
Anvendelse af vandstandsdata til analyse af regnvandsbassiners hydrauliske funktion

Esther Ritterbusch & Julie Bach
30 ECTS Kandidatspeciale
Vand & Miljø
Aalborg Universitet
4. juni 2025





AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

**Det Ingeniør- & Naturvidenskabelige
Fakultet**

MSc i Water and Environmental Engineering
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Ø
<http://www.build.aau.dk>

Titel:

Anvendelse af vandstandsdata
til analyse af regnvandsbassiners
hydrauliske funktion

Projekt:

30 ECTS Kandidatspeciale

Projektperiode:

Februar 2025 - Juni 2025

Deltagere:

Esther Ritterbusch
Julie Bach

Vejledere:

Jesper E. Nielsen
Michael R. Rasmussen
Janni M. Nielsen

Sidetæl: 113

Bilag: 3

Afsluttet: 04/06/2025

Synopsis:

I dette speciale er tre regnvandsbassiners hydrauliske funktion undersøgt gennem arbejde med kontinuerlige vandstandsmålinger. Frejlev Skolevej Bassin er anvendt som case study, hvor tre metoder med stigende kompleksitetsniveauer udvikles. Den simpleste metode giver tilfredsstillende resultater og det konkluderes, at Frejlev Skolevej Bassin er underdimensioneret med den nuværende installerede vandbremse. For Aladdinvej og Svenstrup Banevej Bassin viser resultaterne, at begge regnvandsbassiner er overdimensionerede og dermed har uudnyttet kapacitet.

I Danmark dimensioneres regnvandsbassiner ofte med SVK's Regionale Regnrækkeværktøj (SVK-ark), som er et simpelt værktøj med få parametre. En analyse af syntetisk generede regnvandsbassiner viser; at udnyttes udledningstilladelsen fuldt, vil SVK-arket overdimensionere bassiner, men anvendes en reel Q-h relation for en vandbremse, vil bassiner med lave afløbstal blive underdimensionerede. I specialet er det erfaret, at selvom vandstandsdata kan oplyse om interessante forhold i regnvandsbassiner, kræver det mere end tre analyserede bassiner at drage generelle konklusioner angående over- eller underdimensionering af regnvandsbassiner i Danmark. Det kan dog konkluderes, at SVK's Regionale Regnrækkeværktøj anvender for store forsimplinger og især giver ukorrekte dimensioneringer for bassiner med lave afløbstal. Det vurderes derfor, at en dynamisk analyse med nedbørsserier og inkludering af Q-h relation ville være fordelagtig.

Abstract

In Denmark, the design of stormwater retention ponds often relies on a simple tool: "SVKs Regionale Regnrækkeværktøj" (The Danish Wastewater Committee's regional rainfall series tool). Using a few simple parameters such as return period, hydrological reduction factor and allowed outflow [L/s/red. ha], which corresponds to the requirements given in the discharge permit, the tool specifies a necessary storage volume. However, after establishing a retention pond, utility companies often fail to monitor whether they actually comply with the discharge permit or not.

This thesis investigates three stormwater retention ponds within Aalborg Forsyning A/S distribution area and their hydraulic performance. Frejlev Skolevej pond was used as a case study to develop a method for the determination of a rating curve using continuous water level data. The analysis of the water level data showed that external factors such as the soil matrix and groundwater influence the water level of the pond. Furthermore, the installed flow regulator only reaches 61% of the maximum allowed discharge.

Three runoff models were tested at the Frejlev Skolevej pond, with the simple basin model performing comparably to more complex models, a reason why it is selected as the preferred tool. For the pond in Frejlev, the results show a lack of capacity due to the current flow regulator, however, simulations with discharge corresponding to a fully utilized discharge permit show that were this the case, the pond could function properly for future climate. Using the simple basin model and water level data, the ponds of Aladdinvej and Svenstrup Banevej were also analyzed. Both retention ponds are expected to fully utilize their discharge permit at maximum storage and allow for 20-30% and 15% additional catchment area under current conditions.

Seeing as the general results are inconclusive, synthetic retention ponds are designed using the wastewater committee tool. Afterwards, they are analyzed using the dynamic simple basin model. The results show; with a fully used discharge permit, the wastewater committee tool is oversizing the retention ponds. If real rating curves are implemented, the results show that with higher allowed outflows, [L/s/red. ha], the retention ponds seem correctly sized. If lower, and more likely, outflows are used, the retention ponds end up lacking in capacity.

In conclusion, the three stormwater retention ponds analyzed in this thesis are insufficient with regard to determining whether Danish retention ponds generally are over- or undersized. However, continuous monitoring of pond water levels contribute significantly to understanding the hydraulic function and/or possible challenges within the pond. This thesis concludes that the wastewater committee tool is built upon assumptions that are too generalized and simplistic for the future design of stormwater retention ponds. The tool lacks inclusion of rating curves and will lead to undersized retention ponds if small outflows are required.

Forord

Kandidatspecialet er udarbejdet som afsluttende opgave ved kandidatuddannelsen Water and Environmental Engineering ved Aalborg Universitet. Der rettes særligt tak til vejledere Jesper E. Nielsen, Janni M. Nielsen og Michael R. Rasmussen for godt samarbejde og vejledning i projektet.

Desuden rettes der tak til Maria Jensen og Freya Mosbæk fra Aalborg Forsyning A/S for deres altid villige hjælp med indhentning af data og besvarelse af forsyningstekniske spørgsmål. Deres imødekommenhed og hurtige respons har været en stor støtte i arbejdet med dette projekt.

Alle tekniske tegninger og udledningstilladelser anvendt i dette projekt er indhentet gennem Aalborg Forsyning A/S.

Det anbefales at rapporten læses kronologisk. Figurer og tabeller henvises til i teksten med tal ud fra kapitlet, figuren er placeret i. Bilag refereres til med bogstaver og findes efter litteraturlisten i rapporten. Som udgangspunkt er figurerne i rapporten enten egne billeder eller figurer udarbejdet af gruppen. Er andet tilfældet, vil det være angivet.

I løbet af specialet er der anvendt flere programmer både til at udarbejde figurer samt udvikle modeller. Programmerne inkluderer især MATLAB og QGIS. Desuden er Generativ AI i form af OpenAIs ChatGPT og Microsofts Copilot løbende anvendt som hjælp til eksempelvis at finde synonymer, små oversættelsesopgaver og kodning.



Esther Ritterbusch
eritte20@student.aau.dk



Julie Bach
jbach20@student.aau.dk

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1	Indledning	1
1.1	Regnvandsbassiner	1
1.2	Dimensioneringspraksis for våde regnvandsbassiner	2
1.3	BAssinMonitorering til brug for design og SystemEffektivisering	3
Kapitel 2	Systembeskrivelse	5
2.1	Regnvandsbassiner og deres massebalance	5
2.2	Problemformulering og projektkonkretisering	9
Kapitel 3	Metode til bestemmelse af Q-h relationer	10
3.1	Indsamling af vandstandsdata fra bassiner i BAMSE-projektet	10
3.2	Metoder til estimering af Q-h relation	13
3.3	Frejlev som case-study	16
3.4	Metode 1	18
3.5	Metode 2	20
3.6	Metode 3	22
Kapitel 4	Diskussion af metoder til Q-h	24
4.1	Sammenligning af estimerede Q-h relationer	24
4.2	Ydre faktorer med indflydelse	26
4.3	Endelig Q-h relation for Frejlev Skolevej Bassin	30
Kapitel 5	Modellering af vandstand	33
5.1	Metode til modellering af vandstand	33
5.2	Simpel bassinmodel	36
5.3	Simpel rørmodel	41
5.4	MIKE URBAN model	47
5.5	Resultater fra de tre modeller	52
Kapitel 6	Aladdinvej Bassin	57
6.1	Datagrundlag og forudsætninger for Aladdinvej Bassin	57
6.2	Karakterisering af udløbsvandføring	62
6.3	Modellering og validering af vandstand med simpel bassinmodel	65
6.4	Resultater fra modellering med længere nedbørsserier	70
Kapitel 7	Svenstrup Banevej Bassin	72
7.1	Datagrundlag og forudsætninger for Svenstrup Banevej Bassin	72
7.2	Karakterisering af udløbsvandføring	76
7.3	Modellering og validering af vandstand med simpel bassinmodel	78
7.4	Resultater fra modellering med længere nedbørsserier	82
Kapitel 8	Sammenligning med gældende dimensioneringspraksis	84

8.1	Gældende dimensioneringspraksis	84
8.2	Virkelige vandbremsere	85
8.3	Dynamisk modellering med output fra SVKs Regionale Regnrækkeværktøj	86
Kapitel 9 Diskussion og konklusion		89
9.1	Datakvalitet	89
9.2	Effekt af frihedsgrader for Q-h ekstrapolation	90
9.3	Jordmatricens bufferkapacitet	92
9.4	Vandstandsmålinger som verificering af tekniske informationer	93
9.5	Simpel bassinmodels anvendelighed og begrænsninger	95
9.6	Begrænsninger i gældende udledningstilladelser	98
9.7	Evaluerings af bassiner og dimensioneringspraksis	99
Litteratur		100
Appendiks A Resulterende tidsserier Frejlev Skolevej		103
Appendiks B Resulterende tidsserier Aladdinvej		110
Appendiks C Resulterende tidsserier Svenstrup Banevej		112

Indledning 1

Historisk set er regnvand og spildevand i fælleskloaker blevet ført gennem renseanlæg inden det efterfølgende er udledt til recipienter. I takt med at der i Danmark opleves stigende og mere intens nedbør, forventes det, at hyppigheden af overløb, hvor fortyndet og urensset spildevand ledes direkte til recipienter, vil stige. Dette værende både overløb i afløbssystemerne, ofte benævnt CSO, eller ved by-pass løsninger på renseanlæggene. Den hyppigst anvendte løsning på dette er, i Danmark, at separatkloakere. I 2020 var Aalborg Kommune 69% separatkloakeret med en målsætning om 100% i år 2065 [Aalborg Kommune, 2025].

Det er landets forsyningsselskaber, som har ansvaret for håndteringen af overfladevand fra de separatkloakerede arealer. Overfladevand fra de urbane overflader ledes til de naturlige recipienter. Overfladevand er dog ofte forurennet og kan strømme med høje intensiteter, hvilket kan være til gene for recipientens kemiske, biologiske og fysiske tilstand. Derfor ledes overfladevand til regnvandsbassiner inden det efterfølgende ledes til de naturlige recipienter.

1.1 Regnvandsbassiner

Regnvandsbassiner kan jævnfør DANVA's: *Designguide for regnvandsbassiner* udføres på forskellige måder og de mange typer af bassiner har også forskellige styrker og svagheder [DANVA, 2018].

I 1960'erne og 1970'erne ses den begyndende anvendelse af separatkloakering i Danmark, og det betyder også, at der er blevet etableret flere udgaver af regnvandsbassiner gennem årene, som stadig er i drift i dag [Winther et al., 2011, s. 18-24]. Siden udgivelsen af *Faktablad om dimensionering af våde regnvandsbassiner* fra 2012 [Vollertsen et al., 2012], anlægges der primært våde regnvandsbassiner, da der opnås større rensning af overfladevand med disse.

Våde regnvandsbassiner etableres med et permanent vådt volumen samt et magasineringsvolumen til overfladevand. Udløbsvandføringen fra bassinet reguleres for at undgå hydraulisk påvirkning af recipienten såsom erosion og forhøjet vandstand. De partikulære stoffer i overfladevand sedimenterer i regnvandsbassinet, grundet det våde volumen, inden overfladevand udledes til recipienten. Herved opnås også en rensning af overfladevand inden udledning. Det våde regnvandsbassin kan ofte fremstå som en sø med bevoksning og dyreliv, hvorved der også opnås begrænset rensning af opløste stoffer i overfladevand. Før 2012 blev der anlagt mange tørre regnvandsbassiner. De tørre regnvandsbassiner sikrer ligeledes forsinkelse af overfladevand, dog opnås ingen eller begrænset rensning af overfladevand.

1.2 Dimensioneringspraksis for våde regnvandsbassiner

Med tiden er der blevet stillet skarpere krav til anlæggelsen af regnvandsbassiner. Tidligere fremgik der ikke altid optegninger og notater angående dimensioneringen af regnvandsbassinerne, hvorfor det i dag eksempelvis kan være vanskeligt at kortlægge hvorvidt et regnvandsbassin er anlagt med membran eller ej, hvordan udledning fra regnvandsbassinet reguleres etc.

Den nuværende praksis er, at anlæggelsen af et regnvandsbassin kræver en udledningstilladelse. En udledningstilladelse gives af den pågældende Kommune i forsyningens distributionsområde. Udledningstilladelsen skal sikre, at der ikke sker en hydraulisk eller økologisk forringelse af den modtagende recipient. Derfor vil udledningstilladelsen, på baggrund af oplandskarakteristika, angive en maksimal udløbsvandføring til recipienten samt et påbud om ikke at belaste denne, omend det er svært at kvantificere, om disse påbud overholdes. I to forskellige udledningstilladelser udstedt af Aalborg Kommune angående henholdsvis Landbækken og Hasseris Å står der ”udledningen må ikke være til hinder for at målsætningen kan opfyldes for Landbækken der modtager spildevandet” [Aalborg Kommune, 2016] og ”udledningerne må ikke medføre hyppigere eller større oversvømmelse af vandløbene end der ville være tilfældet ved afstrømning fra vandløbenes naturlige opland”. [Aalborg Kommune, 2021] Udledningstilladelserne har siden udgivelsen af *Faktablad om dimensionering af våde regnvandsbassiner* henvist til, at bassiner, som anlægges, skal være Best Available Technology, BAT, hvilket ifølge førnævnte faktablad er våde regnvandsbassiner.

Udledningstilladelsen angiver ligeledes gentagelsesperioden, også benævnt overfyldningshyppigheden, for nødoverløb fra regnvandsbassinet, hvor den maksimalt tilladte udløbsvandføring overskrides. Gentagelsesperioden og afløbstallet har stor betydning for det endelige bassinvolumen og derved anlæggelsen af regnvandsbassinet. Udledningstilladelsen angiver ikke hvordan regnvandsbassinet skal dimensioneres, kun hvilke krav det skal overholde. Det er op til den enkelte forsyning at overholde disse krav, når regnvandsbassinet dimensioneres. Den udbredte dimensioneringspraksis for regnvandsbassiner er Spildevandskomiteens *Regionale Regnrækkeværktøj*. Dette værktøj er udgivet i forbindelse med Spildevandskomiteens Skrift 32, men værktøjet er opdateret fra tidligere skrifter såsom Skrift 30. Værktøjet kan beregne et nødvendigt magasineringsvolumen på baggrund af inputtene: gentagelsesperiode, afløbstal, befæstet areal, hydrologisk reduktionsfaktor, geografisk placering af bassin og en operationel faktor.

Fra de angivne input beregnes volumenkurver, som visualiserer afløbstallets betydning for det nødvendige magasineringsvolumen. Værktøjet viser resultater fra to metoder til beregning af volumenet: ”regnrække-metoden” og ”regnserie-metoden”, hvor den primære forskel er, om der eksplicit tages hensyn til koblede hændelser. Jævnfør Gregersen et. al [2023] er det tanken, at brugeren, ved at sammenligne de to metoder, har mulighed for at vurdere, om der er tale om et simpelt tilfælde, hvor regnrækkeværktøjet alene kan benyttes til bassindimensionering, eller om mere avancerede metoder er nødvendige. Dette afhænger i stor grad af afløbstallet, som især har indflydelse på tømmetiden, og dermed bassinvolumenet, hvis det er under 1 L/s/ red. ha. Vurderingen, som skal foretages af den projekterende, introducerer dermed en usikkerhed.

Foruden afløbstallet inkluderer beregningerne med regnrække-metoden, som er den primære beregningsgang, et volumentillæg på 20% som kompensation for ikke eksplicit at tage

koblede hændelser med i beregningen. Desuden arbejdes der med en operationel faktor, som dækker klimafremskrivning og usikkerheder angående afstrømningen fra oplandet. Slutteligt skal det også pointeres, at den hydrologiske reduktionsfaktor sjældent er kendt, hvorfor denne faktor også er usikker. [Gregersen et al., 2023, s. 6-9] [Spildevandskomiteen, 2023] [Winther et al., 2011, s. 98-102, s. 312-317] Regnrækkeværktøjet til bassindimensionering introducerer derfor flere faktorer, som påvirker det endelige magasineringsvolumen, og det kan derfor være vanskeligt at afgøre, hvilket volumen der er tilstrækkeligt.

Foruden dimensioneringen af et regnvandsbassin kræves der også en stor planlægning af udførelsen af bassinet. Dette inkluderer opkøb af arealer, geotekniske forundersøgelser, eventuelle VVM-undersøgelser eller dispensationer samt projektering. Slutteligt skal anlæggelsen af regnvandsbassinet også inkluderes, såsom jordhåndtering, entreprenørarbejde og eventuelle grundvandssænkninger. Alle disse arbejdsprocesser betyder, at arbejdet med at opføre et regnvandsbassin er krævende hvad angår både tid og økonomiske ressourcer.

1.3 BassinMonitorering til brug for design og SystemEffektivisering

Når først regnvandsbassinet er idriftsat, hører det dog til sjældenhederne, at bassinets faktiske hydrauliske funktion verificeres [VUDP, 2025]. Det er derfor ofte ukendt hvorvidt magasineringsvolumenet stemmer overens med gentagelsesperioden påkrævet gennem udledningstilladelsen. Idet beregningen af magasineringsvolumenet er forbundet med visse usikkerheder, er det sandsynligt, at der vil være uoverensstemmelser mellem dette og gentagelsesperioden. Det er samtidig også uvist, om det våde volumen er påvirket af ydre faktorer såsom: ind- og udsivning fra grundvand eller drænledninger. Ofte er den eneste overvågning af et regnvandsbassin gennem en sensor koblet til Styring, Regulering og Overvågning, SRO, som anvendes til at advare driftsafdelinger om nødoverløb fra regnvandsbassinet.

Skal en forsyning i dag foretage en separatkloakering af et allerede fælleskloakeret område eller byggemodne et nyt område, anlægges et nyt regnvandsbassin, da der ofte ikke findes en hydraulisk vurdering af eksisterende bassiner, hvorfor nyere arealer sjældent kobles til et eksisterende regnvandsbassin. Med henblik på omfanget af ressourcer der benyttes til planlægning og anlæg af et regnvandsbassin er der derfor et effektiviseringspotentiale, hvis regnvandsbassiner i dag er overdimensioneret. Fremfor alt vil det være gavnligt at kunne undersøge eksisterende regnvandsbassiner og afgøre, om der forefindes uudnyttet kapacitet eller om bassinerne generelt har manglende kapacitet.

Dette er grundlaget for projektet: *BassinMonitorering til brug for design og SystemEffektivisering*, også forkortet BAMSE. Projektet er støttet af VUDP, og løber fra 1. juni 2024 til 31. maj 2027. Projektet ejes af Aalborg Forsyning - Kloak A/S og er et samarbejde med Institut for Byggeri, By og Miljø ved Aalborg Universitet.

BAMSE-projektet har til hensigt undersøge, om der ved hjælp af simple, kontinuerlige målinger af vandstand i et regnvandsbassin, kan opnås resultater, som kan afgøre hvorvidt et regnvandsbassin fungerer planmæssigt. Projektet skal arbejde med både nye, ældre, våde og tørre regnvandsbassiner og vil undersøge deres hydrauliske effektivitet. Der skal testes flere bassiner, så der er et større statistisk grundlag. Samtidig skal BAMSE-projektet

kunne hjælpe andre forsyninger, som også ønsker at undersøge egne bassiner.

Målet er, at undersøgelsen og vurderingen af om bassinet er fuldt udnyttet skal være en simpel proces, som ikke kræver andet end kontinuerlige vandstandsmålinger. Idet der er begrænset information angående de hydrologiske processer i regnvandsbassiner i dag, bliver BAMSE-projektet ligeledes et studie i, hvor meget vandstandsmålinger kan fortælle om regnvandsbassinet.

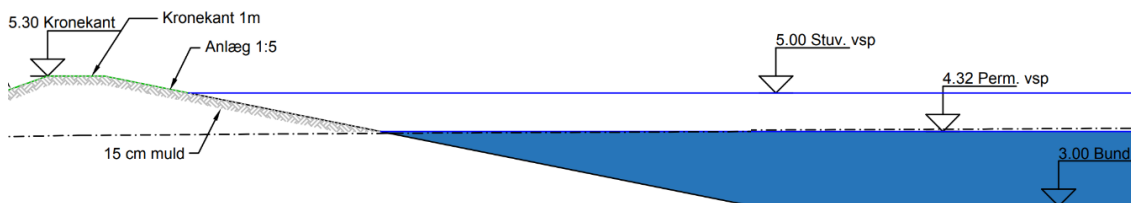
Systembeskrivelse 2

I det følgende redegøres mere teknisk for regnvandsbassiner og deres massebalance samt hvorledes denne ønskes anvendt til at modellere vandstanden i udvalgte bassiner.

2.1 Regnvandsbassiner og deres massebalance

Et vådt regnvandsbassin er et teknisk anlæg, hvorfor der er foretaget flere foranstaltninger for at opnå forsinkelse og rensning af overfladevandet. På figur 2.1 ses et udklip fra en teknisk tegning af tværsnittet af et regnvandsbassin. Eksemplet er fra et vådt regnvandsbassin i Frejlev, sydvest for Aalborg. Bassinet har en bundkote samt en kote for det permanente vandspejl. Dybden af det permanente vandspejl skal være mellem 1-1,5 meter for at opnå rensning. På figuren er der ligeledes angivet en stuvningskote, som er den dimensionerede kote. Overskrides denne, angives det som et nødoverløb og overløbskanten i udløbsbrønden vil være i brug. Under et nødoverløb vil regnvandsbassinet dog ikke oversvømme det omkringliggende terræn, idet bassinet er udstyret med en kronekant. Kronekanten vil være i varierende størrelsesorden, dog er den en ekstra sikkerhedsforanstaltning, som giver mulighed for at forhindre oversvømmelse af omkringliggende terræn. Er dette ekstra volumen i brug, er det dog stadig karakteriseret som et nødoverløb, da udledningstilladelsen overskrides grundet overløbskanten i udløbsbrønden. For visualisering af en udløbsbrønd se vedhæftede bilag: *15_Frejlev_Udløbsbrønd 42051301.pdf* [Aalborg Forsyning A/S, 2019]. Flere forhold vil afgøre hvorvidt et regnvandsbassin etableres med en fast membran. Er der grundvandsinteresser nær bassinet, skal der etableres en fast membran. I tilfældet på figur 2.1 ses det, at der ikke er anlagt membran. Det er dog påpeget i udledningstilladelsen, at i tilfælde af at bassinet ikke kan opretholde sit permanente vådvolumen, skal der efterfølgende indlægges en membran [Aalborg Kommune, 2021]. En fast membran kan have stor betydning for udledningen fra regnvandsbassinet, idet bassinet kan blive påvirket af grundvandsspejlet eller andre uforudsete faktorer. [DANVA, 2018]

Våde regnvandsbassiner bliver anlagt med et dykket indløb, som ofte er placeret i et forbassin. Dette fungerer da som et sandfang. Under indløbet støbes typisk en betonoverflade for at undgå erosion. Når indløbet er placeret i et forbassin begrænses resuspension af sedimenterede stoffer i det våde volumen. Ind- og udløb vil ligeledes være placeret med størst mulig afstand for at opnå lang opholdstid i bassinet. [DANVA, 2018]



Figur 2.1. Udklip af teknisk tegning over tværsnittet af et regnvandsbassin. Her er eksemplet Frejlev Skolevej Bassin. Se vedhæftede bilag: *20-Frejlev_Bassin_Snit A-A og B-B.pdf* [Aalborg Forsyning A/S, 2019]

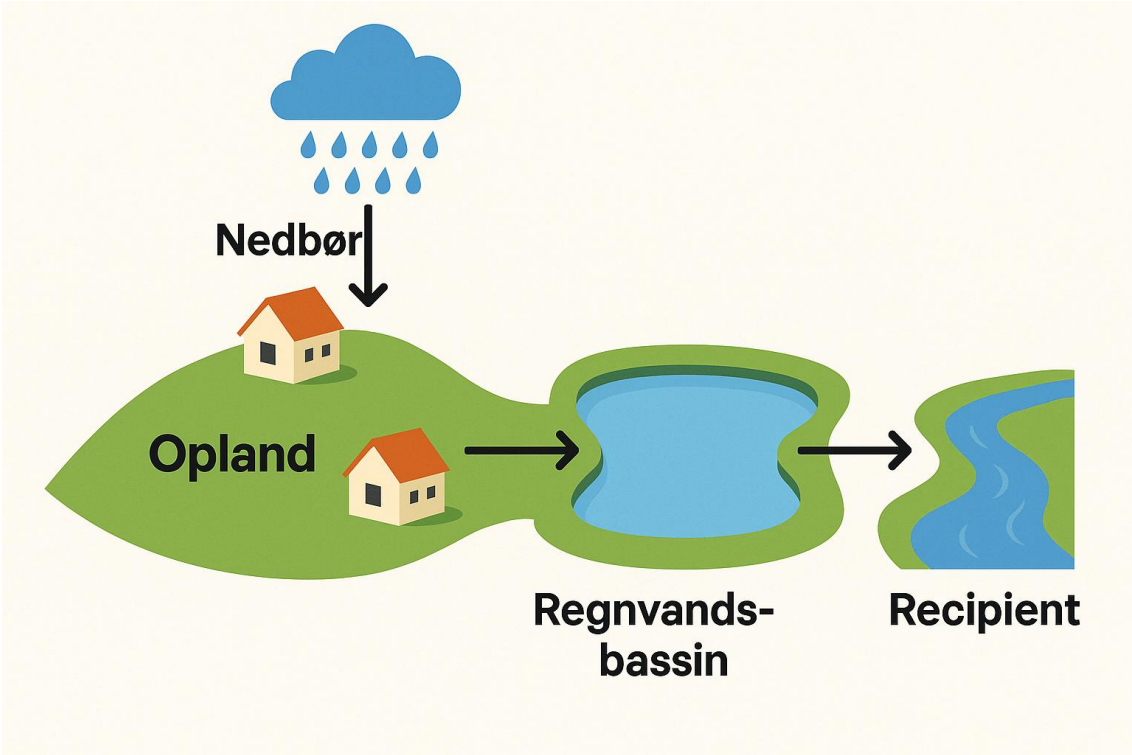
Våde regnvandsbassiner etableres med en vandbremse i udløbet for at regulere udløbsvandføringen fra bassinet til recipienten. Den maksimale vandføring fremgår af den bassinspecifikke udledningstilladelse. Spildevandskomiteens Regionale Regnrækkeværktøj beregner tømningstider med en konstant udløbsvandføring lig den maksimalt tilladte udledning.

Vandbremsere findes i flere udgaver, dog har de til fælles, at de kan beskrives med en Q-h relation og derfor ikke udleder med en fast udløbsvandføring. Når vandbremsere bestilles fra producenten er de derfor optimeret til, at ved den maksimale stuvningskote, skal vandbremsen levere den maksimalt tilladte udløbsvandføring. Dette betyder, at ved alle lavere vandstande, udnytter regnvandsbassinet ikke udledningstilladelsen. Regnvandsbassinet udnytter derfor reelt set kun sin udledningstilladelse, hver gang vandspejlet er tæt på overløbskanten. Konsekvensen af dette er også, at regnvandsbassinet vil have længere tømningstider, end angivet i det Regionale Regnrækkeværktøj, og dermed vil et regnvandsbassin stå vandfyldt oftere og derfor have mindre tilgængeligt magasineringsvolumen.

Den færdiginstallerede vandbremse har dog sjældent en Q-h relation tilgængelig. Derfor kan det være nødvendigt at bestemme vandbremsens faktiske ydeevne empirisk. Dette kan eksempelvis gøres i et laboratorium eller ved hjælp af vandstandsdata.

Idet tørre regnvandsbassiner fortsat er i drift flere steder i Danmark, gennemgås det også kort, hvordan disse er etableret og fungerer. Tørre regnvandsbassiner kan både forsinke og nedsive overfladevand inden videre udløb til en recipient. Er jorden forurenet under bassinet, skal bassinet etableres med fast membran. Bassinet vil, som våde regnvandsbassiner, have et indløb med erosionsbeskyttelse og et udløb med en regulering af udløbsvandføringen. Tørre regnvandsbassiner anlægges med en svag hældning fra indtil udløbet. De vil derfor typisk fremstå vandfyldte 2-3 dage efter en nedbørshændelse og renser ligeledes overfladevandet omend begrænset sammenlignet med våde bassiner. [Københavns Kommune, 2011] [DANVA, 2018]

Af figur 2.2 ses en konceptuel skitse af et simpelt system indeholdende et bidragende opland, et regnvandsbassin samt recipienten, som bassinet aflaster til.



Figur 2.2. Simple skitse af bassinsystemet. Er genereret med AI.

Systemet er forsimplet idet eksempelvis ind- og udsivning fra bassinet eller fordampning fra den frie overflade kan spille en rolle, hvad angår bassinets massebalance. For dette simple bassinsystem kan der dog opstilles en simpel massebalance. Det må gælde, at, mængden af vand der kommer ind i bassinet som afstrømning fra oplandet er lig mængden af vand ud af bassinet, som ledes til recipienten, med en magasinering i bassinet til forskel, ligning 2.1.

$$Q_{ind}(t) = Q_{ud}(h(t)) + \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot A(h(t)) \tag{2.1}$$

Hvor:

h	Vandstand [m]
t	Tid [s]
$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	Ændring i vandstand pr. tidsskridt [m/s]
$A(h(t))$	Overfladeareal som funktion af vandstanden [m ²]
$Q_{ind}(t)$	Indløbsvandføring [m ³ /s]
$Q_{ud}(h(t))$	Udløbsvandføring [m ³ /s]

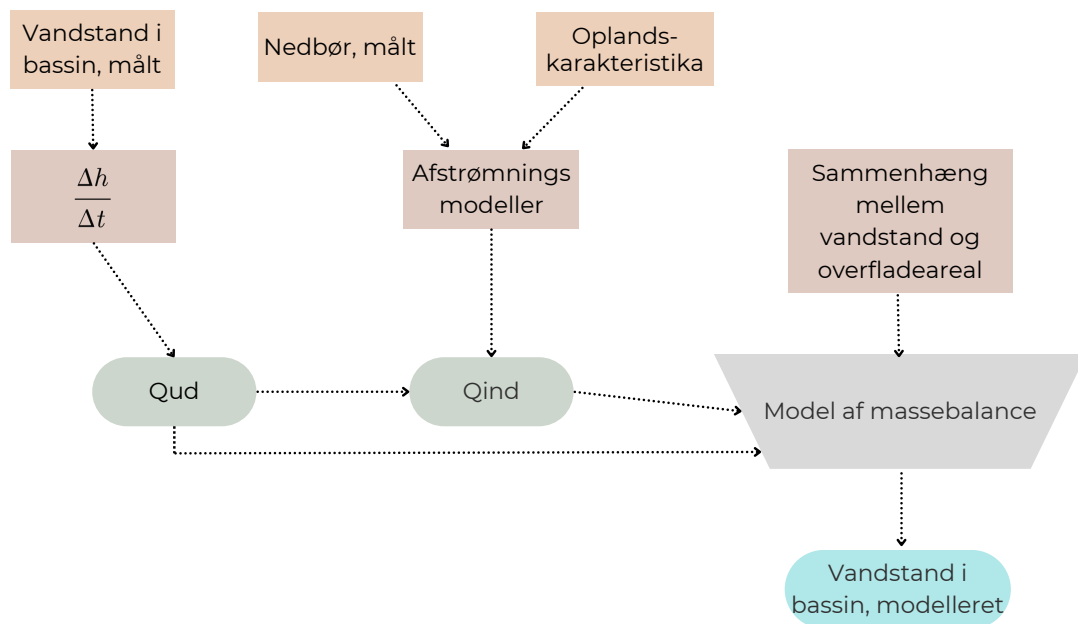
Ved at omskrive ligningen fremgår det dermed også, at en ændring i volumen, og dermed vandstand i bassinet, kan beskrives via forskellen mellem ind- og udløbsvandføring. Kan der opstilles udtryk for netop ind- og udløbsvandføringen, samt bassinets overfladeareal, er det muligt at modellere vandstanden i et givet regnvandsbassin over tid via ligning (2.2):

$$h(t) = \frac{Q_{ind}(I(t)) - Q_{ud}(h(t))}{A(h(t))} \cdot \Delta t + h(t - \Delta t) \quad (2.2)$$

Hvor:

$h(t)$	Vandstand i regnvandsbassinet til tiden t [m]
$h(t - \Delta t)$	Vandstand i regnvandsbassinet til tidsskridtet før [m]
Δt	Tidsskridt [s]
I	Nedbørsintensitet [$\mu\text{m/s}$]

For at modellere vandstand kræves det, som beskrevet, at henholdsvis ind- og udløbsvandføring for et bassin kortlægges. Indløbsvandføringen til et bassin afgøres af nedbøren og det bidragende oplands karakteristika. Udløbsvandføringen afgøres af bassinets vandbremse og dennes Q-h kurve, der, som beskrevet, ikke altid er nærmere defineret. Af figur 2.3 fremgår et diagram, som illustrerer de nødvendige komponenter i en bassinmodel.



Figur 2.3. Systembeskrivelse for etablering af en bassinmodel, som kan beregne vandstand i et bassin på baggrund af nedbør, oplandskarakteristika og en Q-h relation for bassinets vandbremse.

2.2 Problemformulering og projektkonkretisering

I tråd med ambitionen for BAMSE-projektet, er et af formålene med nærværende kandidatspeciale at bidrage til udviklingen af metoder eller værktøjer, som kan anvendes i monitoreringen og analysen af eksisterende regnvandsbassiner. Det ønskes at udføre en nøjagtig hydraulisk karakteristik af udløbsvandføringen, og dermed vandbremsen, for et regnvandsbassin på baggrund af vandstandsmålinger, som indsamles i forbindelse med BAMSE-projektet. Ligeledes er det et ønske, at afdække hvor mange andre informationer det er muligt at opnå gennem det indsamlede vandstandsdata. På baggrund af dette, er ambitionen at opstille et modelværktøj med udgangspunkt i ligning (2.2), der, med nedbør som input, kan modellere vandstanden i udvalgte regnvandsbassiner. For bassinerne indenfor BAMSE-projektet, kan denne modellering efterfølgende valideres med de målte vandstande.

Grundtanken er, at anvende modelværktøjet til at afgøre, om givne regnvandsbassiner har den planlagte hydrauliske funktion, mere specifikt om gentagelsesperioden for overløb overholdes, og hvilken indflydelse vandbremsens faktiske ydeevne har på overfyldningshyppigheden. Dette ønskes beskrevet ved at modellere vandstanden gennem længere tid for efterfølgende at lave statistiske analyser på fyldningsgraden. Her er ideen at foretage analysen på både historisk og klimafremskrevet regn, for at analysere og afgøre om bassinet har den fornødne kapacitet i dag og under hensyntagen til fremtidens klima. Derfor opstilles følgende problemformulering:

Udnytter våde regnvandsbassiner deres kapacitet? og hvad kan simple vandstandsmålinger bidrage med, når regnvandsbassiner og deres udløbsvandføring analyseres?

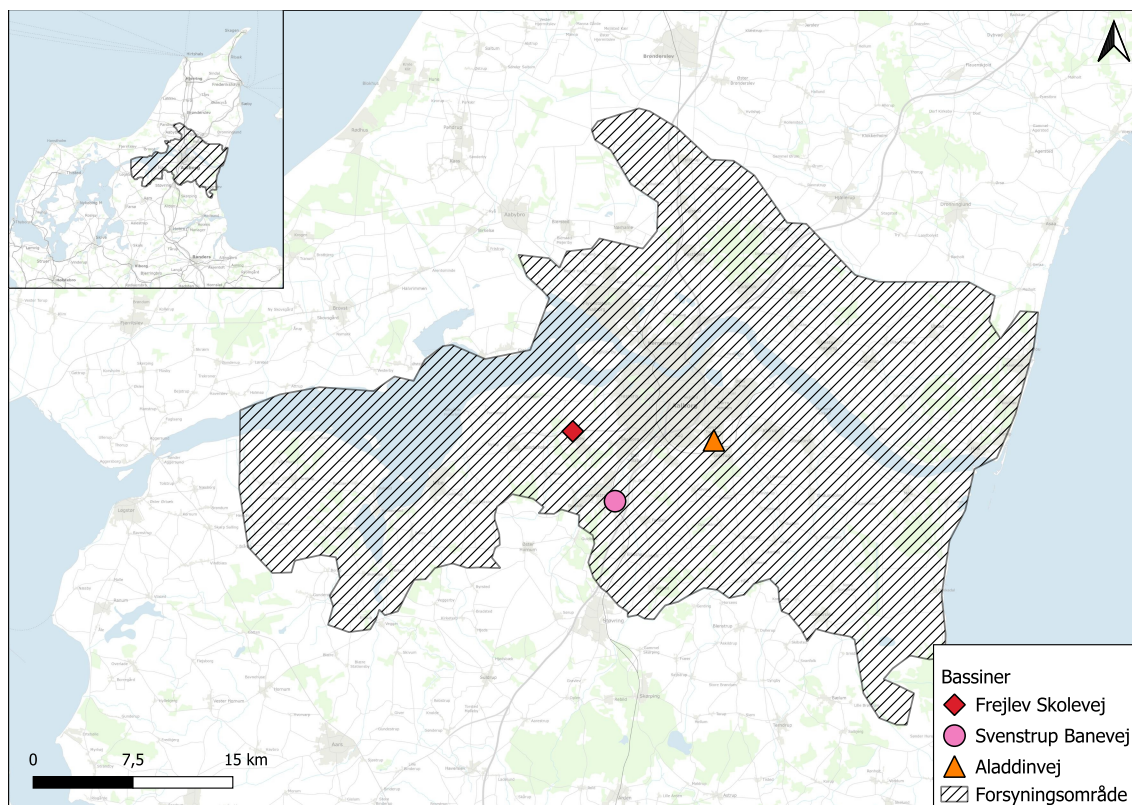
I arbejdet med vandstandsmålingerne og udarbejdelsen af en bassinmodel til at besvare om regnvandsbassiner er over- eller underdimensioneret, udvikles flere værktøjer. Først arbejdes der med metoder til at karakterisere bassiners udløbsvandføring, hvorefter der arbejdes med afstrømningsmodeller med stigende grad af kompleksitet. I specialet arbejdes der derfor med tre forskellige tilgange: en simpel bassinmodel, en simpel rørmodel og MIKE URBAN med overflade- og rørmodel. Disse udvikles med udgangspunkt i et case study bassin, hvorefter det vurderes, hvilket kompleksitetsniveau der er nødvendigt for tilfredsstillende at kunne besvare, om et bassin er over- eller underdimensioneret. Herefter anvendes det udvalgte bassinværktøj til at analysere andre bassiner. Der inkluderes yderligere to våde regnvandsbassiner inden for Aalborg Forsynings distributionsområde. Analyserne fokuseres på våde bassiner, da de i dag er mere almindelige. De i alt tre bassiner analyseres kun med øje for hydraulik, hvorfor biologiske og kemiske processer ikke berøres, omend de også foregår. Desuden tages der ikke særlige hensyn til, om der i oplandet sker lokale eller private forsinkelser af regnvand. Der arbejdes udelukkende med det våde regnvandsbassin og dets tilhørende totale bidragende opland. Det endelige bassinværktøj skal bestemme overfyldningshyppigheden nøjagtigt, hvorfor høje vandstande skal modelleres så korrekt som muligt. Dette er derfor også fokus, når værktøjet udvikles og valideres. Fremfor at have fokus på dynamisk korrekt modellering, optimeres der på baggrund af en statistisk vurdering af modellen. Herved ses der bort fra, om værktøjet kan modellere alle peak-vandstande korrekt. Så længe der statistisk set opnås samme antal, accepteres modellen.

Metode til bestemmelse af Q-h relationer 3

I det følgende kapitel redegøres der for tre udvalgte bassiner, inkluderet i BAMSE-projektet, som i dette speciale analyseres. Det beskrives, hvordan bassinerne monitoreres, og metoden hvormed det målte vandstandsdata behandles, for at estimere en Q-h relation.

3.1 Indsamling af vandstandsdata fra bassiner i BAMSE-projektet

Som det fremgår af problemformuleringen og projektkonkretiseringen i afsnit 2.2 er det ambitionen at arbejde med vandstandsmålinger indsamlet i forbindelse med BAMSE-projektet og på baggrund af disse drage konklusioner om bassiners hydrauliske funktion. Til arbejdet i nærværende speciale er der udvalgt regnvandsbassiner, som ligger inden for Aalborg Forsynings forsyningsområde, og som indgår i BAMSE-projektet. Af figur 3.1 fremgår forsyningsområdet og de udvalgte bassiner. Her er tale om tre regnvandsbassiner beliggende på henholdsvis Frejlev Skolevej i Frejlev, Aladdinvej i Sønder Tranders og Svenstrup Banevej i Svenstrup.



Figur 3.1. Aalborg Forsynings forsyningsområde samt BAMSE bassiner udvalgt i projektet.

For de tre udvalgte bassiner gør det sig gældende, at der forefindes målinger af bassinets vandstand over en længere periode. For bassinet i Frejlev er denne data tilgængelig via *radardata.aau* [Aalborg Universitet, 2025] som drives af Aalborg Universitet (AAU). Vandstanden er af AAU monitoreret med en tryktransducer placeret midt i regnvandsbassinet siden 03/04/2022. Fra 07/08/2024 monitoreres regnvandsbassinet også i forbindelse med BAMSE-projektet af en Dryp radar afstandsmåler placeret i udløbsbrønden, som sender data til Dryps online platform. Se figur 3.2. Tryktransducere har en tidslig opløsning på 5 minutter, mens Dryps radar afstandsmåler har 2 minutter.

AAU's tryktransducer er en OTT ecoLog 500 Water Level Logger med et måleområde på 0-4 meter. Det tekniske datablad angiver, at tryktransducere har en præcision på 2 mm [OTT, ud, s. 49]. Opløsningen af data er observeret til at være 1 mm. Ud fra dataanalyse ses det, at tryktransducere producerer støj med en amplitude på 1 mm.

Radaren i udløbsbrøndens præcision og nøjagtighed er undersøgt i et tidligere semesterprojekt ligeledes forbundet med BAMSE-projektet [Bach, 2025]. Det blev vurderet, at radarens præcision er ± 10 mm, og nøjagtigheden afviger med cirka +15 mm. Opløsningen af radarens data er 1 mm. Der er altså en større måleusikkerhed med radardata end data fra tryktransducere.

Placeringen af de to sensorer gør, at der, på grund af frost, for tryktransducere er udfald henover vinterperioder mens dette ikke er tilfældet for radaren.



(a) Dryp radar placeret i udløbsbrønden til Frejlev Skolevej Bassin.



(b) AAUs tryktransducer i Frejlev Skolevej Bassin.

Figur 3.2. Tryktransducer og Dryp radar til niveaumålinger ved Frejlev Skolevej Bassin

Ved Aladdinvej Bassinet monitoreres vandstanden af en Dryp radar til niveauopmåling og en vandstandsmåler. Begge sidder i udløbsbrønden, se figur 3.3. Vandstandsmåleren er Aalborg Forsyning A/S's egen, som sender data til deres SRO platform (Styring Regulering Overvågning). Her findes vandstandsmålinger fra 19/08/2021 til i dag med en opløsning på 1 cm. Målingerne har en tidsopløsning på 5 minutter. Målingerne hentet fra SRO'en angiver dybden af vandniveauet i brønden. Dryp radaren i Aladdinvej Bassinet er magen til den, som findes i udløbsbrønden ved Frejlev Skolevej Bassin. Sensoren har siddet siden 26/09/2024 og målt vandstand med en tidslig opløsning på 2 minutter.



Figur 3.3. Vandstandsmåler til SRO (rød) og Dryp (sort) radar til niveaumåling i udløbsbrønden ved Aladdinvej Bassinet. Billeder taget 23/04/2025.

Data fra Svenstrup Banevej hentes fra Aalborg Forsynings SRO. Bassinet har historisk været et tørt bassin som primo 2024 er udgravet og omdannet til et vådt bassin. Efter omlægningen har Aalborg Forsyning monitoreret vandstanden med hjælp fra Wasys og en Siemens 80 GHz SITRANS LR100 radarsender til niveauopmåling placeret i udløbsbrønden, se figur 3.4. LR100 radaren har jævnfør Siemens en rækkevidde på 8 m med en nøjagtighed på 5 mm [Siemens AG, 2023]. Der findes koterefererede målinger af vandstand fra 11/04/2024 til i dag med en primær tidsopløsning på 5 minutter, mens tidsopløsningen er finere ved vandstande over kote 6. Her foretages en måling hvert minut. Ved nærmere undersøgelse af målingerne, afgøres det, at de har en opløsning på 1 cm.



(a) Åben udløbsbrønd ved Svenstrup Banevej Bassin



(b) SITRANS LR100 radar niveaumåler placeret i udløbsbrønden.

Figur 3.4. Åben udløbsbrønd med vandbremse og overløbskant samt placering af radar niveaumåler ved Svenstrup Banevej Bassin. Fotos taget 23/04/2025.

På baggrund af målt vandstandsdata ønskes det at undersøge forskellige metoder til karakterisering af bassinens udløbsvandføring. I det følgende redegøres for metoden anvendt til behandling af vandstandsdata og andet indledende dataindsamling og -behandling.

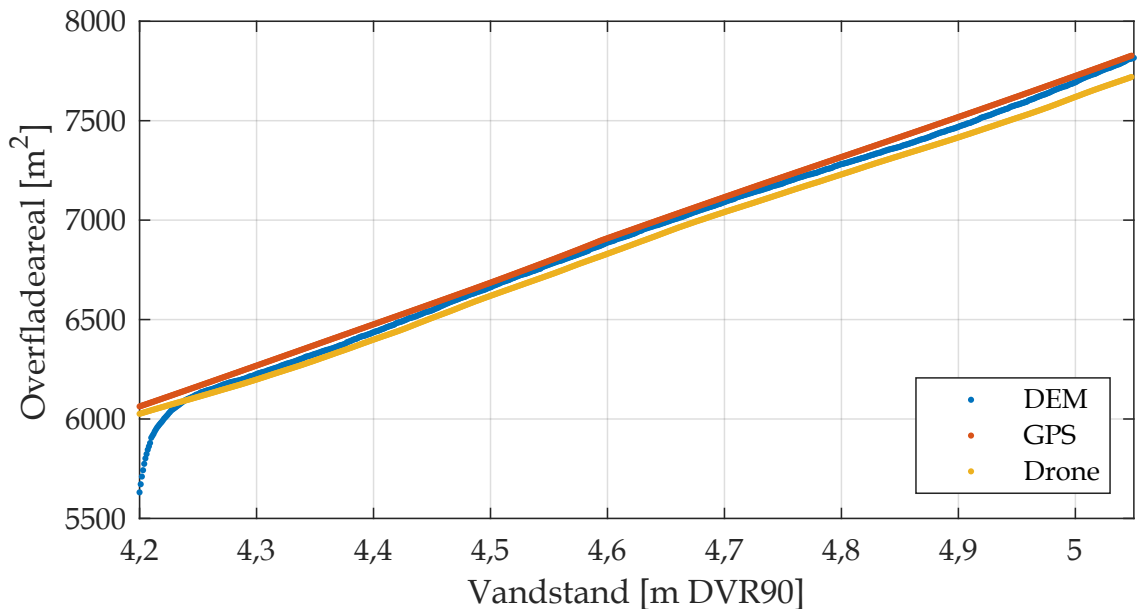
3.2 Metoder til estimering af Q-h relation

3.2.1 Bestemmelse af $A(h)$

For at karakterisere udløbsvandføringen fra et regnvandsbassin er det essentielt at kende sammenhængen mellem vandstanden i bassinet og det tilsvarende overfladeareal. Dette fremgår også af massebalancen præsenteret i ligning (2.1). Heri indgår leddet $A(h(t))$, som er et udtryk for, hvordan bassinets overfladeareal ændrer sig som funktion af vandstanden i bassinet. For at bestemme $A(h(t))$ anvendes et QGIS plug-in kaldet *Hypsometriske kurver* [QGIS Documentation, 2024]. Her indlæses en digital højdemodel, DEM, hentet i SCALGO sammen med bassinets geometri, hvorefter der udtrækkes sammenhængende værdier af kote og overfladeareal i opløsningen 1 mm. Dette udtræk af værdier anvendes efterfølgende som en opslagstabel, hvor der til en given modelleret vandstand identificeres en nærmeste vandstand i tabellen og et tilsvarende overfladeareal.

Idet denne metode kræver at den digitale højdemodel er opdateret med nyeste ændringer, kan der forekomme tilfælde, hvor denne ikke kan anvendes. I sådanne tilfælde kan der anvendes alternativer såsom: GPS opmålinger, fotogrammetri med droneopmåling eller LiDAR. GPS opmålinger kan, alt efter antallet af målinger, være en tidskrævende proces, men få datapunkter kan også give en retvisende højdemodel af bassinskråninger.

Fotogrammetri kræver en drone samt program til udarbejdelse af højdemodel. LiDAR har større omkostninger men er til gengæld også meget præcis. I forbindelse med projektet: *RADIATE – RADARPROGNOSER TIL VANDSEKTOREN* er der foretaget en sammenligning af GPS opmåling og droneopmåling af regnvandsbassinet på Frejlev Skolevej. På figur 3.5 er de to datakilder fra RADIATE sammenlignet med nærværende data fra den digitale højdemodel. [Ahm et al., 2024]



Figur 3.5. Sammenligning af overfladeareal målt med tre forskellige metoder. GPS og drone data er udleveret af Janni M. Nielsen fra projektet: RADIATE [Ahm et al., 2024]. Data fra DEM er indsamlet i forbindelse med specialet.

Det ses, at der er stor overensstemmelse mellem de tre datakilder. For nærværende bassineksempel findes det permanente vandspejl i kote 4,32. GPS- og droneopmålingen er foretaget en dag, hvor vandspejlet er under det permanente vandspejl. Den digitale højdemodel er opmålt med rød LiDAR. Rødt lys absorberes af vandoverflader, fremfor at blive reflekteret, hvorfor den digitale højdemodel ikke er repræsentativ under det permanente vandspejl, hvilket også ses på figuren, hvor DEM er afvigende fra de to andre datakilder. Er vandstanden i bassinet under kote 4,25, er GPS og drone derfor mere pålidelig. Det er dog usandsynligt, at denne forskel får en betydning i modelleringen. Det ses, at der er begrænset forskel på hvilken metode der anvendes til at definere et overfladeareal, jævnfør tabel 3.1. Det resulterende forsinkelsesvolumen beregnet på baggrund af de tre datakilder afviger inden for 1%. Det afgørende for valg af datakilde er derimod, hvad der er til rådighed.

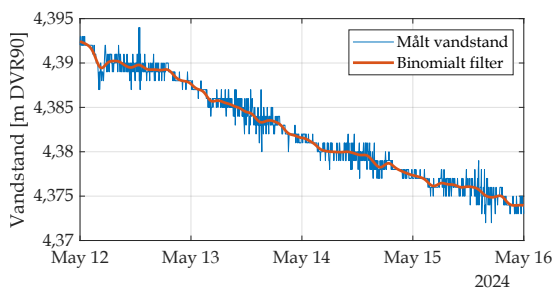
Tabel 3.1. Afvigelse af totale magasineringsvolumen (mellem kote 4,32 og 5) mellem de tre datakilder: DEM, GPS og Drone.

	DEM	GPS	Drone
Magasineringsvolumen [m ³]	4746,9	4776,0	4719,7
Afvigelse [m ³]	-	+29,1	-27,2
Afvigelse [%]	-	0,61%	-0,57%

3.2.2 Databehandling

For at udjævne eventuel støj i det målte vandstandsdata filtreres målingerne med et binomialt filter på $[1/2, 1/2]^{400}$. Dette giver en tidsforskydning på 200 datapunkter, som der efterfølgende korrigeres for. Effekten af filteret ses på figur 3.6, hvor det er tydeligt, at der stadig er små udslag, men ikke i nær samme grad som for de rå målinger.

For at etablere Q-h relationen beregnes ændringer i volumen over et tidsskridt på 5 minutter. Dette på baggrund af opslagstabellen for overfladeareal og det målte vandstandsdata i det udvalgte bassin.

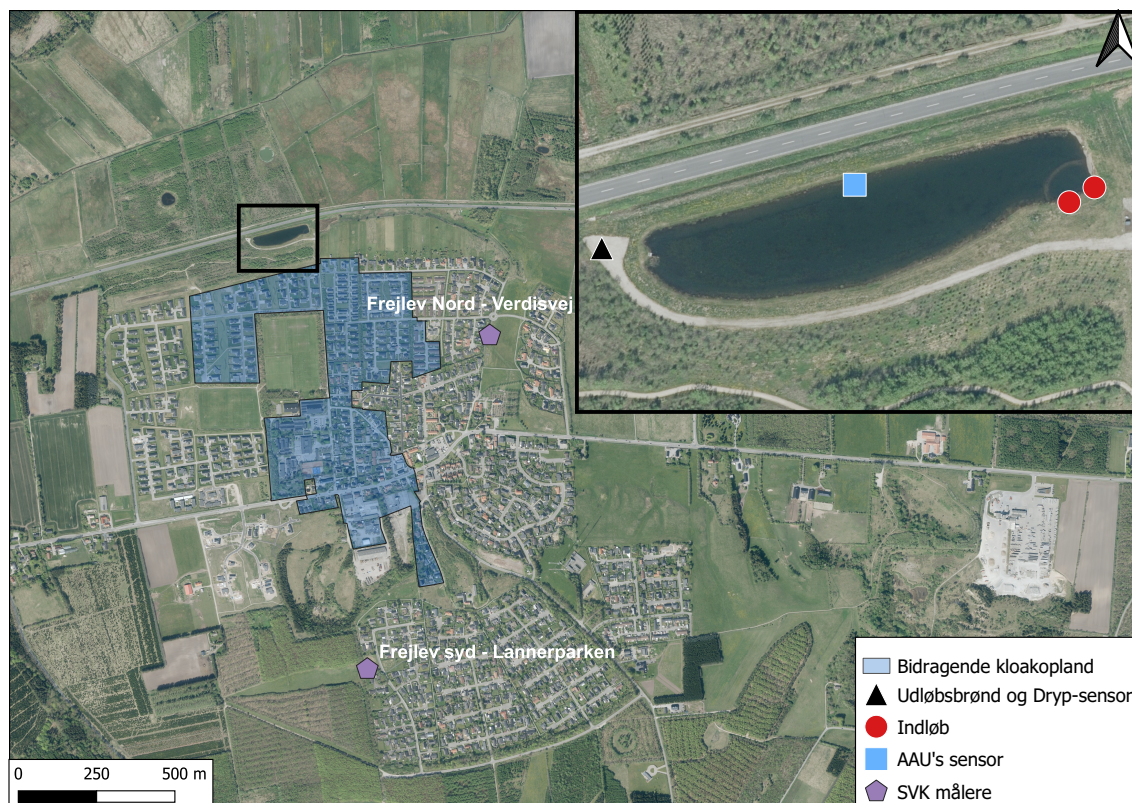


Figur 3.6. Eksempel på effekten af et binomialt filter på det målte vandstandsdata.

En Q-h relation for bassinets vandbremse forsøges udledt via målinger af vandstand i perioder, hvor indløbsvandføringen til bassinet har været lig $0 \text{ m}^3/\text{s}$. I perioder hvor der er en indløbsvandføring, vil den beregnede udløbsvandføring underestimeres, hvorfor den bestemmes, som den størst målte udløbsvandføring til enhver given vandstand i bassinet. Dette er grundtanken bag fremgangsmåden præsenteret i afsnit 3.4. I afsnit 3.5 afdækkes det, om det er muligt at bestemme en Q-h kurve baseret på et forsøg, hvor bassinets vandbremse bevidst har været lukket således at bassinet er blevet fyldt op, hvorefter vandbremsen er åbnet og bassinet er tømt igen. Slutteligt undersøges det i afsnit 3.6 om Q-h relationen kan opstilles på baggrund af et antal selektivt udvalgte tømningshændelser, hvor det via korrelation med nedbørshændelser sikres, at der ikke er faldet nedbør under tømningen, hvorfor ændringen i vandstand udelukkende må skyldes udløbsvandføringen gennem vandbremsen.

3.3 Frejlev som case-study

For at arbejde med de tre forskellige tilgange anvendes det våde regnvandsbassin på Frejlev Skolevej som case study. Bassinet har adressen Frejlev Skolevej 97, Frejlev, 9200 Aalborg SV og fremgår af figur 3.7, hvor nærmeste SVK-målere (Spildevandskomiteens vippekarsmålere) ligeledes fremgår. SVK-måleren 5057 Frejlev Nord er placeret 0,75 km fra Frejlev Skolevej Bassin, mens 5058 Frejlev Syd er placeret 1,4 km fra bassinet.



Figur 3.7. Kloakopland, ind- og udløb til Frejlev Skolevej Bassin. Ligeledes er nærmeste SVK målere markeret.

Regnvandsbassinet er udvalgt, da Aalborg Universitet har monitoreret vandstanden i bassinet siden 03/04/2022, hvorfor der forefindes en længere dataserie. I tabel 3.2 opsummeres væsentlige informationer om Frejlev Skolevej Bassin herunder information om eksempelvis volumener, tilkoblede opland og bassinets vandbremse. Data er fundet i udledningstilladelsen for bassinet [Aalborg Kommune, 2021] samt tekniske tegninger udleveret af Aalborg Forsyning A/S og som fremgår af vedlagte bilag: *15_Frejlev_Udløbsbrønd 42051301.pdf* og *20_Frejlev_Bassin_Snit A-A og B-B.pdf* [Aalborg Forsyning A/S, 2019].

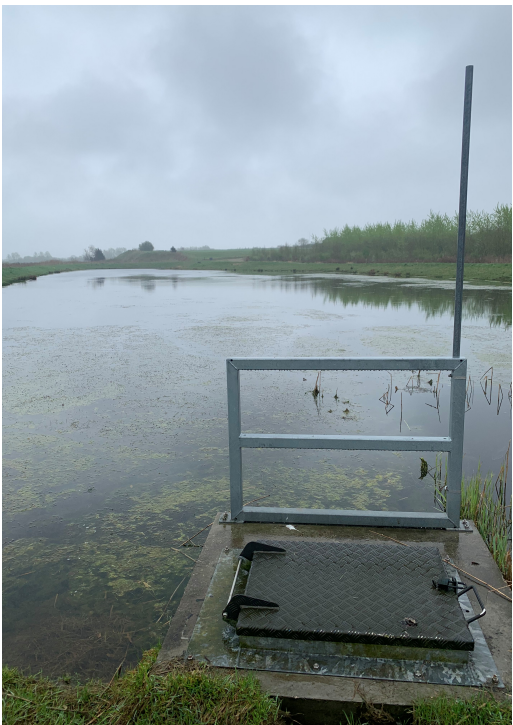
I udledningstilladelsen er det angivet, at det totale bidragende areal til bassinet er 83,5 ha. I specialet er dette areal indledende blevet undersøgt, hvor det ikke tyder på, at så stort et areal bidrager til bassinet. Dette understøttes desuden af slutrapporten fra ”*RADIATE - Radarprognoser til vandsektoren*”, hvor det bidragende areal stemmer overens med det anvendte i dette speciale [Ahm et al., 2024, s. 46-47]. Det totale bidragende areal er derfor 36,8 ha.

Billeder af regnvandsbassinet og vandbremsen fremgår ligeledes af henholdsvis figur 3.8 og 3.9.

Tabel 3.2. Karakteristika for Frejlev Skolevej Bassin.

* mm nedbør der skal falde i oplandet for at fylde bassinet.

Frejlev Skolevej Bassin			
Vådt volumen	6700 m ³	Forsinkelsesvolumen	4450 m ³
Permanent vandspejl	4,32 m DVR90	Maks vandspejl	5,0 m DVR90
Type vandbremse	Se figur 3.9	Udledningstilladelse	36 L/s
Totalt bidragende opland	36,8 ha	Befæstet opland	14,7 ha
Aflaster til	Hasseris Å	Type	Åbent, vådt bassin (Se figur 3.8)
Overfyldningshyppighed	0,2 / år	mm bassin/opland*	16,9
Idriftsættelse	2019	Data	Fra 03/04/2022 til 14/03/2025



Figur 3.8. Billeder taget af Frejlev Skolevej Bassin henholdsvis 08/05/2025 og 23/04/2025.

Typen af vandbremse i Frejlev Skolevej Bassin er ikke opgivet på de tekniske tegninger. Da det var muligt at hive vandbremsen op, er denne inspiceret nærmere og fremgår af figur 3.9. Her ses det, at typen af vandbremse ikke er angivet. Det ses også, at den er produceret af Mosbaek A/S, og er angivet til at overholde udledningstilladelsen på 36 L/s. Det er dog ikke muligt at finde denne type af vandbremse under Mosbaek's produktkatalog [Mosbaek, 2024]. Derfor er det ikke muligt at sammenligne en Q-h relation udarbejdet af producenten med de Q-h relationer som udarbejdes i dette speciale.



(a) Vandbremse forfra.

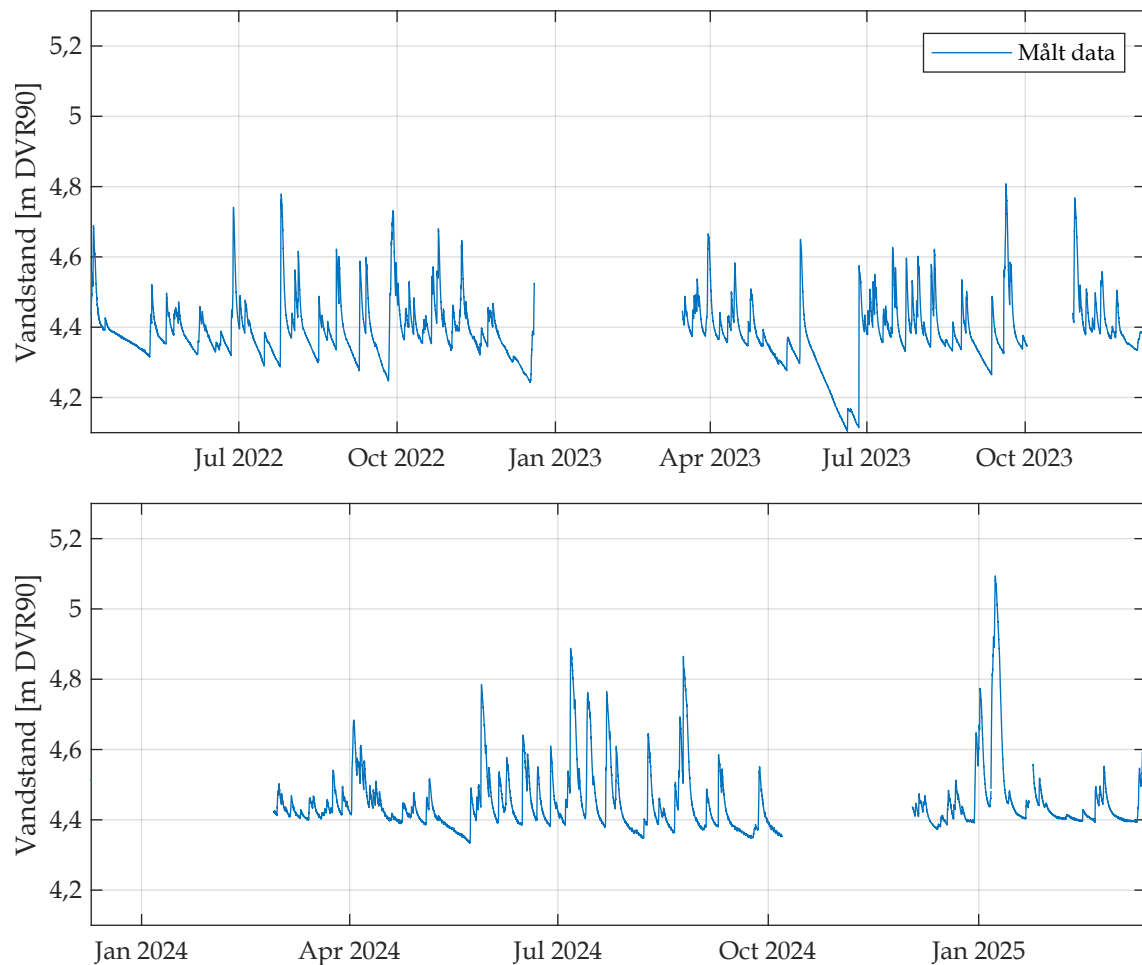


(b) Vandbremse nedefra.

Figur 3.9. Billeder taget af Frejlev Skolevej Bassins "klokke" vandbremse 23/4/2025.

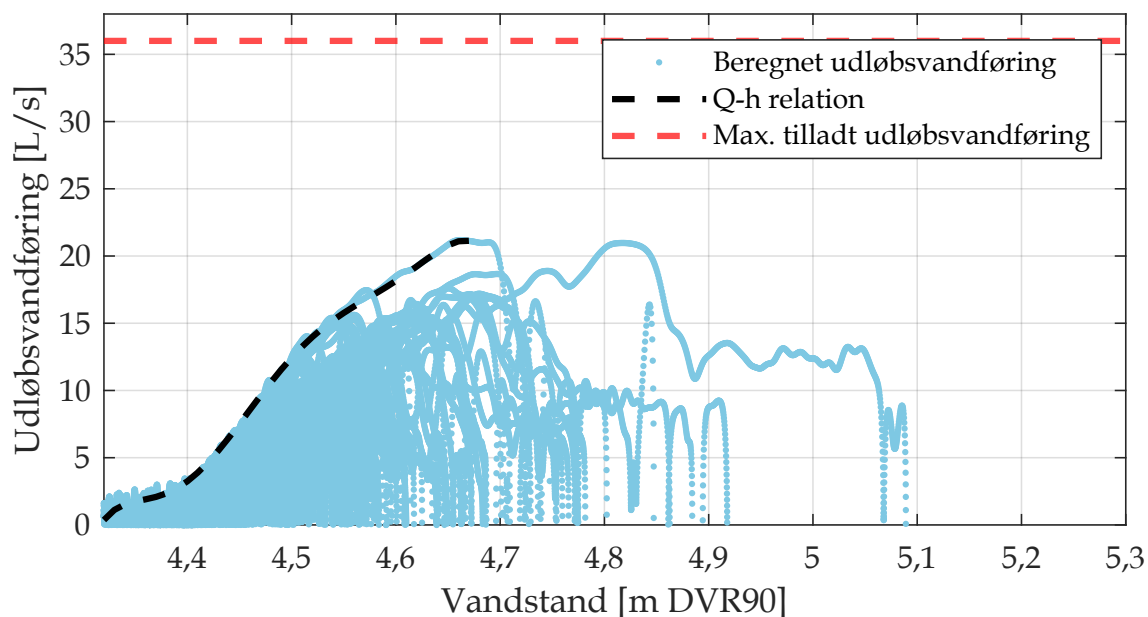
3.4 Metode 1

For metoden, som præsenteres i dette afsnit, er ønsket at benytte al tilgængelig data i form af en længere tidsserie med målt vandstand. Case-study bassinet på Frejlev Skolevej er jævnfør tabel 3.2 monitoreret siden 03/04/2022 hvorfor der forefindes over 3 års data. Da tryktransduceren i midten af bassinet ikke har været aktiv i vinterperioder er der udfald i dataserien i vintrene 2022-2023 og 2023-2024. Idet radaren i forbindelse med BAMSE-projektet har siddet beskyttet i udløbsbrønden, er der data for vinteren 2024-2025. Det samlede datagrundlag til udarbejdelsen af en Q-h relation for vandbremsen fremgår af figur 3.10. Det noteres, at vandstandsdata fra perioden: 07/10/2024 til 03/12/2024 er frasorteret, da dette er den førømtalte periode, hvor bassinets vandbremse bevidst var lukket og efterfølgende blev åbnet. Behandling af denne dataserie præsenteres i afsnit 3.5 og benævnes metode 2.



Figur 3.10. Alt data anvendt til udarbejdelsen af en Q-h relation for vandbremsen i Frejlev Skolevej Bassin. Perioden dækker fra 03/04/2022 til 14/03/2025. Der er to vinterperioder, hvor der ikke er målt vandstand samt to perioder med udfald.

På figur 3.11 fremgår de beregnede udløbsvandføringer til hvert tidsskridt samt Q-h relationen. Idet denne metode består af beregningen af en volumenændring mellem to tidsskridt, må datapunkter under Q-h relationen optegnet betyde, at vand ligeledes er løbet ind i bassinet imellem de to tidsskridt hvorved relationen underestimeres, hvis disse punkter anvendes. Q-h relationen er et kontinuert polynomium af 6. grad, som er fittet til 99-percentilen af datapunkter. Kurven er desuden tvunget gennem 0 ved det permanente vandspejl i kote 4,32. Datapunkter under kote 4,32 repræsenterer hændelser, hvor vand ikke forlader bassinet gennem vandbremsen, men eksempelvis ved fordampning eller udsivning. Q-h relationen kan estimere udløbsvandføringen op til kote 4,68 på baggrund af det målte data. Selvom der har været højere vandstand i regnvandsbassinet end kote 4,68, ses det, at datapunkter over kote 4,68 er påvirket af en indløbsvandføring siden punkterne ligger under den estimerede Q-h kurve. Skal Q-h relationen kunne håndtere vandstande over kote 4,68 er det derfor nødvendigt at ekstrapolere den.

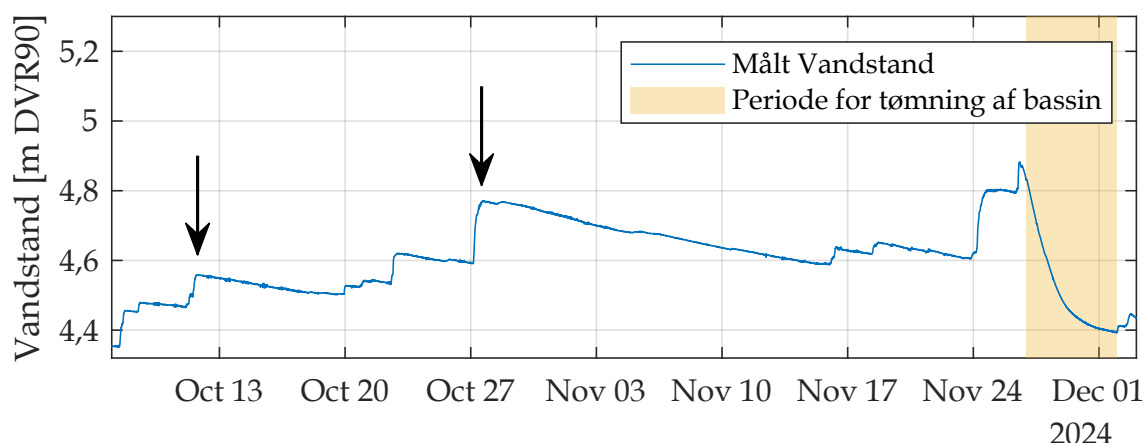


Figur 3.11. Metode 1: Q-h relation for Frejlev Skolevej Bassin med kontinuerligt vandstandsdata. Overløbskant i kote 5,0.

3.5 Metode 2

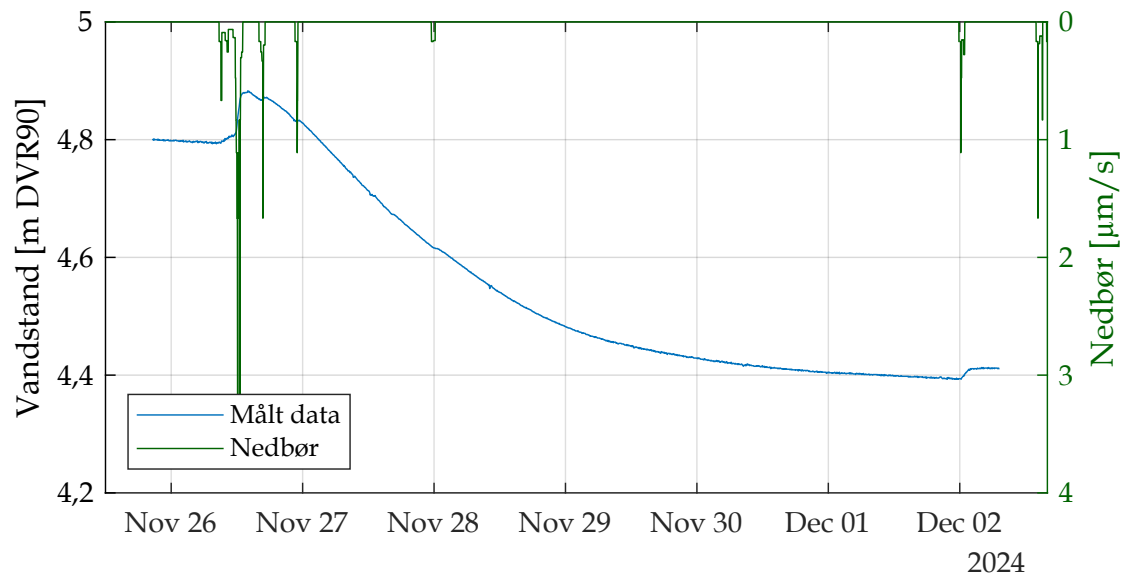
Til denne metode er der taget udgangspunkt i føromtaltte hændelse, hvor vandbremsen i Frejlev Skolevej Bassin blev blokeret i perioden 07/10/2024 til 26/11/2024. Data fra perioden fremgår af figur 3.12.

Formålet var, at fylde regnvandsbassinet til maksimal belastning og fjerne blokeringen, mens der ikke faldt nedbør. Herved kan beregningen af udløbsvandføring foretages, under den forudsætning at der under tømningen ikke er afstrømning og indløb til bassinet. På trods af at bassinet har været afproppet, ses det dog, at vandstanden i bassinet i perioder efter nedbør falder igen. Se figur 3.12 hvor pile markerer starten af to sådanne tilfælde. Dette tyder på, at der sker enten fordampning fra bassinoverfladen eller udsivning gennem bassinets bund og sider.



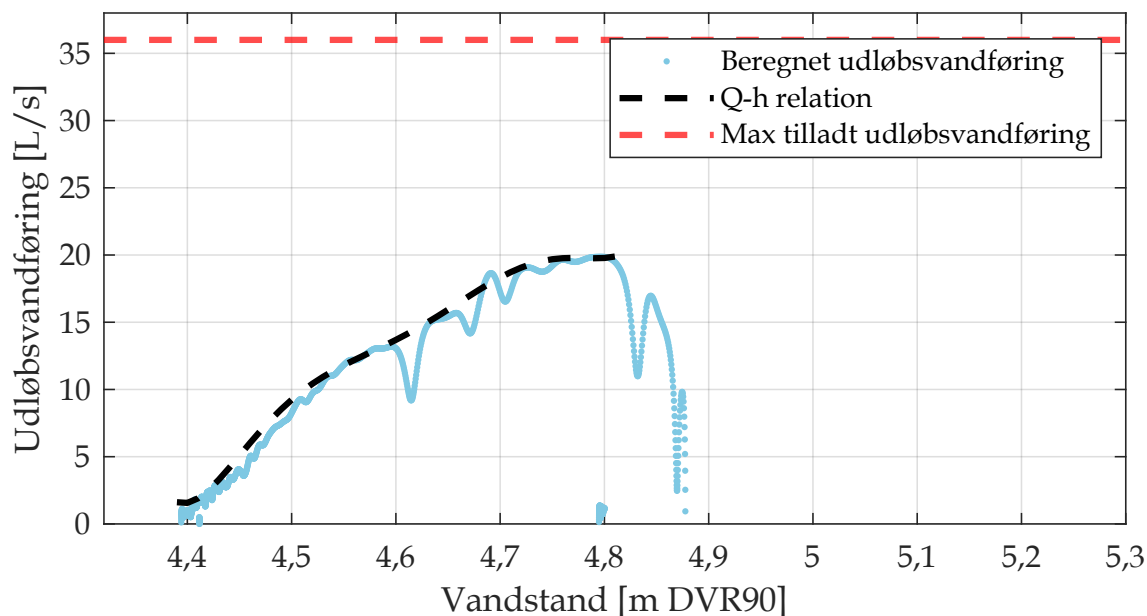
Figur 3.12. Data indsamlet mens vandbremsen I Frejlev Skolevej Bassin var blokeret, samt tømningen af regnvandsbassin efter blokeringen fjernes markeret med gul. Pile illustrerer tilfælde, hvor vandstanden falder på trods af at vandbremsen er lukket.

Til estimering af Q-h relationen anvendes kun dataet fra 26/11/2024, hvor blokeringen fjernes og frem til endt tømning af regnvandsbassinet 02/12/2024 (tømmetid på ca. 5,5 døgn). Se figur 3.12. Den udvalgte hændelse fremgår ligeledes af figur 3.13. Det ses, at nedbør falder kort tid efter blokeringen fjernes, men ellers foregår tømningen under tørvejr. Desuden fremgår det, at en ny nedbørshændelse starter 02/12/2024.



Figur 3.13. Anvendt data til at bestemme en Q-h relation eksperimentelt i Frejlev Skolevej Bassin.

Plottes de beregnede vandføringer fås nu kun en enkelt streng, som repræsenterer tømningshændelsen. På figur 3.14 fremgår de beregnede udløbsvandføringer for hændelsen den 26/11/2024 til 02/12/2024. Den estimerede Q-h relation fremgår ligeledes af figuren.

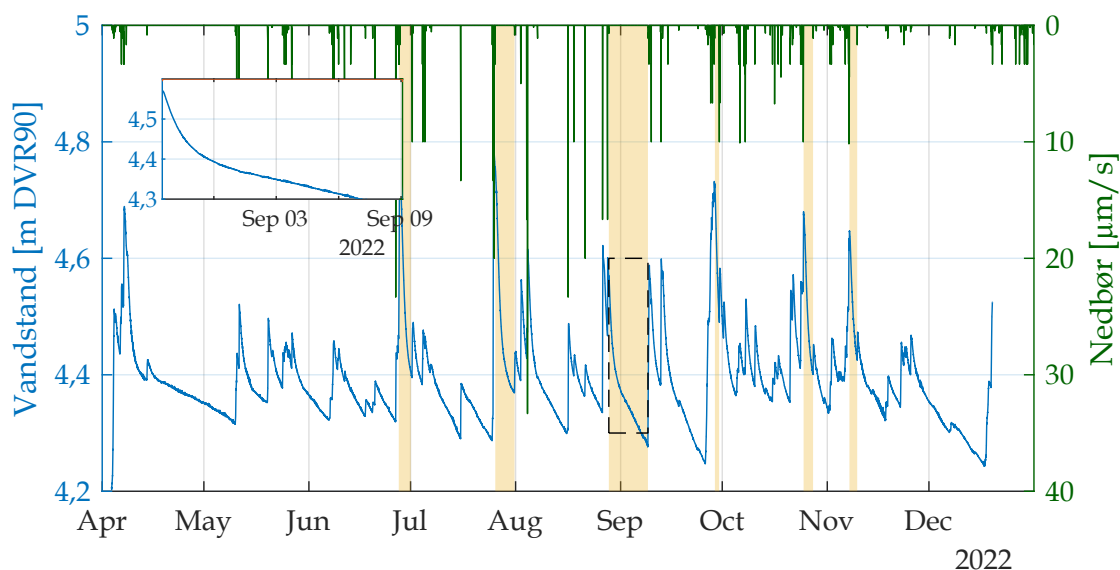


Figur 3.14. Eksperimentelt bestemt Q-h relation for Frejlev Skolevej Bassin, metode 2.

Ønsket var, at denne metode skulle bidrage til at estimere Q-h relationen for højere vandstande idet bassinet næsten var fyldt. Dette er også tilfældet op til kote 4,8, hvorefter stadig afstrømning fra oplandet og indløb til bassinet resulterer i, at der ikke måles større ændring i vandstand og dermed ikke større udløbsvandføringer. Desuden ses det, at der ikke findes datapunkter for vandstande under kote 4,4 hvilket skyldes nedbørshændelsen som indtræf 02/12/2024 før bassinet var tømt fuldstændigt. Dette fremgår også af figur 3.13.

3.6 Metode 3

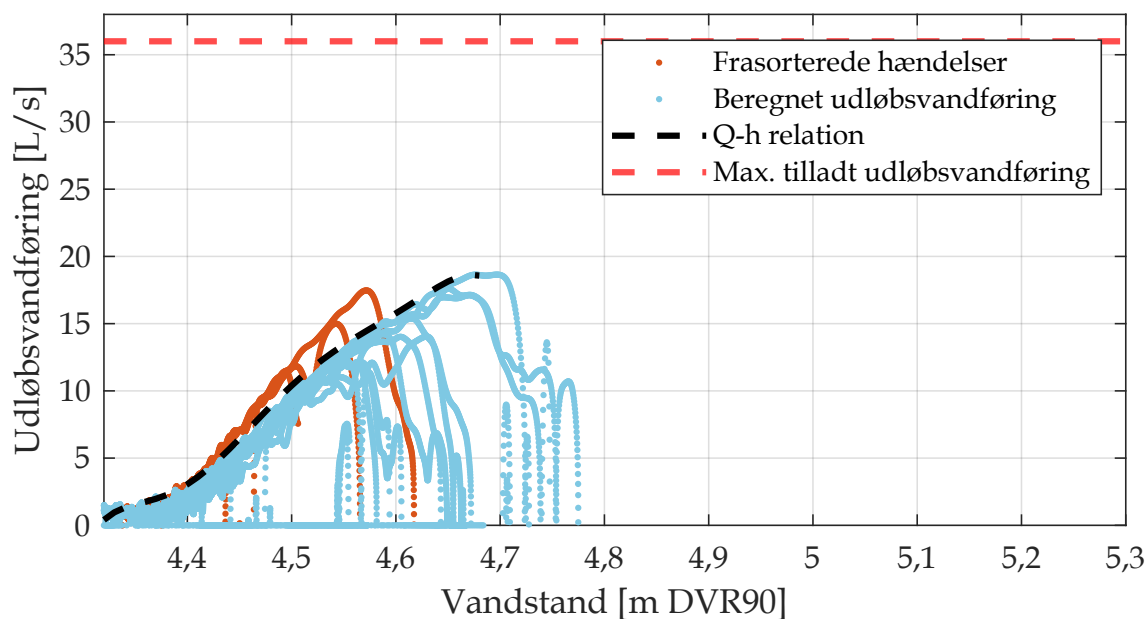
Formålet med metoden er, at få endnu bedre styr på bassinets massebalance. Hvis det vides, ved at sammenholde med målt nedbør fra nærmeste SVK regnmåler, at der ikke falder nedbør under en tømningshændelse, må al ændring i vandstand nødvendigvis skyldes, at der på den ene eller anden måde løber vand ud af bassinet. Er der kendskab til udsivningen gennem siderne og bunden, eller antages denne som værende lig nul, må udløbsvandføringen, der bestemmes, svare til udløbsvandføringen gennem vandbremsen. På figur 3.15 fremgår det målte vandstandsdata i Frejlev Skolevej Bassin for året 2022 plottet sammen med alt målt nedbør fra Spildevandskomiteens vippekarsmåler 5057 Frejlev Nord i samme periode (se placering på figur 3.7). Udklipset illustrerer et eksempel for hvordan hændelserne i 2022 er udvalgt, således at der er tørvejr under tømningen. 5057 måleren er valgt frem for 5058 Frejlev Syd idet den er placeret tættest på oplandets massemidtpunkt.



Figur 3.15. Hændelsesudvælgelse til 3. metode for bestemmelse af Q-h relation. Figuren illustrerer de udvalgte hændelser i år 2022.

Der udvælges i alt 12 hændelser over årene 2022 til og med 2024, hvor der, jævnfør SVK måleren i Frejlev, har været tørvejr under tømningen af bassinet. Det er prioriteret at vælge hændelser, hvor vandstanden i bassinet har været så højt som muligt - gerne over kote 4,6. Der tillægges 30 minutter fra endt nedbørshændelse for at sikre, at afstrømning fra oplandet er stoppet, og der regnes udløbsvandføringer på baggrund af massebevarelsen, hvor det nu er sikkert at $Q_{ind} = 0$ i kraft af, at der ikke falder nedbør i løbet af hændelserne. Af figur

3.16 fremgår den estimerede Q-h kurve baseret på denne metode, som igen dannes af 99-percentilen af det inkluderede data. Det er tydeligt, at 10 af de udvalgte hændelser danner en front, som brydes af de to resterende hændelser. De to hændelser er fra juli og august 2023 hvor der jævnfør figur 3.10 i juni var en længerevarende tørkeperiode, som forårsagede bassinvandstand under kote 4,2. En forklaring kan dermed være, at den større ændring i volumen, relativt til de resterende 10 hændelser, skyldes ekstraordinær udsivning til den tørre jord omkring bassinet eller fordampning fra overfladen og dermed ikke udelukkende er et udtryk for udløbsvandføringen gennem vandbremsen. Dette understøttes ligeledes af, at andre juli og august hændelser er inkluderet i de 12 udvalgte hændelser, hvor disse ikke skiller sig ud, hvorfor Q-h relationen estimeres på baggrund af de 10 hændelser, som følges ad.



Figur 3.16. Estimeret Q-h relation på baggrund af selektivt udvalgte hændelser med tørvejr under tømning.

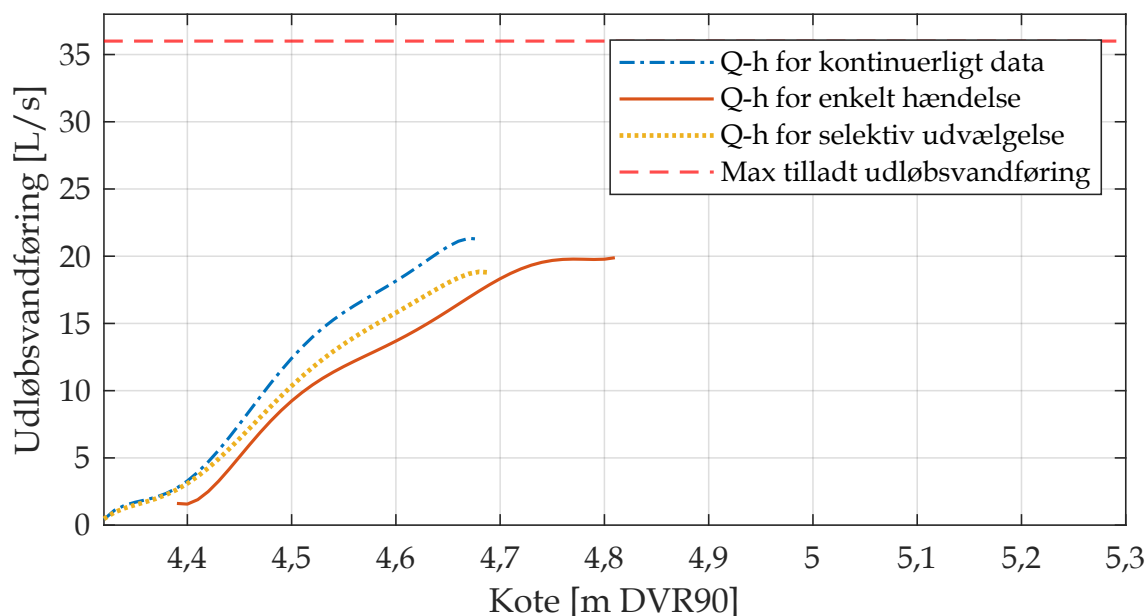
Metoden med selektiv udvælgelse af en række tørvejrshændelser giver dermed et tredje bud på en Q-h relation for bassinets vandbremse.

Diskussion af metoder til Q-h 4

I det følgende undersøges det, hvorvidt de forskellige metoder producerer lignende hydrauliske karakteristikker af vandbremsen i Frejlev Skolevej Bassin, og hvilke faktorer der kan forårsage eventuelle afvigelser.

4.1 Sammenligning af estimerede Q-h relationer

I figur 4.1 er Q-h kurverne, estimeret ved de tre metoder, plottet i samme diagram. Her er det tydeligt, at de har nogenlunde samme forløb og tendens men ikke er fuldstændig ens. Kurven estimeret på baggrund af metode 2 med den enkelte hændelse er, på trods af den meget mindre datasky, i stand til at beskrive udløbsvandføringen ved højere vandstand i bassinet end kurven fra metode 1 bestemt via godt 3 års kontinuerligt data. Dog estimerer Q-h kurven for metode 2 også en mindre udløbsvandføring til samme vandstand end metode 1 med kontinuerligt data over 3 år. Ved eksempelvis kote 4,5 estimeres en forskel i udløbsvandføring mellem de to metoder på omkring 3,5 L/s, hvilket udgør cirka 10% af den maksimale tilladte udløbsvandføring på 36 L/s.

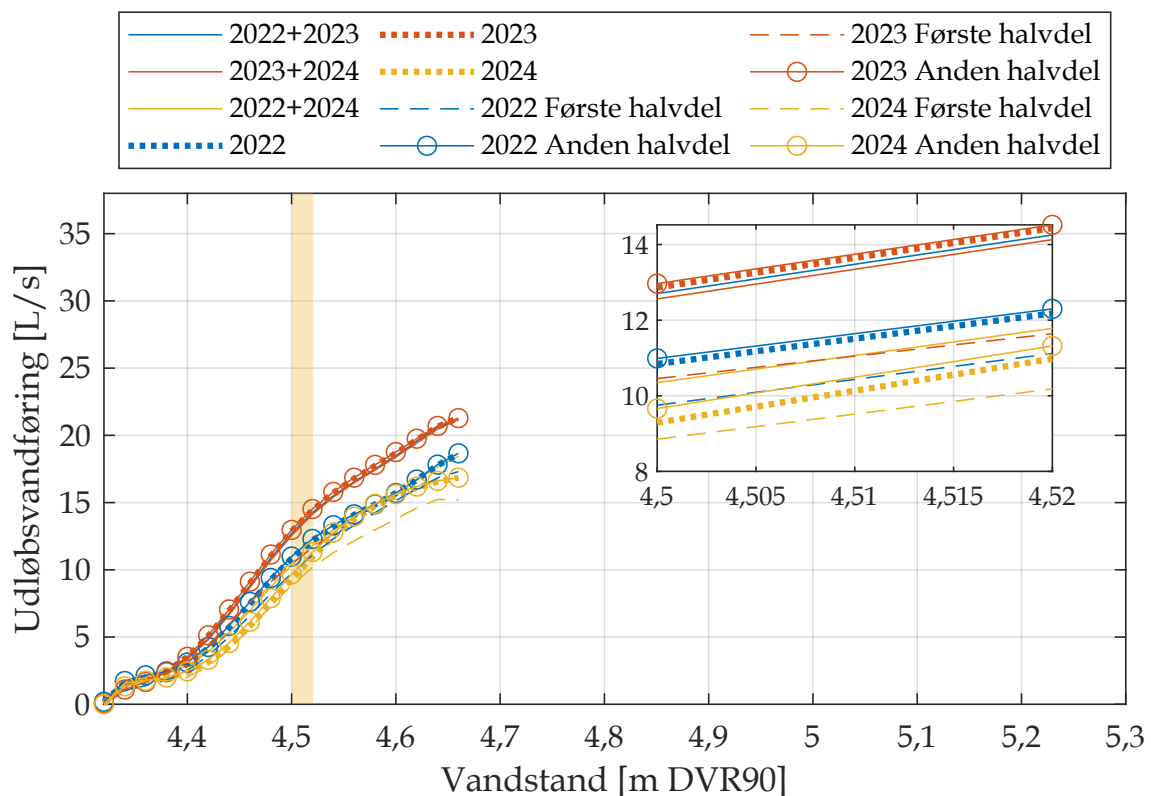


Figur 4.1. Grafisk sammenligning af estimeret Q-h kurve opnået ved de tre forskellige metoder.

Den 3. metode, udvælgelse af tørvejrshændelser, producerer en Q-h relation som ligger cirka i midten af spændet mellem de to andre kurver. Metoden, hvor 10 tørvejrshændelser benyttes, estimerer altså også en større udløbsvandføring til samme vandstand end metode 2 med den enkelte hændelse, uden dog at estimere lige så stor forskel, som metode 1 med kontinuerligt målt vandstand. Ideen bag metode 1 er, at 99-percentilen nødvendigvis må repræsentere situationer, hvor der kun strømmer vand ud af bassinet og ikke vand

ind i bassinet. Er dette en korrekt forståelse, burde den estimerede Q-h relation stemme overens med metoden, hvor det netop specifikt er tørvejrshændelser, der er udvalgt. Dette er dog ikke tilfældet, hvorfor det er relevant at prøve at beskrive hvilke andre faktorer, der eventuelt kan have indflydelse på vandstanden og målinger af denne i et forsinkelsesbassin.

For at undersøge metode 1 nærmere, kan sammenligningen yderligere udvides til at inkludere Q-h kurver produceret på varierende mængder af data i et forsøg på at afgøre, om analysen og arbejdet nødvendigvis skal udføres med 3 års vandstandsdata, eller om eksempelvis 1 år eller 6 måneder er tilstrækkeligt og bidrager med de samme resultater. Figur 4.2 illustrerer Q-h kurver beregnet ud fra en 99-percentil til forskellige dataperioder. Det er tydeligt, at alle 12 kombinationer giver lignende forløb for Q-h relationerne, og at de overordnet set ligner hinanden.



Figur 4.2. Q-h kurver estimeret på baggrund af forskellige datamængder varierende fra 6 måneder til 2 år.

Det ses dog, at kurverne indeholdende data fra andet halvår af 2023 generelt ligger højest og danner en separat front, som adskilles fra de resterende, hvorfor der må findes én eller flere hændelser i andet halvår af 2023, som dermed bliver styrende for den endelige Q-h relation, hvis metode 1 med kontinuert data fra Frejlev Skolevej Bassin anvendes. Dette forklarer også den beskrevne afvigelse i estimeret Q-h relation, som ses på figur 4.1 mellem metode 1 og 3. Den omtalte 2023 hændelse er selvfølgelig inkluderet i metode 1 med det kontinuertlige data, men er ikke udvalgt som en tørvejrshændelse til metode 3, hvorfor hændelsen ikke bliver styrende for den endelige metode 3 Q-h relation.

Umiddelbart kan det ikke entydigt afgøres, hvor meget data, der er ”nok” data. Det ses tydeligt af figur 4.2, at den samme Q-h relation kan opnås ved anvendelse af et halvt, et helt eller to års data, så længe at der i dataserien indeholdes den eller de styrende hændelser, som bliver afgørende for det endelige resultat.

4.2 Ydre faktorer med indflydelse

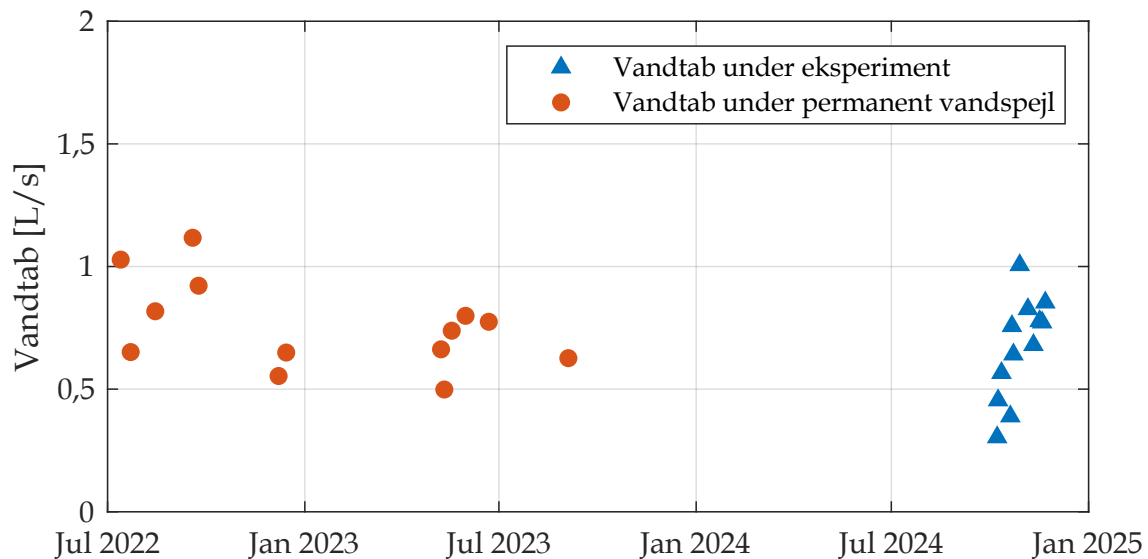
Idet det er vurderet, at der i visse situationer potentielt over- eller underestimeres udløbsvandføring, er det interessant at undersøge faktorer, som eventuelt kan have indflydelse på den målte vandstand i et regnvandsbassin, herunder eksempelvis udsivning og fordampning.

4.2.1 Udsivning

Eksfiltration eller udsivning fra et regnvandsbassin kan forekomme i tilfælde af, at der ikke er anlagt en bentonitmembran i bassinets bund og sider. Her kan forekomme en vekselvirkning mellem regnvandsbassinet og jordmatricen. Under forsøget, hvor regnvandsbassinets vandbremse er afproppet, ses det, at vandspejlet i perioder er faldende efter en nedbørshændelse, jævnfør figur 3.12 på side 20, på trods af at vandbremsen er lukket. Forsøget er foretaget i oktober og november, hvor der jævnfør DMI’s Klimaatlas i efteråret (sep-okt-nov) er en gennemsnitlig potentiel fordampning på omkring 0,9 mm/døgn beregnet med Makkinks metode svarende til omkring 0,10 L/s potentiel fordampning fra overfladen af Frejlev Skolevej Bassin ved det permanente vandspejl [DMI, 2025a]. Herved kan det faldende vandspejl både skyldes fordampning og udsivning gennem bassinets bund og sider.

Ydermere er det observeret i data fra 2022 og 2023, at vandstanden i visse perioder fortsætter med at falde, på trods af, at denne står under det permanente vandspejl. Disse perioder kan ligeledes undersøges for udsivning og eventuel fordampning.

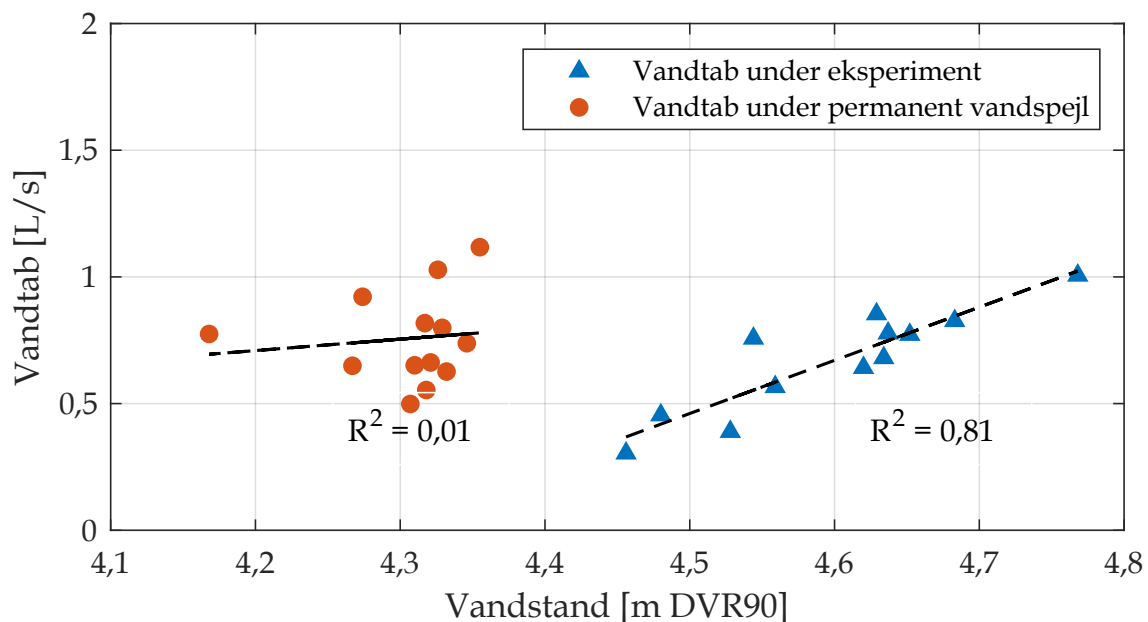
På figur 4.3 fremgår observeret vandføring ud af regnvandsbassinet, som ikke løber gennem vandbremsen. Beregningen er foretaget ved at udpege start- og sluttidspunkt samt dertilhørende kote for en periode, hvor vandet ikke forlader bassinet gennem vandbremsen, idet vandspejlet står lavere end denne eller fordi bremsen er lukket. Herefter er der beregnet en volumenændring mellem de to tidspunkter, hvormed: $Q_{vandtab} = A \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t}$. De blå trekanter er data fra forsøget, mens de orange cirkler er andre tidspunkter med identificeret vandtab.



Figur 4.3. Udsivning og fordampning af vand fra Frejlev Skolevej i hele tidsperioden med tilgængeligt data. Cirkler indikerer tidspunkter, hvor vandspejlet er under det permanente vandspejl, mens trekkanter er under eksperimentet i perioden 07/10/2024 til 26/11/2024.

Det fremgår af figur 4.3, at de fleste datapunkter angiver et vandtab i intervallet 0,5-1 L/s med en middelværdi på 0,75 L/s. De punkter, som fremkommer af tidspunkter med vandstand under det permanente vandspejl, findes typisk i sommermånederne, hvorfor yderligere fordampning ikke kan udelukkes. Dog ses to datapunkter i december 2022, hvor det vurderes, at den potentielle fordampning er meget lav. I disse tilfælde i december må det faldende vandspejl derfor primært kunne tilskrives udsivning.

I forsøget på at finde en eventuel sammenhæng, der kan beskrive størrelsen af vandtab fra bassinet, er tabet sammenholdt med vandspejlet i bassinet. Denne sammenligning fremgår af figur 4.4.



Figur 4.4. Plot mellem vandstand i regnvandsbassinet og tab af vand.

Ud fra figur 4.4 ses det, at en lineær sammenhæng mellem kote og vandtab, mens vandbremsen er blokeret, er mulig at identificere med en forklaringsgrad på 0,81. Det er dog også tydeligt, at de orange punkter ikke kan tilskrives samme sammenhæng.

Det er derfor muligt, på baggrund af forsøget med blokering af vandbremsen, forsigtigt, at kvantificere udsivningen i efterårsmåneder i Frejlev med tanke på, at vandtabet plottet i figur 4.4 også kan dække over eventuel fordampning. Det ses, at jo højere vandstand i bassinet, desto større udsivning.

4.2.2 Fordampning og grundvandsstand

Som beskrevet illustrerer figur 4.4, at i tilfældene hvor vandspejlet kommer under det permanente vandspejl, kan der ikke identificeres en fuldstændig sammenhæng mellem vandstand i regnvandsbassinet og udsivning. Disse datapunkter er derfor påvirket af flere faktorer, som er komplicerede at identificere.

Til at forsøge at identificere faktoren fordampning beregnes potentiel fordampning ved hjælp af Makkinks formel. Denne er præsenteret i *"Sammenligning af metoder til bestemmelse af potentiel vandfordampning"* af Statens Planteavlsvforsøg [Mikkelsen og Olesen, 1991, s. 13] [Allen et al., 1998]. Her beregnes en referencefordampning, som efterfølgende omregnes til potentiel fordampning fra en fri vandoverflade ved hjælp af en årstidsafhængig faktor [Aslyng og Hansen, Ny]. Der er hentet timeopløst temperatur fra DMIs vejrarkiv samt solindstråling fra DMIs målestation i Tylstrup (StationsID: 06031) [DMI, 2025b].

Beregningerne angiver en største aktuelle fordampning på i alt 4 mm over 2,5 dage, svarende til 0,12 L/s over perioden, for tre udvalgte hændelser i juni - august 2022. Jævnfør DMIs Klimaatlas er den gennemsnitlige potentielle fordampning om sommeren cirka 3,3 mm/døgn. Et tab på 0,12 L/s er en minimal andel af den samlede mængde vand, som forsvinder udenom vandbremsen, hvilket dermed antyder at udsivningen gennem bassinets bund og sider vægter mere i det samlede vandtab, end fordampning gør. Stor udsivning i sommermåneder kan muligvis tilskrives et lavere grundvandsspejl. Grundvandsspejlet har potentiale til at spille en betydelig rolle hvad angår retningen og størrelsen på udvekslingen af vand mellem regnvandsbassinet og den omkringliggende jord. Et lavere grundvandsspejl kan forårsage eksfiltration fra bassinet til jorden. Står grundvandsspejlet derimod højt, er der mulighed for, at der sker infiltration fra den mættede jord til bassinet, hvorfor vandstanden i bassinet dermed også kan styres af grundvandsspejlet.

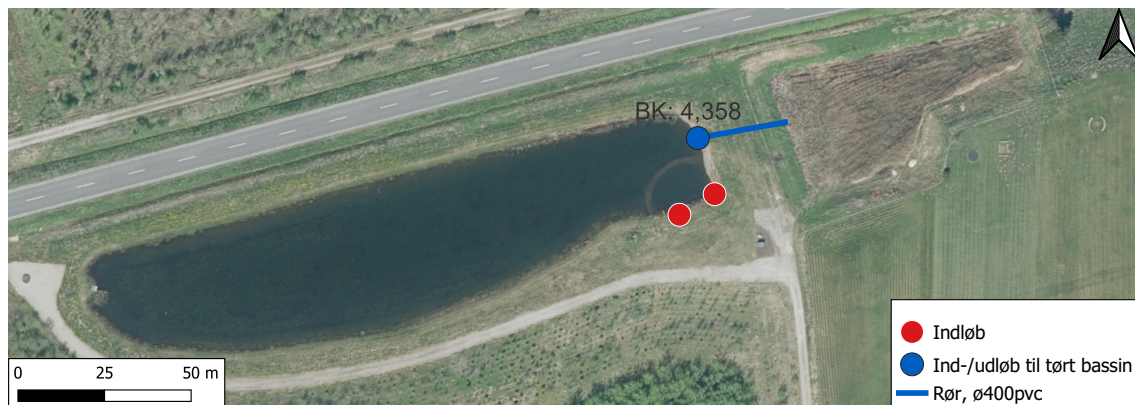
4.2.3 Måleusikkerheder og databehandling

Jævnfør afsnit 3.3 på side 16, producerer tryktransduceren og Dryps radar støj i størrelsesordenen 1 mm. Herudover vides det også, at Dryps radar kan afvige med op til ± 10 mm. Disse faktorer kan herved gøre, at eksempelvis metode 1, hvor der anvendes en 99-percentil vil resultere i en overestimering af Q-h relationen.

Det binomiale filter kan derimod, med midlingen over flere værdier, påvirke, at de største "peaks" i målte vandstande mindskes, hvorfor mindre udløbsvandføringer beregnes. Dette er dog i begrænset omfang.

4.2.4 Drænrør til tidligere bassin

Frejlev Skolevej Bassin er forbundet til et tørt regnvandsbassin, som fremgår af figur 4.5. Det tørre regnvandsbassin var formentlig det tidligere anvendte regnvandsbassin til det bidragende opland i Frejlev, og det er således ikke fjernet i dag. Frejlev Skolevej Bassin og det tørre bassin er forbundet af en $\varnothing 400$ pvc-ledning, som ud fra tekniske tegninger har bundkote i 4,31 i Frejlev Skolevej Bassin enden, mens røret i den anden ende, i det tørre bassin, har bundkote 4,32. Opmålingerne fremgår af det vedlagte bilag: *110A_Situationsplan Frejlev Skolevej_SU Bund og kronekant opmålt af landinspektør.pdf*.



Figur 4.5. Oversigt over tørt bassins forbindelse til Frejlev Skolevej Bassin.

For at undersøge denne kote, er der den 23/04/2025 foretaget en egenopmåling af bundkoten ind til Frejlev Skolevej Bassin. Her er denne opmålt til kote 4,358. Det var ikke muligt at måle ind-/udløbet til det tørre bassin. Opmåling af koten viser, at ved 4 cm over det permanente vandspejl, vil vand begynde at strømme til det tørre bassin. Jævnfør figur 4.6 ses det også, at ledningen er delvist vandfyldt med et vandspejl på få centimeters dybde. Strømmer vand til det tørre regnvandsbassin og ikke tilbage til Frejlev Skolevej Bassin, vil Q-h relationen overestimere vandføring gennem vandbremsen grundet dette rør. Det er dog uvist, om vand ligeledes kan strømme fra det tørre bassin til Frejlev Skolevej Bassin, det er dog sandsynligt grundet lav hældning på røret.



Figur 4.6. GPS opmåling af rør mellem Frejlev Skolevej Bassin og tørt bassin. Billeder taget 23/04/2025.

4.2.5 Bølger og vindstuvning

Vinden varierer betydeligt i tid og sted, hvorfor de afledte effekter heraf også gør. Effekterne er resultatet af en forskydningskraft på vandoverfladen, som bestemmes af vindhastigheden, luftens densitet og vandoverfladens ruhed, hvor større eller mindre bølger også dannes i relation til vindens hastighed. Ved større vindhastighed dannes større bølger og overfladens ruhed øges, hvorfor forskydningskraften også øges.

Forskydningskraften på overfladen skaber en langsom turbulent strøm, som overfører kraften på vandoverfladen ned gennem vandmassen. Resultatet bliver en horisontal trykgradient i balance med forskydningskraften, hvorfor vandspejlet stuver, og det fænomen, som kaldes vindstuvning, finder sted. Jævnfør Larsen [2021] kan denne forskydningskraft og den resulterende vindstuvning beregnes via to simple udtryk.[Larsen, 2021] DMI måler i dag vindens hastighed med instrumenter placeret i en 10 meter høj mast, hvorfor værdier fra DMI's vejrarkiv kan benyttes til at estimere en vindstuvning sammen med standardværdier for tyngdekraft og densitet. For eksempel er der i Aalborg i marts 2024 målt en middelvind på 5,2 m/s, en højeste 10 min. middel på 18,7 m/s og et højeste vindstød på 25,3 m/s. Dette korresponderer cirka til en vindstuvning på henholdsvis 0,5 mm, 20 mm og 55 mm i Frejlev Skolevej Bassin.

Som det dog fremgår af figur 3.7 på side 16 er AAU's sensor til måling af vandstand placeret nogenlunde midt i bassinet, hvorfor eventuel vindstuvning til den ene eller anden side ikke bør have betydelig indflydelse på målingerne af vandstand. Som det dog også er beskrevet, er vinden med til at skabe bølger på vandoverfladen, hvilket godt kan forstyrre sensoren og skabe støj eller unøjagtige målinger, hvis enten bølgetop eller bølgedal netop passerer sensoren, idet målingen foretages. Dette kan, på samme måde som eksempelvis transducerens måleusikkerheder, introducere vandstandsmålinger, som bidrager til for store beregnede vandstandsændringer og dermed resulterer i en overestimering af Q-h relationen.

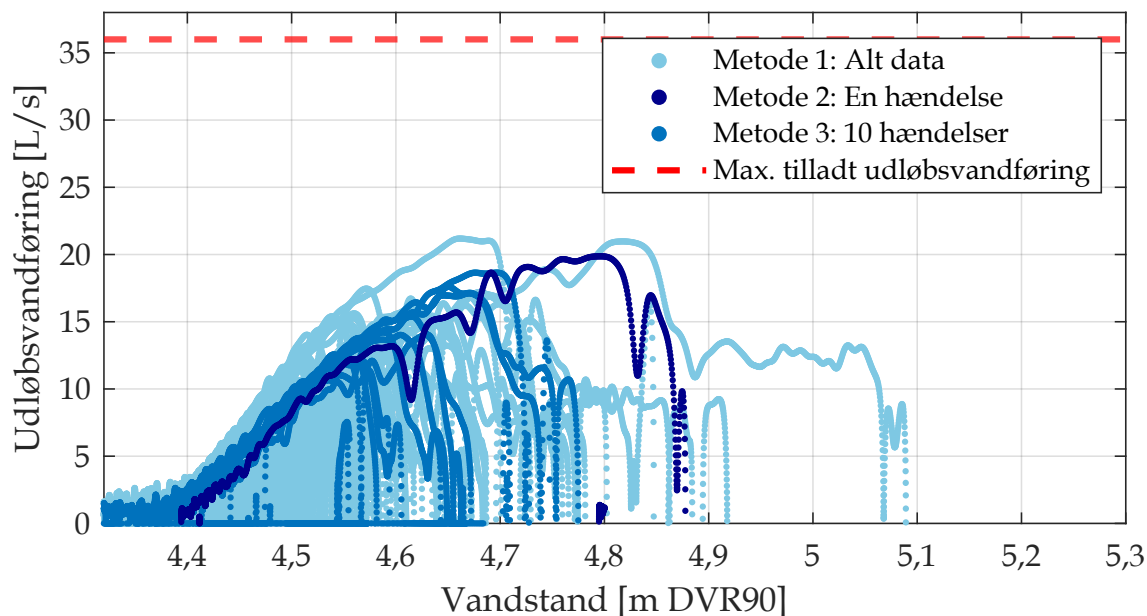
4.3 Endelig Q-h relation for Frejlev Skolevej Bassin

Figur 4.7 illustrerer, hvordan den enkelte tømningshændelse, metode 2, og de 10 udvalgte tørvejrstømninger, metode 3, ser ud relativt til alle hændelserne inkluderet i metode 1, hvor en længere dataserie er analyseret. Det er tydeligt, at de 10 hændelser fra metode 3 følger en front under de største datapunkter i metode 1. Det tyder derfor på, at flere af hændelserne i metode 1 ikke kun er præget af vand, som forlader regnvandsbassinet gennem vandbremsen, men overestimeres grundet ydre faktorer. Med stor sandsynlighed er der flere af ovenstående faktorer, som virker samtidigt, hvorfor det ikke kan præciseres yderligere. Det vurderes dog, at Q-h relationen i metode 1 med stor sandsynlighed overestimerer udløbsvandføringen gennem vandbremsen.

Betragtes derimod den enkelte hændelse, metode 2, ligger den under både metode 1 og 3. Op til denne hændelse har vandbremsen været blokeret i 50 dage i oktober og november 2024, hvor større mængder udsivning er detekteret til jorden omkring bassinet. For metode 2 kan det derfor tyde på, at jorden er vandmættet omkring bassinet, da blokeringen af vandbremsen fjernes. Denne hændelse er derfor højst sandsynlig ikke påvirket af udsivning eller fordampning grundet årstiden. Forsøget tog seks dage om at tømme bassinet, indtil en regnhændelse gjorde, at det ikke var muligt at bestemme Q-h relationen for metode 2

fra kote 4,4 til permanent vandspejl i kote 4,32.

Metode 3, som er bestemt af tørvejrhændelser, inkluderer tømningshændelser fra flere årstider, det forekommer dog oftest, at der er længere tørvejrperioder efter en regnhændelse i sommermånederne. Disse hændelser må være påvirket af enten udsivning eller fordampning eller en kombination af begge, siden de ligger højere end metode 2.

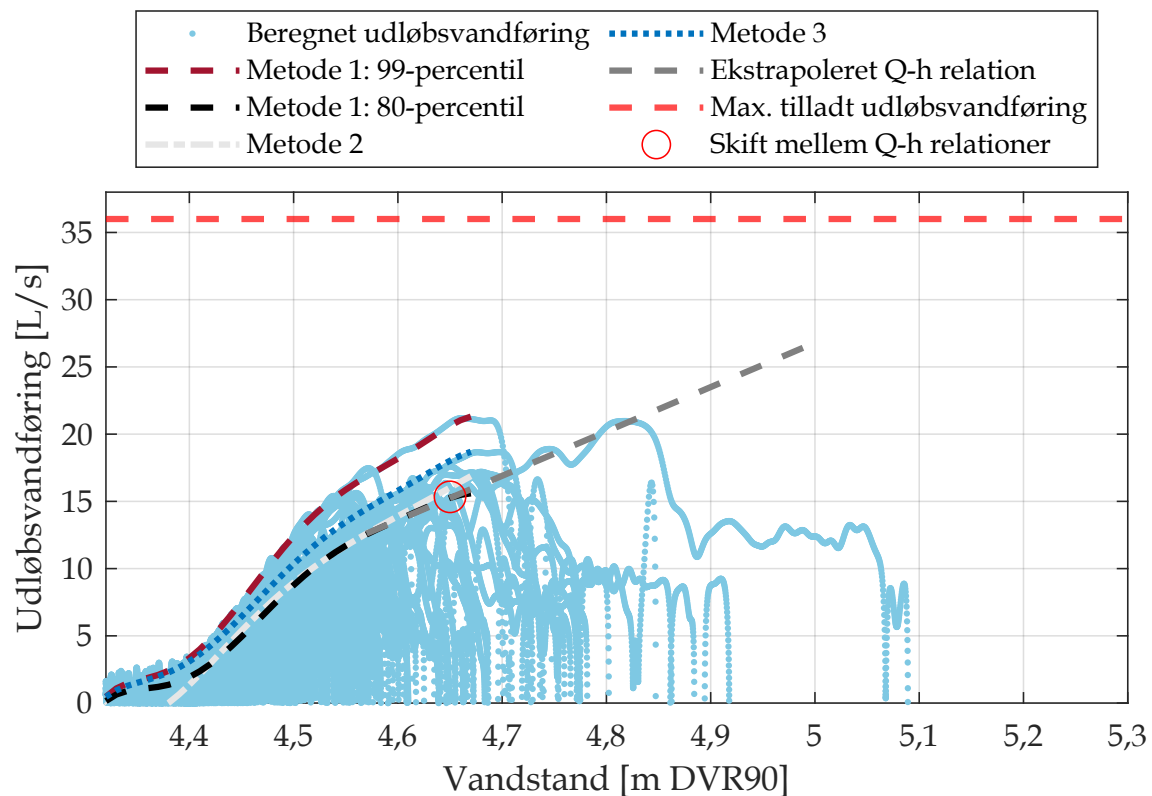


Figur 4.7. Beregnet udløbsvandføring for metode 1, metode 2 og metode 3 plottet sammen.

Med forbehold for alle de ovennævnte faktorer bestemmes en endelig Q-h relation for Frejlev Skolevej Bassin, som afgøres af 80-percentilen af alle de målte data i perioden. Dette er altså en ændring af metode 1. 80-percentilen er udvalgt, idet der er observeret flere ydre faktorer, som påvirker beregningen.

Som det fremgår af figur 4.8 har den fittede kurve begrænset virkning ved vandstande over kote 4,65. For at kunne anvende relationen i det fremtidige modelarbejde, ekstrapoleres kurven. Der tages udgangspunkt i Q-h relationens hældning i spændet fra kote 4,55 til kote 4,65, hvormed der ekstrapoleres lineært, sådan at det er muligt at beskrive udløbsvandføringen ved vandstande op til overløbskanten i kote 5.

Denne endelige Q-h relation har stor korrelation med metode 2, den enkelte hændelse. Metode 2 er dog fravalgt, da den ikke beskriver udløb ved de laveste vandstande. Metode 2 vurderes også at kunne anvendes, omend det kræver yderligere data til at bestemme Q-h relationen fra kote 4,32 til 4,4.



Figur 4.8. De fire metoder præsenteret samlet. Den anvendte Q-h relation fremover er Metode 1: 80 percentil. Ekstrapolering er på baggrund af hældningen fra kote 4,57 til 4,66.

Metode 1 er baseret på databehandling og herefter en empirisk analyse og forståelse af ydre faktorer. Denne Q-h relation er derfor det mest kvalificerede bud på en Q-h relation for Frejlev Skolevej Bassin. Dette betyder ligeledes også, at det er sandsynligt, at den gældende udledningstilladelse ikke er fuldt udnyttet. Jævnfør tabel 3.2 på side 17 er den maksimalt tilladte udløbsvandføring 36 L/s. Med det tilgængelige data over tre år er dette aldrig blevet udnyttet, og der udledes maksimalt 20 L/s under den enkelte hændelse beskrevet i metode 2. Det ses også på hældningen af Q-h relationen, at den er stagnerende efter kote 4,55, hvorfor det forventes, at 36 L/s aldrig opnås.

I analysen af de resterende regnvandsbassiner vil der anvendes metode 1 til at estimere en Q-h relation. Det skal pointeres, at det ikke forventes, at metode 1 altid skal beregnes af 80-percentilen. Metode 1 skal anvende alt tilgængeligt data og der skal undersøges tekniske tegninger og data hvorfra en percentil udvælges. Metode 1 kan derfor inkludere en iterativ proces, når modelleringen af vandstand valideres.

Det konkluderes også, at metode 2 kan anvendes til at bestemme en Q-h relation for en vandbremse. Er der flere års data tilgængeligt, ligesom i Frejlev Skolevej Bassin, er det ikke nødvendigt at skulle lave forsøget. Er store datamængder ikke tilgængeligt, kan denne metode derimod godt anvendes som alternativ. Det kan dog kræve længere tid, i dette eksempel to måneder, med kontrol af forsøgsopstilling jævnligt. Det kræver også, at der efter den regnhændelse, som fylder regnvandsbassinet, er en lang tørvejrperiode. I Frejlev Skolevej Bassin tømmes bassinet over næsten seks dage og var fortsat ikke tørt inden en ny regnhændelse startede. Udvalges regnvandsbassiner til at udføre metode 2 på, anbefales det at gøres på regnvandsbassiner med en tæt bund eller membran.

Modellering af vandstand 5

I det følgende forsøges vandstanden i Frejlev Skolevej Bassin modelleret via tre forskellige tilgange med stigende grad af kompleksitet, som præsenteret i afsnit 2.2. Det er hensigten at udarbejde en model, der, så simpelt som muligt, kan besvare eksempelvis Aalborg Forsynings spørgsmål angående hydraulisk funktion eller overfyldningshyppighed så nøjagtigt som muligt, hvorfor tre tilgange efterprøves. Indledningsvist præsenteres den generelle metode til at kunne modellere vandstande, hvorefter de tre forskellige tilgange til afstrømningsmodeller præsenteres og anvendes. Slutteligt præsenteres resultater.

5.1 Metode til modellering af vandstand

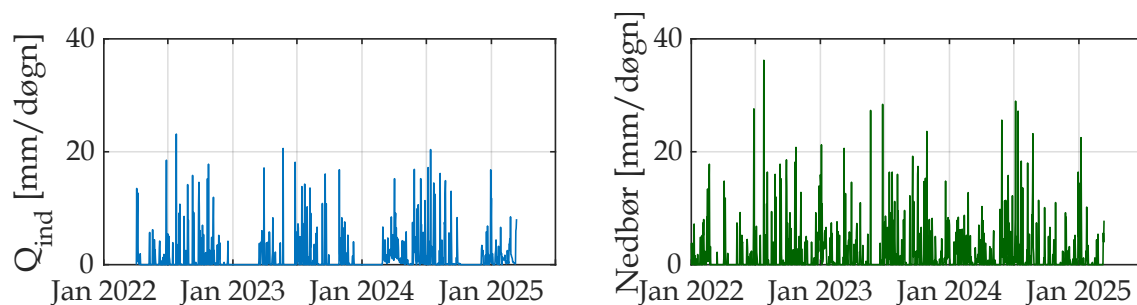
I det følgende arbejde anvendes Q-h relationen bestemt ved den modificerede metode 1 fra afsnit 4.3 sammen med al nedbørsdata fra SVK regnmålerne 5057 Frejlev Nord, hvis placering kan ses på figur 3.7 på side 16. Som præsenteret i tabel 3.2 har Frejlev Skolevej Bassin et bidragende opland på 36,8 ha, som med en befæstelsesgrad på 0,4 jævnfør [Aalborg Kommune, 2021] svarer til et befæstet areal på 14,7 ha.

5.1.1 Hydrologisk reduktionsfaktor

For at kunne opstille en model kræves det, at den oplandsspecifikke parameter; hydrologisk reduktionsfaktor, bestemmes. Den hydrologiske reduktionsfaktor (ϕ) beskriver hvor stor en del af nedbøren, der falder på impermeable overflader, som bidrager til afstrømning fra oplandet og bestemmes ofte som hældningen på en kurve med nedbør på førsteaksen og afstrømning på andenaksen. SVK regnmåleren 5057 Frejlev Nord bidrager med nedbørsserien, mens afstrømningen til Frejlev Skolevej Bassin (Q_{ind}) beregnes ved hjælp af massebalancen, hvor målt vandstand og den nu bestemte Q-h relation for udløbsvandføringen (Q_{ud}), afhængig af vandstanden, indgår. Se ligning (5.1).

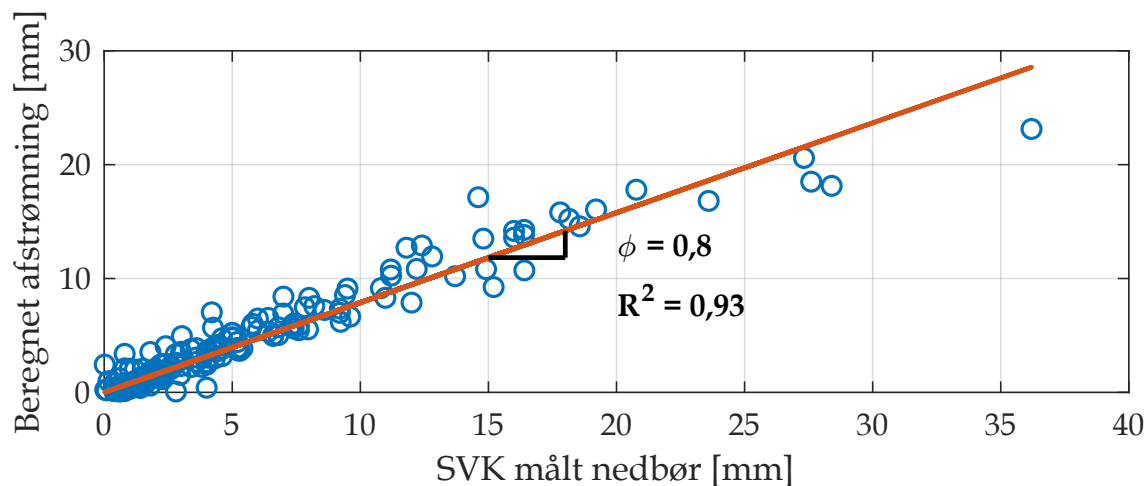
$$Q_{ind}(t) = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot A(h(t)) + Q_{ud}(h(t)) \quad (5.1)$$

Beregningen giver en tidsserie for indløbsvandføringer til Frejlev Skolevej Bassin, som styres af Q-h kurven. Denne serie ses til venstre på figur 5.1 mens nedbørsserien for perioden ses til højre.



Figur 5.1. Beregnet indløbsvandføring til Frejlev Skolevej Bassin på baggrund af vandstand og Q-h kurve samt nedbørsserie. Akkumulerings tid på 24 timer.

Den beregnede indløbsvandføring omregnes til afstrømning i enheden millimeter ved hjælp af det befæstede areal, og for både afstrømning og nedbørshændelser summeres der over 24 timer. De sammenhørende nedbørs- og afstrømningshændelser plottes mod hinanden i figur 5.2. Den hydrologiske reduktionsfaktor for det bidragende opland til Frejlev Skolevej Bassin bestemmes dermed til $\phi = 0,8$.



Figur 5.2. Bestemmelse af hydrologisk reduktionsfaktor for oplandet til Frejlev Skolevej Bassin.

5.1.2 Afstrømning

Modellen skal drives af nedbør, hvorfor indløbsvandføringen bestemmes afhængigt af denne. Det er netop afstrømningen til bassinet der i de tre modeller bestemmes forskelligt, hvorfor dette uddybes nærmere i de relevante afsnit.

5.1.3 Modellering med 2022-2025 data

På baggrund af den opstillede Q-h relation for udløbsvandføringen, den estimerede hydrologiske reduktionsfaktor, sammenhængen mellem vandstand og overfladeareal samt indløbsvandføringen, styret af nedbør, er det muligt at opstille den endelige massebalance, som skal modellere vandstanden i Frejlev Skolevej Bassin.

$$h(t) = h(t - \Delta t) + (Q_{ind}(I(t)) - Q_{ud}(h(t - \Delta t))) \cdot \frac{1}{A(h(t - \Delta t))} \cdot \Delta t \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Hvis } h(t) < 4,32 & \quad Q_{ud} [m^3/s] = 0,00075 \\ \text{Hvis } 4,32 < h(t) < 4,65 & \quad Q_{ud} [m^3/s] = p(h(t - \Delta t)) \\ \text{Hvis } 4,65 < h(t) < 5,00 & \quad Q_{ud} [m^3/s] = 0,033 \cdot h(t - \Delta t) - 0,1382 \\ \text{Hvis } h(t) > 5,00 & \quad Q_{ud} [m^3/s] = 0,0268 \end{aligned}$$

Ligning (5.2) angiver, at udløbsvandføringen beskrives forskelligt alt efter vandstanden i bassinet. Ved vandstande under kote 4,32 er udløbsvandføringen tilskrevet en værdi, som antages værende repræsentativ for udsivning fra bassinet jævnfør afsnit 4.2.1. Til resten af spændet anvendes den stykvis Q-h relation præsenteret i afsnit 4.3 hvor $p(h)$ er det anvendte polynomium af 6.grad. Ved koter over overløbskanten anvendes en udløbsvandføring på 26,8 L/s. På baggrund af den opstillede massebalance kan den modellerede vandstand i perioden januar 2022 til marts 2025 nu plottes sammen med den målte vandstand.

5.1.4 Validering og statistisk evaluering

I forsøget på at kunne sammenligne modelværktøjer og afgøre om de præsterer tilfredsstillende beregnes enkelte statistiske deskriptorer for både 5 minutters og 15 minutters værdier. Disse er; Root Mean Square Error (RMSE), Nash Sutcliffe Efficiency (NSE) og Procent Bias (PBIAS) for de modellerede vandstande. Generelt siges det om NSE, at en acceptabel model præstation findes indenfor intervallet $-\infty < NSE < 1$ hvor en $NSE = 1$ er en perfekt model. PBIAS er et mål for, om modellen har tendens til at over- eller underestimere vandstande. En positiv PBIAS er ensbetydende med, at modellen generelt underestimerer vandstande. RMSE beskriver forskellen mellem den statistisk forventede værdi og den faktiske værdi. Jo tættere de modellerede værdier er på de målte værdier, jo mindre bliver RMSE.

Da ét fokus for arbejdet i nærværende speciale er at identificere eventuelle historiske eller fremtidige overløb fra bassinet, er det essentielt, at den opstillede model håndterer og modellerer høje vandstande så nøjagtigt som muligt. Den statistiske analyse har netop til formål at belyse, om dette er tilfældet. For dermed yderligere at undersøge om modellen statistisk set kan sammenlignes med det målte, udarbejdes histogrammer og fordelingsfunktioner for de målte og modellerede vandstande. Herved ses der bort fra om modellerede bassinfyldninger passer dynamisk med målte bassinfyldninger, men det undersøges i stedet, om der, over valideringsperioden, statistisk er modelleret samme frekvenser af de forskellige vandstande som målt.

5.2 Simpel bassinmodel

I dette afsnit redegøres for tilgangen som benævnes en simpel bassinmodel og som anses som værende den mest simple tilgang.

5.2.1 Afstrømning til Frejlev Skolevej Bassin

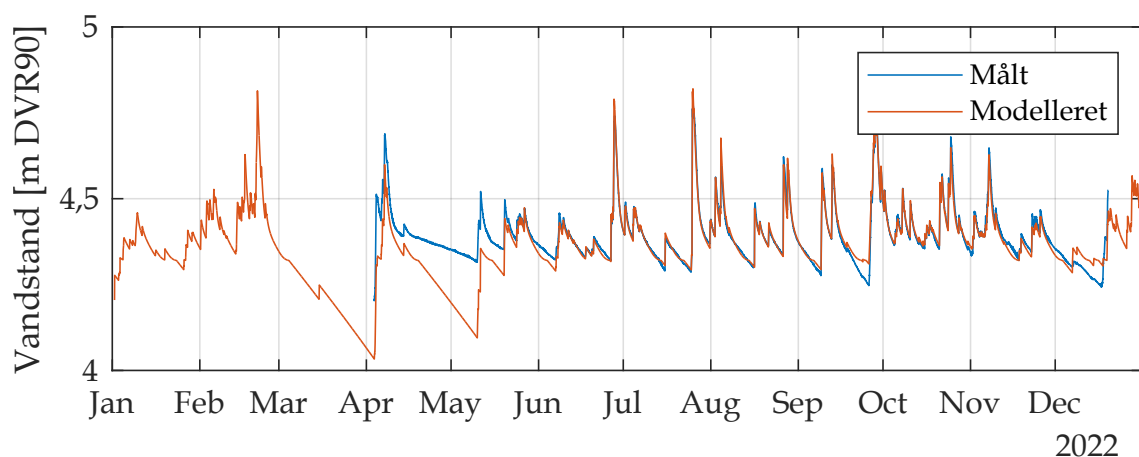
Til at beskrive afstrømning anvendes en simpel bassinmodel, hvor det antages, at nedbør, som falder i oplandet, falder direkte i bassinet, hvorfor indløbsvandføringen beregnes som i ligning (5.3) på baggrund af nedbørsintensiteten (I), det befæstede areal (F_{bef}) og den hydrologiske reduktionsfaktor (ϕ).

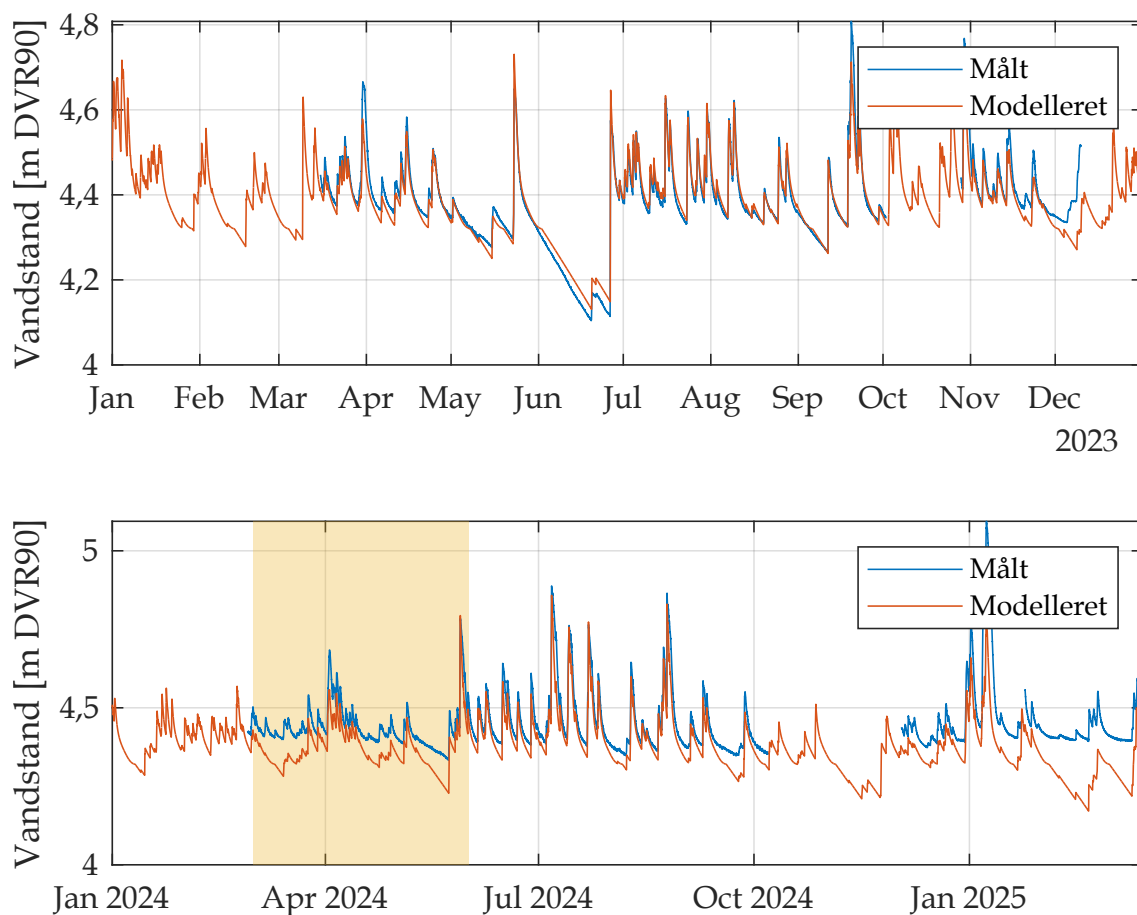
$$Q_{ind}(t) = I(t) \cdot F_{bef} \cdot \phi \quad (5.3)$$

5.2.2 Modellering og validering af simpel bassinmodel med 2022-2025 data

Den modellerede vandstand for perioden januar 2022 til marts 2025 plottes imod den målte vandstand i figur 5.3. Det fremgår, at det opstillede modelværktøj i mange tilfælde modellerer vandstand med tilfredsstillende nøjagtighed, men at der også er perioder, som modelværktøjet er knap så godt til at gengive. Umiddelbart modelleres toppe og høje vandstande godt mens lavere vandstande modelleres mindre godt. Til modelværktøjets tiltænkte formål relateret til overfyldningshyppighed, er de lave vandstande dog også mindre vigtige at modellere nøjagtigt, så længe "fejlen" ikke trækker markante spor med sig videre.

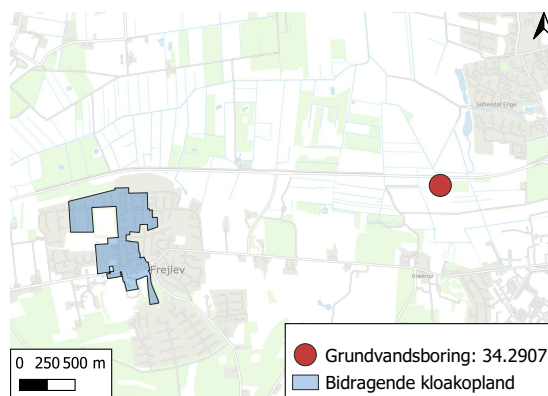
Det ses eksempelvis i april og maj 2022, at frem til juni 2022, trækkes "fejlen" videre, men efterfølgende bliver modellen repræsentativ.



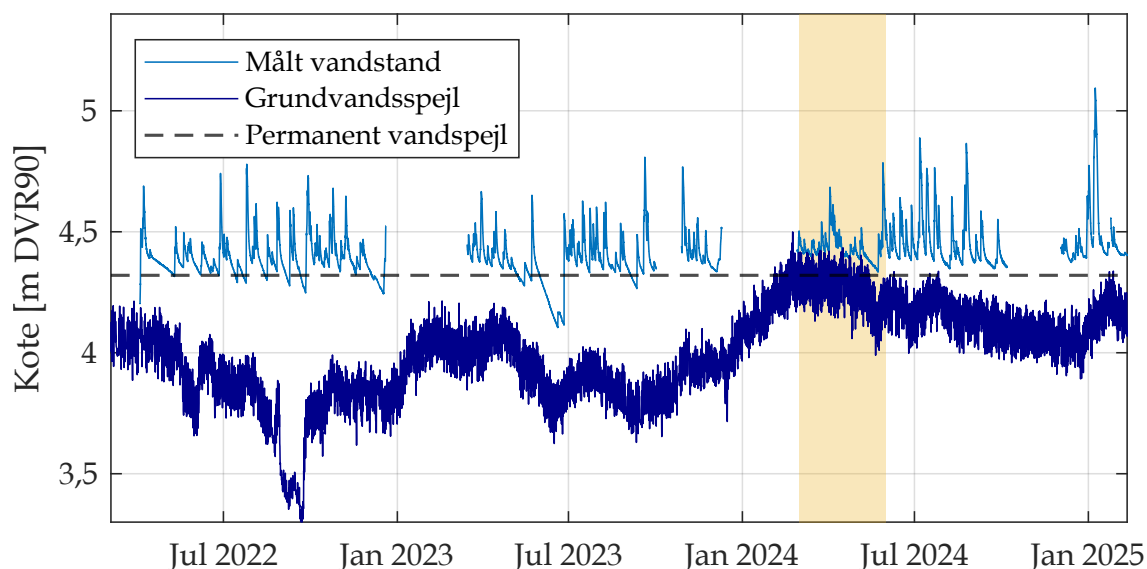


Figur 5.3. Modelleret og målt vandstand i Frejlev Skolevej Bassin i perioden januar 2022 til marts 2025

Som beskrevet ses perioder, hvor den målte vandstand ikke modelleres tilfredsstillende. Et eksempel er perioden fra primo marts 2024 til ultimo maj 2024, hvor den modelerede vandstand er betydeligt lavere end den målte, se år 2024 nederst på figur 5.3. I et forsøg på at afdække denne afvigelse, er grundvandsdata indhentet fra en monitoringsboring med DGU-nummer: 34.2907, se figur 5.4. Boringen er placeret 3 km fra Frejlev Skolevej Bassin i kote 3,4, mens det permanente vandspejl af bassinet er i kote 4,32 [Calypso, 2025]. Grundvandsstanden i boringen er i figur 5.5 plottet sammen med det målte vandspejl i Frejlev Skolevej Bassin. I førnævnte periode ses det tydeligt, at grundvandsstanden står betydeligt højere, end den eksempelvis gjorde i samme periode de forgående år. I modelværktøjet er grundvandsstanden ikke inkluderet som en variabel, hvorfor afledte effekter og eventuel infiltration fra det højtstående grundvand ikke modelleres. Dette kan forklare diskrepansen mellem den målte og modelerede vandstand i førnævnte periode.



Figur 5.4. Lokation af grundvandsboring: 34.2907.



Figur 5.5. Den målte vandstand og grundvandsspejl. Grundvandsdata er fra en monitoringsboring med DGU-nummer: 34. 2907.

Der ses ligeledes en relativt stor afvigelse omkring januar 2025 på figur 5.3. Jævnfør DMI's vejrkarkiv var der eksempelvis d. 06/01/2025 en maksimal snedybde i Aalborg på 13,5 cm. Afsmeltning af sne er, ligesom grundvandsstanden, ikke en parameter, som modelværktøjet kan tage højde for, hvorfor der i perioder efter snevejr måles vandstande i Frejlev Skolevej Bassin, som modelværktøjet ikke kan modellere nøjagtigt.

5.2.3 Statistisk evaluering og modeltilpasning

Idet det er identificeret, at der er store afvigelser i perioden 28/02/2024 til 28/05/2024 og 23/12/2024 til 25/02/2025 grundet henholdsvis unormalt højt grundvandsspejl og sneafsmeltning, er der lavet analyser, både hvor disse perioder er frasorteret, og hvor de ikke er. Modelværktøjet, som dette speciale ønsker at udvikle, er tiltænkt at skulle modellere vandstand i længere tidsperioder med begrænset data tilgængeligt for at kunne afgøre en overfyldningshyppighed. Skal der tages højde for sneafsmeltning og højt grundvand i modellen, kræves mange datakilder såsom grundvandspejlinger og temperatur. Desto flere datakilder der er nødvendige, jo mindre er sandsynligheden for at kunne modellere længere perioder.

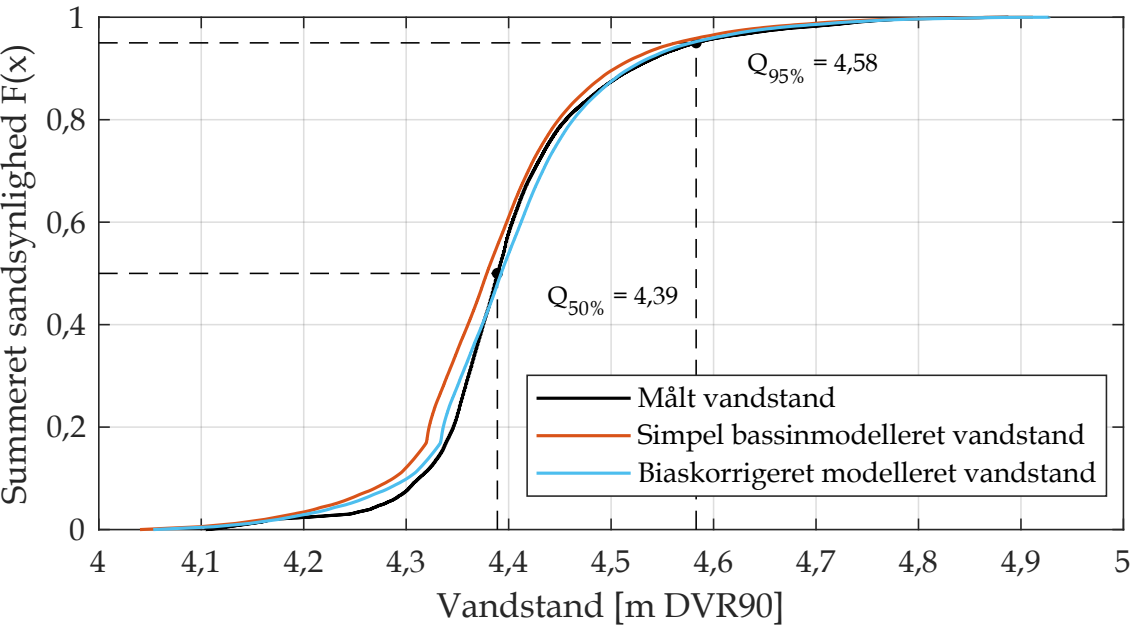
De beregnede statistiske deskriptorer fremgår af tabel 5.1. Det ses også, at der er forskel på den statistiske evaluering af modellen, hvis parametrene beregnes for al data eller for data hvor de førnævnte to hændelser er frasorteret men at der ikke beregnes forskel hvad angår 5- og 15- minutters værdier.

Tabel 5.1. Statistiske deskriptorer for modelleret vandstand i Frejlev Skolevej Bassin sammenholdt med målt vandstand. Sorteret data refererer til den samlede dataserie hvor perioderne 28/02/2024 til 28/05/2024 og 23/12/2024 til 25/02/2025 er frasorteret.

	Tid [min]	RMSE [cm]	NSE [-]	PBIAS [%]
Sorteret data	5	4,5	0,787	0,32
Al data	5	6,0	0,631	0,63
Sorteret data	15	4,5	0,787	0,32
Al data	15	6,0	0,631	0,63

Da dette værktøj skal anvendes til at bestemme en overfyldningshyppighed, er det vigtigt, at værktøjet er nøjagtigt ved højere vandstande. På baggrund af figur 5.3 med modelleret vandstand er det ikke muligt entydigt at afgøre, om der generelt over- eller underestimeres vandstande. Dette afgøres dog af de beregnede PBIAS, som peger på, at den simple bassinmodel underestimerer vandstande.

I figur 5.6 fremgår tre fordelingsfunktioner for henholdsvis den målte vandstand, den modellerede samt en biaskorrigeret modelleret vandstand. Her er vandstanden modelleret via den simple bassinmodel korrigeret for den beregnede PBIAS på 0,32% fra tabel 5.1 da PBIAS på 0,63% fra analysen inkluderende alt data ikke anses som værende repræsentativ for hele den modellerede periode.



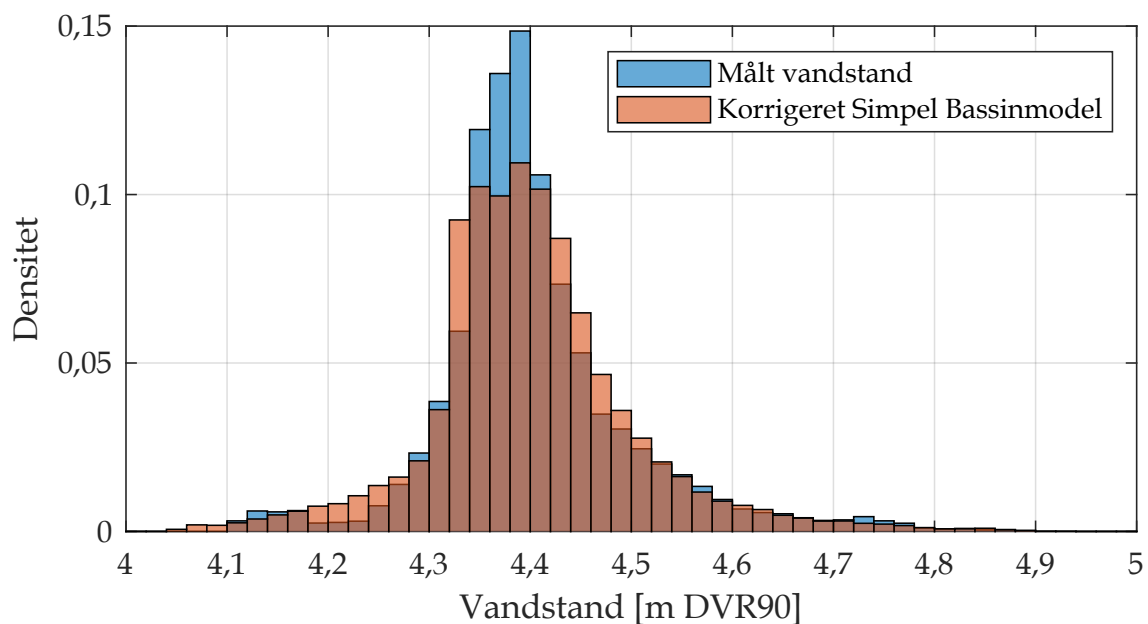
Figur 5.6. Empirisk fordelingsfunktion for henholdsvis målt vandstand, simpel bassinmodelleret vandstand og biaskorrigeret modelleret vandstand i Frejlev Skolevej Bassin. De to indtegnede percentiler forholder sig til fordelingsfunktionen tilhørende målt vandstand.

Det tilhørende kvartilsæt til hver fordelingsfunktion fremgår af tabel 5.2, hvor det er tydeligt, at den biaskorrigerede modellering af vandstand i Frejlev Skolevej Bassin stemmer godt overens med den målte idet to af percentilerne har samme værdi mens de øvrige to begge kun afviger med en enkelt centimeter.

Tabel 5.2. Kvartilsæt samt 95-percentil for målt vandstand, vandstand modelleret med Simpel Bassinmodel og biaskorrigeret modelleret vandstand.

Metode	Q _{25%}	Q _{50%}	Q _{75%}	Q _{95%}
Målt	4,35	4,39	4,44	4,58
Modelleret	4,33	4,38	4,43	4,56
Biaskorrigeret	4,34	4,39	4,45	4,58

Figur 5.7 illustrerer histogrammer eller densitetsplots over de målte og biaskorrigerede modellerede vandstande. Det fremgår, at de biaskorrigerede værdier afviger med op mod 5% hvad angår de hyppigste vandstande i spændet fra kote 4,32 til kote 4,4. Dog ses der nærmest ingen afvigelser ved højere vandstande i spændet fra kote 4,5 m og opefter.



Figur 5.7. Densitetsfordeling af målt og biaskorrigeret simpel bassinmodelleret vandstand i Frejlev Skolevej Bassin.

Da det fremgår af kvartilerne i tabel 5.2 samt af densiteterne i figur 5.7 at der er god overensstemmelse mellem målt og modelleret vandstand, især hvad angår højere vandstande, vurderes det, at den opstillede simpel bassinmodel med korrektion for PBIAS nu kan anvendes til at modellere vandstanden i Frejlev Skolevej Bassin både med historisk og klimafremskrevet regn.

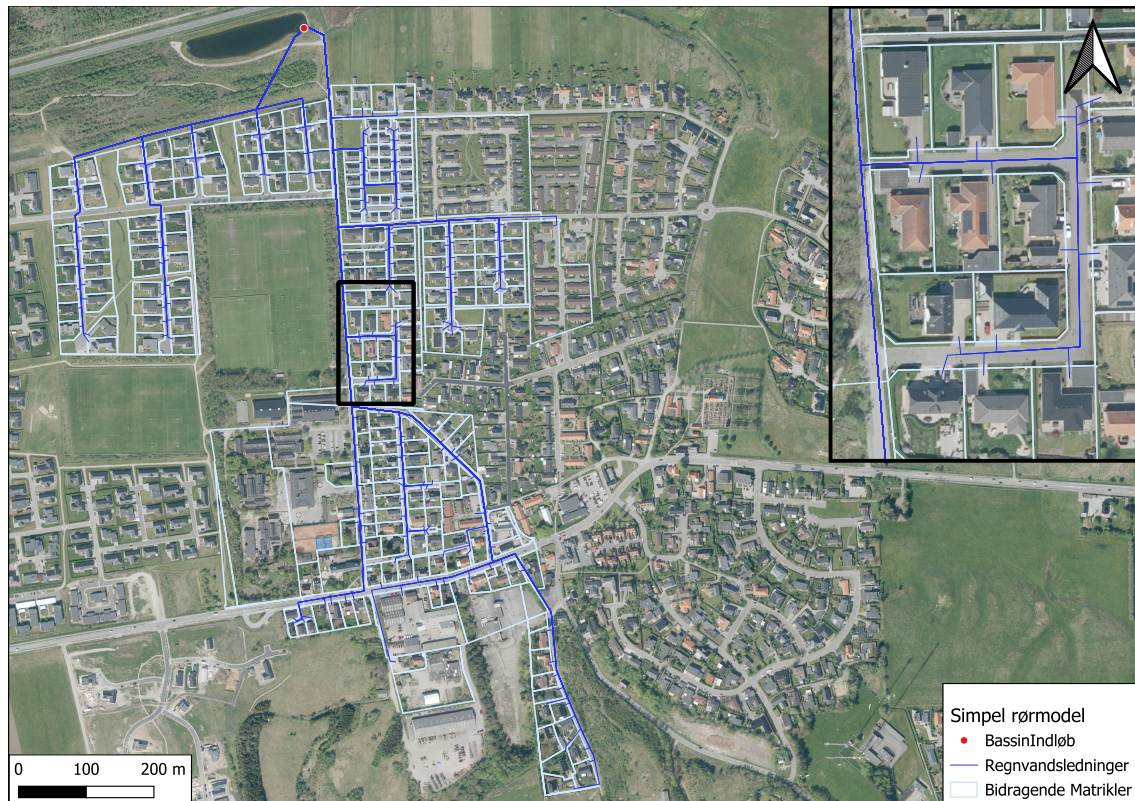
5.3 Simpel rørmodel

Afløbssystemet opstrøms for Frejlev Skolevej Bassin er relativt simpelt og lige til, hvorfor det forventes, at en simpel rørafstrømningsmodel over det bidragende opland ikke vil resultere i store afvigelser fra den simple bassinmodel. Denne påstand efterprøves i det følgende afsnit, hvor det redegøres for, hvorledes rørmodellen opstilles og anvendes som afstrømningsmodel for oplandet til Frejlev Skolevej Bassin.

5.3.1 Inddeling i og tilkobling af deloplande

Rørmodellen anvendt er en forsimpeling af det hydrauliske system. Denne er en relativt simpel afstrømningsmodel, hvor afløbstiden relateres til det areal, der bidrager til afstrømningen, hvorfor der med denne metode kan tages højde for koncentrationstiden i rørene, $t_{c,r}$. Det er en grundlæggende forudsætning, at strømningshastigheden, v , i regnvandsledningerne er uafhængig af tiden, er konstant og kan anvendes til at beregne koncentrationstiden i rørene som $t_{c,r} = \frac{d}{v}$ hvor d er distancen til udløbet. Det bidragende opland inddeles i mindre deloplande, som hver især bidrager med afstrømning til udløbet i forskellige tider, afhængigt af deres placering relativt til udløbet.

For at benytte rørmodellen inddeles hele Frejlev Skolevej Bassins bidragende opland i mindre deloplande, som alle kobles på et netværk af ledninger, som fører til bassinindløbet, se figur 5.8. I QGIS er det bidragende opland inddelt efter matrikler som, via små stikledninger, er koblet på regnvandsledningerne i oplandet. Det antages, at al nedbør på matriklen bidrager direkte til afløbssystemet og der er derfor ingen koncentrationstid på overfladen. Ved hjælp af QGIS plugin værktøjet QNEAT3 beregnes korteste afstand fra hver matrikel til bassinudløbet, gennem ledningsnetværket [QGIS, 2025]. Det samme er gældende for vejarealerne. Der laves efterfølgende et udtræk indeholdende matrikelnumre, matriklens areal samt distancen, d , til bassinindløbet. Det kontrolleres, at det samlede bidragende areal stadig svarer til 36,8 ha jævnfør tabel 3.2. Fastlægges en strømningshastighed i rørene, er det muligt at beregne koncentrationstiden i rørene og dermed tidsvarierende afstrømning fra de forskellige deloplande.



Figur 5.8. Matrikler og regnvandsledninger anvendt i arbejdet med en rørstrømningsmodel for det bidragende opland til Frejlev Skolevej Bassin.

Resultatet af inddelingen bliver 246 deloplande med arealer varierende mellem 204 m^2 og 2677 m^2 samt afstande til bassinindløbet varierende mellem 155 m for deloplandet tættest på og 1,37 km for deloplandet længst væk samt en middelfastand på 620 m. Der antages en rørstrømningshastighed på 1 m/s, hvilket giver afstrømningstider mellem 3 og 23 minutter med en middelværdi på 10 minutter.

5.3.2 Afstrømning til Frejlev Skolevej Bassin

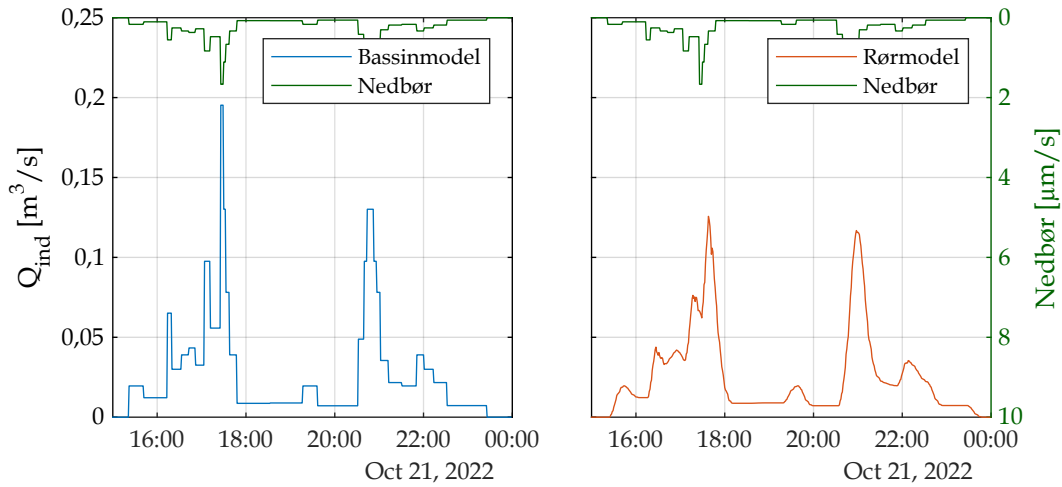
Den tidsafhængige afstrømning fra oplandet til bassinet beregnes via følgende ligning 5.4 som er inspireret af ligning (2) fra *Modeling of subsurface throughflow in urban pervious areas* [Nielsen et al., 2020, s. 3].

$$Q(t) = \sum_{n=1}^N I(t - (v_{rør} \cdot d_n)) \cdot A_{redn} \cdot \phi \quad (5.4)$$

Hvor:

$Q(t)$	Afstrømning til bassinet [m^3/s] til tiden t
I	Regnintensiteten [m/s] forsinket med rørafstrømningsitiden $t_{c,r} = v_{rør} \cdot d_n$
$v_{rør}$	Rørafstrømningshastigheden [m/s]
d_n	Afstand til indløb fra delareal n [m]
N	Totale antal delarealer [-]
A_{redn}	Reduceret overfladeareal af det delareal n [m^2]
ϕ	Hydrologisk reduktionsfaktor [-]

Resultatet bliver en hydrograf, som tager højde for deloplandenes tidsforskudte bidrag til indløbsvandføringen, $Q_{ind}(t)$ i Frejlev Skolevej Bassin se figur 5.9.

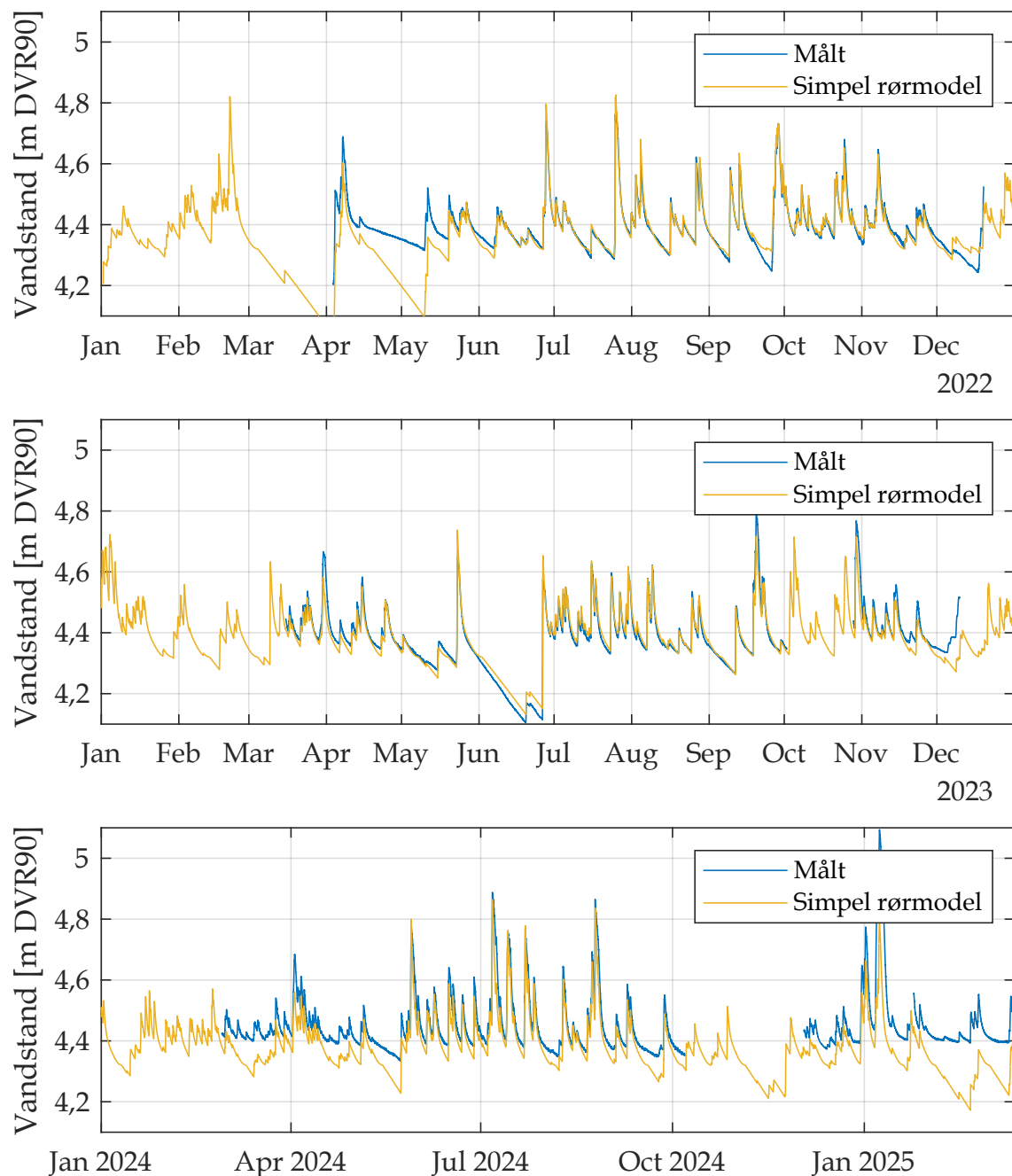


Figur 5.9. Hydrografer for henholdsvis den simple bassinmodel og rørmodellen for 21/10/2022.

Det fremgår tydeligt, at de beregnede indløbshydrografer for de to metoder er forskellige. For rørmodellen ses en hydrograf som er mere glat og udjævnet, med toppe som er knap så høje men derimod er bredere, idet alle oplande ikke bidrager på samme tid, men forskudt af hinanden. For den simple bassinmodel ses nærmere en hydrograf som er meget lig nedbørsintensiteten i og med, at det er antaget, at al nedbør falder direkte i bassinet.

5.3.3 Modellering og validering af simpel rørmodel med 2022-2025 data

Den modellerede vandstand for perioden januar 2022 til marts 2025 plottes imod den målte vandstand i samme periode. Se figur 5.10.



Figur 5.10. Simpel rørmodelleret og målt vandstand i Frejlev Skolevej Bassin i perioden januar 2022 til marts 2025 med værktøjet: simpel rørmodel.

Det ses, som det også gjaldt for den simple bassinmodel, at vandstanden for det meste modelleres med tilfredsstillende nøjagtighed mens der stadig er perioder hvor eksempelvis grundvandsstanden eller sneafsmeltning påvirker det målte vandspejl, hvorfor modelleringen afviger her. Umiddelbart er det ikke muligt at identificere, om den modellerede vandstand med afstrømning og indløbsvandføring bestemt af rørmodellen giver et bedre eller dårligere estimat end den simple bassinmodel.

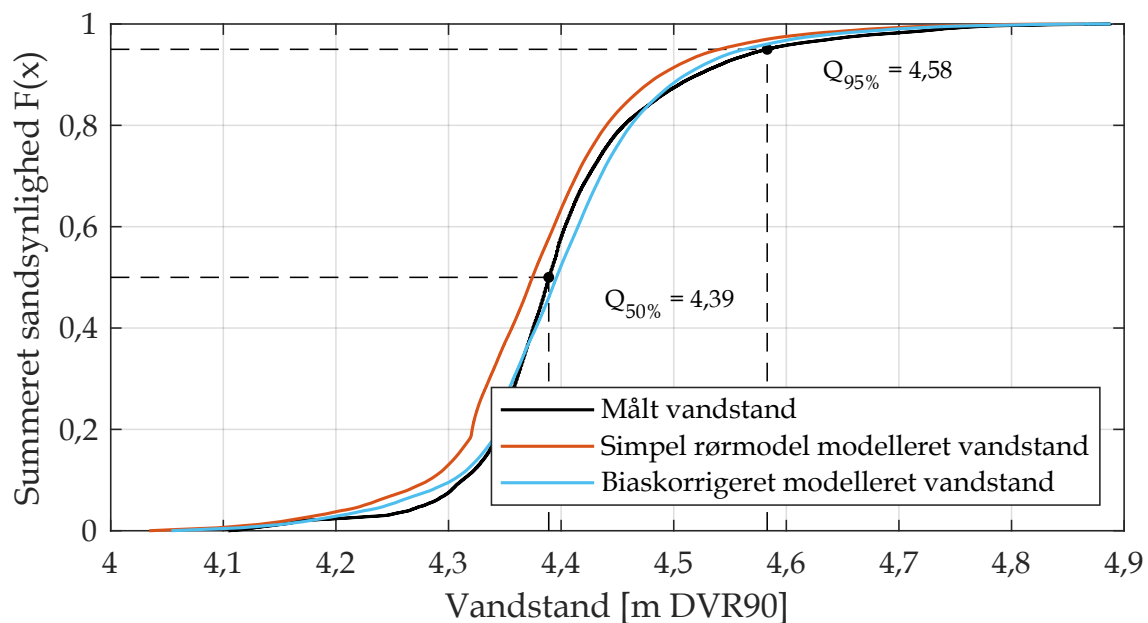
5.3.4 Statistisk evaluering og modeltilpasning

For rørmodellen er der igen beregnet RMSE, NSE og PBIAS, som fremgår af tabel 5.3. NSE værdien, som er en goodness-of-fit parameter, er i dette tilfælde en smule større hvis den beregnes for 15-minutters værdier og indikerer en god model, omend der er beregnet en bias på 0,49% som indikerer, at rørmodellen har tendens til at underestimere de modellerede vandstande. Sorteret data er, ligesom for den simple bassinmodel, eksklusiv perioderne: 28/02/2024 til 28/05/2024 og 23/12/2024 til 25/02/2025.

Tabel 5.3. Statistiske deskriptorer for målt og modelleret vandstand i Frejlev Skolevej Bassin via simpel rørmodel. Sorteret data refererer til den samlede dataserie hvor perioderne 28/02/2024 til 28/05/2024 og 23/12/2024 til 25/02/2025 er frasorteret.

	Tid [min]	RMSE [cm]	NSE [-]	PBIAS [%]
Sorteret data	5	4,9	0,745	0,49
Al data	5	6,4	0,575	0,79
Sorteret data	15	4,9	0,750	0,49
Al data	15	6,4	0,575	0,79

Af figur 5.6 fremgår fordelingsfunktionen for den målte vandstand sammen med tilsvarende for både modelleret vandstand samt biaskorrigeret modelleret vandstand. Her er modelleringen korrigeret for den beregnede PBIAS på 0,49 % fra tabel 5.3.



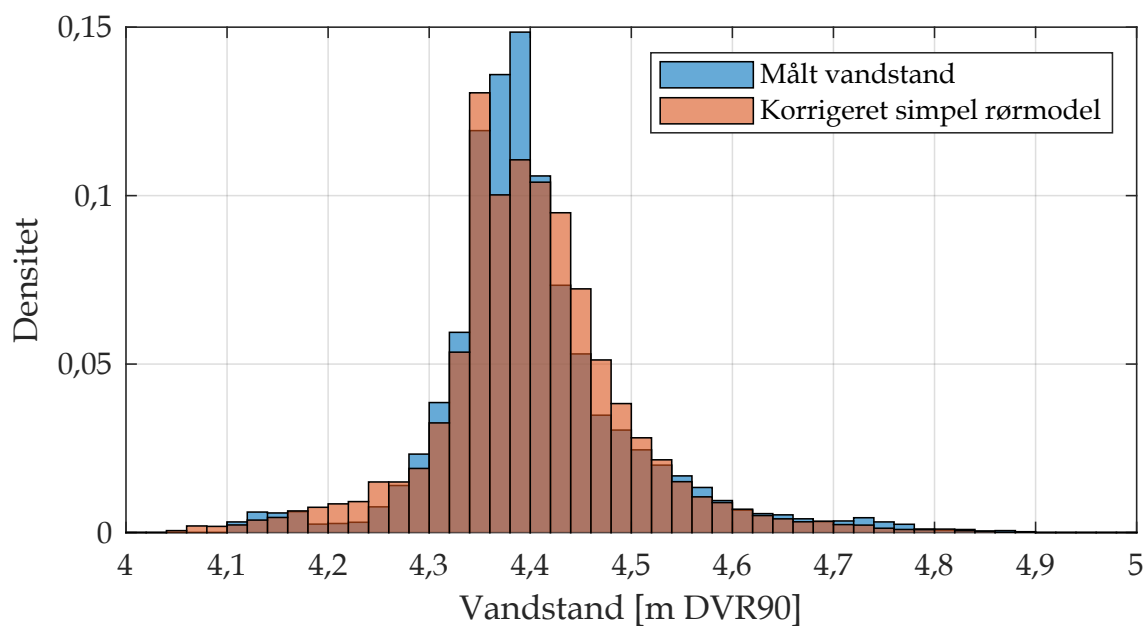
Figur 5.11. Empirisk fordelingsfunktion for henholdsvis målt, simpel rørmodel og korrigeret simpel rørmodel modelleret vandstand i Frejlev Skolevej Bassin. De to indtegnede percentiler forholder sig til fordelingsfunktionen tilhørende målt vandstand.

De tilhørende kvartilsæt til hver fordelingsfunktion fremgår af tabel 5.4. Det illustreres både af fordelingsfunktionen og af kvartilsættene, at der er god overensstemmelse mellem den korrigerede rørmodellerede vandstand og de målte værdier omend der for to af percentilerne er en afvigelse på en enkelt centimeter.

Tabel 5.4. Kvartilsæt samt 95-percentil for målt vandstand, vandstand modelleret med simpel rørmodel og biaskorrigeret modelleret vandstand.

Metode	Q _{25%}	Q _{50%}	Q _{75%}	Q _{95%}
Målt	4,35	4,39	4,44	4,58
Modelleret	4,33	4,37	4,43	4,54
Biaskorrigeret	4,35	4,39	4,45	4,57

Slutteligt sammenlignes også histogrammer over målt og modelleret vandstand. Her findes en afvigelse omkring 4% for vandstande i spændet fra kote 4,34 til kote 4,4. Også i spændet efterfølgende fra kote 4,4 til 4,5 ses små afvigelser, hvor det lader til, at der med en simpel rørmodel nu modelleres flere værdier af denne størrelse end der måles. Dog er det også tilfældet her, som for densitetsplottet i figur 5.7 for den simple bassinmodel, at der i fokusområdet fra kote 4,5 og opefter er god overensstemmelse mellem densiteten af målte og modellerede vandstande, hvorfor det vurderes, at den opstillede simple rørmodel med korrektion for PBIAS nu kan anvendes i arbejdet med modellering af vandstanden i Frejlev Skolevej Bassin.



Figur 5.12. Densitetsfordeling af målt og biaskorrigeret simpel rørmodel modelleret vandstand i Frejlev Skolevej Bassin.

5.4 MIKE URBAN model

Yderligere anvendes en afstrømningsmodel baseret på en MIKE URBAN model. Det er som med den simple rørmodel sandsynligt, at der er overensstemmelse mellem en afstrømningsmodel genereret med MIKE URBAN og den simple bassinmodel og simple rørmodel, hvorfor det ikke forventes, at der ses store afvigelser mellem de tre afstrømningsmodeller.

5.4.1 Afstrømning til Frejlev Skolevej Bassin

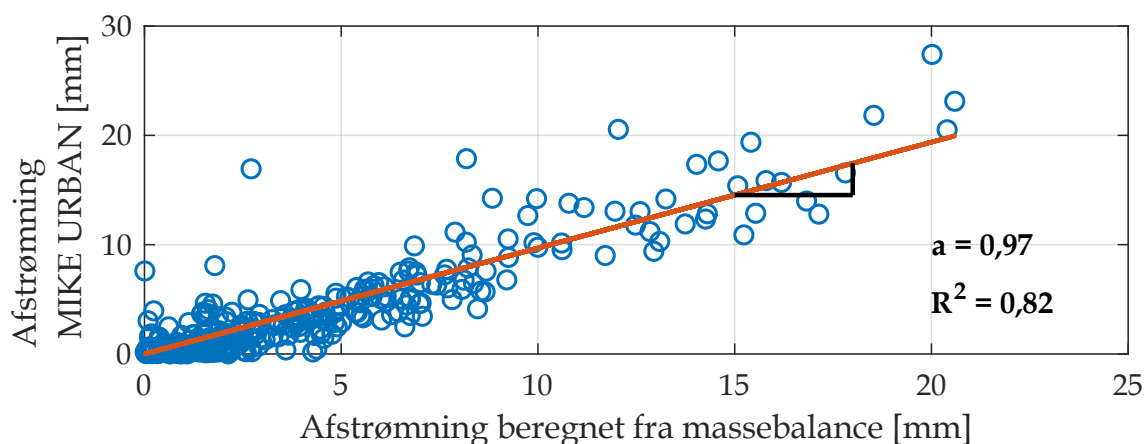
Afstrømningsmodellen benævnt MIKE URBAN modellen er baseret på, at der i MIKE URBAN regnes med en overflade- samt rørmodel. Til dette er der anvendt en Tid/Areal overflademodel og en fuldt dynamisk bølgemodel som rørmodel. Den hydrologiske reduktionsfaktor sættes til 0,8 jævnfør figur 5.2 på side 34. Som en del af overflademodellen er der anvendt en koncentrationstid på 7 minutter og et initialtab på 0,6 mm, hvilket er standardværdier [DHI, 2019b].

Overflademodellen Tid/Areal baserer sig på, at til hver tid t , beregnes hvor stort et opland der bidrager til afstrømningen til kloakledninger. Mængden af vand i systemet afhænger af, hvor stor koncentrationstiden er, hvor stort initialtabet er samt befæstelsesgraden af det bidragende areal. I MIKE URBAN kan der derudover vælges en Tid/Areal-kurve, hvor der i de følgende beregninger er anvendt et rektangulært opland. Beregnes der med et tidsskridt på Δt , kan der dannes en hydrograf, som angiver flowet fra oplandet til nærmeste brønd i MIKE URBAN modellen [DHI, 2019b].

En fuldt dynamisk bølgemodel er baseret på Saint Venant ligningerne, som er en endimensionel modellering af vandstanden idet der forekommer ikke-stationære, uensformige og turbulente strømninger. Saint Venant ligningerne er en simplificering af Navier Stokes ligningerne og er baseret på kontinuitetsligninger og Newtons 2. lov (impulsligningen). Ved at modellere med en fuldt dynamisk bølgemodel kan der tages højde for tilbagestuvning i rør, fuldtløbende rør og hurtige accelerationer i rørene. Tidligere har det været nødvendigt at tage stilling til, hvorvidt en fuldt dynamisk bølgemodel var nødvendigt grundet processeringstiden. I dag er processeringstiden ikke betydeligt højere ved at anvende en fuldt dynamisk bølgemodel, hvorfor denne også altid anvendes i praksis [Schaarup-Jensen, 1996] [DHI, 2019a]. Den fuldt dynamiske bølgemodel beregner vandstanden i alle ledninger, men kan samtidig også beregne en vandføring til hvert tidsskridt og i hvert punkt i ledningsnettet. Det er derfor muligt at udtrække indløbsvandføringen til Frejlev Skolevej Bassin. Samtidig er det også muligt at medtage en vandudveksling mellem Frejlev Skolevej Bassin og det tørre bassin.

MIKE URBAN modellen tilhører Aalborg Forsyning, hvorfor alle ledningsdimensioner, arealer af matrikler samt befæstelsesgrader er prædefinerede af Aalborg Forsyning. Der er bevist ikke ændret på disse informationer, da tanken er, at vælges det udenfor BAMSE-projektet af andre forsyninger at anvende deres MIKE URBAN model, vises her et eksempel uden kalibrering af modellens parametre bortset fra den hydrologiske reduktionsfaktor, da denne er bestemt tidligere. Det totale areal er dog kontrolleret til at stemme overens med det bidragende opland på 36,8 ha. Idet der anvendes en MIKE URBAN model til at beregne Q_{ind} , skal der indtænkes en længere beregningstid end de foregående afstrømningsmodeller, da det er en mere kompleks beregningsmetode.

Indledningsvist er det undersøgt, hvorvidt den udleverede MIKE URBAN model er hydrologisk korrekt. Selvom det er pointeret, at det ikke er givet, at en MIKE URBAN model altid er korrekt, kontrolleres det her, om det kan vurderes, at resultaterne fortsat vil være repræsentative til sammenligning med de andre værktøjer: simpel bassinmodel og simpel rørmodel. Dette gøres ved at indtegne mm nedbør afstrømmet til bassinet pr. døgn beregnet ud fra massebalancen (5.1) på førsteaksen og indløbsvandføringen omregnet til mm afstrømmet til bassinet pr. døgn jævnfør MIKE URBAN modellen på andenaksen. Dette er plottet på figur 5.13.



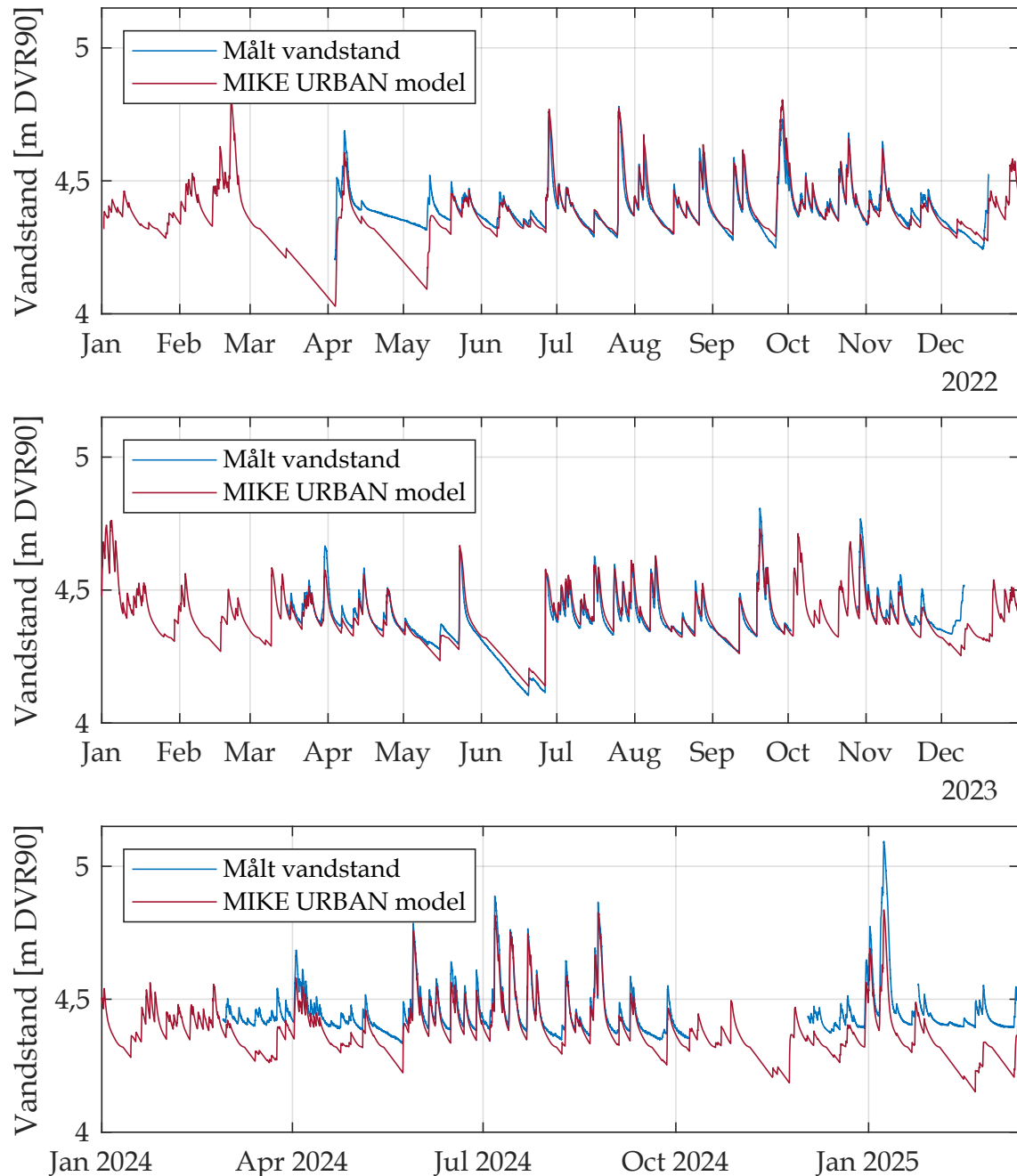
Figur 5.13. Validering af MIKE URBAN model ved at sammenholde afstrømmet mm nedbør pr. døgn baseret på henholdsvis massebalancen og MIKE URBAN modellen.

Det fremgår af figuren, at hældningen er 0,97, hvilket er tæt på en perfekt korrelation. MIKE URBAN modellen angiver minimalt mindre afstrømning til bassinet, hvilket er overensstemmende med, at MIKE URBAN inkluderer et initialtab i den hydrologiske model.

Figur 5.13 viser altså, at MIKE URBAN modellens standardparametre i dette tilfælde stemmer overens med virkeligheden, hvorfor resultaterne fra MIKE URBAN modellen kan sammenholdes med de to andre modeller. Det skal dog pointeres, at standardparametrene i MIKE URBAN ikke altid stemmer overens med virkeligheden, hvorfor det anbefales at gennemgå parametrene i MIKE URBAN samt have kendskab til oplandskarakteristika.

5.4.2 Modellering og validering af MIKE URBAN model med 2022-2025 data

Den modellerede vandstand for perioden januar 2022 til marts 2025 er sammenholdt med den målte vandstand i samme periode. Dette fremgår af figur 5.14.



Figur 5.14. Modelleret og målt vandstand i Frejlev Skolevej Bassin i perioden januar 2022 til marts 2025 med værktøjet: MIKE URBAN model.

Det ses, at i størstedelen af punkterne er der stor overensstemmelse mellem målt og modelleret, ligesom det også er tilfældet med simpel bassinmodel og simpel rørmodel, omend modelleringen tyder på, at den initiale koncentrationstid ikke er korrekt for oplandet, idet de modellerede vandstande har en marginal tidsforskydning relativt til de målte vandstande.

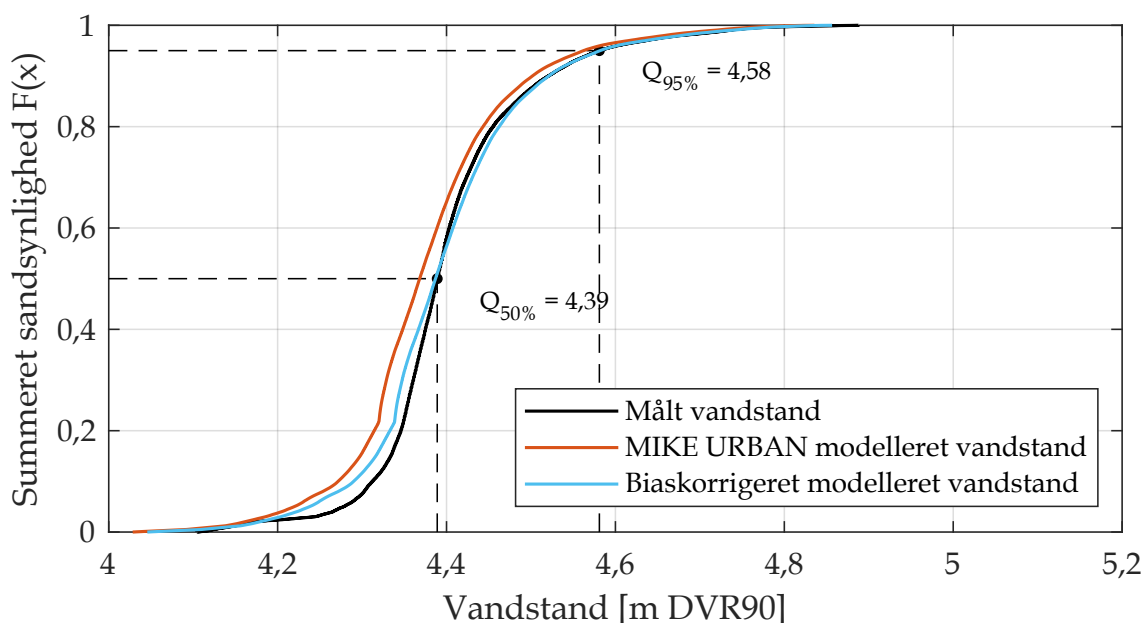
5.4.3 Statistisk evaluering og modeltilpasning

Ligeledes er der beregnet de statistiske parametre: RMSE, NSE og PBIAS for MIKE URBAN modellen, som fremgår af tabel 5.5. Det ses, at når der anvendes sorteret data opnås bedre statistiske parametre. NSE er stærkt påvirket af koncentrationstiden i modellen, som der ikke er justeret på. Idet målet om dynamisk overensstemmelse af modellen ikke er i fokus, har kalibrering af koncentrationstiden ingen betydning i denne sammenhæng. Det ses også, at der er PBIAS på 0,43% for sorteret data og 0,75% for alt data, hvilket er lavere værdier end for simpel rørmodel, men højere end for simpel bassinmodel.

Tabel 5.5. Statistiske deskriptorer mellem målt og modelleret vandstand i Frejlev Skolevej Bassin via MIKE URBAN model.

	Tid [min]	RMSE [cm]	NSE [-]	PBIAS [%]
Sorteret data	5	5,1	0,710	0,43
Al data	5	6,7	0,529	0,75
Sorteret data	15	5,1	0,71	0,44
Al data	15	6,9	0,529	0,76

Af figur 5.15 fremgår fordelingsfunktionen for den målte vandstand sammen med både MIKE URBAN modelleret og biaskorrigeret MIKE URBAN modelleret. Her er det også tydeligt, at biaskorrigeringen har en indvirkning på, at modellen præsterer bedst ved de højere vandstande. Dette fremgår ligeledes af de beregnede percentiler i tabel 5.6.

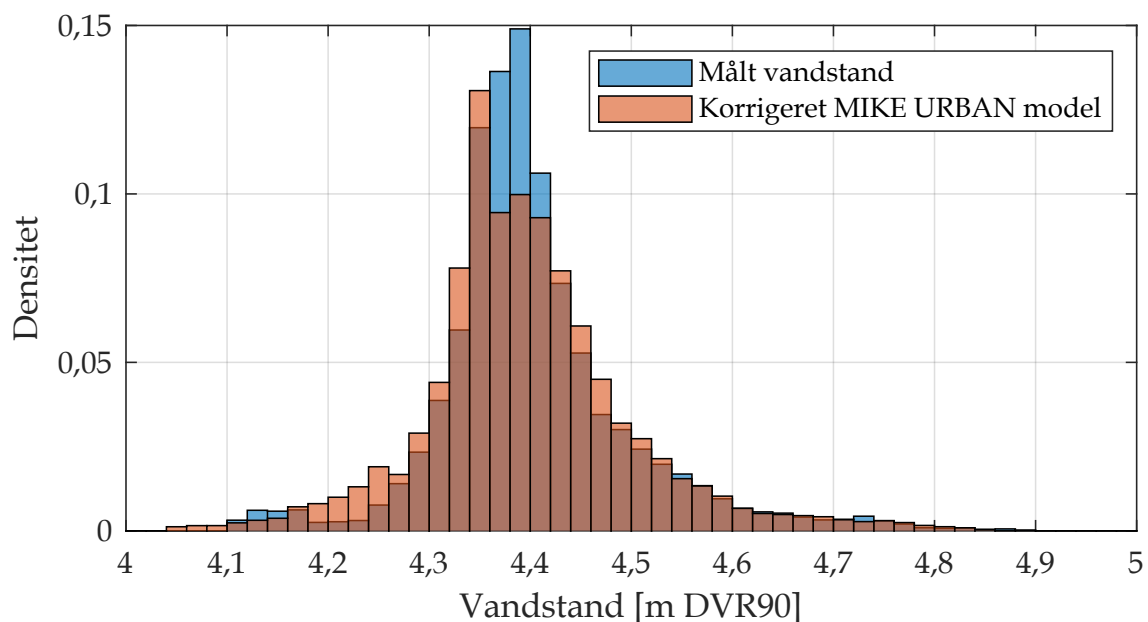


Figur 5.15. Empirisk fordelingsfunktion for henholdsvis målt vandstand, MIKE URBAN modelleret vandstand, og biaskorrigeret modelleret vandstand i Frejlev Skolevej Bassin. De to indtegnede percentiler forholder sig til fordelingsfunktionen tilhørende målt vandstand.

Tabel 5.6. Kvartilsæt samt 95-percentil for målt vandstand, vandstand modelleret med MIKE URBAN model og biaskorrigeret modelleret vandstand.

Metode	Q _{25%}	Q _{50%}	Q _{75%}	Q _{95%}
Målt	4,35	4,39	4,44	4,58
Modelleret	4,32	4,37	4,43	4,56
Biaskorrigeret	4,34	4,39	4,44	4,58

Ligeledes er der udarbejdet et histogram, som viser opdelingen af vandstande i intervaller af 2 centimeter. Der er angivet for målt data samt de biaskorrigerede MIKE URBAN modellerede data i figur 5.16. Det ses også her, at de biaskorrigerede værdier er tættest på de målte over kote 4,5, mens der ses lavere modellerede vandstande ved kote 4,4 end målte vandstande.



Figur 5.16. Densitetsfordeling af målt og biaskorrigeret MIKE URBAN modelleret vandstand i Frejlev Skolevej Bassin.

95-percentilen for målt data og biaskorrigeret data er 4,58 m DVR90, hvilket er 0,42 meter fra overløbskanten. 50-percentilen er kun 7 centimeter over det permanente vandspejl. Idet der er få målte vandstandsmålinger over kote 4,6, er grundlaget begrænset for at kunne bestemme, om værktøjet er i stand til at modellere høje vandstande korrekt - dette gælder for alle tre tilgange. Tendensen i denne validering er dog, at værktøjet modellerer acceptabelt.

5.5 Resultater fra de tre modeller

Til at kunne identificere gentagelsesperioder er det nødvendigt med længere kontinuerlige nedbørsserier og ikke kunstige regnserier. Anvendes kontinuerlige nedbørsserier, er det muligt at undersøge betydningen af koblede regnhændelser, hvilket ikke er muligt med CDS-regn. Idet koblede regnhændelser kan have en betydning for antal overløb, er det nødvendigt at kunne inkludere disse.

Jævnfør Spildevandskomiteens skrift 27: *Funktionspraksis for afløbssystemer under regn*, anbefales det, at skal der påvises en gentagelsesperiode uden stor statistisk usikkerhed, kræver det en fire gange så lang observationsperiode som gentagelsesperioden der ønskes undersøgt [Spildevandskomiteen, 2005]. Det vil sige; skal en gentagelsesperiode på 5 år påvises, kræves 20 års kontinuerligt data.

5.5.1 Modellering med Sulsted regn 1979-2025

For at undersøge gentagelsesperioden for overløb med historisk regn anvendes en regnserie fra SVK regnmåleren 5047 Sulsted; Stokbrovej Pumpestation, som har målt nedbør siden 1979 med enkelte perioders udfald i 1983-1984 og i 1995-1998, hvorfor der i dag findes 42 års historisk nedbørsdata fra denne SVK måler. SVK målerne i Frejlev, 5057 Frejlev Nord og 5058 Frejlev Syd, har kun målt nedbør siden 1997, hvorfor disse fravælges i arbejdet med historisk data, da der kun forefindes 28 års målt nedbør.

5.5.2 Modellering med klimafremskrevet regn

For at modellere vandstanden i Frejlev Skolevej Bassin frem i tiden, anvendes en klimafremskrevet regnserie. Regnserieværktøjet til udvælgelse og analyse af regnserier for både nuværende og fremtidigt klima, udviklet i forbindelse med det VUDP-støttede projekt VÆRDI (VÆRktøjer og regndata til DIimensionering af fremtidens klimatilpassede afløbssystemer), anvendes til at udvælge en klimaregn. Værktøjet er udleveret af Søren Thorndahl (AAU). Serierne, som er tilgængelige i værktøjet, er stokastisk genererede regn, udvalgt med henblik på at fitte bedst muligt til en række "target-parametre som eksempelvis årsnedbør eller intensitet med given varighed og gentagelsesperiode fastsat af DMI. [Thorndahl og Andersen, 2021] Det angives i værktøjet, at regnen skal tilpasses Aalborg og skal optimeres i henhold til en gentagelsesperiode på 5 år samt varigheder over 360 minutter. Dette resulterer i klimaregnserien "9041", som har en årsmiddelnedbør på 771 mm og strækker sig fra år 2070 til 2110. I værktøjet er der optimeret på flere nedbørsparametre, som forventes at ændres i det fremtidige klima [Thorndahl og Andersen, 2021]. Jævnfør Søren Thorndahl er nedbørsparametrene tilpasset et klimascenarie RCP 4.5.

Med denne serie som input, er det muligt at modellere den forventede vandstand i Frejlev Skolevej Bassin fra 2070 og 40 år frem i tiden.

Jævnfør tabel 3.2 på side 17 er den tilladte overfyldningshyppighed 0,2 / år, hvilket svarer til 8 overløb over 40 år.

5.5.3 Resultater for overfyldningshyppighed og antal overløb

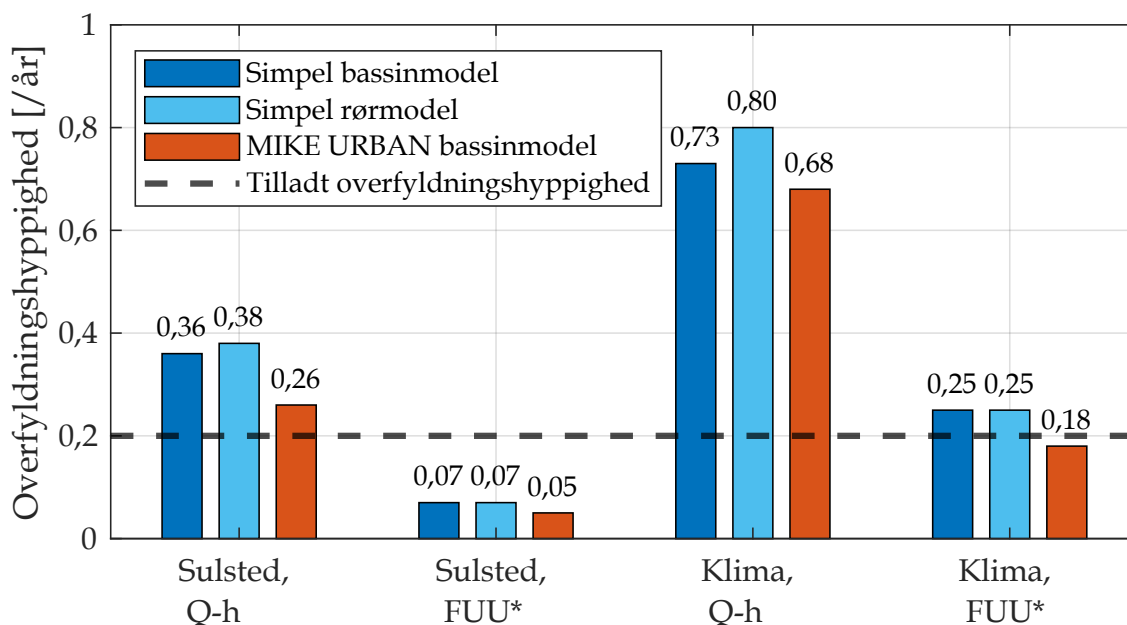
Til at afgøre hvilket bassinværktøj der kan anbefales at anvende, sammenholdes resultaterne fra de tre tilgange. Der er beregnet både overfyldningshyppighed og antal overløb, disse fremgår henholdsvis af figur 5.17 og 5.18, hvor beregningerne er foretaget på baggrund af både Sulsted regnserien samt den klimafremskrevende regnserie. For begge regnserier præsenteres ligeledes resultater for den i projektet estimerede Q-h relation samt for et tænkt scenarie, hvor udløbsvandføringen til enhver tid er svarende til en fuld udnyttelse af udledningstilladelsen (FUU $Q_{ud} = 36L/s$), der som beskrevet i afsnit 1.2 er en antagelse i gældende dimensioneringspraksis.

Klassificeringen af nødoverløb kan jævnfør *Bassindimensionering med SVKs Regionale Regnrækkeværktøj* [Gregersen et al., 2023] have betydning for antallet af observerede eller beregnede overløb og dermed også for den størrelse et bassin skal have, for at overholde en given gentagelsesperiode. Det er undersøgt og påvist, at dette er tilfældet for bassiner med lave afløbstal (under 2 L/s/red. ha). Hvis bassinet tømmes langsomt øges sandsynligheden for, at der kommer ny regn og fylder bassinet, inden det er tomt, hvorfor det fulde magasineringsvolumen ikke er tilgængeligt. Dette kan skabe en koblet effekt kaldet ”koblet regn” [Gregersen et al., 2023]. Anvendes SVKs Regionale Regnrækkeværktøj ligger definitionen fast. Her anvendes en hændelsesdefinition hvor det antages, at der først er tale om en ny hændelse, når bassinet er helt tomt, på trods af at der i mellemtiden måske har været nødoverløb som følge af koblet regn. Af denne årsag melder værktøjet en advarsel, hvis tømmetiden overstiger 3 døgn.

Under arbejdet med metode 2 til bestemmelse af bassinets Q-h relation, sås det af figur 3.13 på side 21 at Frejlev Skolevej bassin har en tømmetid på omkring 6 døgn, hvorfor denne hændelsesdefinition også er fravalgt. Hændelser er i dette speciale klassificeret således, at 24 timer adskiller to hændelser for at sikre meteorologisk uafhængighed. Forekommer der flere overløb indenfor 24 timer vil de tilskrives én og samme overløbshændelse. Hændelsesklassificeringen kan som benævnt have indflydelse på det observerede antal overløb. Det undersøges og afgøres dog, at en adskillelse på henholdsvis 12 og 6 timer også giver samme antal overløb, hvorfor de 24 timer benyttes i forsøget på at synkronisere én overløbshændelse til den svarende regnhændelse.

For at bedømme hvorvidt udledningstilladelsen er overholdt, beregnes antal overløb, som kan omregnes til en gentagelsesperiode for bassinet. Denne tilgang er udvalgt, da det er en simpel og konkret tilgang til at undersøge overholdelsen af udledningstilladelsen omend andre tilgange også er mulige. Som nævnt i afsnit 1.2, er der flere formuleringer i udledningstilladelsen, som påpeger, at der ikke skal ske en forringelse af den modtagende recipient. I sådanne tilfælde ville beregning af total volumen ved nødoverløb eller ”peakflow” være mere hensigtsmæssigt omend det på baggrund af disse, er vanskeligt at drage endelige konklusioner, da udledningstilladelsen ikke yderligere konkretiserer kravene angående eksempelvis hyppigheden af oversvømmelser. Gentagelsesperioden udvælges dermed som kriterie da den er målbar og konkret.

Af figur 5.17 fremgår et søjlediagram, hvor overfyldningshyppighederne beregnet via tre forskellige tilgange er sammenlignet. Det ses tydeligt, at alle tilgange producerer lignende resultater, omend der er en tendens til, at rørmodellen giver den største overfyldningshyppighed i flere tilfælde. Ligeledes fremgår af figur 5.18, hvor antallet af modellerede overløb er illustreret. For at se de modellerede tidsserier for alle tre værktøjer og scenarier, se bilag A.



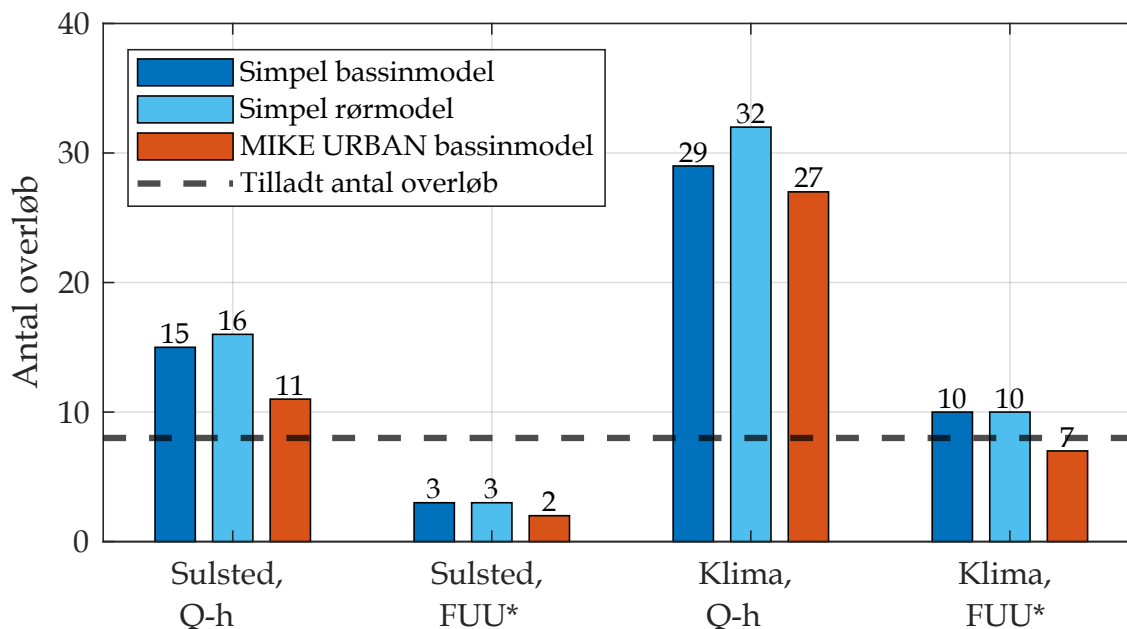
Figur 5.17. Beregnede overfyldningshyppigheder for Sulsted regnserien og den klimafremskrevde regnserie. For begge regnserier er der beregnet overfyldningshyppighed hvor der er anvendt Q-h relationen og hvor udledningstilladelsen er fuldt udnyttet.

*FUU: Fuldt udnyttet udledningstilladelse: $Q_{ud}=36$ L/s.

Skal konklusionen baseres udelukkende på det historiske data og Q-h relationen estimeret i nærværende speciale, så overholder Frejlev Skolevej Bassin ikke kravet om en overfyldningshyppighed på 0,2 /år svarende til en gentagelsesperiode på 5 år. De tre forskellige tilgange giver i gennemsnit 15 overløb i perioden på 42 år, hvilket svarer til overfyldningshyppigheden 0,36 /år eller en gentagelsesperiode på knap 3 år. Var det muligt at udnytte udledningstilladelsen fuldt ved samtlige vandstande, overholdes overfyldningshyppigheden uden problem hvad angår det historiske data. Jævnfør modelleringerne med klimafremskrevet regn og reel Q-h relation bliver antallet af overløb fordoblet i årene 2070-2110, svarende til en gentagelsesperiode på < 2 år, hvorfor kravet til overfyldningshyppigheden ikke overholdes.

Forudsættes det, at Frejlev Skolevej Bassin er dimensioneret med udgangspunkt i SVKs Regionale Regnrækkeværktøjet til bassindimensionering, er resultaterne i god overensstemmelse, hvad angår den fuldt udnyttede udledningstilladelse. Dimensioneringen med Regnrækkeværktøjet tager netop udgangspunkt i, at vandbremsen leverer en fast udløbsvandføring omend resultaterne af modelleringerne i specialet viser, at dette ikke er realiteten. Modelleringen med Sulsted regn og FUU viser at bassinet historisk, og i dag, er for stort omend modelleringen med klimanedbør viser at bassinet har en passende størrelse

med henblik på fremtiden, under forudsætning af at vandbremsen leverer en konstant udløbsvandføring på 36 L/s. Modelleringerne med den reelle Q-h relation viser dog, at gentagelsesperioden for overløb ikke overholdes, netop fordi den faktiske udløbsvandføring ikke er konstant, som antaget under dimensioneringen. Dette betyder, at ændres der ikke på den installerede vandbremse, er Frejlev Skolevej Bassin underdimensioneret til fremtidige forhold.



Figur 5.18. Beregnede antal overløb for Sulsted regnserien og den klimafremskrevde regnserie. For begge regnserier er der beregnet antal overløb, hvor der er anvendt Q-h relationen og hvor udledningstilladelsen er fuldt udnyttet.

*FUU: Fuldt udnyttet udledningstilladelse: $Q_{ud}=36$ L/s.

Som det fremgår af søjlediagrammerne producerer de tre forskellige tilgange overensstemmende resultater, hvor den største afvigelse, findes mellem MIKE URBAN modellen og de to andre, når vandstanden modelleres med Sulsted regnserien. Dette skyldes formentlig det ekstra kompleksitetsniveau hvor eksempelvis initialtab og enkelttab inkluderes i MIKE URBAN modellen men ikke i de to andre.

Det kan ikke afgøres, om én eller flere af tilgangene enten over- eller underestimerer resultaterne, da der ikke er noget kendt facit. Da ønsket var at benytte vandstandsdata til, så simpelt og nøjagtigt som muligt, at karakterisere bassiners hydrauliske funktion, vurderes det dermed, at en afstrømning til bassinet, beregnet på baggrund af en simpel bassinmodel, med fordel kan benyttes. Denne metode leverer resultater, overensstemmende med de to mere komplicerede metoder, hvorfor den må være lige så korrekt som de andre.

MIKE URBAN modellen er ofte tilgængelig for forsyninger og andre myndigheder og anvendes i bred udstrækning til flere opgaver. Til disse modelleringer, kræves 15 timer for at bestemme afstrømningen til bassinet med Sulsted regnserien på 42 år, og 13 timer med den klimafremskrevne regnserie. Simuleringstiden er derfor betydeligt højere end ved de to andre metoder.

Med udgangspunkt i Frejlev Skolevej Bassin som case-study, er der dermed nu udvalgt en metode til karakterisering af udløbsvandføringen fra et regnvandsbassin samt en simpel tilgang, hvormed hydrologisk reduktionsfaktor og afstrømningen til bassinet kan bestemmes i sådan en grad, at det med tilfredsstillende nøjagtighed kan benyttes til at modellere vandstanden gennem en længere periode.

Det udarbejdede modelværktøj: simpel bassinmodel kan nu afprøves på flere regnvandsbassiner. Simpel bassinmodel indebærer følgende fremgangsmåde:

- Brug alt vandstandsdata til at udarbejde Q-h relation. I denne proces se efter anormali og vurder en passende percentil. Kan være en iterativ proces.
- Brug nærmeste regnmåler til at beregne nedbør pr. døgn. Brug massebalance til at beregne afstrømning til bassin pr. døgn. Hældning mellem de to datasæt angiver den hydrologiske reduktionsfaktor.
- Udarbejd afstrømningsmodel og Q_{ind} .
- Modellér og validér modellen over periode med tilgængeligt vandstandsdata med nærmeste regnmålers input. Dette indebærer at undersøge statistiske deskriptorer, fordelingsfunktion, densitetsfunktion samt dynamiske tidsserier.
- Simulér med længere nedbørsperioder for at afgøre en overfyldningshyppighed.

Aladdinvej Bassin 6

Idet der er udarbejdet et færdigt bassinværktøj, kan dette nu anvendes på flere regnvandsbassiner. I det følgende gennemgås Aladdinvej Bassinet, dets karakteristika og datagrundlag hvorefter vandstanden modelleres via den simple bassinmodel, og resultaterne præsenteres.

6.1 Datagrundlag og forudsætninger for Aladdinvej Bassin

Aladdinvej Bassinet er anlagt i Sønder Tranders i Aalborg, jævnfør figur 3.1 på side 10, på adressen Aladdinvej 17C, 9260 Gistrup. Kloakopland, ind- og udløb samt nærmeste SVK-måler fremgår af figur 6.1. Den nærmeste SVK-måler er 5049 Gistrup. Denne er opsat i 1999 med en afstand på 1,5 km til regnvandsbassinet. Regnmåleren opsat i forbindelse med BAMSE-projektet er opsat i februar 2025, hvorfor der er begrænset data tilgængeligt imens dette speciale udarbejdes.



Figur 6.1. Kloakopland, ind- og udløb til Aladdinvej Bassin. Ligeledes er nærmeste SVK måler markeret.

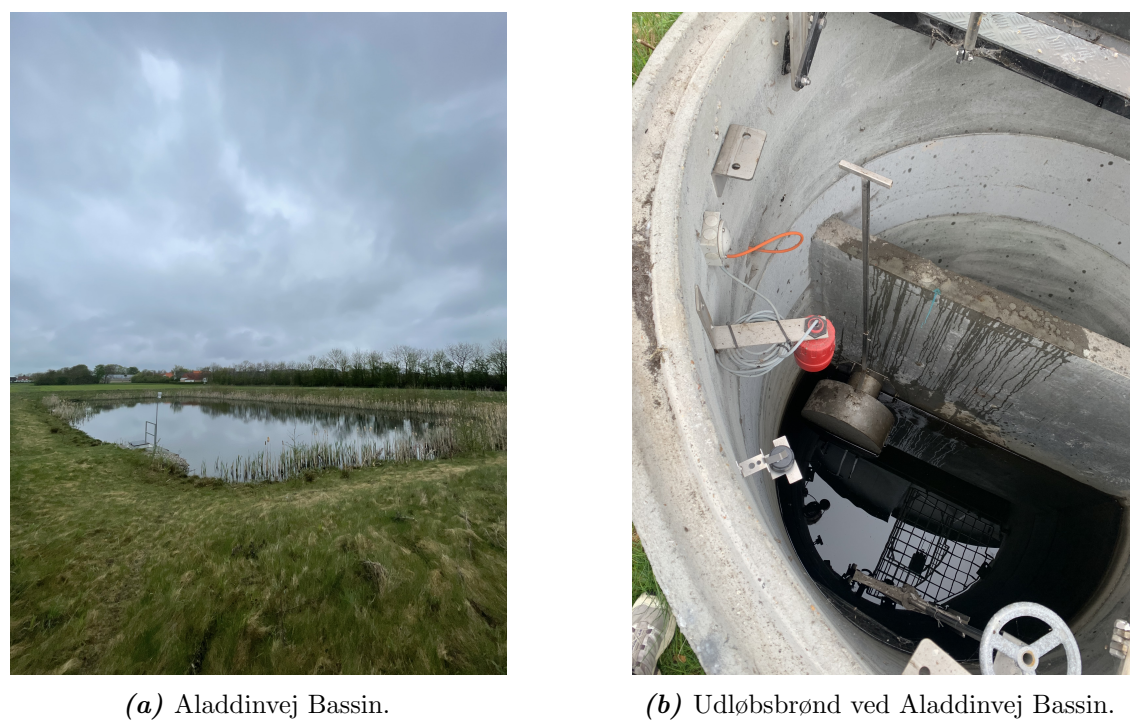
Der er ligeledes indsamlet tekniske specifikationer for Aladdinvej Bassinet. Disse fremgår af tabel 6.1. Data er fundet i udledningstilladelsen: *Tilladelse til udledning af separat regnvand fra nyt udløb U0.4.40a med udledning til Landbækken, Sønder Tranders*, som er udleveret af Aalborg Forsyning [Aalborg Kommune, 2016]. Ydermere er tekniske tegninger af Aladdinvej Bassinet, som fremgår af de vedlagte bilag: *Sdr. Tranders Aladinvej 120_Bassin, snit A-A og B-B_SU.pdf* og *Udløbsbrønd_Aladdinvej.pdf* anvendt. [Aalborg Forsyning A/S, 2023]. Billeder af Aladdinvej Bassin samt udløbsbrønden fremgår af figur 6.2.

Tabel 6.1. Karakteristika for Aladdinvej Bassin.

* Formodet bremse jævnfør figur 6.2b.

** mm nedbør der skal falde i oplandet for at fylde bassinet.

Aladdinvej Bassin			
Vådt volumen	1170 m ³	Forsinkelsesvolumen	3370 m ³
Permanent vandspejl	4,75 m DVR90	Maks vandspejl	6,05 m DVR90
Type vandbremse	Centrifugalbremse*	Udledningstilladelse	31,4 L/s
Totalt bidragende opland	31,4 ha	Befæstet opland	10,1 ha
Aflaster til	Tilløb til Landbækken	Type	Åbent, vådt bassin
Overfyldningshyppighed	0,1 / år	mm bassin/opland**	47,5
Idriftsættelse	2021	Data	Fra 18/08/2021 til 26/03/2025



Figur 6.2. Billeder af Aladdinvej Bassin og dets udløbsbrønd. Billeder taget 23/04/2025.

Som det fremgår af figur 6.2b, må det forventes, at Aladdinvej Bassins vandbremse er af typen centrifugalbremse. Ved inspektionen af udløbsbrønden den 23/04/2025, var det ikke muligt at løfte vandbremsen op. Det er dog muligt at tyde på vandbremsens etikette, at det er en type RSK. Ved undersøgelser fremkommer dette som en centrifugalbremse fra Cady Aqua Control [Control, 2025].

Der er uoverensstemmende informationer angående koter for regnvandsbassinet. De angivne koter i tabellen er fra en opmåling af udløbsbrønden foretaget i forbindelse med BAMSE-projektet, idet alle udløbsbrønde skal opmåles til dette projekt. I opmålingen af en udløbsbrønd måles, blandt andet, bunden af vandbremsen, hvilket svarer til det permanente vandspejl i regnvandsbassinet samt overløbskanten i udløbsbrønden, hvilket svarer til stuvningsvandspejlet. Ved inspektion af udløbsbrønden den 23/04/2025, var det ikke muligt at opmåle koter, idet der er begrænset plads i udløbsbrønden, se figur 6.2b.

På tekniske tegninger fremgår ikke samme koter, som der er opmålt i forbindelse med BAMSE-projektet [Aalborg Forsyning A/S, 2023]. Her findes forskelle på 2-4 centimeter. De tekniske tegninger, den ene af udløbsbrønden og den anden af et tværsnit gennem regnvandsbassinet, er derudover også indbyrdes uoverensstemmende.

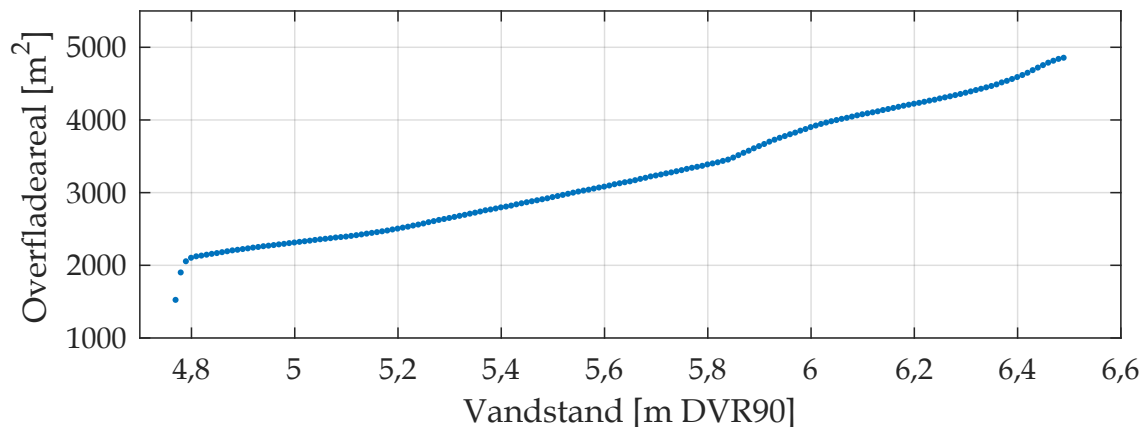
Grundet disse forskellige opmålinger, er det valgt at anvende koterne fra opmålingen idet de er foretaget i december 2024, mens de tekniske tegninger har en angivet dato i december 2023.

Foruden uoverensstemmende koter, er det nødvendigt at pointere, at det ikke vides, om der er bentonit membran i regnvandsbassinet. Ifølge udledningstilladelsen fra 2016, skal regnvandsbassinet anlægges med membran, grundet en nærliggende grundvandsboring. På den tekniske tegning af tværsnittet fra 2023, er det angivet, at der er bentonit membran i bassinet skråninger, mens der er råjord i bunden af regnvandsbassinet.

Ydermere fremgår det af Aalborg Forsynings Kloakkort samt teknisk tegning, at der er anlagt drænedninger i skråningen af regnvandsbassinet. Hvorvidt dette påvirker vandspejlet i regnvandsbassinet er ligeledes ukendt.

Til at bestemme en overfladearealfunktion, $A(h(t))$, for Aladdinvej Bassin anvendes højdedata fra SCALGO. Der er anvendt data fra det formodede permanente vandspejl i kote 4,75 og op til kronekanten i kote 6,48. Herved fås overfladearealfunktionen på figur 6.3.

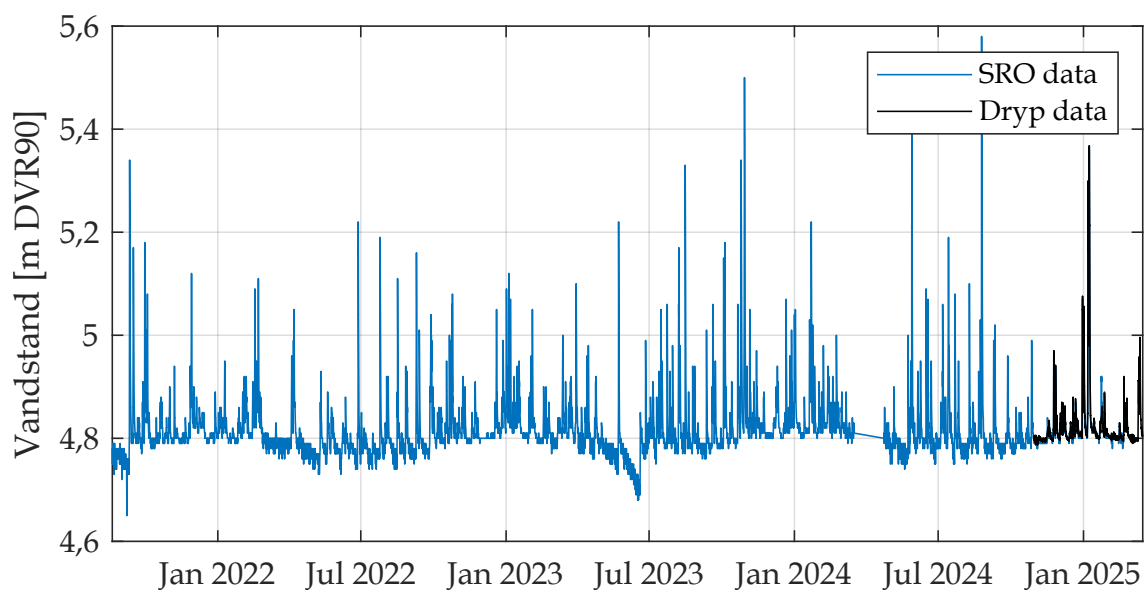
Af figuren fremgår det, at overfladearealfunktionen først udvikler sig som forventet efter kote 4,8. Under denne kote angives der for små overfladearealer, hvilket skyldes, at vandoverflader ikke kan måles nøjagtigt i DEM. Dette antyder, at SCALGO-opmålingen ikke har været foretaget sammenfaldende med at bassinet har været tømt til det permanente vandspejl, eller at det permanente vandspejl ikke står i kote 4,75.



Figur 6.3. Lineær regression til bestemmelse af sammenhæng mellem kote og overfladeareal for Aladdinvej Bassin.

I forbindelse med BAMSE-projektet er Aladdinvej Bassinet monitoreret siden 26/09/2024. Der var dog udfordringer i starten af denne måling, hvorfor der kun er inkluderet data siden 30/10/2024. Dette data benævnes Dryp data.

Foruden disse data, har en måler forbundet til driftsafdelingens SRO-system monitoreret siden 19/08/2021. Dette data benævnes SRO-data. Både SRO og Dryp-data er indsamlet i udløbsbrønden. Alt data, som kan anvendes, fremgår af figur 6.4.

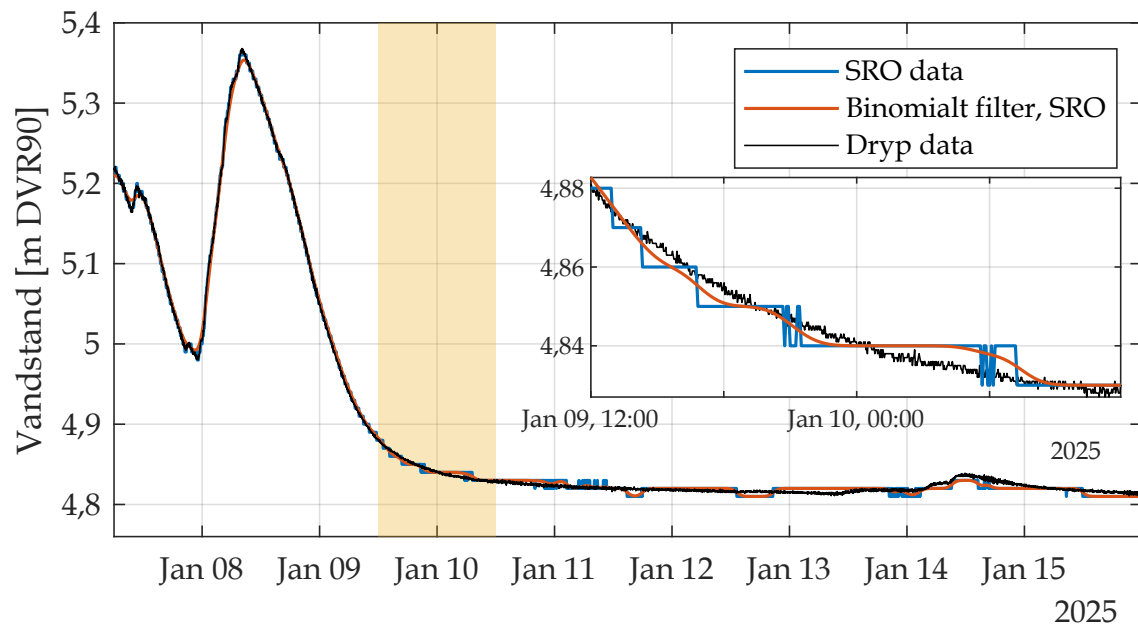


Figur 6.4. Tilgængeligt data af vandstand i Aladdinvej Bassin.

Jævnfør afsnit 3.1, har SRO-data en opløsning på 10 mm og Dryp-data 1 mm. Dette har en stor betydning for datakvaliteten især ved lavere udløbsvandføringer. Dette ses på figur 6.5. På figuren kan det ses, at ved lavere udløbsvandføringer, hvor vandspejlet ændrer sig langsommere, vil den ringe opløsning af SRO-data have betydning for de beregnede udløbsvandføringer. Støj fra måleudstyret påvirker dermed det binomiale filter, se figur 6.5. SRO-data er derfor ikke anvendeligt ved lave vandstande tæt på det permanente vandspejl, men kan dog anvendes til højere vandstande. Det vurderes, at fra permanent vandspejl i

kote 4,75 til kote 4,9 kan SRO-data ikke anvendes til at karakterisere en udløbsvandføring. Her er det nødvendigt at anvende Dryp-data.

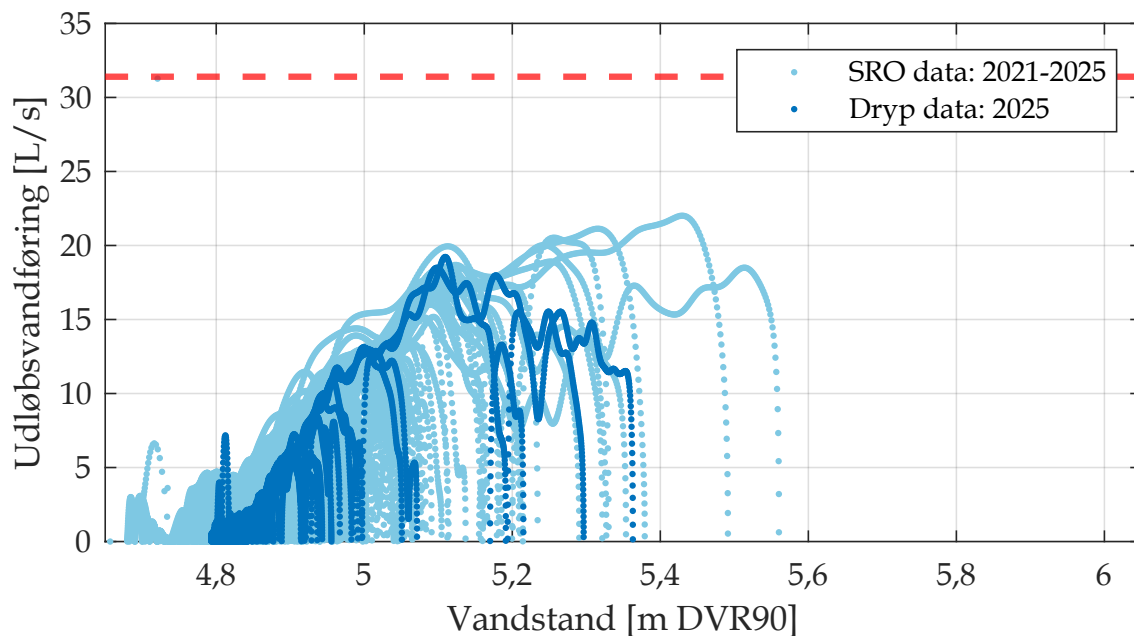
Idet SRO-data fortsat er anvendeligt ved højere vandstande og vurderes ikke at forringe den endelige Q-h relation, så længe der suppleres med Dryp-data, kan SRO-data fortsat anvendes. Det skal pointeres, at grundet SRO-datas opløsning på 10 mm, kan der potentielt beregnes større udløbsvandføringer grundet større hældninger mellem datapunkter.



Figur 6.5. Visualisering af opløsningen af SRO-data.

6.2 Karakterisering af udløbsvandføring

Alt tilgængeligt data anvendes til at beregne udløbsvandføringen for Aladdinvej Bassin, som fremgår af figur 6.6. Der er vist beregnede udløbsvandføringer for både SRO- og Dryp-data.

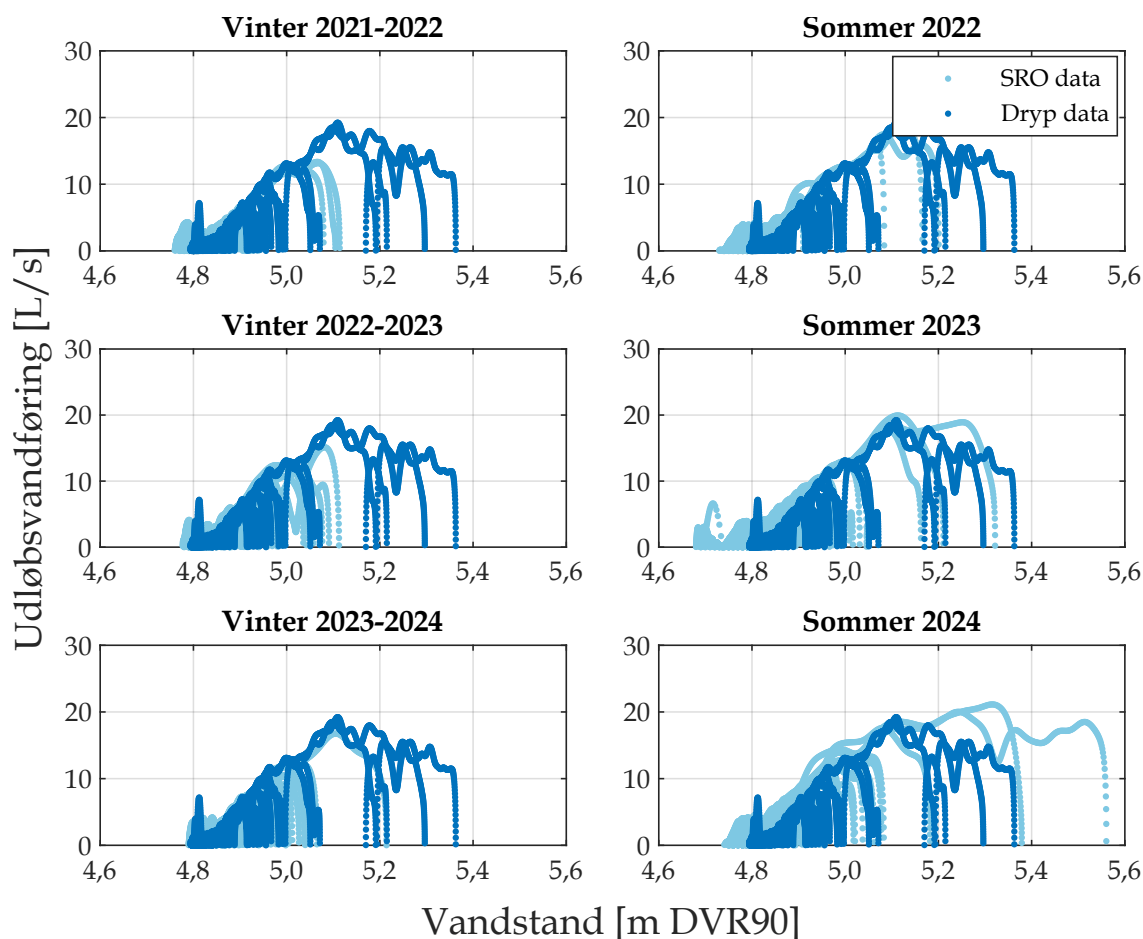


Figur 6.6. Beregnede udløbsvandføringer for både SRO- og Dryp-data målt i Aladdinvej Bassinet.

Det ses, at der er tydelig forskel på de to datakilder ved koter i intervallet fra 4,8 til 5,1. Da Aalborg Forsyning i december 2024 fik foretaget en opmåling af udløbsbrønden, er vandspejlet i brønden ligeledes opmålt og noteret sammen med det præcise klokkeslæt. Både SRO- og Dryp-data stemmer overens med denne opmåling, hvorfor forskellen i beregnede udløbsvandføringer ikke skyldes en afvigelse i kotereferering i det ene datasæt.

I forsøget på at identificere grunden til afvigelsen, er det undersøgt, om årstider har en betydning. Idet Dryp-data er indsamlet 30/10/2024 til 26/03/2025, er det kategoriseret som en vinterperiode. Der er derfor beregnet udløbsvandføringer for de tilgængelige vinter- og sommerperioder i SRO-data. Disse fremgår af figur 6.7.

Det er tydeligt, at Dryp-data stemmer overens med vinterperioder, mens sommerperioderne er afvigende, specielt i 2024. Denne afvigelse betyder, at der i sommermåneder ses et vandtab, som kan skyldes fordampning og potentielt udsivning, idet det ikke vides, om der er membran i bunden af regnvandsbassinet. For sommer 2024 på figur 6.7 ses ved kote 4,9 en forskel på 2-3 L/s.

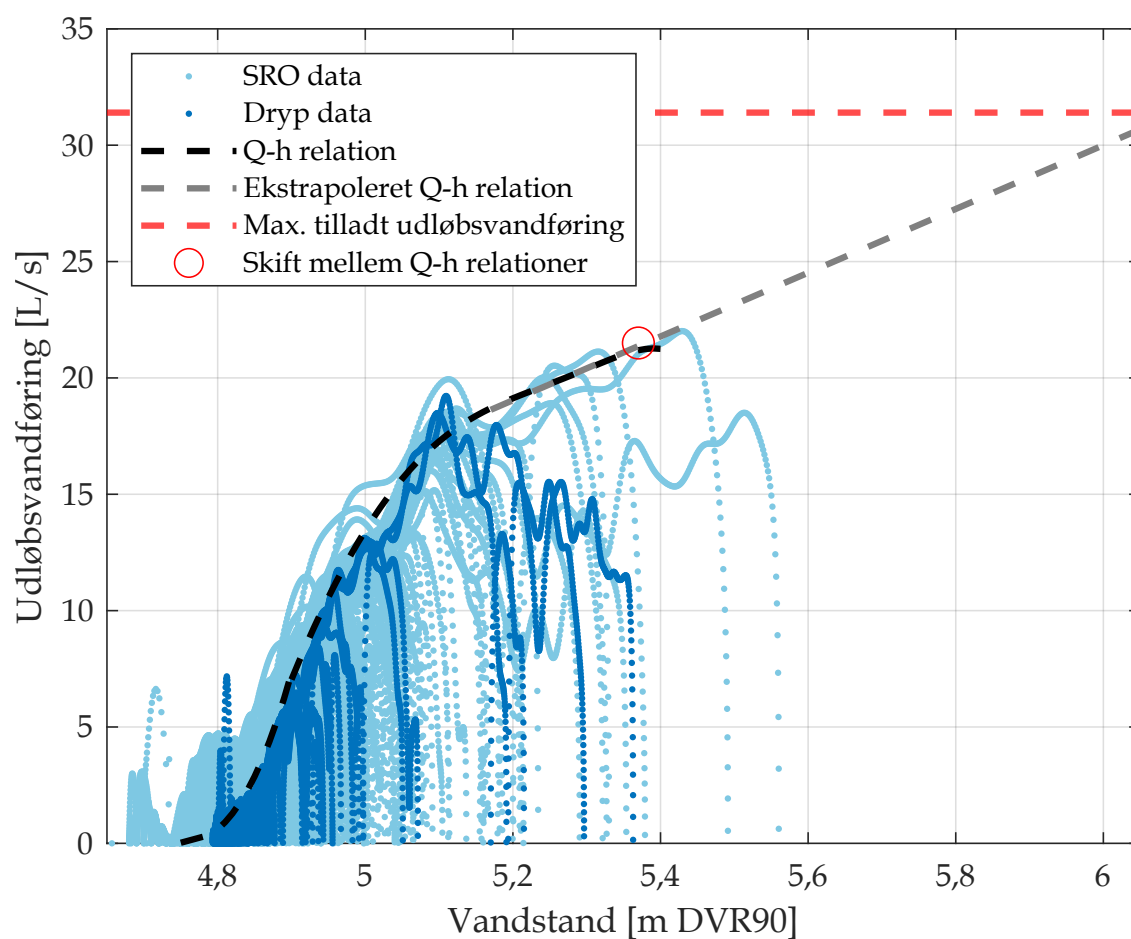


Figur 6.7. Beregnede udløbsvandføringer for vinter- og sommerperioder fra Aalborg Forsynings SRP sammenholdt med Dryp-data som er fra en vinterperiode.

Det vurderes, at den front, som Dryp-data danner, er tættere på den korrekte Q-h relation for vandbremsen ved Aladdinvej Bassinet. Derfor fittes Q-h relationen til Dryp-data, hvor dette er tilgængeligt, hvilket er en 95-percentil af alt det tilgængelige data. Fra kote 5,2 til kote 5,4 anvendes SRO-data. Q-h relationen fremgår af figur 6.8 og er udarbejdet med to 6. gradspolynomier.

Jævnfør tabel 6.1, ses det, at overløbskanten er placeret i kote 6,05. Regnvandsbassinet har derfor ikke været tæt på et overløb siden 2021, hvor bassinet er idriftsat. Bassinet er dog dimensioneret efter en overfyldningshyppighed på 0,1 /år (gentagelsesperiode på 10 år), hvorfor det er mere usandsynligt, at et overløb skulle være målt siden idriftsættelsen. Idet der skal foretages en ekstrapolering af Q-h relationen for en fremtidig modellering af vandspejlet, er der beregnet en hældning af Q-h relationen fra kote 5,17 til 5,37. Hældningen mellem disse punkter er herefter anvendt til en lineær funktion frem til kote 6,05.

Ud fra de stærke antagelser angående den lineære regression, ligner det, at vandbremsen kan levere op til den udstedte udledningstilladelse på 31,4 L/s. Med samme metode for Frejlev Skolevej Bassin, se figur 4.8 på side 32, blev det ikke fundet, at udledningstilladelsen vil blive fuldt udnyttet ved vandstande tæt på overløbskanten.

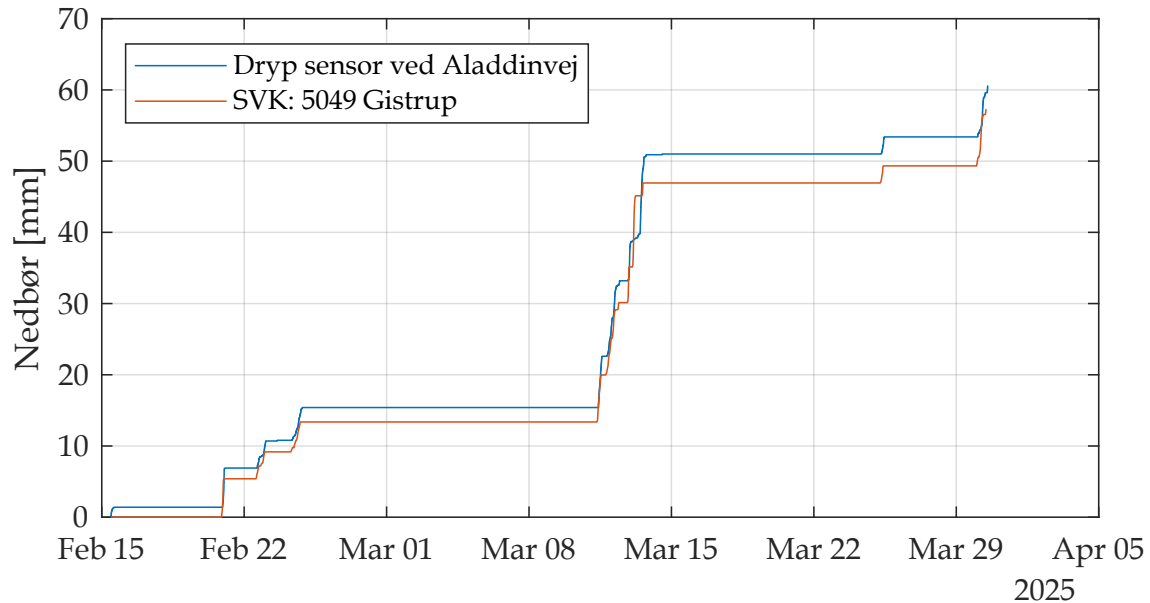


Figur 6.8. Endelig Q-h relation for Aladdinvej Bassin tilpasset 95-percentilen af det tilgængelige Dryp-data.

6.3 Modellering og validering af vandstand med simpel bassinmodel

Som beskrevet i kapitel 6, er der i forbindelse med BAMSE-projektet opsat en Dryp regnmåler ved regnvandsbassinet, se figur 6.1 på side 57. Der er dog begrænset data tilgængeligt fra denne, hvorfor SVK-måleren: 5049 Gistrup anvendes.

Idet der er 1,5 km mellem SVK regnmåler og regnvandsbassin er der sammenlignet det akkumulerede nedbør fra Dryp regnmåleren og 5049 Gistrup SVK måleren i perioden, hvor der er overlappende data: 15/02/2025 til 09/04/2025. Sammenligningen fremgår af figur 6.9.

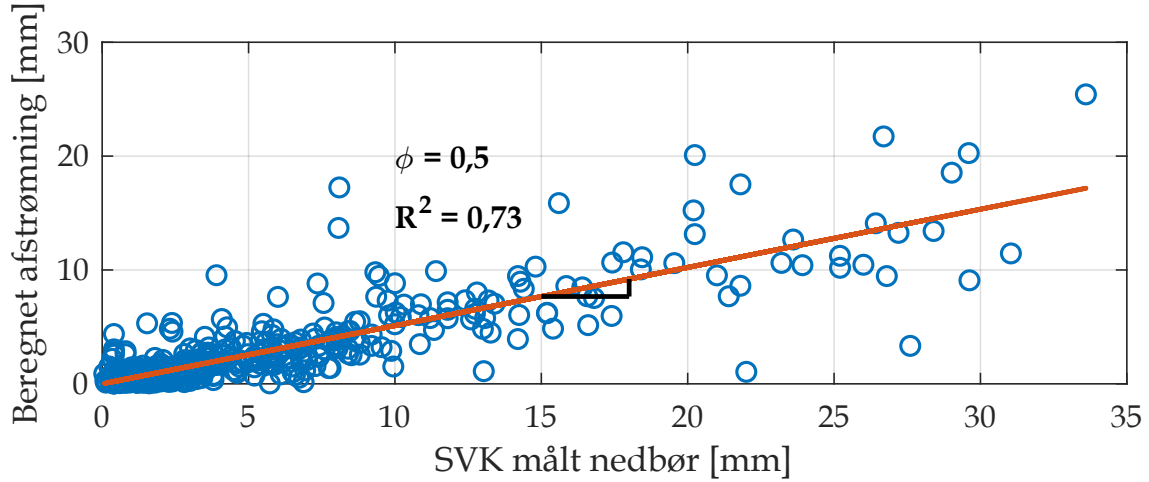


Figur 6.9. Sammenligning af akkumuleret nedbør mellem Dryp sensor ved Aladdinvej og SVK-måler: 5049 Gistrup. Indbyrdes afstand: 1,5 km.

Der ses forskelle mellem hvad de to regnmålere har registreret. Det fremgår, at der er en smal tidlig forskydning mellem de to, hvilket skyldes de 1,5 km. Herudover kan det også ses, at der er registreret mere nedbør med Dryp regnmåleren end SVK måleren. Dette kan skyldes en spatial heterogenitet i nedbørsintensitet, hvormed en front der passerer disse to regnmålere, ikke nødvendigvis har samme intensitet i hele udstrækningen. Derudover kan det også skyldes, at det er to forskellige typer af regnmålere. Dryp regnmåleren er et enkelt-ske vippekar, mens SVK måleren er et vippekar med to skeer.

Det konstateres, at der er identificerbare forskelle på den målte regn i de to regnmålere, men SVK måleren i Gistrup anvendes på trods af dette, idet Dryp regnmåleren kun har været drift siden februar 2025 og derfor ikke kan bidrage til tilstrækkelig modellering og validering af vandstand fra 2021 og frem.

Til at bestemme den hydrologiske reduktionsfaktor benyttes SVK måleren 5049 Gistrup derfor. Der er identificeret sammenhørende værdier af målt nedbør og afstrømning til regnvandsbassinet beregnet ved hjælp af ligning 5.1 i enheden millimeter pr. døgn. Den hydrologiske reduktionsfaktor for oplandet til Aladdinvej Bassinet er beregnet til $\phi = 0,5$ jævnfør figur 6.10.



Figur 6.10. Beregning af hydrologisk reduktionsfaktor for Aladdinvej Bassin.

Der ses større spredning i de sammenhørende værdier relativt til beregningen af den hydrologiske reduktionsfaktor for Frejlev Skolevej Bassin. Dette skyldes formentlig den større afstand til SVK måleren end i Frejlev, hvor der kun er 0,75 km til den anvendte SVK måler.

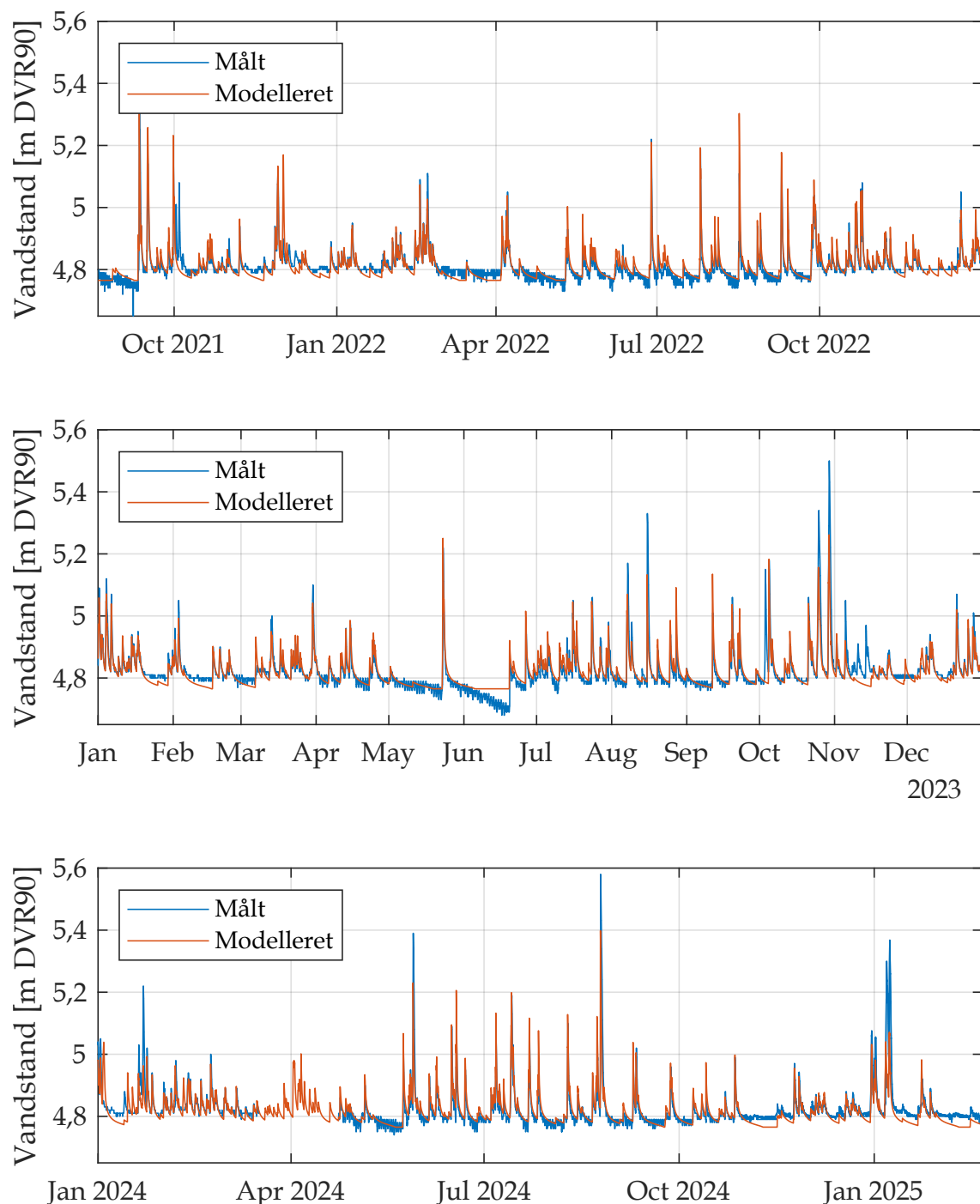
Idet alle parametre til at modellere vandstanden er identificeret, er det nu muligt at opstille den endelige massebalance, ligning 6.1, for Aladdinvej Bassinet.

$$h(t) = h(t-1) + (Q_{ind}(I(t)) - Q_{ud}(h(t-1))) \cdot \frac{1}{A(h(t-1))} \cdot \Delta t \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Hvis } h(t) < 4,75 & \quad Q_{ud} [m^3/s] = 0 \\ \text{Hvis } 4,75 < h(t) < 4,90 & \quad Q_{ud} [m^3/s] = p1(h(t - \Delta t)) \\ \text{Hvis } 4,90 < h(t) < 5,37 & \quad Q_{ud} [m^3/s] = p2(h(t - \Delta t)) \\ \text{Hvis } 5,37 < h(t) < 6,05 & \quad Q_{ud} [m^3/s] = 0,0137 \cdot h(t - \Delta t) - 0,0522 \\ \text{Hvis } h(t) > 6,05 & \quad Q_{ud} [m^3/s] = 0,0314 \end{aligned}$$

Hvor $p1(h)$ og $p2(h)$ er to forskellige 6. gradspolynomier.

Idet målt nedbør fra 5049 Gistrup SVK måleren benyttes som input til $Q_{ind}(I(t))$, er det muligt nu at modellere vandstanden i Aladdinvej Bassinet i perioden 19/08/2021 til 26/03/2025 og holde denne op imod den målte vandstand tilgængeligt for perioden. De modellerede vandstande fremgår af figur 6.11.



Figur 6.11. Modelleret vandstand og målt vandstand for Aladdinvej Bassin i perioden 19/08/2021 til 26/03/2025.

Der ses stor overensstemmelse mellem den målte og modellerede vandstand. Kun få steder kan der ses uoverensstemmelser, hvilket flere steder formentlig kan tilskrives nedbørsinputtet fra Gistrup SVK måleren. Ligeledes ses det i januar 2025, at sneafsmeltningshændelsen ikke modelleres korrekt, hvilket også er forventet.

Ved de lave vandstande er det tydeligt, at det målte data er foretaget med en opløsning af 10 mm, hvorfor det er præget af støj. Dette forekommer ikke ved den modellerede vandstand.

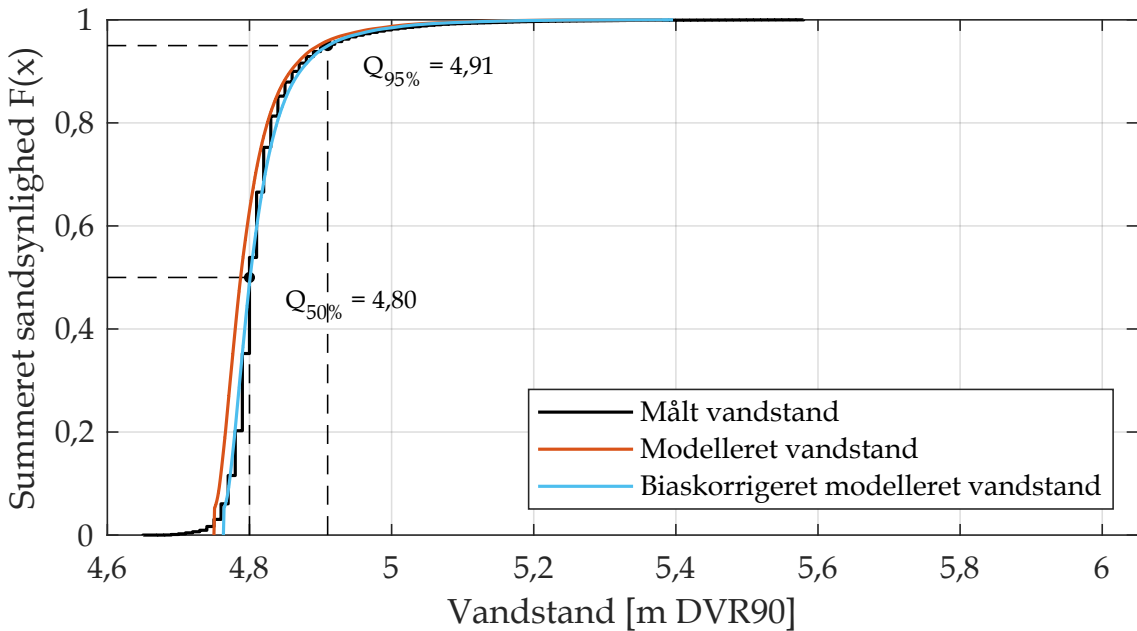
Ligesom for modelleringen af Frejlev Skolevej Bassins vandstand beregnes de statistiske parametre NSE, RMSE og PBIAS. Disse fremgår af tabel 6.2. Alt data er fra 19/08/2021 til 26/03/2025. Sorteret data er uden perioden: 03/12/2024 til 28/02/2025, hvor der er observeret en sneafsmeltning. Perioden er samme periode, som frasorteres ved Frejlev Skolevej Bassin.

Tabel 6.2. Statistiske deskriptorer mellem målt og modelleret vandstand i Aladdinvej Bassin via simpel bassinmodel. Sorteret data er uden perioden: 03/12/2024 til 28/02/2025, hvor der er observeret en sneafsmeltning.

	Tid [min]	RMSE [cm]	NSE [-]	PBIAS [%]
Sorteret data	5	3,6	0,622	0,28
Al data	5	3,8	0,597	0,31
Sorteret data	15	3,6	0,622	0,28
Al data	15	3,8	0,597	0,31

Den beregnede NSE-værdi for Aladdinvej bassinet er forholdsvis lav. Dette kan sandsynligvis skyldes målingernes ringe opløsning. I målt data vil der i perioder være hyppige udslag i målingen, mens modelleringen er mere glat, hvorfor der registreres større forskelle mellem de to serier.

For at yderligere validere modellen, undersøges fordelingen af bassinfyldninger. Fordelingsfunktionen for målt og modelleret vandstand fremgår af figur 6.12.



Figur 6.12. Empirisk fordelingsfunktion for målt, modelleret og biaskorrigeret modelleret vandstand i Aladdinvej Bassin. De to indtegnede percentiler forholder sig til fordelingsfunktionen tilhørende målt vandstand.

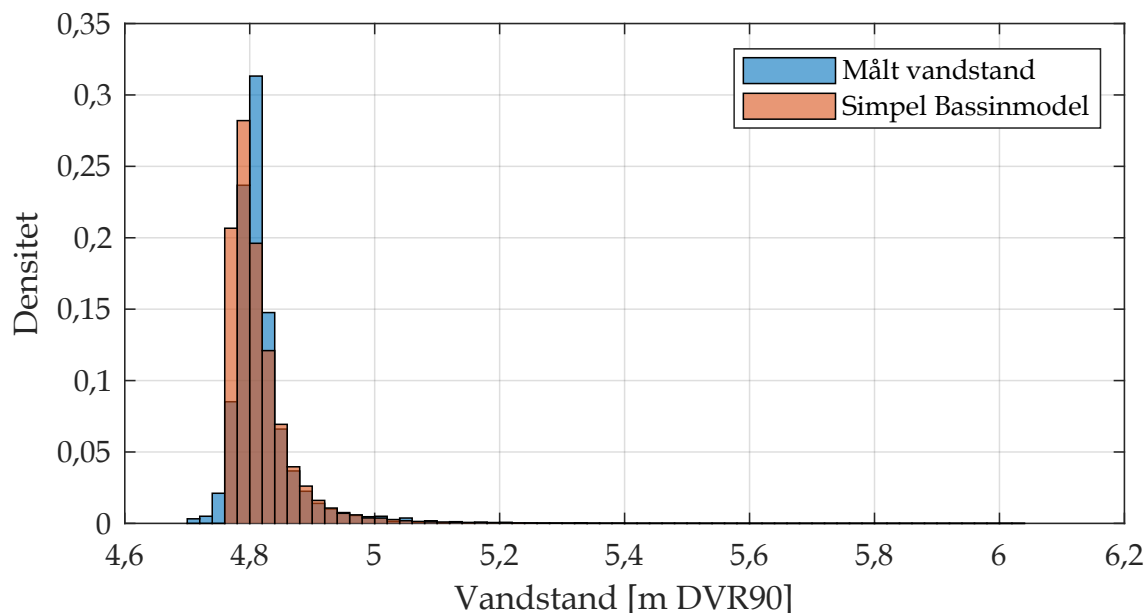
Her ses der stor overensstemmelse især ved de højere vandstande. Ved lavere vandstande er der en minimal større forskel. På baggrund af fordelingsfunktionen ses det også, at regnvandsbassinet kun har opnået en vandstand i kote 5,6, hvor kote 6,05 er den maksimale stuvningskote.

I tabel 6.3 fremgår kvartilsæt for målt og modelleret vandstand. Her ses stor overensstemmelse med maksimalt 1 centimeters forskel. Det ses også, at det er vanskeligt at afgøre, om modellen er præcis ved højere vandstande, idet 95-percentilen er 4,91, hvilket er 1,14 meter fra overløbskanten.

Tabel 6.3. Kvartilsæt samt 95-percentil for målt vandstand og vandstand modelleret med simpel bassinmodel.

Metode	Q _{25%}	Q _{50%}	Q _{75%}	Q _{95%}
Målt	4,79	4,80	4,82	4,91
Modelleret	4,77	4,79	4,82	4,90
Biaskorrigeret	4,78	4,80	4,83	4,91

Ligeledes er der udarbejdet en densitetsfunktion med intervaller af 2 centimeter, som fremgår af figur 6.13. Her ses det, at ved de lave vandstande i kote 4,80, er der forskelle mellem målt og modelleret vandstand, men ved vandstande over dette ses stor overensstemmelse. Der er meget få vandstandsmålinger over kote 4,86, hvorfor det er på begrænset datagrundlag, at de høje vandstande sammenlignes. Der er dog ikke andet data tilgængeligt, hvorfor modellen accepteres til at kunne modellere vandstanden i Aladdinvej Bassinet.



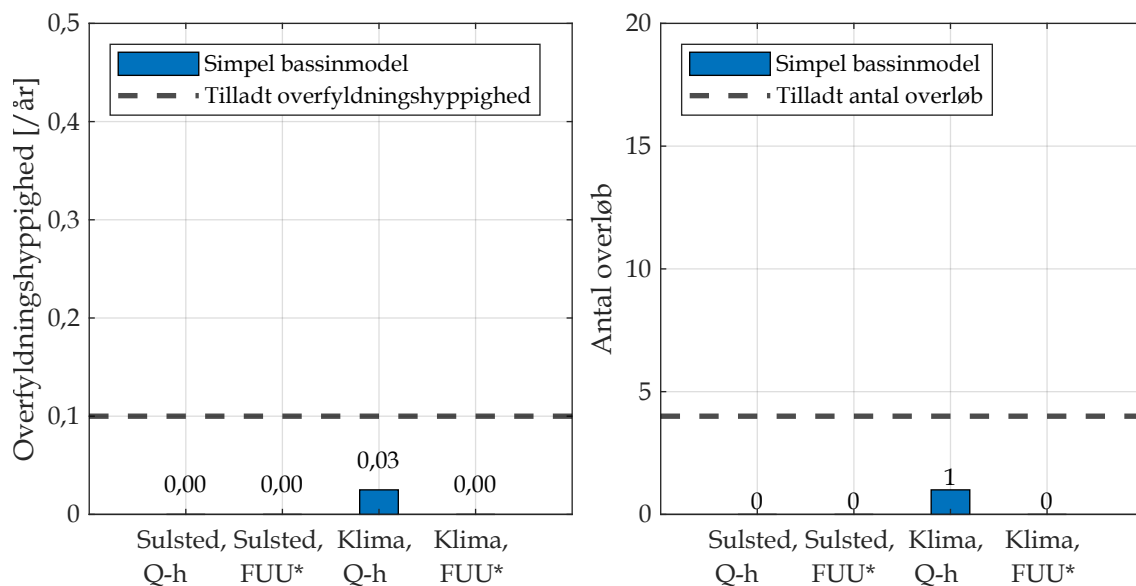
Figur 6.13. Densitetsfordeling af målt og modelleret vandstand i Aladdinvej Bassin.

6.4 Resultater fra modellering med længere nedbørsserier

Til at afgøre overfyldningshyppigheden og antal overløb, anvendes der længere historiske og klimafremskrevne nedbørsserier. Ligesom for Frejlev Skolevej Bassin anvendes den historiske nedbørsserie fra Sulsted fra 1979-2025. Her er der 42 års data tilgængeligt.

Til den klimafremskrevne nedbørsserie, anvendes værktøjet udviklet i forbindelse med VÆRDI, hvortil nedbørsserien "9041" fortsat er den mest anvendelige for Aladdinvej Bassin. Derfor er 40 års klimafremskrevet data tilgængeligt fra 2070-2110 for Aladdinvej Bassin.

På figur 6.14 fremgår overfyldningshyppigheden og antal overløb for Aladdinvej Bassin beregnet med den simple bassinmodel. Der er angivet for både Sulsted- og klimafremskrevet nedbørsserie, resultater for modellering med både Q-h relation og hvor der er en fuldt udnyttet udledningstilladelse til alle tidspunkter (FUU). Aladdinvej har, jævnfør udledningstilladelsen, en tilladt overfyldningshyppighed på 0,1 pr. år, hvilket over 40 og 42 år svarer til 4 overløb. For resultater af tidsserierne se bilag B.



Figur 6.14. Overfyldningshyppighed og antal overløb for modelleringen af vandstand i Aladdinvej Bassin. Der er modelleret for historisk data i 42 år og klimadata i 40 år.

* FUU = Fuldt udnyttet udledningstilladelse: 31,4 L/s.

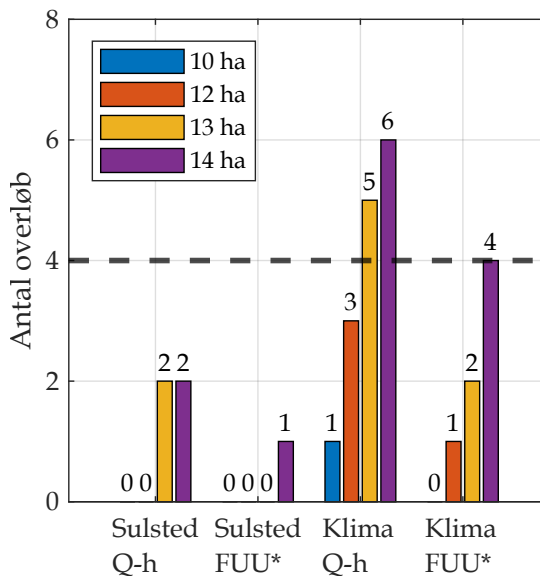
Det fremgår, at historisk set ville Aladdinvej ikke have et overløb, hverken med Q-h relation eller en fuldt udnyttet udledningstilladelse. Med den klimafremskrevne nedbørsserie og Q-h relation forekommer 1 overløb, hvor 4 er tilladt.

Det vurderes dermed, at Aladdinvej Bassinet er overdimensioneret med det nuværende opland koblet til regnvandsbassinet. Det nuværende areal tilkoblet bassinet er 10 befæstede hektar.

Det er undersøgt, hvor stort et areal der, med henblik på både nuværende og fremtidige forhold, er muligt at tilkoble Aladdinvej Bassinet og fortsat overholde udledningstilladelsen. Dette fremgår af figur 6.15. Det ses, at ændres der ikke på vandbremsen installeret, kan der tilkobles yderligere 2-3 befæstede hektar under fremtidige forhold. Udnyttes udledningstilladelsen fuldt kan der i stedet tilkobles 4 befæstede hektar. Forudsættes det, at befæstelsesgraden fortsat er 0,32 svarer dette til en total forøgelse af det totale bidragende opland på henholdsvis 20-30% og 40 %.

For Aladdinvej Bassinet kan der gennem arbejdet med vandstandsmålinger fra fire år ikke drages entydige konklusioner på hvorvidt bassinet påvirkes markant af ydre faktorer som ind- og udsivning, omend der i nogle perioder kan observeres dyk i vandspejlet under det permanente vandspejl. Dette skyldes sandsynligvis fordampning, hvilket stemmer overens med observationerne fra figur 6.7, hvor vandføringen ud af bassinet i sommermånederne er større. Samtidig kan det ses, at anvendes der data med lav opløsning, såsom 10 mm, vil der opstå større usikkerhed i udarbejdelsen af Q-h relationen, især ved lavere vandstande. Det er dog fortsat muligt at udarbejde en Q-h relation på baggrund af dette data. Kurven for vandbremsen tyder på, at den ved højeste vandstand, vil udlede det maksimalt tilladte vandføring på 31,4 L/s. Dette er dog ikke observeret i det tilgængelige data, hvor højeste målte vandstand er 45 centimeter fra overløbskanten.

Foretages der simuleringer af længere tidsserier, er regnvandsbassinet fortsat overdimensioneret, da der kun observeres 1 overløb med klimafremskrevet regn. Med formodning om, at Aladdinvej Bassinet er dimensioneret med SVK's Regionale Regnrækkeværktøj, tyder det på, at Aladdinvej Bassinet er dimensioneret for stort med dette værktøj.



Figur 6.15. Modellerede overløb for øgede bidragende oplande. Det befæstede areal er øget fra 10 ha befæstet til henholdsvis 12, 13 og 14 ha.

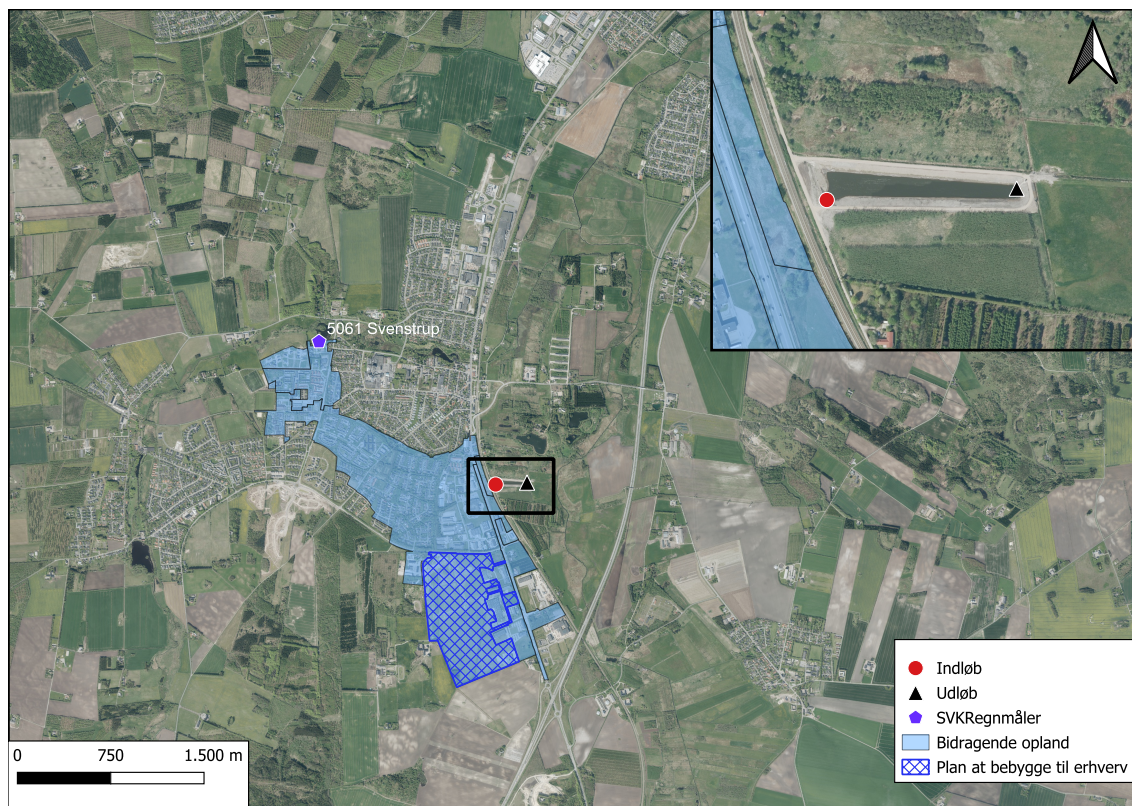
* FUU = Fuld udnyttet udledningstilladelse: 31,4 L/s.

Svenstrup Banevej Bassin 7

I det følgende præsenteres regnvandsbassinet benævnt Svenstrup Banevej Bassin. Karakteristika og datagrundlag for bassinet fremlægges hvorefter bassinets Q-h relation estimeres og vandstanden i bassinet modelleres.

7.1 Datagrundlag og forudsætninger for Svenstrup Banevej Bassin

Svenstrup Banevej Bassinet er anlagt i Svenstrup syd for Aalborg, jævnfør figur 3.1 på side 10, på adressen Svenstrup Banevej 21, 9230 Svenstrup. Det bidragende opland, ind- og udløb til bassinet samt placering af nærmeste SVK regnmåler 5061 Svenstrup er illustreret på figur 7.1. Regnmåleren står i dag 1,8 km nordvest for bassinet og har målt nedbør siden 1979 med udfald i årene 1990-1998. Jævnfør spildevandsplanen er det på nuværende tidspunkt kun dele af Svenstrup, som er separatkloakeret og samtidig bidrager med afstrømning til Svenstrup Banevej Bassinet. Af figuren fremgår dette areal. Det er desuden markeret, at der i den sydlige del af oplandet findes et område, som planmæssigt skal bebygges til erhvervsområde og dermed vil bidrage mere i fremtiden.



Figur 7.1. Bidragende- og forventet kloakopland, ind- og udløb til Svenstrup Banevej Bassin samt nærmeste SVK regnmåler.

Af tabel 7.1 fremgår relevante karakteristika for det våde regnvandsbassin samt dets opland, hvor tekniske specifikationer er indhentet via ”som udført”tegningen 20 *Længdesnit A – A og tværsnit B – B og C – C bassin – SU.pdf* udleveret af Aalborg Forsyning [Aalborg Forsyning A/S, 2024]. Af det udleverede materiale fremgår det ikke tydeligt hvilken gentagelsesperiode bassinet er dimensioneret efter, hvorfor det antages, at den gængse 5 års gentagelsesperiode lægger til grund for dimensioneringen af det nuværende Svenstrup Banevej Bassin.

Tabel 7.1. Karakteristika for Svenstrup Banevej Bassin.

* mm nedbør der skal falde i oplandet for at fylde bassinet.

** Antaget værdi

*** Jævnfør projekteringsgrundlag [Kristensen, 2022]

Svenstrup Banevej Bassin			
Vådt volumen	1600 m ³	Forsinkelsesvolumen	27000 m ³
Permanent vandspejl	5,4 m DVR90	Maks vandspejl	7,9 m DVR90
Type vandbremse	Ukendt	Udledningstilladelse	100 L/s
Totalt bidragende opland	217 ha***	Befæstet opland	48 ha
Aflaster til	Drækanal til Østerå	Type	Åbent, vådt bassin
Overfyldningshyppighed	0,2/ år**	mm bassin/opland*	66
Idriftsættelse	2024	Data	Fra 11/03/2024 til 04/02/2025

Det planlagte erhvervsområde udgør 53,7 ha af hele det bidragende opland på 217 ha. Ved bassinets anlæg i 2024 blev hele det bidragende opland tilskrevet en samlet befæstelsesgrad på 0,2. Bebygges det planlagte erhvervsområde svarende til en befæstelsesgrad på 0,7, vil det samlede befæstede areal for oplandet ændres [Kristensen, 2021]. Af figur 7.2 fremgår billeder taget af det våde regnvandsbassin på Svenstrup Banevej hvor både indløbet til bassinet og udløbsbrønden kan anes.



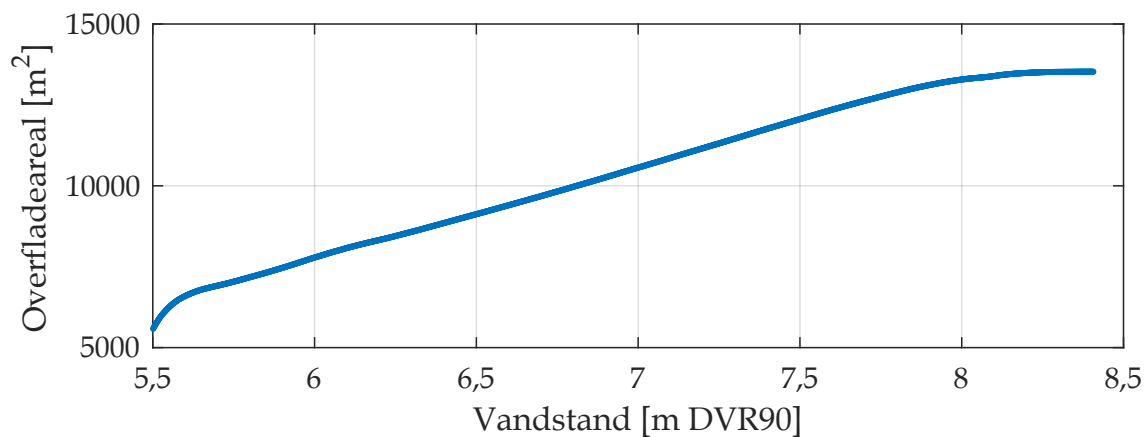
(a) Fra vest hvor indløbet til bassinet er synligt.



(b) Fra øst hvor udløbsbrønden er synlig nederst i venstre hjørne.

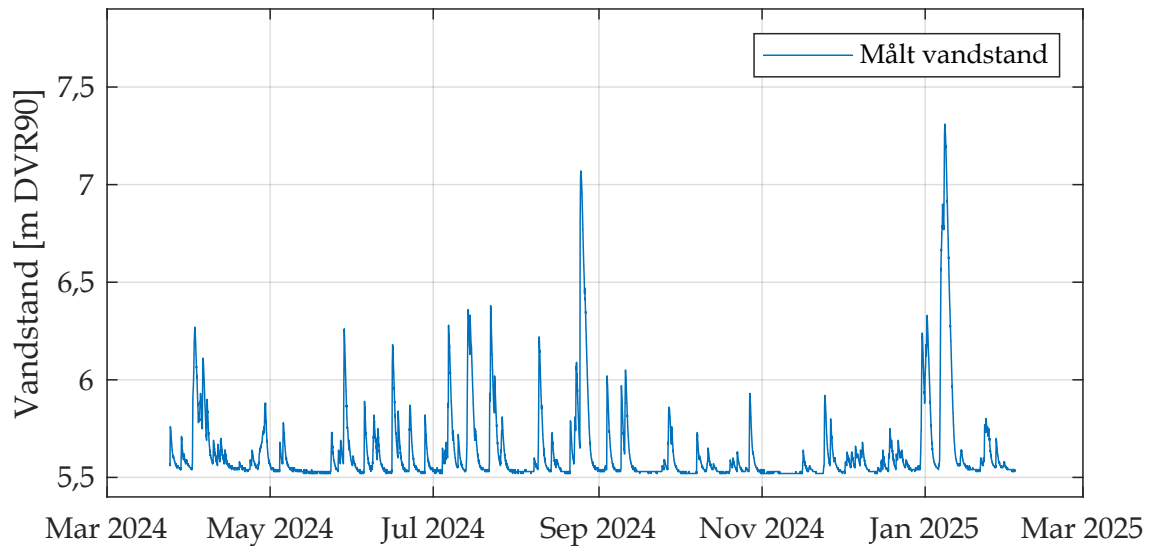
Figur 7.2. Fotos taget af det våde regnvandsbassin på Svenstrup Banevej 23/04/2025.

I forbindelse med BAMSE-projektet har Aalborg Forsyning med fotogrammetri opmålt Svenstrup Banevej Bassin ultimo marts 2025 hvorefter en digital terrænmodel er udleveret. Denne er behandlet i QGIS hvorefter punkter for hver millimeter er hentet. Disse er plottet i figur 7.3, hvor det fremgår, at bassinet har forholdsvis pæne skrå sider - hvilket også fremgår af billederne på figur 7.2. Datapunkterne anvendes efterfølgende som opslagstabel i arbejdet med at modellere vandstand.



Figur 7.3. Opmålt med fotogrammetri af Aalborg Forsyning i forbindelse med BAMSE-projektet ultimo marts 2025.

Som beskrevet er vandstanden i Svenstrup Banevej Bassinet også monitoreret i forbindelse med BAMSE-projektet. Målingerne starter i marts 2024 efter at arbejdet med at udvide og omlægge bassinet blev afsluttet hvorfor der findes knap 1 års vandstandsdata fra det nuværende våde bassin på Svenstrup Banevej. Dette fremgår af figur 7.4. Som præsenteret i tabel 7.1 angiver de tekniske specifikationer, at vandbremsen, og dermed det permanente vandspejl, findes i kote 5,4 omend vandstandsmålingerne tyder på, at dette ikke er sandt, idet den laveste målte vandstand findes i kote 5,52.

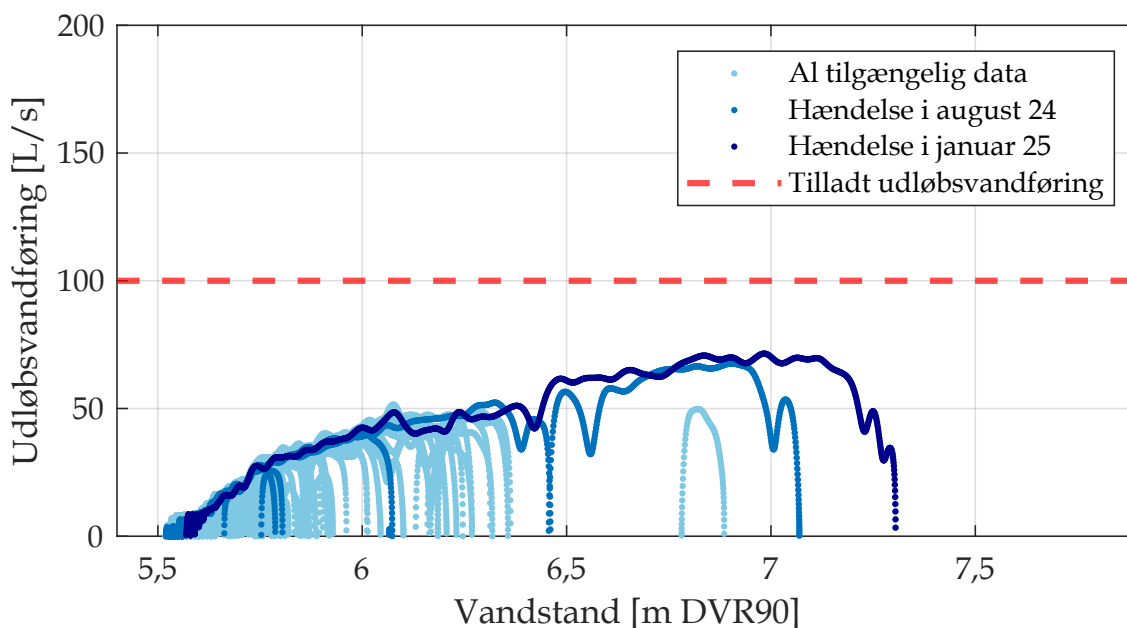


Figur 7.4. Målt vandstand i Svenstrup Banevej Bassinet fra marts 2024.

Det fremgår af figur 7.4 at der over perioden med målt vandstand kun kan identificeres to hændelser, hvor vandstanden i bassinet har været over kote 7 på trods af at bassinet har overløbskant i 7,9. Her er tale om en hændelse i august 2024 og januar 2025, som begge giver en indikation på, at bassinet ikke udnytter sin fulde kapacitet.

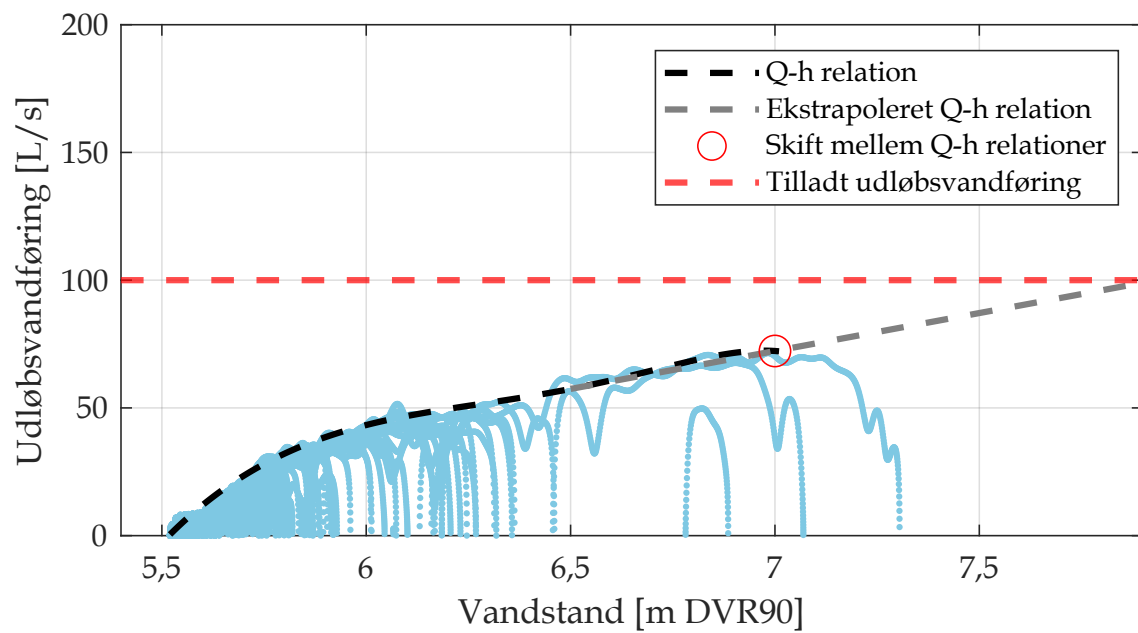
7.2 Karakterisering af udløbsvandføring

Al den tilgængelige data benyttes og der beregnes udløbsvandføringer jævnt fremgangsmåden i afsnit 3.2 og 3.4. Som beskrevet i afsnit 3.1 har målingerne varierende tidslig opløsning afhængigt af vandstanden i bassinet, hvorfor punkterne omdateres således dataserien har fast tidslig opløsning på 5 minutter. Ved at isolere de to førømtalte hændelser, og indtegne dem sammen med beregningerne for alt det tilgængelige data, fås plottet i figur 7.5. Her ses det, at de to hændelser tydeligt bidrager til at kortlægge udløbsvandføringen i spændet over kote 6.



Figur 7.5. Beregnet udløbsvandføring fra Svenstrup Banevej bassinet for data med tidsskridt på 5 minutter.

Af projekteringsgrundlaget, som udgør fundamentet for et anlæg, fremgår det, at der er afsat 1,3 mio. kr. til en membran, men at nødvendigheden skal afgøres af geotekniske undersøgelser i detailprojekteringen [Kristensen, 2022]. Af de tekniske tegninger fremgår der dog ingen membran, hvorfor det må antages, at undersøgelserne viste, at membranen ikke var nødvendig. Af denne årsag kan udsivning potentielt forekomme. Målingerne af vandstand indikerer ikke, at der på bestemte tidspunkter af året sker tømning af bassinet, på trods af at vandspejlet står i nærheden af det permanente vandspejl, hvorfor det ikke umiddelbart lader til at være tilfældet, at der sker udsivning fra bassinet. Ligeledes indikerer udløbsvandføringerne fra henholdsvis august 2024 og januar 2025 ingen sæsonbestemt variation, omend det på baggrund af kun ét års data ikke kan siges med sikkerhed. Den endelige Q-h relation for Svenstrup Banevej Bassinet bestemmes som et 6.gradspolynomium korresponderende til 99-percentilen af alt det målte data og ser ud som i figur 7.6. Da der er filtreret for støj både i forbindelse med omdateringen af datapunkterne og det binomiale filter, anses 99-percentilen for at være anvendelig i dette tilfælde.

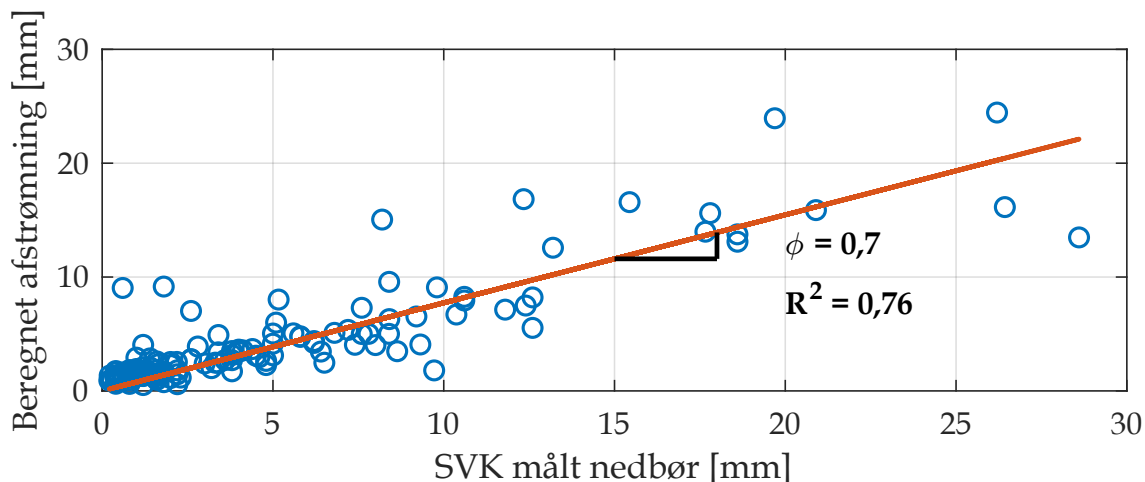


Figur 7.6. Endelig Q-h relation for Svenstrup Banevej Bassinet.

For at arbejde med eventuelle modellerede vandstande over kote 7 ekstrapoleres kurven baseret på hældningen mellem kote 6,5 og 7, se figur 7.6. På baggrund af denne ekstrapolation ligner det, at bassinet ved fuldstændig fyldning til kote 7,9 vil udnytte sin udledningstilladelse på 100 L/s fuldt.

7.3 Modellering og validering af vandstand med simpel bassinmodel

Den hydrologiske reduktionsfaktor for oplandet til Svenstrup Banevej Bassinet bestemmes som 0,7 på baggrund af afstrømning til bassinet og nedbør målt af SVK måleren 5061 Svenstrup 1,8 km nordvest for bassinet. Forklaringsgraden er knap så god omend der også kun findes knap 12 måneders data, som kan bruges i beregningen. Resultatet stemmer overens med hvad der opgives i projekteringsgrundlaget udleveret af Aalborg Forsyning [Kristensen, 2022].



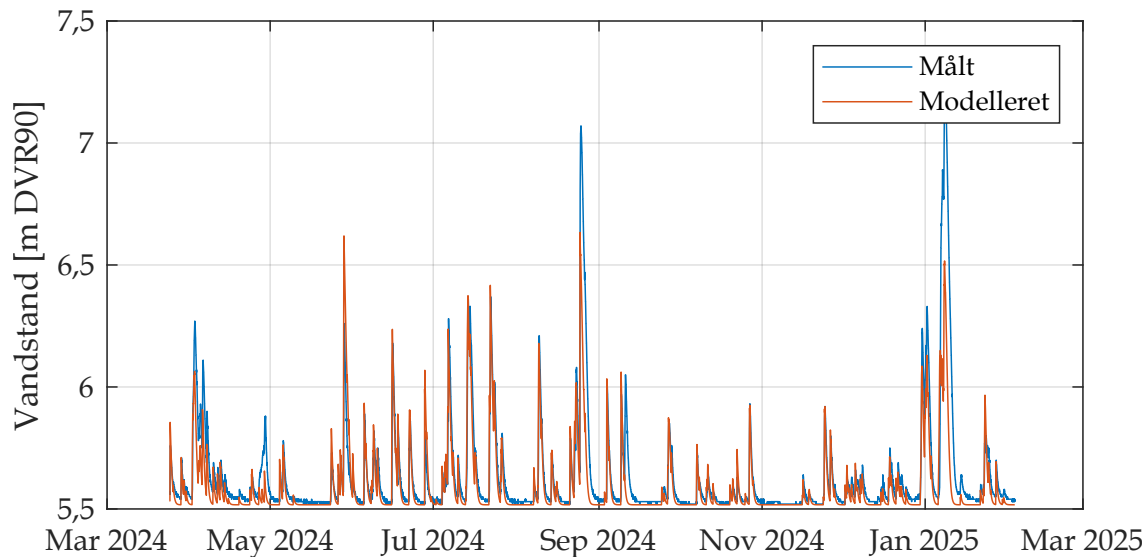
Figur 7.7. Beregning af hydrologisk reduktionsfaktor for Svenstrup oplandet.

Den endelige massebalance for det nuværende bassin på Svenstrup Banevej opstilles i ligning (7.1) hvor polynomiet p af 6. grad samt den lineære ekstrapolation indgår.

$$h(t) = h(t-1) + (Q_{ind}(I(t)) - Q_{ud}(h(t-1))) \cdot \frac{1}{A(h(t-1))} \cdot \Delta t \quad (7.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Hvis } h(t) < 5,52 & \quad Q_{ud} [m^3/s] = 0 \\ \text{Hvis } 5,52 < h(t) < 7,00 & \quad Q_{ud} [m^3/s] = p(h(t - \Delta t)) \\ \text{Hvis } 7,00 < h(t) < 7,90 & \quad Q_{ud} [m^3/s] = 0,0297 \cdot h(t) - 0,1356 \\ \text{Hvis } h(t) > 7,90 & \quad Q_{ud} [m^3/s] = 0,1 \end{aligned}$$

Vandstanden modelleres og sammenholdes med den målte. Dette fremgår af figur 7.8, hvor data for hele perioden ultimo marts 2024 til primo februar 2025 indgår. Det er, som tidligere beskrevet, igen muligt at identificere en hændelse omkring januar/februar 2025, hvor vandstanden i bassinet måles meget større end det modelleres, hvilket skyldes afsmeltning af sne, som SVK regnmåleren naturligvis ikke opfanger som nedbør, hvorfor det ikke indgår i modellen. Herudover ser modelleringen umiddelbart acceptabel ud. Det bemærkes, at der indenfor valideringsperioden ikke modelleres vandstande over kote 7, hvorfor den lineære ekstrapolation ikke endnu har været anvendt.



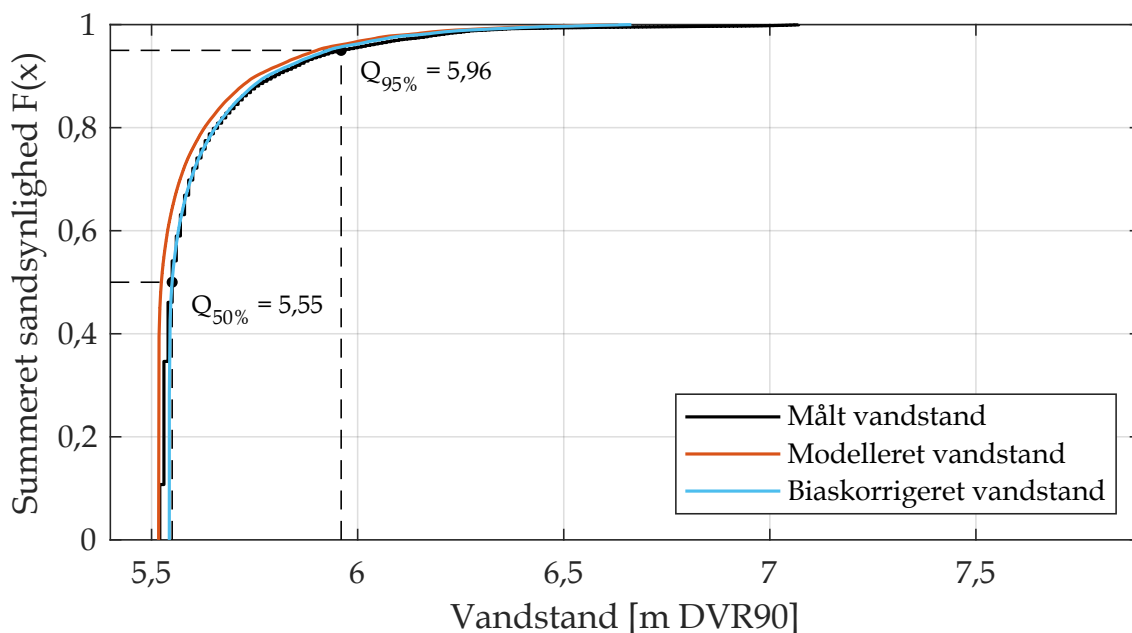
Figur 7.8. Målt og modelleret vandstand i Svenstrup Banevej Bassin.

For at undersøge nøjagtigheden af modellen yderligere, beregnes de statistiske parametre NSE, RMSE og PBIAS. Disse beregnes både for 5- og 15 minutters værdier og for serier hvor perioden med sneafsmeltning er med og hvor den er frasorteret. Dette fremgår af tabel 7.2.

Tabel 7.2. Statistiske deskriptorer for modelleret vandstand i bassinet på Svenstrup Banevej sammenholdt med målt vandstand. Sorteret data refererer til den samlede dataserie hvor perioden 23/12/2024 til 04/02/2025 er frasorteret.

	Tid [min]	RMSE [cm]	NSE [-]	PBIAS [%]
Sorteret data	5	9,6	0,698	0,47
Al data	5	12,7	0,653	0,68
Sorteret data	15	9,6	0,698	0,47
Al data	15	12,7	0,653	0,68

Beregningen af en $PBIAS > 0$ indikerer at de modellerede vandstande underestimeres. Det ses, at frasorteringen af perioden med sneafsmeltning forbedrer alle tre statistiske deskriptorer og indikerer en acceptabel model. Af fordelingsfunktionen på figur 7.9 fremgår det også, at fordelingen af målte og modellerede værdier er nogenlunde tilsvarende, mens en korrigering med PBIAS på 0,47 % giver et endnu bedre resultat.



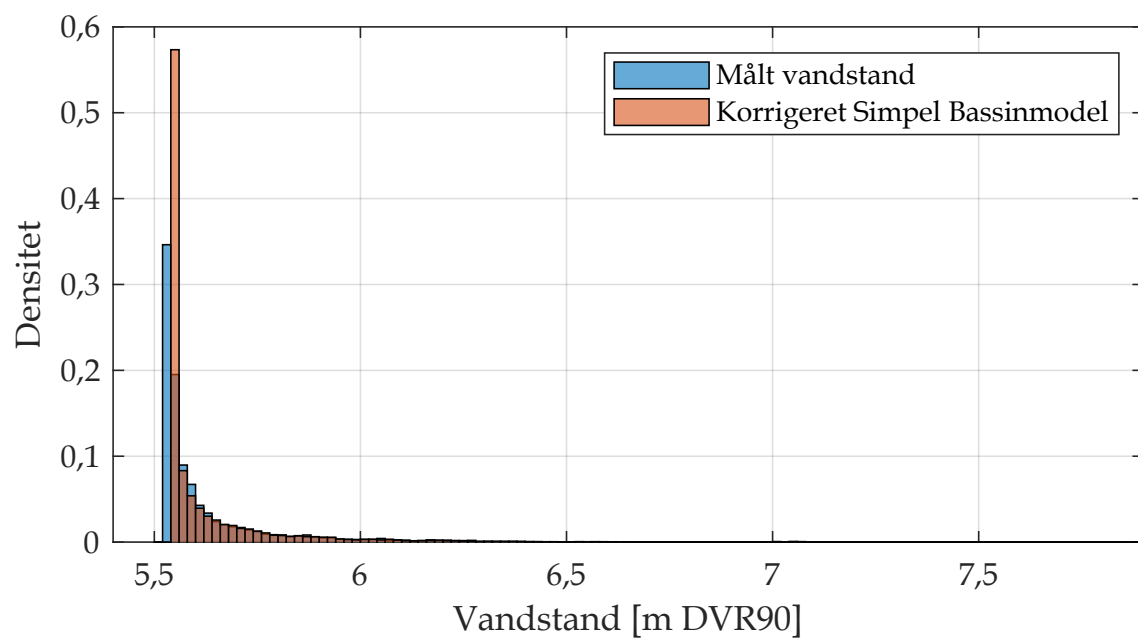
Figur 7.9. Empirisk fordelingsfunktion for henholdsvis målt vandstand, modelleret vandstand og biaskorrigeret modelleret vandstand i Svenstrup Banevej Bassinet. De to indtegnede percentiler forholder sig til fordelingsfunktionen tilhørende målt vandstand.

Bassinet på Svenstrup Banevej har overløbskant i kote 7,9 omend det fremgår tydeligt af fordelingsfunktionen men også frekvensfunktionen i figur 7.10 samt kvartilerne i tabel 7.3, at der inden for perioden med opsat måleudstyr, på omkring ét år, primært er forekommet hændelser i intervallet fra kote 5,5 til kote 6, hvor 95% af målingerne findes under kote 5,96.

Tabel 7.3. Kvartilsæt samt 95-percentil for målt vandstand, vandstand modelleret og biaskorrigeret modelleret vandstand for Svenstrup Banevej Bassinet.

Metode	Q _{25%}	Q _{50%}	Q _{75%}	Q _{95%}
Målt	5,53	5,55	5,62	5,96
Modelleret	5,17	5,52	5,60	5,90
Biaskorrigeret	5,53	5,54	5,61	5,92

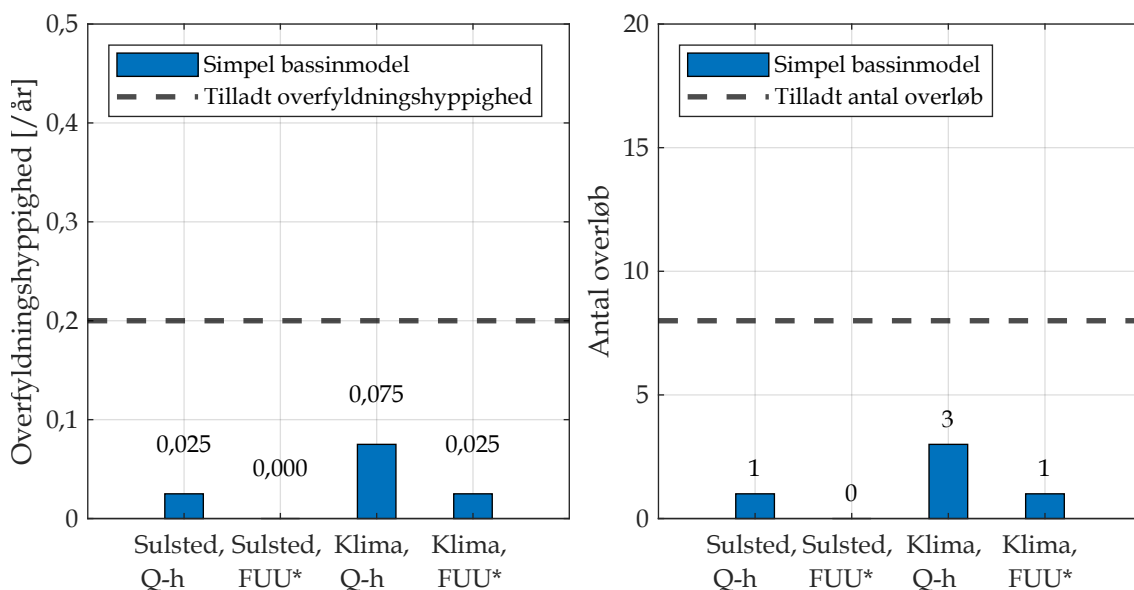
Kvartilerne stemmer pænt overens for den målte og den biaskorrigerede vandstand, med afvigelser på henholdsvis 1 cm og 4 cm omend det er ærgerligt, at 95-percentilen har størst afvigelse, da det er de højeste vandstande, der ønskes modelleret nøjagtigt. Der er meget få, mindre end 5%, vandstandsmålinger over kote 6, hvorfor det er på begrænset datagrundlag, at de højere vandstande sammenlignes. Frekvensfunktionen viser god korrelation mellem de målte og modellerede vandstande med værdier over 5,6. Dette er ikke høje vandstande i bassinet, idet der stadig findes 2,3 m til bassinets overløbskant i kote 7,9, omend det er høje værdier relativt til hvad der er målt over perioden. Da der ikke er andet data tilgængeligt, accepteres denne model.



Figur 7.10. Densitetsfordeling af målt og biaskorrigeret modelleret vandstand i Svenstrup Banevej Bassinet.

7.4 Resultater fra modellering med længere nedbørsserier

De lange historiske og klimafremskrevne nedbørsserier benyttes til at modellere vandstand i bassinet med den biaskorrigerede simple bassinmodel. Sulsted serien fra 1979-2025 benyttes mens klimaserien "9041" for årene 2070-2110 fortsat anses som værende den mest anvendelige hvad angår Svenstrup Banevej Bassinet. SVK måleren 5061 i Svenstrup har også målt nedbør siden 1979 ligesom den i Sulsted, omend 5061 også har en længere periode med udfald, hvorfor Sulsted serien anvendes. De resulterende tidsserier for modelleret vandstand fremgår af bilag C. Modelleret overfyldningshyppighed og antal overløb fremgår af figur 7.11, hvor det igen er antaget, at der i Svenstrup er dimensioneret med udgangspunkt i den gængse gentagelsesperiode på 5 år, hvilket svarer til 8 overløb.



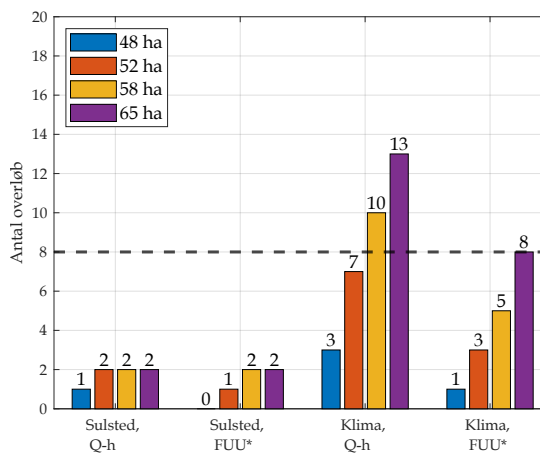
Figur 7.11. Overfyldningshyppighed og antal overløb for modelleringen af vandstand i Svenstrup Banevej Bassinet. Der er modelleret historisk data i 42 år og klimadata i 40 år.

* FUU = Fuldt udnyttet udledningstilladelse: 100 L/s.

Der modelleres kun ét enkelt historisk overløb i Svenstrup Banevej Bassinet jävnfør Sulsted serien. Scenariet med en fuldt udnyttet udledningstilladelse og dermed en udløbsvandføring på 100 L/s resulterer i, at denne hændelse ikke giver et overløb. Med klimanedbør modelleres tre overløb i perioden 2070 til 2110 hvilket reduceres til 1 overløb med den fuldt udnyttede udledningstilladelse, hvorfor den umiddelbare konklusion må være, at bassinet er overdimensioneret til det nuværende bidragende opland hvad angår både historisk og fremtidigt klima.

Som beskrevet i afsnit 7.1 er der i det bidragende opland et areal, som planlægges udvidet og bebygget som et erhvervsområde, hvorfor det må forventes, at størrelsen af det befæstede areal, som bidrager med afstrømning til bassinet, vil ændres. Det undersøges, hvilket antal nødoverløb der modelleres, i tilfælde af at ekstra opland bidrager. Resultaterne fremgår af figur 7.12 hvor antallet af nødoverløb for forskellige befæstede arealer fremgår. Det nuværende befæstede areal er 48 hektar.

Tilkobles et opland svarende til 65 befæstede ha vil der jævnfør modelleringen med den historiske Sulsted serie stadig kun ske to nødoverløb fra bassinet, omend klimaserien giver 13 nødoverløb med den reelle vandbremse og 8, svarende til den gældende gentagelsesperiode, ved modellering med den fuldt udnyttede udledningstilladelse. Forudsættes det, at udledningstilladelsen kan udnyttes fuldt, findes der dermed på nuværende tidspunkt et vådt regnvandsbassin, som har kapacitet til yderligere 17 befæstede ha - dette svarer til en forøgelse af det befæstede areal med 35%. Under antagelse af at befæstelsesgraden fortsat er 0,2 svarer dette til 85 ha som er knap 38% af det nuværende bidragende opland på 217 ha. Kan udledningstilladelsen ikke udnyttes fuldt findes der, jævnfør modelleringen med klimaserien og den reelle Q-h relation, kapacitet til et befæstet opland på 52 - 58 ha svarende til en forøgelse på 4-10 befæstede ha eller 8-20%.



Figur 7.12. Modellerede overløb for øgede bidragende oplande. Det befæstede areal er øget fra 48 bef. ha til henholdsvis 52, 58 og 65 bef. ha. * FUU = Fuld udnyttet udledningstilladelse: 100 L/s.

På Svenstrup Banevej tyder vandstandsmålingerne på, at bassinets bund og sider er tætte, idet der ikke observeres vandtab eller vandstande under det permanente vandspejl, omend dette også konkluderes på et relativt begrænset datagrundlag. Arbejdet med vandstandsmålingerne gav en Q-h relation for bassinets vandbremse, som, efter den valgte tolkning, ser ud til at udnytte den udstedte udledningstilladelse på 100 L/s, når vandstanden i bassinet nærmer sig overløbskanten i kote 7,9. Simuleringerne med historisk og klima nedbør viser dog, at bassinet har ringe udnyttelse af dets kapacitet og, med klimafremskrevet nedbør, kun går i nødoverløb 3 gange i løbet af 40 år på trods af at 8 nødoverløb er tilladt. Forudsættes det, at bassinet på Svenstrup Banevej er dimensioneret med udgangspunkt i SVKs Regionale Regnrækkeværktøj og en antagelse om konstant udløbsvandføring på 100 L/s, tyder det på, at værktøjet i dette tilfælde markant overdimensionerer bassinvolumenet relativt til informationer om oplandsstørrelse og befæstelsesgrad oplyst i udledningstilladelsen. Det vurderes dermed muligt at øge det bidragende opland eksempelvis i forbindelse med udbygningen af det planlagte erhvervsområde.

Sammenligning med gældende dimensioneringspraksis 8

I det følgende relateres gældende dimensioneringspraksis for regnvandsbassiner til resultater fra nærværende speciale.

8.1 Gældende dimensioneringspraksis

Som beskrevet i indledningens afsnit 1.2 er den udbredte dimensioneringspraksis angående regnvandsbassiner i dag at anvende Spildevandskomiteens Regionale Regnrækkeværktøj, der senest ligger som bilag til Skrift 32. Den primære metode til dimensionering af bassinvoluminer er baseret på regnrækker. Disse dimensioneringsregn er konstruerede og syntetiske ekstremhændelser for en på forhånd valgt gentagelsesperiode. Regnrækkerne dannes på baggrund af målte regnserier, hvor der for hver regn i hele serien findes den største gennemsnitsintensitet over forskellige varigheder af eksempelvis 5 eller 10 min via et glidende gennemsnit over hele regnens varighed. Det største af de glidende gennemsnit er da den eftersøgte maksimale intensitet for den givne varighed. Udføres dette for alle regn i serien, bliver resultatet en serie af maksimale intensiteter for de valgte varigheder. Gennemføres statistisk behandling af serierne kan en gentagelsesperiode for intensiteterne slutteligt bestemmes og regnrækker kan opstilles med sammenhørende værdier af gentagelsesperiode, varighed og intensitet. [Winther et al., 2011, s.99] [Spildevandskomiteen, 2023].

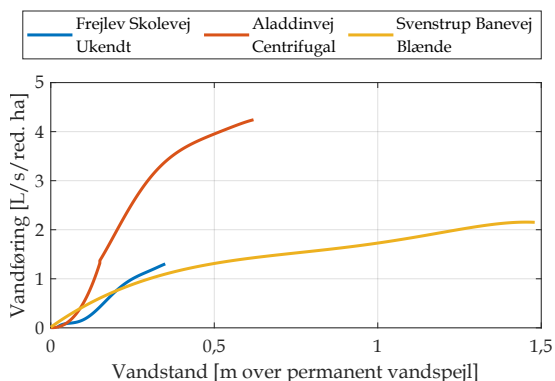
Ved at aggregere resultaterne fra forskellige regnserier kan regionale regnrækker opstilles. Regionalisering gør det dermed muligt at forstå regionale variationer samt at forbedre grundlaget for at vælge repræsentative serier på lokaliteter uden lokalt målte serier. Ved at angive blandt andet en gentagelsesperiode og nærmeste SVK station i Regnrækkeværktøjet hentes relevante parametre fra den regionale regnrække. Kasseregn med relevante intensiteter og varigheder genereres og de svarende tilløbshydrografer benyttes til at beregne det nødvendige bassinvolumen samt den dimensionsgivende varighed.

Endnu en forudsætning for dimensionering med regnrækkeværktøjet er den afskærende lednings kapacitet, også benævnt afløbstallet. Som beskrevet i afsnit 1.2 gives udledningstilladelser, som skal sikre at der ikke sker hydraulisk eller økologisk forringelse af den modtagende recipient. Af den årsag dikterer tilladelsen den afskærende lednings kapacitet. Ved dimensionering med det Regionale Regnrækkeværktøj forudsættes det, at størrelsen af dette afløb fra bassinet er konstant og svarende til en fuldt udnyttet udledningstilladelse (FUU), omend arbejdet i nærværende speciale har vist anderledes.

8.2 Virkelige vandbremsere

I figur 8.1 ses Q-h kurverne for vandbremsere i de tre udvalgte bassiner indenfor Aalborg Forsynings distributionsområde. Q-h kurverne er normaliseret i forhold til det reducerede areal koblet på de tre bassiner. Det ses tydeligt, at de tre vandbremsere overordnet har samme funktion. Mindre vandføring ved lave vandstande og større vandføring ved højere vandstande. Dog er deres forløb forskellige, hvilket også er forventeligt, idet der er tale om tre forskellige vandbremsere. Bemærkelsesværdigt er det dog, at de ikke udleder en konstant vandføring svarende til FUU, som ellers antaget i den gældende dimensioneringspraksis.

Den ukendte ”klokke” vandbremse i udløbsbrønden til Frejlev Skolevej Bassin (se figur 3.9 på s. 18) ser ud til funktionsmæssigt at være meget lig centrifugalbremsen på Aladdinvej. Det ses desuden, at udledningstilladelserne for de tre bassiner er givet på forskellige grundlag. I Frejlev og Svenstrup er udledningerne cirka af samme størrelse. Ved en vandstand 0,25 m over det permanente vandspejl udledes der med begge vandbremsere omkring 1 L/s/red. ha mens der på Aladdinvej udledes omkring 2,5 L/s/red. ha ved samme vandstand. Dette afsløres også af afløbstallet, som for Frejlev Skolevej og Svenstrup Banevej beregnes til henholdsvis 3,0 og 2,9 L/s/red. ha mens det for Aladdinvej beregnes til 6,2 L/s/red. ha. Udledningstilladelserne til de tre bassiner er udstedt i Frejlev: 2021, Aladdinvej: 2016 og Svenstrup Banevej: 2004. I nuværende dimensioneringspraksis forventes et større fokus på sårbarheden af de modtagende vandmiljøer, hvorfor udledningstilladelserne fremover gives med fortsat lavere afløbstal end disse.



Figur 8.1. Estimerede Q-h kurver for vandbremsere i de tre udvalgte bassiner i Aalborg Forsynings distributionsområde normaliseret i forhold til det reducerede areal.

8.3 Dynamisk modellering med output fra SVKs Regionale Regnrækkeværktøj

Jævnfør afsnit 5.5.3 viste modellering i Frejlev, at med FUU i fremtidige forhold, passede de modellerede overløb med gentagelsesperioden, som antages anvendt ved dimensioneringen med SVKs Regionale Regnrækkeværktøj til bassindimensionering (også benævnt SVK-ark). Årsagen til at der observeres for mange overløb både med Sulstedserien og med en klimaserie er, at den installerede vandbremse ikke leverer en vandføring tæt på udledningstilladelsen jævnfør figur 4.8 på side 32. For Aladdinvej og Svenstrup Banevej er tilfældet derimod, at regnvandsbassinerne fremstår overdimensionerede, både med FUU og reel Q-h relation for vandbremsen, hvorfor der i de to scenarier er uudnyttet kapacitet. Det er dog vanskeligt at sige med sikkerhed, hvilke parametre der i sin tid er anvendt i Regnrækkeværktøjet under planlægningen af bassinerne. Herved er det også svært, på dette grundlag, at konkludere, hvorvidt SVK-værktøjet generelt over- eller underdimensionerer bassiner. For at undersøge dette nærmere, udarbejdes en række tænkte scenarier. Fire regnvandsbassiner ”dimensioneres” på baggrund af simple input i SVKs Regnrækkeværktøj. Efterfølgende modelleres vandstanden dynamisk i de fiktive bassiner, for at afdække hvorvidt den ønskede gentagelsesperiode overholdes.

Bassinerne dimensioneres efter en gentagelsesperiode på 5 år og designes til fremtidig brug hvorfor en klimafaktor anvendes. Den eneste afvigelse i input for de fire bassiner er den afskærende lednings kapacitet og dermed afløbstallet. Bassinerne dimensioneres med stadig mindre afløbstal for at undersøge konsekvenserne af dette. Supplerende parametre fremgår af tabel 8.1.

Tabel 8.1. Antaget input og resulterende output fra SVKs Regionale regnrækkeværktøj til bassindimensionering fra Skrift 32. Der er taget udgangspunkt i ét opland hvor forskellige afskærende ledningskapaciteter er anvendt.

* θ angiver den, i SVK-arket, benævnte operationelle faktor. Klimafaktoren udgør 1,25 af de 1,3.

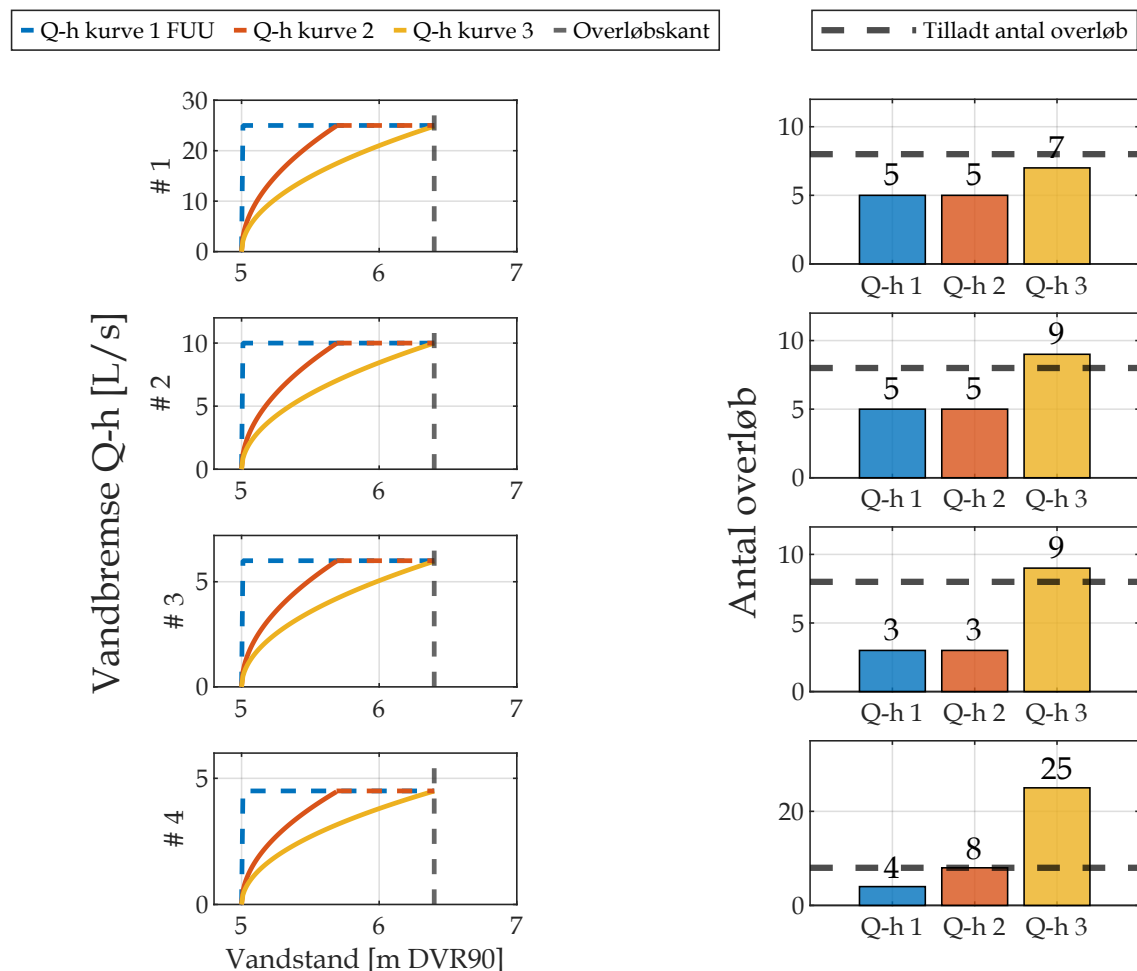
** Angiver hvor mange mm der skal falde i oplandet for at fylde bassinet.

#	A_{bef} [m ²]	ϕ [-]	T [/år]	θ^* [-]	SVK station	Kap. [L/s]	a [L/s/red.ha]	mm bassin pr. opland**	V [m ³]
1	15	0,6	5	1,3	Sulsted	25	2,8	50,0	4.596
2	15	0,6	5	1,3	Sulsted	10	1,1	70,6	6.362
3	15	0,6	5	1,3	Sulsted	6	0,7	84,3	7.617
4	15	0,6	5	1,3	Sulsted	4,5	0,5	93,6	8.428

Som beskrevet i afsnit 5.5.3 kan beregningsmetoden i SVK-arket ikke inkludere effekten af koblet regn, hvorfor det beregnede magasineringsvolumen er øget med 20% i SVK-arket for at kompensere herfor.

På baggrund af det endelige volumen bestemt af Regnrækkeværktøjet, konstrueres et fiktivt bassin med skråningsanlæg 1:5, et firkantet bundareal med varierende størrelse og en fast bundkote, dybde og overløbskant. De lavere afløbstal betyder større tømme tid og dermed større volumen. De fiktive geometrier anvendes til dynamisk at modellere vandstand i bassinerne med den simple bassinmodel opstillet i specialet.

Idet bassinerne er tiltænkt fremtidig brug, anvendes den klimafremskrevne nedbørsserie ”9041”. Serien er 40 år lang, hvorfor en gentagelsesperiode på 5 år svarer til 8 overløb i perioden. Vandstanden modelleres med tre forskellige, tænkte Q-h relationer: fuldt udnyttet udledningstilladelse, svarende til hvad SVK-arket anvender, en potensfunktion som hurtigt opnår det maksimale afløbstal, og en potensfunktion som opnår det maksimale afløbstal i overløbskoten, se figur 8.2. Her fremgår ligeledes resultater for modellerede overløb fra bassinerne.



Figur 8.2. Modellering med tre syntetiske Q-h relationer på bassiner med varierende volumener og afløbstal. De fiktive bassiner har permanent vandspejl i kote 5,0 og overløbskant i kote 6,4.

I alle fire beregninger er det tilfældet, at antallet af modellerede overløb, hvor Q-h kurve 1 FUU benyttes, er færre end antallet svarende til 5 års gentagelsesperioden. Dette gælder også hvad angår Q-h kurve 2, med undtagelse af bassin # 4, hvor antallet af overløb netop stemmer med gentagelsesperioden. Eftersom SVK-arkets beregningsgang anvender en fuldt udnyttet udledningstilladelse med fast afløbstal, må SVK-arket generelt overdimensionere regnvandsbassiner med disse forudsætninger. En Q-h relation med fast afløbstal er dog sjældent mulig at installere, og det er jævnfør figur 8.1 set i bassinerne undersøgt i dette speciale, at vandbremsers virkelige Q-h relationer oftere ligner Q-h kurve 3 fra figur 8.2. I dette fiktive scenarie tyder det dermed på, at overdimensioneringen af volumenet fra SVKs Regionale Regnrækkeværktøj i nogle tilfælde kan udlignes af de installerede vandbremsers

manglende evne til at levere den planlagte udløbsvandføring, hvorfor gentagelsesperioden for overløb tilnærmelsesvist stemmer, omend dette ikke er tilfældet, hvis afløbstallet bliver meget lille. Afløbstallet på 0,5 L/s/red. ha i bassin # 4 resulterer i mere end tre gange flere overløb end tilladt. Dette er en konsekvens af den meget lange tømmetid (>21 døgn), hvorfor bassinet sjældent tømmes fuldstændigt inden nye regnhændelser fylder det igen. Ved de lave afløbstal og lange tømmetider melder Regnrækkeværktøjet også to advarsler. Det advares, at afløbstallet er < 2 L/s/red. ha hvilket kan give problemer i forhold til gyldigheden af den regionale model. Desuden advares det, som følge af tømmetider > 72 timer, at bassinet muligvis er underdimensioneret, da det sjældent tømmes helt - hvilket tydeligt fremgår af bassin # 4. Begge advarsler er afledte konsekvenser af værktøjets hændelsesdefinition og manglende evne til at tage højde for koblede hændelser. Dette er altså en tydelig mangel i Regnrækkeværktøjet, hvortil det også tilføjes, at faktoren på 20% til kompensation for koblede hændelser dårligt kan antages som være gældende i alle tilfælde og for alle bassiner.

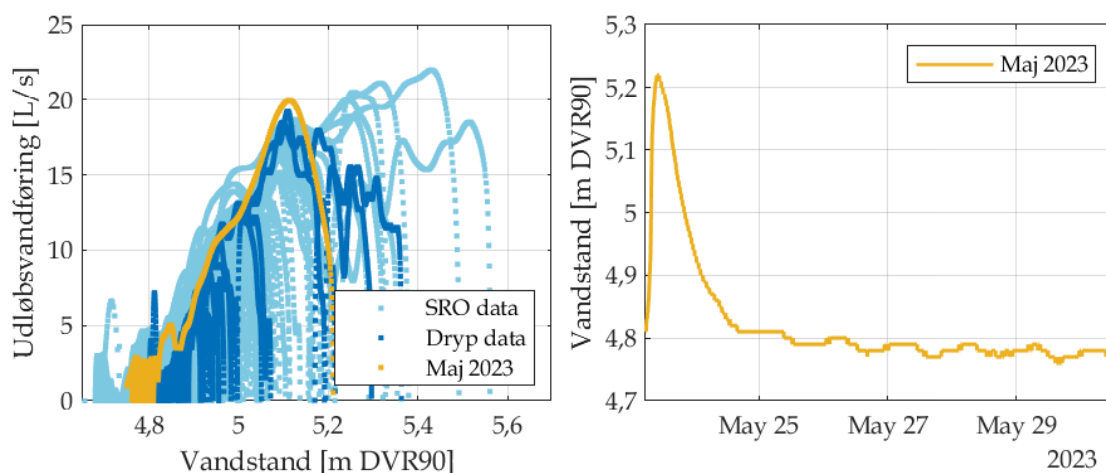
På trods af at de lave afløbstal fastsættes med gode intentioner om minimal belastning af vandmiljøet, bliver resultatet jævnfør tabel 8.1 og figur 8.2 store og dyre regnvandsbassiner, der meget hyppigt går i overløb, hvilket strider imod hensigten med udledningstilladelserne. En omvendt tendens ses dog for de højere afløbstal, hvor det tyder på, at SVK-arket nærmere overdimensionerer bassinet. Regnrækkeværktøjet, som bygger på ekstremstatistik og urealistiske vandbremsere, ser dermed ud til at være for simpelt til at favne alle de parametre, der har afgørende betydning for bassinets funktion og at inklusion af en operationel faktor og et volumentillæg som kompensation for koblede hændelser ikke er en fyldestgørende nuancering. Det understøttes ligeledes af Winther et. al [2011, s. 319], som skriver at "dimensionering af bassiner bør foregå ved brug af lange, lokale regnserier og langtidssimulering (...)" hvortil det kan tilføjes, at dimensioneringen bør tage højde for vandbremsens faktiske kapacitet og funktion.

Diskussion og konklusion 9

I det følgende samles op på forskellige diskussionspointer angående det fortløbende arbejde og der konkluderes løbende på hvilke erkendelser de forskellige iagttagelser og udfordringer har medført.

9.1 Datakvalitet

Arbejdet med at estimere Q-h relationer for de inkluderede våde regnvandsbassiner har vist, at der ikke i alle tilfælde findes en entydig løsning på det bedste estimat af en Q-h kurve. Gennem dette speciale er der gjort flere bemærkelsesværdige observationer, som i større eller mindre grad har en betydning for udformningen af Q-h relationerne. I BAMSE-projektet er der opsat radarer, som måler afstand til vandspejlet i udløbsbrøndene. I dette speciale er der flere steder anvendt data fra Aalborg Forsynings SRO-plattform, idet der er indsamlet data i længere tidsperioder. Det er dog, i nogle tilfælde, ikke muligt udelukkende at anvende SRO-data, hvilket er erfaret i forbindelse med analyse af Aladdinvej Bassinet. På figur 9.1 fremgår til venstre de beregnede udløbsvandføringer for både SRO- og Dryp-data, hvor en hændelse i maj 2023 er fremhævet. Til højre fremgår tømningsforløbet. Denne hændelse er beregnet ud fra SRO-data og ved lave vandføringer ses stor fluktuering i data, hvorfor det ikke er muligt at bestemme Q-h relationens forløb ved de laveste vandstande. For Aladdinvej Bassinet var det således nødvendigt at anvende Dryp-data, idet figur 9.1 viser markante forskelle mellem hændelsen i maj 2023 og Dryp-data ved koter under 4,9. Den fjernaflæste måler på Aladdinvej, som sender data til SRO-plattformen, er sandsynligvis en ultralydssensor, hvorfor noget fluktuation på målingen muligvis kan skyldes temperaturvariationer, som påvirker ultralydssignalet hastighed og dermed giver unøjagtige målinger, hvis ikke sensoren kompenserer korrekt herfor.



Figur 9.1. Til venstre: Fremhævet udløbsvandføring for hændelse i maj 2023 beregnet ud fra SRO-data. Til højre: tømningsforløbet efter nedbørshændelsen.

Udfordringen med datakvalitet gør også, at arbejdet med at analysere bassiner i specialet er afgrænset til tre våde regnvandsbassiner. Indledende undersøgelser blev foretaget i forbindelse med to våde bassiner på henholdsvis Sønderkæret 9 i Klarup og Vodskov Enge 24 i Vodskov samt for det historiske, tørre bassin på Svenstrup Banevej 21 inden ombygningen. I de tre tilfælde findes vandstandsdata over 3-5 år på Aalborg Forsynings SRO-platform omend målingerne har ringe kvalitet. Bassinerne viste sig desuden uegnede, da der i et tilfælde var tegn på nedsivning og i et andet kun var målt vandstande i spændet mellem kote 8 og 8,3 på trods af, at overløbskanten findes i kote 9.

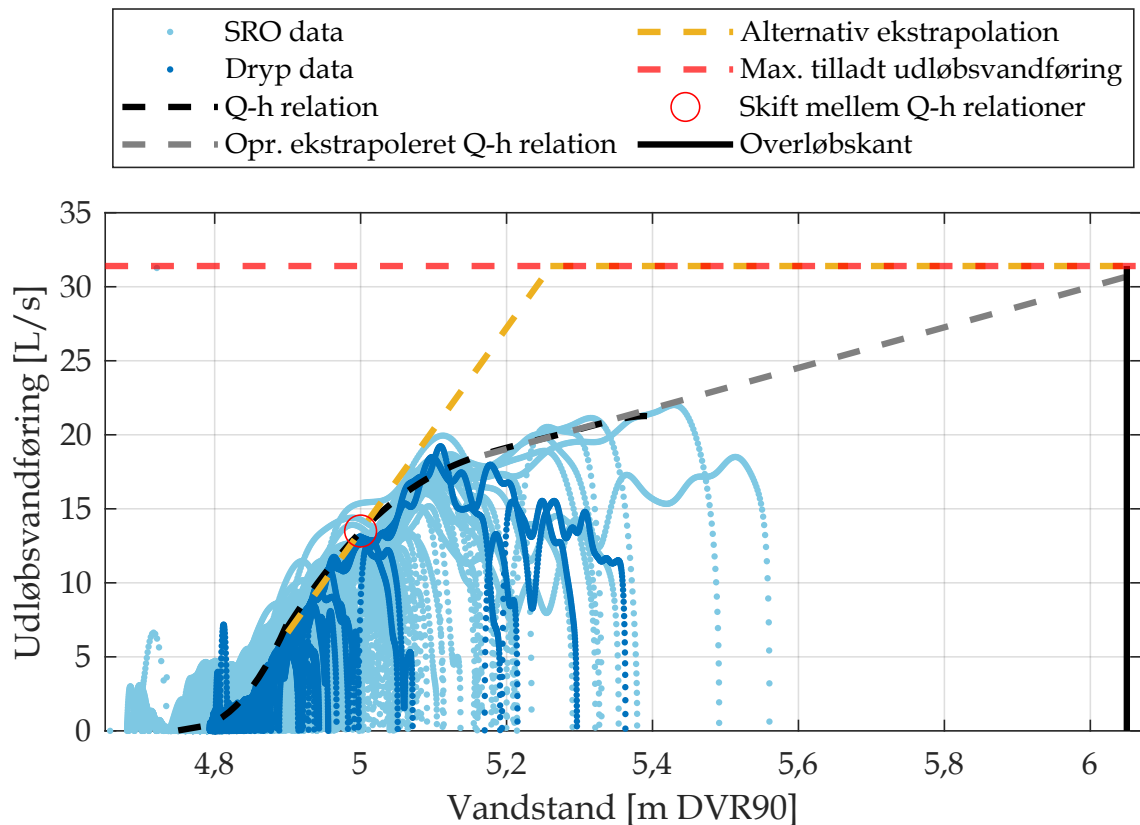
Det vurderes, at skal der udarbejdes resultater som i dette speciale, er data fra Aalborg Forsynings SRO-platform med 10 mm opløsning i nogle tilfælde for lav en præcision til at bestemme Q-h relationen ved de lave vandstande, da fluktuationen udgør for stor en procentdel af den samlede målte vandstand. Dette var tilfældet på Aladdinvej, omend der på Svenstrup Banevej ikke var samme udfordringer idet fluktuationen her kun udgjorde en noget mindre del af den maksimale udløbsvandføring.

Det konkluderes dermed, at for eventuelt at udføre arbejdet med analyser af bassinerne mere systematisk fremadrettet, kræves bassiner, som er velegnede hertil samt dertilhørende vandstandsdata af en hvis kvalitet.

9.2 Effekt af frihedsgrader for Q-h ekstrapolation

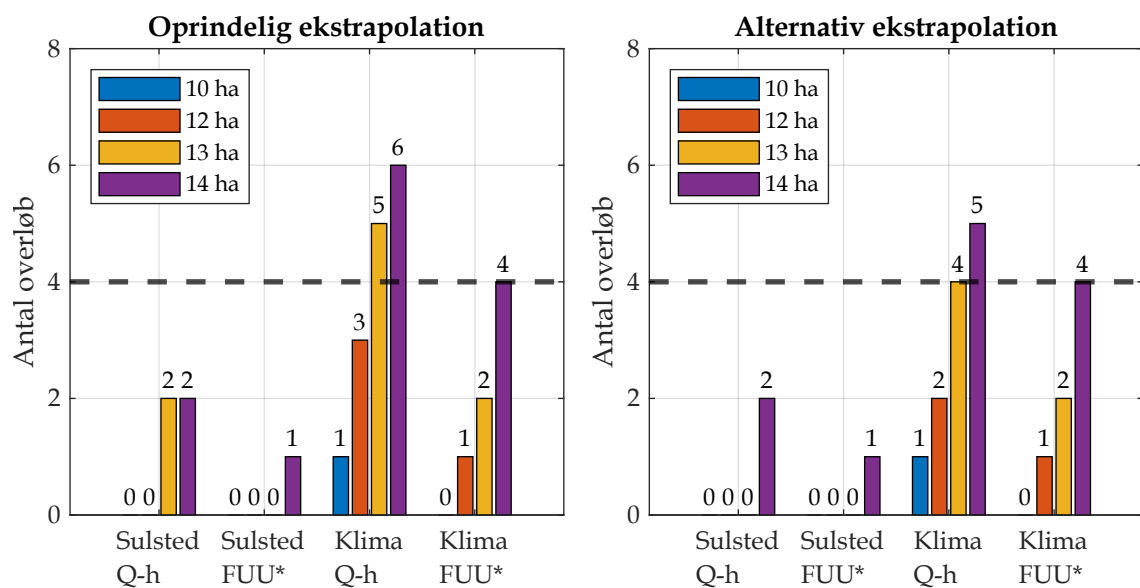
Foruden nødvendigheden af præcist data ved de lave vandstande, er det ligeledes udfordrende at bestemme det fulde forløb af Q-h relationen fra permanent vandspejl til overløbskant. Selvom der kontinuerligt er målt data i flere år, eksempelvis 4,5 år i Aladdinvej Bassin og 3,5 år i Frejlev Skolevej Bassin, er der ingen af disse steder målt et overløb, som kan beskrive Q-h relationen ved de højeste vandstande. I specialet er der udarbejdet ekstrapolationer baseret på hældninger af Q-h relationen ved de kendte vandstande. Det er dog uvist, hvilket forløb der er det korrekte.

For at belyse betydningen af Q-h relationers ekstrapolation, er der undersøgt en alternativ ekstrapolation for Aladdinvej Bassinet. På figur 9.2 fremgår den oprindelige ekstrapolation (grå linje), samt en alternativ ekstrapolation (gul linje). Den nye ekstrapolation er baseret på hældningen mellem kote 4,87 og 5. Oprindeligt er denne hældning fravalgt, da punkter fra kote 5,17 til 5,37 viser en aftagende hældning.



Figur 9.2. Alternativ ekstrapolation (gul linje) af Q-h relation for Aladdinvej. Oprindelig ekstrapolation fremgår af grå linje.

Den alternative ekstrapolation anvendes herefter til at beregne resultater for overfyldningshyppighed. Det kan derfor afgøres, hvilken, hvis nogen, forskel der er i resultaterne for Aladdinvej Bassinet. Resultatet for simuleringen med alternativ ekstrapolation fremgår til højre på figur 9.3, mens resultater med den oprindelige ekstrapolation fremgår til venstre.



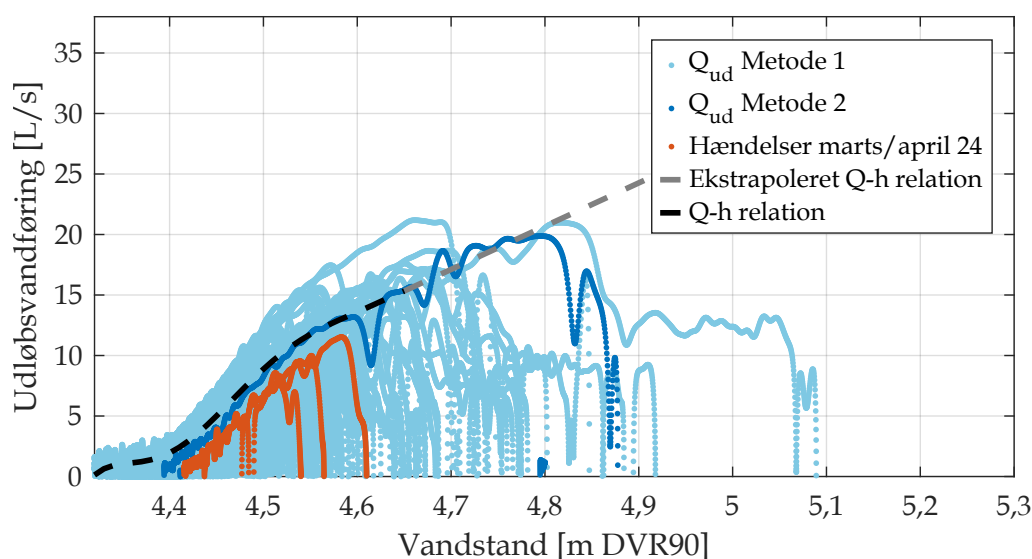
Figur 9.3. Sammenligning af antal overløb med den oprindelige ekstrapolation og den alternative ekstrapolation. Resultaterne med FUU er uændrede.

Ekstrapolationen har en betydning for Aladdinvej Bassin, omend den er lille. Idet den alternative ekstrapolation fuldt udnytter sin udledningstilladelse oftere end den oprindelige, kan der på baggrund af resultaterne simuleret med klimaserien undgås 1 overløb med den alternative ekstrapolation. Det er tidligere fremhævet, at ekstrapolationer er vanskelige at bestemme, da de skal dække over et område, hvor det er uvist hvordan en vandbremse agerer. Derfor kan begge resultater således være det korrekte. Med den oprindelige ekstrapolation var konklusionen, at 20-30 % større befæstet areal kunne tilkobles. Med den alternative ekstrapolation kan 30% større befæstet areal tilkobles.

Det konkluderes, at en markant anderledes ekstrapolation for Aladdinvej Bassinet har en begrænset betydning for antal overløb, omend der vil udledes mere vand med den alternative ekstrapolation. Skal andre regnvandsbassiner analyseres anbefales det, som for Aladdinvej, at der er målte vandstande i længere perioder, så der er større sandsynlighed for at opnå vandstande tæt på overløbskanten. Måles vandstande tættere på overløbskanten, mindskes usikkerheden af ekstrapolationen.

9.3 Jordmatrixens bufferkapacitet

Vandstandsmålingerne i Frejlev Skolevej Bassin afslører udsivning gennem bassinets bund og sider. Det sås eksempelvis under forsøget til metode 2, at vandspejlet i bassinet under forsøget var faldende, på trods af at bassinets vandbremse var lukket. Hvis jordmatricen er i stand til at tage imod vand fra bassinet kan det omvendt ikke afvises, at matricen, hvis den er vandmættet, også er i stand til at frigive vand til bassinet. Som beskrevet i afsnit 5.2.2 og illustreret på figur 5.5 side 38 er der i foråret 2024 målt særdeles højt grundvandsspejl nær Frejlev relativt til årene 2022 og 2023, hvorfor det er relevant at undersøge om bassinet på Frejlev Skolevej her interagerer med vandet i jordmatricen. Der undersøges, i samme stil som for metode 3 til bestemmelse af Q-h kurven, tre bassintømninger i marts/april 2024, hvor der jævnfør SVK måleren 5057 Frejlev Nord ikke er faldet nedbør. Udløbsvandføringen for de tre tømninger ses illustreret sammen med data fra metode 1 og metode 2 til Q-h estimering samt den endelige Q-h relation, modificeret metode 1, på figur 9.4.



Figur 9.4. Undersøgelse af tre tømninger fra marts/april 2024 hvor grundvandsspejlet har været særdeles højt.

Af figuren ses det tydeligt, hvordan udløbsvandføringen fra bassinet i løbet af de tre udvalgte tømninger er mindre end eksempelvis tømningen fra eksperimentet i forbindelse med metode 2 og den valgte Q-h relation for vandbremsen. Hvis udløbsvandføringen jævnfør den anvendte beregningsgang estimeres mindre, end hvad der er fastlagt som Q-h relationen, må der komme vand ind i bassinet samtidig med, at der løber vand ud. Idet der ikke falder nedbør, må vandet komme ind gennem bassinets bund eller sider, hvilket leder til den generelle erkendelse, at jordmatricen rundt om et vådt regnvandsbassin altså kan have bufferkapacitet og dermed kan modvirke store ændringer i bassinets vandspejl i begge retninger. Konceptet er forsøgt illustreret i figur 9.5, hvor vandspejlet i den omkringliggende jordmatrice dikterer hvilken vej vandet bevæger sig ind eller ud af bassinet.



Figur 9.5. Principskitse af vekselvirkning mellem vand i jordmatricen og vandstanden i et vådt regnvandsbassin.

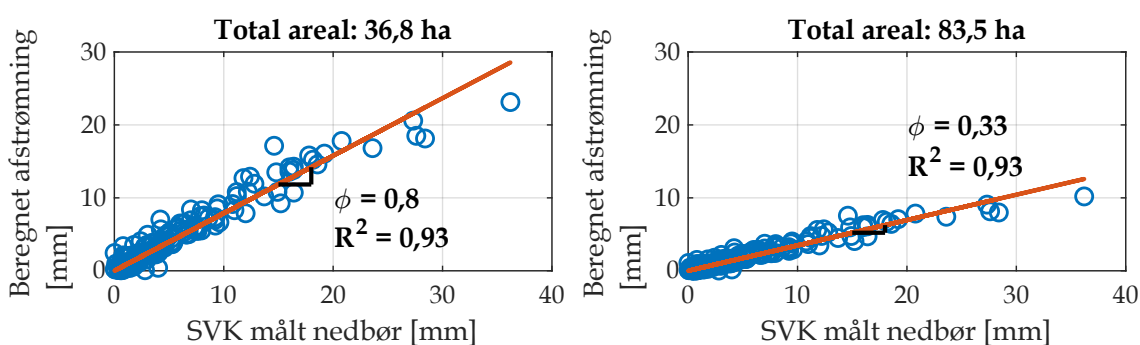
Det kan konkluderes, at i Frejlev kan den omkringliggende jord dermed fungere som ekstra magasinering i situationer, hvor vandspejlet står højere end grundvandsspejlet. Et skybrud en sensommer, hvor grundvandsspejlet står lavt, kan dermed give et lavere resulterende vandspejl i bassinet, fordi jordmatricen magasinerer noget af vandet. Var bassinet anlagt med membran, ville alt vandet magasineres i bassinet og vandstanden ville dermed blive højere. Omfanget og størrelsesordenen af magasineringen i jorden er ikke bestemt nærmere, hvorfor det ikke med sikkerhed kan siges, om det har reel indflydelse på antallet af overløb fra bassinet. Kontinuerlig overvågning af regnvandsbassinene via vandstandsmålinger virker dermed også som driftsovervågning. Som netop illustreret, kan målingerne afsløre om bassinet er tæt eller om det taber vand. Dette kan eksempelvis være hvis et permanent vandspejl ikke opretholdes eller som iagttaget i bassinet på Frejlev Skolevej, hvor vandstanden falder på trods af at vandbremsen er lukket.

9.4 Vandstandsmålinger som verificering af tekniske informationer

Arbejdet med de tre bassiner, især estimeringen af Q-h kurver, besværliggøres af, at der i flere tilfælde findes notater, tekniske tegninger, nyere opmålinger, kort eller udledningstilladelser, som er uenige hvad angår eksempelvis koten for det permanente vandspejl, koten for overløbskanten eller størrelsen af det totale bidragende opland. Ligeledes kan der forefindes både notater, forslag eller vurderinger angående de forskellige bassiner, hvor det i flere tilfælde er svært at afgøre, hvad der reelt er vedtaget. Eksempelvis findes der "som udført" tekniske tegninger af bassinernes bundkote, stuvningskote med mere, omend der i senere opmålinger af bassinet registreres andre koter. Dette kan i værste tilfælde lede til fejl, hvis eksempelvis vandstandsmålingerne er lavet som "afstand til permanent vandspejl" og som resultat af uenigheden kotesættes forkert. Denne fejl leder til, at et forkert

overfladeareal benyttes, hvorfor forkerte voluminer beregnes, når der måles ændringer i vandstanden, hvormed der i sidste ende estimeres en forkert Q-h kurve.

Udledningstilladelsen udstedt angående Frejlev Skolevej Bassin angiver, som nævnt i afsnit 3.3, et totalt bidragende opland på 83,5 ha omend arbejde udført i forbindelse med RADIATE viser, at det kun er 36,8 ha der reelt bidrager med afstrømning til bassinet [Aalborg Kommune, 2021] [Ahm et al., 2024]. Dette skyldes blandt andet et system af mindre, tørre bassiner internt i oplandet. Det teoretiseres, at vandet nedsives i disse og dermed ikke bidrager videre i systemet. I nærværende speciale blev en hydrologisk reduktionsfaktor på 0,8 bestemt for oplandet på baggrund af arealet på 36,8 ha og befæstelsesgraden 0,4. Var der i stedet taget udgangspunkt i oplandet på 83,5 ha angivet i udledningstilladelsen, var reduktionsfaktoren da bestemt til 0,33 jævnfør figur 9.6. Det anses som værende urealistisk, at kun 33% af nedbøren, som falder på de befæstede arealer, bidrager til afstrømning i systemet, hvorfor det indikerer, at arealet er for stort.



Figur 9.6. Hydrologisk reduktionsfaktor beregnet for varierende størrelse af bidragende opland til Frejlev Skolevej Bassin. De sammenhørende værdier er summeret over 1 døgn.

Arbejdet med vandstandsmålingerne til at bestemme Q-h relationer og efterfølgende afstrømning til og fra de våde regnvandsbassiner bidrager dermed til at belyse unøjagtigheder angående bassinernes bidragende oplande. Det er muligt, at det samme gælder bassinet på Aladdinvej. Her beregnes, i specialet, en hydrologisk reduktionsfaktor på 0,5. Det vil igen sige, at kun 50% af nedbøren, som falder på befæstede arealer i oplandet, vil afstrømme til bassinet. Dette anses også som værende ikke realistisk, hvorfor det tyder på, at det reelt er et mindre opland end de 31,4 totale ha angivet i udledningstilladelsen, der bidrager med afstrømning til bassinet [Aalborg Kommune, 2016]. Unøjagtigheden af det bidragende oplands størrelse kan eksempelvis skyldes områder, der endnu ikke er bebygget, fejkoblinger i systemet eller ukendte interne forsinkelser. Det får dog ingen betydning for det resulterende antal modellerede overløb. Fejlen angående oplandets størrelse udlignes netop af den hydrologiske reduktionsfaktor, hvorfor mængden af vand i systemet stemmer.

Det konkluderes dermed, at vandstandsmålinger kan være medvirkende til at belyse hvorvidt udledningstilladelser, tekniske tegninger og notater stemmer overens med virkeligheden. Vandstandsmålingerne bidrager til at afgøre hvorvidt angivene koter på tekniske ”som udført” tegninger er i overensstemmelse med virkeligheden og kan eksempelvis afsløre det permanente vandspejls reelle niveau. Dette er observeret på Svenstrup Banevej, hvor det permanente vandspejl på tekniske tegninger er angivet i kote 5,4 mens vandstandsmålingerne

viser kote 5,52. I arbejdet med validering af den modellerede vandstand er det også muligt at identificere, om arealet angivet i udledningstilladelsen er i overensstemmelse med det areal, der reelt bidrager med afstrømning til bassinet. Det er også erfaret, at analysen af bassiner kræver meget præcist data, hvor især koter i regnvandsbassinet og udløbsbrønden samt de valgte tekniske løsninger hos forsyningen er af stor betydning. Er dette ikke tilgængeligt besværliggøres arbejdet betydeligt, idet større antagelser skal anvendes.

9.5 Simpel bassinmodels anvendelighed og begrænsninger

I dette speciale er der undersøgt flere tilgange til at udvikle et værktøj, som skal kunne bestemme, hvorvidt et regnvandsbassin overholder sin udledningstilladelse. Jævnfør afsnit 5.5 blev det vurderet, at det simple værktøj: simpel bassinmodel er i stand til at afgøre overfyldningshyppigheden tilfredsstillende, idet der er stor overensstemmelse mellem dette værktøj og de to andre: simpel rørmodel og MIKE URBAN model.

Resultaterne, som dette speciales konklusioner baserer sig på, er derfor udarbejdet med det simple bassinværktøj. Dette værktøj har flere fordele i og med der kun anvendes få parametre til at producere et resultat for overfyldningshyppighed. Disse er: funktion for overfladeareal, kontinuerligt målt vandstandsdata, nedbørsserier samt viden om det bidragende opland.

Værktøjet kræver hverken en hydrologisk- eller hydraulisk model, og har derfor ikke en spatial forståelse af oplandet eller ledningsnettet. Der skal blot kendes et bidragende opland samt beregnes en hydrologisk reduktionsfaktor. Herved kan det simple bassinværktøj, i modsætning til simpel rør- og MIKE URBAN model, anvendes i arbejdet med eventuelle fremtidige udvidelser af et opland, hvor hydrologiske eller hydrauliske parametre ikke allerede er kendte. Dette er eftervist ved Aladdinvej Bassin og Svenstrup Banevej Bassin, hvor det er beregnet, hvor meget areal, der eventuelt yderligere kan tilkobles bassinerne således den gældende udledningstilladelse stadig overholdes. Med henblik på potentielle anvendelsesmuligheder, såsom planlægning af nye separatkloakerede områder, er dette en klar fordel, da det samme ikke er muligt med simpel rør- og MIKE URBAN model.

MIKE URBAN modellen inkluderer derimod en kompleks hydrologisk- og hydraulisk model, hvorfor afstrømning til bassinet vil fremstå mere nøjagtigt end det simple bassinværktøjs afstrømningsmodel. I case study'et af Frejlev Skolevej Bassin viste resultaterne stor overensstemmelse mellem de tre afstrømningsmodeller, men MIKE URBAN modellen viste generelt færre overløb. Dette skyldes inkluderingen af eksempelvis initialtab. I MIKE URBAN modellen for Frejlev er den beregnede hydrologiske reduktionsfaktor anvendt, og valideringen viste, at MIKE URBAN modellen er korrekt. Der er derfor en høj grad af tillid til disse resultater.

Det forventes derfor også, at udfører en forsyning samme analyse af regnvandsbassiners hydrauliske funktion vil en MIKE URBAN model oftest blive anvendt, idet der er stor tillid til MIKE URBANs beregninger. En MIKE URBAN model af et opland er ofte tilgængelig hos forsyninger og derfor kræver det ikke analyse af oplandet for først at finde input parametre, som det er nødvendigt ved det simple bassinværktøj.

I sådanne tilfælde som Frejlev, vil resultaterne være nøjagtige, omend det ikke altid vil være tilfældet for andre oplande. MIKE URBAN anvendes ofte i dimensioneringspraksis,

da det anses som det mest nøjagtige værktøj til at angive eksempelvis stuvninger i ledningssystemer og langtidssimuleringer. Til dimensionering af ledningssystemer, kan det forventes at en MIKE URBAN model er kalibreret til at være konservativ, og at der sjældent er foretaget en korrekt bestemmelse af den hydrologiske reduktionsfaktor. Skal en model være konservativ, vil der være mere vand i systemet, hvorfor den modellerede vandstand i et regnvandsbassin vil være overestimeret. Dette vil i stedet angive, at regnvandsbassinet er underdimensioneret, hvilket ikke nødvendigvis er korrekt.

Anvendes MIKE URBAN modellen som afstrømningsmodel, kræver det derfor en omhyggelig kontrol af input og en validering af den modellerede vandstand. Til sammenligning er den simple bassinmodel et effektivt værktøj, som kan besvare et komplekst spørgsmål uden lange simuleringstider. Eksempelvis kræver det 15 timer at beregne afstrømningsmodellen for Frejlev Skolevej Bassin for 42 års data med MIKE URBAN modellen, hvor der er < 5 sekunders beregningstid for den simple bassinmodel for samme tidsperiode.

På baggrund af resultaterne for antal modellerede overløb og det ovenstående beskrevne, vurderes det, at hvis der er en MIKE URBAN model tilgængelig, som er kontrolleret og valideret, er der god grund til at have tillid til modellens resultater. Er der derimod uvisse parametre i MIKE URBAN modellen i relation til eksempelvis tilkoblede arealer eller hydrologisk reduktionsfaktor, anbefales det at anvende det simple bassinværktøj. Værktøjet har dog ingen inkludering af ydre faktorer såsom: fordampning, interaktion med jordmatricen og forbindelse til grundvand med mindre dette eksplicit inkorporeres. Dette ses eksempelvis også ved Frejlev Skolevej Bassin, hvor det modellerede vandspejl i foråret 2024 ikke er optimalt grundet et højt grundvandsspejl. Modelleringen i Frejlev fremstår flere steder som mindre præcis sammenlignet med resultaterne for Aladdinvej og Svenstrup Banevej grundet vekselvirkningen med jordmatricen.

Det er muligt at inkorporere eksempelvis fordampning, det kræver dog datakilder såsom solindstråling og temperatur, hvilket er datakilder som ofte ikke er tilgængelige i lange perioder som nedbør er. Derfor skal der i stedet anvendes antagelser om årlige eller daglige svingninger af parametrene. Dette arbejde er omfattende, og det er begrænset, hvor stor betydning det har for det endelige resultat. I den simple bassinmodel er der estimeret en Q-h relation, som jævnfør kapitel 4 kan dække over flere ydre faktorer, hvorfor det implicit er muligt at inkorporere vandtab i det simple bassinværktøj.

Ens for de tre modelleringer er, at sneafsmeltningen i januar 2025 ikke kan modelleres korrekt idet værktøjerne udelukkende anvender nedbør til at modellere vandstanden og dermed ikke kan inkorporere sneafsmeltning. Af denne årsag kan der også forekomme flere overløb end angivet i specialets resultater. I kapitel 8 beskrives det, at SVKs Regionale Regnrækkeværktøj dimensionerer på baggrund af kasseregn baseret på målte nedbørsserier, hvorfor gældende dimensioneringspraksis ligeledes ikke inkluderer sneafsmeltning. I Danmark opleves sjældent store sneafsmeltninger, og det er potentielt også begrænset, hvor mange der vil forekomme i fremtiden. Derfor vurderes det, at det ikke er nødvendigt at inkludere i dansk dimensioneringspraksis.

En del af forudsætningerne for den simple bassinmodel er anvendelse af en klimafremskrevet nedbørsserie udvalgt ved brug af værktøjet: VÆRDI. Anvendelsen af en klimafremskrevet nedbørsserie erstatter derfor anvendelsen af en klimafaktor, ofte på 1,25, som eksempelvis anvendes i SVKs Regionale Regnrækkeværktøj. En klimafremskrevet nedbørsserie fra

VÆRDI er der udarbejdet under hensyntagen til eksempelvis et ændret klima med længere tørvejrperioder om sommeren, men mere intens nedbør, og kortere tørvejrperioder om vinteren. Det forventes derfor ikke, at årsnedbøren vil stige med 25%, som det ofte angives i SVK-arket.

De udarbejdede nedbørsserier, som udvælges med VÆRDI, er alle stokastisk genereret og er konstrueret med henblik på at opnå mindst mulig afvigelse mellem forventet værdi (fastsat af DMI) og beregnede værdier ud fra de genererede nedbørsserier. Ud fra i alt 15 parametre udvælges det hvilke der skal optimeres med henblik på. Der er derfor mulighed for, at visse parametre har større afvigelse end andre. Så længe der samlet set opnås mindst mulig afvigelse accepteres regnserien.

Benyttes VÆRDI værktøjet, skal der tages stilling til hvilke parametre, der er korrekte at optimere i henhold til formålet med regnen. [Thorndahl og Andersen, 2021] Til anvendelse i dette speciale har der derfor været optimeret med fokus på de lange varigheder samt en gentagelsesperiode på 5 år. Det er derfor uvist om en anden nedbørsserie, optimeret på andre parametre, ville resultere i en markant anden overfyldningshyppighed.

Det vurderes, at klimaserier fra VÆRDI er en mere korrekt metode end at anvende en klimafaktor, som ikke tager højde for de forventede ændringer i nedbørsmønster i fremtiden. Det anbefales at vælge optimeringsparametrene med henblik på bassindimensionering, for at minimere risikoen for en nedbørsserie, som ikke er tilpasset de længere regnvarigheder korrekt.

Det konkluderes derfor, at den simple bassinmodel er i stand til at modellere vandstanden tilfredsstillende for simple oplande som Frejlev, Sønder Tranders og Svenstrup. Det kan forventes, at i oplande med eksempelvis pumpestationer, tæt bebyggelse i større byer eller store oplande vil mere komplekse afstrømningsmodeller være mere oplagte, idet kompleksiteten er større i sådanne områder. Anlagte våde regnvandsbassiner er indtil videre oftest anlagt i byer såsom Frejlev, Sønder Tranders og Svenstrup, hvorfor det simple bassinværktøj i langt størstedelen af tilfælde, kan anvendes.

9.6 Begrænsninger i gældende udledningstilladelser

I de tre undersøgte udledningstilladelser er det beskrevet at ”udledningerne må ikke medføre hyppigere eller større oversvømmelse af vandløbene end der ville være tilfældet ved afstrømning fra vandløbenes naturlige opland” [Aalborg Kommune, 2021] samt et punkt som henviser til den specifikke recipient, eksempelvis beskriver udledningstilladelsen fra Aladdinvej at ”udledningen må ikke være til hinder for at målsætningen kan opfyldes for Landbækken der modtager spildevandet” [Aalborg Kommune, 2016]. Dette antages i dag som overholdt, hvis regnvandsbassinerne dimensioneres efter en given gentagelsesperiode og en maksimalt tilladt udløbsvandføring. Det er dog muligt at stille sig kritisk overfor, hvorvidt disse parametre reelt er de mest meningsfulde at overholde med henblik på ikke at belaste den modtagende recipient hydraulisk eller økologisk.

Den gældende praksis med en gentagelsesperiode for overløb på 5 år er sandsynligvis udvalgt på baggrund af økonomiske årsager og ikke under særlig hensyntagen til økologisk tilstand eller genoprettelsestid i de modtagende recipienter. Ligeledes dimensioneres regnvandsbassiner på baggrund af en gentagelsesperiode for regn, hvormed det antages, at de skadevoldende effekter har samme gentagelsesperiode som regnen [Winther et al., 2011]. Altså dimensioneres bassinerne på baggrund af størrelsen på en given regn og ikke størrelsen af den belastning et overløb yder på en recipient, omend der i udledningstilladelserne reelt stilles krav til hydrologisk gentagelse.

Et mere oplagt kriterie er derimod volumen eller ”peakflow” af et nødoverløb samt genoprettelsestiden for den modtagende recipient. Dette forsøges også, som citeret, inkorporeret i udledningstilladelsens nuværende krav omend punkterne er mangelfulde, upræcise og ikke umiddelbart målbare, hvorfor det ikke er muligt at afgøre, om de overholdes, selvom sådanne krav er mere meningsfyldte end kravet om at overholde et antal overløb. Det er dog mere omfattende at skulle overholde disse punkter, hvorfor det formodes, at udledningstilladelserne ikke har fastsat disse krav mere præcist. Skal det undersøges om recipienten forringes hydraulisk, skal der udarbejdes en hydraulisk vandløbsmodel og en habitatmodel hvis økologiske krav skal undersøges. Disse modeller er ressourcekrævende at opstille, hvorfor de formentlig ikke indsættes som en del af kravet i udledningstilladelserne.

Det konkluderes dermed, at som udledningstilladelser i dag er udformet og formuleret er det muligt, eksempelvis gennem arbejdet i nærværende speciale, entydigt at afgøre hvorvidt udledningstilladelser overholdes med henblik på den påbudte gentagelsesperiode for overløb. Er kommunerne eller forsyningerne derimod interesserede i, at tilladelserne har større fokus på at undgå hydraulisk og økologisk forringelse af recipienten, må udledningstilladelserne udspecificeres og de relevante påbud gøres målbare, således det entydigt kan afgøres hvorvidt de overholdes.

9.7 Evaluering af bassiner og dimensioneringspraksis

Modelleringerne af vandstand i Frejlev Skolevej Bassin viste, at bassinet med de reelle nuværende forhold er underdimensioneret omend det efter gældende dimensioneringspraksis med antagelser om FUU ser ud til at have en passende størrelse. Ydermere viste vandstandsmålingerne, at vandet i bassinet interagerer med den omkringliggende jordmatrice og at vandbremsen ikke leverer en vandføring i nærheden af den tilladte. På Aladdinvej i Sønder Tranders og på Svenstrup Banevej i Svenstrup er billedet dog modsat. Vandstandsmålingerne tyder ikke på utætte bassiner og vandbremserne ser ud til, ved maksimal vandstand, at kunne udnytte udledningstilladelsen. De to bassiner er overdimensionerede hvad angår både de reelle forhold og gældende dimensioneringspraksis. Begge bassiner har uudnyttet kapacitet og kan magasinere vand fra henholdsvis 20% og 15% forøgelse af det totale bidragende opland forudsat at de nuværende vandbremsere beholdes. Konklusionen angående de tre analyserede bassiner er dermed, at bassinet i Frejlev ikke overholder sin udledningstilladelse, men at de to øvrige gør med så stor margin, at de fremstår tydeligt overdimensionerede. Resultaterne fra undersøgelserne er dermed ikke entydige, og det er ikke muligt at drage overordnede og generelle konklusioner angående alle regnvandsbassiner i hverken Danmark eller Aalborg Forsynings distributionsområde. Ønskes dette, skal arbejdet omfatte flere bassiner af forskellig størrelse og karakter herunder eksempelvis tørre bassiner eller bassiner med andre typer af oplande, omend det, som beskrevet, er essentielt at bassinerne egner sig hertil.

Arbejdet med SVK-arkets dimensionering af regnvandsbassiner i kapitel 8 viste også tvetydighed. Ved store afløbstal, $> 1 \text{ l/s/red. ha}$, fremstår de fiktive bassiner enten en anelse for store eller passende i størrelse afhængigt af hvilken Q-h kurve vandstanden i bassinet modelleres med. Bliver afløbstallet mindre, $< 1 \text{ L/s/red. ha}$, vender tendensen. Tømmetiden stiger markant, hvorfor bassinerne bliver meget store. Modelleringerne med en virkelighedstro Q-h kurve viser dog hyppigere overløb på trods af det store bassinvolumen, hvorfor det konkluderes, at afløbstallet, angivet i udledningstilladelserne, har afgørende betydning for bassinets størrelse og dets hydrauliske funktion. Som bemærket i kapitel 8 er det dog især bassiner med lave afløbstal, der i gældende dimensioneringspraksis er udfordringer med at dimensionere korrekt, hvorfor det konkluderes, at Spildevandskomiteens Regionale Regnrækkeværktøj til bassindimensionering ikke har den fornødne nuancering og det nødvendige kompleksitetsniveau til fortsat at kunne anvendes i dimensioneringen af fremtidens regnvandsbassiner. Det er derimod af særlig interesse at kunne inkludere Q-h relationer fra vandbremsere, fremfor at antage en fuldt udnyttet udledningstilladelse samt at foretage en dynamisk modellering med længere, klimafremskrevne regnserier fremfor at benytte en klimafaktor og 20% volumentillæg for koblede hændelser.

Arbejdet med vandstandsmålinger, Q-h kurver og dynamisk modellering med klimanedbør har bidraget til at afdække regnvandsbassinernes hydrauliske funktion herunder eksempelvis mængden af vand vandbremsen leverer og om bassinerne er tætte. Desuden belyses det, om det bidragende opland angivet i udledningstilladelsen stemmer overens med bassinets tilsluttede areal. Det kan konkluderes hvorvidt bassinerne overholder deres udledningstilladelse mens arbejdet også har belyst den gældende dimensioneringspraksis' utilstrækkelighed.

Litteratur

- [Aalborg Forsyning A/S, 2019] Aalborg Forsyning A/S (2019). Frejlev Skolevej - Bassin. Tværsnit A-A og tværsnit B-B. Og tegning: Udløbsbrønd 42051301.
- [Aalborg Forsyning A/S, 2023] Aalborg Forsyning A/S (2023). Aladdinvej, Sønder Tranders - bassin. Udløbsbrønd 04401311 - plansnit og snit A-A - SOM UDFØRT. Og tegning: Bassin, snit A-A og B-B - SOM UDFØRT.
- [Aalborg Forsyning A/S, 2024] Aalborg Forsyning A/S (2024). Svenstrup Banevej, Svenstrup - Bassin. Længdesnit A-A og tværsnit B-B og C-C SOM UDFØRT. Og tegning: Udløbsbrønd 40500501 SOM UDFØRT.
- [Aalborg Kommune, 2016] Aalborg Kommune (2016). Tilladelse til udledning af separat regnvand fra nyt udløb U0.4.40a med udledning til Landbækken, Sønder Tranders.
- [Aalborg Kommune, 2021] Aalborg Kommune (2021). Tilladelse til ændret udledning af separat overfladevand fra U4.2.05 i Frejlev til grøft med udløb i Hasseris Å.
- [Aalborg Kommune, 2025] Aalborg Kommune (2025). Spildevandsplan 2021-2032 - Separatkloakeringsstrategien. <https://aalborgkommune.viewer.dkplan.niras.dk/plan/33#/110476>.
- [Aalborg Universitet, 2025] Aalborg Universitet (2025). AAU Measurements. <https://radardata.dk/aaumeasurements/>.
- [Ahm et al., 2024] Ahm, M. S., Laursen, R., Nielsen, J. M., Rasmussen, M. R. og Nielsen, J. E. (2024). RADIATE - RADARPROGNOSER TIL VANDSEKTOREN. <https://www.danva.dk/media/10688/112020-radiate-vudp-slutrapport.pdf>.
- [Allen et al., 1998] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. og Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e0j.htm#annex%202.%20meteorological%20tables>.
- [Aslyng og Hansen, Ny] Aslyng, H. og Hansen, L. (N/y). Vandfordampning og vindhastighed ved statens forsøgsstationer. https://dcapub.au.dk/pub/plant_eavl_64_185.pdf.
- [Bach, 2025] Bach, J. (2025). Undersøgelse af regnvandsbassiner og måleudstyr til projektet: Bassinmonitorering til brug for design- og systemeffektivisering. Semesterrapport tilkoblet BAMSE-projektet i perioden september 2024 til januar 2025.
- [Calypso, 2025] Calypso (2025). Calypso - 34.2907 indtag1 Vandstand (m DVR90). <https://www.watsonc.dk/software/>.

- [Control, 2025] Control, C. A. (2025). Afløbsbegrænsninger fra CAC. <https://cac-aqua.dk/produkter/regnvand.aspx>.
- [DANVA, 2018] DANVA (2018). Designguide for regnvandsbassiner DANVA vejledning nr. 102, 2018.
- [DHI, 2019a] DHI (2019a). MOUSE Pipe Flow Reference Manual. <https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2019/Cities/MOUSEPipeFlowReference.pdf>.
- [DHI, 2019b] DHI (2019b). MOUSE SURFACE RUNOFF MODELS Reference Manual. <https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2019/Cities/MOUSERunoffReference.pdf>.
- [DMI, 2025a] DMI (2025a). Klimaatlas. <https://www.dmi.dk/klima-atlas/data-i-klimaatlas?paramtype=evap&mapttype=kom>.
- [DMI, 2025b] DMI (2025b). Observationer. <https://www.dmi.dk/friedata/observationer>.
- [Gregersen et al., 2023] Gregersen, I. B., Arnbjerg-Nielsen, K., Sørup, H. J. D., Paludan, B., Thorndahl, S., Møllerup, A. L., Illeris, T. S. og Rosbjerg, D. (2023). Bassindimensionering med SVKs Regionale Regnrækkeværktøj. <https://spildevand.skomiteen.dk/bassindimensionering-med-svks-regionale-regnraekkevaerktoej/>.
- [Kristensen, 2021] Kristensen, A. (2021). NOTAT: Vurdering af bassinbehov for K-område 4.0.50 og 4.0.51, Svenstrup.
- [Kristensen, 2022] Kristensen, A. M. (2022). Projektgrundlag Svenstrup Banevej, Bassin.
- [Københavns Kommune, 2011] Københavns Kommune (2011). Tørre bassiner. https://kk.sites.itera.dk/apps/kk_pub2/pdf/1319_hevqou3qum.pdf.
- [Larsen, 2021] Larsen, T. (2021). Lecture note on wind effects in estuaries and lakes.
- [Mikkelsen og Olesen, 1991] Mikkelsen, H. E. og Olesen, J. E. (1991). Sammenligning af metoder til bestemmelse af potentiel vandfordampning. https://dcapub.au.dk/pub/S_beretning_2157_1991.pdf.
- [Mosbaek, 2024] Mosbaek (2024). Produkter. <https://www.mosbaek.dk/dk/produkter>.
- [Nielsen et al., 2020] Nielsen, K. T., Nielsen, J. E., Uggerby, M. og Rasmussen, M. R. (2020). Modeling of subsurface throughflow in urban pervious areas. Journal of Hydrologic Engineering, 25(12):04020050.
- [OTT, ud] OTT (u.d.). Operating instructions - Groundwater Datalogger: OTT ecoLog 500, OTT ecoLog 500 3G. Teknisk datablad for tryktransducer.
- [QGIS, 2025] QGIS (2025). QNEAT3. <https://plugins.qgis.org/plugins/QNEAT3/#plugin-about>.

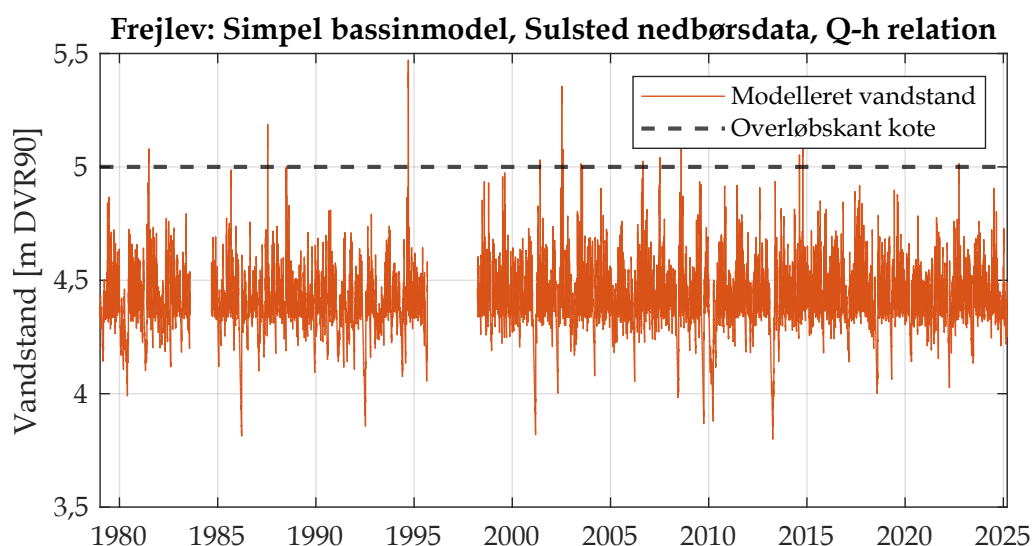
- [QGIS Documentation, 2024] QGIS Documentation (2024). 27.1.13. Raster terrain analysis. https://docs.qgis.org/3.28/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/rasterterrainanalysis.html#qgishypsometriccurves.
- [Schaarup-Jensen, 1996] Schaarup-Jensen, K. (1996). Beregning af ikke-stationære strømninger i afløbssystemer.
- [Siemens AG, 2023] Siemens AG (2023). Embrace the proven. Welcome the new. SITRANS LR100 series compact 80 GHz radar transmitters for hassle-free level measurement. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:193bee5a-2606-4368-b63f-aa88fd7ee16d/dipab10081-00-7600lr100-300.pdf>.
- [Spildevandskomiteen, 2005] Spildevandskomiteen (2005). Funktionspraksis for afløbssystemer under regn. <https://spildevandskomiteen.dk/skrift-nr-27/>.
- [Spildevandskomiteen, 2023] Spildevandskomiteen (2023). Regional variation af ekstremregn i Danmark (1979-2019) inkl. korrektion for klimaændringer. <https://spildevandskomiteen.dk/skrift-nr-32-2/>.
- [Thorndahl og Andersen, 2021] Thorndahl, S. og Andersen, C. B. (2021). Climacs: A method for stochastic generation of continuous climate projected point rainfall for urban drainage design. Journal of Hydrology, 602:126776.
- [Vollertsen et al., 2012] Vollertsen, J., Hvitved-Jacobsen, T. og Nielsen, A. H. (2012). Faktablad om dimensionering af våde regnvandsbassiner.
- [VUDP, 2025] VUDP (2025). BAMSE - Bassinmonitorering til brug for design- og systemeffektivisering. <https://vudp.dk/projekter/bamse.aspx>.
- [Winther et al., 2011] Winther, L., Linde, J. J., Jensen, H. T., Mathiasen, L. L. og Johansen, N. B. (2011). Afløbsteknik. 6. udgave, 5. oplag 2021.

Resulterende tidsserier Frejlev

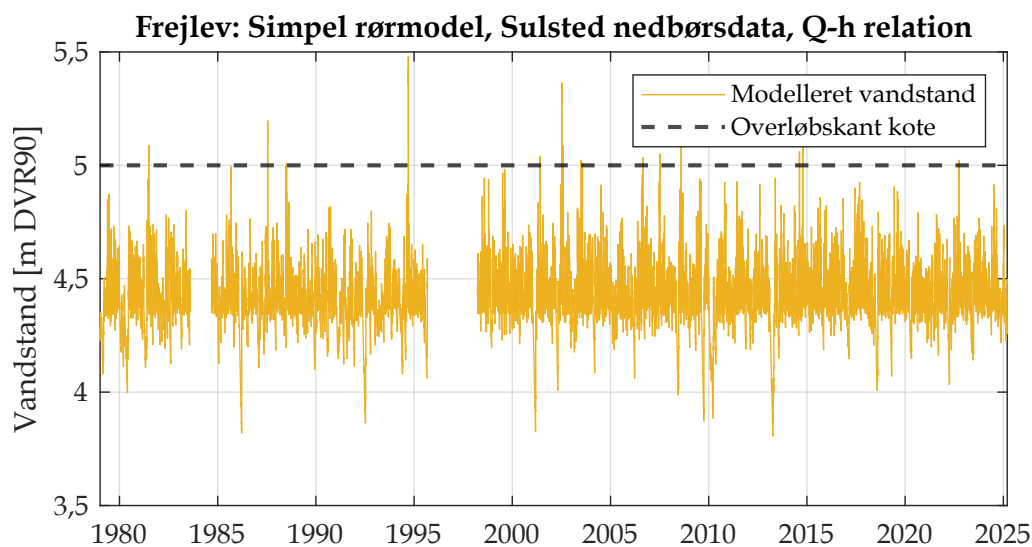
Skolevej A

Sulsted regnserie med Q-h relation

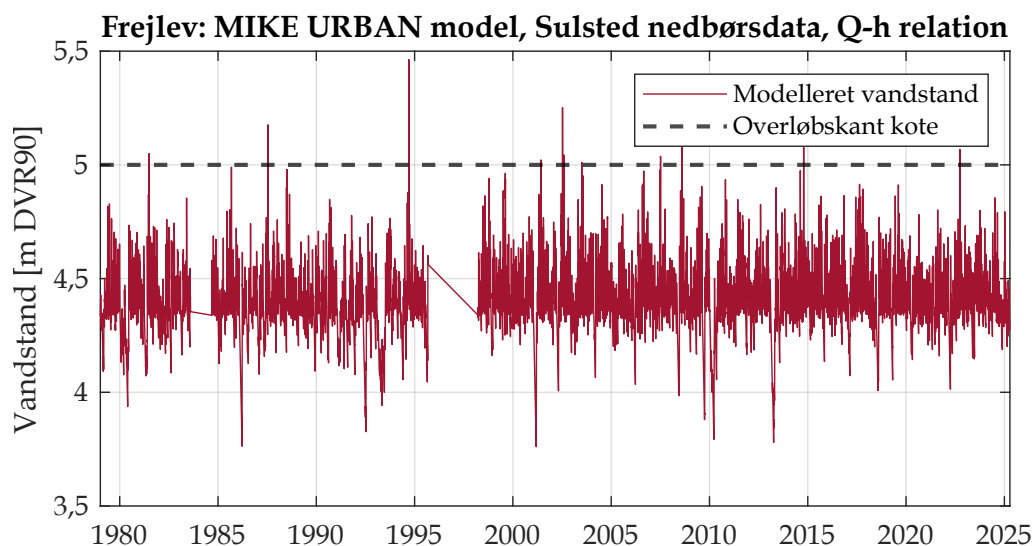
Figur A.1, A.2 og A.3 viser de modellerede tidsserier for perioden 1979-2025 baseret på Sulsted regnserie med den udarbejdede Q-h relation. Figur A.1 angiver resultatet for simpel bassinmodel, figur A.2 angiver resultatet for simpel rørmodel og figur A.3 angiver resultatet for MIKE URBAN model.



Figur A.1. Modelleret vandstand med simpel bassinmodel i Frejlev Skolevej bassin med Q-h relation. Sulsted regnserie.



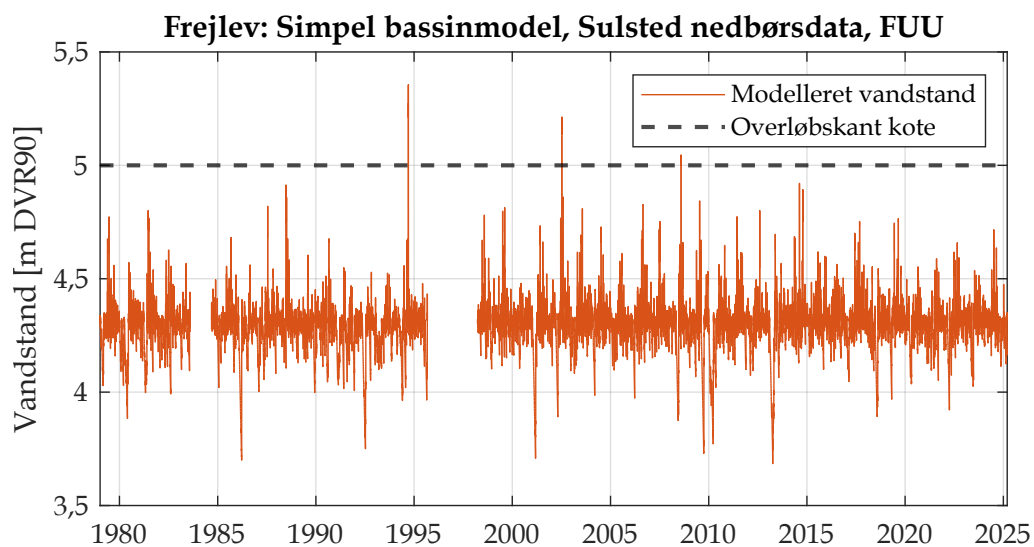
Figur A.2. Modelleret vandstand med simpel rørmodel i Frejlev Skolevej bassin med Q-h relation. Sulsted regnserie.



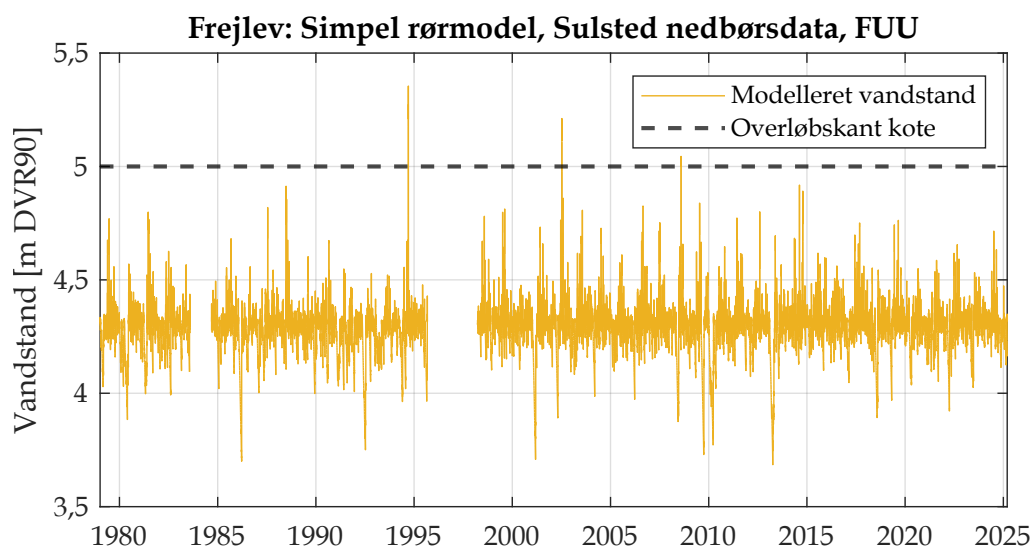
Figur A.3. Modelleret vandstand med MIKE URBAN model i Frejlev Skolevej bassin med Q-h relation. Sulsted regnserie.

Sulsted regnserie med fuldt udnyttet udledningstilladelse

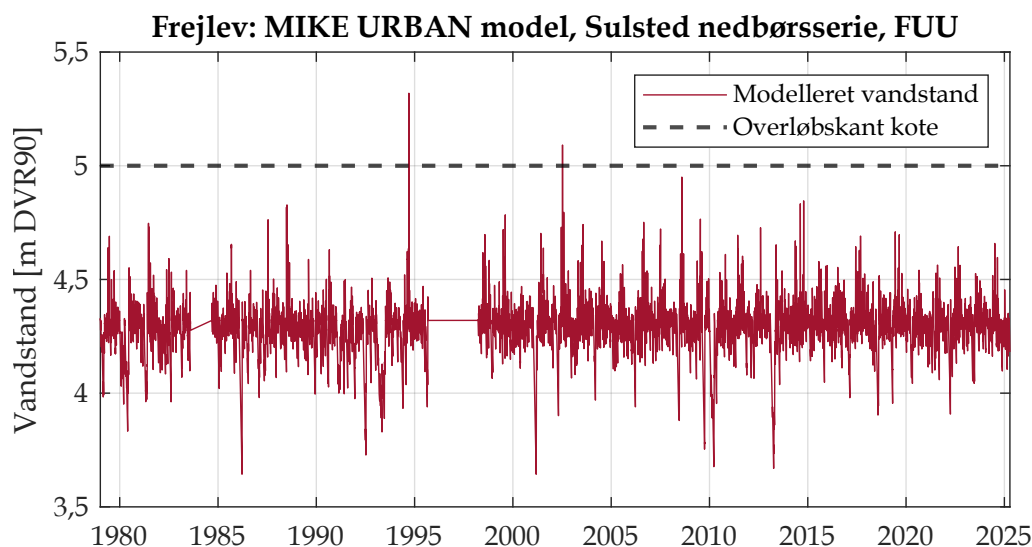
Figur A.4, A.5 og A.6 viser de modellerede tidsserier for perioden 1979-2025 baseret på Sulsted regnserie med en FUU - fuldt udnyttet udledningstilladelse. Figur A.4 angiver resultatet for simpel bassinmodel, figur A.5 angiver resultatet for simpel rørmodel og figur A.6 angiver resultatet for MIKE URBAN model.



Figur A.4. Modelleret vandstand med simpel bassinmodel i Frejlev Skolevej bassin med FUU. Sulsted regnserie.



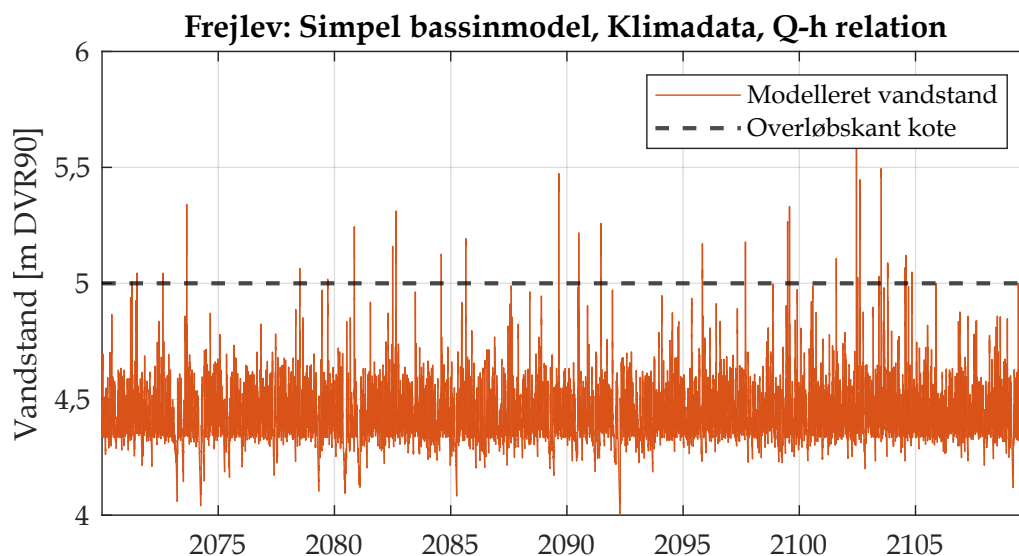
Figur A.5. Modelleret vandstand med simpel rørmodel i Frejlev Skolevej bassin med FUU. Sulsted regnserie.



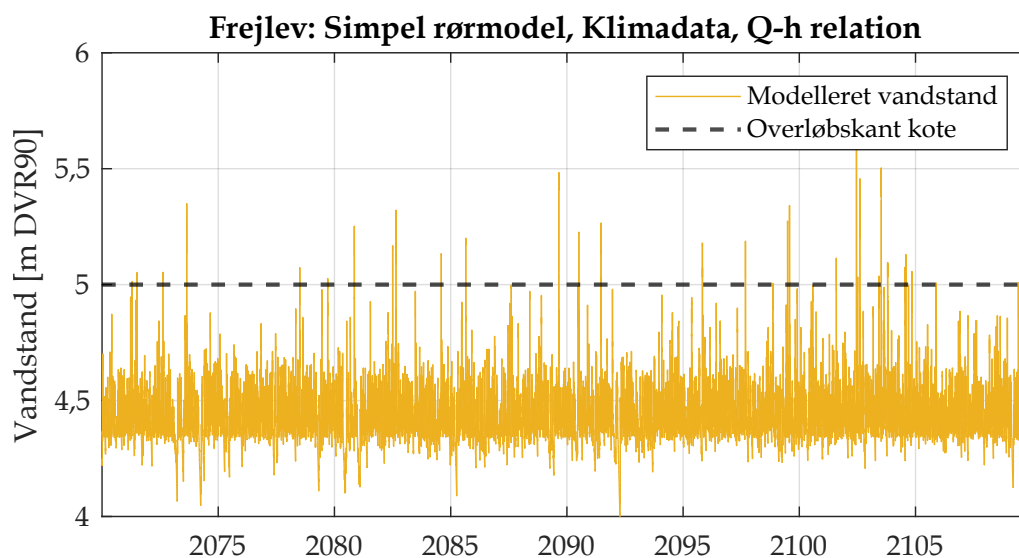
Figur A.6. Modelleret vandstand med MIKE URBAN model i Frejlev Skolevej bassin med FUU. Sulsted regnserie.

Klima regnserie med Q-h relation

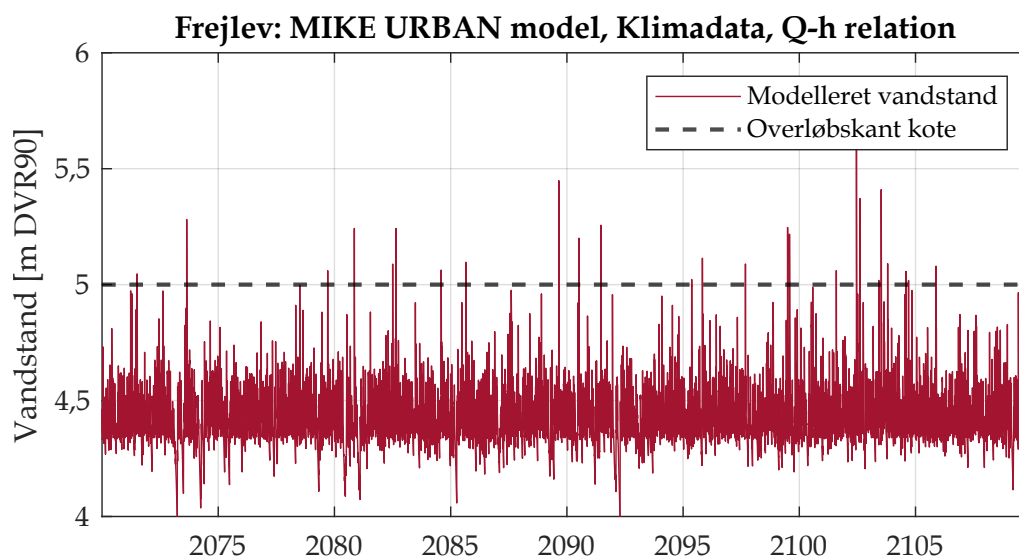
Figur A.7, A.8 og A.9 viser de modellerede tidsserier for perioden 2070-2110 baseret på den klimafremskrevne regnserie: "9041" med den udarbejdede Q-h relation. Figur A.7 angiver resultatet for simpel bassinmodel, figur A.8 angiver resultatet for simpel rørmodel og figur A.9 angiver resultatet for MIKE URBAN model.



Figur A.7. Modelleret vandstand med simpel bassinmodel i Frejlev Skolevej bassin med Q-h relation. Klima regnserie.



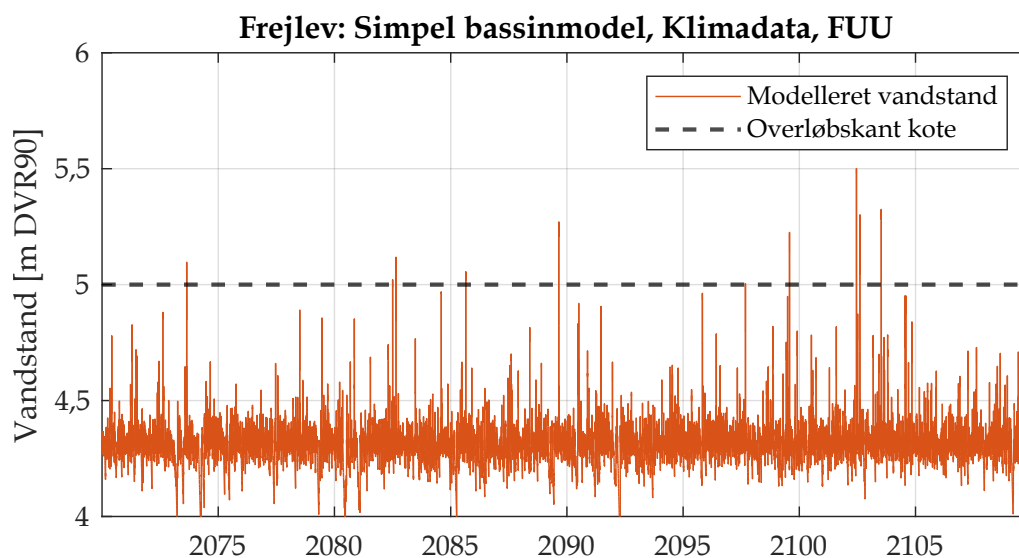
Figur A.8. Modelleret vandstand med simpel rørmodel i Frejlev Skolevej bassin med Q-h relation. Klima regnserie.



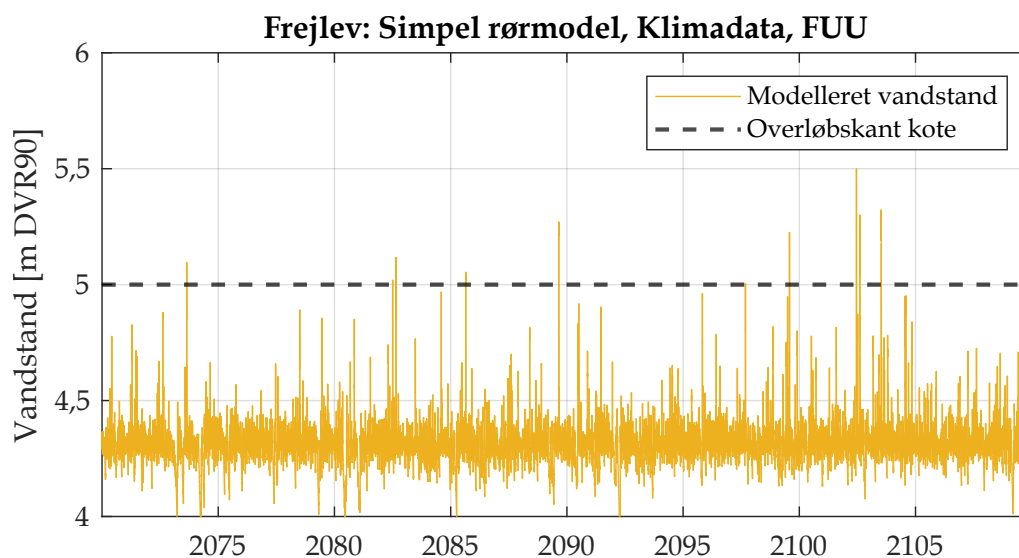
Figur A.9. Modelleret vandstand med MIKE URBAN model i Frejlev Skolevej bassin med Q-h relation. Klima regnserie.

Klima regnserie med fuldt udnyttet udledningstilladelse

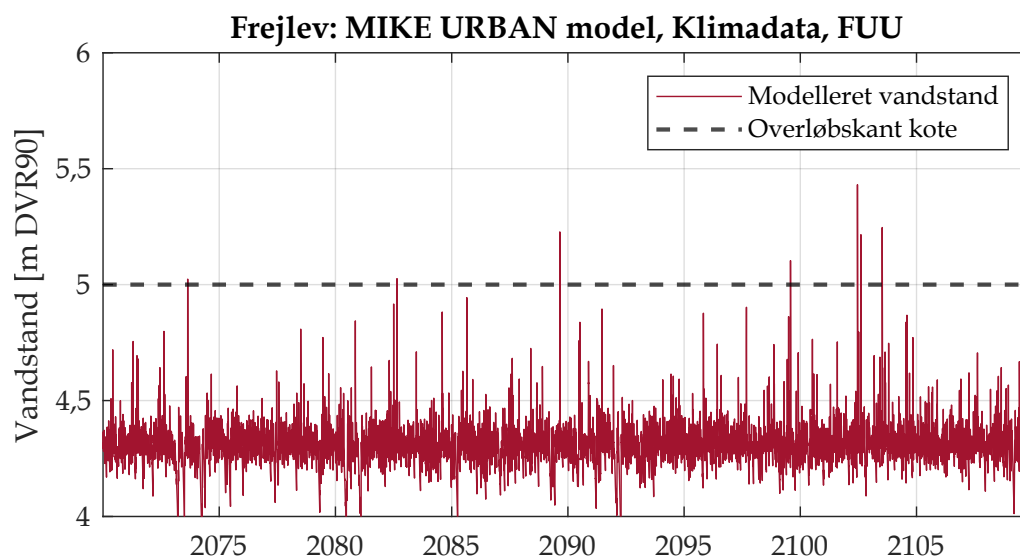
Figur A.4, A.11 og A.12 viser de modellerede tidsserier for perioden 2070-2110 baseret på den klimafremskrevende regnserie: "9041" med en fuldt udnyttet udledningstilladelse. Figur A.10 angiver resultatet for simpel bassinmodel, figur A.11 angiver resultatet for simpel rørmodel og figur A.12 angiver resultatet for MIKE URBAN model.



Figur A.10. Modelleret vandstand med simpel bassinmodel i Frejlev Skolevej bassin med FUU. Klima regnserie.



Figur A.11. Modelleret vandstand med simpel rørmodel i Frejlev Skolevej bassin med FUU. Klima regnserie.

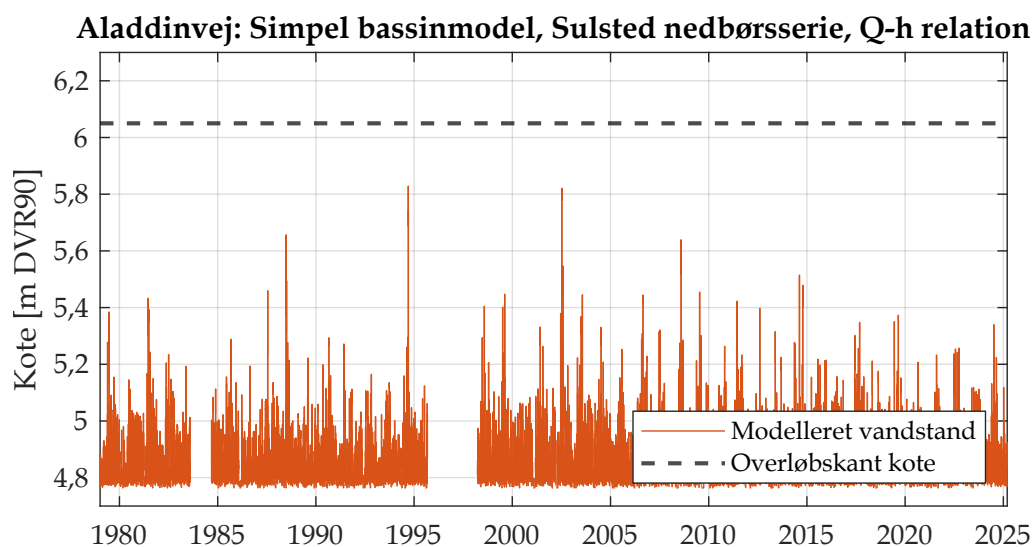


Figur A.12. Modelleret vandstand med MIKE URBAN model i Frejlev Skolevej bassin med FUU. Klima regnserie.

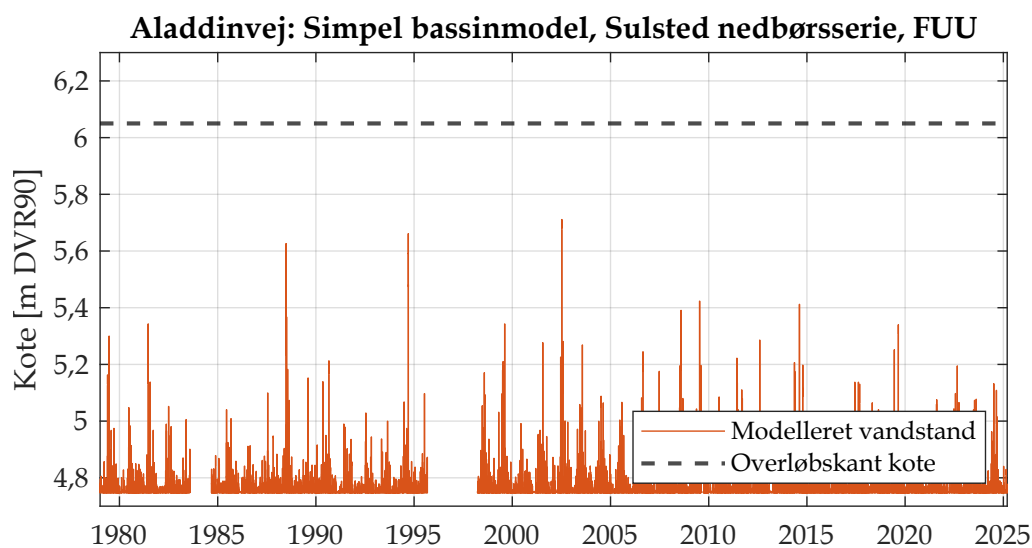
Resulterende tidsserier

Aladdinvej B

De følgende figurer viser de modellerede tidsserier for Aladdinvej Bassin med simpel bassinmodel. Figur B.1 angiver modelleret vandstand med Sulsted regnserie og udarbejdet Q-h relation, mens figur B.2 angiver med fuldt udnyttet udledningstilladelse.

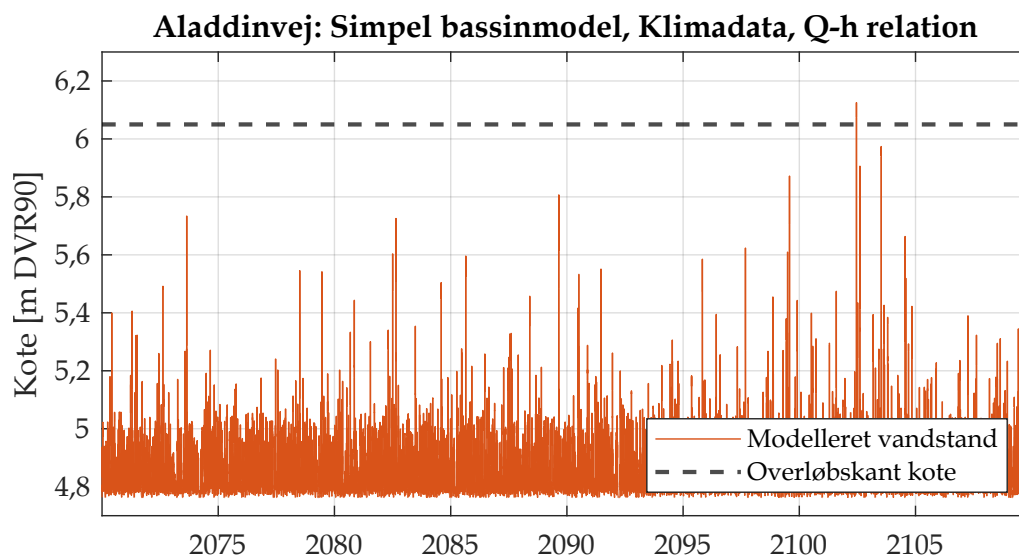


Figur B.1. Modelleret vandstand med simpel bassinmodel i Aladdinvej Bassin med Q-h relation. Sulsted regnserie.

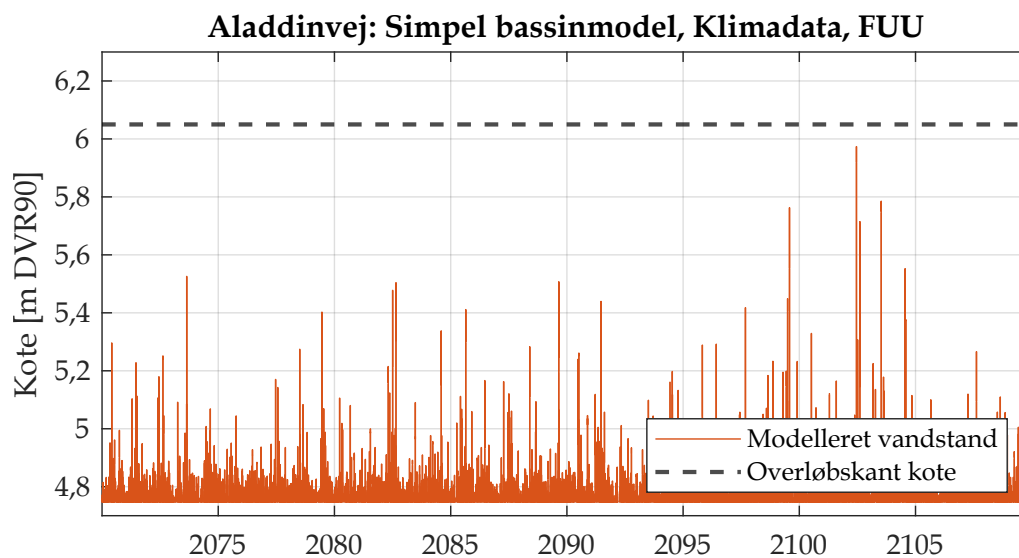


Figur B.2. Modelleret vandstand med simpel bassinmodel i Aladdinvej Bassin med FUU. Sulsted regnserie.

Figur B.3 angiver modelleret vandstand med klimafremskrevet regnserie og udarbejdet Q-h relation, mens figur B.4 angiver med fuldt udnyttet udledningstilladelse.



Figur B.3. Modelleret vandstand med simpel bassinmodel i Aladdinvej Bassin med Q-h relation. Klima regnserie.



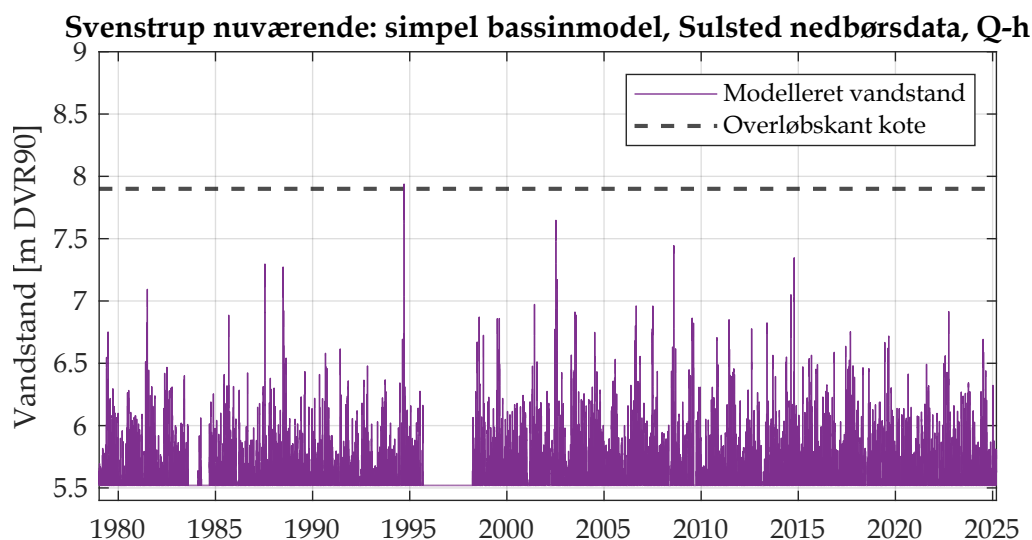
Figur B.4. Modelleret vandstand med simpel bassinmodel i Aladdinvej Bassin med FUU. Klima regnserie.

Resulterende tidsserier

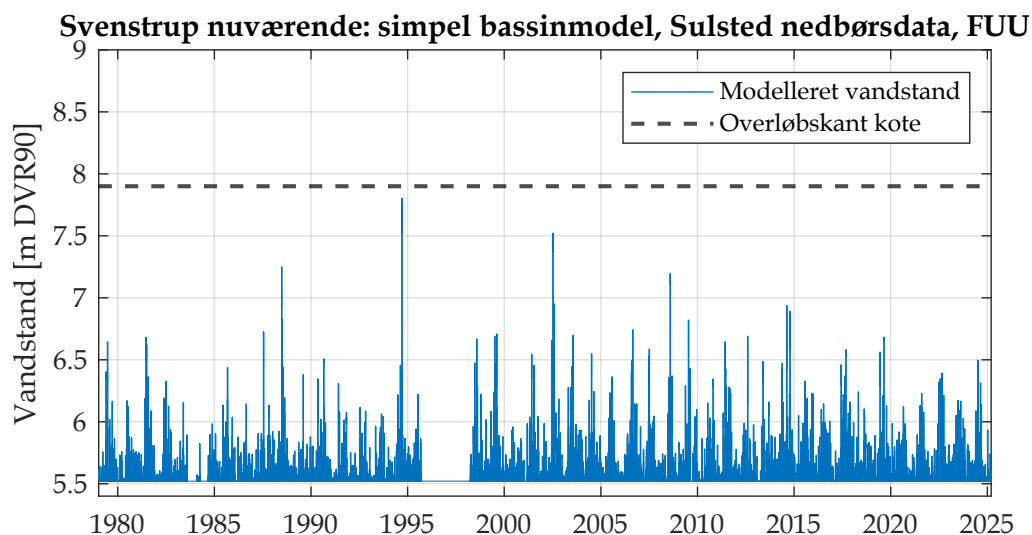
Svenstrup Banevej



Dette bilag indeholder de modellerede tidsserier af vandstand for Svenstrup Banevej bassin. Figur C.1 og C.2 angiver vandstand modelleret med Sulsted regnserie hvor henholdsvis Q-h relationen og en fuldt udnyttet udledningstilladelse er anvendt.

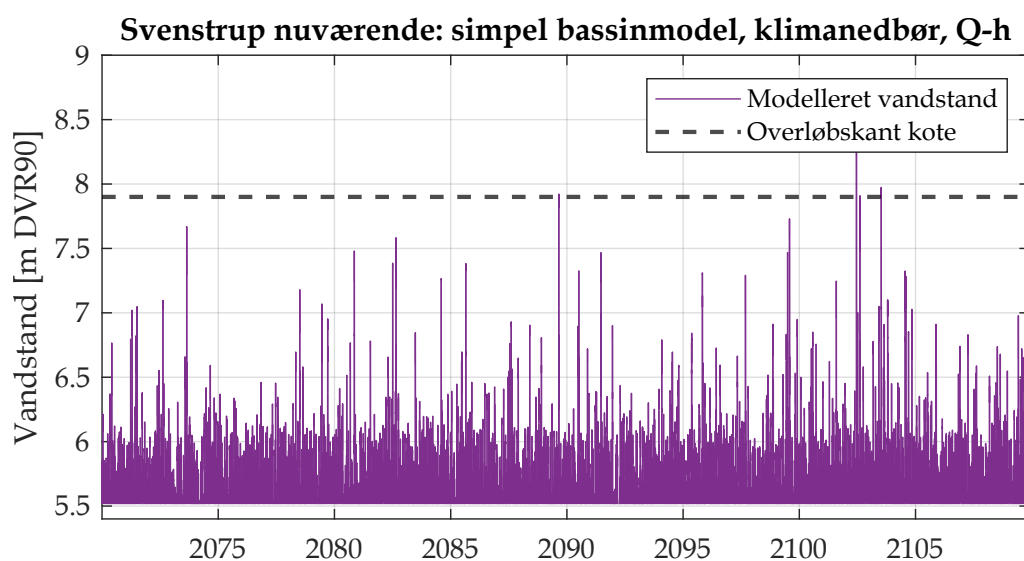


Figur C.1. Modelleret vandstand med simpel bassinmodel i Svenstrup Banevej bassin med Q-h relation. Sulsted regnserie.

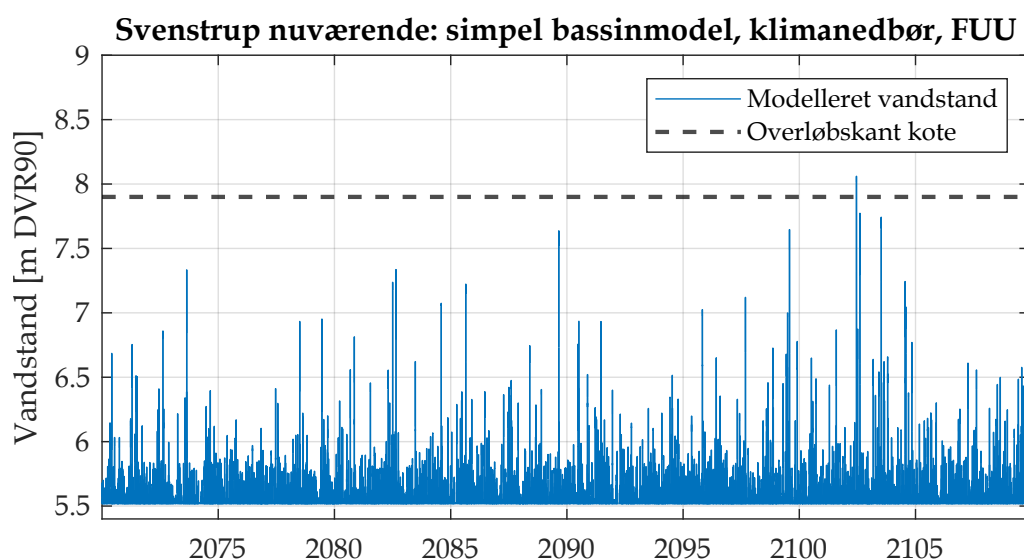


Figur C.2. Modelleret vandstand med simpel bassinmodel i Svenstrup Banevej bassin med FUU. Sulsted regnserie.

Figurerne C.3 og C.4 angiver serierne, hvor klima nedbør er anvendt.



Figur C.3. Modelleret vandstand med simpel bassinmodel i Svenstrup Banevej bassin med Q-h. Klima regnserie.



Figur C.4. Modelleret vandstand med simpel bassinmodel i Svenstrup Banevej bassin med FUU. Klima regnserie.