

STYRING AF UDLEDNING FRA REGNVANDSBASSINER

Anne G. Jensen & Line B. Nørgaard

Kandidatspeciale

Vand & Miljø

7. Juni 2019



AALBORG UNIVERSITET



AALBORG UNIVERSITET

**Det Ingeniør- og
Naturvidenskabelige Fakultet**

Institut for Byggeri og Anlæg

Thomas Manns Vej 23

9220 Aalborg Øst

www.civil.aau.dk

Title:

Styring af udledning fra regnvandsbassiner

Projekttype:

Kandidatspeciale

Projektperiode:

1. februar 2019 - 7. juni 2019

Forfattere:

Anne Godiksen Jensen

Line Bønnelycke Nørgaard

Vejledere:

Anja Thrane Hejselbæk Thomsen

Jesper Ellerbæk Nielsen

Michael Robdrup Rasmussen

Sideantal: 82

Afsluttet: 7. juni 2019

Synopsis:

Dette afgangsprøveprojekt omhandler udledning fra regnvandsbassiner til vandløb. Det undersøges, hvorledes funktionen af regnvandsbassiner kan forbedres ved en aktiv styring af bassinudledningen. Undersøgelsen foretages på baggrund af et projektområde i Voldum beliggende i Favrskov Kommune, hvor der er et regnvandssystem med et forsinkelsesbassin. Bassinet har en udledningstilladelse på 0,3 l/s/ha total oplandsareal. Regnvandssystemet opbygges i en numerisk model, som danner grundlag for beregningerne i rapporten. Modellen anvendes til at simulere forskellige styringsstrategier for bassinudledning. Bassinstyringen har til formål at udnytte den samlede kapacitet i bassin og vandløb, og samtidig sikre, at vandløbet ikke belastes mere end ved en fast passiv udledning reguleret af vandbremse. De forskellige styringsstrategier tager i mindre eller større grad hensyn til vandløbets kapacitet. Det konkluderes, at en aktiv styring af bassinudledningen gør det muligt at tillede mere regnvand til et bassin og samtidig overholde en gentagelsesperiode for overløb på fem år. Såfremt der tillades en øget udløbsvandføring på 1,5 l/s/ha total oplandsareal i kritiske perioder, kan bassinet håndtere et dobbelt så stort opland, hvor alle overløbshændelserne i den beregnede periode på 11 år forhindres.

Forord

Dette kandidatspeciale er udarbejdet af afgangsstuderende Anne Godiksen Jensen og Line Bønnelycke Nørgaard, ved Vand og Miljø på Aalborg Universitet. Rapporten er skrevet i tidsperioden 1. februar 2019 til 7. juni 2019. Projektet har til formål at undersøge potentialet for aktiv styring af bassinudledning fra regnvandsbassiner. Undersøgelserne tager udgangspunkt i et projektområde i Favrskov Kommune.

Der skal rettes en stor tak til Michael Robdrup Rasmussen, Jesper Ellerbæk Nielsen og Anja Thrane Hejselbæk Thomsen for inspirerende og konstruktiv vejledning gennem projektperioden. Tak til samtlige vejledere for forsyning af data og materiale, samt gode råd og sparring gennem hele projektperioden. For hjælp med feltarbejde, i form af vejledning til brug af udstyr og målemetoder ved projektområdet, rettes tak til Anja.

Abstract

This master's thesis investigates how the utilization of the capacity in stormwater detention ponds can be improved. The focus in this project is discharge from wet detention ponds to streams. The discharge of the wet detention pond is limited to 0,3 l/s/ha total catchment area. During this project it is analyzed whether it is possible to improve the functionality of a wet detention pond by implementing different control strategies for the discharge.

The study is based on a project location in Favrskov Kommune, where a wet detention pond is located. The stormwater system at the project location is described in a numerical model, which forms the basis of the calculations in this report. Various control strategies are simulated throughout the project. The purpose is to improve the utilization of the capacity of the stormwater detention pond without further burdening the receiving stream. The hydraulic capacity of the stream is considered in different extends throughout the various control strategies.

It is possible to discharge more stormwater to a detention pond, and still comply with the design criteria, by implementing a control strategy for the discharge. The objective of the control strategies is to utilize the total capacity of the wet detention pond and the receiving stream, whilst ensuring that no further harm is done to the stream compared with the existing strategy. When allowing a discharge equivalent to 1,5 l/s/ha during critical time periods, the same detention pond can handle twice the catchment area and all overflow events are prevented.

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1	Introduktion	1
1.1	Opbygning og funktion af regnvandsbassiner	1
1.2	Administrationspraksis for regnvandsbassiner	3
1.3	Problemformulering	5
1.4	Løsningsstrategi	5
1.5	Projektområde i Voldum	6
Kapitel 2	Numerisk model af regnvandsbassin	11
2.1	Modelopbygning	11
2.2	Vandføringsdata for vandløb	15
2.3	Sammenligning af vandføringsdata	17
Kapitel 3	Modellering af eksisterende regnvandsbassin	21
3.1	Hydraulisk vandløbspåvirkning	23
3.2	Delkonklusion	24
Kapitel 4	Fremtidig forøgelse af bassinopland	27
4.1	Effekt af øget udledningstilladelse	28
Kapitel 5	Bassinstyring på baggrund af restkapacitet i vandløb	33
5.1	Styringsstrategi 1: Maksimal udnyttelse af vandløbskapacitet	34
5.2	Styringsstrategi 2: Sæsonvarieret udnyttelse af vandløbskapacitet	37
5.3	Delkonklusion	40
Kapitel 6	Bassinstyring ved sammenspil mellem vandløbsbelastning og bassinkapacitet	41
6.1	Styringsstrategi 3: Udledning i afgrænset interval	41
6.2	Styringsstrategi 4: Øget udløbsvandføring ved kritisk vandstand	45
6.3	Delkonklusion	47
Kapitel 7	Bassinstyring ved udnyttelse af det permanente volumen	49
7.1	Styringsstrategi 5: Udnyttelse af permanent volumen	49
7.2	Styringsstrategi 6: Kontrolleret overløb	53
7.3	Delkonklusion	56
Kapitel 8	Konklusion	57
Kapitel 9	Perspektivering	59
Litteratur		61
Bilag A	Elektronisk bilag	63
Bilag B	Reduceret areal af bassinopland	65
Bilag C	Naturlig dybde i Revens Møllebæk	67
Bilag D	Q-h relation for Revens Møllebæk	69

1. Introduktion

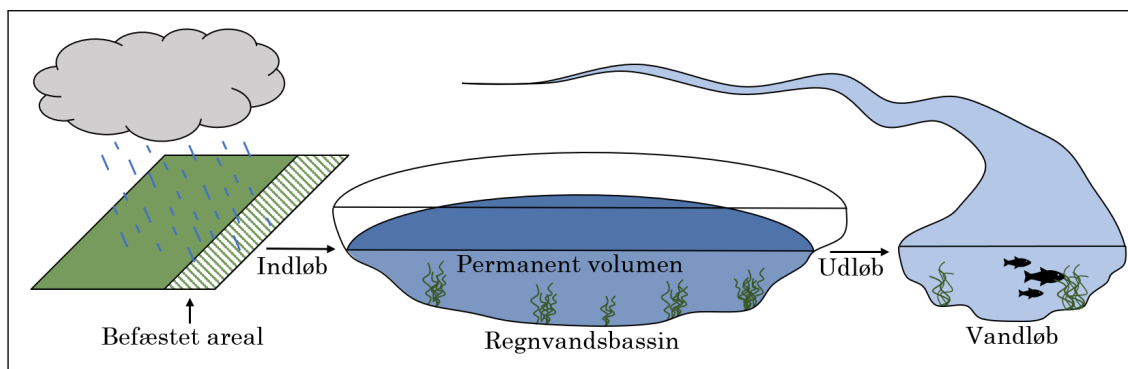
Vandløb i Danmark benyttes i høj grad til at aflede regnvand, både fra dyrkede arealer via drænelinger, og fra befæstede arealer i byområder via kloaksystemet. Derved udgør de danske vandløb en stor rolle i håndtering og afledning af regnvand. I fremtiden forventes det, at ekstreme regnhændelser forekommer hyppigere, som følge af klimaforandringer, hvilket stiller krav til håndtering af regnvand i byområder [Miljøstyrelsen, 2015]. Den del af nedbøren som lander på befæstede arealer, skal hurtigt og effektivt ledes til nærtliggende vandområder. Ved aflastning til vandløb er der ikke som udgangspunkt kapacitet til at håndtere nedbørsmængderne fra de befæstede arealer uforsinket. Der er derfor et behov for at kontrollere belastningen til vandløbet. I dag findes der rundt omkring i Danmark store magasineringsvolumener i form af regnvandsbassiner, som har til formål at samle og forsinke regnvand, som falder på befæstede arealer.

Fra slutningen af 1800-tallet til i dag, er Danmarks befæstede areal næsten femdoblet [Levin og Normander, 2008]. Det forventes at der, som følge af befolkningstilvækst og urbanisering, i fremtiden er et større befæstet areal [Arler et al., 2017]. På baggrund af dette, samt hyppigere og mere ekstreme regnhændelser, skal der i fremtiden håndteres mere regnvand. Eksisterende bassiner vil blive udfordret, og nye bassiner vil være mere pladskrævende. Derved er nødvendigheden af effektiv regnafledning stigende.

Det er almen praksis at anlægge et regnvandsbassin i forbindelse med håndtering af regnvand i nye boligområder og ved separatkloakering af eksisterende områder. Der findes omkring 15.000 separate regnbetingede udledninger i Danmark, hvoraf omtrent 23 % er tilkoblet et regnvandsbassin [Miljøstyrelsen, 2016]. Udledningen af regnvand fra bassin til vandløb foregår ved en passiv udledning fastsat på baggrund af en udledningstilladelse. Passiv udledning indebærer ofte, at udløbsvandføringen reguleres af en vandbremse, som styres af trykhøjden i bassinet. I dette projekt undersøges, hvordan udnyttelsesgraden af de eksisterende bassiner kan øges ved at implementere en aktiv styring af bassinudledningen. Herved kan bassiner tilpasses den øgede urbanisering og fremtidige klimascenarier. En aktiv styring af regnvandsbassiner åbner op for nye dimensioneringsforudsætninger, og smartere løsninger til håndtering af nedbør i fremtiden.

1.1 Opbygning og funktion af regnvandsbassiner

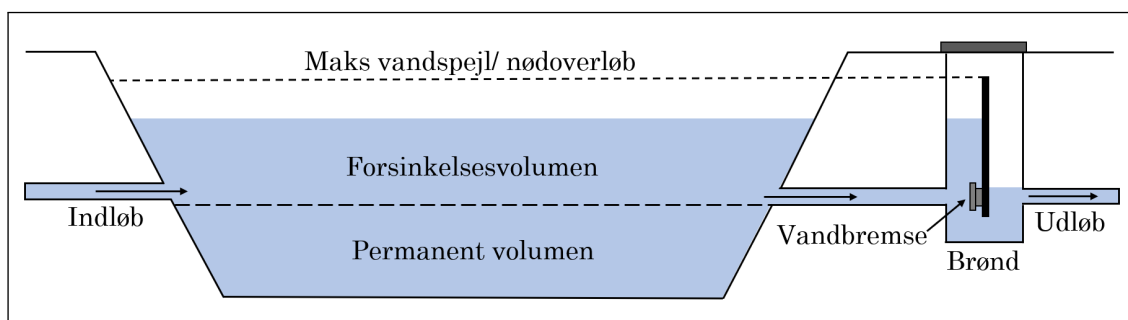
Regnvandsbassiner har et opland bestående af et bebygget område, hvor permeabelt jord er erstattet med tage, asfalt, og anden impermeabel belægning, hvorved nedsivning ikke længere kan finde sted. For at befæstede arealer ikke oversvømmes, når det regner, føres regnvandet, via afløbssystemet, væk fra overfladen og til et regnvandsbassin. Regnvandsbassiner har til formål at beskytte recipienten mod hydraulisk og stofmæssig belastning. Der etableres både våde og tørre bassiner, hvor der i dette projekt tages udgangspunkt i et vådt regnvandsbassin. Af figur 1.1 fremgår et systemoverblik, hvor der indgår et vådt bassin til håndtering af nedbør fra befæstede arealer.



Figur 1.1. Principiel opbygning af afledning af regnvand fra befæstet areal, når det forsinkes af et vådt regnvandsbassin, inden det ledes til et vandløb.

I bassinoplandet finder forskellige aktiviteter sted, som giver anledning til frigivelse af miljøfremmede stoffer. De miljøfremmede stoffer vaskes væk fra overfladen og føres med nedbøren til regnvandssystemet. I separate systemer føres regnvand til et forsinkelsesbassin og herefter til en recipient, hvorved miljøfremmede stoffer potentielt kan ende i recipienten. I Vandrammedirektivet, som har til formål at beskytte vandområderne i EU, er det bestemt, at EU-medlemslande er forpligtet til at reducere forurening af vandmiljøet. Landene er ansvarlige for at foretage nødvendige foranstaltninger for at begrænse udledning af miljøfremmede stoffer [Europaparlamentet, 2000]. Et regnvandsbassin er et eksempel på en sådan foranstaltning.

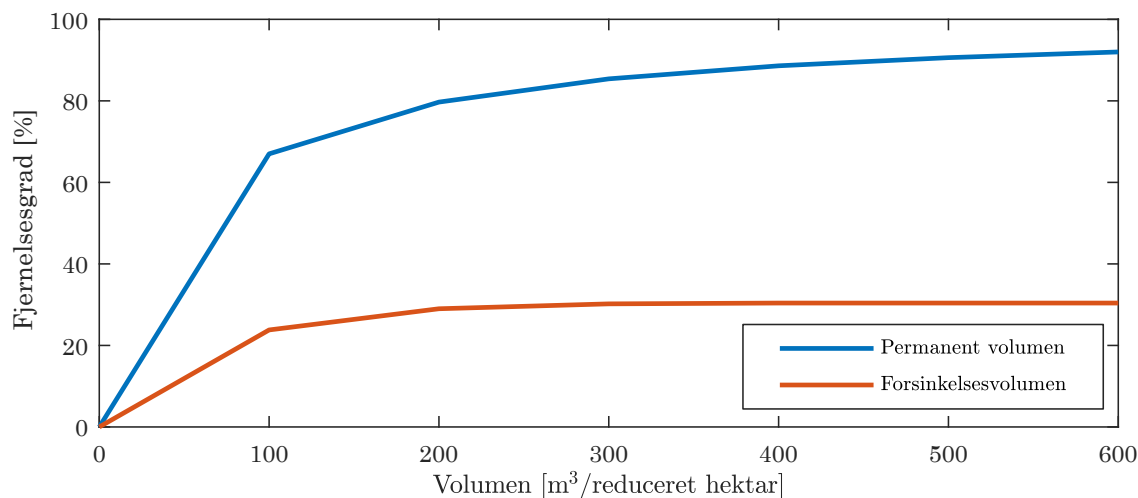
I Danmark designs regnvandsbassiner som udgangspunkt ud fra et hydraulisk perspektiv, og der ønskes ofte en gentagelsesperiode for overløb på fem år. Regnvandet tilbageholdes midlertidigt i bassinet, inden det ledes til en recipient med en kontrolleret vandføring. Overløbs-hændelser kan have store konsekvenser for det modtagende vandområde samt bassinet. I våde bassiner deles bassinvolumenet op i et permanent vandvolumen og et forsinkelsesvolumen. I det permanente volumen opnås en god renseeffekt for miljøfremmede stoffer, og volumenet over det permanente vandspejl fungerer som forsinkelsesvolumen. [Vollertsen et al., 2012] På figur 1.2 fremgår en illustration af et vådt regnvandsbassin, hvor udløbsvandføringen til recipient begrænses af en vandbremse placeret i en brønd.



Figur 1.2. Illustration af forsinkelsesbassin med et permanent volumen, og en vandbremse som begrænser udløbsvandføringen.

Forsinkelsesvolumenet har begrænset indflydelse på bassinets renseegenskaber. Der anbefales et permanent volumen på 200-300 m³ pr. hektar reduceret areal, som alene udgør en rensning af suspenderet stof på op til 85 %. En yderligere forøgelse af det permanente volumen har en beskeden effekt på renseevnen, ligesom forsinkelsesvolumenet er af mindre betydning. [Vollertsen

et al., 2012] På figur 1.3 fremgår fjernelsesgraden af suspenderet stof, for både det permanente volumen og forsinkelsesvolumenet, afhængig af bassinstørrelsen.



Figur 1.3. Fjernelsesgraden af suspenderet stof afhængig af henholdsvis størrelsen på forsinkelsesvolumenet og det permanente volumen. Estimeret på baggrund af programmet WDP (Wet Detention Ponds) [Vollertsen, 2017].

I dette projekt er der fokus på udledning af separat regnvand fra regnvandsbassiner til vandløb. Mange af de naturlige mæandrerende danske vandløb, som fandtes førhen, er rettet ud og gravet dybere for at udnytte dem til afvanding. Det er sket i takt med, at arealanvendelsen i Danmark har ændret sig fra naturområder til landbrug og by. Kanaliseringen af vandløbene har effektiviseret afstrømningen, men konsekvensen er ofte en nedgang i den økologiske tilstand [Rasmussen et al., 2018].

Der opstår modstridende interesser, idet vandløb både er levested for dele af det danske dyre- og planteliv og samtidig skal sikre afstrømningen fra byer, skove og dyrkede arealer. Det blev i 1982 bestemt, at vandløbenes fysiske kvaliteter skal genskabes for at fremme dyre- og plantelivet [Madsen et al., 2006]. I år 2000 er det i EU's Vandrammedirektiv bestemt, at vandløb skal have en god økologisk tilstand [Europaparlamentet, 2000]. God økologisk tilstand er udtryk for en svag afvigelse fra en tilstand, hvor recipienten er upåvirket, og for vandløb er det tilstedeværelsen af invertebrater, fisk og planter, der afgør dette.

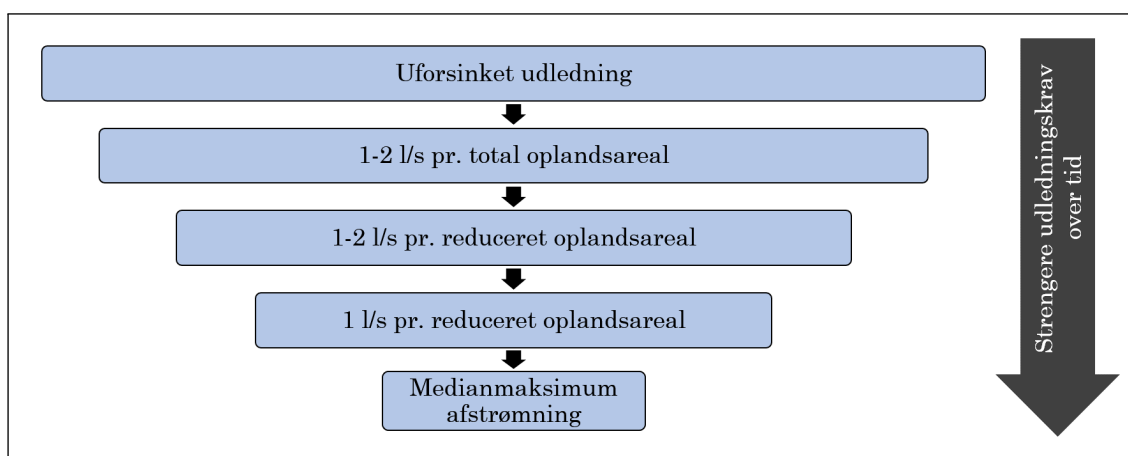
Når der anlægges regnvandsbassiner med udledning til vandløb, skal der i designet og dimensioneringen af bassinet tages højde for, at store hydrauliske og stofmæssige belastninger kan give anledning til negative påvirkninger i vandløbet. Flora og fauna kan vaskes ud ved for høj hydraulisk belastning, og en stor stofmæssig belastning kan have konsekvenser for vandkvaliteten. I dag arbejdes der stadig på vandløbsrestaurering i den danske natur, hvilket vidner om en interesse i at bevare og beskytte vandløbene [Miljøstyrelsen, 2019].

1.2 Administrationspraksis for regnvandsbassiner

Ved udledning fra regnvandsbassiner til vandløb, skal den pågældende kommune give en udledningstilladelse, som skal sikre, at recipienten ikke overbelastes. I denne forbindelse skal Miljøbeskyttelsesloven kapitel 4 overholdes, hvor det fremgår, at der ikke må tilføres stoffer til en recipient, som er skadelig for denne [Miljøstyrelsen, 2018]. Ved udledning til vandløb

skal BAT-princippet (Best Available Techniques) for separate udledninger overholdes. Dette er gældende for bassinudledning, idet der er tale om en diffus forureningskilde, som er bestemt af aktiviteter i oplandet. Der er derfor ikke krav til stofkoncentrationer i udledningen, som det eksempelvis er tilfældet ved udledning fra renseanlæg. [DANVA, 2018]

Retningslinjerne for udledning af overfladevand er dannet ud fra rammerne i Miljøbeskyttelsesloven og Spildevandsbekendtgørelsen. Udledningstilladelser afhænger som regel af recipientfølsomheden, hvor det længe har været almen praksis, at der maksimalt må udledes en vandføring svarende til 1 l/s/ha reduceret oplandsareal. I nogle tilfælde kan det være nødvendigt at udlede til et følsomt vandområde, hvor der gives udledningstilladelser på mindre end 1 l/s/ha reduceret oplandsareal. Danmark har siden 1980'erne skærpet de miljømæssige krav til beskyttelse af overfladevand, gennem miljøplanlægning i form af vandplanerne. Øget fokus på miljøpåvirkningen har resulteret i strengere krav for udledning til vandløb, hvilket fremgår af figur 1.4. [Naturstyrelsen, 2014]



Figur 1.4. Krav for udledning til overfladevand er blevet strengere over tid. Data fra Naturstyrelsen [2014].

I 2014 blev det afgjort i Natur- og Miljøklagenævnet, at udledninger skal tage udgangspunkt i den naturlige afstrømning i vandløbet. Enten svarende til medianmaksimum vandføringen eller på baggrund af en vurdering af vandløbets hydrauliske kapacitet. Medianmaksimum vandføringen er den største naturligt forekommende vandføring med en to års gentagelsesperiode. Den bestemmes ved at beregne medianen af maksimumværdierne for afstrømningen hvert år. [DANVA, 2018]

Det tillades ofte, at der fra det pågældende bassinopland må udledes tilsvarende medianmaksimum vandføringen i l/s/ha, hvor der som regel tages udgangspunkt i det reducerede areal [DANVA, 2018]. Metoden kræver, at der foretages vandføringsmålinger i det pågældende vandløb, og der anbefales en måleperiode på de seneste 30 år som referenceperiode [Ovesen et al., 2000]. I Danmark findes der ikke målestationer i alle vandløb. De fleste målestationer er placeret i de større vandløb og ofte foretages ikke vandføringsmålinger men kun måling af vandstanden. Derved kan der ikke altid fastsættes en medianmaksimum vandføring, og i nogle tilfælde benyttes en estimeret værdi på baggrund af lignende vandløb, når der skal gives en udledningstilladelse.

Ved at bestemme udledningstilladelsen på baggrund af medianmaksimum vandføringen, op-

nås ofte udledningstilladelser lavere end 1 l/s/ha reduceret oplandsareal. Lave udledningstilladelser resulterer i lange tømmetider i bassinet, hvorved der er risiko for akkumulering af nedbøren. Det kræver store bassinvolumener med høje etableringsomkostninger. Det forventes, at regnvandsbassiner kan udnyttes bedre, hvis der indføres en mere målrettet aktiv udledningsstrategi fremfor en passiv bassinudledning. Herved kan den hydrauliske kapacitet af vandløb og bassin bestemme udløbsvandføringen til vandløbet. Det kan muliggøres ved at implementere en regulerbar vandbremse i bassinerne til styring af udløbsvandføringen til det modtagende vandområde.

1.3 Problemformulering

I dette projekt ønskes det at undersøge potentialet for en styret udledning fra regnvandsbassiner til vandløb. Styring giver mulighed for at tilgodese det enkelte afløbssystem, og dermed opnå en mere effektiv afledning af regnvand. I udviklingen af en regulerbar vandbremse er Favrskov Forsyning, Mosbaek, Aalborg Universitet og Orbicon gået sammen om projektet Re-LeVand (Regulerbar Lavenergi Vandbremse). Projektets formål er at optimere udnyttelsen af fremtidige og eksisterende bassinvolumener ved at udvikle en ny type vandbremse. Som resultat af implementeringen af en regulerbar vandbremse forventes det, at fremtidens bassiner kan dimensioneres mindre. For eksisterende bassiner forventes det, at bassinvolumenet kan udnyttes bedre og gentagelsesperioden for overløb øges.

I forbindelse med udviklingen af en ny type vandbremse er det nødvendigt at undersøge, hvorvidt det er fordelagtigt at implementere en styringsstrategi for udledningen. Det ønskes, at regnvand fra befæstede arealer fremover udledes hurtigere til vandløbet, således at der ofte er et større effektivt volumen til rådighed. Det kræver undersøgelser af styringsstrategier for udledning, samt undersøgelser af vandløbspåvirkningen. På denne baggrund kan det vurderes, hvorvidt reguleret udledning fra forsinkelsesbassiner har potentiale for fremtidens bassinpraksis. Dette leder til følgende problemformulering:

Hvordan kan udnyttelsen af den hydrauliske kapacitet i et regnvandsbassin forbedres ved aktiv styring af bassinudledningen?

1.4 Løsningsstrategi

For at besvare problemformuleringen undersøges et regnvandssystem med et forsinkelsesbassin, som aflaster til et vandløb. Der tages udgangspunkt i et regnvandssystem baseret på et projektområde i Voldum beliggende i Favrskov Kommune, og det danner grundlag for alle undersøgelser i denne rapport. For at undersøge potentialet for en aktiv styring af bassinudledning, opstilles en numerisk model af regnvandssystemet, hvor forskellige strategier for bassinudledning simuleres.

Alle undersøgelser i rapporten tager udgangspunkt i regnvandsbassinet ved projektlokaliteten. Dog vil oplandet, som bidrager til bassinet, igennem projektet forøges for at vise, hvordan styringsstrategierne kan bruges til at effektivisere et eksisterende bassin. Den overordnede fremgangsmåde for denne rapport beskrives nedenfor.

- Numerisk model af regnvandssystem

Der opbygges en numerisk model af regnvandsbassinet ved projektlokaliteten, som er baseret på et massebevarelsesprincip.

- **Det eksisterende regnvandssystem modelleres**

Den numeriske model anvendes til at undersøge den hydrauliske kapacitet i det eksisterende regnvandssystem med den givne udledningstilladelse i projektområdet.

- **Forøgelse af bassinopland**

Bassinoplandet forøges for at udfordre bassinets hydrauliske kapacitet, og dermed skabe et potentiale for at forbedre bassinets kapacitet ved implementering af styringsstrategier.

- **Styringsstrategier for bassinudledningen**

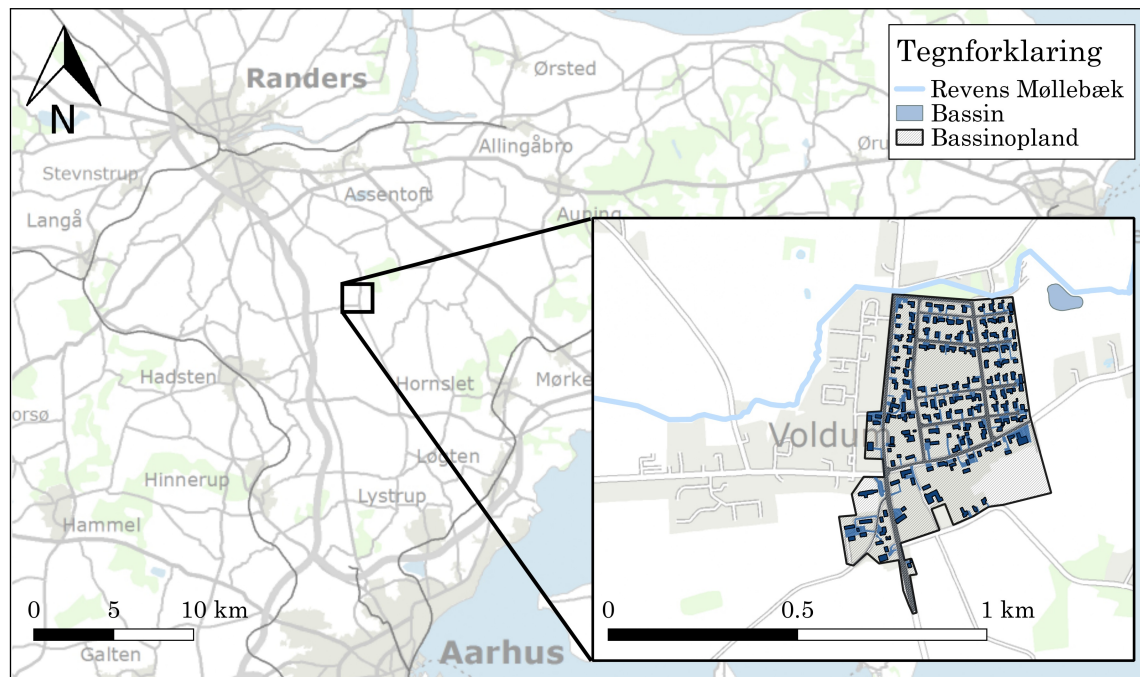
Der implementeres seks forskellige styringsstrategier i den numeriske model. Styringsstrategierne har til formål at forbedre regnvandsbassinets hydrauliske kapacitet uden, at det medfører en u hensigtsmæssig vandløbsbelastning. Styringsstrategierne der undersøges kan opdeles i tre grupper:

1. Først undersøges to ekstremer i forhold til vandløbsbelastningen. Der undersøges en situation, hvor vandløbet belastes meget, og en situation, hvor vandløbet beskyttes mest muligt. Dette har til formål at finde grænserne for henholdsvis kapaciteten i bassinet og kapaciteten i vandløbet.
2. Dernæst undersøges udledningsstrategier, hvor der opnås et kompromis mellem kapaciteten i bassinet og kapaciteten i vandløbet.
3. Til sidst undersøges, hvordan der kan vindes ekstra kapacitet i bassinet ved at udnytte det permanente bassinvolumen.

I projektet fokuseres udelukkende på det hydrauliske aspekt inden for udledning fra regnvandsbassiner til vandløb, hvorfor der ikke tages hensyn til rensningen af regnvandet i bassinet.

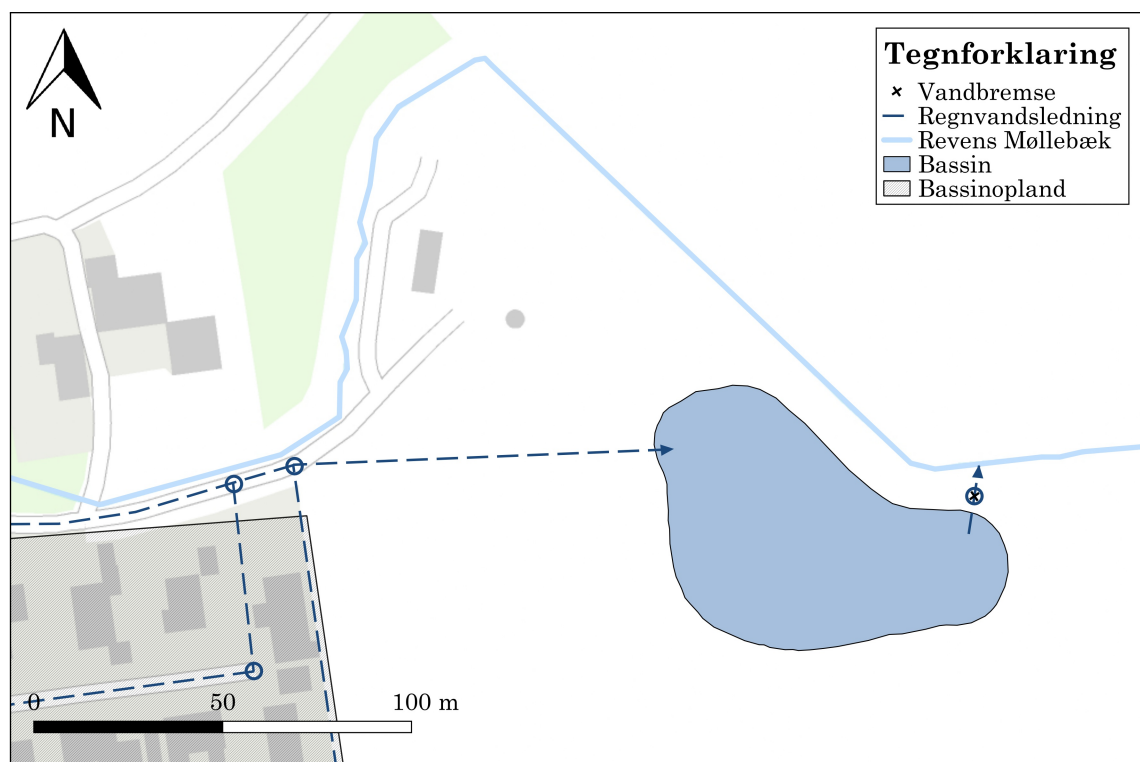
1.5 Projektområde i Voldum

I dette projekt indgår et projektområde, hvor potentialet for implementering af styringsstrategier for bassinudledning, kan testes. I forbindelse med ReLeVand er et nyanlagt regnvandsbassin i landsbyen Voldum udpeget som testområde. Voldum ligger i Midtjylland sydøst for Randers, i Favrskov Kommune. Bassinet har et permanent volumen, og det aflaster til vandløbet, Revens Møllebæk. På figur 1.5 fremgår projektområdet Voldum.



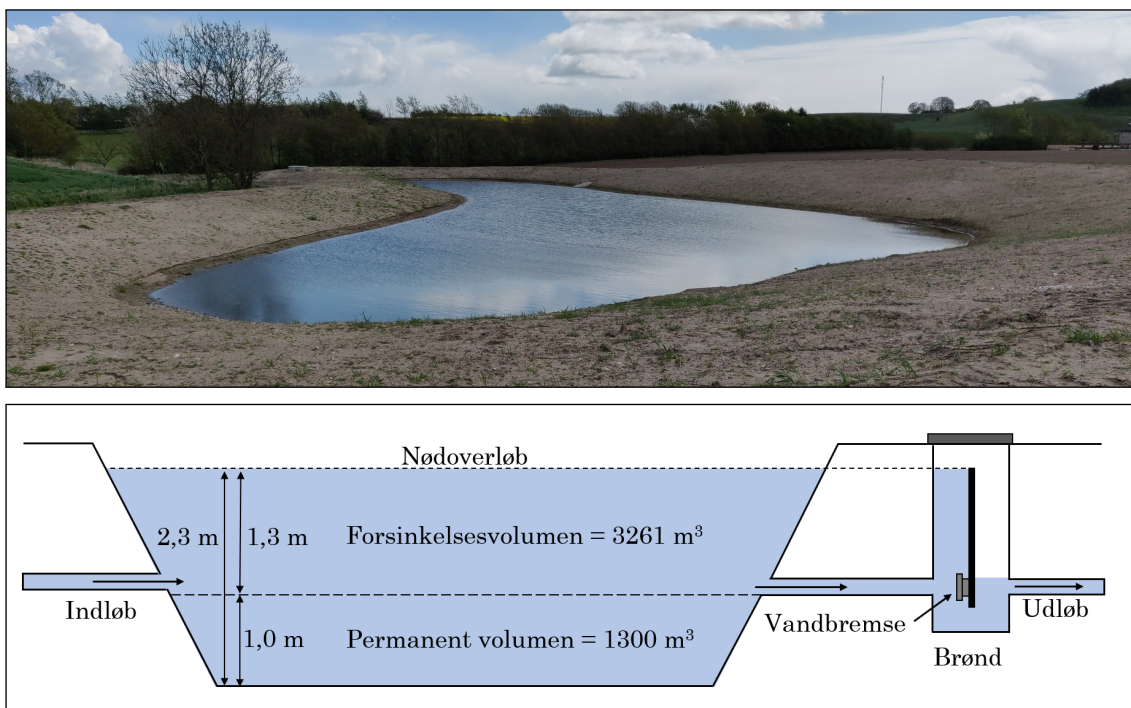
Figur 1.5. Beliggenhed af projektområdet, Voldum.

Af figur 1.5 fremgår bassinoplandet, hvor det totale oplandsareal er 27 hektar og består af en stor del af Voldum by. Oplandstypen kan kategoriseres som villakvarter, og der findes et stort grønt område midt i oplandet. Det reducerede areal er bestemt til 6,5 hektar i bilag B. Placering af det nyanlagte regnvandsbassin fremgår af figur 1.6, hvor ind- og udløb fra bassinet ligeledes fremgår.



Figur 1.6. Placering af regnvandsbassin i Voldum.

Regnvandsbassinet er anlagt i 2018 i forbindelse med separatkloakering af Voldum, som blev påbegyndt i marts 2017 og forventes afsluttet i december 2020 [Favrskov Forsyning, 2017]. Bassinet er et åbent jordbassin med et anlæg på fem. I forbindelse med etablering af bassinet i Voldum, har Favrskov Kommune tildelt en udledningstilladelse på 0,3 l/s/ha total oplandsareal. I dette projekt tages der udgangspunkt i denne udledningstilladelse, hvilket, på baggrund af oplandsarealet på 27 hektar, svarer til en udløbsvandføring på 8 l/s. I forbindelse med udledningstilladelsen er der tildelt yderligere 9 l/s for at kompensere for drænaflledning, hvorved der i alt må udledes 17 l/s. I dette projekt ses bort fra drænaflledning og dermed tages der udelukkende hensyn til afstrømningen fra Voldum by. Bassinet fremgår på figur 1.7, hvor der ligeledes er illustreret en principskitse, hvor volumener og vandspejlshøjder for bassinet fremgår.



Figur 1.7. Regnvandsbassin i Voldum og principskitse af bassinet med en vandbremse [Favrskov Forsyning, 2018].

Som det er vist på figur 1.7, reguleres bassinudløbet med en vandbremse, som begrænser udledningen til maksimalt 8 l/s. Der er benyttet en centrifugalvandbremse, som bremser vandet ved hjælp af centrifugalkraft. Det fungerer ved, at øget trykniveau i bassinet får vandet i vandbremsen til at rotere, hvilket resulterer i et energitab og derved en passende modstand tilsvarende den ønskede udledning. [Mosbaek, 2019] Vandbremsen i Voldum er vist på figur 1.8.



Figur 1.8. Vandbremse i brønd placeret i forbindelse med udløbet fra regnvandsbassinet i Voldum.

Bassinet har udløb til vandløbet, Revens Møllebæk, som fletter sammen med Skader Å. Bassinudløbet er vinklet med strømningsretningen i vandløbet og er sikret med sten omkring røret, udløbet fremgår på figur 1.9.



Figur 1.9. Udløb fra regnvandsbassinet til Revens Møllebæk.

Revens Møllebæk nedstrøms bassinudløbet fremgår på figur 1.10. Vandløbet har høje brinke, relativt til vandstanden på figuren. Billedet er taget i slut maj, hvorfor der er meget bevoksning langs vandløbet.

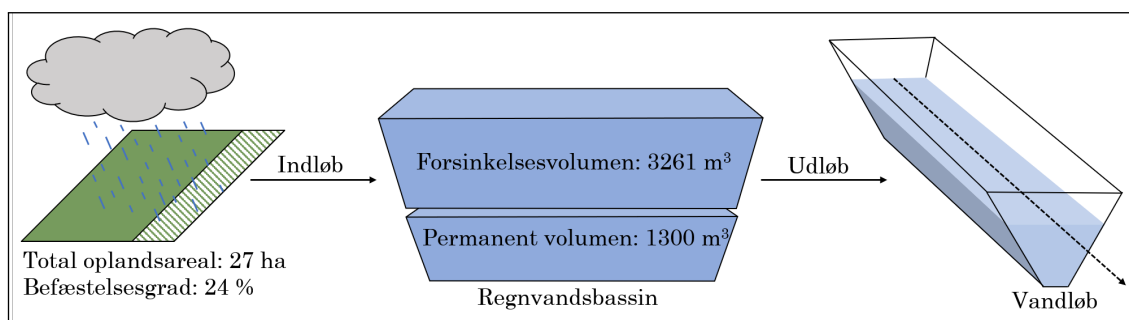


Figur 1.10. Revens Møllebæk nedstrøms bassinudløbet, 22. maj 2019. Pæl til at holde vandstandsmåler fremgår ligeledes på billedet.

I forbindelse med projektet ReLeVand er der i maj 2019 opstillet tre vandstandsmålere, én opstrøms bassinudløbet, én nedstrøms udløbet og én i bassinet. Tidligere har der ikke været målestationer for vandstand eller vandføring i hverken Revens Møllebæk eller Skader Å, til gengæld er der foretaget klassificering af den økologiske tilstand i begge vandløb. Revens Møllebæk er klassificeret som værende i moderat økologisk tilstand og Skader Å har høj økologisk tilstand [Danmarks Miljøportal, 2019]. Dette vidner om en interesse for at beskytte vandløbet.

2. Numerisk model af regnvandsbassin

Med udgangspunkt i systemet i Voldum opbygges en numerisk model af regnvandssystemet. Formålet med modellen er at undersøge funktionen af det eksisterende system samt at undersøge mulighederne for en styring af bassinudledningen. Systemet i modellen baseres som nævnt på projektlokaliteten i Voldum, hvorfra bassindimensioner, oplandsdata og udledningstilladelse anvendes. Princippet, som ligger til grund for modellen, fremgår af figur 2.1. På figuren fremgår de karakteristika, som er gældende for systemet i Voldum.

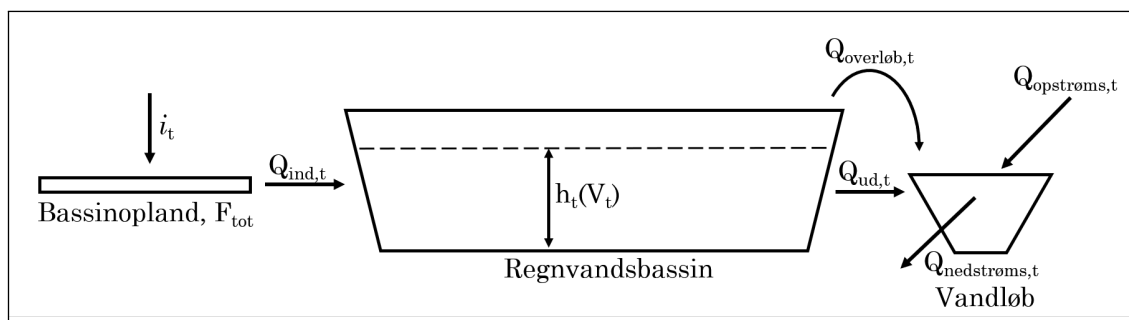


Figur 2.1. Principskitse af regnvandssystemet i Voldum med tilhørende karakteristika for systemet.

Bassinet fyldes gradvist op, når det regner, hvorefter der aflastes til vandløbet, hvor den nedstrøms vandføring udgøres af både den opstrøms vandføring, udløbsvandføringen fra bassinet samt eventuelle overløbshændelser. Der modelleres udelukkende hydrauliske forhold, hvorfor der ikke medregnes renseprocesser i bassinet.

2.1 Modelopbygning

Regnvandssystemet modelleres i en numerisk model på baggrund af loven om massebevarelse. En principskitse af systemets massebalance fremgår af figur 2.2.



Figur 2.2. Principskitse af regnvandssystemets massebalance.

Som input til modellen anvendes en historisk regnserie fra Randers Centralrenseanlæg, SVK-målestation 5145, som er placeret 12 kilometer nord for Voldum. For at beregne indløbsvandføringen til regnvandsbassinet anvendes det totale oplandsareal for Voldum samt en afløbsko-

efficient, jævnfør formel (2.1).

$$Q_{ind,t} = i_t \cdot F_{tot} \cdot \phi \quad (2.1)$$

$Q_{ind,t}$	Indløbsvandføring til bassin
i_t	Regnintensitet
F_{tot}	Total oplandsareal
ϕ	Afløbskoefficient

Det totale oplandsareal på 27 hektar, og den samlede afløbskoefficient er bestemt til 0,24 i bilag B. Der anvendes ingen koncentrationstid på overfladen og i afløbssystemet, da oplandet er lille og ligger tæt på bassinet, hvorved koncentrationstiden er lav i forhold til bassinets tømmetid.

I bassinet modelleres bassinvolumenet på baggrund af en massebevarelse. Volumenet i indeværende tidsskridt beregnes ud fra volumenet i forrige tidsskridt, samt indløb- og udløbsvandføringer fra forrige tidsskridt, jævnfør formel (2.2). Der anvendes et tidsskridt på ét minut.

$$V_t = V_{t-1} + (Q_{ind,t-1} - Q_{ud,t-1}) \cdot \Delta t \quad (2.2)$$

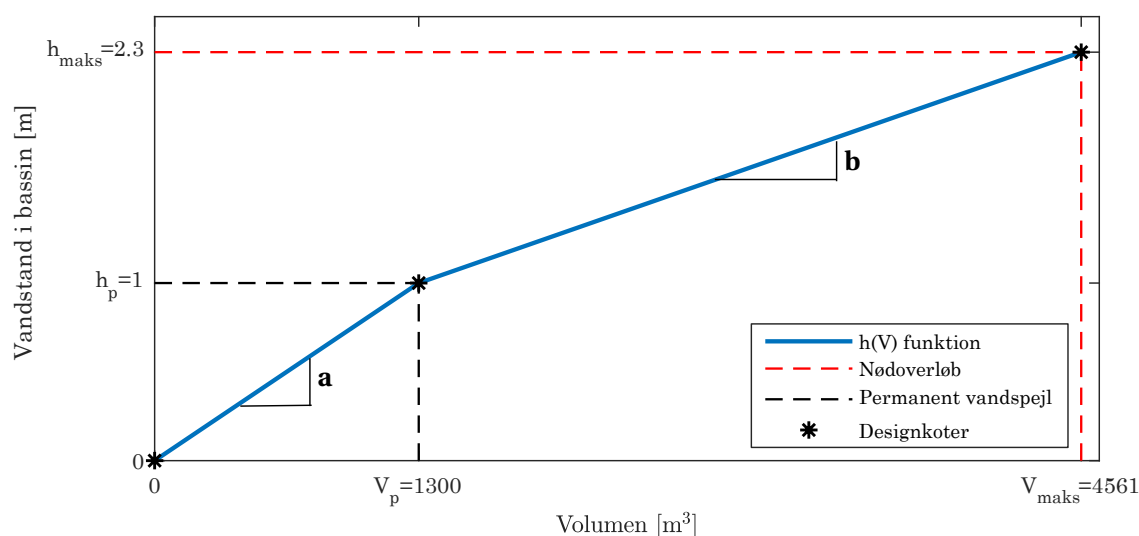
V_t	Bassinvolumen
$Q_{ud,t}$	Udløbsvandføring fra bassin
Δt	Tidsskridt

Ved anvendelse af massebevarelsesligningen jævnfør formel (2.2) beregnes bassinvolumenet i hvert tidsskridt. For at bestemme, hvor meget vand der udledes fra bassinet, skal vandstanden i bassinet bestemmes. Der anvendes en sammenhæng mellem volumen og vanddybde for bassinet i Voldum til at bestemme vandstanden i hvert tidsskridt. Sammenhængen bestemmes på baggrund af bassinkoter og volumener givet af Favrskov Forsyning [2018], hvilket fremgår i tabel 2.1.

	Kote [m]	Vandstand [m]	Volumen [m ³]
Bund	22,90	0	0
Permanent vandspejl	23,90	1,0	1300
Vandspejl for nødoverløb	25,20	2,3	4561

Tabel 2.1. Bassinkoter og -volumener for regnvandsbassin i Voldum [Favrskov Forsyning, 2018].

Relationen mellem volumen og vanddybde er vist på figur 2.3, hvor der antages en lineær sammenhæng mellem punkterne. Her fremgår det ligeledes, at der opstår nødoverløb, hvis vandstanden i bassinet overstiger 2,3 meter.



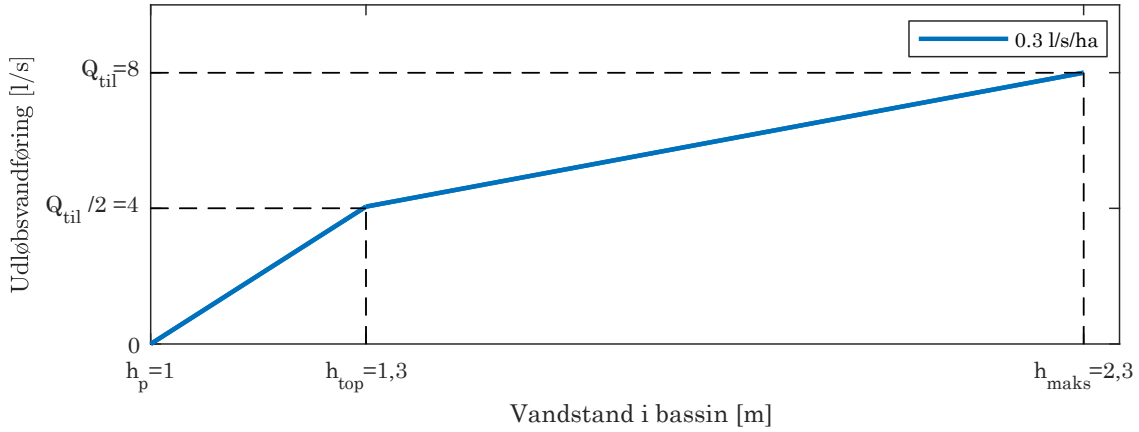
Figur 2.3. Relation mellem vandstand, h og volumen, V .

Relationen mellem volumen og vandstand på figur 2.3 anvendes til at bestemme vanddybden jævnfør formel (2.3). Formlerne er gældende for en bassinudformning, hvor der antages to $h(V)$ funktioner for henholdsvis permanent- og forsinkelsesvolumen.

$$h_t = \begin{cases} V_t \cdot a & \text{for } 0 < V_t \leq V_p \\ h_p + b \cdot (V_t - V_p) & \text{for } V_p < V_t \leq V_{maks} \end{cases} \quad (2.3)$$

h_t	Vandstand
h_p	Permanent vandspejl
V_p	Permanent volumen
h_{maks}	Maksimal vandspejl
V_{maks}	Maksimal volumen

Vandstandsstigning i bassinet resulterer i en udløbsvandføring. Størrelsen af udledningen er begrænset af udledningstilladelsen, som i Voldum er på 0,3 l/s/ha total oplandsareal. Med et oplandsareal på 27 hektar er den maksimale udledning 8 l/s. Udløbet reguleres af en vandbremse, hvortil den specifikke vandbremsekarakteristik er ukendt, hvorfor der anvendes en foresimplet Q-h kurve for udledningen. Det antages, at vandbremsen er delfyldt ved vandbremsens topkote, som er placeret 0,3 meter over det permanente volumen. Her svarer udløbsvandføringen til halvdelen af udledningstilladelsen. Den maksimale udledning opnås, når vandbremsen er fyldt ved den maksimale vandspejlskote. Vandbremsekarakteristikken fremgår på figur 2.4. Det antages, at vandbremsekarakteristikken for stigende og faldende tryk er identisk.



Figur 2.4. Antaget vandbremsekarakteristik for en udledningstilladelse på 0,3 l/s/ha total oplandsareal svarende til 8 l/s. Karakteristikken knækker ved topkoten for vandbremsen, som ligger 0,3 meter over det permanente volumen. Vandstanden regnes fra bassinbunden til vandspejlet.

Udløbsvandføringen beregnes på baggrund af vandbremsekarakteristikken jævnfør formel (2.4), hvor det forudsættes, at vandbremsekarakteristikken er to lineære funktioner.

$$Q_{ud,t} = \begin{cases} \frac{Q_{tilladt}/2}{h_{top} - h_p} \cdot (h_t - h_p) & \text{for } h_p < h_t \leq h_{top} \\ \frac{Q_{tilladt}/2}{h_{maks} - h_{top}} \cdot (h_t - h_{top}) + \frac{Q_{tilladt}}{2} & \text{for } h_{top} < h_t \leq h_{maks} \end{cases} \quad (2.4)$$

$Q_{tilladt}$ | Tilladt udløbsvandføring
 h_{top} | Vandstand til vandbremsens toppunkt

Udløbsvandføringen anvendes i formel (2.2), hvor volumenet i hvert tidsskridt beregnes. Regnvandsbassinet har dog en begrænset kapacitet, og hvis der i længere tid løber mere vand ind end ud af bassinet, stiger volumenet for hvert tidsskridt. Hvis volumenet i bassinet overskrider kapaciteten, V_{maks} , resulterer det i et overløb. Samtidig sættes volumenet i bassinet til at svare til det maksimale volumen ved overløbskoten, jævnfør formel (2.5)

$$Q_{overløb,t} = \frac{V_t - V_{maks}}{\Delta t} \rightarrow V_t = V_{maks} \quad (2.5)$$

$Q_{overløb,t}$ | Overløbsvandføring
 V_{maks} | Maksimal volumen

Når vandet udledes fra bassinet, lægges det til den eksisterende vandføring opstrøms udløbspunktet, og summen af disse vandføringer defineres som vandføringen nedstrøms i vandløbet, jævnfør formel 2.6. I dette tilfælde udleder bassinet til Revens Møllebæk.

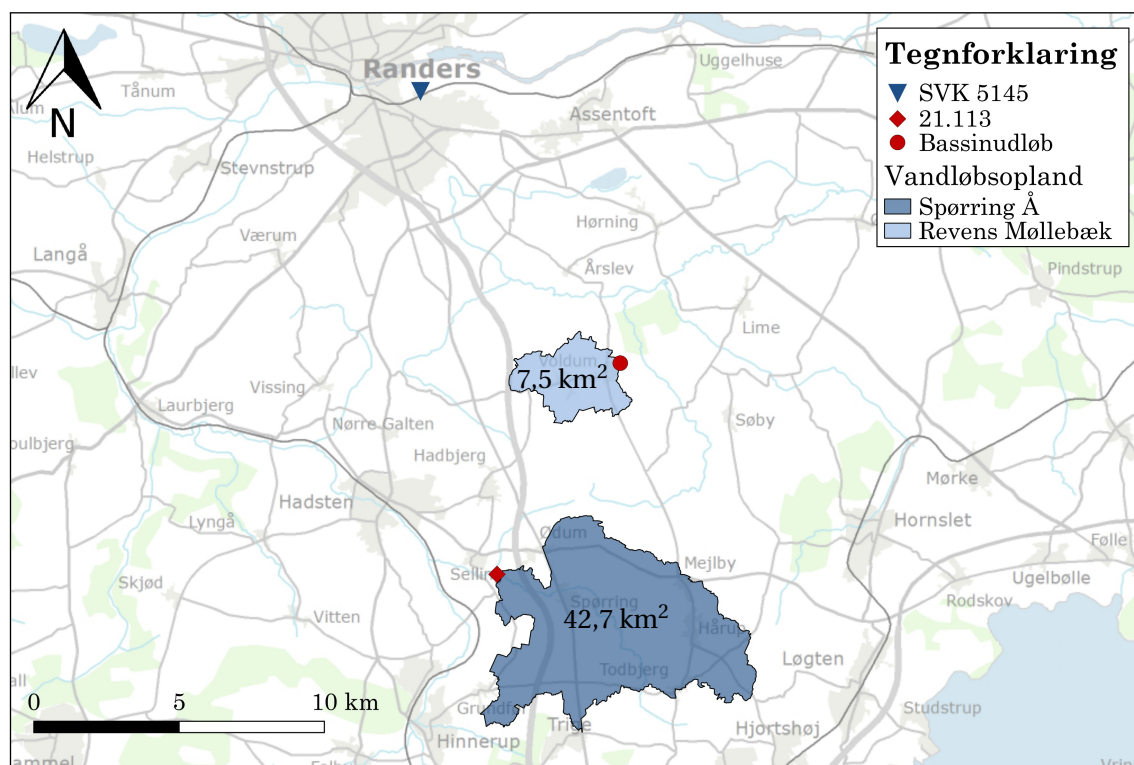
$$Q_{nedstrøms,t} = Q_{opstrøms,t} + Q_{ud,t} + Q_{overløb,t} \quad (2.6)$$

$Q_{nedstrøms,t}$ | Vandføring nedstrøms i vandløb
 $Q_{opstrøms,t}$ | Vandføring opstrøms i vandløb

Modellen verificeres med en massebalance af systemet. Modellen er enkel, og der indgår ikke processer som nedsivning, fordampning og indsivning af grundvand. Det antages, at disse processer udgør en lille forskel i massebalancen i forhold til ind- og udløb. I modellen er der desuden ikke medregnet koncentrationstider på overfladen, i afløbssystemet eller i bassinet, og derfor er responsen i modellen øjeblikkelig. Det resulterer i udledning fra bassin til vandløb allerede i tidsskridtet efter, at det begynder at regne. Alle disse antagelser gør, at modellen ikke afspejler virkeligheden fuldstændigt. Formålet med modellen er udelukkende at skabe et system, som kan anvendes til at undersøge potentialet for en ændret udledningsstrategi. Derfor er det af mindre betydning, at det reelle system ved Voldum ikke er modelleret helt korrekt. Det vurderes, at en enkel model er tilstrækkelig til formålet i dette projekt.

2.2 Vandføringsdata for vandløb

For at bestemme vandføringen nedstrøms for udledningen anvendes vandføringsdata opstrøms bassinudløbet. Idet der ikke er vandføringsdata for Revens Møllebæk, anvendes vandføringsdata fra Spørring Å, som ligger syd for Voldum. Vandløbenes placering og oplandsstørrelse fremgår af figur 2.5. Oplandet til Spørring Å ligger 17 kilometer fra SVK målestationen, som benyttes som regninput i modellen. Der er derfor ikke stedslig overensstemmelse mellem regndata og vandføringsdata, hvilket har betydning for tidsforskydningen i modellen.



Figur 2.5. Vandløbsopland for Spørring Å og Revens Møllebæk, data fra SCALGO [2019] og DMI [2019a].

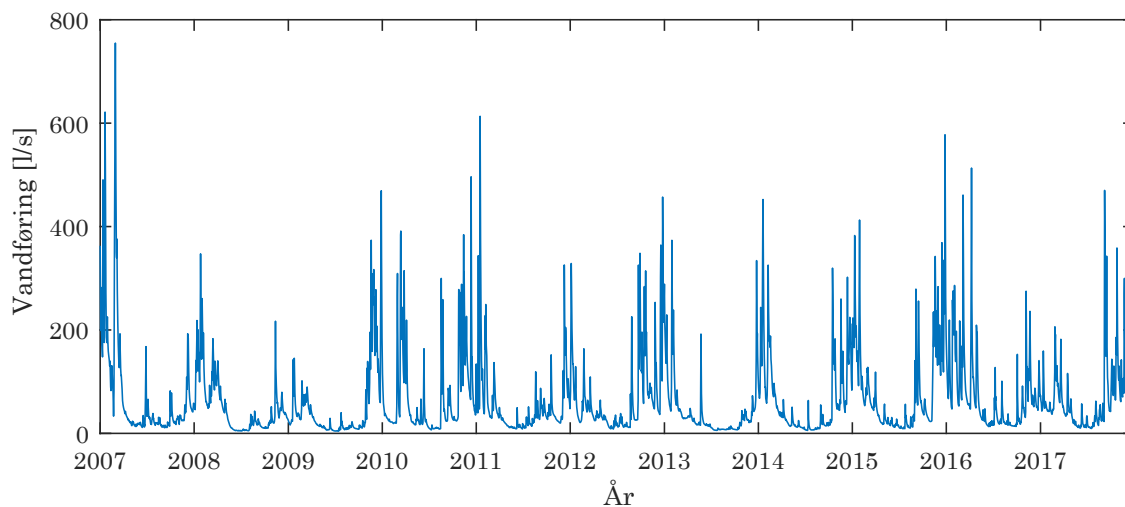
Som det fremgår af figur 2.5, er oplandsarealet til Spørring Å $42,7 \text{ km}^2$ og oplandsarealet til Revens Møllebæk er $7,5 \text{ km}^2$. Et større oplandsareal giver en større afstrømning, og derfor er der høje vandføringer i Spørring Å i forhold til, hvad der er realistisk for Revens Møllebæk. På

den baggrund arealkorrigeres vandføringen i Spørring Å jævnfør formel (2.7).

$$Q_{opstr\ddot{o}ms} = Q_{Sp\ddot{o}rring} \cdot \frac{A_{Revens}}{A_{Sp\ddot{o}rring}} \quad (2.7)$$

$Q_{opstr\ddot{o}ms}$	Vandføring opstrøms i Revens Møllebæk
$Q_{Sp\ddot{o}rring}$	Vandføring i Spørring Å
A_{Revens}	Areal af vandløbsopland til Revens Møllebæk
$A_{Sp\ddot{o}rring}$	Areal af vandløbsopland til Spørring Å

Estimeret vandføringsdata for Revens Møllebæk fremgår af figur 2.6. Måleperioden er på 11 år fra 2007 til og med 2017.



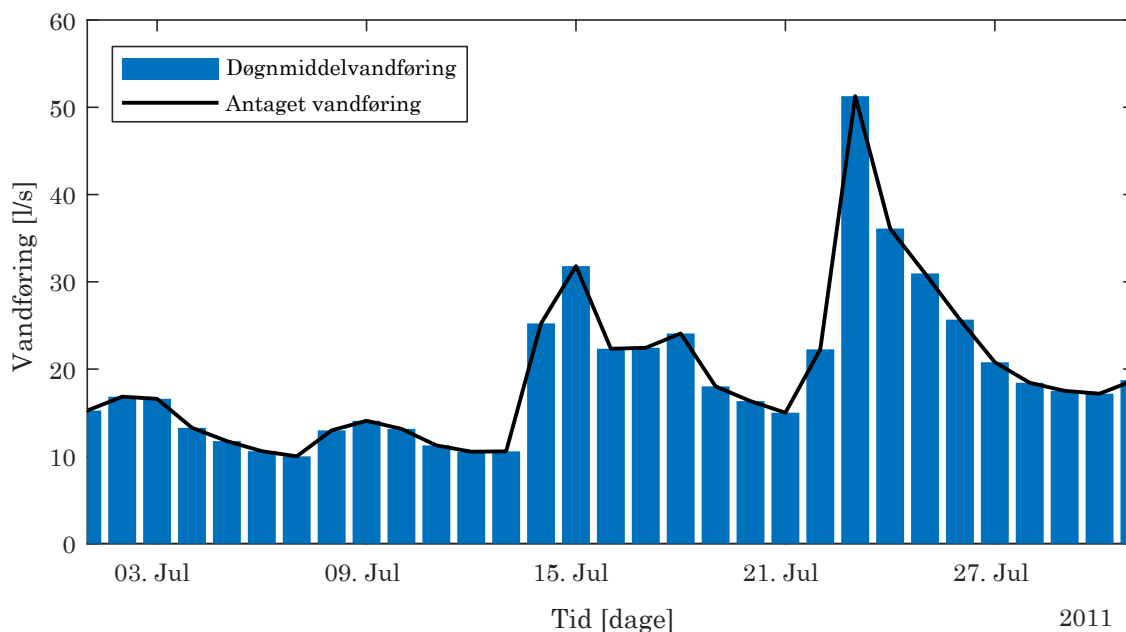
Figur 2.6. Vandføring i Revens Møllebæk i perioden 2007 til 2017, estimeret på baggrund af vandføringsdata fra Spørring Å.

Som det fremgår af figur 2.6, er der store fluktuationer i vandføringen. Det er karakteristisk for et overfladefødt vandløb, hvor vandføringen i høj grad afhænger af nedbøren, som falder i oplandet. Fluktuation i vandføringen er også karakteristisk for et vandløb med et lille opland, da koncentrationstiden er kort, og afstrømningen derfor ikke fordeles ud over en længere periode. Af tabel 2.2 fremgår karakteristiske vandføringer for Revens Møllebæk. Her fremgår det, at værdierne for medianmaksimum vandføringen er høje i forhold til middelværdierne, hvilket skyldes de store variationer i vandføringen.

Vandføring [l/s]	Vinter	Sommer
Medianminimum	15,9	8,4
Middel	91,1	25,9
Medianmaksimum	452,4	167,8

Tabel 2.2. Karakteristiske parametre for estimeret vandløbsdata for Revens Møllebæk. Opdelt efter hydrologisk årstid, hvor vinter er oktober-april og sommer er maj-september.

I datasættet for vandføringerne er der én værdi for vandføringen pr. døgn. Det antages i modellen, at hver måling er gældende midt på dagen. Der anvendes lineær interpolation til at bestemme vandføringen pr. tidskridt mellem døgnmidlerne. Et eksempel på interpolation af vandføringsdataene i Juli 2011 fremgår på figur 2.7.



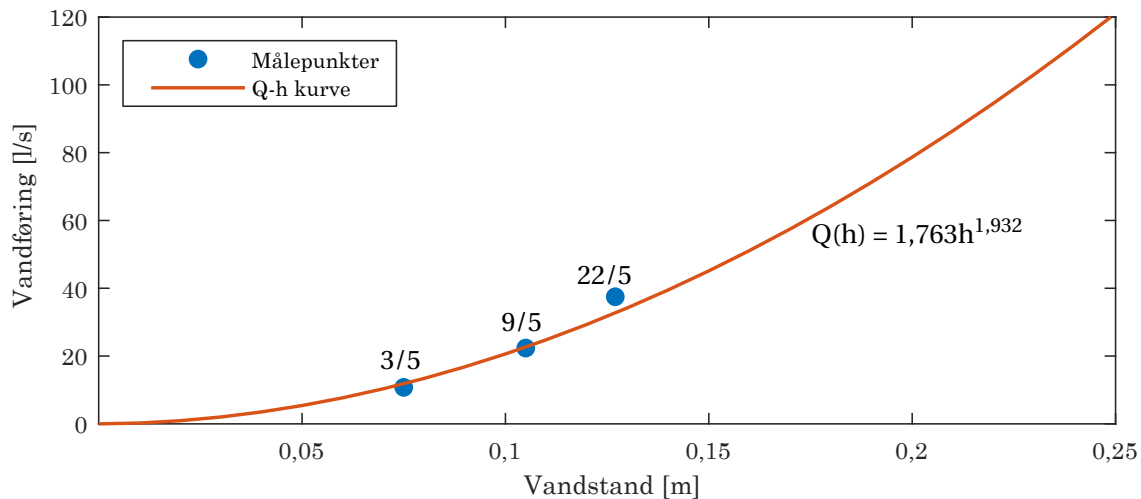
Figur 2.7. Lineær interpolation af vandføringsdata.

Ved interpolation af vandføringsdataene undgås store fluktuationer ved datoskift. At anvende døgnmidler i modellen giver en meget udjævnet vandføring i forhold til de naturlige variationer der reelt forekommer. Især i vandløb med lille oplandsareal, hvor der er kortvarige fluktuationer, er døgnmiddel et upræcist estimat af den egentlige øjebliksvandføring.

2.3 Sammenligning af vandføringsdata

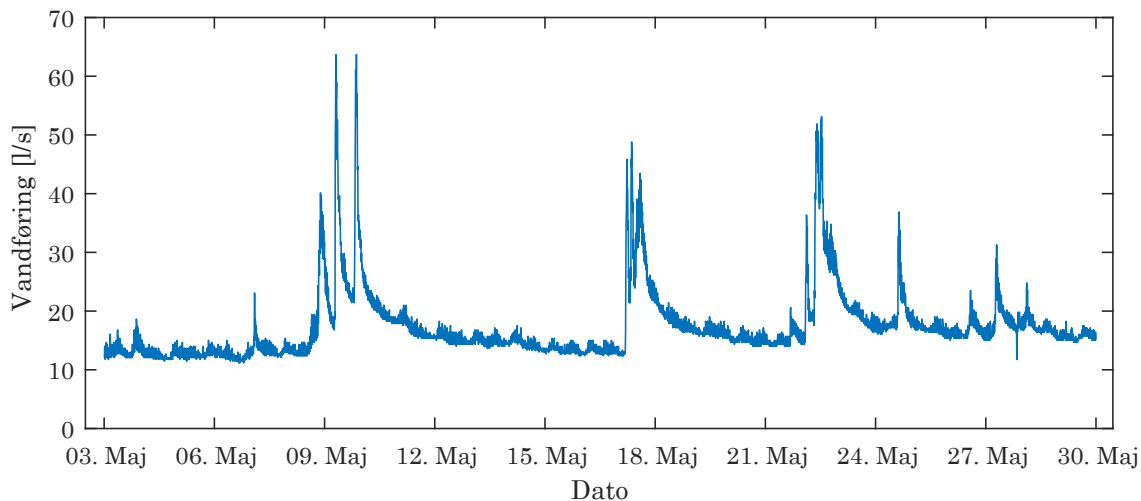
For at undersøge hvorvidt de estimerede vandføringsdata er repræsentative for de egentlige vandføringer i Revens Møllebæk, sammenholdes de estimerede data med målt data.

I forbindelse med dette projekt, er der i maj 2019, opstillet en måler opstrøms bassinudløbet i Revens Møllebæk. Måleren har logget vandstandsdata i perioden 3. maj 2019 til 29. maj 2019 med et interval på ti minutter. I denne periode varierer vandstanden mellem 0,072 - 0,18 meter. For at bestemme vandføringen i vandløbet er der foretaget propelmålinger inden for samme periode. På baggrund af propelmålingerne og Manning formelen opstilles en Q-h kurve for Revens Møllebæk, hvilket er beregnet i bilag D. En Q-h kurve for Revens Møllebæk fremgår af figur 2.8.



Figur 2.8. Q-h relation for Revens Møllebæk, baseret på Mannings formel og målepunkter.

Q-h relationen er bestemt på baggrund af tre vandføringsmålinger, hvilket er et lille datagrundlag for en Q-h kurve. Det forventes derfor ikke, at Q-h kurven er en korrekt beskrivelse af vandløbet, men en tilnærmelse. Q-h relationen anvendes til at beregne vandføringen i Revens Møllebæk på baggrund af de loggede vandstandsdata. Resultatet fremgår af figur 2.9.



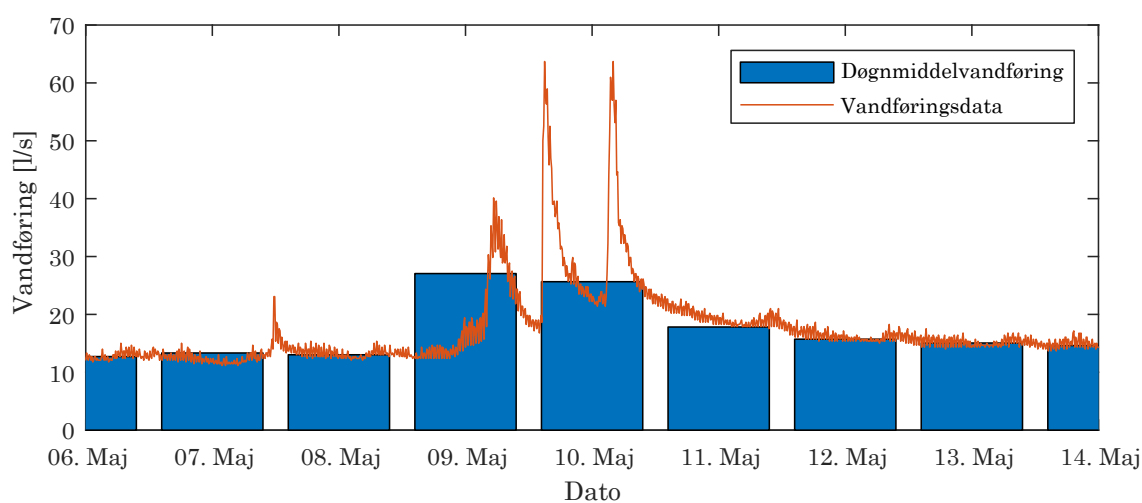
Figur 2.9. Vandføring i Revens Møllebæk.

Vandføringen i Revens Møllebæk er bestemt for maj måned med et interval på ti minutter. På figur 2.9 fremgår det, at der er store fluktuationer i vandføringen, hvilket tyder på, at vandløbet er overfladefødt. Revens Møllebæk har en hurtig responstid ved regnhændelser, hvilket er karakteristisk for et vandløb med et lille oplandsareal. Det minder om observationerne i datasættet fra Spørring Å. Det er med til at underbygge, at arealkorrigerede data fra Spørring Å har samme karakteristika som Revens Møllebæk.

Der findes ikke tidsmæssigt sammenfaldende data for de to vandløb. For yderligere at sammenholde den estimeret vandføringsdata med den egentlige vandføring i Revens Møllebæk, sammenlignes gennemsnittet af vandføringerne i maj måned. Gennemsnittet af vandføringerne for maj måned i de arealkorrigerede data fra Spørring Å er 23,6 l/s baseret på de 11 års data. Majmidlerne for de 11 år varierer mellem 11,8 og 45,3 l/s, og på baggrund af en Lilliefors test

bestemmes det, at dataene er normalfordelte. For Revens Møllebæk er majmidlen 17,3 l/s. Ved statistisk analyse af de to middelværdier på 23,6 l/s og 17,3 l/s kan det bestemmes, at vandføringen i Revens Møllebæk ligger inden for normalfordelingen af majmidlerne for Spørring Å. Det underbygger, at arealkorrigerede vandføringsdata fra Spørring Å er repræsentative for Revens Møllebæk. Desuden er nedbøren i maj måned undersøgt, hvor der i Favrskov Kommune gennemsnitligt falder 52 millimeter i maj måned, baseret på data fra 2012 og frem [DMI, 2019b]. I maj 2019 er der faldet 54 millimeter, hvilket derfor også ligger tæt på middelværdien.

Døgnmiddelvandføringerne for Revens Møllebæk, bestemt på baggrund af målte data, fremgår af figur 2.10. Her er vist et udsnit af døgnmidlerne i maj, hvor problematikken ved at anvende døgnmidler i den numeriske model fremgår. Vandføringen i Revens Møllebæk fluktuerer meget inden for et døgn, hvilket ikke afspejles i døgnmidlerne. Dette giver en væsentlig usikkerhed i modellen.

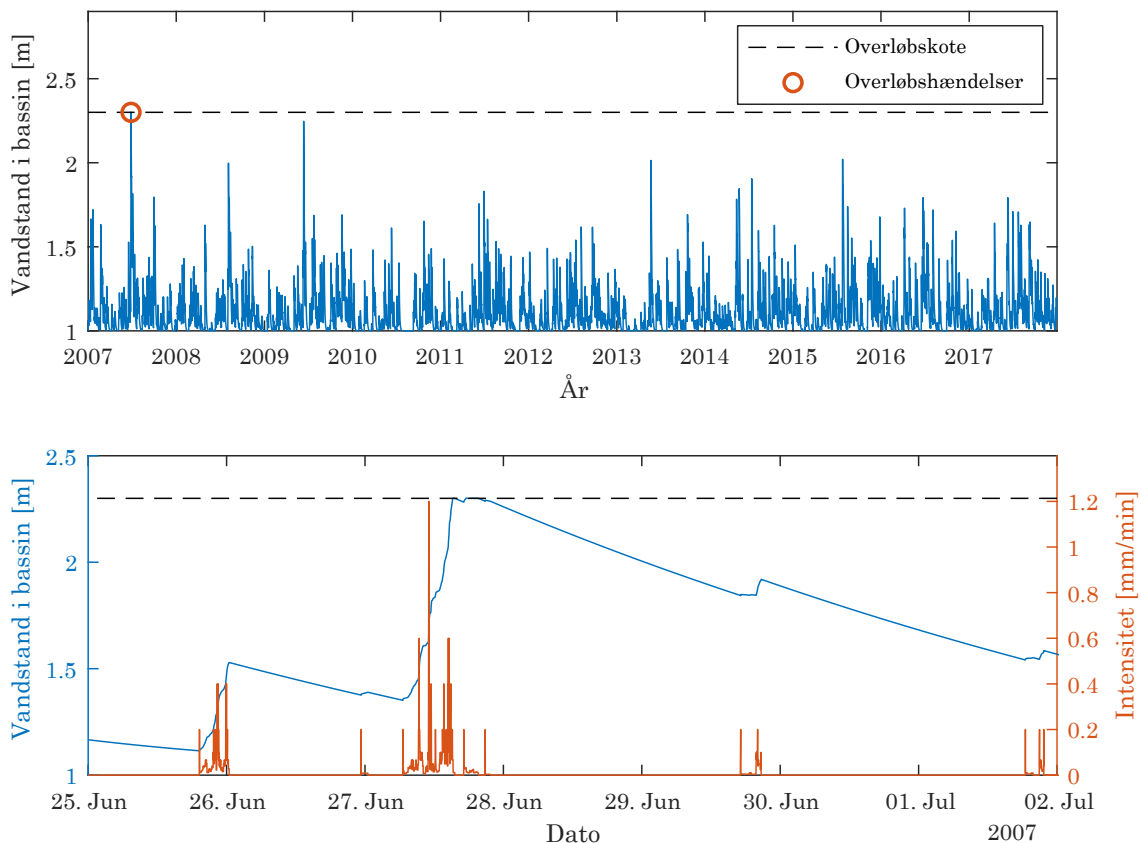


Figur 2.10. Døgnmiddelvandføringer for Revens Møllebæk baseret på målte data i maj 2019.

3. Modellering af eksisterende regnvandsbassin

Den numeriske model anvendes til at simulere det eksisterende bassin ved Voldum. Formålet er at finde ud af, hvordan systemet reagerer, når det regner. Herunder, hvordan vandstandstigningen i bassinet foregår, samt i hvilken grad, vandløbet påvirkes. Det eksisterende system skal tilmed danne grundlag for at bestemme den tilstand, hvorudfra de kommende styringsstrategier vurderes.

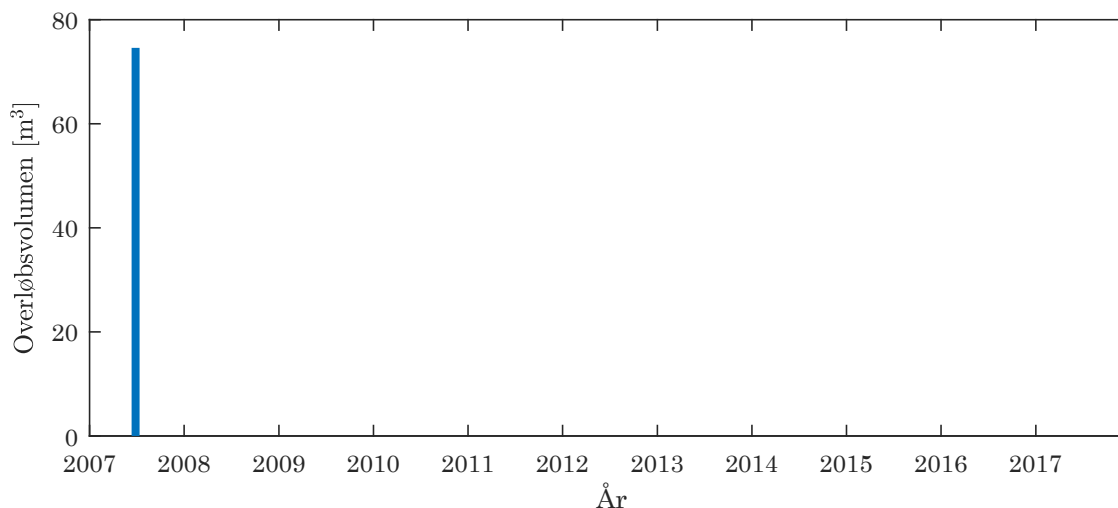
Systemet modelleres med et total oplandsareal på 27 hektar og en udledningstilladelse på 0,3 l/s/ha total oplandsareal. Der simuleres i perioden 1. januar 2007 til 31. december 2017 med et tidsskridt på ét minut. Resultater for vandstand i bassinet fremgår af figur 3.1. På den øverste graf fremgår det, at vandstanden i bassinet ofte er under 1,5 meter. Udløbsvandføringen er ved dette trykniveau 4,9 l/s. Den gennemsnitlige udløbsvandføring fra bassinet er 1,4 l/s for de perioder, hvor bassinet udleder regnvand. Det er derfor en underudnyttelse af den tilladte udledning på 8 l/s.



Figur 3.1. Resultater for simulering med en maksimal udledning på 0,3 l/s/ha total oplandsareal svarende til 8 l/s. Øverst: Simuleret vandstand. Nederst: Udsnit af regndata og simuleret vandstand for overløbshændelsen i 2007.

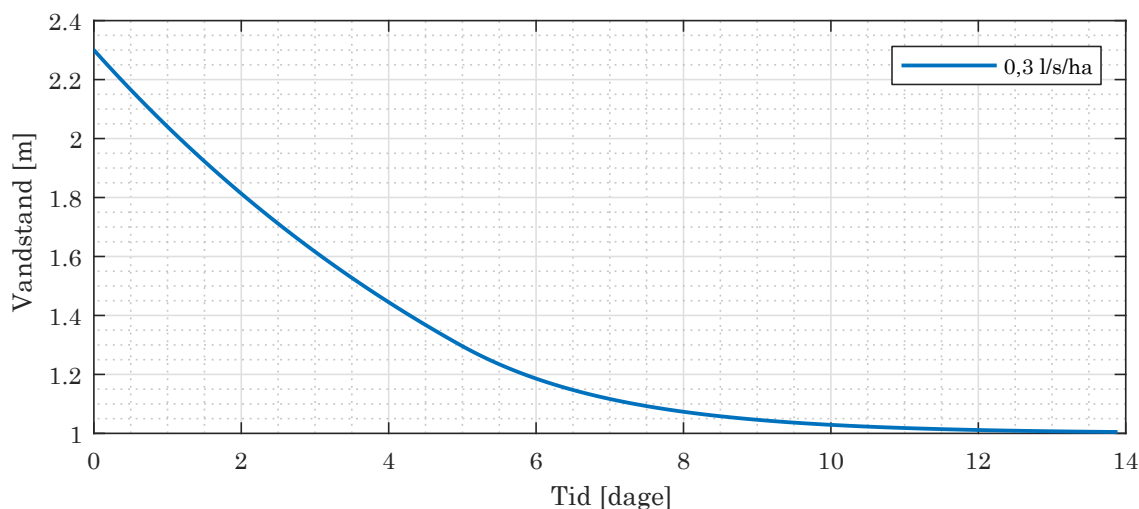
Det fremgår af figur 3.1, at der er en overløbshændelse fra bassinet i juni 2007. Overløbshæn-

delsen varer 5 timer og der udledes i alt 75 m^3 , hvor der opnås en maksimal udløbsvandføring på 64 l/s . På den nederste graf fremgår det, at nødoverløbet er et resultat af koblede regnhændelser. Da udledningstilladelsen er lav, bliver bassinet ikke tømt mellem de to regnhændelser, og derfor ender regnhændelsen den 27. juni med at give et nødoverløb. Overløbsvolumenet fremgår på figur 3.2.



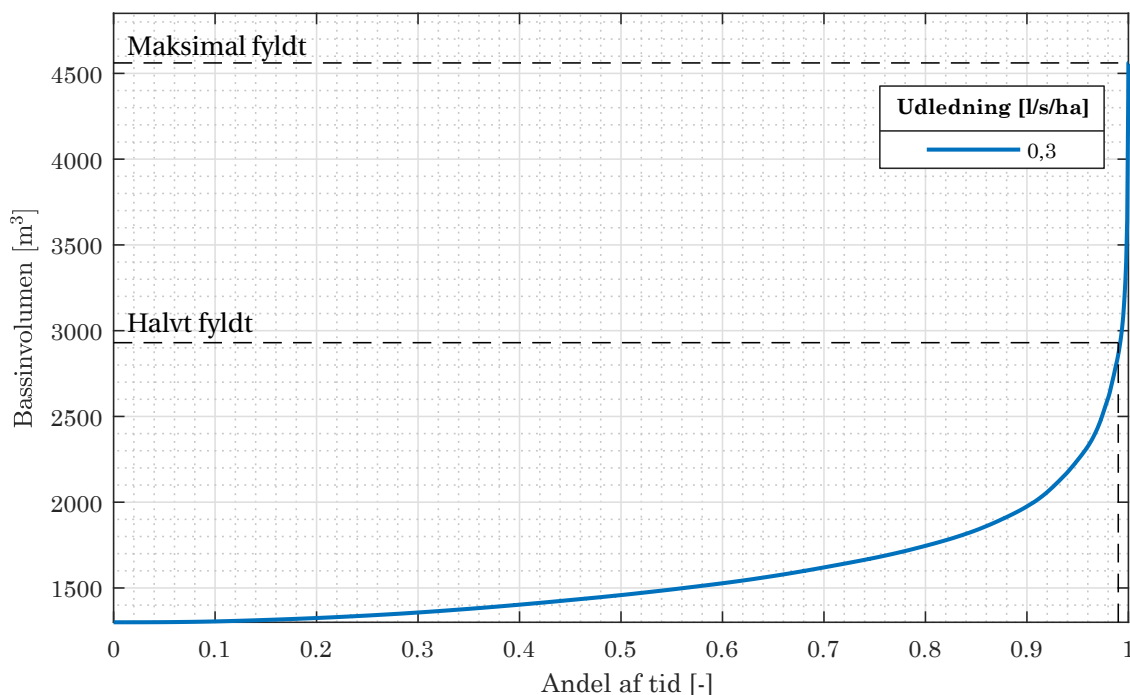
Figur 3.2. Overløbsvolumen for simulering af det eksisterende system ved Voldum, hvor bassinoplandet er 27 ha og der er en udledningstilladelse på $0,3 \text{ l/s/ha}$ total oplandsareal.

Generelt er det problematisk, at bassinet er mange dage om at udlede vandet efter en regnhændelse. På figur 3.3 fremgår det, at tømmetiden for bassinet er ca. 12 dage forudsat, at der ikke løber yderligere vand ind i bassinet i de dage. Der er derfor stor sandsynlighed for, at koblet regn kan skabe overløbshændelser.



Figur 3.3. Tømmetid for bassinet når udløbsvandføringen er $0,3 \text{ l/s/ha}$ total oplandsareal.

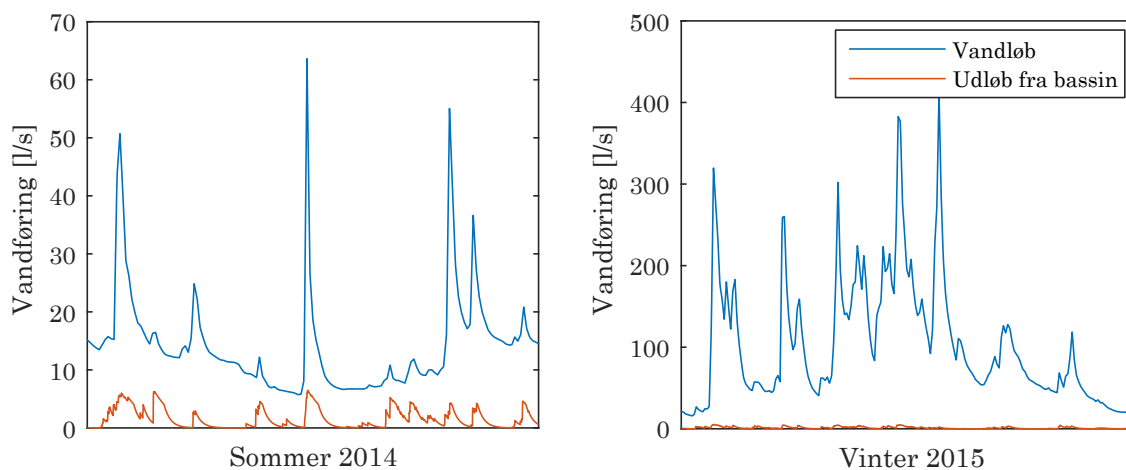
Fyldningsgraden, som er den tidsandel, hvor bassinet er fyldt til et givet volumen, fremgår på figur 3.4. Her er vist, at bassinet er under halvt fyldt i 99 % af tiden. Selvom bassinet er lang tid om at tømmes efter en regnhændelse, er fyldningsgraden forholdsvis lav. Dette indikerer, at bassinet er dimensioneret for stort.



Figur 3.4. Fyldningsgrad for bassinet når udløbsvandføringen maksimalt er 0,3 l/s/ha total oplandsareal.

3.1 Hydraulisk vandløbspåvirkning

Vandløbspåvirkningen kan vurderes på baggrund af udløbsvandføringen sammenholdt med den opstrøms vandføring i vandløbet. På figur 3.5 fremgår et eksempel på bassinudledningen relativt til vandløbsvandføringen opstrøms i vandløbet, opdelt i hydrologiske årstider.

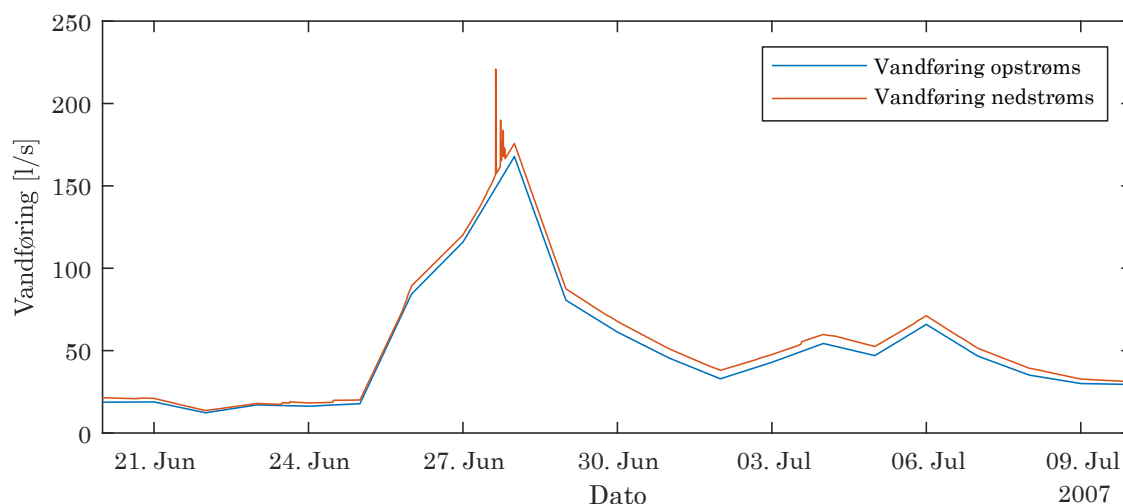


Figur 3.5. Eksempel på vandløbsvandføring samt udløbsvandføring fra bassinet for de hydrologiske årstider. NB: Forskellige y-akser.

På figur 3.5 fremgår det, at udløbsvandføringen udgør en meget lille del af vandføringen i vandløbet. Vandløbsvandføringen er op til 95 gange højere end den tilladte udledning. Det fremgår, at dette især er gældende om vinteren, hvorimod udløbsvandføringen om sommeren udgør en større del. Påvirkningen på vandløbets naturlige vandføring er derved størst om sommeren, og meget lille om vinteren. Om vinteren giver udledningen til gengæld de største resulterende

de vandføringer i vandløbet, men det resulterer ikke i en væsentlig ændring for vandføringen i vandløbet at udlede 8 l/s. I forhold til det hydrauliske aspekt af vandløbspåvirkningen er det derfor en fordel, at dimensionere store bassiner med lave udledningstilladelser.

Når vandløbspåvirkningen altid er lav skyldes det også, at bassinoplandet kun udgør 3,6 % af vandløbets samlede oplandsareal. Derved er andelen af regnvand fra Voldum lille i forhold til afstrømningen fra det samlede vandløbsopland. Ud fra figur 3.5 er det klart, at påvirkningen af vandløbet er meget begrænset ved en udledning på 0,3 l/s/ha total oplandsareal. Derved er det kun overløbshændelsen i juni 2007, som kan påvirke vandløbet negativt. Vandløbsvandføringen opstrøms og nedstrøms for bassinudløbet, for tidspunktet for overløbshændelsen, fremgår på figur 3.6.



Figur 3.6. Vandløbsvandføring samt udløbsvandføring fra bassinet i forbindelse med overløbshændelsen i juni 2007.

På figur 3.6 fremgår det, at overløbshændelsen resulterer i en forøgelse af vandføringen i vandløbet med omtrent 60 l/s i en kort periode. Overløbsvolumenet er forholdsvis lille og den resulterende vandføring på 220 l/s overstiger sommer medianmaksimum vandføringen, men ikke vinter medianmaksimum vandføringen, når disse er defineret ud fra den hydrologiske årstid. Det vurderes derfor, at overløbet ikke er specielt kritisk for vandløbet.

3.2 Delkonklusion

Resultater for den simulerede vandstand i bassinet giver en indikation af et hydraulisk ineffektivt bassin. Det tyder desuden på, at målet med dette bassin er at begrænse vandløbspåvirkningen, og at hurtig afledning af regnvand ikke er en prioritet. Det er umiddelbart ikke fordelagtigt at overbeskytte et vandløb ved at indføre en lav udledningstilladelse, da der samtidig opstår risiko for at koblet regn fører til overløbshændelser. Det vurderes, at bassinet er overdimensioneret, idet den lave udløbsvandføring kun resulterer i ét overløb på 11 år, hvor regnvandsbassiner normalvis dimensioneres med en gentagelsesperiode for overløb på fem år.

Med en bassinstørrelse på 4561 m³, og et reduceret oplandsareal på 6,5 hektar, burde det være muligt at undgå nødoverløb i systemet. Den lave udledningstilladelse har til formål at beskytte vandløbet, og det er tydeligt, at vandløbet ikke er i nærheden af at være belastet. Derfor

vurderes det, at bassinudløbet er droslet unødvendigt meget, og at koblede regnhændelser er mest kritisk for systemet.

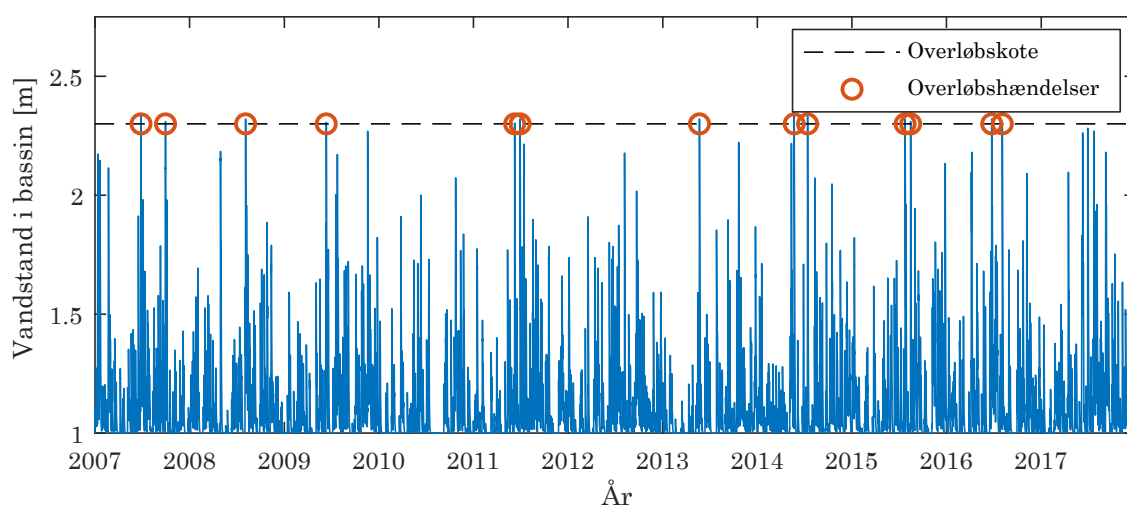
Det vurderes, at der er begrænset potentiale for at afprøve styring baseret på det eksisterende regnvandsbassin i Voldum, da det i forvejen ikke er ret belastet.

4. Fremtidig forøgelse af bassinopland

For mange danske byer er det en realitet, at der i fremtiden sker byudvikling, hvorved det be-fæstede areal øges. Det kan også blive relevant for Voldum. Desuden er der fortsat fælleskloa-kerede områder i byen, som skal separatkloakeres i fremtiden. På denne baggrund undersøges konsekvensen af et større oplandsareal tilkoblet det eksisterende regnvandsbassin. Dette er fordelagtigt frem for at anlægge et nyt regnvandsbassin, da det er meget bekosteligt.

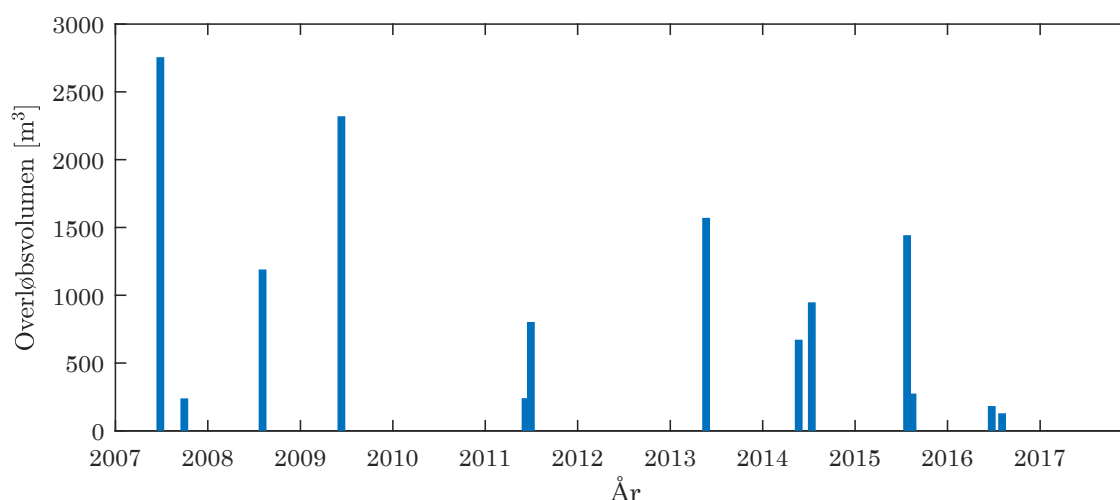
Der arbejdes videre med et fremtidigt scenarie, hvor oplandsarealet til regnvandsbassinet er fordoblet. Herved bliver bassinet i større grad udfordret, og det øger potentialet for at imple-mentere styringsstrategier for bassinudledningen. Det totale oplandsareal bliver 54 hektar. Det antages, at udledningstilladelsen fastholdes på 0,3 l/s/ha total oplandsareal, således udlednin-gen pr. areal er den samme. Dermed er den maksimalt tilladte udløbsvandføring 16 l/s. Nor-malvis gives en ny udledningstilladelse, når der kobles mere opland til et bassin, hvorfor den kan blive mindre end 0,3 l/s/ha total oplandsareal. Bassinvolumenet fastholdes på 4561 m³.

Simulering af det fremtidige scenarie med en udledningstilladelse på 0,3 l/s/ha total oplands-areal, bliver fremover i rapporten benævnt som en passiv udledning. Resultaterne for den pas-sive udledning danner et sammenligningsgrundlag for de kommende styringsstrategier af bas-sinudledningen. På figur 4.1 fremgår den simulerede vandstand i bassinet, hvor overløbshæn-delserne er markeret.



Figur 4.1. Simuleret vandstand for passiv udledning, hvor bassinoplandet er 54 hektar, og udledningen er 0,3 l/s/ha total oplandsareal svarende til 8 l/s.

Som følge af, at der er tilkoblet det dobbelte oplandsareal, opstår der højere vandstande i bassinet. Simuleringen med den passive udledning resulterer i overløbsvolumenerne som er vist på figur 4.2.



Figur 4.2. Overløbsvolumener for en passiv udledning, hvor bassinoplandet er 54 hektar, det oprindelige bassinvolumen på 4561 m³ er bevaret og udledningstilladelsen er 0,3 l/s/ha total oplandsareal.

Der forekommer 13 overløbshændelser i perioden på 11 år. Overløbshændelserne forekommer i forårs- og sommerperioder, hvor der ofte falder meget regn inden for få dage. Overløbenes hyppighed og størrelse er uacceptabel for vandløbet, da der er stor risiko for, at vandløbet overbelastes. Af tabel 4.1 fremgår antal overløb, det maksimale overløbsvolumen, bassinets 50 % fyldningsgrad samt den resulterende maksimale vandløbsvandføring nedstrøms bassinudløbet. Denne række parametre benyttes til at sammenligne den passive udledning med styringsstrategier senere i rapporten.

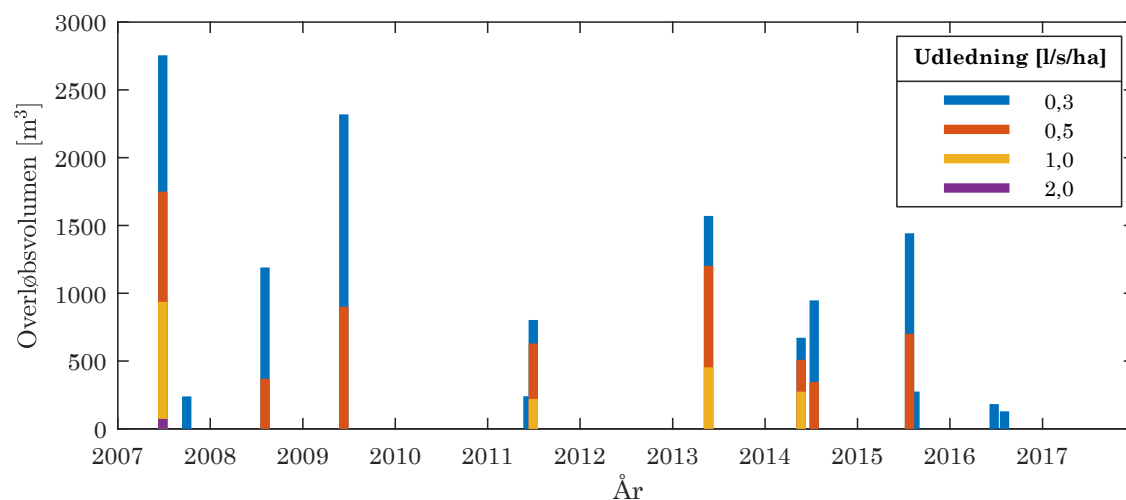
	Antal overløb [-]	Maksimal overløbsvolumen [m³]	>50 % fyld- ningsgrad [%]	Maksimal vand- føring i vandløb [l/s]
Passiv udledning	13	2757	2,8	2176

Tabel 4.1. Antal overløbshændelser og maksimalt overløbsvolumen, fyldningsgrad og resulterende maksimal vandføring i vandløb, for en passiv udledning fra et oplandsareal på 54 hektar.

Af resultaterne i tabel 4.1 fremgår, at bassinet er halvt fyldt eller derover i 2,8 % af tiden. På trods af at der er 13 overløbshændelser på de 11 år, er der meget af tiden relativt lidt vand i bassinet. Det er målet at have et tomt bassin, således der er et stort effektivt volumen, hvor der er plads til kommende regnhændelser.

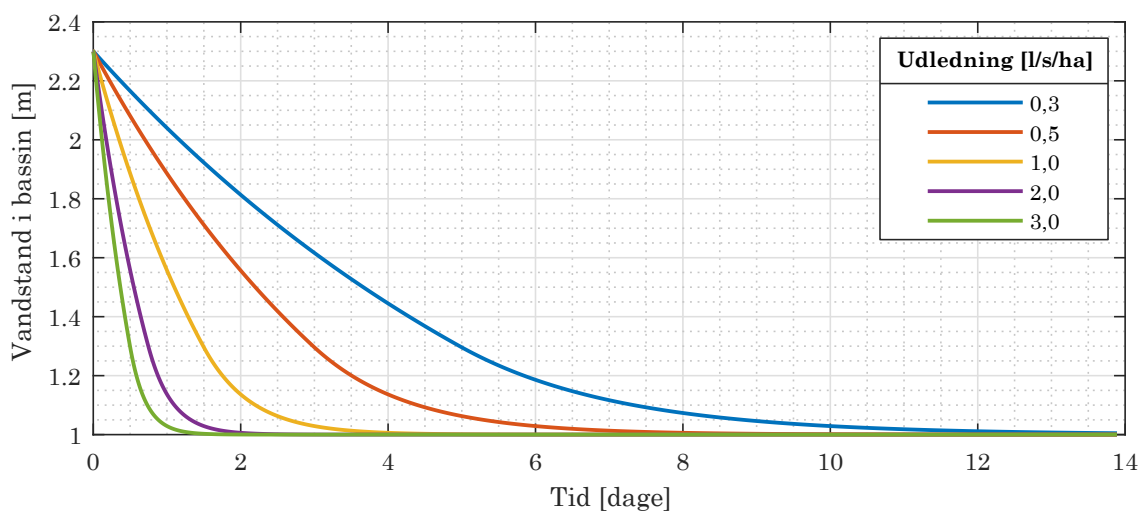
4.1 Effekt af øget udledningstilladelse

For at undgå overløb kan det først og fremmest forsøges at øge den passive udløbsvandføring. Derfor undersøges effekten af forskellige passive udledninger i systemet. Der simuleres med udledninger mellem 0,3 l/s/ha og 3,0 l/s/ha. Vandbremsekarakteristikkerne antages fortsat at være to lineære funktioner, hvor maksimumudledningen opstår ved koten for nødoverløb, og halvdelen af maksimumudledningen opstår ved topkoten for vandbremsen. Simulering med de forskellige passive udledninger giver forskellige antal overløbshændelser i systemet, hvilket fremgår af figur 4.3.



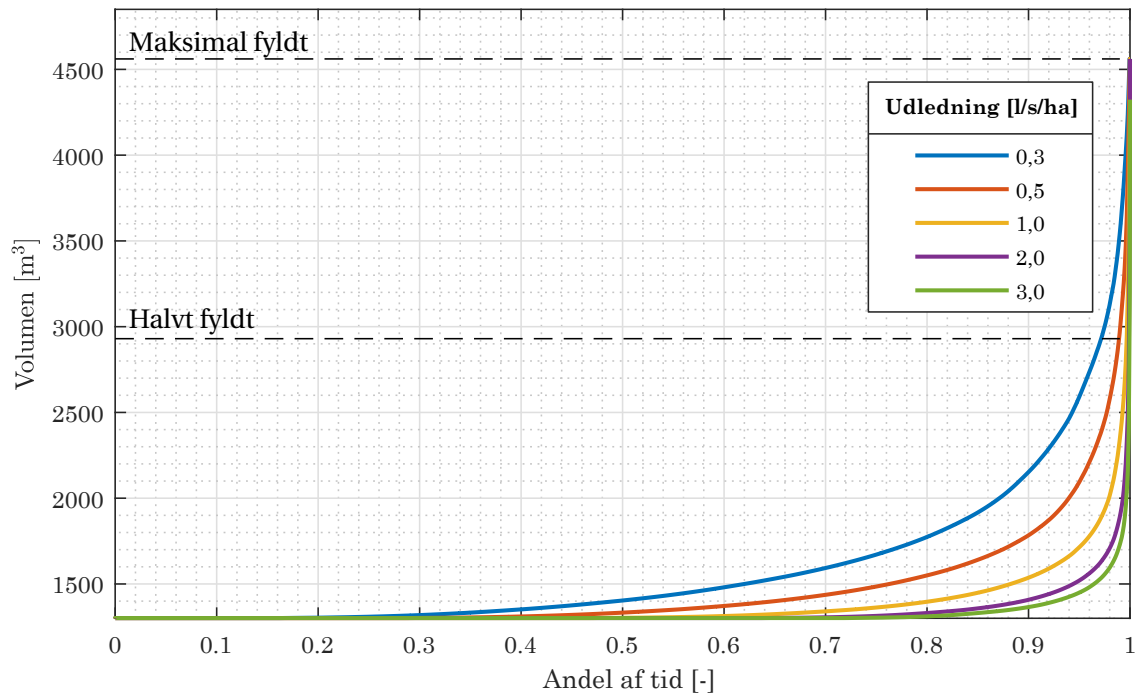
Figur 4.3. Overløbsvolumener ved udledninger på 0,3, 0,5, 1,0 og 2,0 l/s/ha total oplandsareal. En udledning på 3,0 l/s/ha total oplandsareal resulterer ikke i overløbshændelser.

Det er indlysende, at der er færre og mindre nødoverløb, hvis der tillades en højere udløbsvandføring fra bassinet. For en udledning på 2,0 l/s/ha total oplandsareal forekommer der én overløbshændelse, hvorved bassinet overholder serviceniveauet for overløbshændelser. Når udløbsvandføringen hæves med en faktor 10 til 3,0 l/s/ha total oplandsareal, forekommer der ingen overløbshændelser i systemet. Det skyldes, at bassinets tømmetid er væsentligt lavere, hvilket også reducerer risikoen for, at koblet regn giver overløb. Tømmetiden for de forskellige passive udledninger fremgår af figur 4.4.



Figur 4.4. Bassinets tømmetid ved forskellige passive udledninger.

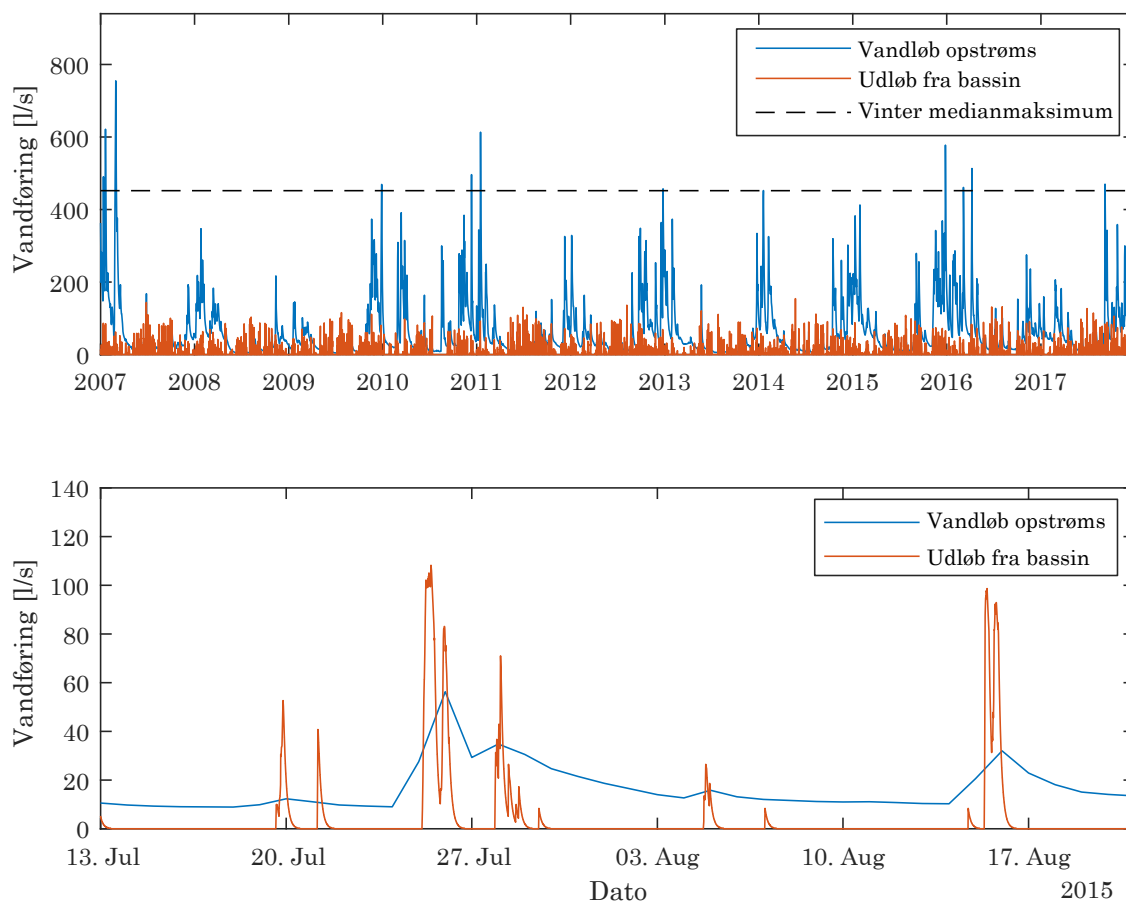
Tømmetiden for bassinet er én dag ved den højeste tilladte udløbsvandføring. Ved at hæve udløbsvandføringen er forskellen i tømmetiden størst ved de lave udløbsvandføringer. Modsat er udbyttet i forhold til tømmetiden af bassinet ikke særligt stort, hvis udløbsvandføringen hæves fra 2,0 til 3,0 l/s/ha total oplandsareal. En forøgelse af udledningen fra 0,3 til 0,5 l/s/ha total oplandsareal betyder, at tømmetiden næsten halveres. Dette er en væsentlig forbedring af bassinets tømmetid ved at øge udledningstilladelsen med 0,2 l/s/ha. De forskellige udledningers betydning for bassinudnyttelsen kan sammenlignes ved at beregne fyldningsgraden af bassinet for hver udledning. Fyldningsgraden fremgår af figur 4.5.



Figur 4.5. Fyldningsgraden i bassinet for de modellerede passive udledninger.

Det fremgår af figur 4.5, at udløbsvandføringen har stor betydning for udnyttelsen af bassin-volumenet. Derved er der ved en højere udledning, et højere effektivt volumen i bassinet i en større del af tiden.

Ud fra betragtningerne omkring kapaciteten i bassinet kan det konkluderes, overløbshændelser kan undgås fuldstændigt, ved en udledningstilladelse på 3,0 l/s/ha total oplandsareal. Til gengæld kan der opstå problemer ved denne udløbsvandføring, hvis vandløbskapaciteten overskrides. Derfor undersøges udløbsvandføringen relativt til vandløbsvandføringen ved en udledningstilladelse på 3,0 l/s/ha total oplandsareal. Dette fremgår på figur 4.6.



Figur 4.6. Vandføringen i vandløbet opstrøms for bassinudløbet, samt udløbsvandføringen i bassinet med en udledningstilladelse på 3,0 l/s/ha total oplandsareal. Øverst: hele perioden. Nederst: en sommerperiode.

Det er umiddelbart svært at kvantificere, hvornår vandløbspåvirkningen er for stor. Af figur 4.6 fremgår det, at udløbsvandføringen i nogle perioder er høj sammenlignet med den naturlige vandføring i vandløbet. I sommerperioden nederst på figur 4.6 er den relative påvirkning stor, da vandføringen i vandløbet er lav. Modsat er den relative påvirkning lille i vinterperioden, hvor det til gengæld opstår de største resulterende vandføringer. Det er ikke umiddelbart til at afgøre, hvilket af tilfældene der er mest kritisk for vandløbet, da der er forskellig modstand i vandløbet afhængig af årstiden. En udledning på 3,0 l/s/ha total oplandsareal kan muligvis påvirke vandløbet negativt, når det ikke er kontrolleret i forhold til kapaciteten i vandløbet.

Det fremgår desuden nederst på figur 4.6, at der er sammenfald mellem høj udløbsvandføring og høj vandløbsvandføring i vandløbet. Der tages derfor ikke hensyn til vandløbets kapacitet ved blot at hæve den passive udledning. Det vurderes derfor, at det er en meget ukontrolleret metode blot at hæve udløbsvandføringen. For at imødekomme dette er der et potentiale i at indføre aktiv styring af udledningen.

5. Bassinstyring på baggrund af restkapacitet i vandløb

For at opnå en bedre udnyttelse af bassinvolumenet, og dermed undgå overløbshændelser, implementeres en aktiv styring af bassinudløbet i den numeriske model. Der tages fortsat udgangspunkt i systemet i Voldum med en fremtidig oplandsforøgelse. Effekten af styringsstrategierne kan direkte sammenlignes med resultaterne for den passive udledning. Samtidig vurderes den hydrauliske vandløbspåvirkning.

Styringen af bassinet foregår i realtid. Realtidsstyring opnås ved at overvåge systemet samtidig med, at data herfra benyttes til at styre systemet. Ved implementering af styring i et bassinudløb skal målet for styringen være fastlagt. Herudfra kan der fastlægges en styringsstrategi for det enkelte bassin. Fordelen ved at styre udledningen fra et bassin er, at styringen er fleksibel, og den kan tilpasses mange forskellige problemstillinger. Forskellige formål for en styringsstrategi kan være:

- Hurtig afledning af regnvand
- Begrænsning af hydraulisk vandløbspåvirkning
- Begrænsning af stofrelateret vandløbsbelastning
- God vandkvalitet i bassin
- Forudbestemt opholdstid af vand i bassin

Det er de lokale forhold, der skal afgøre formålet for en styringsstrategi for bassinudledningen. I dette projekt er formålet at øge funktionskapaciteten for bassinet. Derfor skal styringen tage udgangspunkt i at aflede vandet hurtigt uden, at det er på bekostning af den hydrauliske vandløbspåvirkning. Disse to styringsmål skal danne rammerne for at finde en løsning, der tilgodeser begge henseende. På denne baggrund afprøves først følgende to styringsstrategier, som udgør to ekstremer inden for styringsmålene:

- **Styringsstrategi 1: Maksimal udnyttelse af vandløbskapacitet**

Formålet er at øge kapaciteten i afløbssystem og bassin ved at udfordre vandløbets kapacitet til maksimumgrænsen.

- *Styringen baseres udelukkende på vandføringen i vandløbet.*

- **Styringsstrategi 2: Sæsonvarieret bestemmelse af vandløbskapacitet**

Formålet er at beskytte vandløbet ved at overholde sæsonbestemte kriterier for, hvor meget vand der udledes. Dermed udfordres kapaciteten i bassinet.

- *Styringen baseres udelukkende på vandføringen i vandløbet.*

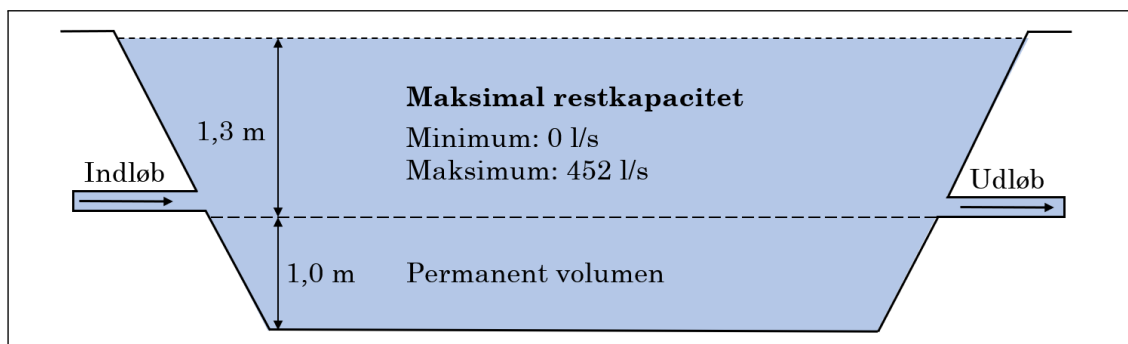
De første to styringsstrategier baseres udelukkende på vandføringen i det modtagende vandløb. Senere i projektet undersøges også styringsstrategier, hvor vandstanden i bassinet inddrages. Når styringsstrategierne er baseret på vandstanden i bassinet og den hydrauliske vandløbspåvirkning, er det nødvendigt at have et mål for, hvornår kapaciteten overskrides. I bassinet overskrides kapaciteten, når der sker overløbshændelser. I vandløbet er det også nødvendigt at have et mål for, hvornår kapaciteten overskrides. I forbindelse med den hydrauliske belastning

er erosion af brinke og vandløbsbund kritisk for vandløbet. En oversvømmelse af vandløbet er ikke direkte skadeligt for selve vandløbet, men det kan have konsekvenser for de omkringliggende arealer. I denne rapport anvendes vandføringen som et mål for kapaciteten i vandløbet. Det antages, at vandløbet er i stand til at håndtere naturligt høje vandføringer, som forekommer med en rimelig hyppig frekvens. Derfor anvendes vandløbets medianmaksimum vandføring, som et mål for vandløbets hydrauliske kapacitet.

5.1 Styringsstrategi 1: Maksimal udnyttelse af vandløbskapacitet

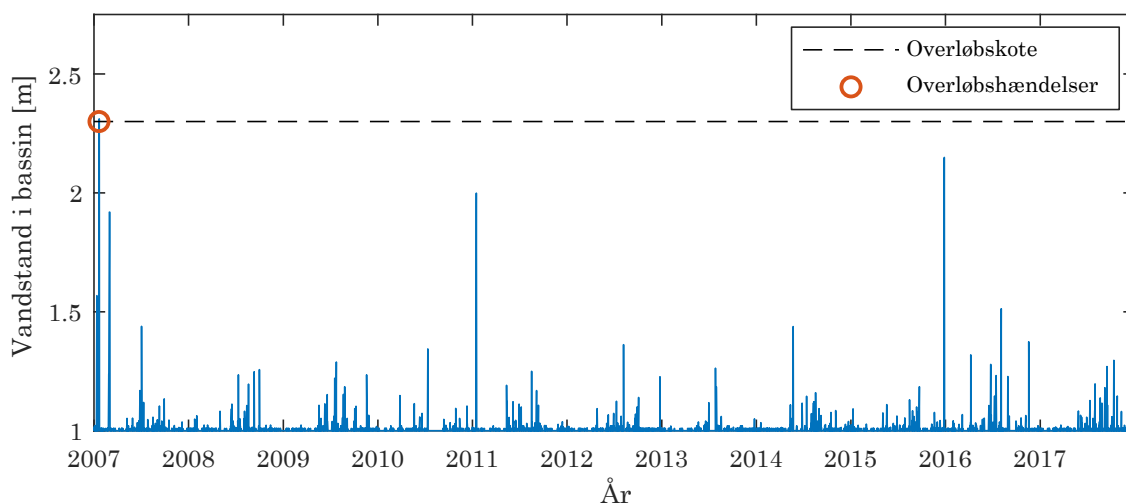
Der undersøges en styringsstrategi, hvor vandløbskapaciteten udfordres. Formålet er at holde vandstanden i bassinet så lav som mulig og herved undgå overløb. For at udnytte vandløbskapaciteten mest muligt antages det, at der kan løbe en vinter medianmaksimum vandføring i vandløbet hele året rundt. Vinter medianmaksimum vandføringen er en naturligt forekommende vandføring, som statistisk set overskrides hvert andet år. For at opnå en maksimal udnyttelse af vandløbskapaciteten, tillades det at udlede den mængde vand, som resulterer i en vinter medianmaksimum vandføring nedstrøms i vandløbet. Styringen tillader også et fuldstændigt stop af udledningen, såfremt vandløbets kapacitet overskrides. Vinter medianmaksimum vandføringen i vandløbet er bestemt til 452 l/s på baggrund af vandføringsdata for hele måleperioden på 11 år.

Ved denne styringsstrategi styres hele forsinkelsesvolumenet i bassinet, og styringen af udløbsvandføringen starter dermed, når vandstanden i bassinet stiger. Princippet for Styringsstrategi 1 fremgår på figur 5.1.



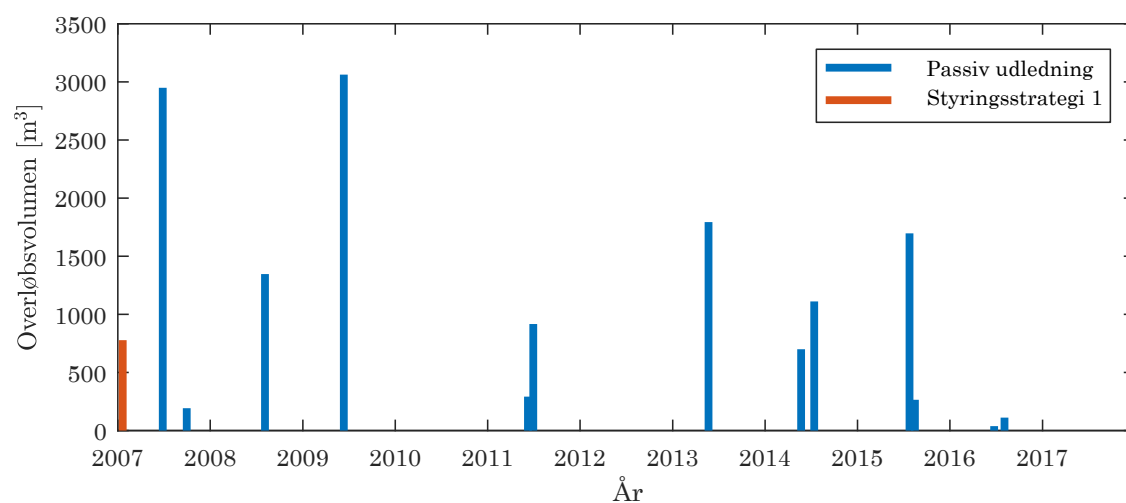
Figur 5.1. Styringsstrategi 1: Princip for styring af bassinudløb.

Udløbsvandføringen beregnes som differensen mellem vinter medianmaksimum vandføringen og vandføringen opstrøms i Revens Møllebæk. For at undgå at det permanente volumen i bassinet udledes, skal udledningen ikke være større end differensen mellem det permanente volumen og volumen af det opmagasinerede nedbør. Hvis vandføringen i vandløbet er højere end vinter medianmaksimum vandføringen, tilbageholdes vandet i bassinet. Styringsstrategiens betydning for den simulerede vandstand i bassinet fremgår på figur 5.2.



Figur 5.2. Styringsstrategi 1: Den simulerede vandstand i bassinet, når der udledes op til vinter medianmaksimum vandføringen.

Det fremgår på figur 5.2, at vandstanden i bassinet altid er lav. Der går flere år mellem, at vandstanden i bassinet er højere end 1,5 meter. Det skyldes, at bassinet udleder vand uforsinket i 93 % af udledningstiden. Det giver et stort effektivt volumen i bassinet og minimerer risikoen for, at koblet regn giver overløb. Der forekommer én overløbshændelse i starten af den simulerede periode. Volumen for denne overløbshændelse samt volumenerne for overløbshændelserne under passiv udledning fremgår på figur 5.3.

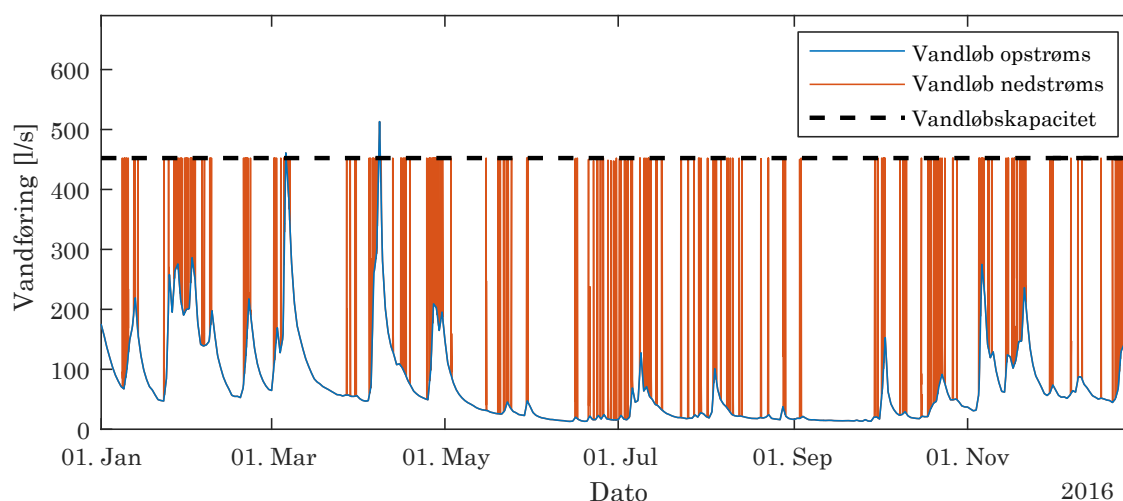


Figur 5.3. Styringsstrategi 1: Overløbsvolumener sammenlignet med en passiv udledning.

Det fremgår, at alle overløbshændelser, som forekommer ved en passiv udledning, undgås ved Styringsstrategi 1. Til gengæld opstår en ny overløbshændelse i vinteren 2007. Det skyldes, at vandføringen i vandløbet i en periode på fem dage er højere end vinter medianmaksimum vandføringen. Derfor kan der i den periode ikke udledes vand fra bassinet. Ulempen ved denne styringsstrategi er derfor, at der ikke er defineret et minimum for udløbsvandføringen, og derfor skal der magasineres meget vand i de perioder, hvor regnhændelser er sammenfaldende med vandløbsvandføringer, hvor vinter medianmaksimum vandføringen overskrides.

I denne styringsstrategi, hvor vandløbets kapacitet udnyttes maksimalt, tillades der store ud-

løbsvandføringer fra bassinet. Den største udløbsvandføring er 447 l/s. På figur 5.4 fremgår vandføringen opstrøms og nedstrøms for bassinudløbet i 2016.



Figur 5.4. Styringsstrategi 1: Vandløbsvandføring opstrøms og simuleret vandløbsvandføring nedstrøms for bassinudløbet i 2016.

Det fremgår af figur 5.4, at bassinudledningen altid udgøres af restkapaciteten i vandløbet. Derfor er den relative påvirkning på vandløbsvandføringen stor om sommeren, da den opstrøms vandføring er lav. Der opstår en høj vandføring i vandløbet på tidspunkter af året, hvor det er usandsynligt, at der naturligt forekommer tilsvarende vandføring. Vandløbet har dog ikke nødvendigvis kapacitet til at håndtere en vinter medianmaksimum vandføring på alle tider af året.

Om sommeren er der en større modstand i vandløbet, og vandføringen kan derfor resultere i en højere vandstand. I bilag C beregnes en vandstand i vandløbet for en sommersituation, hvor der forekommer en vinter medianmaksimum vandføring. Der anvendes tværsnitsdata fra Revens Møllebæk fra Orbicon [2015], til at bestemme om der er risiko for oversvømmelse af vandløbet. Den gennemsnitlige højde på brinkene er 1,2 meter i en strækning på 400 meter efter udløbet, herefter er den 0,7 meter. Den resulterende vandstand er 0,5 meter for en sommersituation, hvor der er en vinter medianmaksimum vandføring. Der forekommer ikke oversvømmelse langs vandløbet, da brinkene for samtlige tværsnitsdata er højere end dette, dog er vandstanden omtrent fire gange så høj, som hvad der naturligt forekommer om sommeren.

Fordelen ved Styringsstrategi 1 er, at den er effektiv til at undgå overløbshændelser, hvilket også medfører, at den maksimale vandføring nedstrøms i vandløbet ikke bliver lige så høj som i en situation med passiv udledning. Karakteristika for Styringsstrategi 1 fremgår i tabel 5.1.

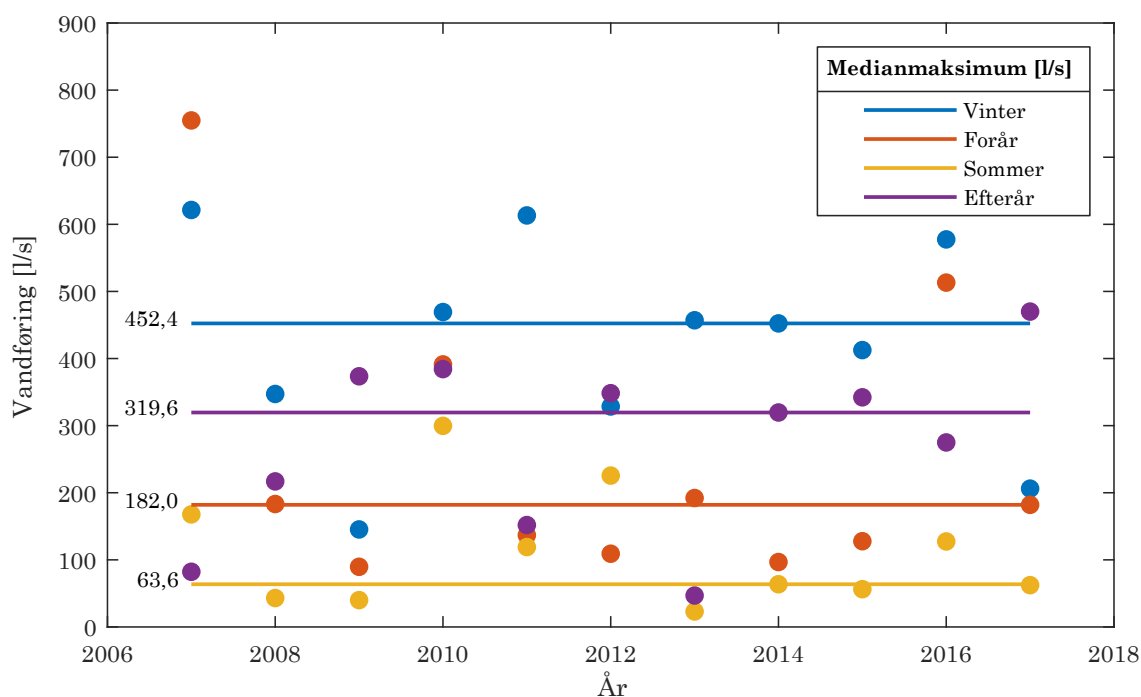
	Antal overløb	Maksimal overløbsvolumen	>50 % fyld- ningsgrad	Maksimal vand- føring i vandløb
	[-]	[m³]	[%]	[l/s]
Passiv udledning	13	2756	2,8	2176
Styringsstrategi 1	1	780	0,2	1027

Tabel 5.1. Antal overløbshændelser og maksimal overløbsvolumen, fyldningsgrad og resulterende maksimale vandføring i vandløb for en passiv udledning og **Styringsstrategi 1**: (Maksimal udnyttelse af vandløbskapacitet).

Styringsstrategi 1 har en god effekt i regnvandssystemet ved Voldum, da vandløbsvandføringen har store variationer. Dermed er vinter medianmaksimum vandføringen høj i forhold til den normale vandføring i vandløbet, hvilket resulterer i en høj restkapacitet. Derved skal bassinet kun tilbageholde ganske få hændelser ved denne styringsstrategi. Et system, hvor der udledes til et vandløb med mindre variation i vandføringen, kan udfordre denne styringsstrategi, da restkapaciteten er lavere. Det er desuden en grov antagelse, at en vinter medianmaksimum vandføring er et mål for vandløbets kapacitet hele året rundt.

5.2 Styringsstrategi 2: Sæsonvarieret udnyttelse af vandløbskapacitet

I Styringsstrategi 2 er målet at beskytte vandløbet mest muligt, hvilket stiller krav til kapaciteten i bassinet. Der anvendes en årstidsbestemt medianmaksimum vandføring som mål for vandløbets kapacitet, da vandføringen i vandløbet varierer meget årstiderne imellem. Desuden er det vist i Styringsstrategi 1, at en vinter medianmaksimum vandføring giver en meget høj udledning i sommersituationer, sammenlignet med vandløbets vandføring om sommeren. Det er mere konservativt i forhold til vandløbsbelastningen at anvende årstidsbestemte medianmaksimum vandføringer, da der derved tages højde for, at der ikke er samme modstand i vandløbet året rundt. Medianmaksimum vandføringen for hver årstid, baseret på de 11 års data, fremgår af figur 5.5.



Figur 5.5. Medianmaksimum vandføring for de fire årstider. Punkterne angiver årlige maksimumværdier for hver årstid.

Af figur 5.5 fremgår det, at der er en stor spredning af de maksimale sæsonbestemte vandføringer. Maksimumvandføringerne for forårs månederne har den største spredning, som er på 203 l/s. Her er forskellen fra den laveste til højeste døgnmiddelvandføring 665 l/s. Det er karakteristisk for vandløbet, at der forekommer vandføringer som er meget lavere og meget højere end

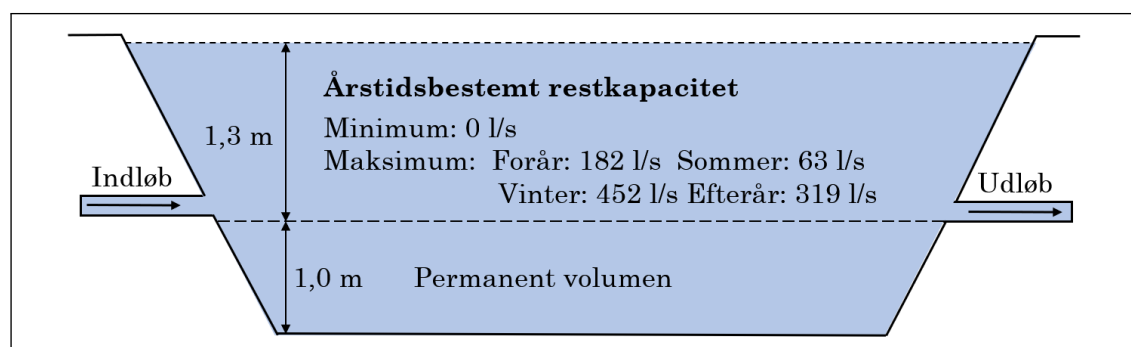
medianmaksimum vandføringen. Det er derfor konservativt at antage, at medianmaksimum vandføringen er den maksimale vandføring, som vandløbet kan håndtere. Medianmaksimum, -minimum og middel vandføringen for de fire årstider, fremgår af tabel 5.2.

Vandføring [l/s]	Forår	Sommer	Efterår	Vinter
Medianminimum	12,2	8,4	14,3	33,4
Middel	55,2	19,8	67,0	116,2
Medianmaksimum	182,0	63,6	319,6	452,4

Tabel 5.2. Karakteristiske parametre for estimeret vandløbsdata for Revens Møllebæk. Opdelt efter årstider.

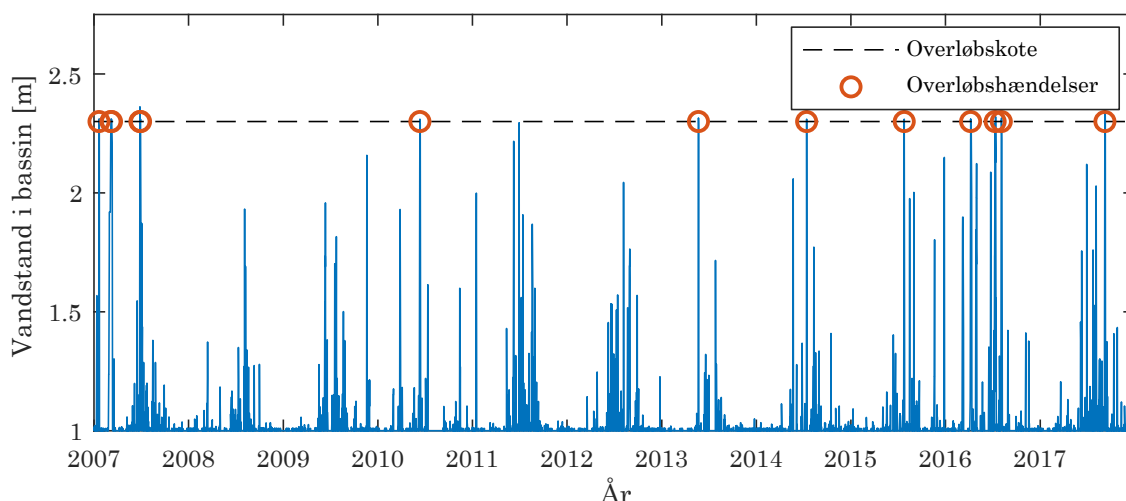
Medianmaksimum vandføringerne er beregnet på baggrund af døgnmiddel vandføringer, som er væsentligt lavere end nogle af de øjebliksvandføringer som forekommer i vandløbet. Det er dermed konservativt at anvende døgnmiddelvandføringerne til at bestemme et mål for øjebliksvandføringer.

For at sikre, at medianmaksimum vandføringerne ikke giver anledning til oversvømmelse, bestemmes vandstanden i vandløbet for hver årstid i bilag C. Vandstanden er bestemt på baggrund af årstidsbestemte Manningtal, og det viser, at en sæsonbestemt medianmaksimum vandføring, ikke resulterer i kritiske vandstande i vandløbet. Derfor anvendes medianmaksimum vandføringen, som den maksimale tilladte resulterende vandføring nedstrøms for udledningen, i hver af de fire årstider. Styringsstrategi 2 fremgår på figur 5.6.



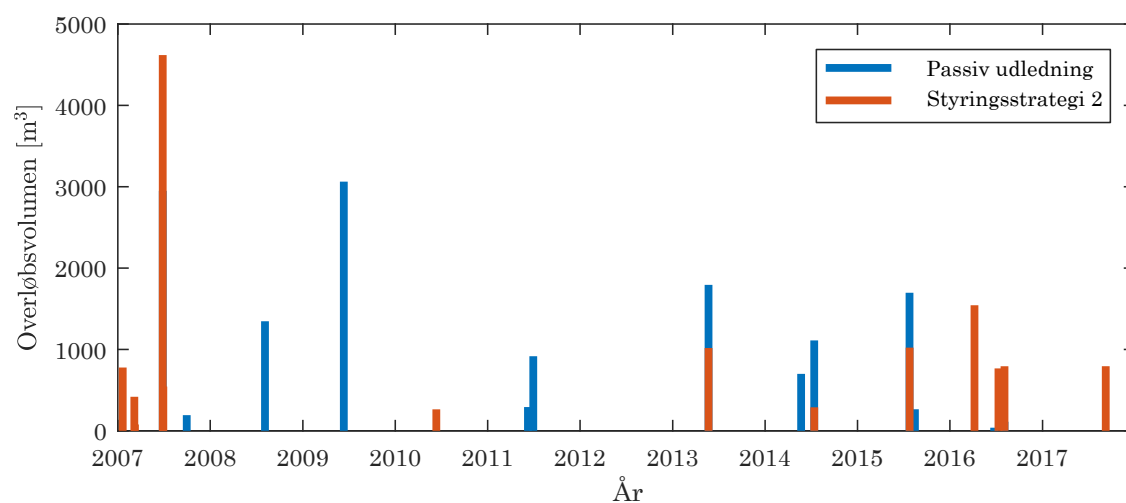
Figur 5.6. Styringsstrategi 2: Princip for styring af bassinudløb.

Bassinet styres fortsat kun på baggrund af vandføringen i vandløbet, som er årstidsbestemt. Den simulerede vandstand i bassinet ved Styringsstrategi 2 fremgår på figur 5.7.



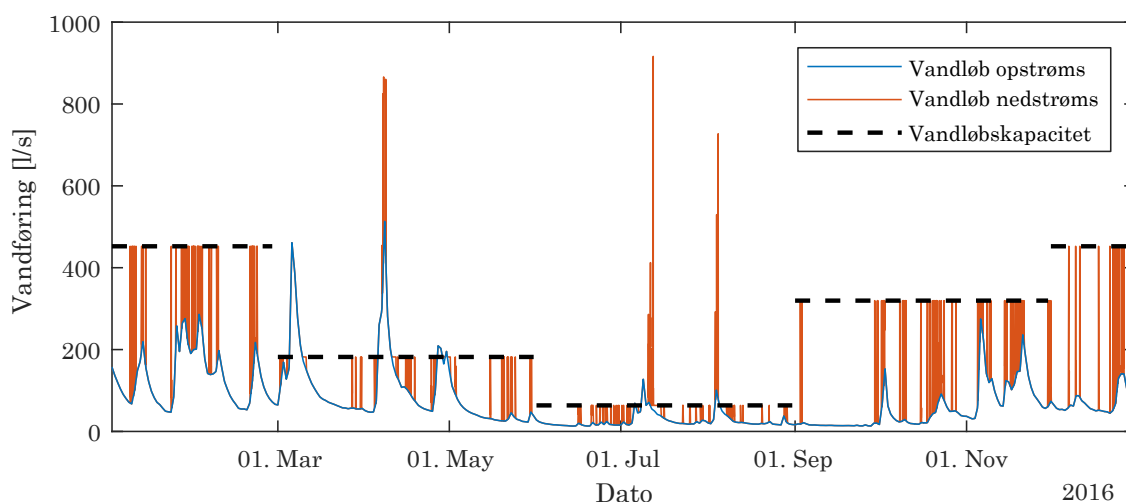
Figur 5.7. Styringsstrategi 2: Den simulerede vandstand i bassinet, når der udledes i henhold til årstidsbestemte medianmaksimum vandføringer.

På figur 5.7 fremgår det, at vandstanden i bassinet ofte er høj i forhold til Styringsstrategi 1, hvor vandstanden sjældent er over 1,5 meter. Det er primært i sommerperioderne, at vandstanden i bassinet stiger, fordi der er en mindre restkapacitet i vandløbet. I denne styringsstrategi kan vandet udledes uforsinket i 68 % af tiden. Styringsstrategi 2 medfører 11 overløbshændelser i perioden, hvilket fremgår på figur 5.8.



Figur 5.8. Styringsstrategi 2: Overløbsvolumener sammenlignet med passiv udledning. Bemærk: overløbshændelsen i 2007 samt de to overløbshændelser i 2016 for passiv udledning, ligger bag overløbshændelserne for Styringsstrategi 1, på samme tidspunkt.

Nogle af de 11 overløbshændelser sker på andre tidspunkter i forhold til den passive udledning, da de er et resultat af, at bassinet skal tilbageholde hele regnhændelser i perioder med høj vandløbsvandføring. De 11 overløbshændelser viser, at der er stor forskel på, hvordan restkapaciteten i vandløbet bestemmes, da Styringsstrategi 1 kun gav ét overløb. Det fremgår på figur 5.9, at vandløbsbelastningen, i henhold til vandløbsvandføringen, i denne styringsstrategi er væsentligt lavere end før.



Figur 5.9. Styringsstrategi 2: Vandløbsvandføring opstrøms og nedstrøms for bassinudløbet i 2016.

Det fremgår, at vandløbsbelastningen er under kontrol, medmindre der sker overløb. Dette viser, at det er meningsløst at passe på vandløbet samtidig med, at der tillades overløbshændelser. Overløbshændelserne er meget kritiske for vandløbet, da den maksimale vandføring nedstrøms i vandløbet stiger. Dette fremgår af resultaterne for Styringsstrategi 2 i tabel 5.3.

	Antal overløb	Maksimal overløbsvolumen	>50 % fyld- ningsgrad	Maksimal vand- føring i vandløb
	[-]	[m³]	[%]	[l/s]
Passiv udledning	13	2756	2,8	2176
Styringsstrategi 1	1	778	0,2	1027
Styringsstrategi 2	11	5162	1,9	2947

Tabel 5.3. Antal overløbshændelser og maksimal overløbsvolumen, fyldningsgrad og resulterende maksimale vandføring i vandløb for en passiv udledning, **Styringsstrategi 1:** (Maksimal udnyttelse af vandløbskapacitet) og **Styringsstrategi 2:** (sæsonvarieret udnyttelse af vandløbskapacitet).

Det fremgår af tabel 5.3, at Styringsstrategi 2 er en forværring i forhold til forrige resultater i Styringsstrategi 1. Styringsstrategi 2 tager meget hensyn til vandløbet, men det er på bekostning af mange overløbshændelser, hvilket er i strid med formålet med styringsstrategien.

5.3 Delkonklusion

I de to første styringsstrategier er to ekstremer inden for styringsmålene testet. Styringsstrategi 1 giver en klar forbedring af kapaciteten i bassinet, men den presser til gengæld vandløbskapaciteten til grænsen. Styringsstrategi 2 tager meget hensyn til vandløbet, men kapaciteten i bassinet er ikke tilstrækkelig til at tilbageholde vandet, så derfor opstår der mange overløbshændelser. Det er derfor klart, at der skal findes et kompromis mellem de to styringsstrategier for at opnå et effektivt bassin, som ikke overbelaster vandløbet. For at skåne vandløbet fortsættes der med styringsstrategier baseret på den årstidsbestemte restkapacitet i vandløbet.

Begge styringsstrategier forudsætter, at der tillades høje udløbsvandføringer fra bassinet. Det er dog tvivlsomt hvorvidt en kommune vil tillade udløbsvandføringer på op imod 447 l/s, hvilket for dette oplandsareal svarer til en udledning på 8,3 l/s/ha total oplandsareal.

6. Bassinstyring ved sammenspil mellem vandløbsbelastning og bassinkapacitet

Styringsstrategi 1 og 2 i kapitel 5 danner grundlag for at opnå et kompromis mellem kapaciteten i bassinet og belastningen af vandløbet. Det vælges at bygge videre på Styringsstrategi 2, da den tager mest hensyn til vandløbets kapacitet. Ud fra forrige styringsstrategier er det desuden konkluderet, at et fuldt stop af udløbsvandføringen hurtigt resulterer i overløbshændelser, da vandløbsvandføringen i lange perioder kan overskride medianmaksimum vandføringen. Derfor undgås styringsstrategier med fuldt stop af udløbsvandføringen. Det fører til følgende styringsstrategier:

- **Styringsstrategi 3: Udledning i afgrænset interval**

Formålet er at opnå en mere kontrolleret udløbsvandføring ved at afgrænse udløbsvandføringen til et bestemt interval. Der findes et kompromis mellem vandstanden i bassinet og vandløbspåvirkningen.

- *Styringen baseres på vandføringen i vandløbet og vandstanden i bassinet.*

- **Styringsstrategi 4: Øget udløbsvandføring ved kritisk vandstand**

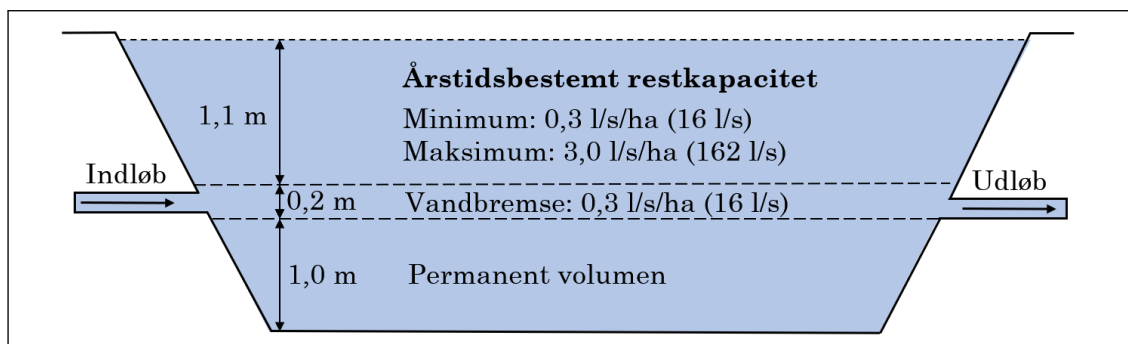
Formålet er at undgå overløbshændelser ved at øge udløbsvandføringen, hvis vandstanden i bassinet bliver kritisk.

- *Styringen baseres på vandføringen i vandløbet og vandstanden i bassinet.*

Hvor Styringsstrategi 1 og 2 er baseret udelukkende på vandføringen i vandløbet, er Styringsstrategi 3 og 4 også baseret på vandstanden i bassinet. Herved får bassinets kapacitet en betydning for styringsstrategien. Dette gør det muligt at tilpasse udledningen alt efter, hvor kritisk vandstanden i bassinet er.

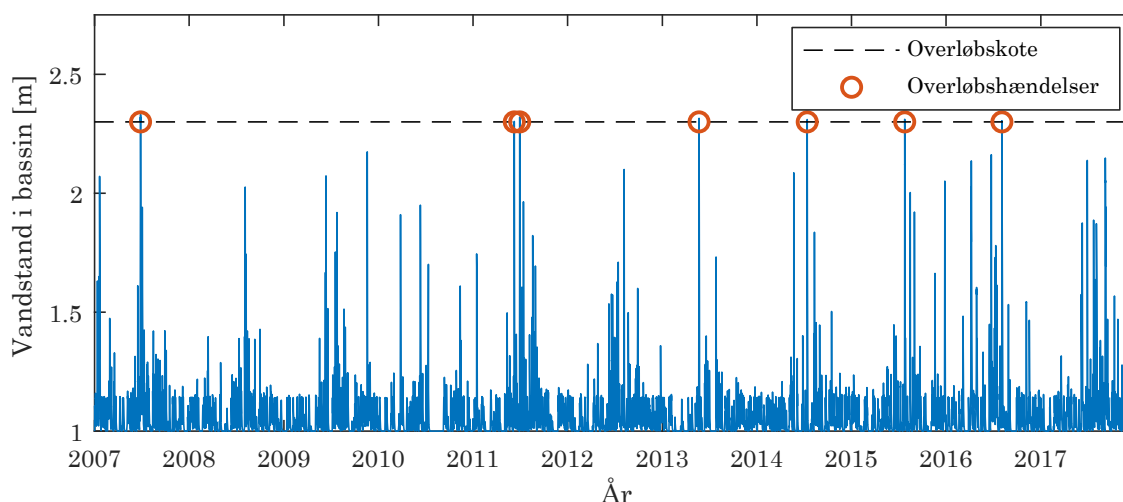
6.1 Styringsstrategi 3: Udledning i afgrænset interval

I denne styringsstrategi tages fortsat udgangspunkt i den årstidsbestemte restkapacitet i vandløbet, da vandløbspåvirkningen er mindre. For at undgå store udløbsvandføringer fra bassinet defineres en maksimum udløbsvandføring til 3,0 l/s/ha total oplandsareal. Denne er valgt, da det er påvist i afsnit 4.1 på side 28, at overløbshændelserne ved denne udløbsvandføring kan undgås ved en passiv udledning. Derudover defineres en minimum udløbsvandføring på 0,3 l/s/ha for at undgå perioder, hvor bassinet skal tilbageholde hele regnhændelser. Der er mange små regnhændelser, som ikke giver en væsentlig vandstandsstigning i bassinet, så styringen skal først træde i kraft, når vandstanden i bassinet er steget mindst 0,2 meter over det permanente vandspejl. Dette er en fordel, da der herved spares energi ved ikke at benytte styringsstrategien på de mindste regnhændelser. Vandstanden er under 0,2 meter i 83 % af tiden. Når vandstanden stiger yderligere, starter styringen af bassinet på baggrund af aktuel vandføringsdata. Princippet for styringen er illustreret på figur 6.1.



Figur 6.1. Styringsstrategi 3: Princip for styring af bassinudløb.

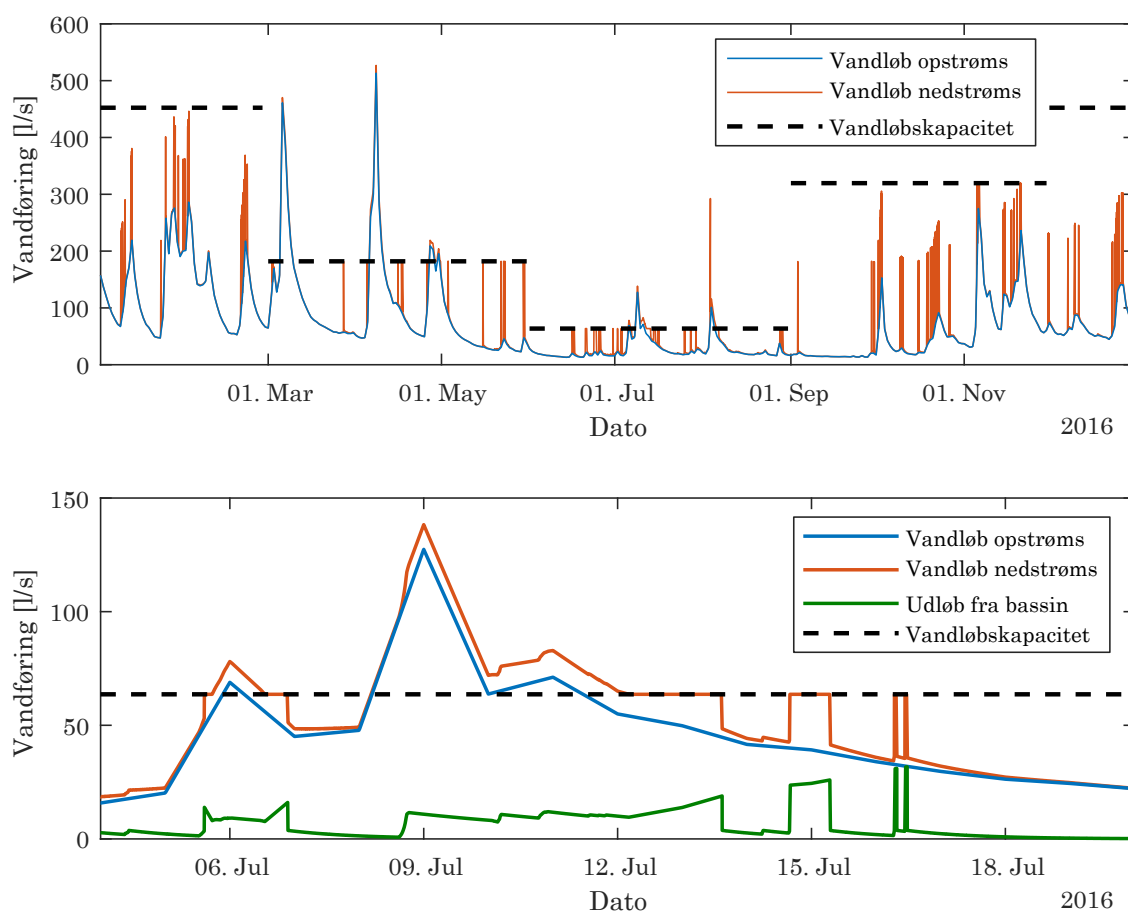
Det bestemmes på baggrund af restkapaciteten i vandløbet, hvor meget vand der udledes fra bassinet. Hvis vandføringen i vandløbet overskrider den sæsonbestemte medianmaksimum vandføring udledes der 0,3 l/s/ha total oplandsareal. Omvendt, hvis restkapaciteten er stor, udledes der maksimalt 3,0 l/s/ha total oplandsareal. Ved simulering med Styringsstrategi 3 er vandstanden i bassinet som vist på figur 6.2.



Figur 6.2. Styringsstrategi 3: Den simulerede vandstand i bassinet.

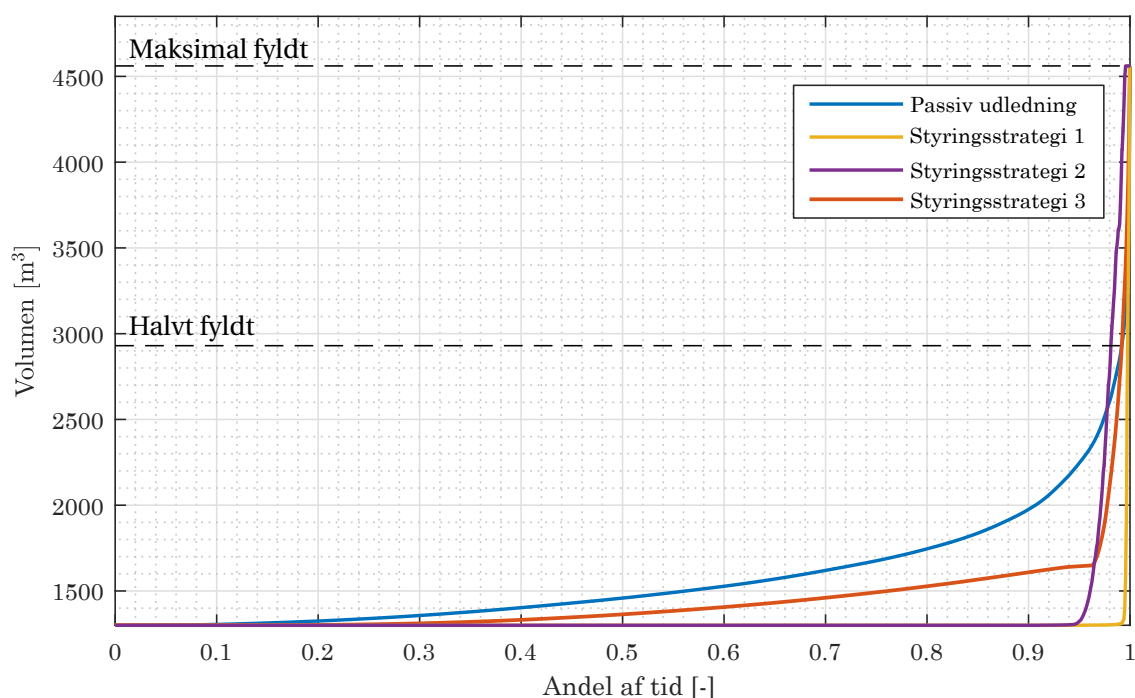
Det fremgår af figur 6.2, at vandstanden ofte er under 1,2 meter. Det skyldes, at styringen træder i kraft ved denne vandstand og vandet afledes hurtigt derefter. Derved opnås et forholdsvist tomt bassin i en stor del af tiden, og risikoen for overløbshændelser grundet koblet regn falder. Samtidig er vandløbspåvirkningen begrænset, da den nedstrøms vandføring ikke overstiger de årstidsbestemte medianmaksimum vandføringer med mere end 16 l/s, tilsvarende minimumudledningen på 0,3 l/s/ha total oplandsareal. Det overskrides kun, når der sker overløbshændelser, hvilket er syv gange i løbet af de 11 år.

På figur 6.3 fremgår vandløbsvandføringen opstrøms og nedstrøms for bassinudløbet. Øverst er vist år 2016, hvor det fremgår, at vandløbsbelastningen holdes inden for vandløbets naturlige variationer året rundt, såfremt der ikke sker en overløbshændelse.



Figur 6.3. Styringsstrategi 3: Øverst - Vandløbsvandføring opstrøms og nedstrøms bassinudløbet i 2016. Nederst - Bassinudledning, samt vandløbsvandføring opstrøms og nedstrøms bassinudløbet for en periode i juli 2016.

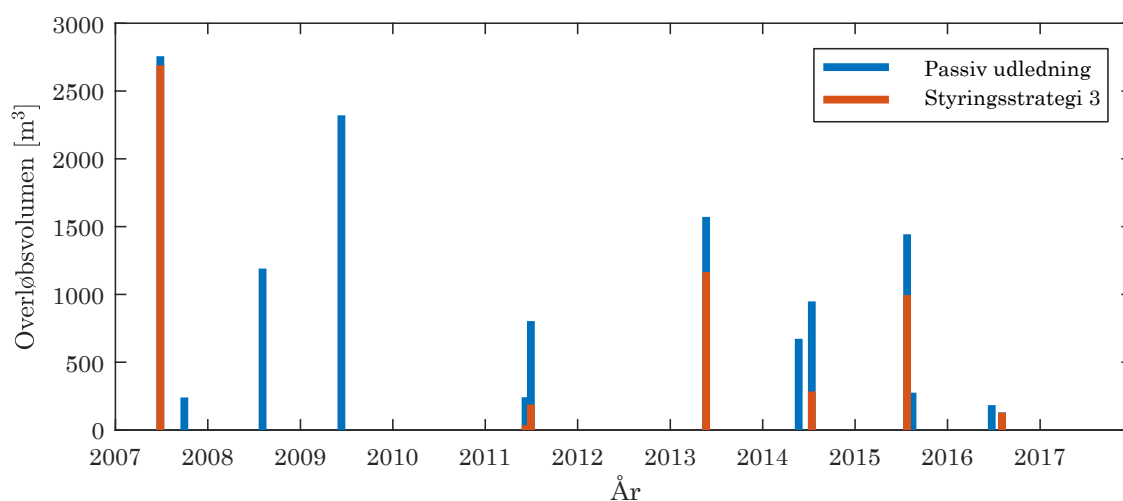
Nederst på figur 6.3 fremgår det, at udløbet fra bassinet ikke resulterer i en større vandføring end medianmaksimum vandføringen. Der er dog perioder, hvor den opstrøms vandføring er højere end medianmaksimum vandføringen, og der udledes en minimumudledning på 0,3 l/s/ha. Ved at anvende denne form for styring kan den relative belastning af vandløbet blive stor, men den resulterende vandføring bliver ikke kritisk for vandløbet. Samtidig undgås meget store fluktuationer i udløbsvandføringen ved aldrig at overskride en udløbsvandføring på 3,0 l/s/ha total oplandsareal. Ved Styringsstrategi 3 er der opnået et bassin med en lav fyldningsgrad, hvilket fremgår af figur 6.4.



Figur 6.4. Fyldningsgrad for bassinet ved Styringsstrategi 1, 2 og 3 samt for passiv udledning.

Det fremgår på figur 6.4, at grafen for Styringsstrategi 3 har et knæk, hvilket opstår i det punkt, hvor styringen af udløbet begynder. Fyldningsgraden for styringen er ikke ækvivalent til fyldningsgraden for den passive udledning på 0,3 l/s/ha total oplandsareal, selvom der udledes med samme vandføring de første 0,2 meter. Det skyldes, at bassinvandstanden oftere er under 0,2 meter, når styringen anvendes. Det fremgår også, at Styringsstrategi 3 er en anelse bedre end Styringsstrategi 2, da bassinet sjældnere er fyldt mere end 2000 m³. Dette skyldes minimumudledningen på 0,3 l/s/ha total oplandsareal.

Styringsstrategi 3 forårsager syv overløbshændelser i løbet af perioden på 11 år. Sammenlignet med den passive udledning på 0,3 l/s/ha total oplandsareal, er det næsten en halvering af antal hændelser. På figur 6.5 fremgår overløbshændelserne for Styringsstrategi 3.



Figur 6.5. Styringsstrategi 3: Overløbsvolumen for passiv udledning og Styringsstrategi 3. Bemærk: Den sidste overløbshændelse i 2016 for passiv udledning, ligger bag overløbshændelsen for Styringsstrategi 3, på samme tidspunkt.

I denne styringsstrategi er overløbshændelserne sammenfaldende med dem, som forekommer ved den passive udledning. Af figur 6.5 fremgår det, at de resterende overløbshændelser for Styringsstrategi 3 har et mindre overløbsvolumen. Den maksimale vandføring nedstrøms i vandløbet er desuden reduceret, da overløbshændelserne er mindre. Dette fremgår i tabel 6.1.

	Antal overløb [-]	Maksimal overløbsvolumen [m ³]	>50 % fyld- ningsgrad [%]	Maksimal vand- føring i vandløb [l/s]
Passiv udledning	13	2756	2,8	2176
Styringsstrategi 1	1	778	0,2	1027
Styringsstrategi 2	11	5162	1,9	2947
Styringsstrategi 3	7	2689	0,8	1443

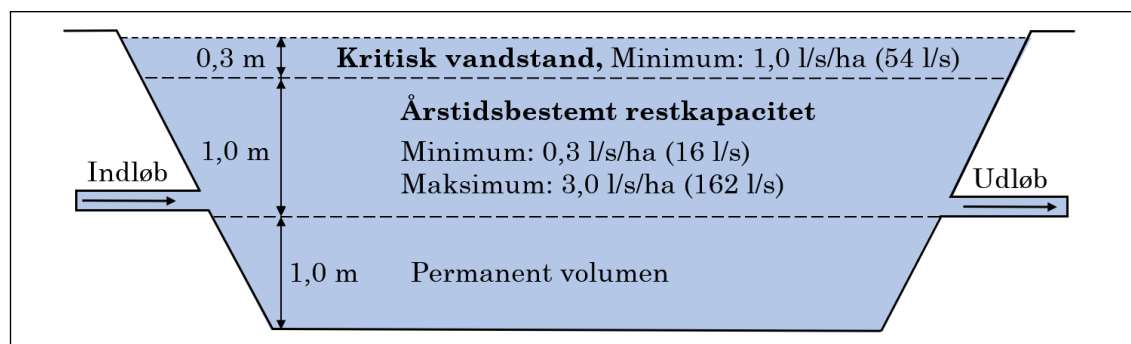
Tabel 6.1. Antal overløbshændelser og maksimal overløbsvolumen, fyldningsgrad og resulterende maksimale vandføring i vandløb for en passiv udledning, **Styringsstrategi 1:** (maksimal udnyttelse af vandløbskapacitet), **Styringsstrategi 2:** (sæsonvarieret udnyttelse af vandløbskapacitet) og **Styringsstrategi 3:** (udledning i afgrænset interval).

Syv overløbshændelser på 11 år er stadig ikke et tilfredsstillende serviceniveau, selvom bassinet har en meget lav fyldningsgrad. Derfor er det nødvendigt at ændre styringsstrategien, således flest mulige overløbshændelser undgås, og bassinet opnår et tilfredsstillende serviceniveau.

Ved videre undersøgelser af Styringsstrategi 3 viser det sig, at det ikke forhindrer overløbshændelserne at hæve maksimumudledningen til mere end 3,0 l/s/ha. Det skyldes, at de tilbageværende overløbshændelser, sker på tidspunkter, hvor vandføringen i vandløbet er højere end den pågældende medianmaksimum vandføring. Hvis overløbshændelserne skal reduceres, er det derfor minimumudledningen på 0,3 l/s/ha, der skal hæves.

6.2 Styringsstrategi 4: Øget udløbsvandføring ved kritisk vandstand

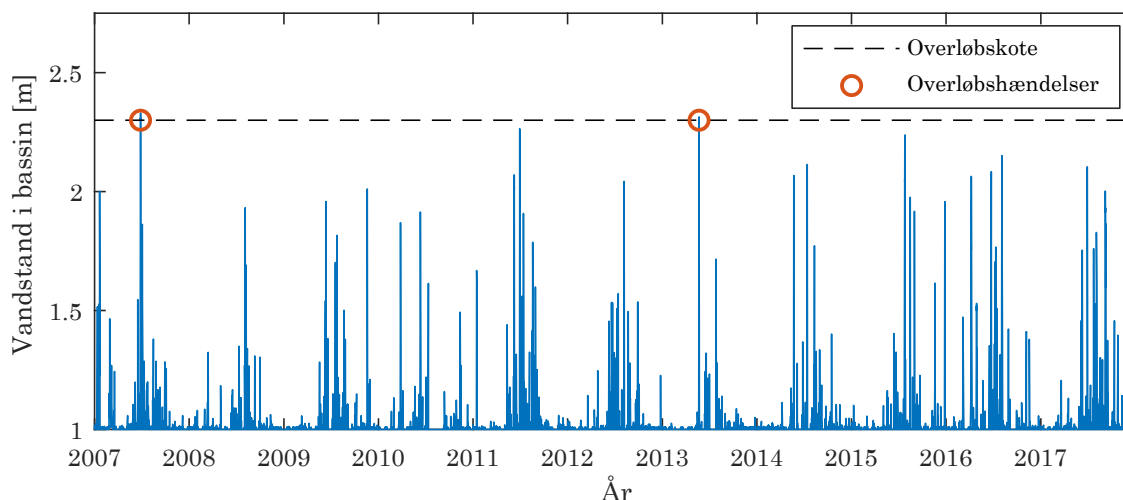
I Styringsstrategi 3 træder styringen i kraft, når vandstanden i bassinet er mere end 1,2 meter. Det undersøges, hvilken effekt det har at styre bassinet i hele forsinkelsesvolumenet, hvorfor de 0,2 meter uden styring geninddrages i styringen. Derudover tilføjes en kritisk vandstand, hvor udløbsvandføringen øges til minimum 1,0 l/s/ha total oplandsareal, hvis vandstanden i bassinet overstiger 2 meter. Dermed bliver Styringsstrategi 4 jævnfør figur 6.6.



Figur 6.6. Styringsstrategi 4: Princip for styring af bassinudløb.

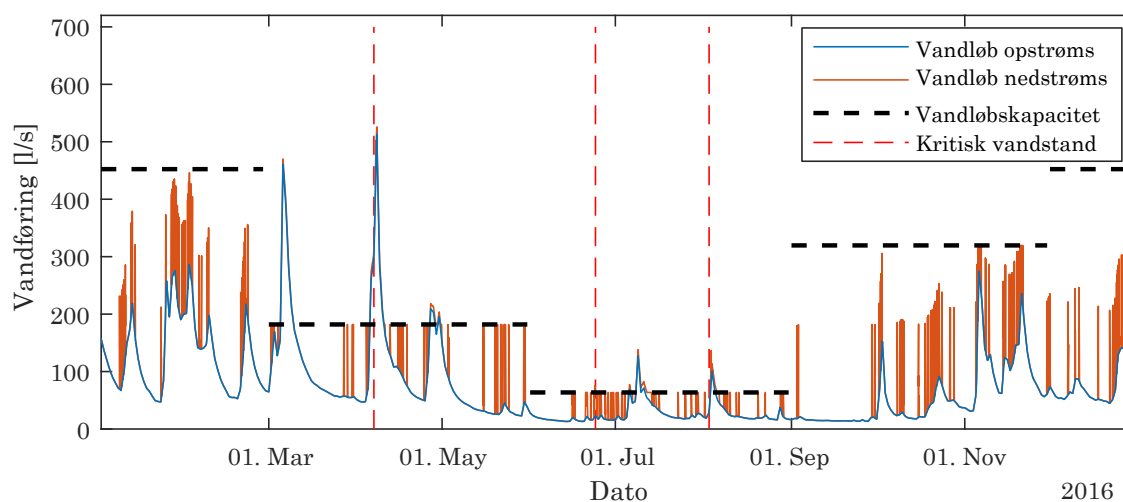
Styringsstrategi 4 giver anledning til en vandstand, som oftere er under 2 meter, hvilket fremgår af figur 6.7. Dette er som følge af at mange regnhændelser udledes fra bassinet med en høj

vandføringen med det samme, hvilket resulterer i at der ofte er en meget lav vandstand i bassinet.



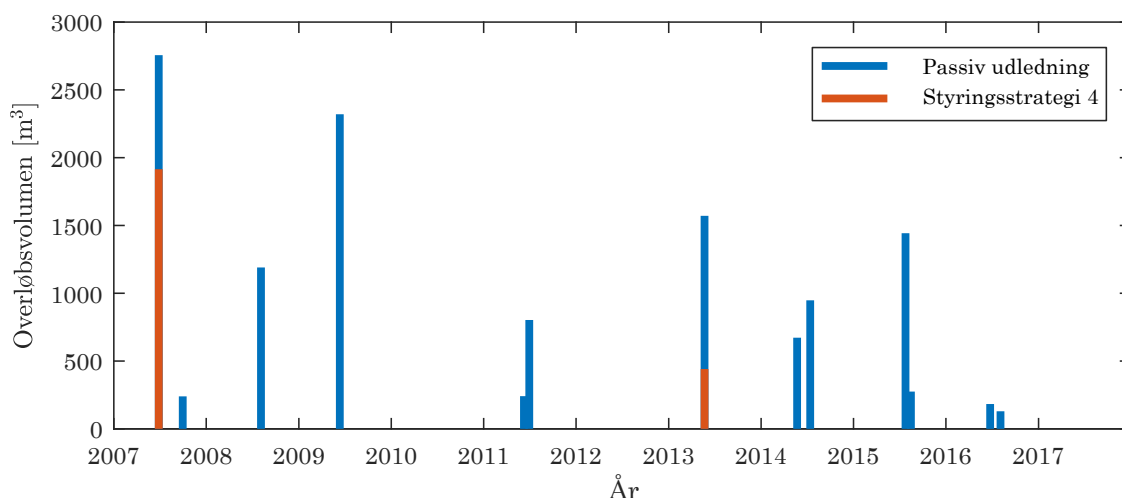
Figur 6.7. Styringsstrategi 4: Den simulerede vandstand i bassinet.

Det er en fordel at øge minimumudledningen for at undgå overløbshændelser i kritiske situationer, men den øgede udledning kan være sammenfaldende med en høj vandløbsvandføring. På figur 6.8 fremgår vandføringen opstrøms og nedstrøms for bassinudløbet, samt hvornår en kritisk vandstand resulterer i øget udløbsvandføring. Derved kan dette overbelaste vandløbet. Den kritiske vandstand kan dog også forekomme i perioder, hvor en udledning på 1,0 l/s/ha total oplandsareal ikke er kritisk for vandløbet.



Figur 6.8. Styringsstrategi 4: Vandløbsvandføring opstrøms og nedstrøms for bassinudløbet i 2016. Tidspunkt for den kritiske vandstand er markeret, hvor udledningen øges fra 0,3 til 1,0 l/s/ha total oplandsareal.

Det er ikke i alle tilfælde, at den øgede udløbsvandføring kan forhindre overløbshændelser. Der forekommer to nødoverløb ved Styringsstrategi 4, disse fremgår på figur 6.9.



Figur 6.9. Styringsstrategi 4: Overløbsvolumen sammenlignet med passiv udledning.

Det fremgår af figur 6.9, at overløbet i 2007 stadig er mest kritisk, men at alle de mindre overløbshændelser undgås på nær én. Af tabel 6.2 fremgår resultaterne for Styringsstrategi 4.

	Antal overløb [-]	Maksimal overløbsvolumen [m ³]	>50 % fyld- ningsgrad [%]	Maksimal vand- føring i vandløb [l/s]
Passiv udledning	13	2756	2,8	2176
Styringsstrategi 1	1	778	0,2	1027
Styringsstrategi 2	11	5162	1,9	2947
Styringsstrategi 3	7	2689	0,8	1443
Styringsstrategi 4	2	1915	0,6	1443

Tabel 6.2. Antal overløbshændelser og maksimal overløbsvolumen, fyldningsgrad og resulterende maksimale vandføring i vandløb for en passiv udledning, **Styringsstrategi 1:** (maksimal udnyttelse af vandløbskapacitet), **Styringsstrategi 2:** (sæsonvarieret udnyttelse af vandløbskapacitet), **Styringsstrategi 3:** (udledning i afgrænset interval) og **Styringsstrategi 4:** (øget udløbsvandføring ved kritisk vandstand).

Styringsstrategi 4 er effektiv til at undgå små overløbshændelser, det er dog på bekostning af en høj vandløbsbelastning. Den kritiske vandstand fører til en øget udløbsvandføring i 1,4 % af udledningstiden, hvor udløbsvandføringen tvinges til 1,0 l/s/ha total oplandsareal. Det kan være kritisk for vandløbet at tillade en udledning på 1 l/s/ha total oplandsareal, men det er ikke kritisk sammenlignet med en potentiel overløbshændelse.

6.3 Delkonklusion

I Styringsstrategi 3 indføres et minimum- og maksimum for udløbsvandføringen fra bassiner. Minimumudledningen på 0,3 l/s/ha total oplandsareal indføres for at undgå overløbshændelser, hvorved der forekommer færre og mindre nødoverløb. Ved at indføre en maksimal tilladt udledning på 3,0 l/s/ha total oplandsareal, sikres at udløbsvandføringen ikke er ude af proportioner i forhold til vandløbsvandføringen. En fordel ved Styringsstrategi 3 er, at små regnhændelser ikke kræver styring, da de ikke forårsager en væsentlig vandstandsstigning i bassinet.

Ved at styre hele forsinkelsesvolumenet i Styringsstrategi 4, samt indføre en højere minimum-

udledning ved kritisk vandstand, er der kun to overløbshændelser. Der forekommer dog samme maksimale resulterende vandføring som ved Styringsstrategi 3, og det er derfor ikke en umiddelbar forbedring af forholdene i vandløbet. Det giver en lille forskel for vandstanden i bassinet at styre de første 0,2 meter. Derfor vurderes, dette at være en unødvendig brug af ressourcer, da vandstanden er under 0,2 meter i 97 % af den samlede tid. På dette grundlag arbejdes der videre med Styringsstrategi 3.

7. Bassinstyring ved udnyttelse af det permanente volumen

På baggrund af Styringsstrategi 1-4 er det ikke muligt at undgå alle overløbshændelser. Derfor inddrages det permanente volumen som ekstra kapacitet i systemet, som et tillæg til Styringsstrategi 3. Det undersøges, hvorvidt der er potentiale i at tømme bassinet, inden der forekommer en regn, som kan resultere i en overløbshændelse.

Udledning af det permanente volumen kan give en øget stofrelateret belastning til vandløbet, da bassinets renseevne afhænger af det permanente volumen. Hvis det permanente volumen udledes kort tid efter en regnhændelse, er der risiko for, at vandet ikke opnår en opholdstid, hvor rensningen er tilfredsstillende. Det prioriteres dog at undgå overløbshændelser, da disse har en længerevarende skadelig effekt på vandløbet. Udnyttelse af det permanente volumen fører til følgende styringsstrategier som, med udgangspunkt i Styringsstrategi 3, undersøges i dette kapitel:

- **Styringsstrategi 5: Udnyttelse af permanent volumen**

Formålet er at undgå overløbshændelser ved at forudsige kritiske regnhændelser og tømme ud af det permanente volumen i bassinet. Det permanente volumen udledes i henhold til den årtidsbestemte restkapacitet i vandløbet, og medfører derfor ikke en øget hydraulisk belastning på vandløbet.

- *Styringen baseres på vandføringen i vandløbet, vandstanden i bassinet samt en forudsigelse af nedbør.*

- **Styringsstrategi 6: Kontrolleret overløb**

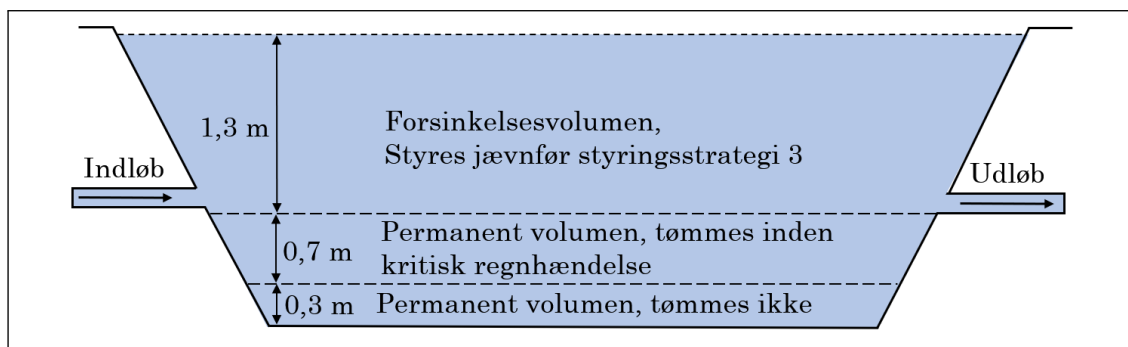
Formålet er at undgå overløbshændelser ved at forudsige kritiske regnhændelser, og lave et kontrolleret overløb. Både forsinkelsesvolumenet og det permanente volumen udledes med en øget udløbsvandføring i den kritiske periode, hvorfor der forekommer en øget hydraulisk belastning på vandløbet.

- *Styringen baseres på vandføringen i vandløbet, vandstanden i bassinet samt en forudsigelse af nedbør.*

I dette kapitel arbejdes ud fra Styringsstrategi 3 og det vælges ikke at gå videre med Styringsstrategi 4, selvom denne giver færre overløb. Dette skyldes den høje vandløbsbelastning ved Styringsstrategi 4.

7.1 Styringsstrategi 5: Udnyttelse af permanent volumen

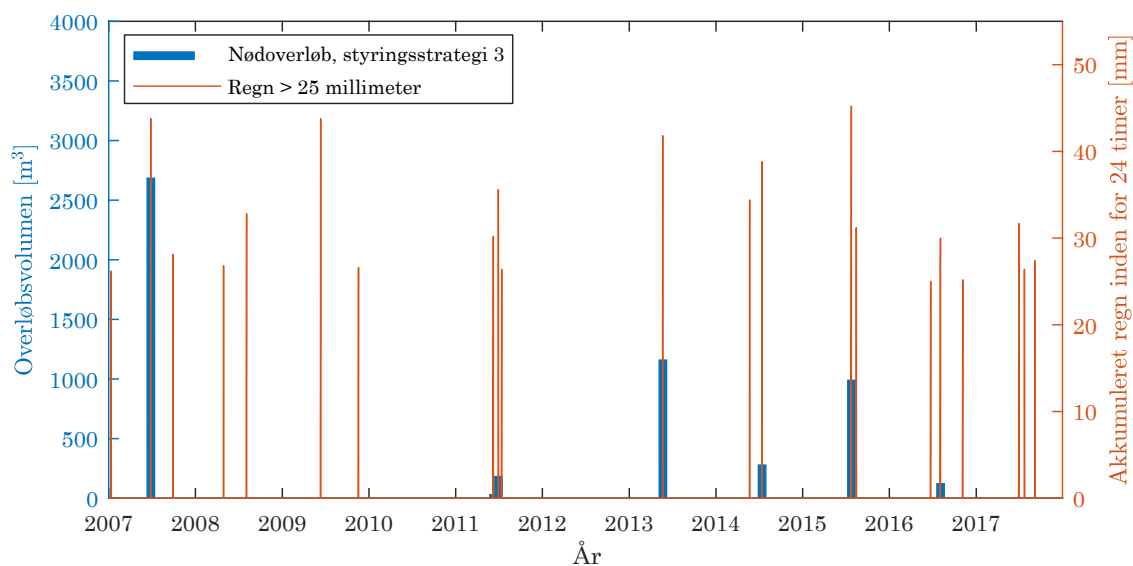
Der implementeres en ny styringsstrategi for bassinudledningen, som træder i kraft, når en kritisk regnhændelse forudsiges. Styringen består i at udlede en del af det permanente volumen på baggrund af restkapaciteten i vandløbet. Strategi for styringen af bassinudløbet fremgår af figur 5.6.



Figur 7.1. Styringsstrategi 5: Princip for styring af bassinudløb ved forudsigelse af en kritisk regnhændelse.

Som det fremgår af figur 7.1, udledes størstedelen af det permanente volumen i tilfælde af en kritisk regnhændelse. Vandspejlet i bassinet skal minimum være 0,3 meter, hvilket sikrer, at sediment og planter ikke skylles ud i udløbsbrønd og vandløb. Dermed minimeres risikoen for, at udløbet tilstopper. I tilfælde, hvor vandspejlet sænkes til 0,3 meter er der udledt 960 m³ vand, som giver en ekstra kapacitet i bassinet forud for en regnhændelse. Styringsstrategi 3 resulterede i syv overløbshændelser, hvoraf fire af disse hændelser har et mindre volumen end 960 m³.

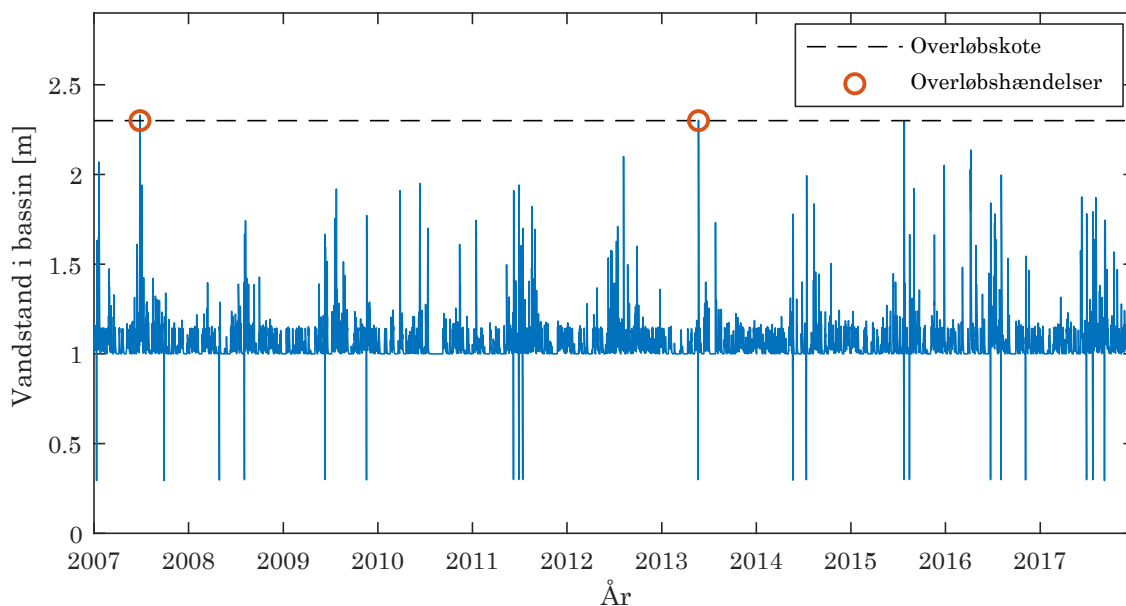
Udledning af det permanente volumen starter, hvis der er risiko for overløb. Metoden kræver derfor, at overløbene forudsiges. Ud fra en analyse af overløbshændelserne viser det sig, at der er risiko for overløb, hvis der i en periode på 24 timer, falder mere end 25 millimeter regn. For at implementere denne metode kan der benyttes realtidsdata fra en vejrmødel, som estimerer hvor mange millimeter regn, der falder i området de kommende 24 timer. Dermed antages det, at der er en perfekt forudsigelse af regn. I dette tilfælde anvendes den historiske regnserie fra Randers Centralrenseanlæg, som også er input til modellen. De overløb som forudsiges indenfor 24 timer fremgår af figur 7.2. Her fremgår også overløbshændelserne fra Styringsstrategi 3, som er dem der skal undgås.



Figur 7.2. Styringsstrategi 5: Overløbshændelser som forudsiges indenfor 24 timer samt overløbshændelser i Styringsstrategi 3.

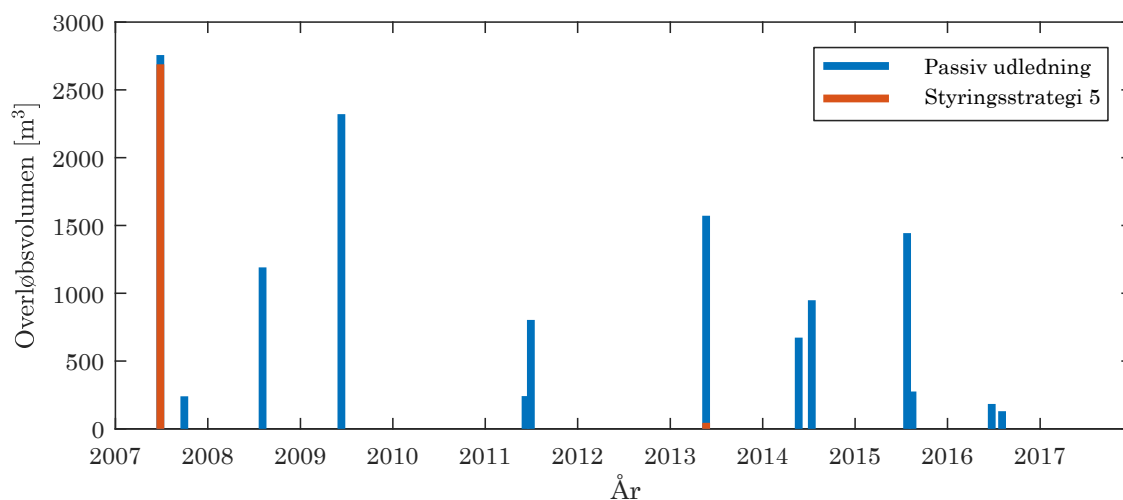
Det fremgår af figur 7.2, at alle overløb forudsiges på forhånd. I nogle tilfælde forudsiges også overløb, som ikke indtræffer. Det vurderes, at det er mere fordelagtigt at tømme bassinet unødigt fremfor, at der sker overløbshændelser, som kan forhindres. Når der forudsiges et nødoverløb, starter udledningen af det permanente volumen i henhold til restkapaciteten i vandløbet. Denne styring fortsætter i 24 timer, indtil den kritiske periode er ovre.

På figur 7.3 fremgår vandstanden i bassinet ved implementering af Styringsstrategi 5. Tidspunkter, hvor vandstanden er under én meter, indikerer at det permanente volumen udledes. Det fremgår ligeledes, at der opstår to overløbshændelser, og at der lige præcis ikke sker nødoverløb i 2015.



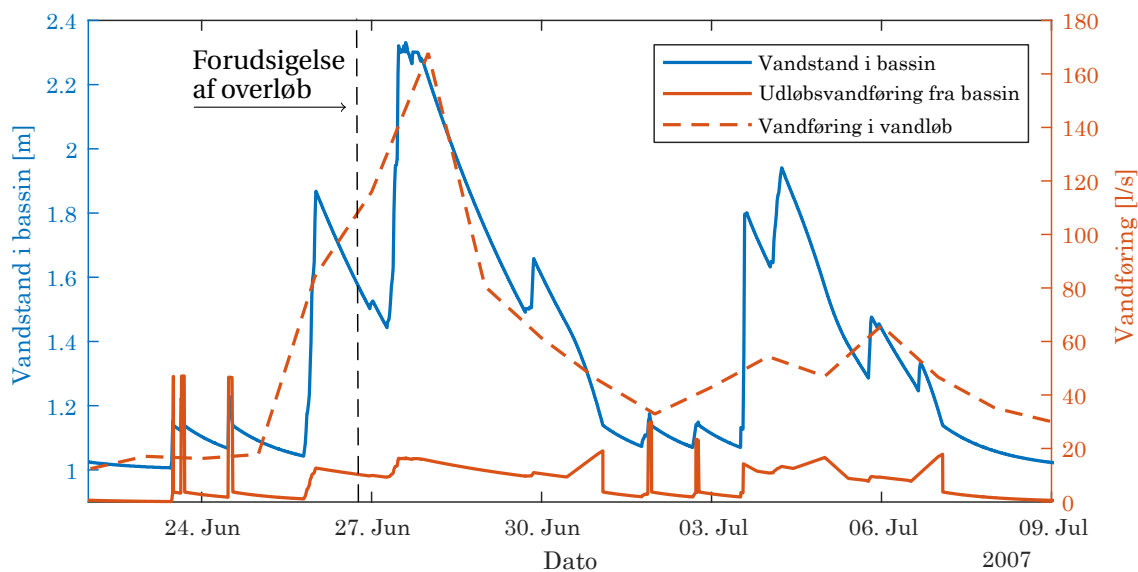
Figur 7.3. Styringsstrategi 5: Den simulerede vandstand i bassinet.

Det fremgår på figur 7.3, at det ikke er alle hændelser, hvor vandstanden sænkes til 0,3 meter, som er minimumvandstanden. Ligeledes udledes det permanente volumen ikke ved overløbshændelsen i 2007. Det tilbageværende overløb er på 2689 m^3 , hvilket betyder, at Styringsstrategi 5 ikke har nogen effekt på denne overløbshændelse i lighed med Styringsstrategi 3. Det skyldes, at det permanente volumen ikke udledes, og derfor vindes ingen ekstra kapacitet i bassinet. Der er derfor stadig to overløbshændelser i systemet, hvor overløbsvolumenet for disse fremgår på figur 7.4.



Figur 7.4. Styringsstrategi 5: Overløbsvolumen sammenlignet med passiv udledning.

Med to overløbshændelser overholder systemet serviceniveauet for nødoverløb med en gentagelsesperiode på fem år. Et af formålene med at implementere en styringsstrategi er at undgå overløbshændelser fuldstændigt. Overløbshændelsen i 2007 er dog svær at undgå, idet ingen af styringsstrategierne har formået at håndtere denne. Overløbshændelsen fremgår på figur 7.5. Hændelsen er et resultat af, at det regner 65 millimeter mellem d. 25. og 30. juni 2007, hvoraf 43 millimeter falder d. 27. juni.



Figur 7.5. Styringsstrategi 5: Vandstand i bassin, udløbsvandføring fra bassin og vandføring i vandløbet under overløbshændelsen i sommeren 2007.

På figur 7.5 fremgår det, at overløbet er et resultat af flere dages vandstandsstigning i bassinet. Når overløbshændelsen forudsiges, er vandstanden i bassinet 1,7 meter, og vandløbsvandføringen har overgået medianmaksimum vandføringen for den pågældende årstid. Der tillades kun en minimumudledning på 0,3 l/s/ha, hvorfor det ikke er muligt at udlede det permanente volumen. Det svage punkt ved denne styringsstrategi er, at udløbsvandføringen er vandløbsafhængig. Såfremt en overløbshændelse er sammenfaldende med en vandløbsvandføring, som overstiger medianmaksimum vandføringen, ændrer styringen ingenting. Derfor bør det over-

vejes, hvad der skal ske i tilfælde af, at der forudsiges en overløbshændelse, samtidig med at der forekommer en medianmaksimum vandføring i vandløbet. Idet den største overløbshændelse forbliver uændret, er resultaterne for Styringsstrategi 5 meget lignende resultaterne for Styringsstrategi 3, hvilket fremgår i tabel 7.1.

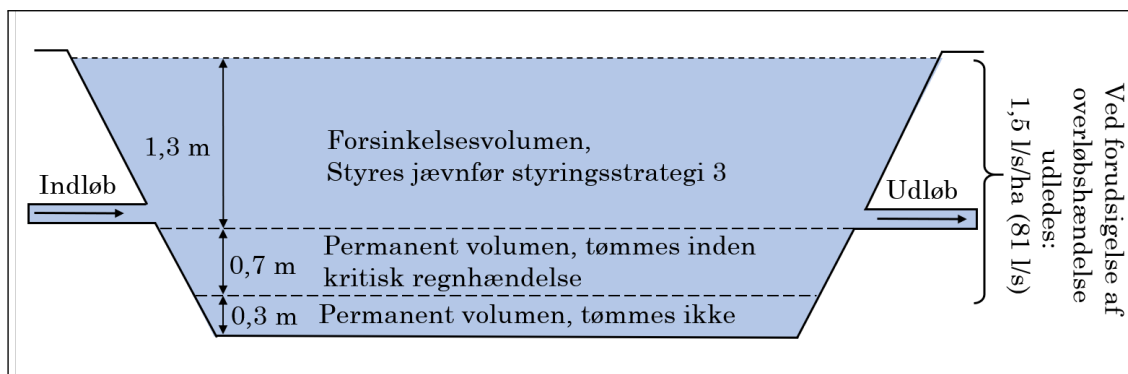
	Antal overløb [-]	Maksimal overløbsvolumen [m ³]	>50 % fyld- ningsgrad [%]	Maksimal vand- føring i vandløb [l/s]
Passiv udledning	13	2756	2,8	2176
Styringsstrategi 1	1	778	0,2	1027
Styringsstrategi 2	11	5162	1,9	2947
Styringsstrategi 3	7	2689	0,8	1443
Styringsstrategi 4	2	1915	0,6	1443
Styringsstrategi 5	2	2687	0,7	1443

Tabel 7.1. Antal overløbshændelser og maksimal overløbsvolumen, fyldningsgrad og resulterende maksimale vandføring i vandløb for en passiv udledning, **Styringsstrategi 1:** (maksimal udnyttelse af vandløbskapacitet), **Styringsstrategi 2:** (sæsonvarieret udnyttelse af vandløbskapacitet), **Styringsstrategi 3:** (udledning i afgrænset interval), **Styringsstrategi 4:** (øget udløbsvandføring ved kritisk vandstand) og **Styringsstrategi 5:** (udnyttelse af permanent volumen).

7.2 Styringsstrategi 6: Kontrolleret overløb

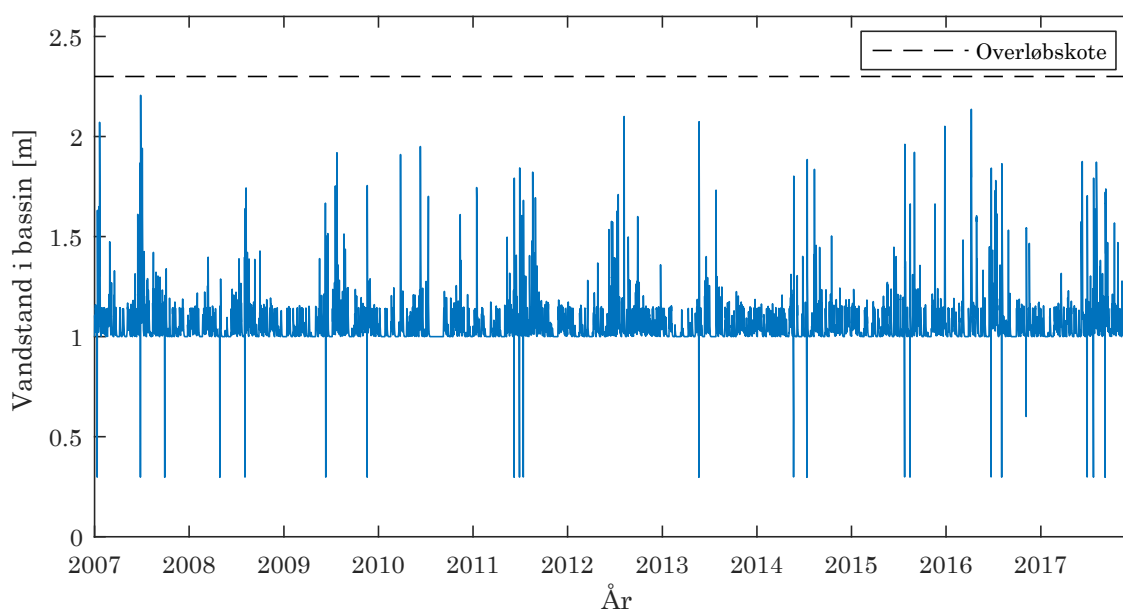
Ved styring af udløbsvandføring fra et regnvandsbassin kan både vandstanden i bassinet og vandføringen i vandløbet overvåges, således udløbsvandføringen reguleres herefter. Fremtidige regnhændelser er dog altid ukendte, og ekstremregn kan presse regnvandssystemet til overløbshændelser. Derfor er det fornuftigt at lave en styringsstrategi, som kan håndtere uundgåelige overløbshændelser. Det er en mulighed at øge udløbsvandføringen fra bassinet, når vandstanden når et kritisk niveau. Denne metode er ligeledes anvendt i Styringsstrategi 4. Det er dog problematisk først at øge udløbsvandføringen, når kapaciteten i bassinet næsten er opbrugt, da det kræver en høj udløbsvandføring at forhindre overløbshændelsen. Modsat, hvis udløbsvandføringen øges, imens der stadig er stor kapacitet i bassinet, skal udløbsvandføringen øges knap så meget. Derfor tager Styringsstrategi 6 udgangspunkt i at starte en højere udløbsvandføring allerede når en potentiel overløbshændelse forudsiges.

Der tages fortsat udgangspunkt i at udlede det permanente volumen fra bassinet, såfremt der forudsiges en overløbshændelse. Det sker i henhold til Styringsstrategi 5, hvor der antages en perfekt forudsigelse af nedbøren 24 timer frem. Ved forudsigelse af mere end 25 millimeter regn inden for et døgn, starter udledningen af det permanente volumen. Da det allerede er forudset, at der kan ske et overløb, skal udløbsvandføringen i hele den kritiske periode være 1,5 l/s/ha total oplandsareal. Dermed tages der ikke hensyn til vandføringen i vandløbet i den periode. Styringsstrategi 6 fremgår på figur 7.6.



Figur 7.6. Styringsstrategi 6: Princip for styring af bassinudløb ved forudsigelse af en kritisk regnhændelse.

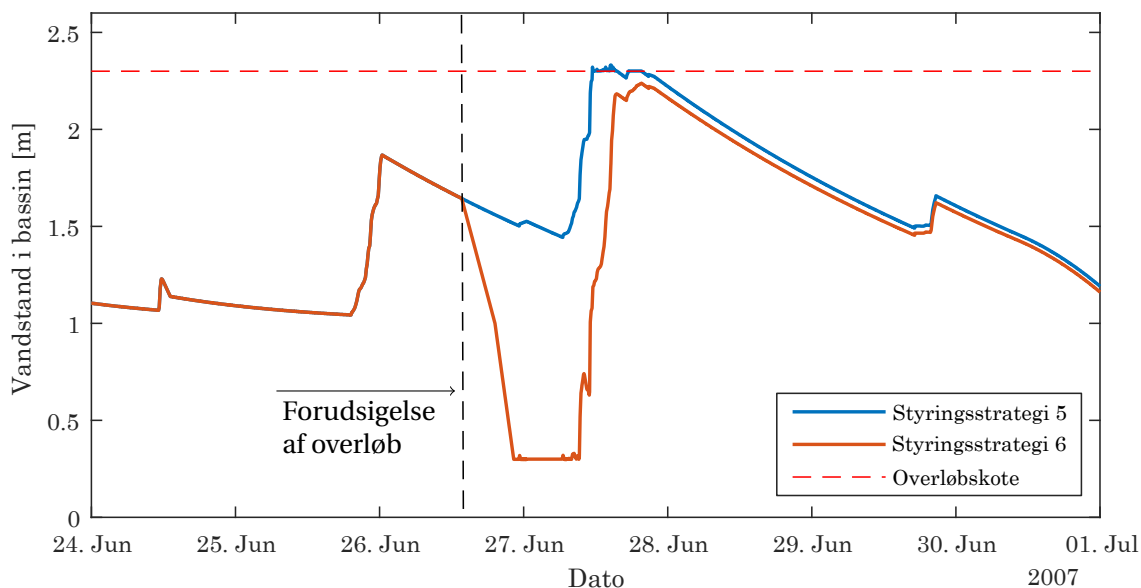
På figur 7.6 fremgår det, at udløbsvandføringen er 1,5 l/s/ha total oplandsareal, og at der må udledes ned til en vandstand på 0,3 meter ved forudsigelse af en overløbshændelse. Under normale forhold er Styringsstrategi 3 gældende, hvor forsinkelsesvolumenet udledes i henhold til den årstidsbestemte restkapacitet. Ved simulering med Styringsstrategi 6 undgås alle overløbshændelser. Vandstanden i bassinet fremgår på figur 7.7.



Figur 7.7. Styringsstrategi 6: Den simulerede vandstand i bassinet.

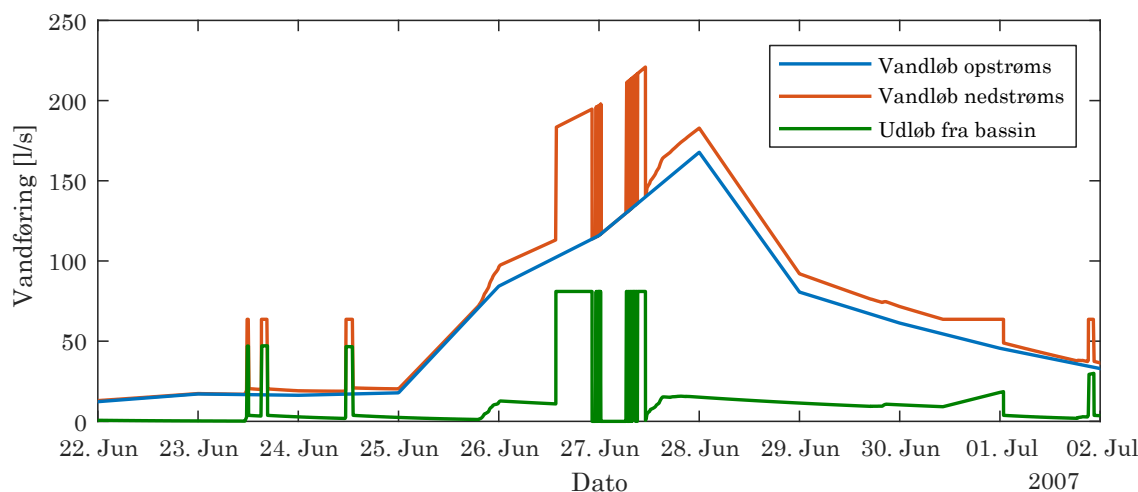
En udløbsvandføring på 1,5 l/s/ha total oplandsareal er tilstrækkelig til at undgå overløb, når hele kapaciteten i bassinet udnyttes. I afsnit 4.1 fremgår det, at en passiv udledning på 1,5 l/s/ha total oplandsareal ikke kan håndtere overløbshændelserne. Det skyldes, at det kun er på baggrund af forsinkelsesvolumenet, og derfor gør det en stor forskel at udlede det permanente volumen inden en overløbshændelse.

På figur 7.8 fremgår det, hvordan overløbshændelsen i 2007 undgås på baggrund af styringsstrategi 6. Der er sammenlignet med Styringsstrategi 5, hvor det ikke lykkedes at udlede det permanente volumen inden regnhændelsen.



Figur 7.8. Vandstand i bassin under overløbshændelsen i sommeren 2007 for Styringsstrategi 5 og 6.

Når der forudsiges en kritisk regnhændelse, tages der ikke hensyn til vandløbskapaciteten. Udløbsvandføringen er 1,5 l/s/ha total oplandsareal svarende til 81 l/s, under hele hændelsen, hvilket er den maksimale vandløbsbelastning ved Styringsstrategi 6. I Styringsstrategi 5, hvor der forekommer nødoverløb i 2007, er den maksimale vandløbsbelastning 1242 l/s. Dermed er der ved styringsstrategi 6 foretaget et kontrolleret overløb, hvor den maksimale belastning er bestemt på forhånd. Vandføringen opstrøms og nedstrøms bassinudløbet i juni 2007 fremgår af figur 7.9.



Figur 7.9. Styringsstrategi 6: Vandløbsvandføring opstrøms og nedstrøms for bassinudløbet i 2007.

Hvor der før var et nødoverløb i 2007, som resulterede i en nedstrøms vandføring på 1444 l/s, er der nu ingen overløb. Dette er dog på bekostning af en udledning der ikke tager hensyn til vandløbs kapacitet for den pågældende årstid. Styringsstrategi 6, forårsager dog kun en nedstrøms vandløbsvandføring på 220 l/s. I tabel 7.2 fremgår resultaterne for Styringsstrategi 6.

	Antal overløb [-]	Maksimal overløbsvolumen [m ³]	>50 % fyld- ningsgrad [%]	Maksimal vand- føring i vandløb [l/s]
Passiv udledning	13	2756	2,8	2176
Styringsstrategi 1	1	778	0,2	1027
Styringsstrategi 2	11	5162	1,9	2947
Styringsstrategi 3	7	2689	0,8	1443
Styringsstrategi 4	2	1915	0,6	1443
Styringsstrategi 5	2	2687	0,7	1443
Styringsstrategi 6	0	0	0,6	763

Tabel 7.2. Antal overløbshændelser og maksimal overløbsvolumen, fyldningsgrad og resulterende maksimale vandføring i vandløb for en passiv udledning, **Styringsstrategi 1:** (maksimal udnyttelse af vandløbskapacitet), **Styringsstrategi 2:** (sæsonvarieret udnyttelse af vandløbskapacitet), **Styringsstrategi 3:** (udledning i afgrænset interval), **Styringsstrategi 4:** (øget udløbsvandføring ved kritisk vandstand), **Styringsstrategi 5:** (udnyttelse af permanent volumen) og **Styringsstrategi 6:** (Kontrolleret overløb).

Styringsstrategi 6 er meget effektiv til at undgå overløbshændelser. Det er fordelagtigt, med en langvarig lav vandløbsbelastning fremfor en kortvarig høj vandløbsbelastning. Herved undgås ukontrolleret overløbshændelser.

7.3 Delkonklusion

Styringsstrategierne i dette kapitel bygger på Styringsstrategi 3, hvortil der indføres en udledning af det permanente volumen, såfremt der er risiko for en overløbshændelse. Der er forskellige måder, hvormed det permanente volumen kan udledes, men det viser sig, at den ekstra kapacitet i regnvandsbassinet med fordel kan benyttes til at undgå overløbshændelser.

Hvorvidt Styringsstrategi 5 eller 6 er den bedste løsning, afhænger af formålet med styringsstrategien, og hvad der defineres som et succeskriterie. Styringsstrategi 5 er tilstrækkelig til at overholde serviceniveauet for overløbshændelser med en gentagelsesperiode på fem år. Hvis det derimod ønskes at undgå alle overløbshændelser, er det på bekostning af en øget udløbsvandføring i en del af tiden. Der er derfor en afvejning mellem lille vandløbsbelastning i længere tid eller stor vandløbsbelastning i kort tid.

8. Konklusion

I denne rapport er det undersøgt, hvordan udnyttelsen af den hydrauliske kapacitet i regnvandsbassiner kan forbedres ved aktiv styring af bassinudledningen. For at undersøge dette er der opbygget en numerisk model af et regnvandsbassin, hvor forskellige styringer af bassinudløbet implementeres. Det kan konkluderes, at en enkel model bestående af bassinindløb, -udløb og vandløbsvandføring er tilstrækkelig til at modellere et regnvandsbassin, og sammenligne forskellige styringsstrategier for bassinudledning.

Først og fremmest kan det konkluderes, at det eksisterende regnvandsbassin med en passiv udledning på 0,3 l/s/ha total oplandsareal er overdimensioneret. I en periode på 11 år forekommer der kun én mindre overløbshændelse, hvor designkriteriet for overløbshændelser ofte er fem år. Desuden drosles udløbsvandføringen fra bassinet unødvendig meget, da vandløbet kan klare større belastninger end 0,3 l/s/ha total oplandsareal.

Såfremt bassinoplandet fordobles, resulterer en passiv udledning på 0,3 l/s/ha total oplandsareal i 13 overløbshændelser, hvilket er uacceptabelt i en periode på 11 år. Hvis udløbsvandføringen styres i henhold til kapaciteten i vandløbet kan antallet af overløbshændelser halveres. Ved udnyttelse af det permanente volumen, som ekstra kapacitet ved kritiske regnhændelser, kan bassinet overholde en gentagelsesperiode for overløbshændelser på fem år. Ingen af disse metoder resulterer i en vandløbsbelastning, som overskrider vandløbets naturlige vandføring. Det kan derfor konkluderes, at et overbelastet regnvandsbassin kan overholde serviceniveauet for overløbshændelser, hvis bassinudledningen styres i henhold til vandløbsvandføringen.

Det er på baggrund af regnvandssystemet i projektet erfaret, at det er næsten umuligt at håndtere alle regnhændelser uden at overbelaste vandløbet. Med fordel kan der implementeres en styring for kontrollerede overløb, hvor udløbsvandføringen øges, når der forudsiges en kritisk regnhændelse. Det kan forhindre alle overløb i den simulerede periode, dog på bekostning af en øget vandløbsbelastning. En langvarig lav vandløbsbelastning anses for at være mere fordelagtig end en kortvarig høj vandløbsbelastning. Ved at indføre kontrollerede overløb er det muligt at lede mere regnvand til bassinet samtidig med, at vandløbsbelastningen reduceres.

Samlet set konkluderes det, at det er meget fordelagtigt at indføre en aktiv styring af bassinudledningen. Der kan opnås mere effektive bassiner, hvor et langt større oplandsareal kan tilkobles samme bassinvolumen uden konsekvenser for det modtagende vandløb.

9. Perspektivering

Effektiv håndtering af regnvand er et globalt behov, hvorfor der er et stort potentiale i aktiv styring af udledning fra regnvandsbassiner. Gennem dette projekt er det konkluderet, at der ved en målrettet styringsstrategi kan tilkobles et større bassinopland til eksisterende bassiner. Udnyttelsen af eksisterende bassiner kan øges, hvorved de er i stand til at håndtere fremtidig forøget belastning. Endvidere er der i fremtiden behov for at anlægge effektive kompakte bassiner med lav risiko for overløb, grundet fortætning i byerne og klimaforandringer.

Hensigten med aktiv styring af regnvandsbassiner er, at både afløbssystemets og vandløbets kapacitet tilgodeses. Den nuværende udledningspraksis bygger på et forsigtighedsprincip, hvorfor der tildeles lave udledningstilladelser for at bevare vandløbets naturlige vandføring. Regnvandsbassiner dimensioneres på baggrund af disse lave udledningstilladelser, hvortil der må ske nødoverløb i bassinet hvert femte år. Overløbshændelser er i direkte strid med hensigten med udledningstilladelsen, idet de kan have store konsekvenser for vandløbet. Ved at styre udledningen efter vandløbets kapacitet, er der mulighed for at tilgodese det enkelte vandløb og bassin. I tilfælde af store regnhændelser kan der foretages kontrollerede overløb, hvorved vandløbet skånes for de spidsbelastninger, som forekommer ved en overløbshændelse. Aktiv styring af regnvandsbassiner kan derved være med til at forbedre og bevare tilstanden i vandløbet, såfremt styringen foregår på baggrund af vandløbets kapacitet.

Hidtil har det været en udfordring at indføre styring af bassinudløb, idet det kræver, at der er adgang til strøm og dataforbindelse på lokationen. Styringsmekanismen i bassinet skal netop kunne modtage data i realtid fra tilkoblede sensorer. Derfor udvikles den regulerbare vandbremse som en lavenergi vandbremse med solceller og batterier. Realtidsstyring af bassinudløbet i henhold til vandløbskapaciteten kræver, at der opstilles vandstandsloggere både opstrøms og nedstrøms for alle bassinudledninger, samt i selve bassinet. Med fordel kan der også placeres sensorer i afløbssystemet således den nøjagtige koncentrationstid og afløbskoefficient kan bestemmes.

Der er potentiale for at indføre samstyring mellem flere bassiner langs samme vandløbsstrækning, hvis styring af bassinudledningen bliver den nye praksis inden for regnvandsbassiner. Der er mulighed for, at sensorbaseret overvågning kan skabe en forståelse for systemet, således systemet kan styres som en helhed, hvorved det også er nemmere at udnytte dets fulde potentiale.

Litteratur

- Arler et al., 2017.** Finn Arler, Michael Søgaard Jørgensen og Esben Munk Sørensen. *Prioritering af Danmarks areal i fremtiden*, 2017.
- Brorsen og Larsen, 2009.** Michael Brorsen og Torben Larsen. *Lærebog i hydraulik*. Aalborg Universitetsforlag, 2009.
- Danmarks Miljøportal, 2019.** Danmarks Miljøportal. *Danmarks Miljøportal*, 2019. URL <https://arealinformation.miljoeportal.dk/html5/index.html?viewer=distribution>. Besøgt 05-02-2019.
- DANVA, 2018.** DANVA. *Administrationspraksis for regnvandsbassiner og udledningstilladelser, DANVA Vejledning nr. 104, 2018*, 2018.
- DMI, 2019a.** DMI. *Stationskort*, 2019. URL http://svk.dmi.dk/dmi/RainEvents/oversigtpaakort/*.stationskort. Besøgt 29-05-2019.
- DMI, 2019b.** DMI. *Vejrarkiv*, 2019. URL <https://www.dmi.dk/vejrarkiv/>. Besøgt 06-06-2019.
- Europaparlamentet, 2000.** Europaparlamentet. *Vandrammedirektivet, Europa-parlamentets og rådets direktiv om fastlæggelse af en ramme for fællesskabets vandpolitiske foranstaltninger*, 2000.
- Favrskov Forsyning, 2017.** Favrskov Forsyning. *Separatkloakering af dele af Voldum*, 2017. URL <https://www.favrskovforsyning.dk/spildevand/her-arbejder-vi>. Besøgt 28-05-2019.
- Favrskov Forsyning, 2018.** Favrskov Forsyning. *Møllevænget, Voldum Regnvandsbassin*. Teknisk tegning af Voldum Regnvandsbassin, 2018.
- Levin og Normander, 2008.** Gregor Levin og Bo Normander. *Arealanvendelse i Danmark siden slutningen af 1800-tallet*, 2008.
- Madsen et al., 2006.** Søren Madsen, Paul Debois, Per Søby Jensen, Peter Hyldegaard, Ole Helgren, Tony Bygballe, Allan R. Jensen, Anne-Marie G. Kristensen, Ole Schwalbe Madsen, Berit L. Mogensen, Troels Karlog, Ove Kann, Lars Bangsgaard og Ole Ottesen. *Vandløbsrestaurering i Danmark*, 2006.
- Miljøstyrelsen, 2018.** Miljøstyrelsen. *Spildevandsvejledningen, til bekendtgørelse om spildevandstilladelser m.v. efter miljøbeskyttelseslovens kapitel 3 og 4*, 2018.
- Miljøstyrelsen, 2015.** Miljøstyrelsen. *Klimaaendringer i Danmark*, 2015. URL <https://www.klimatilpasning.dk/viden-om/fremtidens-klima/klimaaendringeridanmark/>. Besøgt 04-06-2019.

- Miljøstyrelsen, 2019.** Miljøstyrelsen. *Vandløbsrestaurering*, 2019. URL <https://mst.dk/natur-vand/vandmiljoe/tilskud-til-vand-og-klimaprojekter/vandloesrestaurering/>. Besøgt 29-05-2019.
- Miljøstyrelsen, 2016.** Miljøstyrelsen. *Punktkilder 2015*, 2016.
- Mosbaek, 2019.** Mosbaek. *Vandbremsere med hvirveeffekt*, 2019. URL <https://www.mosbaek.dk/dk/losninger/funktion/vandbremsere-med-hvirveeffekt/>. Besøgt 26-03-2019.
- Naturstyrelsen, 2014.** Naturstyrelsen. *Vandplan 2009-2015, 1.5 Randers Fjord*, 2014.
- Orbicon, 2015.** Orbicon. *Revens Møllebæk, Regulativopmåling*. Vaspplot af Revens Møllebæk, St. 2823-4324., 2015.
- Ovesen et al., 2000.** Niels B. Ovesen, Hans Legard Iversen, Søren E. Larsen, Dirk-Ingmar Müller-Wohlfeil, Lars M. Svendsen, Anne Steensen Blicher og Per Møller Jensen. *Afstrømningforhold i danske vandløb*, 2000.
- Rasmussen et al., 2018.** Jes J. Rasmussen, Dagmar K. Andersen og Anette B. Alnøe. *Vandløb 2016, Økologisk tilstand, miljøfremmede stoffer og tungmetaller samt naturtyper og arter*, 2018.
- Rasmussen, 2018.** Michael R. Rasmussen. *Måling af vandføring i åbne kanaler*, 2018.
- SCALGO, 2019.** SCALGO. *SCALGO live*, 2019. URL <https://scalgo.com/live/global>. Besøgt 09-04-2019.
- Vollertsen, 2017.** Jes Vollertsen. *Wet Detention Pond (WDP)*. Computerprogram til hydraulisk og stofmæssig dimensionering af våde regnvandsbassiner, 2017.
- Vollertsen et al., 2012.** Jes Vollertsen, Thorkild Hvitved-Jacobsen, Asbjørn Haaning Nielsen og Søren Gabriel. *Våde bassiner til rensning af separat regnvand*, 2012.
- Winther et al., 2011.** Leif Winther, Jens Jørgen Linde, H. Thorkild Jensen, Leo Lund Mathiasen og Niels Bent Johansen. *Afløbsteknik*. Polyteknisk forlag, 2011.

A. Elektronisk bilag

Den aktive styring af udledning fra regnvandsbassin til vandløb er simuleret ved hjælp af en numerisk model opstillet i MatLab. De forskellige strategier er modelleret i hvert sit MatLab-script, hvilke medfølger rapporten. I det elektroniske bilag indgår:

- **Passiv bassinudledning**
- **Styringsstrategi 1:** Maksimal udnyttelse af vandløbskapacitet
- **Styringsstrategi 2:** Sæsonvarieret udnyttelse af vandløbskapacitet
- **Styringsstrategi 3:** Udledning i afgrænset interval
- **Styringsstrategi 4:** Øget udløbsvandføring ved kritisk vandstand
- **Styringsstrategi 5:** Udnyttelse af permanent volumen
- **Styringsstrategi 6:** Kontrolleret overløb

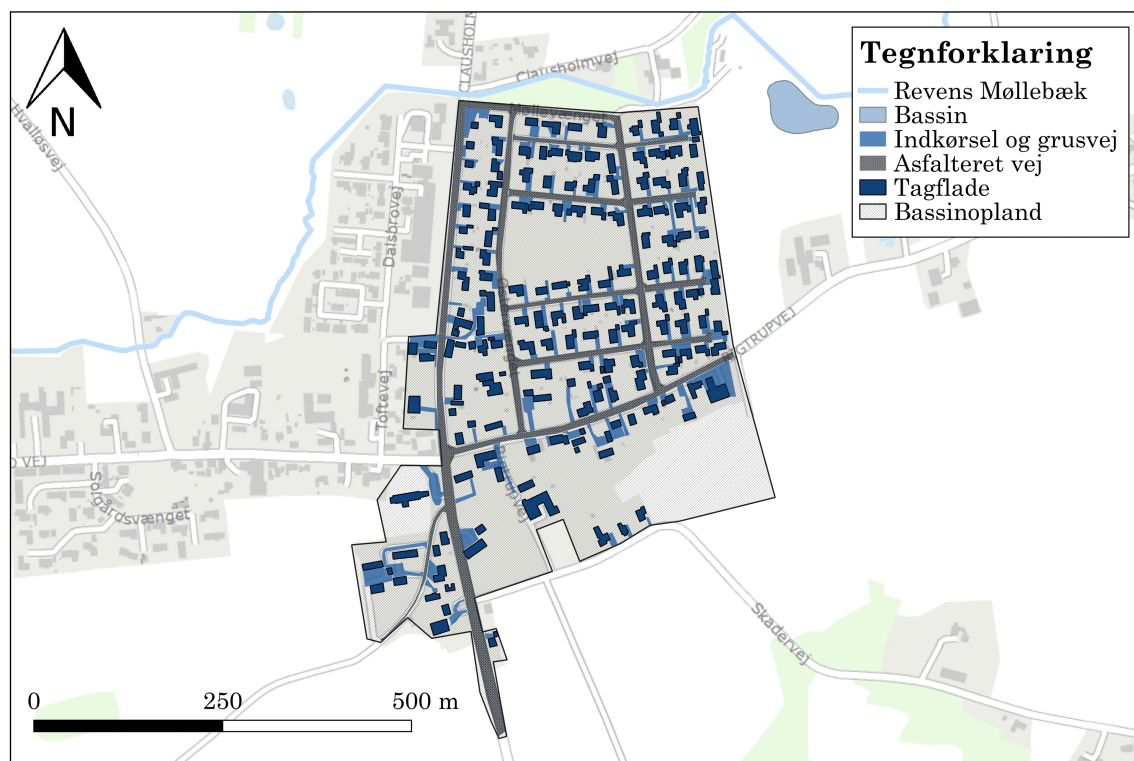
B. Reduceret areal af bassinopland

For at estimere mængden af regn som ender i et regnvandsbassin, skal det reducerede oplandsareal bestemmes. Ved reduceret areal menes det befæstede areal ganget en afløbskoefficient, som beskriver, hvor stor en del af arealet, der bidrager med regnvand til afløbssystemet. Her tages ikke hensyn til den hydrologiske transformation på overfladerne. Dette fremgår af ligning B.1.

$$F_{red} = F_{tot} \cdot \phi \quad (\text{B.1})$$

F_{red}	Reduceret oplandsareal
F_{tot}	Total oplandsareal
ϕ	Afløbskoefficient

Det totale oplandsareal er 27 hektar. Arealet af henholdsvis tagflader, veje, indkørsler og grusveje, som udgør det befæstede areal i bassinoplandet, er bestemt ved opmåling. Dette er illustreret på figur B.1, som viser projektområdet Voldum.



Figur B.1. Opmåling af befæstet areal til bestemmelse af reduceret areal.

Ved beregning af det reducerede areal antages, at der er forskellig afstrømning fra henholdsvis tagflader, veje og indkørsler. Der tages ikke videre hensyn til initialtab, infiltration eller fordamning ved denne metode. Desuden antages der 100 % nedsivning på ubefæstede arealer. De benyttede værdier for afløbskoefficienterne fremgår af tabel B.1, hvor størrelsen på det befæstede areal ligeledes fremgår.

	Areal [ha]	Afløbskoefficient ϕ [-]	Reduceret areal F_{red} , [ha]
Tagflade	2,7	1,0	2,7
Asfalterede veje	3,0	0,9	2,7
Indkørsel og grusvej	1,8	0,6	1,1
I alt	7,5		6,5

Tabel B.1. Afløbskoefficienter og reduceret areal [Winther et al., 2011].

Det reducerede areal bestemmes til 6,5 hektar for bassinoplandet. Den forholdsvis lille befæstelsesgrad skyldes et stort grønt område midt i oplandet, samt et ubebygget areal nordøst i oplandet. På baggrund af det totale- og reducerede oplandsareal, bestemmes den samlede afløbskoefficient til 0,24 som vist i ligning B.2.

$$\phi = \frac{F_{red}}{F_{tot}} \quad (\text{B.2})$$

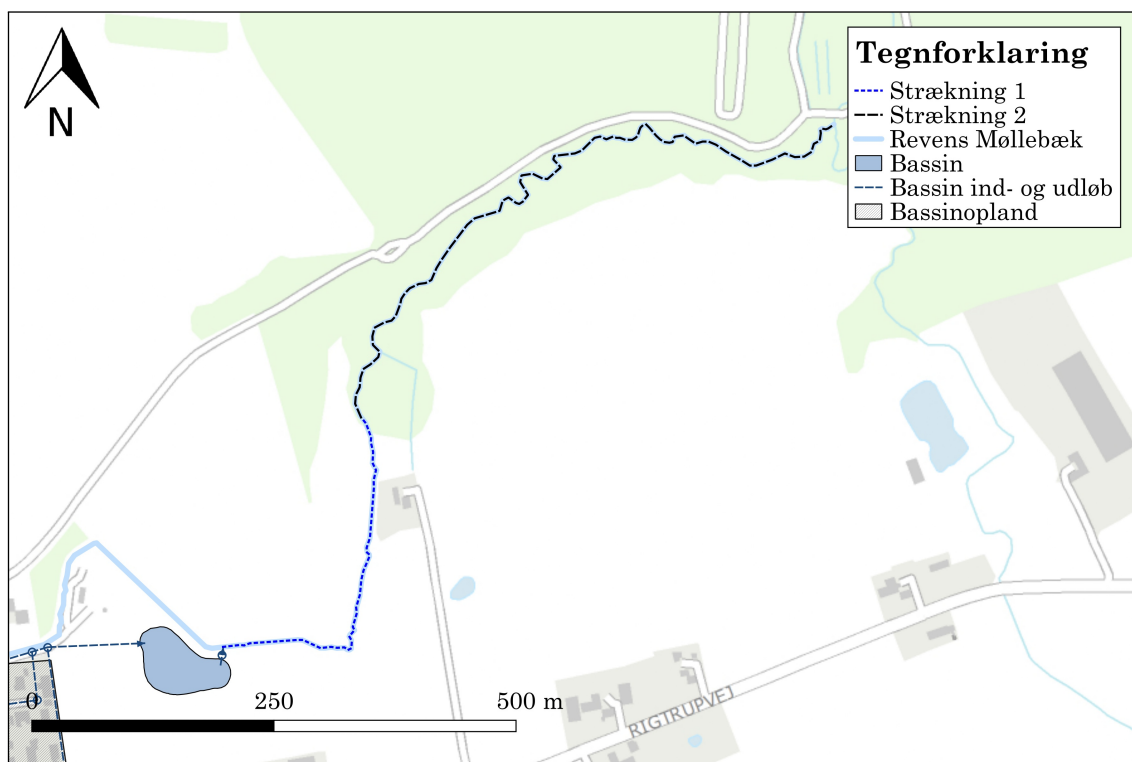
C. Naturlig dybde i Revens Møllebæk

Den resulterende naturlige dybde for medianmaksimum vandføringerne i Revens Møllebæk bestemmes ved Manning formlen, som fremgår af udtryk C.1. Der antages ensformig laminær strømning, hvorved energilinjegradiënten, I , antages at være tilsvarende bundlinjegradiënten i vandløbet.[Brorsen og Larsen, 2009]

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

Q	Vandføring [m ³ /s]
A	Tværsnitsareal
M	Manningtal [m ^{1/3} /s]
R	Hydraulisk radius [m]
I	Bundhældning [m/m]

Den naturlige dybde bestemmes for strækningen fra bassinudløbet i Voldum til sammenløbet med Skader Å. Strækningen deles op i to, hvor den første strækning på 400 meter er fra bassinudløbet til skoven og den sidste strækning på 950 meter er inde i skoven. Årsagen til dette er, at der antages, at vandløbet har forskellige egenskaber i de to forskellige miljøer. Opdelingen af vandløbet fremgår af figur C.1.



Figur C.1. Opdeling af vandløbet i to strækninger, til beregning af naturlig dybde.

Manningtallet antages at være højt om vinteren og lavt om sommeren for strækning 1, og for strækning 2 antages denne at være høj hele året. For at simplificere beregningerne antages et trapezformet tværsnit. Det antages, at der for hver af de to strækninger er opnået en ligevægtssituation i vandløbet. Her antages, at bundhældning og tværsnitsgeometrien er konstant i længdeprofilet for hver af strækningerne. For beregningerne benyttes de værdier som fremgår i tabel C.1, for hver af de to strækninger. Værdierne er baseret på tværsnit af Revens Møllebæk fra programmet VASP, opmålinger er foretaget af Orbicon [2015] i november.

	I [m/m]	b [m]	h_{maks} [m]
Strækning 1	0,00875	1,5	1,2
Strækning 2	0,00874	3,0	0,7

Tabel C.1. Gennemsnitlig bundhældning, tværsnitsbredde og maksimal vandspejlhøjde for de to strækninger i Revens Møllebæk.

De årstidsafhængige manningstal som benyttes for hver af strækningerne fremgår af tabel C.2.

	Forår	Sommer	Efterår	Vinter
Manningtal, Strækning 1 [$m^{1/3}/s$]	15	10	20	25
Manningtal, Strækning 2 [$m^{1/3}/s$]	25	25	25	25

Tabel C.2. Manningtal.

Af tabel C.3 fremgår medianmaksimum vandføringerne i hver sæson, som er de vandføringer der benyttes til beregning af den resulterende vandstand. Resultaterne for den naturlige dybde fremgår ligeledes i tabel C.3. Det fremgår, at h_{maks} ikke overskrides i nogen af tilfældene, og derfor forekommer der ikke oversvømmelse nedstrøms bassinet, hvis medianmaksimum vandføringen overholdes.

	Forår	Sommer	Efterår	Vinter
Medianmaksimum [l/s]	182,00	63,63	319,59	452,35
Naturlig dybde, Strækning 1 [m]	0,26	0,17	0,31	0,34
Naturlig dybde, Strækning 2 [m]	0,12	0,06	0,16	0,20

Tabel C.3. Medianmaksimum vandføringer og resulterende naturlig dybde i vandløbet for de to strækninger.

Den naturlige dybde ved vinter medianmaksimum vandføring bestemmes for alle årstider. Det undersøges med samme fremgangsmåde. Resultater fremgår af tabel C.4.

	Forår	Efterår	Sommer	Vinter
Naturlig dybde, Strækning 1 [m]	0,49	0,65	0,40	0,34
Naturlig dybde, Strækning 2 [m]	0,20	0,20	0,20	0,20

Tabel C.4. Den naturlige dybde som opstår når vandføringen svarer til vinter medianmaksimum i alle årstider, for de to strækninger.

D. Q-h relation for Revens Møllebæk

For at bestemme vandføringen i Revens Møllebæk til forskellige vandstande, opstilles en Q-h relation for vandløbet. Vandføringer bestemmes på baggrund af propelmålinger, hvorudfra en Q-h relation opstilles med udgangspunkt i Manning-formlen. Denne benyttes til at beregne vandføringer ud fra loggede vandstandsdata.

Vandføring på baggrund af propelmålinger

Der foretages propelmålinger for at finde en sammenhæng mellem vandstand og vandføring i Revens Møllebæk. Der er valgt et vandløbstværsnit opstrøms udledningen fra regnvandsbassinet i Revens Møllebæk. Bredden af vandløbet deles op i intervaller på ti centimeter, hvor der for hver ti centimeter foretages et nedstik.

Propellen måler antal omdrejninger, n , som omregnes til en hastighed, v . De formler, som er gældende for omregningen, fremgår af udtryk D.1.

$$v = \begin{cases} 0.2416 \cdot n + 0,015 & 0 < n \leq 0,76 \\ 0.2573 \cdot n + 0,003 & 0,76 \leq n \leq 9,61 \end{cases} \quad (\text{D.1})$$

v	Hastighed
n	Antal omdrejninger

Når hastigheden er bestemt, kan vandføringen bestemmes på baggrund af hastigheden som funktion af dybden som vist i udtryk D.2, hvilket er den analytisk korrekte løsning [Rasmussen, 2018].

$$Q = \int_0^b \int_0^y v(y) dy dx \quad (\text{D.2})$$

Q	Vandføring
b	Tværsnitsbredde
y	Vandstand
$v(y)$	Hastighed som funktion af dybden

Tværsnittet kendes ikke ned til mindste detalje, og er derfor forsimplet på baggrund af de vandstande som er målt langs tværsnittet for hver ti centimeter. Derfor bestemmes vandføringen numerisk, som vist i udtryk D.3.

$$Q = \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i \cdot v_i \quad (\text{D.3})$$

Middelhastigheden for tværsnittet kan bestemmes som vist i udtryk D.4.

$$\bar{U} = \frac{Q}{A} \quad (\text{D.4})$$

$\bar{U}$	Middelhastighed
A	Areal

Resultaterne af propelmålingerne fremgår af tabel D.1.

Dato	Middel vandstand [m]	Areal [m ²]	Hastighed [m/s]	Vandføring [l/s]
03. maj 2019	0,075	0,088	0,12	10,8
09. maj 2019	0,105	0,134	0,28	22,4
22. maj 2019	0,127	0,172	0,32	37,5

Tabel D.1. Resultat af propelmålinger.

Q-h kurve

Det ønskes at opstille en Q-h kurve for Revens Møllebæk på baggrund af Manning-formlen. Et Manningtal bestemmes på baggrund af de tre propelmålinger som vist i ligning D.5.

$$M = \frac{Q}{R^{2/3} \cdot I^{1/2} \cdot A} \quad (\text{D.5})$$

Resultaterne fremgår af tabel D.2.

Dato	Manningtal [m ^{1/3} /s]
03. maj 2019	8,59
09. maj 2019	9,61
22. maj 2019	11,34

Tabel D.2. Manningtal bestemt på baggrund af data fra propelmålinger.

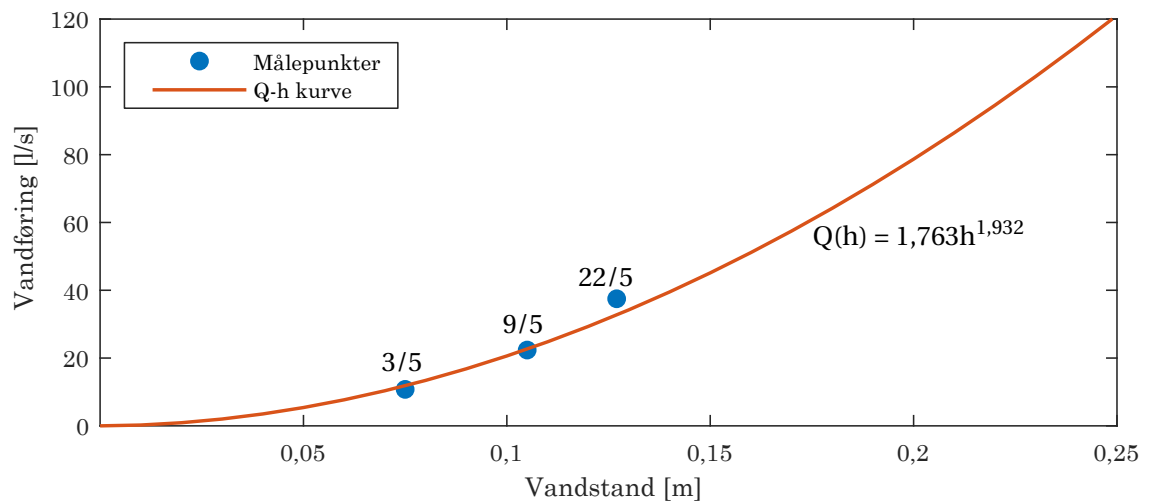
Det gennemsnitlige Manningtal er 9,85 m^{1/3}/s.

Der antages et forsimplet trapezformet vandløbstværsnit, baseret på tværsnitsmålinger foretaget af Orbicon [2015] i november. Der antages ligeledes laminær ensformig strømning, hvorved bundlinjegradiënten er lig med energilinjegradiënten, I , på 0,0875. Derved kan vandføringen, Q , udtrykkes som funktion af vandstanden, h , som vist i udtryk D.6. [Brorsen og Larsen, 2009]

$$Q(h) = A(h) \cdot R(h)^{2/3} \cdot I^{1/2} \cdot M \quad (\text{D.6})$$

$Q(h)$	Vandføring som funktion af vandstand
$A(h)$	Tværsnitsareal som funktion af vandstand
$R(h)$	Hydraulisk radius som funktion af vandstand
I	Energilinjegradiënt
M	Manningtal

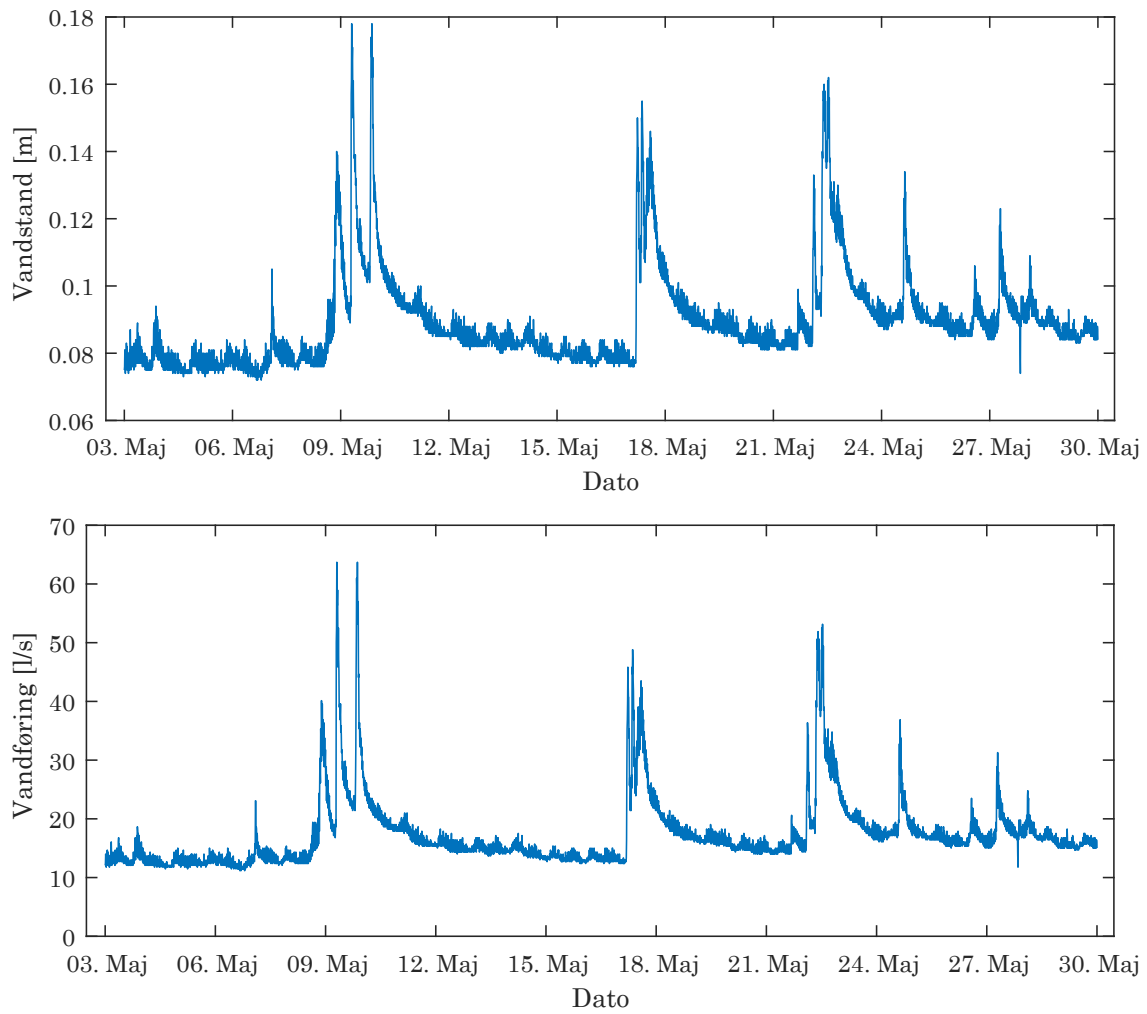
På baggrund af udtryk D.6 bestemmes en Q-h kurve for Revens Møllebæk som fremgår af figur D.1.



Figur D.1. Q-h-relation for Revens Møllebæk samt målepunkter.

Q-h kurven er bestemt på baggrund af tre punkter, som ligger forholdsvis tæt. Det giver en usikkerhed, når sammenhængen benyttes til at bestemme vandføringer, som ikke ligger inden for intervallet af de målte vandføringer.

På baggrund af Q-h kurven bestemmes vandføringen i Revens Møllebæk, med et interval på ti minutter, ud fra loggede vandstandsdata. De loggede vandstandsdata for maj måned 2019, samt resulterende vandføringer, fremgår af figur D.2. Vandstanden er indenfor et interval på 0,072 - 0,18 meter og vandføringen er 11,2 - 63,7 l/s.



Figur D.2. Vandstandsdata (øverst) og vandføringer (nederst) for Revens Møllebæk, baseret på målte data i maj måned 2019.