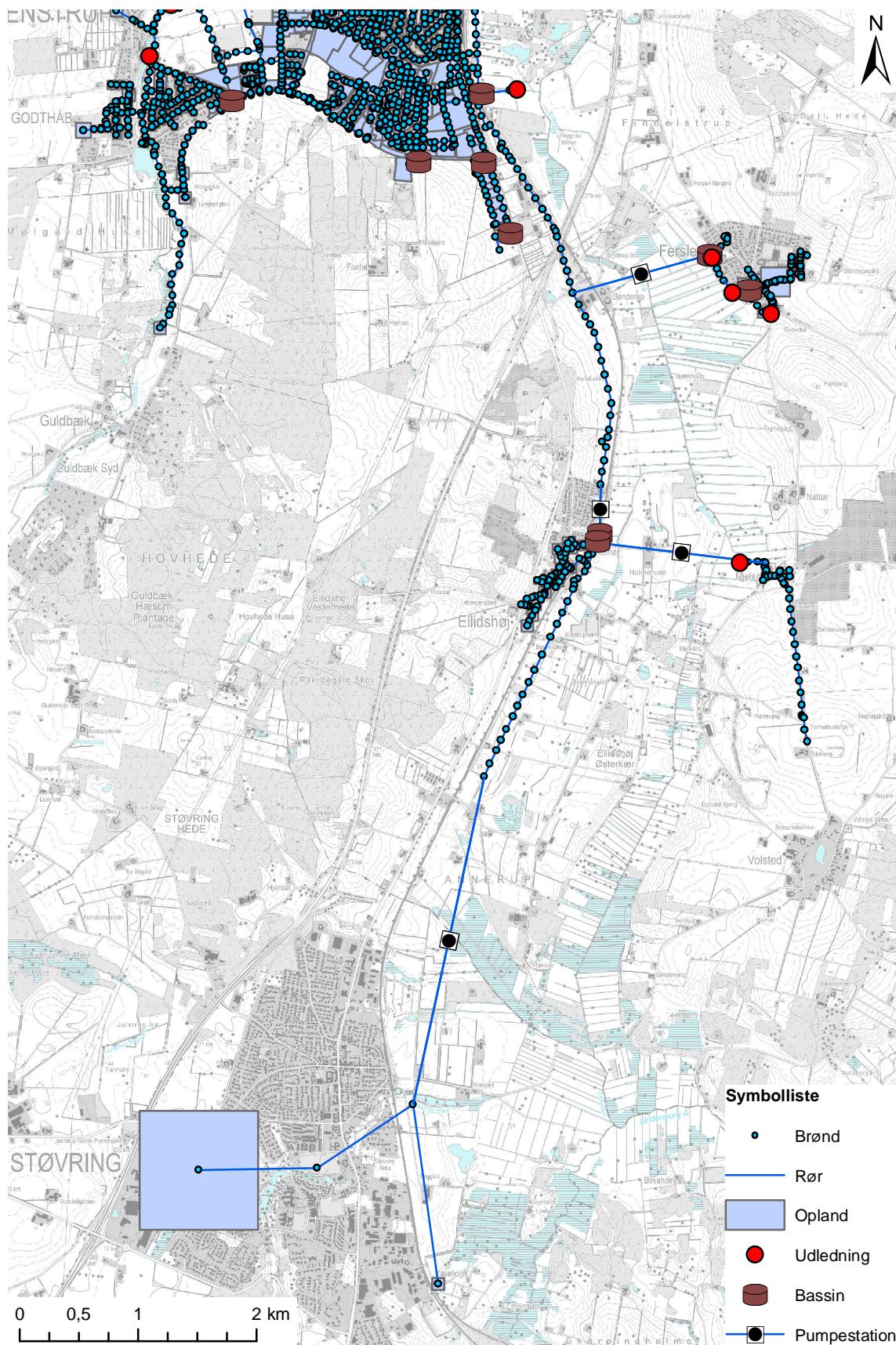
- **Mike Urban-model**
  - “Svenstrup\_regn”: dfs0 fil, Regnserie fra Svenstrup i perioden 1979 til 2015.
  - “Svenstrup\_MU”: Mike Urban fil, Svenstrups afløbssystem i Mike Urban.
- **Selvrensning**
  - “TorSystem”: Matlab fil, Beregning af selvrensningsevne for separatkloakerede rør.
  - “TorSystem\_Analyse”: Matlab fil, Beregning af selvrensningsevne for analysen af de fælleskloakerede rør.
- **Overløbsdata**
  - “Overløbsdata”: Mappe med excel filer, Data fra overløbsregistreringer.
- **Kalibrering af Mike Urban**
  - “Kalibrering”: Excel fil, Resultater af kalibrering med forskellige hydrologiske reduktionsfaktorer i Mike Urban.
  - “sammensatregn”: Excel fil, Sammensat regnserie af de 3 regn brugt til kalibrering af Mike Urban model.
- **GPS-målinger**
  - “maaling\_svenstrup\_red”: Tekstdokument, GPS data fra opmåling af tværsnit og vandspejlskote i Guldbækken.
- **Guldbækvens vandføring**
  - “Flow”: Matlab fil, Beregning af vandføring i Guldbækken på baggrund af propelmålinger.
- **Guldbækvens kapacitet og erosion**
  - “Froudes\_tal”: Matlab fil, Beregning af Froudes tal for målte tværsnit.
  - “ErosionGuldbæk”: Matlab fil, Beregning af erosion i Guldbækken.
  - “bolgemodel”: Matlab fil, Diffusiv bølgemodel til hydraulisk analyse af Guldbækken.
  - “test\_hydrauliskmodel”: Matlab fil, Test af den hydrauliske model ift. naturlig dybde, opstuvning og en bølge.
- **Guldbækvens iltforhold**
  - “SingleCurve”: Matlab fil, Beregning af parametre til vandløbets iltbalance.
  - “Iltforbrug1” og “Iltforbrug2”: Matlab filer, Beregning af iltforbrug ved bunden og i vandfasen.
- **Dimensionering af separate regnvandsafløb**
  - “HandberegnBassin”: Matlab fil, Bestemmelse af bassinvolumen ved håndberegninger.
  - “SeparatVaad”: Matlab fil, Bestemmelse af rørdimensioner til separat regnvand.

# Mike Urban-model B

Oversigt over Mike Urban-modellen og de elementer, der indgår.



**Figur B.1.** Mike Urban-model over Svenstrup.

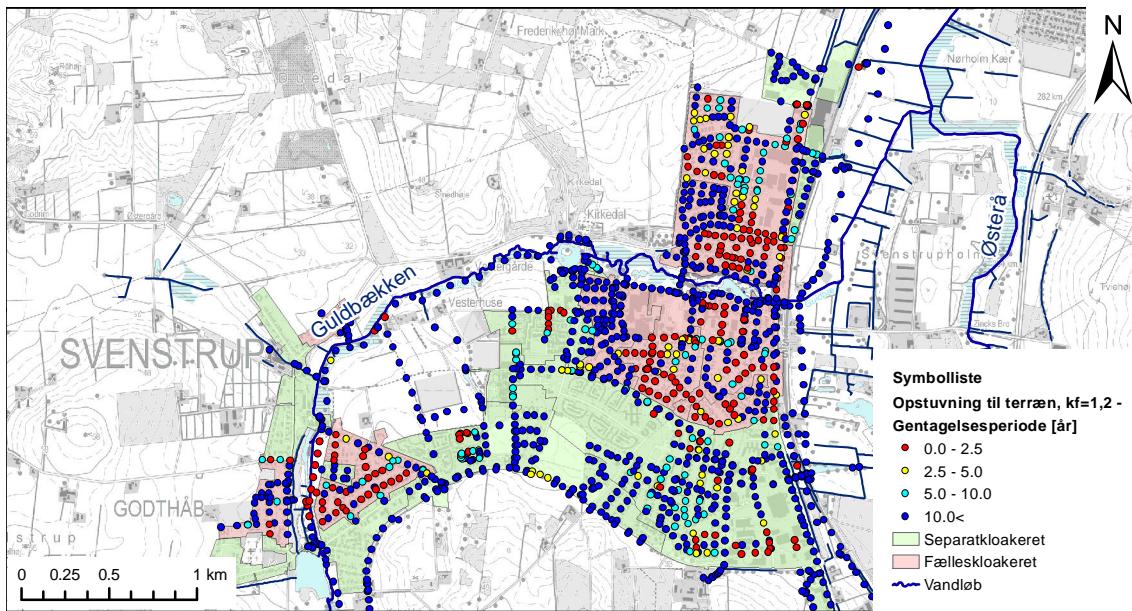


**Figur B.2.** Mike Urban-model over område syd for Svenstrup.

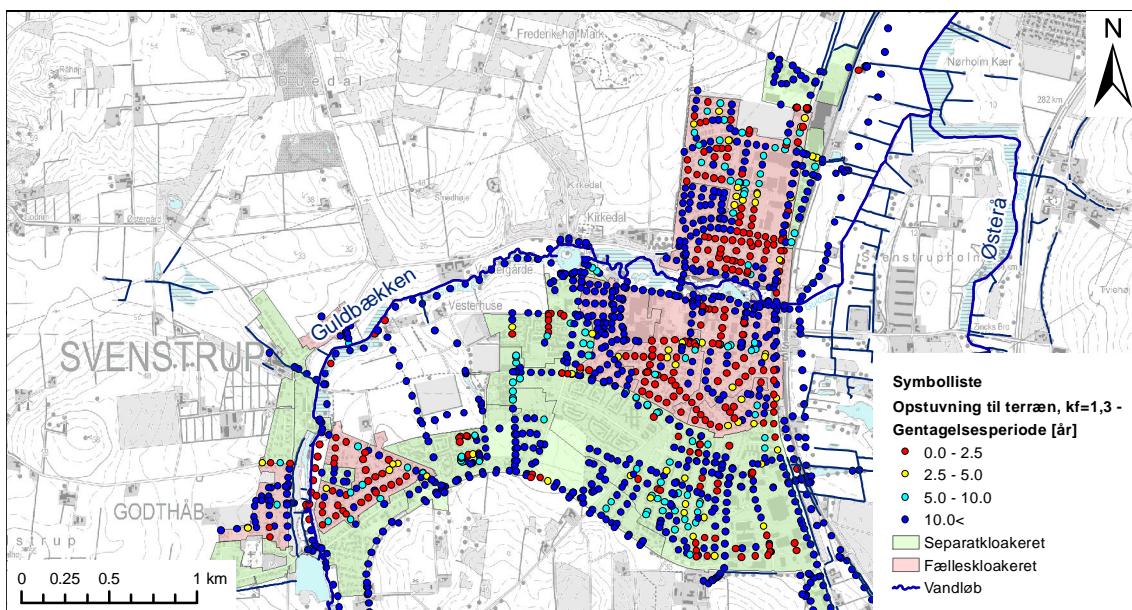
# Kort over opstuvning med klimafaktorer

C

Figur C.1 og C.2 viser opstuvning til terræn for hhv. en klimafaktor på 1,2 og 1,3.



**Figur C.1.** Gentagelsesperiode for opstuvning til terrænniveau, når der anvendes en klimafaktor på 1,2



**Figur C.2.** Gentagelsesperiode for opstuvning til terrænniveau, når der anvendes en klimafaktor på 1,3

# Beregning af vandføring i Guldbækken D

I dette kapitel gennemgås metoden, der er anvendt til at beregne vandføringen for Guldbækken i afsnit 6.2. Antallet af omdrejninger måles med propellen, i forskellige punkter i tværsnittet over tid. Målingerne er foretaget i stik med en halv meter imellem, hvor der i hvert stik måles i forskellige afstande fra bunden, jf. figur 6.5. I den første flowmåling er der i hvert punkt målt tre gange over 15 sekunder, og i de to andre flowmålinger er der målt to gange over 30 sekunder. Der anvendes et gennemsnit af målingerne i hvert punkt.

Ud fra antallet af omdrejninger beregnes en vandhastighed i punkterne vha. formel (D.1) [Messtechnik, 2000].

$$v = \begin{cases} 0,2416 \cdot n + 0,015 & \text{for } 0,00 < n \leq 0,76 \\ 0,2573 \cdot n + 0,003 & \text{for } 0,76 \leq n \leq 9,61 \end{cases} \quad (\text{D.1})$$

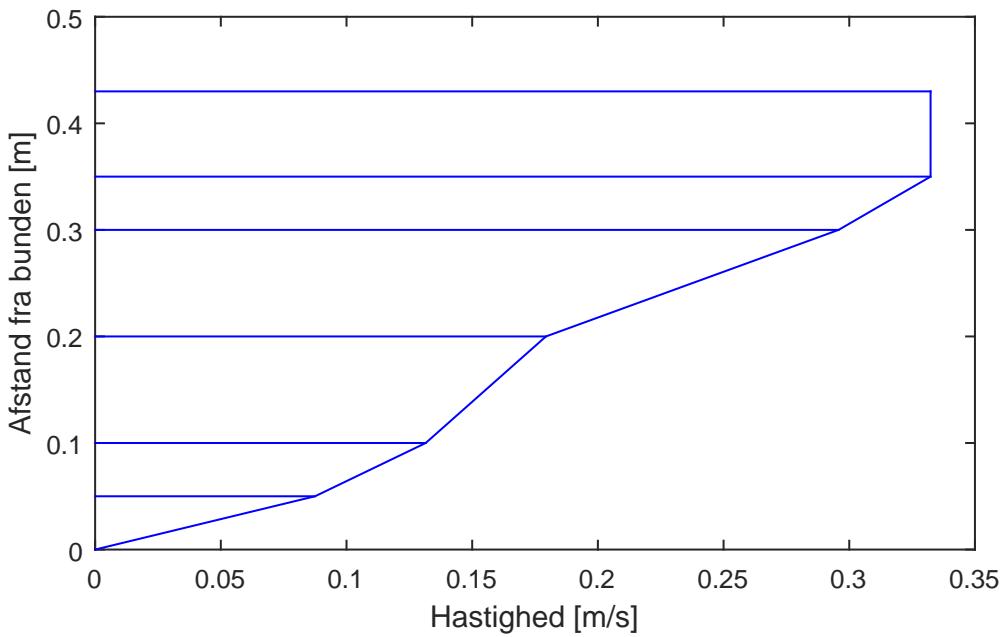
Hvor

$$\begin{array}{l|l} n & \text{Propelomdrejninger } [\text{s}^{-1}] \\ v & \text{Vandhastighed } [\text{m/s}] \end{array}$$

For at beregne vandføringen antages [Rasmussen, 1985, side 3]:

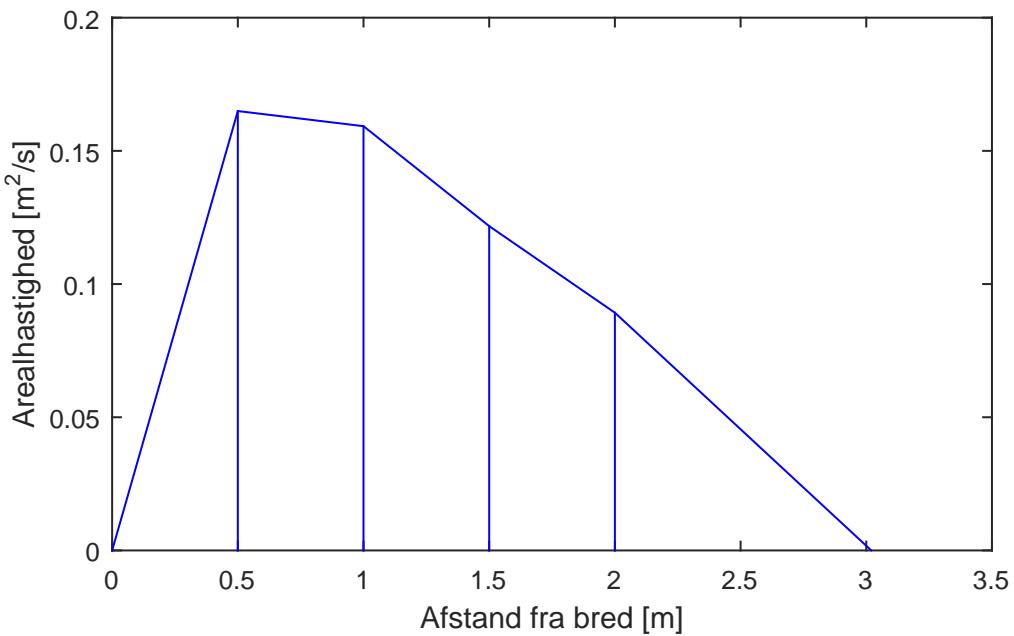
- At hastigheden ved bunden er 0.
- At hastigheden ved vandspejlet er ens med nærmeste måling.
- At hastigheden varierer lineært mellem de enkelte punkter i stikkene.

På baggrund af vandhastigheden i punkterne bestemmes arealhastigheden. Arealhastigheden findes ved at summere arealerne i forhold til y-aksen på grafen, jf. figur D.1.



**Figur D.1.** Areal, der benyttes til at beregne arealhastigheden. I eksemplet er der 5 punkter i ét nedstik.

Vandføringen beregnes ved at integrere over tværsnittet med de beregnede arealhastigheder, jf. figur D.1.



**Figur D.2.** Areal, der benyttes til at beregne vandføring. Der er 4 nedstik i dette eksempel.

For at bestemme vandføringen i tværsnittet benyttes formel (D.2) [Rasmussen, 1985, side

5].

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{s-1} (q_j + q_{j+1}) \cdot (x_{j+1} - x_j) \quad (\text{D.2})$$

Hvor

$Q$	Vandføring [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$s$	Antal nedstik [-]
$q$	Arealhastighed [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$x$	Afstand fra målepunkt til bred [m]

Resultaterne for vandføringsberegningerne er beskrevet i afsnit 6.2.

## D.1 Usikkerheder ved vandføringsmålinger.

Ved målinger af vandføring i vandløb kan der opstå usikkerheder ved målingerne. I vandløb kan der være grøde og sten, hvilket kan medføre, at strømningshastigheden og -retningen bliver påvirket. Foruden kan der være fejl i udstyret, som registrerer antallet at omdrejninger. Derudover måltes der i tværsnit 1 kun i 15 sekunder, mens der i de resterende tværsnit måltes i 30 sekunder. Tidsintervallerne er ikke nødvendigvis tilstrækkelige til at beskrive vandhastigheden. [Rasmussen, 1985, side 6]

# Test af hydraulisk model

E

Den diffusive bølgemodel testes ift. beregning af naturlig dybde, opstuvning og en bølge. Beregninger kan findes på [Bilags-CD, test\_hydrauliskmodel].

Følgende er forudsætninger for testene:

- Der benyttes en kanal med rektangulært tværsnit.
- Der antages stationær og ensformig strømning.
- Der er ingen lateral vandtilførsel.

Parameter	Værdi
Vandføring rand [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	1
Bundhældning [-]	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Bundbredde [m]	2
Manningtal [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ]	30
Stedsskridt [m]	100
Tidsskridt [s]	1

## E.1 Naturlig dybde

Modellen tjekkes vha. en beregning af naturlig dybde, for at vurdere hvorvidt beregningerne i modellen er korrekte. Tværnittet af kanalen antages at være smalt. Manningformlen benyttes til at bestemme den naturlige dybde, jf. formel (E.1). [Brorsen og Larsen, 2009, side 139-142]

$$Q = M \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot I_0^{1/2} \quad (\text{E.1})$$

$$A = b \cdot y_0 \quad (\text{E.2})$$

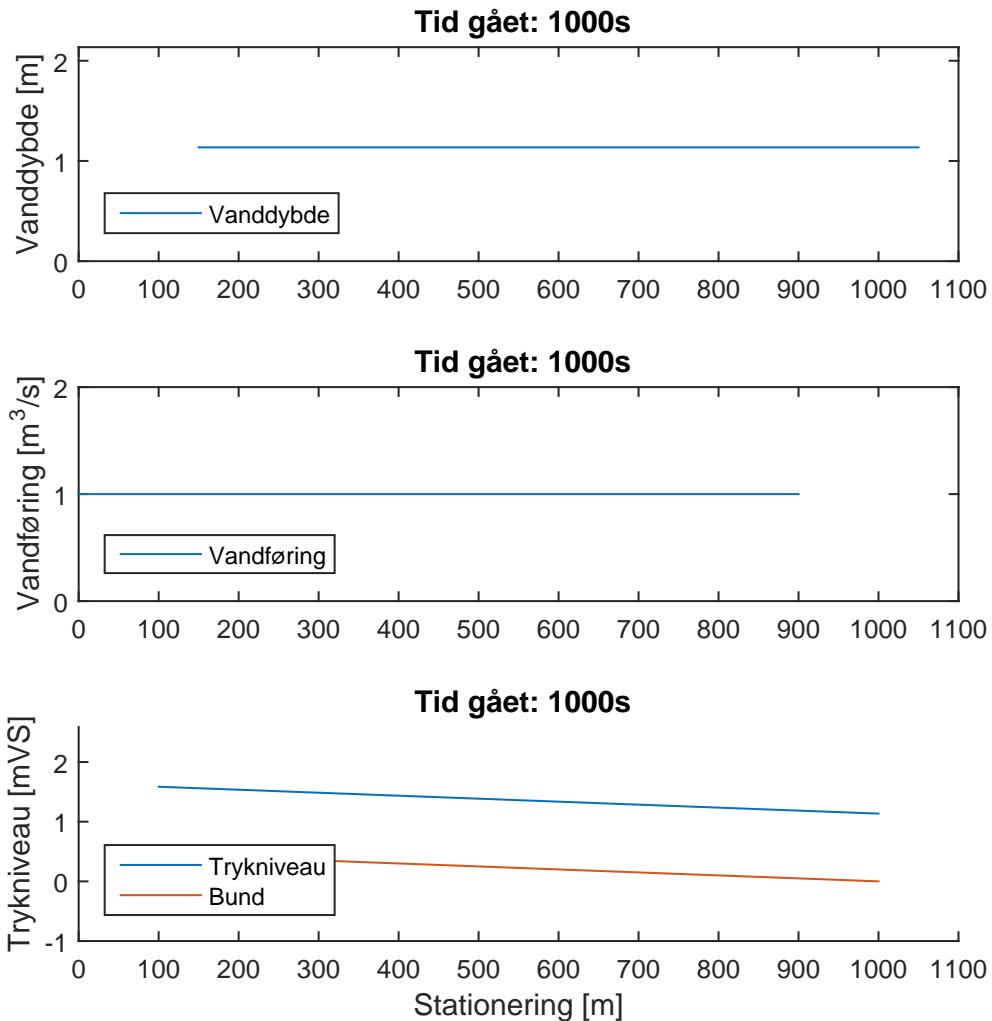
$$R = \frac{A}{b + 2 \cdot y_0} \quad (\text{E.3})$$

Hvor

$Q$	Vandføring [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$M$	Manningtal [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ]
$A$	Gennemstrømmet areal [ $\text{m}^2$ ]
$R$	Hydraulisk radius [m]
$I_0$	Bundhældning [-]
$b$	Bundbredde [m]
$y_0$	Naturlig dybde [m]

Det ses, at den naturlige dybde indgår i både det gennemstrømmende areal og den hydrauliske radius. Der itereres derfor for at finde den naturlige dybde. Den naturlige dybde bestemmes til 1,14 m.

Den naturlige dybde og vandføringen på  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  indsættes som begyndelsesbetingelser til alle stedsskridt og randbetingelse for alle tidsskridt. Som det fremgår af figur E.1, er dybden lig med den naturlige dybde til alle stedskridt. Denne har ikke rykket sig i hele beregningstiden, hvilket var forventeligt, hvorved det vurderes, at den hydrauliske model er i stand til at beregne naturlig dybde.

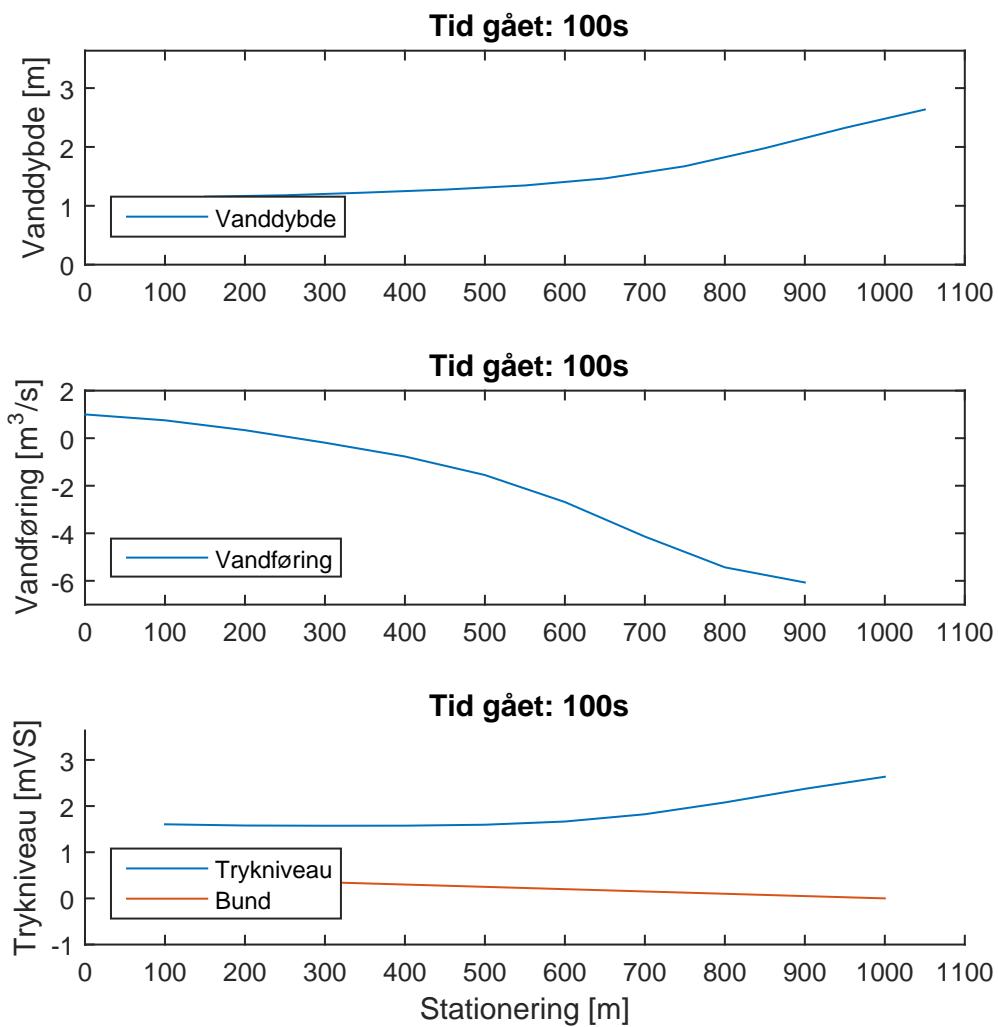


**Figur E.1.** Beregning af naturlig dybde i diffusiv bølgemodel. Beregning i 1000 sekunder.

## E.2 Opstuvning

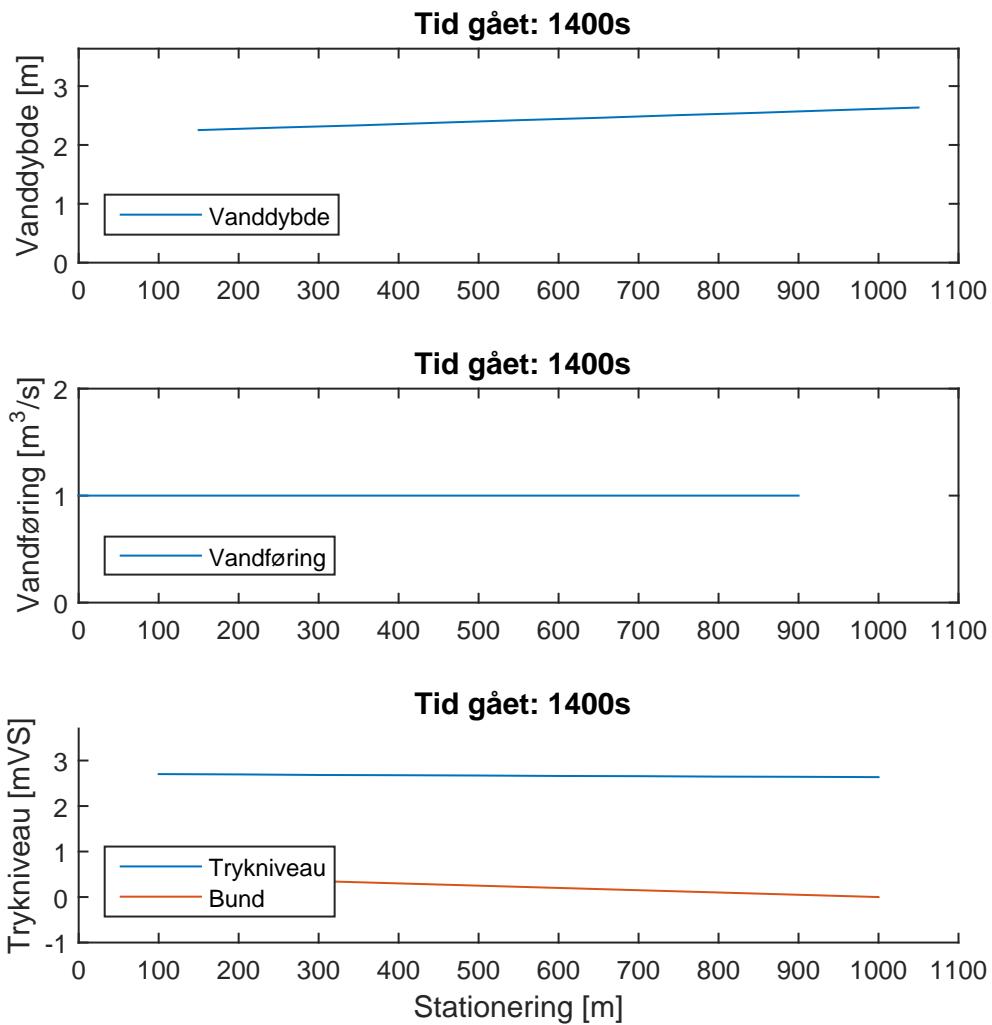
Der foretages en test med opstuvning i modellen, for at undersøge om modellen kan stabilisere sig efter en ændring på den nedre rand.

Opstuvningstesten udføres ved at starte beregningerne på samme måde som for testen med naturlig dybde. For at modellen ikke skal blive ustabil, nedsættes tidsskridtet til 0,1 sekund. Efter 10 sekunder hæves vanddybden ved nedre rand. Efter 50 sekunder er vanddybden øget med 1,5 m ift. naturlig dybde, og vanddybden fastholdes, til beregningerne er slut. På figur E.2 fremgår opstuvningen efter 100 sekunders beregning.



**Figur E.2.** Opstuvning i hydraulisk model efter 100 sekunder.

Det ses, at vandføringen er negativ. Dette skyldes, at vandet kan løbe begge veje i kanalen, hvilket sker, når vandstanden hæves ved den nedre rand. Efter 100 sekunder har systemet ikke nået at stabilisere sig. Det har det efter 1400 sekunder, jf. figur E.3. Det vurderes, at modellen kan beregne en opstuvning og stabilisere sig efterfølgende.

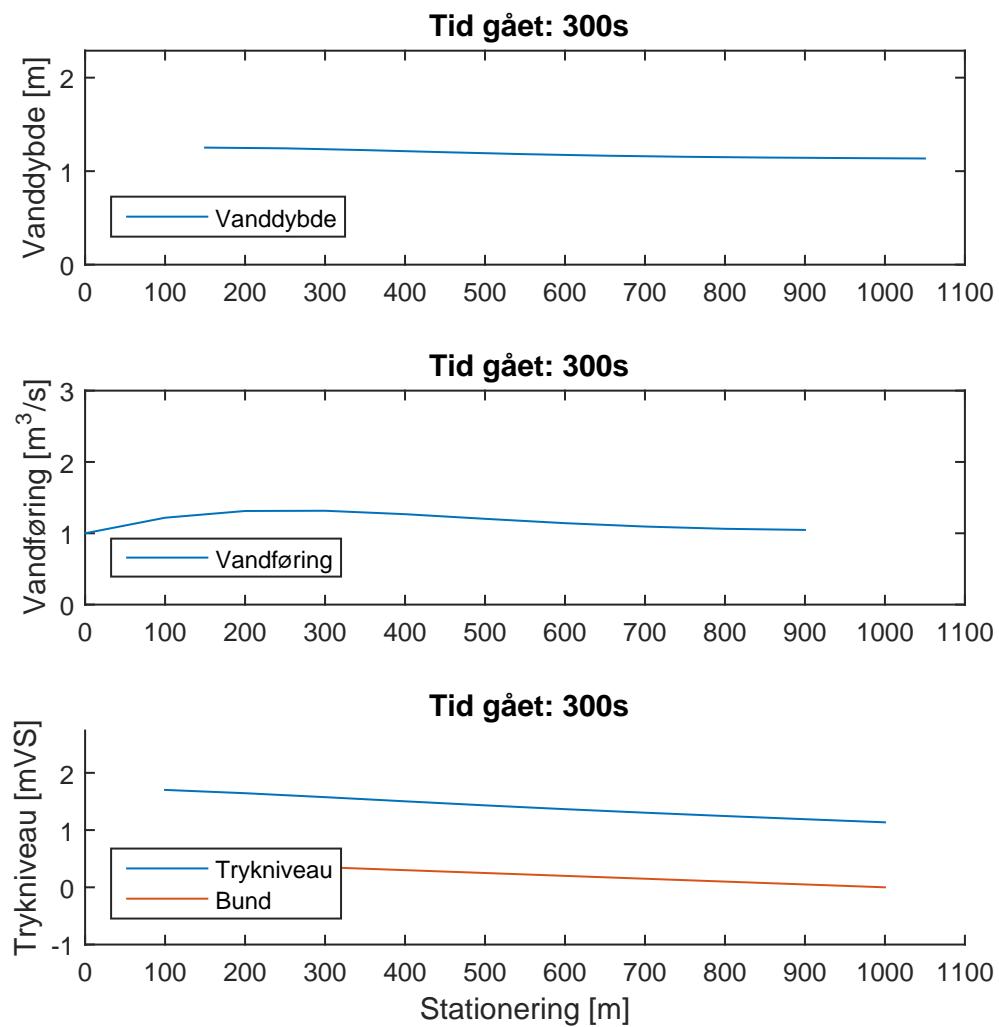


*Figur E.3.* Opstuvning i hydraulisk model efter 1400 sekunder.

### E.3 Bølge

Der laves en bølge i modellen ved at hæve og efterfølgende sænke vandføringen ved den øvre rand. Herved undersøges det, om modellen stabiliserer sig efter en ændring på den øvre rand, og om bølgen fortsætter nedstrøms og dæmpes. Der benyttes tidsskridt på 1 sekund.

Vandføringen øges til  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  fra 100-200 sekunder og sænkes igen til  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  fra 200-300 sekunder. Bølgen fremgår af figur E.4.

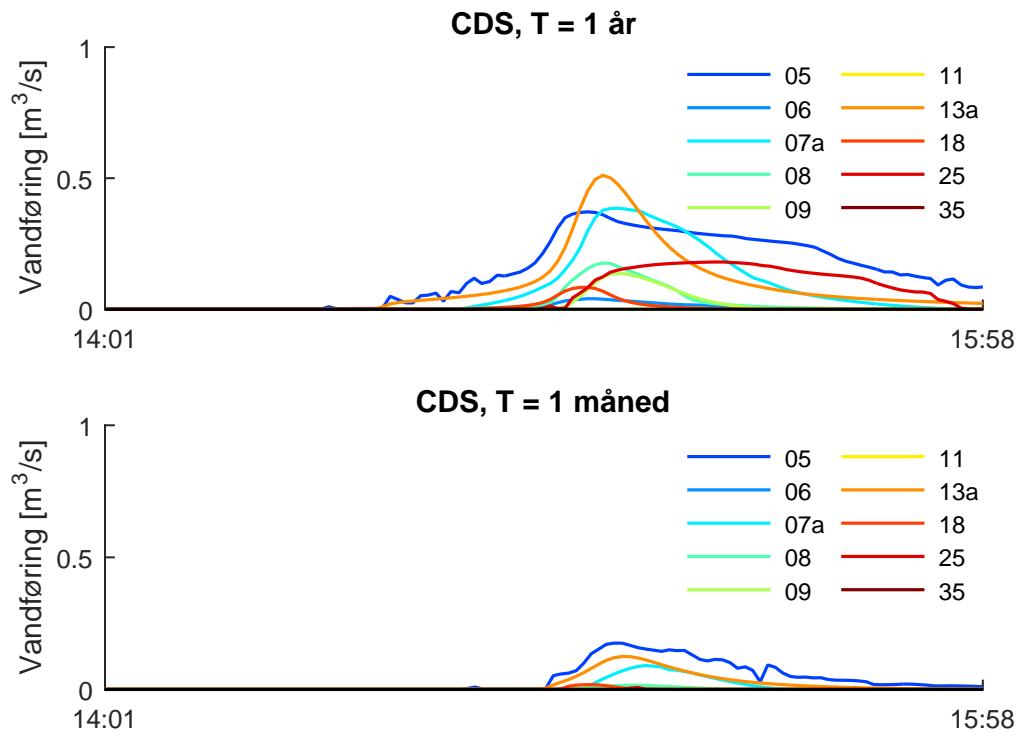


**Figur E.4.** Bølge i hydraulisk model efter 300 sekunder.

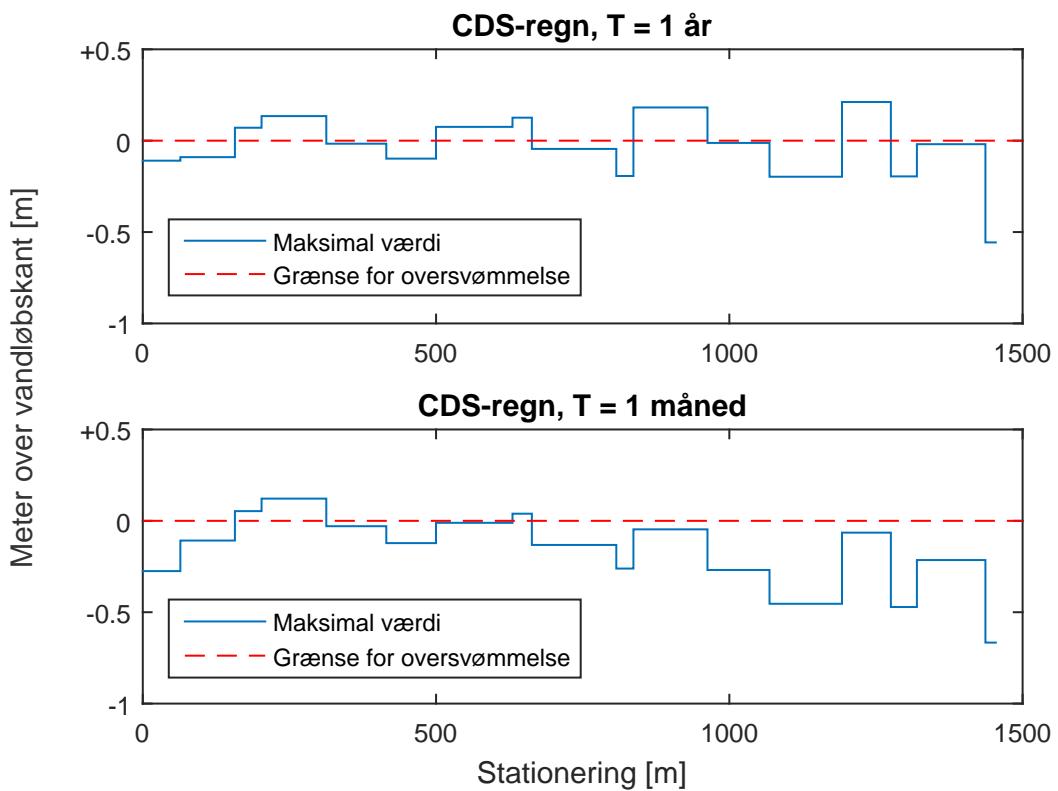
Det ses, at bølgen er reduceret til ca.  $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$  efter 300 m. Modellen er igen stabil og lig med naturlig dybde efter beregning i 4405 sekunder. Det vurderes, at modellen reagerer korrekt, da bølgen fortsætter nedstrøms, hvor den dæmpes undervejs og modellen efterfølgende stabiliserer sig.

# Kapacitetsanalyse af Guldbækken med CDS-regn

Overløbshydrograferne som følge af en 4-timers lang CDS-regn med gentagelsesperiode på hhv. 1 år og 1 måned ses på figur F.1. Oversvømmelsen som følge af CDS-regnene ses på figur F.2. Det ses, at der opstår resultater tilsvarende dem for de historiske regnhændelser.



*Figur F.1.* Overløbshydrograf for CDS-regnene.

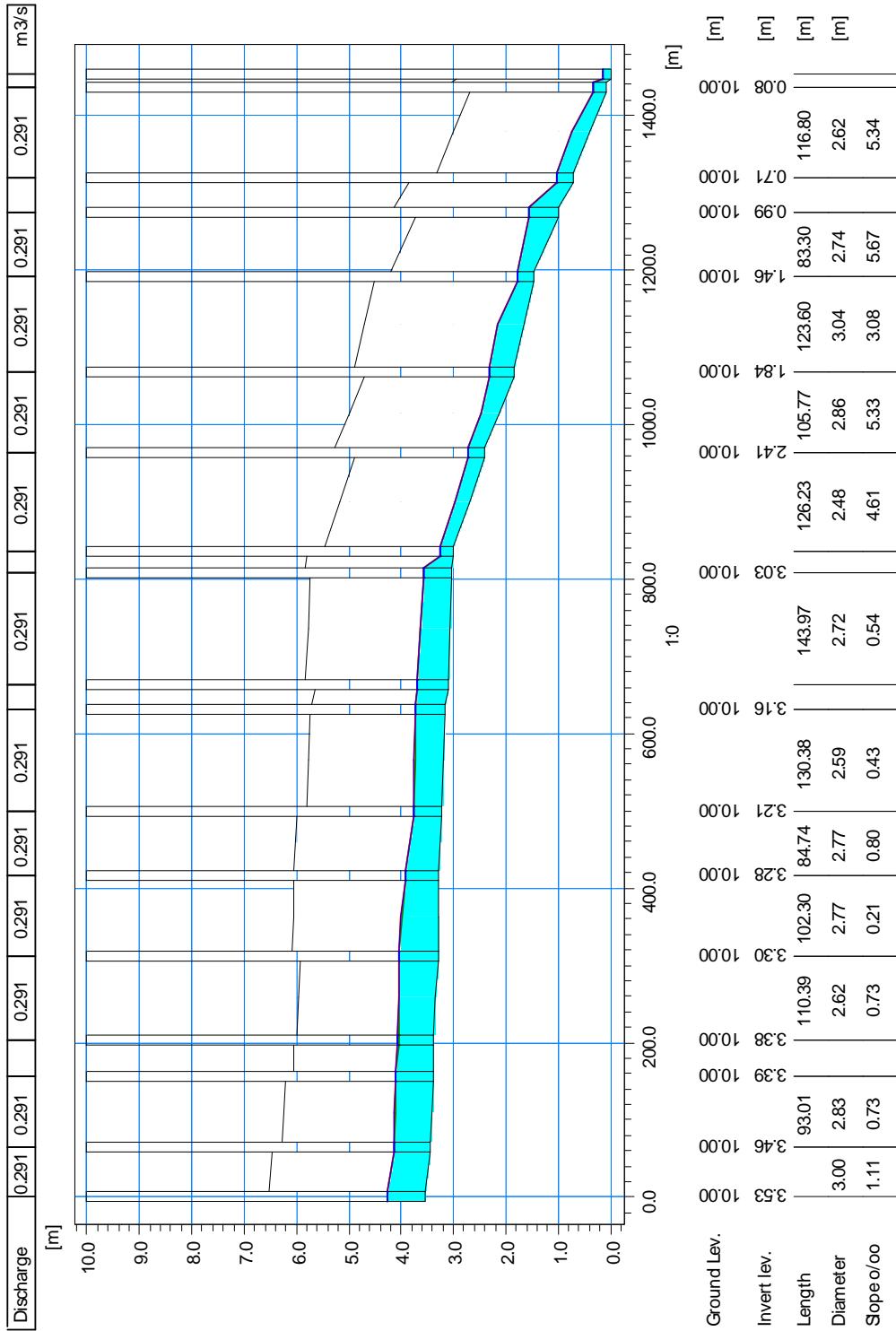


**Figur F.2.** Meter vand over vandløbskant ved CDS-regnene.

# Hydraulisk model i Mike

Urban

G



Figur G.1. Længdeprofil af hydraulisk model i Mike Urban.