



Evaluering af sensorer i afløbssystemer gennem datavalidering

KANDIDATSPECIALE

Alexander Achton-Boel

Afleveret 8. juni 2018

Institut for Byggeri og Anlæg

Section for Vand og Miljø

Kilde til forside: <http://www.plumbperfect.ca/services/drain-clearing/>



AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

**4. semester v/ Det Teknisk-
Naturvidenskabelige Fakultet**

Institut for Byggeri og Anlæg
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Øst
<http://www.byggeri.aau.dk/>

Titel:

Evaluerings af sensorer i afløbssystemer
gennem datavalidering

Projekt:

Kandidatspeciale

Projektperiode:

Februar 2018 - Juni 2018

Forfatter:

Alexander Achton-Boel

Vejledere:

Søren Liedtke Thorndahl
Jesper Ellerbæk Nielsen

Sidetæl: 59

Appendiks: 4

Afsluttet 08-06-2018

Synopsis:

I dette kandidatspeciale opsættes en datavalidering, der kan anvendes til at opbygge en bedre forståelse af afløbssystemer. Til dette anvendes et evalueringsværktøj bestående af tre niveauer. Niveau 1 og 2 er i fokus igennem specialet. Til datavalidering på niveau 1 anvendes et tolerancebånd, der bygger på en eksponentielfremskrivning. Dette tolerancebånd har til formål at opfange pludselige ændringer i data, da alle ændringer i afløbssystemer anses at have en forklaring. På niveau 2 valideres det, hvorvidt den opfangede ændring har en logisk forklaring via et kontekstklassificeret tolerancebånd. Dette tolerancebånd anvender information fra flere sensorer, således den aktuelle kontekst kan defineres.

Evalueringsværktøjet har efterfølgende været anvendt på indsamlet data fra Viby ved Aarhus. For at opnå det bedste resultat kræves en kalibrering af metoderne. Efter kalibreringen viste evalueringsværktøjet sig anvendeligt til at skabe en bedre forståelse for afløbssystemet, da tolerancebåndet tydeligt opfanger pludselige ændringer i data, og efterfølgende validerer hvorvidt disse ændringer var forventet. Datavalideringen er dog ikke bedre end den kalibrering, der udføres.

Forord

Dette kandidatspeciale er udarbejdet af Alexander Achton-Boel. Denne rapport er et produkt af det arbejde der er blevet foretaget på 4. semester af kandidatuddannelsen Vand og Miljø på Aalborg Universitet. Kandidatspecialet er en videreførelse af en rapport udformet i efteråret 2017 i forbindelse med et virksomhedsophold.

Tak

Først og fremmest rettes en stor tak til lektor Søren Liedtke Thorndahl og lektor Jesper Ellerbæk Nielsen, for inspirerende vejledning, konstruktiv kritik og behageligt samarbejde igennem hele projektperioden.

Derudover rettes en tak også til Aarhus Vand A/S for udlevering af data, samt sparring over projektet.

Samtidig skyldes tak til grupperum 1.207, Thomas Aagaard Jensen, Boris Sørensen og Brian Bjerrum for kyndig sparring og godt humør.

Endelig takkes Lisbeth Achton-Boel og Simon Grosen for hjælp til gennemlæsning af rapporten.

Læsevejledning

I rapporten henvises der til kilder ved brug af Harvard-metoden, hvor kilder noteres i klammeparantes med efternavn og årstal, [Efternavn, år]. En kilde placeret før punktum angiver, at den blot er kilde for den pågældende sætning, hvor en kilde efter et punktum indikerer, at den er kilde for hele afsnittet. Litteraturlisten findes bagerst i rapporten, hvor alle kilder, der er henvist til i rapporten, er angivet i alfabetisk rækkefølge.

Der refereres igennem rapporten løbende til figurer og tabeller. Disse er angivet med nummerering, der stemmer overens med kapitlet og placeringen i kapitlet. Således kaldes den første figur i kapitel 1 "figur 1.1" dernæst "figur 1.2" og så videre. Bagerst i rapporten forefindes appendiks, der er henvist til ved hjælp af bogstaver.

Programmer

Til fremstilling af kort er programmet QGIS anvendt, hvor baggrundskortet er fra Kortforsyningen. Tegninger og flowcharts, som fremgår i rapporten, er blevet lavet på hjemmesiden draw.io. Endelig er MATLAB anvendt til databehandling samt fremstilling af grafer.

Rapporten er udarbejdet af Alexander Achton-Boel

Abstract

This master thesis data validation is used to gain a better understanding of urban sewer systems. For this, an evaluation tool consisting of three levels is used. Level 1 and 2 are in focus throughout the thesis. At level 1 a tolerance band is used as data validation. The tolerance band is based on an exponential projection. This tolerance band aims at capturing sudden changes in data, as all changes in drainage systems are considered to have an explanation. At Level 2 it is validated whether the sudden change has a logical explanation via a context-classified tolerance band. This tolerance band uses information from multiple sensors, so the active context can be defined.

The evaluation tool has subsequently been used on collected data from Viby at Aarhus. It is not possible to make a generic data validation. Therefore a calibration of the methods is required. After the calibration, the evaluation tool were useful to provide a better understanding of the urban sewer system as the tolerance band clearly detected sudden changes in data and subsequently validates whether these changes were expected. However, data validation is not better than the calibration performed.

Indholdsfortegnelse

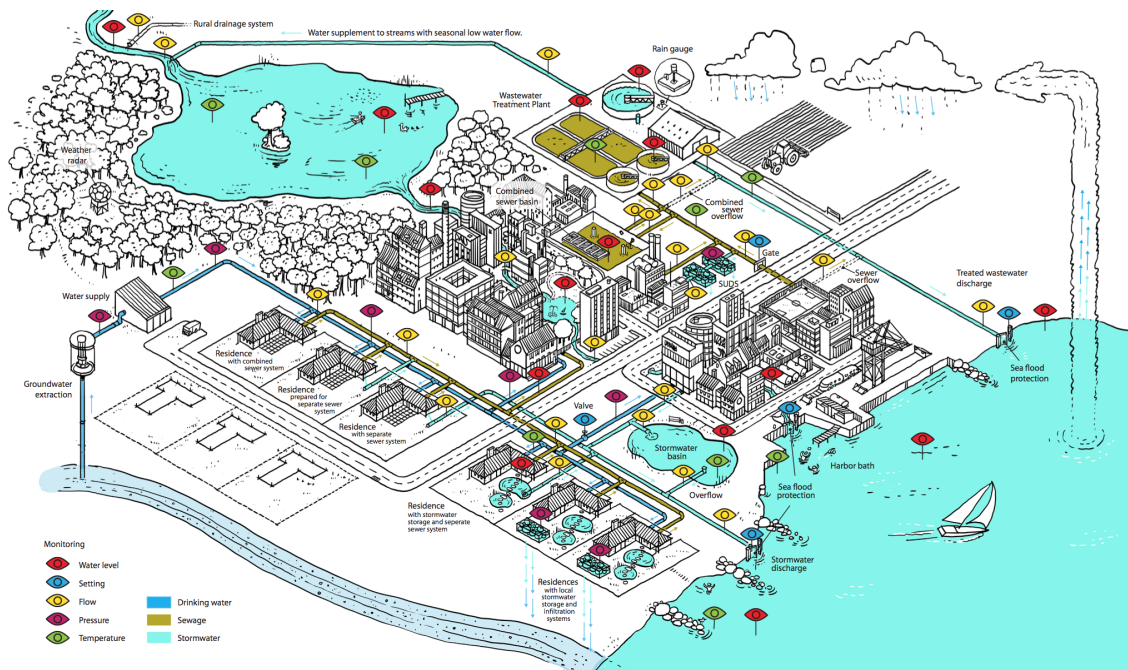
Kapitel 1	Indledning	1
1.1	Datavalidering hos Aarhus Vand A/S	3
1.2	Projektstruktur	4
Kapitel 2	Evalueringsværktøj til validering af data fra sensorer i det urbane vandkredsløb	5
2.1	Evalueringsværktøjets formål	5
2.2	Opbygning af evalueringsværktøjet	6
Kapitel 3	Indsamlet data fra Viby	9
3.1	Præsentation af caseområdet Viby	9
3.2	Anvendt data	10
Kapitel 4	Evalueringsværktøj version 1.0	13
4.1	Evalueringsværktøjets kontrolmetoder	13
4.1.1	Dynamisk forventeligt interval på data	13
4.1.2	Statistiske metoder til evaluering af deterministisk model	16
4.2	Evaluering af evalueringsværktøj 1.0	19
4.2.1	Anvendelse af dynamisk forventeligt interval på flowmålinger fra Viby .	19
4.2.2	Anvendelse af statiske metoder til evaluering af MIKE URBAN model .	20
Kapitel 5	Problemformulering	23
Kapitel 6	Evalueringsværktøj version 2.0	25
6.1	Videreudvikling af forventeligt interval på data	25
6.1.1	Tolerancebånd på baggrund af signalstøj	25
6.1.2	Kontekstklassificeret tolerancebånd	27
6.2	Redundans mellem sensorer	29
6.3	Validering af nyt tolerancebånd	30
6.3.1	Implementering af tolerancebånd på data fra Viby	30
6.3.2	Definering af kontekstklassificeret tolerancebånd for sensorer i Viby . .	35
6.4	Kontrol med redundans	39
Kapitel 7	Anvendelse og diskussion af evalueringsværktøj 2.0	41

7.1	Anvendelse af evalueringsværktøj 2.0	41
7.2	Diskussion	44
Kapitel 8	Konklusion	45
Litteratur		47
Appendiks A	Respons- og afstrømningstid	49
A.1	Jarlsmindevej	49
A.2	Ringvej	50
A.3	Viby Bassin	51
Appendiks B	Kalibrering af kontekstklassificeret tolerancebånd	53
B.1	Regnhændelser ved Jarlsmindevej	53
B.2	Regnhændelser ved Ringvej	55
Appendiks C	Vandstandsanalyse i Ringvejen	57
Appendiks D	Beregning af Viby Bassinets geometri	59

Indledning

Sensorer falder i dag konstant i pris, hvilket medfører, at de vil blive mere tilgængelige [Schilperoort et al., 2008]. I forbindelse med det øgede antal sensorer vil der naturligvis også blive en stor mængde data tilgængeligt. Med disse mængder af data åbnes der nye muligheder for forståelse af systemer. Et af de systemer kunne være det urbane vandkredsløb, hvor en øget mængde sensorer bl.a. vil give mulighed for bedre kalibrering af modeller, sporing af ledningskollaps i afløbssystemet, bedre forståelse af afstrømning fra grønne arealer eller til styring af afløbssystemets komponenter. Derudover vil flere sensorer også bidrage til større viden omkring processer i systemet samt dets tilstand. Samtidig vil det være muligt at opsætte et advarselssystem imod oversvømmelser. Ydermere vil denne store mængde data betyde, at vandbranchen træder ind i big data fællesskabet og kan anvende den viden, der allerede ligger tilgængeligt på dette område. For at data trygt kan anvendes til disse formål, kræves det, at data er valideret. Dette er nødvendigt, da data kan være fejlbehæftet [Alferes & Vanrolleghem, 2016]. Fejlene kan skyldes flere årsager, det kan være fejl på selve sensoren, blokering af sensoren eller andre forhold, der medfører, at dataet ikke kan anvendes til videre brug.

Den øgede mængde sensorer betyder også, at der vil blive en tilsvarende mængde ekstra vedligeholdelse, hvilket kan være svært at overholde, hvorfor validering er yderligere nødvendigt. Da sensorerne genererer data alle døgnet 24 timer, giver det lange tidsserier, hvilket vil være meget krævende at validere manuelt, og derfor er automatisk validering af data praktisk [Branisavljević et al., 2010]. Anvendes der fejlbehæftede data, kan det have alvorlige konsekvenser. Anvendes fejlbehæftet data til kalibrering af modeller, kan det resultere i forkerte ledningsdimensioner og udledningsberegninger, hvilket i sidste ende kan medføre at funktions- og udledningskravene ikke bliver overholdt, til skade for miljøet. [McCarthy et al., 2008][Deletic et al., 2012]. Bruges fejlbehæftede data til styring af afløbssystemer eller rensningsanlæg, kan det også forvolde skader. En niveaumåler kan være fejlbehæftet, hvilket kan medføre, at en pumpe ikke starter rettidigt og forårsager en oversvømmelse. Oversvømmelser vil også kunne medføre miljømæssige konsekvenser, men samtidig have samfundsøkonomiske konsekvenser, hvis der forvoldes skader på materiel, som skal erstattes. Opstår der fejl, som har alvorlige konsekvenser grundet fejlbehæftede data, vil tilliden til sensorer potentielt mindskes eller forsvinde, hvilket er en stor trussel for at få det optimale ud af sensorerne. Derfor er det vigtigt at kunne vurdere, hvorvidt data er korrekt eller ej, således sensorernes potentiale kan udnyttes.



Figur 1.1. Princip af sensorer placeret i det urbane vandkredsløb. Alle rettigheder reserveret, DONUT projektet, Aarhus Vand A/S, 2018. [Aarhus Vand A/S, 2018]

Datavalidering er langt fra et nyt forskningsområde. Derfor findes der også et stort antal videnskabelige artikler indenfor området. Dog er udvalget noget mindre, når det omhandler metoder til validering af data fra afløbssystemer. I følgende afsnit vil enkelte relevante artikler kort blive introduceret, da metoderne, der anvendes i dette projekt, er udsprunget fra disse artikler. I Mourad & Bertrand-Krajewski [2002] beskrives en metode til automatisk validering af lange tidsserier med data fra afløbssystemer. Her valideres data bl.a. på baggrund, af hvorvidt sensoren har været slukket, om værdien er urealistisk i forhold til placeringen af sensoren, tid siden sidste service og kontrol af signalets gradient. Disse metoder fokuserer på den enkelte sensor og anvender statistiske kontroller samt viden omkring sensorernes placering. Dette er netop også metodens styrke, da det ikke er nødvendigt med andre sensorer i nærheden for at kunne validere data. Er der andre sensorer i nærheden, er mulighederne for datavalidering større. I Bijnen & Korving [2008] præsenteres en valideringsprocedure, hvor flere sensorer valideres simultant. Proceduren blev brugt i forbindelse med en målekampagne i Holland. En del af proceduren er blandt andet at sammenholde mængden af regn med mængden af øget afstrømning, som validering af data. I Schweiz har man forsøgt sig med at foretage krydskorrelation og *dynamic time warping*, DTW, mellem vandkvalitetssensorer og flowmålere til validering af data, her viste DTW sig særdeles kyndig til formålet [Dürrenmatt et al., 2013]. I Piatyszek et al. [2000] anvendes redundans mellem tre flows, et målt flow, et flow estimeret af et Kalman filter og et beregnet flow ud fra en deterministisk model. Denne metode kræver dog, at en model kører i realtid, ydermere skal den være præcis nok til at kunne anvendes som en yderligere måling. Ud over de enkeltstående artikler nævnt ovenfor, har Siao et al. [2011] udformet en rapport, som præsenterer yderligere metoder til datavalidering.

1.1 Datavalidering hos Aarhus Vand A/S

Hos Aarhus Vand A/S er datavalidering også en essentiel del i forbindelse med indsamling og anvendelse af data. Udvalgte systemer og komponenter styres på baggrund af sensordata, dette gælder hovedsageligt rensningsanlæggene. Her kan fejl på sensorer være til direkte skade for miljøet og medføre unødige økonomiske omkostninger. Et eksempel på dette kunne være en fejl i ammoniumsensorerne på rensningsanlæggene. Når man på rensningsanlæggene skal fjerne ammonium fra spildevandet, foregår det ved beluftning. Når ammonium beluftes, omdannes det til nitrat, som derefter bliver omdannet til kvælstof under iltfrie forhold. Kvælstoffet forsvinder efterfølgende som gas. [Henze & Henze, 2006] Ammoniumsensorer, der styrer mængden af beluftning, kan være udsat for drift i signalet. Det vil medføre, at de er udsat for et offset, og sensorernes nulpunkt vil flytte sig til 1,5 mg/l. Hvis styringen er indstillet til at ramme et setpunkt på 1,0 mg/l, vil der blive blæst på fuld tryk i luftningstankene. Det vil dog ikke være muligt at opnå setpunktet grundet drift i ammoniumsensoren, og derfor vil der blive brugt en stor mængde energi til ingen formål. Modsat hvis ammoniumsensoren er udsat for negativ drift, vil blæserne ikke blive aktiveret, og der udledes spildevand med en høj koncentration af ammonium til recipienten. Ovenstående er eksempler på, hvorfor datavalidering er vigtigt, således der ikke forårsages unødvendig skade på miljøet. Da data opsamles og anvendes i alle døgnets 24 timer, er det nødvendigt at datavalideringen foregår i realtid.

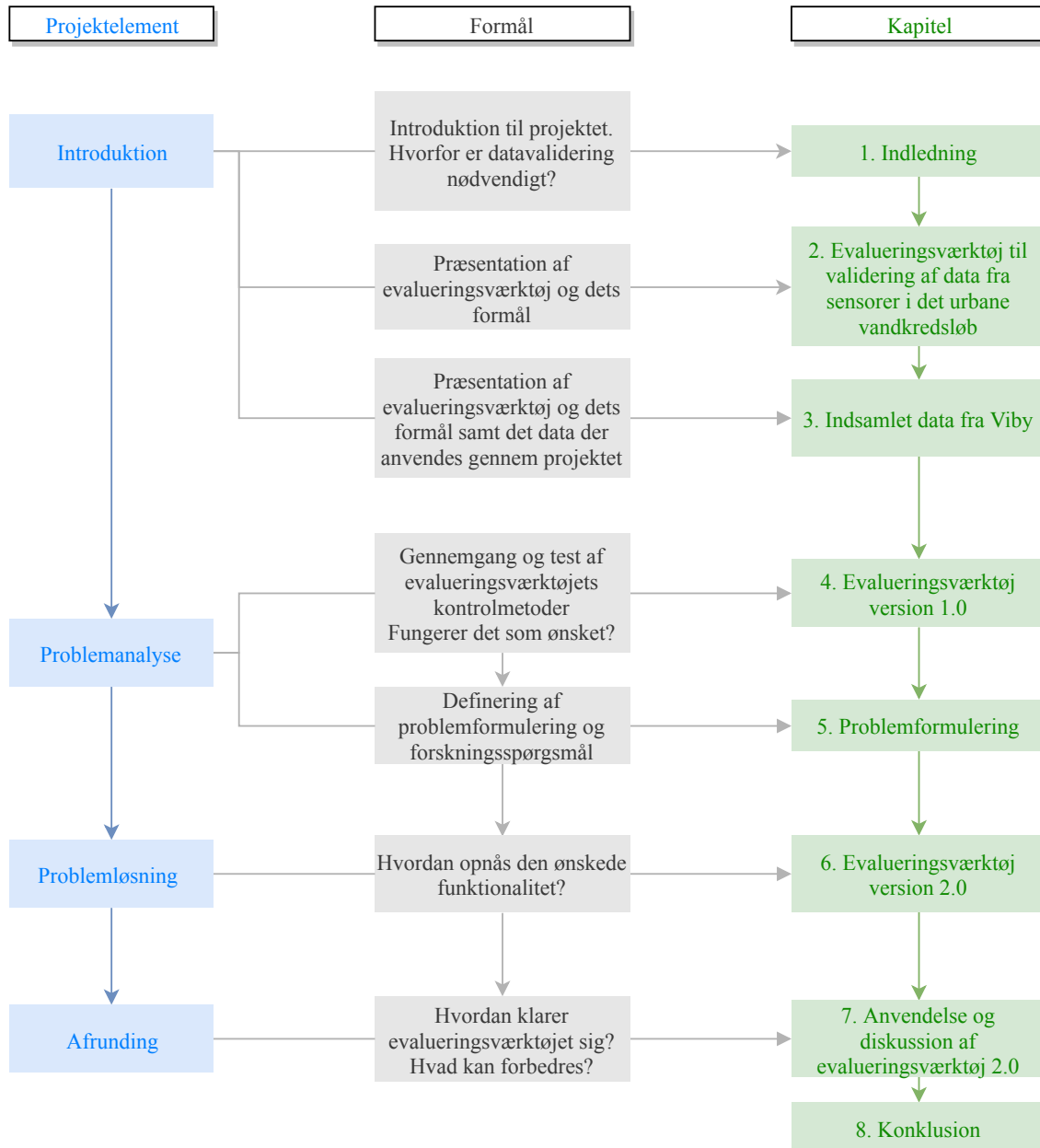
Ud over sensorer på rensningsanlæggene har Aarhus Vand andre planer med sensorer. Aarhus Vand er en del af flere projekter, hvor sensorer er omdrejningspunktet. Senest er Aarhus Vand blevet projektleder for projektet *DONUT – Distributed ONline monitoring of the Urban waTer cycle* [Innovationsfonden, 2018], hvor store mængder af sensorer spredes i vandkredsløbet jf. 1.1. Målet for projektet citeres herunder:

"Målet med projektet er at udvikle og kommercialisere en løsning, som kan foretage målinger i vandkredsløbet omkostningseffektivt og omsætte disse data til viden, som vandselskaber og myndighed aktivt kan anvende i deres beslutninger." [Innovationsfonden, 2018].

For at dette kan lade sig gøre, skal der spredes et stort antal sensorer ud i vandkredsløbet. Før denne datamængde kan indgå i dataprocessering, er det en fordel, at data er valideret. Derfor blev der i efteråret 2017 på mit 9. semester opstillet en ramme for et evalueringsværktøj under erhvervssamarbejde med Aarhus Vand. Projektet havde titlen *"Evalueringsværktøj til kvalitetssikring af sensorer samt opbygning af kendskab til afløbsystemer"*. I frameworket er det forsøgt at anvende metoder fra litteraturen til datavalidering. Evalueringsværktøjet præsenteres i det kommende kapitel. Projektet vil blive refereret til som Achton-Boel [2017].

1.2 Projektstruktur

På figur 1.2 ses projektets struktur visualiseret. Figuren illustrerer de fire projektelementer som projektet er bygget op af, i sammenhæng med deres respektive formål, samt hvilke kapitler formålene behandles i.



Figur 1.2. Visualisering af projektets struktur.

Evalueringsværktøj til validering af data fra sensorer i det urbane vandkredsløb

I følgende kapitel vil evalueringsværktøjet fra Achton-Boel [2017] blive præsenteret. Evalueringsværktøjet er bygget op af tre niveauer. Deres formål vil blive forklaret.

2.1 Evalueringsværktøjets formål

Evalueringsværktøjet har to formål. Det første er at validere data, således det kan bruges til videre arbejde. Det andet formål er at bidrage til forståelsen af det pågældende afløbssystem. Forståelsen skal her ses som værende den reelle opbygning samt responsen i kloaksystemet ved forskellige hændelser. Når data skal valideres ønskes, det at opfange fejl som:

- Udfald i data
- Ingen ændring - konstant værdi
- Afvigelser fra fastsat interval
- Pludselige ændringer
- Konstant bias
- Opbyggende og aftagende bias

Evalueringsværktøjet er opdelt i tre niveauer. Det er gjort for at kunne afgrænse typen af kontroller, der foretages, samt for overblikkets skyld. Evalueringen foretages via forskellige kontroller. Disse kontroller har tre resultater og annoteres på følgende måde:

- ✓ - Godkendt
- ? - Tvivlsom
- X - Forkastet

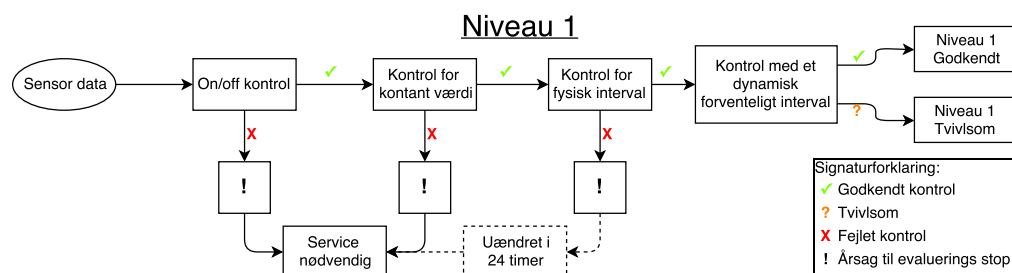
Tvivlsom anvendes hvis en kontrol fejler, men det ikke med sikkerhed kan siges, om det er en fejl, og derfor vil data skulle gennemgå yderligere kontroller.[Achton-Boel, 2017]

2.2 Opbygning af evalueringsværktøjet

Overordnet set foretages der på niveau 1 en kontrol af den enkelte sensor, hvor der kontrolleres for, om sensoren er slukket, blokeret, eller ligger uden for hvad der er fysisk muligt relativt til placeringen. Sidst kontrolleres det data, der opsamles. På niveau 2 vil data gennemgå yderligere kontroller for at sikre validiteten, og det vil blive undersøgt, hvorvidt det tvivlsomme data kan valideres med information fra andre sensorer i systemet. Endeligt vil der på niveau 3 blive foretaget en evaluering af en MIKE URBAN model. [Achton-Boel, 2017]

Niveau 1

Som nævnt har niveau 1 til formål at foretage en kontrol af sensoren samt data, der opsamles. På figur 2.1 ses en grafisk oversigt af opbygningen af niveau 1. Det grundlæggende formål er at kontrollere sensorens status, er sensoren tændt, er sensoren blokeret og giver derfor konstant værdi, eller er værdierne uden for hvad der fysisk kan lade sig gøre på den pågældende lokation. Herudover vil der kontrolleres for pludselige afvigelser eller spring i data. Opstår der en pludselig ændring, må det skyldes tilførslen af vand til systemet, og kilden til dette vand skal kendes for at have fuld kendskab til afløbssystemet. Opfanges disse pludselige ændringer, giver det mulighed for at undersøge, hvad ændringen skyldes. For at fange afvigelserne bruges et dynamisk forventeligt interval ud fra Mourad & Bertrand-Krajewski [2002]. Metoden præsenteres i kapitel 4. Forekommer der en pludselig afgivelse, markeres data som tvivlsomt. Efterfølgende vil data forsøges godkendt på niveau 2, med samme kontrol, her anvendes dog input fra udvalgte sensorer, som kan redegøre for afvigelsen.

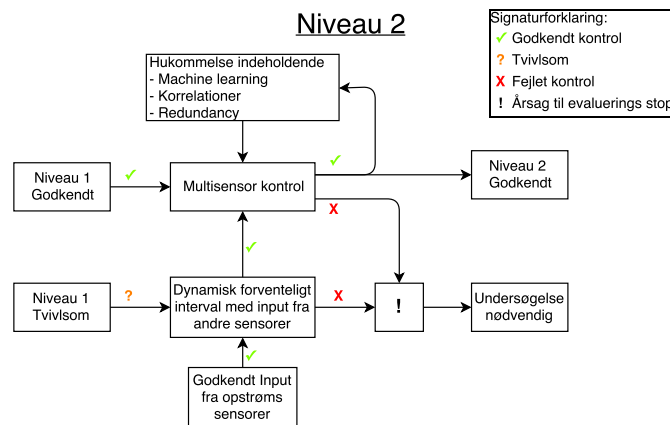


Figur 2.1. Opbygning af evalueringsniveau 1. [Achton-Boel, 2017]

Niveau 2

Niveau 2 har til formål at foretage yderligere kontrol af data, og på dette niveau bliver der gjort brug af andet data. Det kunne være data fra andre sensorer i systemet, deterministiske eller statistiske modeller, hvilket gøres for at medføre større sikkerhed til data. Samtidig skal der foretages yderligere kontrol af det tvivlsomme data. Når det tvivlsomme data skal valideres, sker det også på baggrund af input fra andre sensorer. Eksempelvis kunne der være registreret en pludselig stigning af flow i en ledning, årsagen til dette kunne være regn eller pumpestart. Derfor skal kontrollen koble informationen fra regnmåleren eller pumpen sammen med flowmålingen, således der kan tages højde for disse ændringer i forbindelse med valideringen af det tvivlsomme data. Viden omkring, hvilke sensorer, der skal kobles sammen, skal komme fra operatøren som opsætter kontrollen, og vil ikke være kodet ind i kontrollen fra starten. Årsagen til dette er, at i forbindelse med opsætningen af evalueringsværktøjet også opbygges en forståelse for, hvordan afløbssystemet reelt er sat sammen. Et eksempel på hvorfor dette kunne være anvendeligt, har Aarhus Vand oplevet. Det har vist sig, at et regnvandsbassin

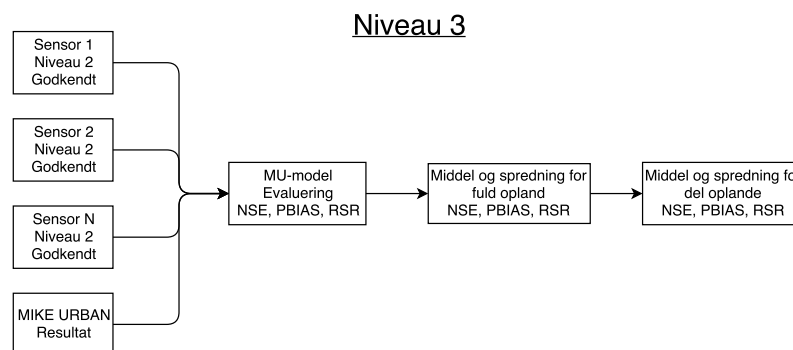
fejlagtigt var koblet på spildevandssystemet. I et tilfælde som dette ville kontrollen på niveau 1 markere data fra spildevandssystemet som tvivlsomt, da der vil forekomme en uventet ændring, når bassinet tømmes. På niveau 2 vil kontrollen igen fejle, da det ikke forventes, at en tømning af et regnvandbassin vil forårsage ændringer i spildevandsnettet. Denne gang markeres data som forkert og ikke tvivlsomt, og det vil være nødvendigt med en undersøgelse for at fastlægge årsagen til den fejlede kontrol. I forbindelse med denne undersøgelse vil fejlkoblingen forhåbentlig blive opdaget. Al godkendt data fortsætter igennem yderligere kontroller. Disse kontroller kunne være korrelationer eller redundans mellem sensorer, sammenligning med modeller. Resultatet af niveau 2 vil enten være et stop af evaluering grundet en fejlet kontrol, ellers vil data fortsætte videre til niveau 3. En grafisk oversigt af niveau 2 kan ses på figur 2.2.



Figur 2.2. Opbygning af evalueringsniveau 2. [Achton-Boel, 2017]

Niveau 3

Som det er illustreret på figur 2.3, vil data på niveau 3 indgå i en modevaluering. Modevaluering foretages på baggrund af tre evalueringsmetoder, som er udvalgt på baggrund af Moriasi et al. [2007]. Metoderne er *Nash-Sutcliffe efficiency* (NSE)[Nash & Sutcliffe, 1970], *procent bias* (PBIAS)[Gupta et al., 1999], samt forholdet mellem root mean square error og standardafvigelsen på observationerne (RSR) [Moriasi et al., 2007]. Disse metoder er udvalgt, da de potentielt skulle kunne beskrive forskellige typer fejl og afvigelser der kan opstå mellem model og virkelighed. Samtidig giver dette niveau en grafisk oversigt af, hvordan modellen har præsteret relativt til sensorerne.



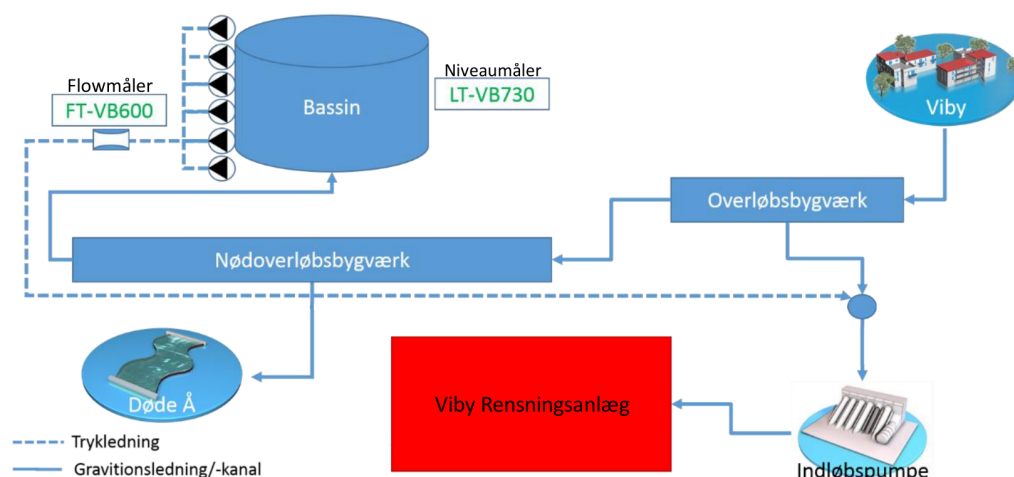
Figur 2.3. Opbygning af evalueringsniveau 3. [Achton-Boel, 2017]

Indsamlet data fra Viby

Som nævnt i introduktionen vil dette projekt fokusere på at påvise evalueringsværktøjets potentiale ved hjælp af reelle data, derfor er der indsamlet data fra Viby området ved Aarhus. Caseområdet og det indsamlede data præsenteres i dette kapitel.

3.1 Præsentation af caseområdet Viby

I følgende projekt vil der blive anvendt data fra oplandet og indløbet til Viby Rensningsanlæg. Viby er en forstad og ligger sydvest for Aarhus. Oplandet er 1426 ha stort, hvor 748 ha er separatkloakeret og de resterende 678 ha er fælleskloakeret [Ahm et al., 2016]. Rensningsanlægget og dele af oplandet er illustreret på figur 3.2 på den følgende side. Da indløbet til Viby Rensningsanlæg er atypisk opbygget og vil blive brugt i projektet, vil dette blive beskrevet kort herunder. Figur 3.1 illustrerer en skematisk opbygning af indløbet.



Figur 3.1. Skematisk opbygning af indløbet til Viby Rensningsanlæg. Figuren er redigeret fra Høgh et al. [2015]. På figuren er placeringen af de anvendte sensorer vist.

Viby Rensningsanlæg har en maksimal rensningskapacitet på 1360 l/s. Hvis afstrømning overstiger denne tærskelværdi, sker der overløb. I første omgang vil vandet løbe i Viby Bassin, hvor der er plads til omkring 16000 m³ vand. Når bassinet er fyldt, vil der ske overløb til det nærliggende vandløb, Døde Å. Når indløbet til rensningsanlægget er faldet til under 1360 l/s vil bassinet blive tømt. Dette sker ved seks tømme-pumper. Derfor kan det antages, at når bassinet tømmes, er der ikke indløb til bassinet.

3.2 Anvendt data

Data, der bliver anvendt i dette projekt, kommer som tidligere nævnt fra oplandet og indløbet til Viby Rensningsanlæg. Al data er blevet omregnet til Greenwich tid, således der ikke vil opstå forskydning på baggrund af dette, samtidig er der korrigeret for sommertid. I tabel 3.1 herunder vil sensorerne blive listet, samt den anvendte tidsperiode.

Sensornummer/ Navn	Sensor type	Sensor model	Nøjagtighed	Anvendt periode
SVK 5177	Vippekarsmålér	SVK-Regnmåler	IT	01/09/16 - 18/01/18
Jarlsmindevej	Flowmåler	DANOVA - Korrelationssensor med tryk	IT	01/10/17 - 18/01/18
Ringvej	Flowmåler	DANOVA - Korrelationssensor med tryk	IT	01/10/17 - 18/01/18
FT-VB600	Flowmåler (EM)	Siemens MagFlo 6000	$\pm 0,20 \%$ MV	01/09/16 - 01/09/17
LT-VB730	Niveaumåler - Tryk	Ørum og Jensen SH3102	$\pm 0,25 \%$ FS (10 m)	01/09/16 - 01/09/17

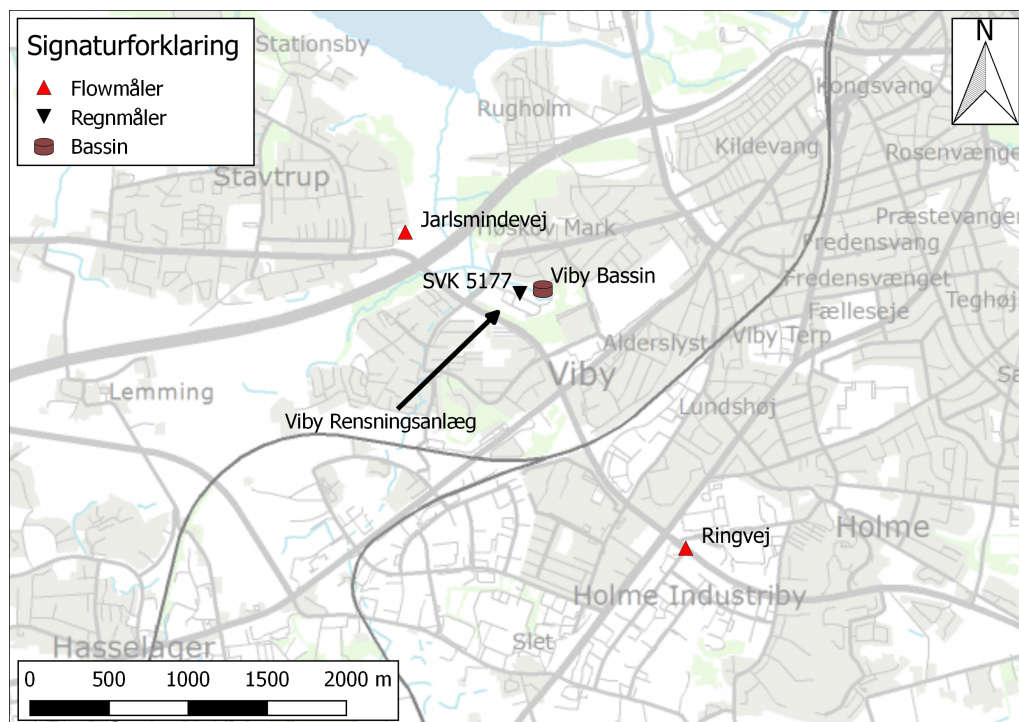
Tabel 3.1. Oversigt over anvendte sensorer. EM = Elektromagnetisk, IT = Ikke tilgængelig, MV = Målt værdi, FS = Fuld skala. [Ahm et al., 2016] [DANOVA, 2018]

Regnmåler

I projektet anvendes SVK regnmåler 5177. Regnmåleren er placeret på Viby Rensningsanlæg og er markeret på figur 3.2.

Flowmålinger

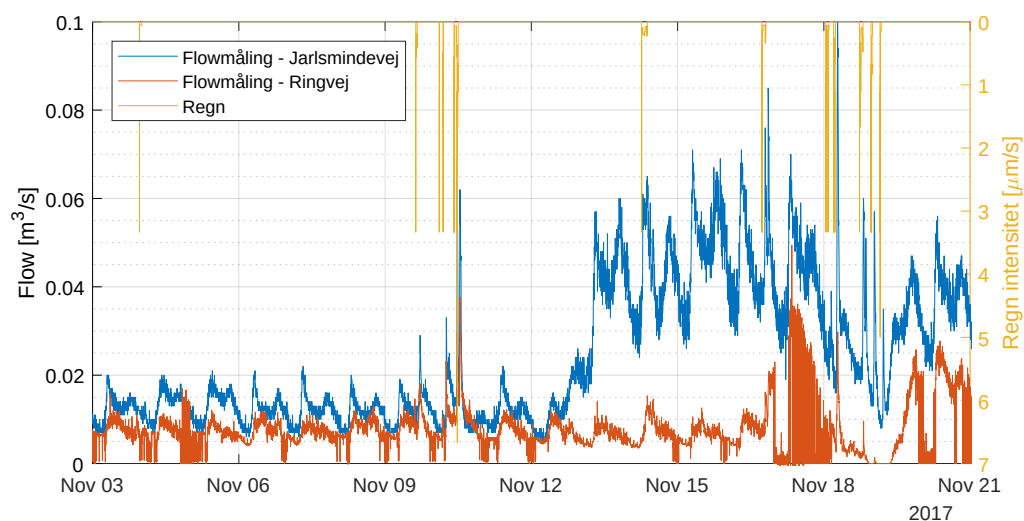
En af de typer data, der vil blive anvendt, er flowmålinger indsamlet i et spildevandssystem. Aarhus Vand har haft EnviDan til at foretage en målekampagne, hvor der er blevet opsat flowmålere på to lokaliteter i Viby, det er ved Jarlsmindevej og på Ringvejen. Placeringerne kan ses på figur 3.2.



Figur 3.2. Placering af flowmålere opsat af EnviDan, SVK regnmåler og niveaumåler i Viby Bassin.

Flowmåleren ved Jarlsmindevej har et 188 ha stort separatkloakeret opland og består næsten udelukkende af parcel- og rækkehuse, hvilket bidrager til meget forudsigelig data. Målingerne er taget med to minutters interval og en opløsning på 1 l/s. I tørvejrperioder ligger flowet mellem 5 og 25 l/s, i regnvejr er der målt flow op til 95 l/s. Oplandet til flowmåleren placeret i Ringvejen er separatkloakeret og på omtrent 115 ha, her er omkring 70 ha industri og resten parcel- eller rækkehuse. Målingerne indsamles også med et interval på 2 minutter, dog er opløsningen på 0,001 l/s. Ved Ringvejen er flowet i tørvejrperioderne mellem 2 og 17 l/s, og i regnvejr kan flowet stige op til 49 l/s.

Flowmålingerne er foretaget i spildevandssystemet, hvor der er forsøgt undgået påvirkninger fra pumpe- og fælleskloakerede oplande. Herudover er placeringerne valgt således, at ledningen opstrøms for sensoren er uden ændringer i fald, retning eller diameter, ligeledes er der heller ikke sideløb eller knæk på ledningen. Selvom det er forsøgt at installere sensorerne således der ikke kommer påvirkninger udefra, fremgår det af data, hvornår det regner. Det kan skyldes regnbetinget infiltration eller fejkoblinger. Yderligere er data fejlbehæftet, da der pludseligt sker et spring i målingerne, jf. figur 3.3. Springerne sker henholdsvis d. 13. og 17. november på Jarlsmindevej og Ringvejen, ifølge EnviDan skyldes dette kondens på sensorerne. Derfor er ønsket at evalueringsværktøjet skulle kunne validere flowdata i perioden, hvor det vides, at det er korrekt, og afvise data efter der er opstået kondens på sensoren.

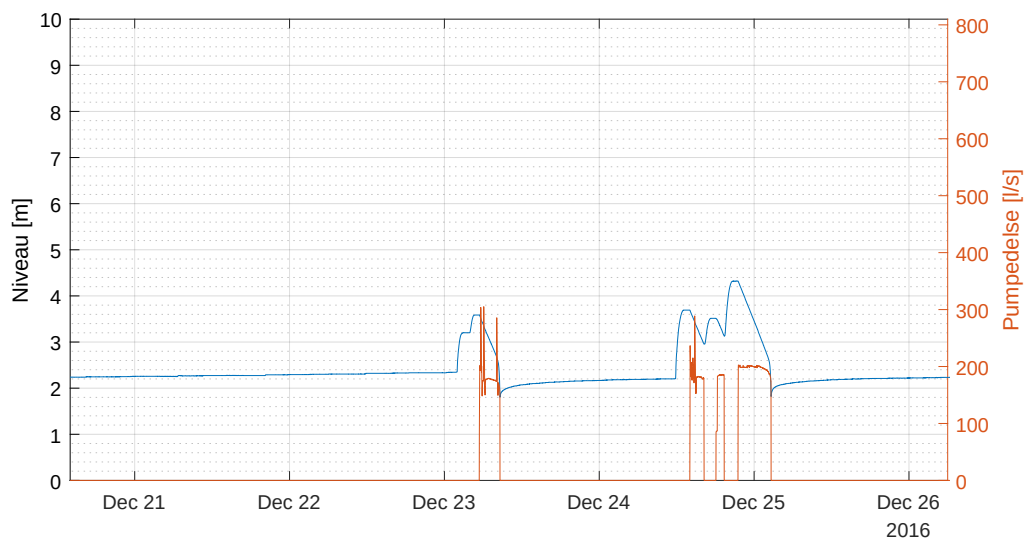


Figur 3.3. Flowdata med pludseligt spring i data, hvor der opstår kondens på sensoren.

Niveaumålinger

En anden type data der vil blive forsøgt valideret er bassindata, bestående af niveaumålinger. Der vil blive anvendt niveaumålinger fra et bassin på Viby Rensningsanlæg. Bassinet har et volumen på 16000 m³, hvilket opnåes, når niveauet i bassinet bliver 10 meter. Bassinet anvendes, når kapaciteten på rensningsanlægget er opbrugt. Når rensningsanlægget igen har mulighed for at modtage vand, pumpes vandet fra bassinet ind på rensningsanlægget. Er bassinet fyldt, og kapaciteten på rensningsanlægget opbrugt, vil der forekomme overløb ud i Døde Å. På figur 3.4 kan et udsnit af niveaumålingerne ses. Som det kan ses på figuren, stiger niveauet konstant, dette skyldes, at der sker en grundvandsindsivning til bassinet. Når vandstanden stiger til 2,5 meter, og der er tilstrækkelig kapacitet på rensningsanlægget, starter tømningpumperne og bassinet

tømmes. Niveauet hvortil bassinet tømmes er ikke konstant, men bassinet tømmes aldrig helt, hvilket skyldes at bassinet har et skylle-kammer. Skylle-kammeret kan anvendes, når bassinets bund skal skylles ren, og inderholder derfor altid vand.



Figur 3.4. Udsnit af niveaumålinger fra bassinet på Viby Rensningsanlæg og pumpeydelse fra tømme-pumperne.

Pumpeydelse

En tredje data type, der vil blive forsøgt valideret, er pumpedata. Der vil blive anvendt data fra de førnævnte pumper, der tømmer Viby Bassinet. Her sidder seks styk, som pumper op til 800 l/s til sammen. Pumpedata vil forsøge at blive valideret ved at sammenholde pumpeydelsen med volumenændringen i Viby Bassin. Et udsnit af pumpeydelse kan ses på figur 3.4.

Evalueringværktøj version 1.0

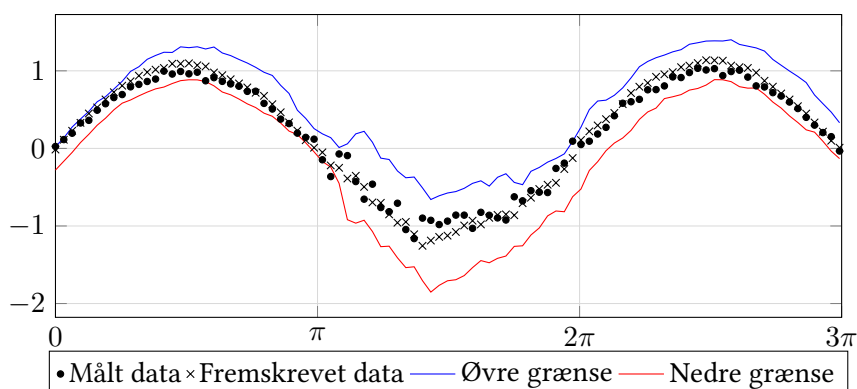
I dette kapitel vil metoderne, der er anvendt i Achton-Boel [2017], blive præsenteret og gennemgået. Efterfølgende vil metodernes anvendelighed blive testet og kommenteret.

4.1 Evalueringværktøjets kontrolmetoder

4.1.1 Dynamisk forventeligt interval på data

Til at opfange og efterfølgende validere de pludselige afvigelser sammenlignes hver ny værdi med et dynamisk forventeligt interval. Metoden står beskrevet i Alferes & Vanrolleghem [2016]. Metoden tager udgangspunkt i en tredje ordens eksponentiel fremskrivning af data, hvor der blot fremskrives en værdi. Efter fremskrivningen er foretaget, og der måles et datapunkt i samme tidsskridt, findes afvigelsen mellem den målte værdi og fremskrivningen. Denne afvigelse anvendes til beregning af et interval, hvori den næste måleværdi forventes at ligge.

På figur 4.1 vises et kunstigt eksempel af kontrollen udført på en sinuskurve, hvor der er tilføjet hvid støj. I intervallet mellem π og 2π er mængden af støj forøget. I perioden mellem 0 og π er der blot en lille mængde støj. Her foregår fremskrivningen uden store afvigelser, hvilket afspejles i det dynamiske forventelige interval, da det er relativt smalt og ligger tæt på data. Ved π stiger støjen, og fremskrivning giver større afvigelser til det målte data. Dette medfører, at det dynamiske forventelige interval bliver større i denne periode. Intervallet bliver igen smallere, da støjen på signalet mindskes ved 2π . Herunder vil fremgangsmetoden til det dynamiske forventelige interval blive gennemgået.



Figur 4.1. Konceptuel graf af det dynamiske forventelige interval.

Til fremskrivning af data anvendes formel 4.1.

$$\hat{x}_{T+1} = \hat{a}_T + \hat{b}_T + \frac{1}{2}\hat{c}_T \quad (4.1)$$

Hvor:

$\hat{x}_{T+1}$	Fremskrevet værdi
T	Indeks for tidsskridt
$\hat{a}_T, \hat{b}_T, \hat{c}_T$	Modelkoefficienter

I formlen til fremskrivning af data anvendes der tre modelkoefficienter. Disse tre koefficienter findes vha. nedenstående formler.

$$\begin{aligned} \hat{a} &= 3S_T^{[1]} - 3S_T^{[2]} + S_T^{[3]} \\ \hat{b} &= \frac{\alpha}{2(\alpha - 1)^2} \left((6 - 5\alpha)S_T^{[1]} - 2(5 - 4\alpha)S_T^{[2]} + (4 - 3\alpha)S_T^{[3]} \right) \\ \hat{c} &= \left(\frac{\alpha}{\alpha - 1} \right)^2 (S_T^{[1]} - 2S_T^{[2]} + S_T^{[3]}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

$\hat{x}_{T+1}$	Fremskrevet værdi
T	Indeks for tidsskridt
$\hat{a}_T, \hat{b}_T, \hat{c}_T$	Modelkoefficienter

I beregningen af de tre ovenstående koefficienter, indgår der tre statistiske værdier. Disse værdier er fundet ved at udglatte tre efterfølgende gange. Ligningen kan ses i formel 4.3.

$$\begin{aligned} S_T^{[1]} &= \alpha x_T + (1 - \alpha)S_{T-1} \\ S_T^{[2]} &= \alpha S_T + (1 - \alpha)S_{T-1}^{[2]} \\ S_T^{[3]} &= \alpha S_T^{[2]} + (1 - \alpha)S_{T-1}^{[3]} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Hvor:

$S_T^{[1]}, S_T^{[2]}, S_T^{[3]}$	Udglatte værdi efter første, anden og tredje udglatning
T	Indeks for tidsskridt
α	Udglatningskonstant i intervallet 0-1
x_T	Målt værdi i tidsskridt T

Udglatningskonstanten α angiver vedholdenheden i udglatningen, altså hvor stor vægtning historiske værdier har relativt til nye værdier. Er en udglatningskonstant tæt på 1, har de seneste målinger stor indflydelse på udglatningen, hvorimod en mindre værdi betyder, at de

historiske værdier har stor indflydelse på udglatningen. α -værdien kan også findes ved formel 4.4 [MATLAB Financial Toolbox]. Når α -værdien fastlægges, ønskes det, at den udglattede dataserie ikke indeholder samme mængde støj som det rå signal, men samtidig må der ikke opstå en forsinkelse i signalet.

$$\alpha = \frac{2}{wsize + 1} \quad (4.4)$$

Hvor:

$wsize$ | Antallet af historiske datapunkter der medtages til fremskrivningen

Efter den fremskrevne værdi er fundet, skal godkendelsesintervallet findes. Det vil sige, at hvis en værdi ligger uden for dette interval, anses datapunktet som afvist. Grænserne for intervallet findes ved formel 4.5.

$$\begin{aligned} x_{T, \text{øvre}} &= \hat{x}_T + K \hat{\sigma}_{e,T} \\ x_{T, \text{nedre}} &= \hat{x}_T - K \hat{\sigma}_{e,T} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Hvor:

$\hat{x}_T$ | Den fremskrevne værdi
 K | Faktor til justering af interval
 $\hat{\sigma}_e$ | Fremskrivningsfejl

For at kunne beregne dette interval er det nødvendigt at kende fremskrivningsfejlen, $\hat{\sigma}_e$, således grænserne kan justeres alt efter fejlen størrelse. Ifølge Montgomery [2009] kan fremskrivningsfejlen beregnes ud fra standardafvigelsen på fejlene mellem fremskrevet og målt data.

$$\hat{\sigma}_e = 1,25 \hat{\Delta}_T \quad (4.6)$$

Standardafvigelsen beregnes ved at foretage en første ordens udglatning for afvigelsen mellem model og måldata [Alferes & Vanrolleghem, 2016].:

$$\hat{\Delta}_T = \alpha |e_T(1)| + (1 - \alpha) \hat{\Delta}_{T-1} \quad (4.7)$$

Hvor:

$er(1)_T$ | Afvigelsen mellem fremskrevet og målt data, $x_T - \hat{x}_T$

I formel 4.5 til beregning af grænserne af intervallet indgår K som endnu en kalibreringskonstant. Denne konstant bidrager til en udvidelse af intervallet. Når både denne konstant og α -værdien skal fastlægges, er det nødvendigt med en periode af repræsentativt data, altså en periode, hvor

der ikke er opstået nogle anormaliteter. I Achton-Boel [2017] blev disse værdier fastlagt til at være $\alpha = 0,04$ og $K = 3,5$ for flowmålinger. Årsagen til at disse faktorer blev lagt fast, skyldes ønsket om at gøre kontrollen generisk, hurtig at implementere og uden krav om en kalibreringsfase. Metoden fungerede på fiktiv data, men det vil senere i projektet undersøges, hvorvidt denne tilgang er anvendelig på reelle data.

Medtagelse af input fra andre sensorer

Er data blevet markeret tvivlsomt af det dynamisk forventelige interval, skal data igennem kontrollen igen, dog med ændrede grænser, hvis der er anledning til det. Denne kontrol vil blive udført på niveau 2, da der vil blive anvendt data fra andre sensorer i systemet. For flowmålinger kunne anledningen til ændrede grænser være regn, pumpestart eller bassintømning, alle hændelser som vil medføre en ændring i flow. Måden hvorved der bliver taget hensyn til disse hændelser, er ved tilføjelse af en konstant udvidelse af det acceptable interval. Derfor ændres formel 4.5, til formelen der ses herunder:

$$\begin{aligned} x_{T,\text{øvre}} &= \hat{x}_T + K\hat{\sigma}_{e,T} + a \\ x_{T,\text{nedre}} &= \hat{x}_T - K\hat{\sigma}_{e,T} - b \end{aligned} \quad (4.8)$$

Som det fremgår af 4.8, er konstanterne a og b blevet tilføjet. De bidrager til konstant udvidelse af båndet, når der modtages input om ændringer fra andre sensorer.

De to ovenstående metoder vil senere blive afprøvet på flowmålingerne præsenteret i 3.2.

4.1.2 Statistiske metoder til evaluering af deterministisk model

På niveau 3 vil godkendt data blive holdt op imod beregningsresultater fra en MIKE URBAN model, således det er muligt at evaluere en MIKE URBAN model. Der vil blive anvendt tre evalueringskriterier. Som tidligere nævnt vil det være NSE, PBIAS, og RSR. Evalueringsmetoderne beskrives i det følgende.

Nash-Sutcliffe efficiency

NSE anvendes til at beskrive, hvor godt en model stemmer overens med observationer. NSE strækker sig fra $-\infty$ til 1. $NSE = 1$ betyder, at modellen er et perfekt fit på observationerne, hvis $NSE < 0$ betyder det, at en middel værdi af observationerne havde ageret som en bedre model end den anvendte. NSE giver et overordnet billede af modellens præstation, og kan udelukkende fortælle, hvorvidt modellen er kalibreret korrekt eller ej. Værdien i sig selv kan ikke angive hvilken type fejl der optræder. NSE er samtidig følsom overfor *spikes* (en ekstrem observation relativt til de omkringliggende observationer) i data, hvorfor det er nødvendigt at disse opfanges på et tidligere stadie af evalueringsværktøjet. NSE beregnes således:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{model})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2} \quad (4.9)$$

Hvor:

Y_i^{obs}	Observeret værdi til tidsskridt i
Y_i^{model}	Modelleret værdi til tidsskridt i
$\overline{Y^{obs}}$	Middelværdi af observerede værdier
n	Antallet af tidsskridt ønsket evalueret

Procent bias

PBIAS angiver forskellen mellem model og observation i procent. En positiv værdi betyder, at modellen underestimerer i forhold til observationerne og vice versa. Fordelen ved at anvende PBIAS som en af de tre evalueringskriterier ligger i, at værdien beskriver, hvorvidt mængden af vand i modellen matcher mængden af vand i afløbssystemet. Det betyder, at værdien potentielt kan fungere som en indikator for fejlkoblinger, forkerte befæstelsesgrader eller døgnvariation. PBIAS findes på følgende måde:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{model}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (4.10)$$

Hvor:

Y_i^{obs}	Observeret værdi til tidsskridt i
Y_i^{model}	Modelleret værdi til tidsskridt i

RSR

RSR udregnes som forholdet mellem Root-Mean-Square-Error og standardafvigelsen på observationer. Det betyder, at RSR kan anses som en normaliseret RMSE-værdi. Derfor vil resultatet, af denne metode ikke være dårligt, hvis modellen indeholder en konstant bias, så længe tendenserne er korrekte. Det bedste resultat der kan opnås med RSR er 0. RSR er derfor brugbar til at kontrollere om modellens tendenser er rigtige. RSR findes således:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDAFV_{obs}} = \left[\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{model})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \overline{Y^{obs}})^2}} \right] \quad (4.11)$$

Hvor:

Y_i^{obs}	Observeret værdi til tidsskridt i
Y_i^{model}	Modelleret værdi til tidsskridt i
$\overline{Y^{obs}}$	Middelværdi af observerede værdier
n	Antallet af tidsskridt ønsket evalueret

Overordnet vurdering

Når resultatet af de tre evalueringsmetoder er blevet beregnet, skal der foretages en samlet vurdering af modellen. I Moriasi et al. [2007] er der opsat en række intervaller, som tilsvarende en samlet vurdering af modellen. Intervallerne er listet i tabel 4.1.

Vurdering	NSE	PBIAS	RSR
Meget god	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$
God	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0,50 < RSR \leq 0,60$
Tilfredsstillende	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$0,60 < RSR \leq 0,70$
Utilfredsstillende	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$RSR > 0,70$

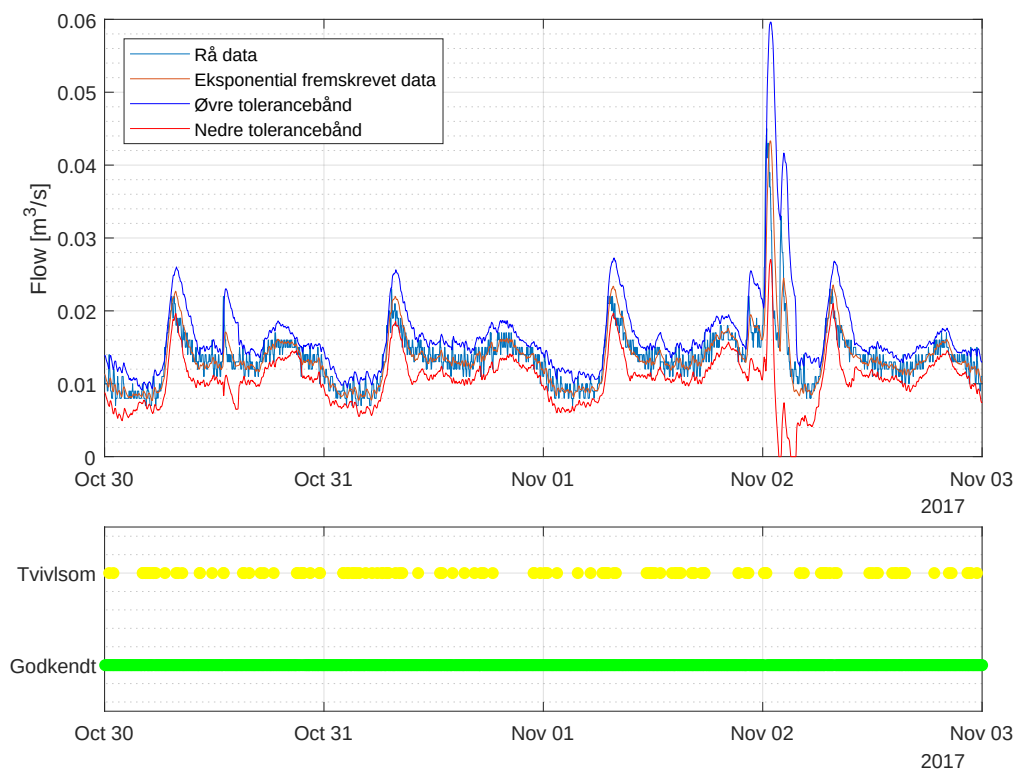
Tabel 4.1. Oversigt af evalueringskriterier fra Moriasi et al. [2007].

Evalueringen vil blive foretaget over en 24 timers horisont, således vil det være muligt at danne sig et overblik over, hvordan modellen har klaret sig de seneste 24 timer. Når der anvendes en tidshorisont på 24 timer betyder det, at en eventuel fejl først vil registres efter regnhændelsen er overstået. Det betyder, at denne metode ikke vil give et øjebliksbillede af, hvordan en model klarer sig, men foretage en evaluering af modellen baseret på de seneste 24 timer. Tidshorisonten kan naturligvis varieres alt efter, hvilket resultat der ønskes. En kortere tidshorisont vil bevirke, at resultatet giver et øjebliksbillede af modellens præstation. En længere tidshorisont vil beskrive modellens generelle evne til at beskrive oplandet. Hvis tidshorisonten bliver for lang er der en risiko for, at resultatet ikke afspejler modellens evne til at beskrive regnvejrflow, men udelukkende tørvejrflow. Det skyldes, at længere perioder indeholder flere tørvejrperioder end regnperioder. Derved vil eventuelle fejl fra regnperioder udglattes. Evalueringen vil blive foretaget på enkelte sensorer, del-oplande og hele modeloplandet. Måden hvorved det vil blive gjort, er ved et vægtet gennemsnit, baseret på de enkelte sensorers opland. Resultaterne skal præsenteres grafisk, således det er let at danne sig et overblik.

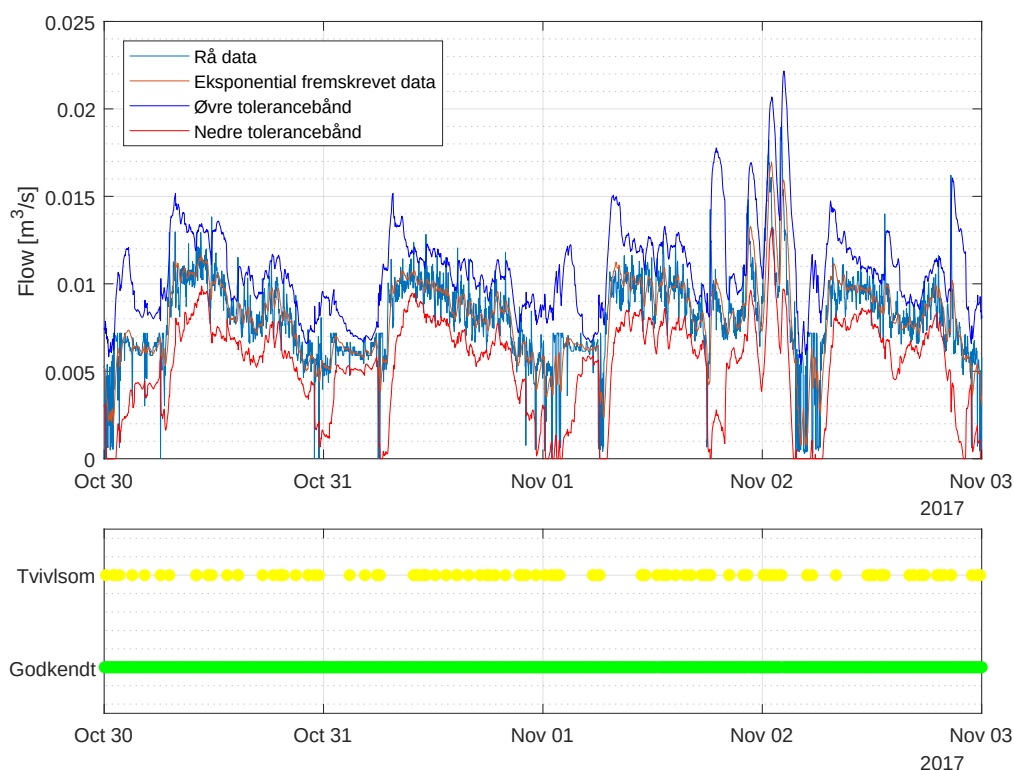
4.2 Evaluering af evalueringerværktøj 1.0

4.2.1 Anvendelse af dynamisk forventeligt interval på flowmålinger fra Viby

Metoden der blev gennemgået i afsnit 4.1.1 er anvendt på flowmålingerne fra Jarlsmindevej og Ringvejen. Som beskrevet i afsnittet vil der blive anvendt kalibreringskonstanterne $\alpha = 0,04$ og $K = 3,5$. På figur 4.2 er kontrollen udført på dataet fra Jarlsmindevej, og for Ringvejen på figur 4.3. Som det kan ses på begge figurer, bliver store mængder af data ukorrekt markeret som tvivlsomme. Samtidig ses det, hvordan båndet ændrer sig markant, når der kommer store ændringer i dataet, specielt kontrollen foretaget på Ringvejen er udsat for dette. Årsagen til dette er, at der er meget støj på signalet. Det medfører, at der enkelte steder godkendes data som er fejlbehæftet. Samtidig bliver godkendelsesintervallet meget bredt i perioder, hvor måling og fremskrivning afviger betydeligt fra hinanden. Godkendelsesintervallet påvirkes derfor, hvis støjen på signalet bliver større, hvorved intervallet også bliver større, hvilket igen vil bevirke, at eventuelle fejl ville blive godkendt. Eksponentialfremskrivningen virker efter hensigten, dog vil det være nødvendigt at kalibrere k - og α -værdien for det bedste resultat. Da det overordnede formål med denne kontrol var at opfange pludselige hændelser, anses denne metode som ikke optimal til formålet. Samtidig ønskes det ikke, at godkendelsesintervallet ændres i takt med afvigelsen mellem fremskrivning og målt data. Det må derfor konstateres, at der skal findes en ny metode til beregning af intervallet, samtidig med at denne metode ikke kan anses for at være generisk, og det vil være nødvendigt med en kalibrering, og ikke blot to fastlagte konstanter. Dette vil medføre, at metoden vil blive mere omstændig at opsætte, det vurderes dog at være nødvendigt for at have en brugbar validering af data. Det vælges ikke at teste metoden fra niveau 2, hvor der anvendes input fra andre sensorer, da hele grundmetoden skal omtænkes.



Figur 4.2. Data fra Jarlsmindevej forsøgt valideret vha. dynamisk forventeligt interval.

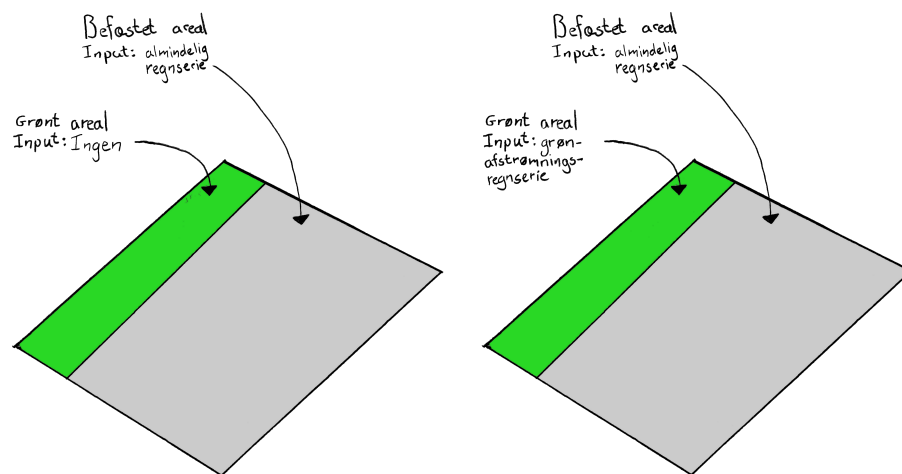


Figur 4.3. Data fra Ringvejen forsøgt valideret vha. dynamisk forventeligt interval.

4.2.2 Anvendelse af statiske metoder til evaluering af MIKE URBAN model

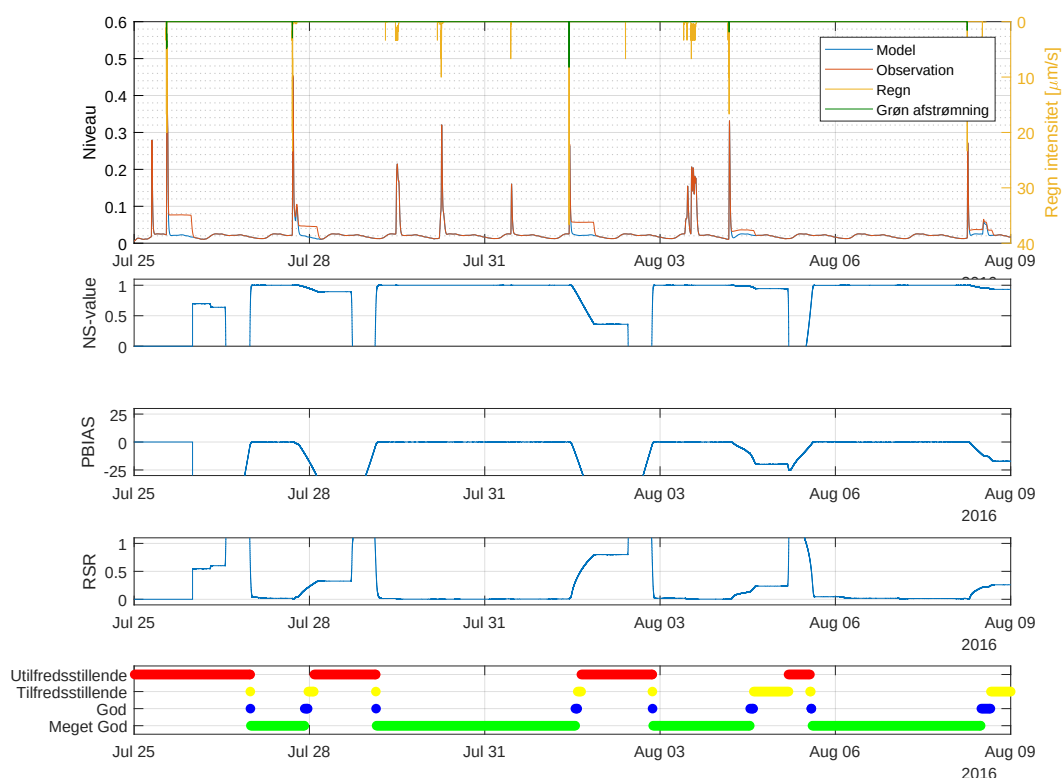
Som nævnt i indledningen tiltænkes niveau 3 at skulle angive, hvorvidt en MIKE URBAN model kunne beskrive, hvad der foregik i systemet. Dette skulle gøres på baggrund af de tre evalueringsmetoder NSE, PBIAS og RSR. Årsagen til at anvende tre evalueringsmetoder var, at sammensætningen af resultaterne fra evalueringsmetoder ville danne et "*fingeraftryk*" af eksempelvis hændelser med afstrømning fra grønne arealer (fremadrettet grøn afstrømning). Efterfølgende kunne denne specifikke sammensætning af resultater kategoriseres, og anvendes fremadrettet til markering af tilsvarende hændelser, der skulle således oprettes et hændelses-katalog med kategoriserede hændelser.

For at kontrollere hvorvidt dette er muligt, kræves et stort antal sensorer i spredt i oplandet. Da dette ikke forefindes, blev der opsat to forskellige MIKE URBAN modeller over Viby. Den ene model skal agere virkelighed, og den anden model skal anses som en *almindelig* model. Med modellen, der skal agere virkelighed, ønskes det at simulere grøn afstrømning. Derfor tilføjes en grøn-afstrømnings-regnserie, som udelukkende påvirker grønne- og permeable arealer jf. figur 4.4. Regnserien, der tilføjes til de grønne arealer, er dannet på baggrund af Thorndahl & Løvgaard [2018] og skal simulere den afstrømning, der vil forekomme, hvis regnen er tilstrækkelig kraftig. Efter modelkørslerne er de tre evalueringskriterier beregnet med en tidshorisont på 24 timer.



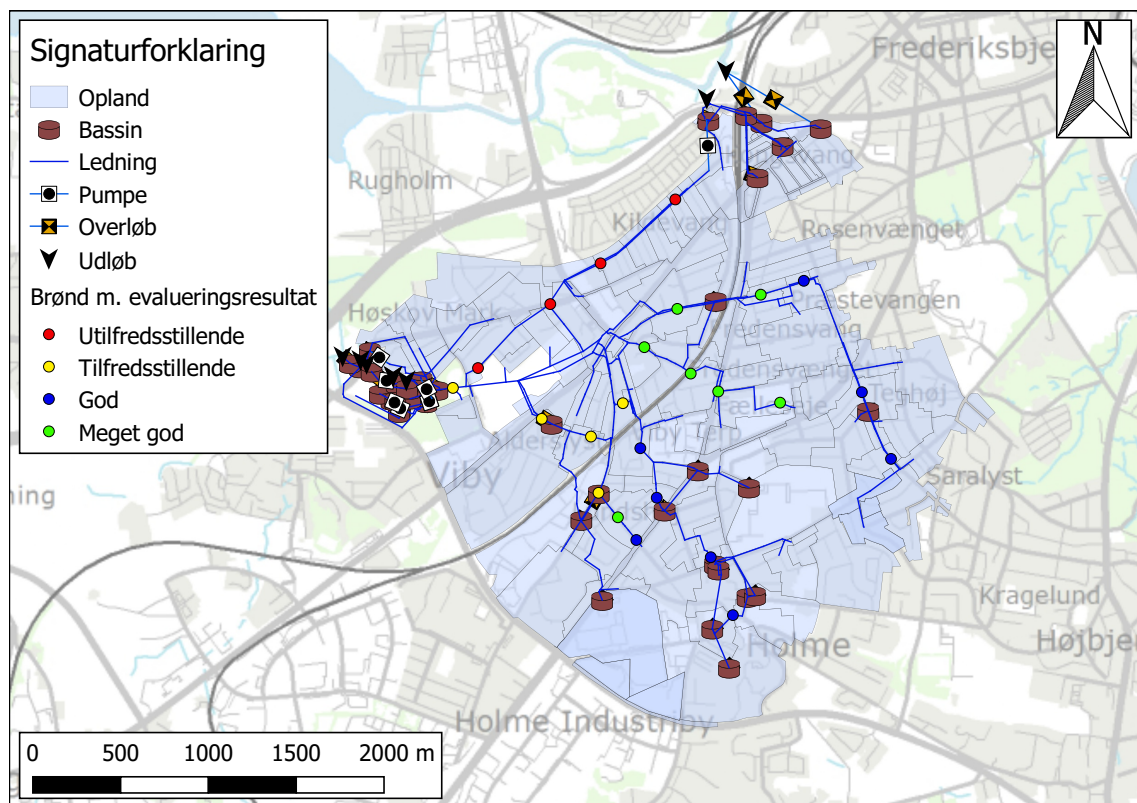
Figur 4.4. Skitsetegning af oplande i de to typer modeller der er blevet anvendt til test af evalueringsniveau 3. Til venstre ses et opland i en *almindelig model*, til højre ses et opland i modellen, der skal agere virkelighed, hvor der forekommer grøn afstrømning.

På figur 4.5 ses evalueringresultaterne for en periode på 15 dage. Enkelte regnhændelser har medført grøn afstrømning, hvilket tydeligt ses på de tre grafer med resultaterne af evalueringsmetoderne. Den nederste af de fem grafer viser den samlede vurdering af modellen, som er foretaget på baggrund af kravene oplyst i tabel 4.1.



Figur 4.5. Evalueringresultat af niveau 3.

Med disse grafer ønskes det at finde dette *fingeraftryk* til kategorisering. Ud fra figur 4.5 graferne har det umiddelbart ikke været muligt at finde et fingeraftryk til kategorisering af afvigelser med. Derfor vurderes det, at dette niveaus styrke ligger i den grafiske præsentation af evalueringen. En grafisk præsentation af resultaterne giver mulighed for at danne sig et hurtigt overblik over, hvordan modellen har præsteret de seneste 24 timer. Figur 4.6 illustrerer et evalueringsresultat efter en regnhændelse. I den nordlige del af figuren haves fire punkter, hvor resultatet af modevalueringen er utilfredsstillende, dette kunne indikere, at modellen ikke er korrekt kalibreret i dette område. I en situation som førnævnte, vil det naturligvis give anledning til at foretage en undersøgelse og forsøge at finde frem til problemets rod.



Figur 4.6. Evalueringsresultat af niveau 3. [Achton-Boel, 2017]

Problemformulering

I det forrige kapitel blev evalueringsværktøjet fra Achton-Boel [2017] gennemgået og testet på indsamlet data. Metoden med det dynamisk forventelige interval fungerede ikke som ønsket til evalueringsværktøjets formål. Samtidig var det forsøgt at gøre opsætningen af kontrollerne generelle, for at implementeringen af evalueringsværktøjet ville være simpel. Dette viste sig ikke at være muligt, da bl.a. støj og tidslig opløsning varierer fra sensor til sensor, hvilket kræver forskellige opsætninger af metoderne. Det ordnede framework anses som værende fungerende, og bibeholdes derfor. Følgende projekt vil således forsøge at opsætte nye metoder til kontrollerne. Der er opstillet følgende forskningsspørgsmål, som vil forsøges belyst.

- Hvordan kan flow- og niveaumålinger valideres?
- Hvordan kan information mellem sensorer anvendes til en bedre validering?
- Hvordan kan datavalidering bidrage til en større forståelse af afløbssystemet?

Evalueringsværktøj version 2.0

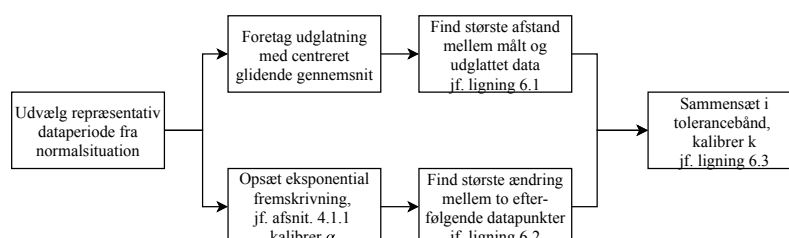
I afsnit 4.2 blev det konkluderet, at metoderne fra Achton-Boel [2017] ikke egnede sig til det ønskede formål. Derfor vil der i dette kapitel blive præsenteret nye metoder, der kan opfange pludselige ændringer i data. Disse metoder vil derefter også blive afprøvet på data for at kontrollere deres anvendelighed.

6.1 Videreudvikling af forventeligt interval på data

6.1.1 Tolerancebånd på baggrund af signalstøj

I stedet for et dynamisk forventeligt interval vælges det at bruge et konstant tolerancebånd til at opfange de pludselige ændringer i data. Tolerancebåndet vil blive beregnet på baggrund af støjen på signalet.

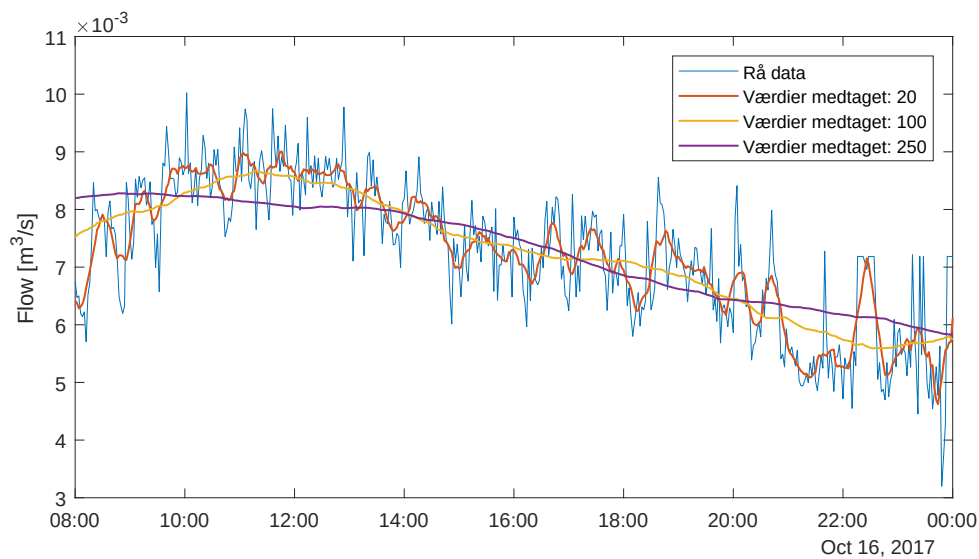
Opsætningen af den nye kontrol består af to kalibreringsprocesser. I første proces skal den maksimale støj på signalet findes, og anden proces består i at opsætte eksponentialfremskrivningen og efterfølgende bestemme den største ændring mellem to efterfølgende punkter. Disse kalibreringsprocesser skal foretages på repræsentativ data fra en normalsituation. Støjen bruges til at bestemme bredden på tolerancebåndet, den største ændring i normalsituationen er nødvendig at fastlægge, for at en pludselig ændring kan opfanges. Et flowchart over opsætningen kan ses på figur 6.1



Figur 6.1. Fremgangsmetode til opsætningen af tolerancebåndet.

For at kunne bestemme den maksimale støj samt største ændring, er det nødvendigt at udvælge en periode, der anses som en normalsituation, det vil sige en periode uden udfald, regn eller andre anormaliteter. Når perioden er udvalgt, skal den maksimale støj bestemmes. Det gøres ved at foretage en udglatning af signalet. Til dette anvendes et centreret glidende gennemsnit. Antallet af værdier, der anvendes til udglatningen skal findes via visuel inspektion, da det ikke er muligt,

at anvende en kvalitativ evalueringsmetode, som RMSE¹ eller NSE. På figur 6.2 illustreres et eksempel med tre forskellige udglatninger. Til udglatningerne er der anvendt henholdsvis 20, 100 og 250 datapunkter, i tabel 6.1.1 ses resultaterne fra evalueringsmetoderne. Resultatet af RMSE strækker sig fra 0 til ∞ , hvor 0 er det bedste resultat. For NSE er det bedste resultat en værdi på 1. Ud fra disse betingelser vil en udglatning med en population på 20 være det åbenlyse valg. Men da formålet med udglatningen er at bestemme den maksimale støj der forekommer i signalet, skal udglatningen ikke fluktuere i samme grad som målingen, samtidig skal der ikke udglattes i en sådan grad, at lokale minimum- og maksimumsværdier ikke beskrives. For at kunne finde den passende udglatning, er det nødvendigt med visuel inspektion. I eksemplet på figur 6.2 vælges det, at 100 datapunkter giver den bedste udglatning til formålet.



Figur 6.2. Resultat af et centreret glidende gennemsnit med tre forskellige populationer.

Population	RMSE-værdi	NSE-værdi
20	$5,1 \cdot 10^{-4}$	0,83
100	$6,9 \cdot 10^{-4}$	0,68
250	$8,0 \cdot 10^{-4}$	0,58

Tabel 6.1. Evalueringsresultat af et glidende gennemsnit med forskellige populationer.

Når udglatningen er blevet foretaget, findes den absolutte forskel mellem det rå og det udglattede data, den største af disse værdier fastlægges som den maksimale støj, jf. formel 6.1.

$$noise_{max} = \max \left(\text{abs} \left(Y_i - \bar{Y}_i \right) \right) \quad (6.1)$$

Hvor:

$noise_{max}$	Maksimal støj på signal
Y_i	Råt signal til tiden i
$\bar{Y}_i$	Udglatet signal til tiden i

$$^1 RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{model})^2}{n}}$$

Når den maksimale støj er fastlagt, skal eksponentialfremskrivningen opsættes. Fremgangsmetoden til opsætningen af fremskrivningen er tilsvarende til metoden i afsnit 4.1.1. Til metoden skal en α -værdi findes. α -værdien beskriver, hvor mange historiske datapunkter, der medtages til fremskrivningen. Det ønskes, at fremskrivningen giver en blød kurve, uden at der forekommer en forsinkelse af signalet, og derfor vil α -værdien variere alt afhængig af den tidlige opløsning samt mængden af støj på signalet. Er der meget støj på signalet, vil det være nødvendigt med en lille α -værdi, altså skal der medtages mange historiske datapunkter til beregningen af den næste observation. Hvis signalet ikke indeholder meget støj, vil en α -værdi tættere på 1 være anvendelig. Ligesom med det glidende gennemsnit kan der ikke anvendes en kvalitativ metode til fastlæggelse af α -værdien, derfor skal visuel inspektion også anvendes her, jf. figur 6.2.

Når eksponentialfremskrivningen er blevet opsat, kan den største maksimale ændring mellem to efterfølgende punkter på fremskrivningen findes. Det gøres som vist i formel 6.2.

$$change_{max} = \max(\hat{Y}_i - \hat{Y}_{i-1}) \quad (6.2)$$

Herefter tilføjes en ny betingelse til eksponentialfremskrivningen. Denne betingelse skal medføre, at hvis en ny værdi stiger eller falder mere end $change_{max}$, bliver den nye værdi blot $\hat{Y}_{i+1} = \hat{Y}_i \pm change_{max}$. Det vælges at tilføje denne betingelse til fremskrivningen, da kraftigere ændringer end dem der forekommer i normalsituationen, må anses som værende anormale, og ønskes derfor markeret. Data vil blive markeret da fremskrivningen, og derved tolerancebåndet, ikke ændres i samme grad som data, grundet begrænsning.

Efter eksponentialfremskrivningen er opsat, er det muligt at fastlægge bredden på tolerancebåndet ved hjælp af formel 6.3. Kalibreringsfaktoren vælges således, at lige akkurat alle værdier, der anses for at være korrekte, godkendes i perioden med repræsentativ data.

$$\begin{aligned} U_{lim,i} &= \hat{Y}_{i-1} + noise_{max} \cdot K \\ L_{lim,i} &= \hat{Y}_{i-1} - noise_{max} \cdot K \end{aligned} \quad (6.3)$$

Hvor:

$U_{lim,i}$	Øvre grænse for tolerancebåndet til tiden i
$L_{lim,i}$	Nedre grænse for tolerancebåndet til tiden i
$\hat{Y}_{i-1}$	Den eksponential fremskrive værdi til tiden $i-1$
K	Kalibreringsfaktor i intervallet $[0,5 - 2]$

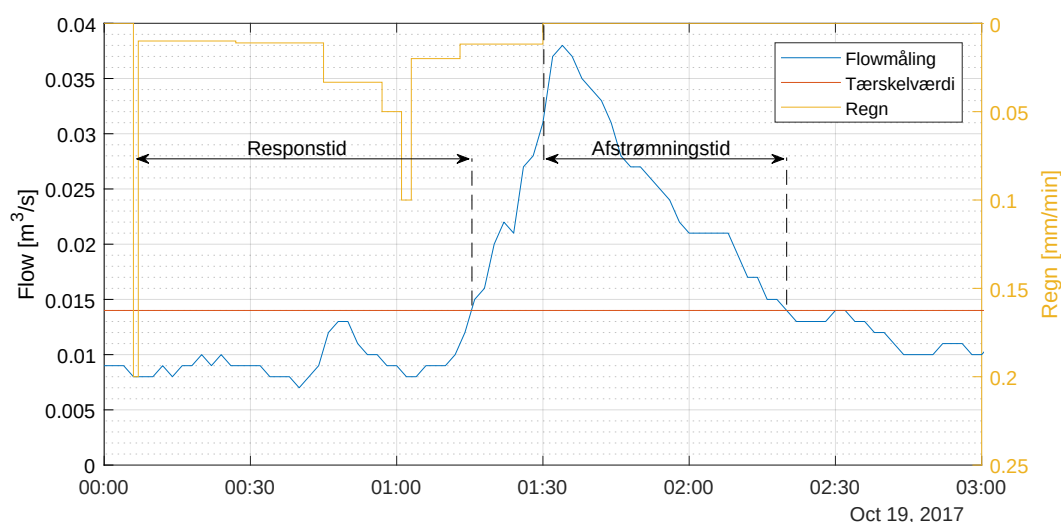
Når ovenstående kalibrering af metoden er foretaget, skal det kontrolleres, hvorvidt kontrollen fungerer som ønsket. Det gøres ved at finde en periode med regn, spikes eller andre forhold, som anses for en pludselig afvigelse. Virker kontrollen efter hensigten, skulle disse nemlig markeres som tvivlsomme.

6.1.2 Kontekstklassificeret tolerancebånd

Data, der er blev markeret som tvivlsom på niveau 1, skal endnu engang igennem en kontrol med et tolerancebånd på niveau 2. Når data skal gennemgå en yderligere kontrol med tolerancebånd,

er formålet at kontrollere, hvorvidt de tvivlsomme data kan have en logisk forklaring. Derfor skal tolerancebåndet og eksponentialfremskrivningen ændre sig i forhold til den aktuelle kontekst. Metoden er inspireret af Branislavljević et al. [2011], hvor data netop valideres på baggrund af deres kontekst.

I dette projekt vil der blive anvendt kontekster som regnvejr, periode hvor der pumpes, bassintømning eller andre forhold som kan have indflydelse på den pågældende måling. Eksempelvis skal en flowmåler derfor ses i sammenhæng med en regnmåler, da der forventes et øget flow, i forbindelse med regn. De ændrede betingelser skal fastholdes så længe, der kan forventes ændrede forhold ved sensoren, samtidig skal de ikke træde i kraft, før det kan forventes at se afvigelser fra normalsituationen. Til at bestemme disse tider, anvendes systemets hurtigste responstid og længste afstrømningstid. Respons- og afstrømningstid skal ikke findes i realtid, men findes under opsætningen af kontrollen. På figur 6.3 ses det hvordan respons- og afstrømningstid defineres. Responstiden angiver hvornår de ændrede betingelser skal træde i kraft, hvor afstrømningstiden bestemmer, hvor længe de ændrede betingelser skal gælde. Responstiden er defineret som tiden mellem det første vip i en regnhændelse og tiden, hvor en måling krydser en tærskelværdi. Denne tærskelværdi vil afhænge af sensortypen. Er det en flowmåler, kunne en maksimal døgnvariation anvendes, for en sensor placeret i et bassin kunne det være et fastlagt niveau. Tærskelværdien skal beskrive, hvornår data ikke længere ligger inden for en normalsituation. Afstrømningstiden defineres som tiden fra det sidste vip i en hændelse til tiden, hvor målingen falder under tærskelværdien, og data igen ligger inden for en normalsituation. Er det ikke muligt at fastlægge en tærskelværdi, kan visuel inspektion anvendes til at bestemme respons og afstrømningstid. I forbindelse med at der foretages en analyse af responstiden, er det muligt at samtidig lave en analyse af mængden af nedbør over en given periode, som kræves for at skabe en respons i systemet. Er responstid længere end netop denne periode, giver det mulighed for at frasortere denne hændelse og undgå en unødvendig udvidelse af tolerancebåndet.



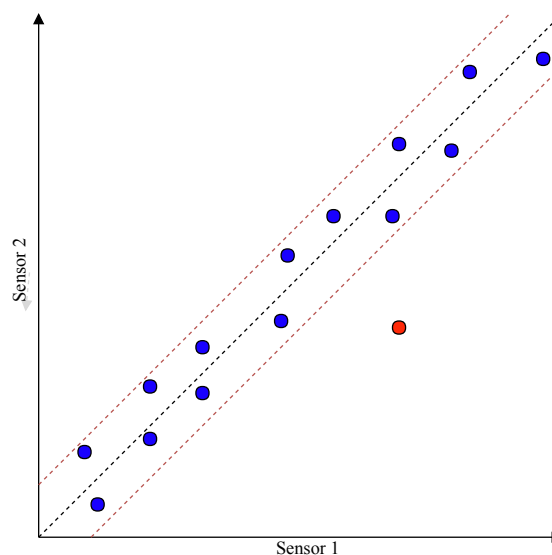
Figur 6.3. Illustration af hvordan respons- og afstrømningstid findes.

Når respons- og afstrømningstid er fastlagt, skal de ændrede betingelser også fastlægges. Det vil sige, at kalibreringskonstanterne α og K , samt den maksimale ændring skal findes igen.

Fremgangsmetoden til dette er den samme som i afsnit 6.1.1, her skal kontrollen dog ikke kalibreres på data fra en normalituation, men med data fra de kontekster, sensoren kan indgå i. Ved bassiner kunne det være under regn samt ved en bassintømning. For en flowmåler kunne det blot være ved regnvejr.

6.2 Redundans mellem sensorer

Ud over tolerancebåndet bliver der anvendt redundans mellem sensorer til at foretage en validering af data. Anvendelsen af redundans er en simpel kontrol, og den kan hurtigt sættes op. En principskitse af kontrollen kan ses på figur 6.4. For at kunne validere data med redundans kræver, det to sensorer der måler den samme type data. Hvis det ikke er tilfældet, kan en mulighed være at oprette en *soft sensor*. En soft sensor er en virtuel sensor, som bygger på data fra andre sensorer, det kunne for eksempel være niveaumåling, der omregnes til en flow- eller volumenmåling. Når der anvendes redundans, skal målingernes forhold være 1:1. I forbindelse med opsætningen af kontrollen skal der vælges en tidshorisont. Tidshorisonten afhænger af typen af sensorer der er redundans mellem, samt skal tidshorisonten afspejle hvilke typer fejl kontrollen ønskes at opfange. Skal kontrollen opfange, enkelte afvigelser i data, anvendes en kort tidshorisont. Ønskes der at kontrollere for drift i sensorerne, skal en længere tidshorisont anvendes. Derved udglattes små fejl og afvigelser, og eventuel drift i sensorerne fremstår tydeligere.



Figur 6.4. Principskitse af redundanskontrol.

Data vil blive valideret ved hjælp af et konfidensbånd. Størrelsen på dette konfidensbånd vil igen afhænge af kontrollens formål. Skal der opfanges mindre afvigelser i data, skal tolerancebåndet være smalt. Skal der kontrolleres for drift i data, kan et bredere bånd anvendes. En ulempe ved denne type kontrol er, at hvis der afvises data, vides det ikke, hvilke sensor der forårsager problemet. Afvises et datapunkt, skal en undersøgelse igangsættes for at fastlægge årsagen til det afviste datapunkt.

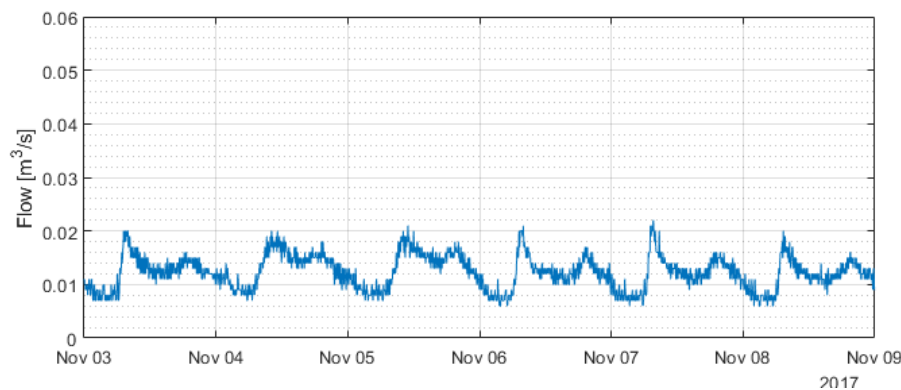
6.3 Validering af nyt tolerancebånd

6.3.1 Implementering af tolerancebånd på data fra Viby

I følgende afsnit vil den nye metode med tolerancebånd anvendes på flowdata fra Jarlsmindevej og Ringvejen, efterfulgt af niveaumålinger fra Viby Bassin.

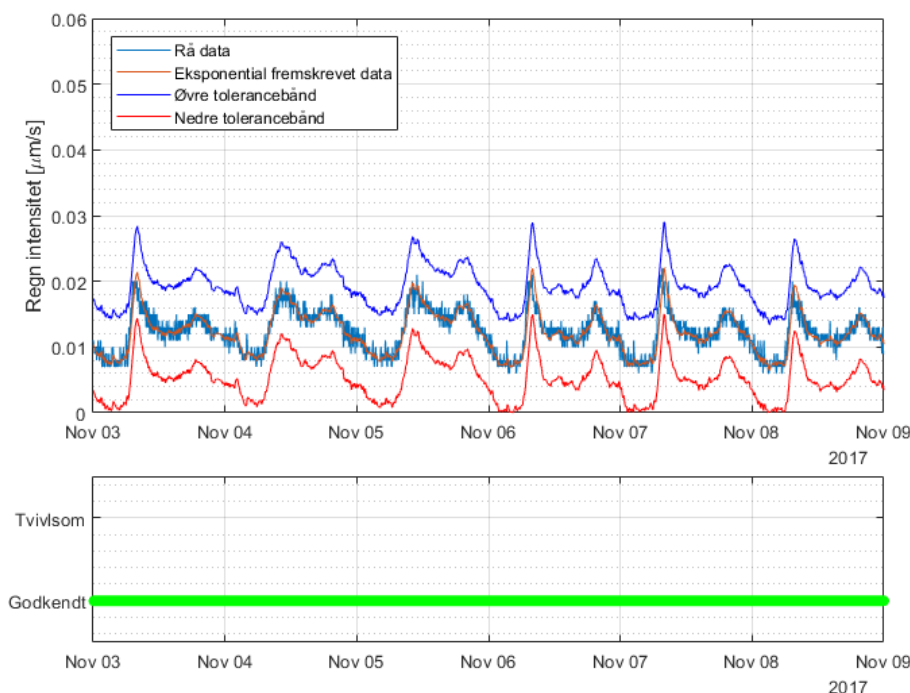
Flowmålinger i Jarlsmindevej

Når kontrollen med tolerancebåndet skal opsættes, fastlægges den maksimale støj samt største gradient først, til det udvælges perioden fra 3. til 9. november 2017 som repræsentativ data. Det gøres da der ikke har været regn i denne periode, samt er der ikke nogle *spikes* i data, jf. figur 6.5.



Figur 6.5. Repræsentativ dataperiode fra flowsensor ved Jarlsmindevej.

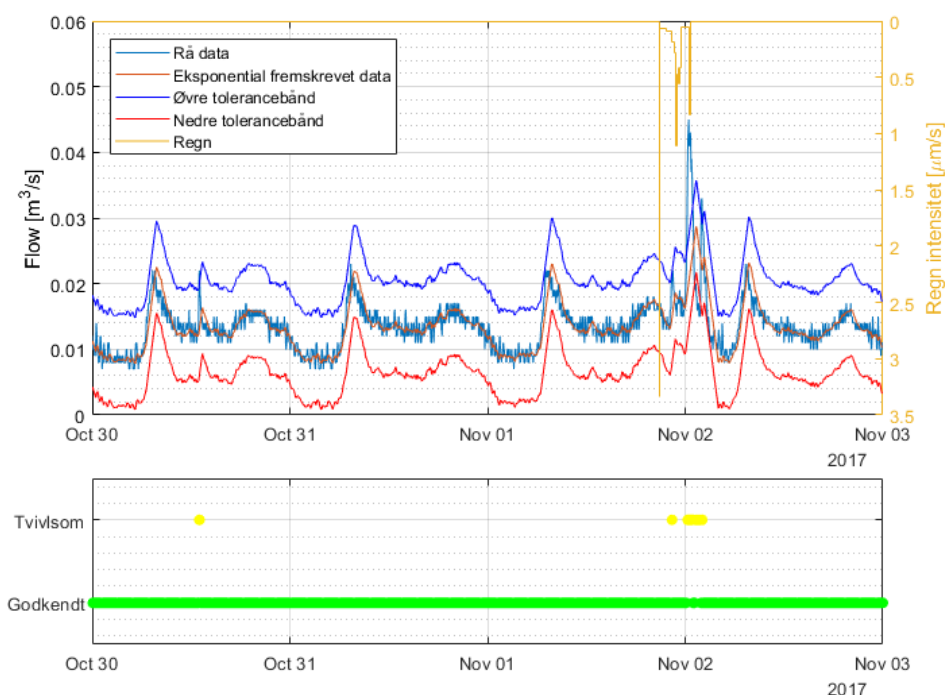
Den maksimale støj i denne periode findes til at være $0,0050 \text{ m}^3/\text{s}$. Til den eksponentielle fremskrivning for data fra Jarlsmindevej vælges skal α -værdien til at medtage de seneste 60 værdier, som svarer til 120 minutter, hvilket giver en α -værdi på 0,03. Kalibreringsfaktoren af tolerancebåndet findes til at skulle være $K = 1,4$, for at alle datapunkter i perioden godkendes.



Figur 6.6. Validering af repræsentativ dataperiode fra flowsensor ved Jarlsmindevej.

På figur 6.6 ses datavalideringen med tolerancebånd af det repræsentative data. Som det illustreres, godkendes alle datapunkter, hvilket også var ønsket.

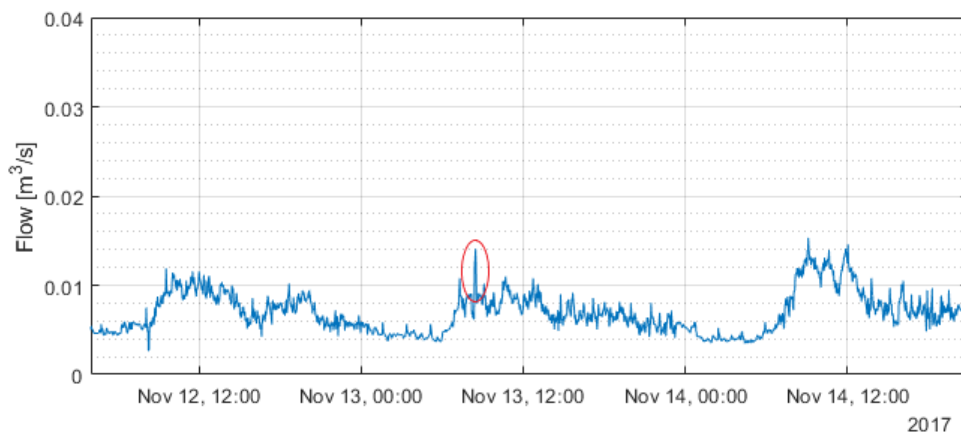
Efter tolerancebåndet er fastlagt, findes den største tilladelige ændring i flow. For Jarlsmindevej er denne 0,32 l/s over 2 minutter. Denne information indsættes i eksponentialfremskrivningen, således der maksimalt kan forekomme en stigning på 0,32 l/s over to minutter. Giver resultatet af fremskrivningen en større ændring end det, vil der blot blive lagt 0,32 l/s til den forrige værdi. På figur 6.7 bekræftes det, at kontrollen fungerer efter hensigten. Den præsenterede periode indeholder både et spike samt en regnhændelse. Begge hændelser markeres tvivlsomme, samtidig ses det, hvordan betingelsen vedrørende den maksimale gradient træder i kraft omkring d. 02. november. Da regnen registreres, forekommer en ændring, der er større end den tilladelige, derfor ses det, at fremskrivningen og tolerancebåndet stiger og efterfølgende falder linært.



Figur 6.7. Validering af flowdata fra Jarlsmindevej, indeholdende spike og regn som korrekt markeres *tvivlsom*.

Flowmålinger i Ringvejen

Samme fremgangsmåde anvendes på data fra Ringvejen. Dette datasæt er mere udfordrende, da der er markant mere støj i signalet, og derfor kan det være svært at vurdere, hvilke af datapunkterne, der kan anses som værende reelle data eller fejlbehæftede. Grundet støjen samt mængden af uregelmæssigheder på signalet har det kun været muligt at finde en periode på omtrent tre dage, der kan anses som værende repræsentativ data for Ringvejen. Denne periode er præsenteret i figur 6.8. Perioden indeholder dog et spike, hvilket også er markeret på figuren. Spiket ønskes ikke godkendt, da punktet ligger i stor afstand fra omkringliggende data.



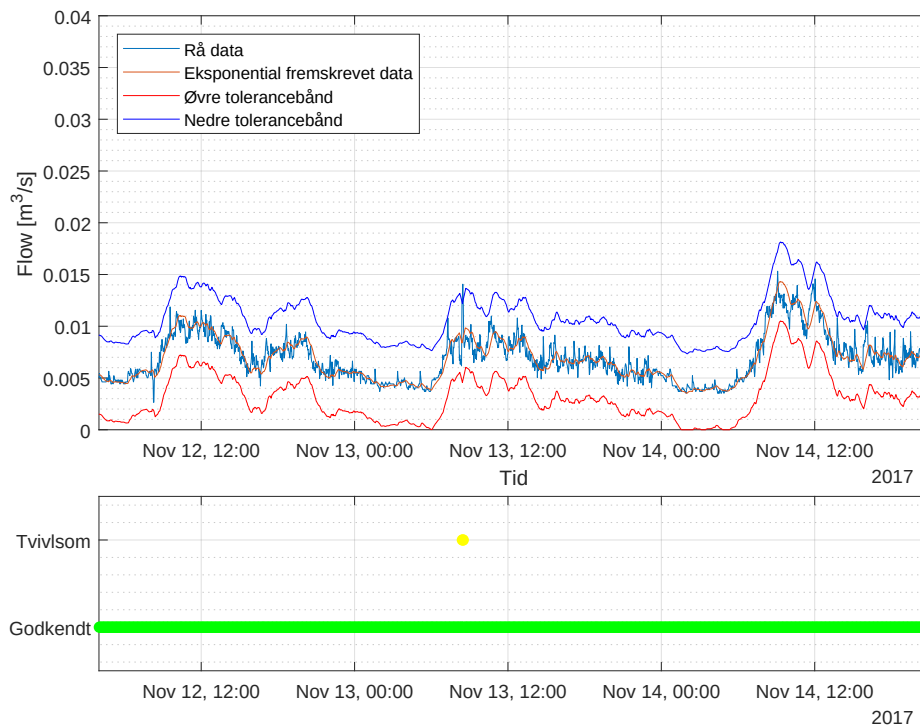
Figur 6.8. Repræsentativ dataperiode med et spike markeret for flowsensor på Ringvejen.

I tabel 6.2 ses værdierne, der er anvendt til opsætningen af kontrollen, de er fundet med samme fremgangsmetode som for sensoren i Jarlsmindevej. Kalibreringsfaktoren er fundet til at skulle være 0,72. En værdi mindre end 1 angiver at tolerancebåndets bredde er mindre end støjen, der er fundet på signalet. Årsagen til dette er spiket markeret på figur 6.8.

Maksimale støj	0,0053 m ³ /s
α -værdi	0,03
Kalibrerings faktor	0,72
Maksimale ændring	0,2 l/s over 2 minutter

Tabel 6.2. Værdier til opsætning af kontrol med tolerancebånd af sensor i Ringvejen.

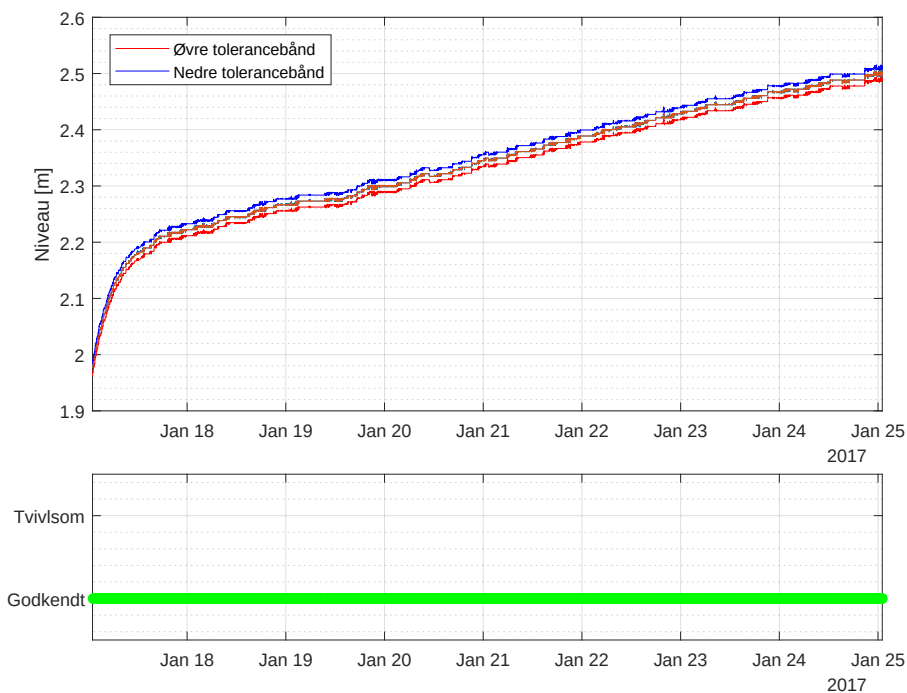
På figur 6.9 ses valideringen af den repræsentative dataperiode. Alle punkter undtaget spiket markeres som godkendt, helt efter ønsket, derfor vurderes det, at kontrollen er korrekt opsat.



Figur 6.9. Validering af repræsentativ dataperiode for flowsensor på Ringvejen.

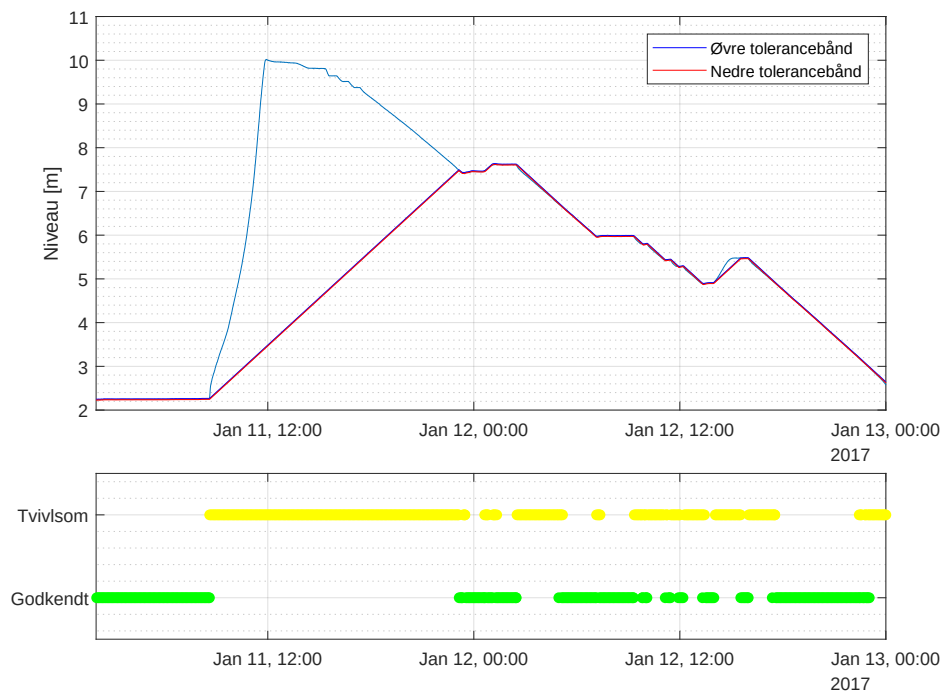
Niveaumålinger i Viby bassin

Når der skal oprettes et tolerancebånd for niveaumålinger, er fremgangsmetoden tilsvarende metoden anvendt til flowmålingerne. En normalsituation for bassinet skal udvælges, således metoden kan kalibreres. For et bassin som Viby Bassinet, burde en normalsituation være en konstant værdi, da bassinet kun er i brug når kapaciteten på Viby Rensningsanlæg er opbrugt, som udelukkende sker under regnvejr. Derfor burde der ikke forekomme niveauændringer i tørvejr. Dette er dog ikke helt tilfældet, da niveauet i bassinet løbende stiger, hvilket antages at være grundvandsindsivning. Derfor skal tolerancebåndet kalibreres over en periode, hvor der forekommer grundvandsindsivning. På figur 6.10 ses niveaumålinger for en periode på otte dage. Her fyldes bassinet af grundvandsindsivningen, og når niveauet når 2,5 meter, tømmes bassinet.



Figur 6.10. Valideret periode med grundvandsindsivning for niveaumålinger i Viby bassinet.

Til eksponentialfremskrivningen er det valgt at bruge en α -værdi på 0,1, hvilket svarer til, at der medtages data for de seneste 19 min. Det er valgt kun at bruge 19 værdier, da der ikke forekommer en stor mængde støj på signalet, og derved er det ikke nødvendigt at foretage en grovere udglatning af signalet. Det maksimale støj er fundet til at være 0,76 cm, og der bliver anvendt en kalibrerings faktor på 1,4. Den maksimale ændring, der må forekomme, er 0,6 cm pr. minut. Disse parametre giver kontrollen, som ses på figur 6.10. For niveaumålingerne i bassinet skal kontrollen markere data tvivlsomme under kraftig bassinfyldning og ved bassintømning, da disse vil være afvigelser fra normalsituationen. Figur 6.11 illustrerer netop dette, her ses en periode, hvor bassinet fyldes og efterfølgende tømmes igen, hvor det tydeligt kan ses, hvordan betingelsen omkring den største tilladelige ændring træder i kraft.



Figur 6.11. Kontrol af niveaumålinger over en periode med bassinfyldning.

6.3.2 Definerings af kontekstklassificeret tolerancebånd for sensorer i Viby

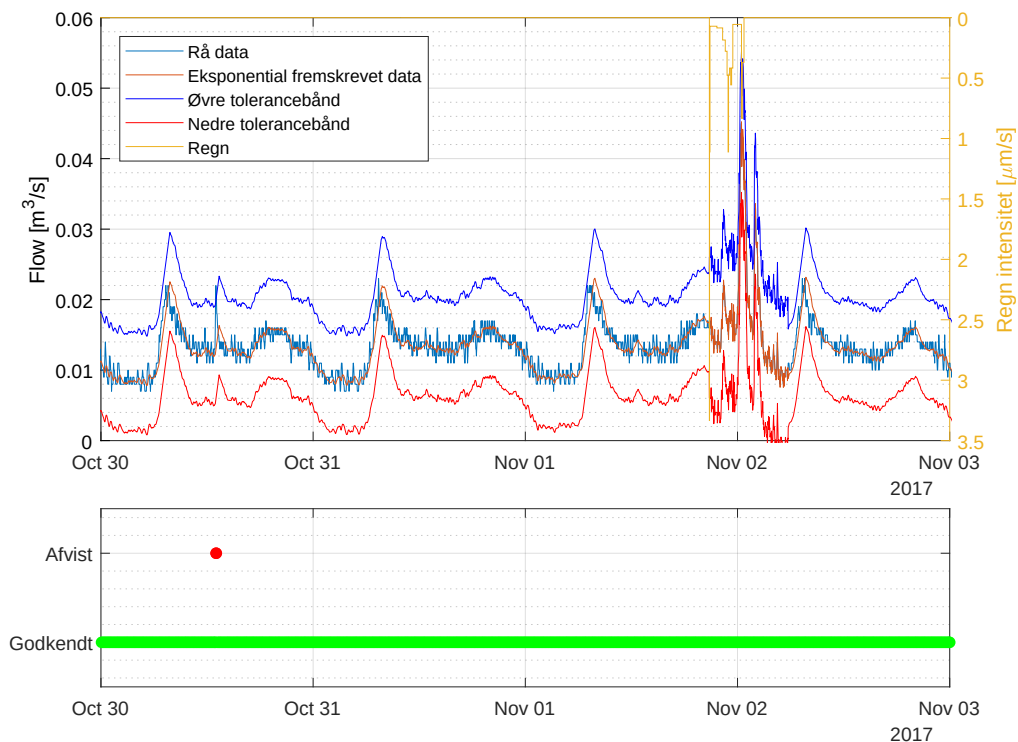
Data, der blev markeret tvivlsom på niveau 1 skal, gennemgå en yderligere kontrol med et kontekstklassificeret tolerancebånd på niveau 2. Derfor skal det undersøges, hvilke påvirkninger sensoren kan være udsat for, og på den måde fastlægge hvilke kontekster, sensoren kan indgå under. I forbindelse med kalibrering af metoden er respons- og afstrømningstider for hver sensor blevet undersøgt. I appendiks A kan histogrammer over respons- og afstrømningstiderne findes.

Flowmålinger

Da flowmålerne er placeret, hvor der udelukkende er påvirkning fra regnbetinget infiltration, vil netop disse to sensorer kun indgå i to typer kontekster, tør- og regnvejrperioder. Derfor skal flowmålingerne ses i forhold til en nærliggende regnmåler for at kunne bestemme, hvornår en regnvejrperiode indtræffer. Til dette vælges regnmåleren på Viby rensningsanlæg.

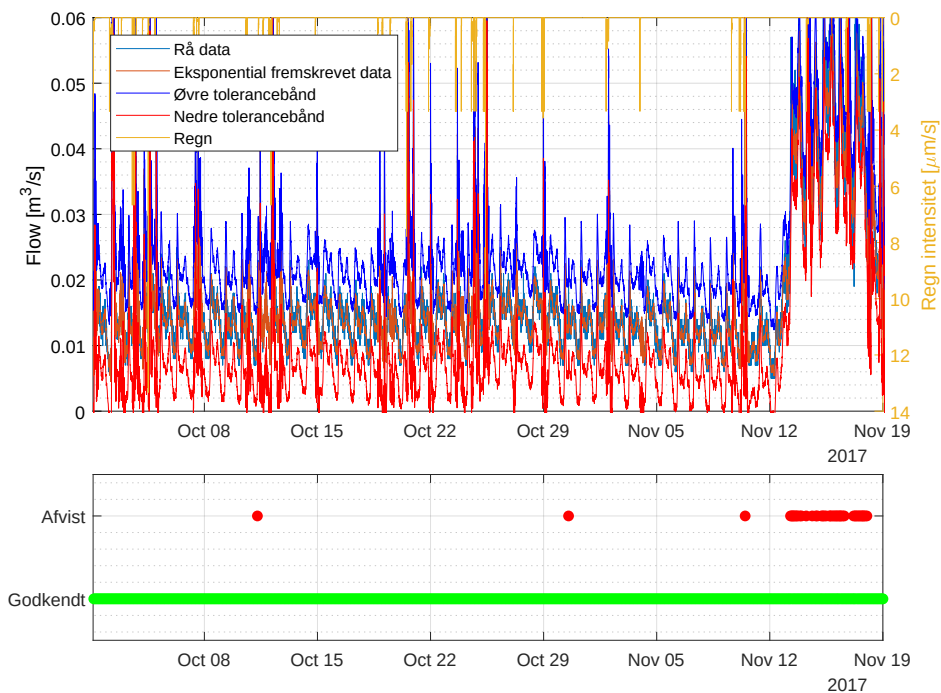
Jarlsmindevej

Når det er blevet fastlagt, hvilke kontekster flowmåleren kan indgå i, skal respons- og afstrømningstid findes. For at kunne gøre dette, skal en tærskelværdi fastlægges. For en flowmåling vælges det at bruge den maksimale døgnvariation. Det gøres således, at det er muligt at opfange ændringer, selv når flowet er lavt. Responstiden er fundet til at være 5 minutter, og afstrømningstiden er fundet til at være 160 minutter. Derfor vil tolerancebåndet have ændrede betingelser fra 5 minutter efter, der er registret et vip. Bliver der efterfølgende registret et vip yderligere inden for en time vil betingelserne være ændret i yderligere 160 minutter frem. Efter respons- og afstrømningstiden er fundet, skal de ændrede betingelser findes. Til det udvælges tre regnhændelser, hvor tolerancebåndet kalibreres på plads efter samme metode anvendt i afsnit 6.3.1. Hændelserne er udvalgt således, at de er repræsentative hele datasættet. Hændelserne kan ses i appendiks B. Resultatet af kalibreringen giver en α -værdi på 0,67, en K -værdi på 2,9 og en maksimal ændring på 20 l/s over 2 minutter.



Figur 6.12. Validering af flowmålinger fra Jarlsmindevej.

På figur 6.12 ses kontrollen med et kontekstklasificeret tolerancebånd udført. Spiket d. 30. oktober er korrekt blevet afvist, samtidig kan det ses, at eksponentialfremskrivningen ændrer sig, når der registres regn d. 1. november. Det medfører, at alle datapunkterne godkendes i forbindelse med regnhændelsen. Dette var desværre ikke tilfældet over hele datasættet. Enkelte steder var stigningen i flow over to minutter for voldsom, således at data blev afvist, selvom flowet vurderes korrekt. For at løse dette problem, ændres den tidslige opløsning til et minut frem for to minutter, hvor de ekstra datapunkter er fundet ved lineær interpolation. Efterfølgende er den størst tilladelige ændring mellem to punkter ændret til 10 l/s over 1 minut. Efter disse ændringer blev foretaget, anses denne kontrol som værende fungerende for flowmåleren i Jarlsmindevej. Ændringen af den tidslige opløsning betyder, at den eksponentielle fremskrivning har bedre mulighed for at beskrive ændringerne, der forekommer ved regn. Disse punkter skal ikke indgå i evalueringen, hverken i denne kontrol eller fremadrettet. De skal udelukkende anses som hjælpepunkter, således kontrollen ikke fejlagtigt afviser korrekt data. Ændringen af den tidslige opløsning er ikke uden konsekvenser. Når der tilføjes ekstra målepunkter til datasættet, medfører det også en udglatning af signalet, samtidig er der ingen måleusikkerhed på de interpolerede punkter. Det betyder, at der i de ekstra punkter ligger information omkring det kommende punkt, hvilket gør det lettere at forudsige det kommende punkt. Denne fejlkilde anses dog som værende af mindre betydning.



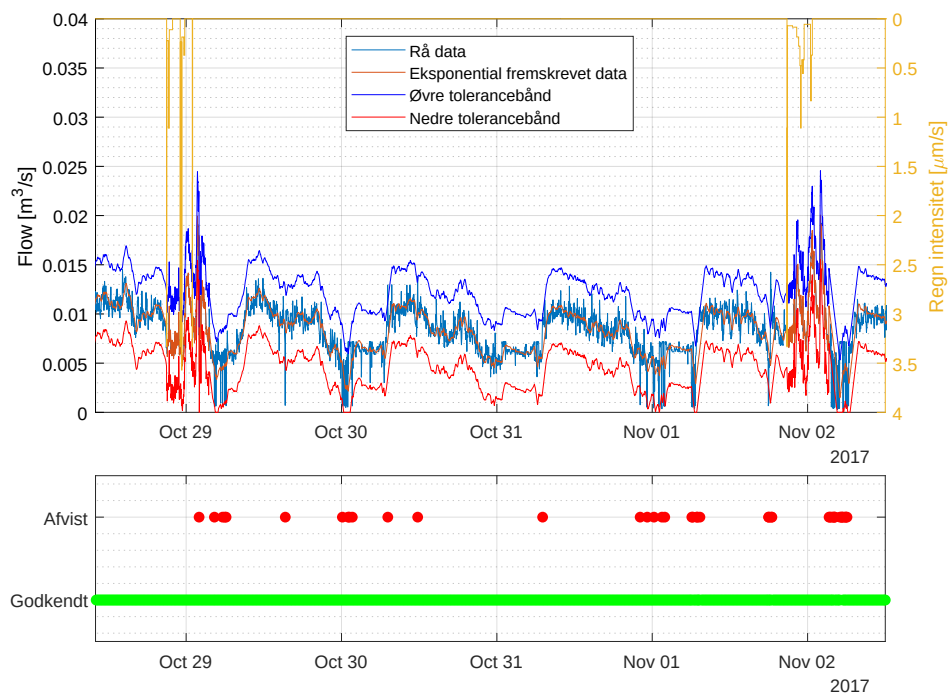
Figur 6.13. Validering af flowmålinger fra Jarlsmindevej.

Figur 6.13 viser kontrollen udført for hele datasættet. I perioden op til d. 13. november afvises få datapunkter. De afviste punkter er spikes, og derfor er afvisningen korrekt. Samtidig ses det tydeligt, hvordan kontrollen afviser store mængder data, efter der er opstået kondens på sensoren, dog bliver der også godkendt datapunkter. Derfor skal det overvejes, hvorvidt der skal opsættes et kriterie på baggrund af antallet af afviste punkter relativt til godkendte. Eksempelvis kunne det opsættes således, at hvis x-% af data afvises i løbet af en time, markeres sensoren som

fejlbehæftet eller defekt. Det er dog vigtigt at vælge et passende interval for give et retvisende billede. Vælges der en for kort periode, vil enkelte fejl resultere i en forkert afvisning af hele intervallet. Anvendes der modsat en for lang periode, er der risiko for, at mindre, men relevante fejl, ikke markeres, samtidig med at informationen omkring en defekt sensor vil være forsinket.

Ringvej For flowmåleren i Ringvejen er den hurtigste responstid fundet til at være 2 minutter, og den længste afstrømningstid fundet til 154 minutter. Igen er det valgt at bruge en maksimal døgnvariation som tærskelværdi, det har dog været nødvendigt at foretage en udglatning af døgnvariationen grundet den store mængde støj i signalet. Efterfølgende er tolerancebåndet for regnvejrssituationer kalibreret på tre regnhændelser, som kan ses i appendiks B. α -værdien blev fundet til at skulle være 0,4, den maksimale tilladelige ændring til 10 l/s over 2 minutter. Kalibreringsfaktoren for tolerancebåndet blev fundet til at være 0,85.

På figur 6.14 ses valideringen foretaget over en periode på fem dage. Enkelte data punkter bliver afvist, disse punkter ligger i betydelig afstand fra de omkringliggende punkter, hvorfor afvisningen vurderes til at være korrekt. Samtidig ses perioder omkring midnat d. 30. oktober og d. 1. november, hvor målingen springer kraftigt i korte intervaller, som også korrekt afvises. Det vurderes, at årsagen til disse fluktuationer skyldes en lav vandstand i ledningen. For at undersøge problemstillingen om hvorvidt fluktuationerne skyldes lav vandstand, er en vandstand i ledningen som funktion af flowet blevet beregnet. Analysen kan ses i appendiks C. Analysen viser, hvordan et flow omkring 5 til 10 l/s modsvarer en vandstand på 3,5 - 5,5 cm, hvilket kan være årsagen til, de voldsomme fluktuationer, der fremkommer ved lave flows, og indikerer, at sensoren måler uden for dens gyldighedsområde. Dette resultat bekræftes af DANOVA [2018], som på deres hjemmeside angiver, at sensoren først foretager nøjagtige flowmålinger fra en vandstand på 3,5 cm og op. Af denne årsag anses afvisningerne for korrekte.



Figur 6.14. Validering af flowmålinger fra Ringvejen.

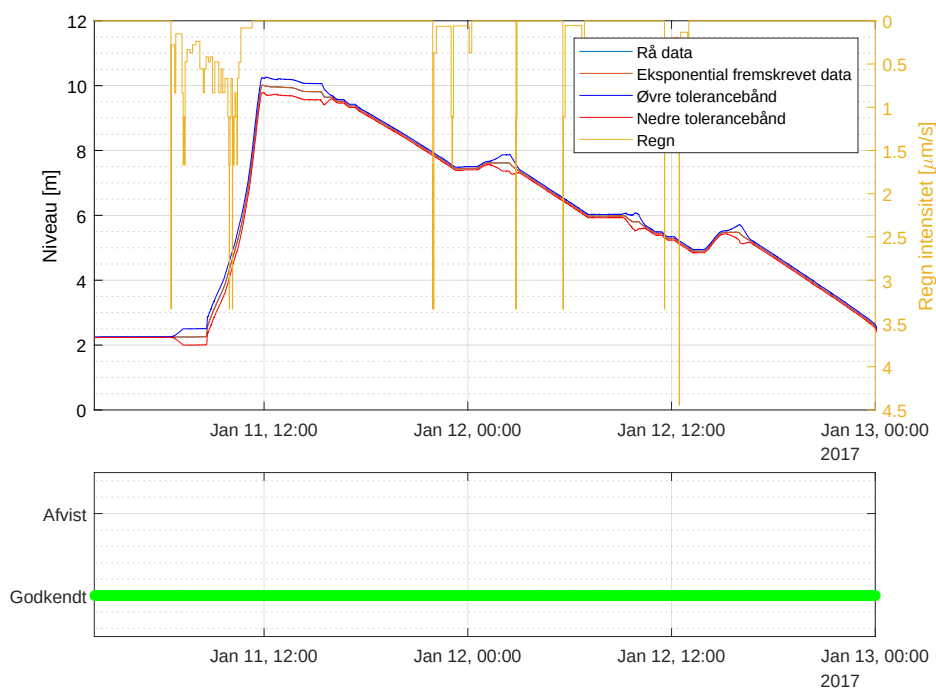
Niveaumålinger i Viby Bassin

Niveaumålingerne fra Viby Bassinet kan have tre forskellige kontekster. Første er normalsituationen, hvor der forekommer grundvandsindsivning, anden er hvis kapaciteten på rensningsanlægget er opbrugt, og overskydende afstrømning ledes i bassinet, tredje og sidste er når bassinet tømmes vha. pumper. På samme måde som flowmålerne skal niveaumålingerne ses i sammenhæng med regnmåleren, men i dette tilfælde også en flowmåler efter pumperne. Derfor bliver der også lavet en analyse af respons- og afstrømningstid for bassinet. For at bestemme disse tider for regn anvendes en tærskelværdi på 2,5 meter, da niveauet kun overstiger denne værdi når kapaciteten på rensningsanlægget er opbrugt. Responstiden af regn er fundet til at være 1 time og 30 minutter. Afstrømningstiden for regn er fundet til 6 timer og 30 minutter. Da responstiden er 1 time og 30 minutter, giver det mulighed for at frasortere mindre regnhændelser. Derfor er det samtidig undersøgt, hvilke nedbørsmængder, der medfører en niveaustigning i bassinet. Analysen viser, at en nedbørsmængde på mindre end 1.0 mm over en time, ikke medfører en respons i bassinet. Af denne årsag vil betingelserne for tolerancebåndet ikke blive ændret, hvis der ikke falder mere end 1 mm regn. For pumpeperioderne er der ingen respons- eller afstrømningstid. Efter disse tider er bestemt, kalibreres tolerancebåndet for regn- og pumpeperioderne. Resultaterne af kalibreringen kan ses i tabel 6.3. Den høje kalibreringsfaktor under regnsituationen skyldes, at der kan forekomme kraftige stigninger i bassinet under regnvejr, og derved at det nødvendigt med et bredt tolerancebånd for ikke at afvise ellers korrekt data.

Parameter	Regnsituation	Pumpesituation
α -værdi	0,67	0,67
Kalibreringsfaktor	33	6.6
Maksimal ændring	0.3750	0.1412

Tabel 6.3. Kalibreringsparameter for regn- og pumpesituation

På figur 6.15 ses kontrollen udført, det ses hvordan båndet udvides under regn, og mindskes igen, når pumperne begynder. Som ønsket godkender kontrollen alle datapunkterne i perioden.



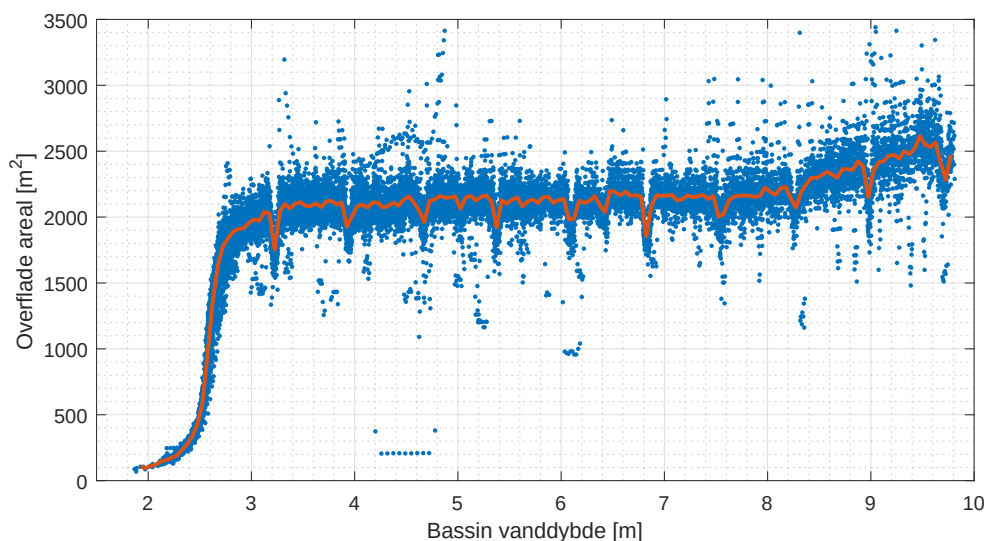
Figur 6.15. Datavalidering af niveaumålinger under regn- og pumpesituation.

6.4 Kontrol med redundans

Da flowmålerne sidder i forskellige ender af afløbssystemet, er det ikke muligt at foretage en redundanskontrol mellem disse. Dette kan dog gøres mellem niveaumålingerne i Viby Bassin og flowmålingerne efter tømpepumperne, hvilket skyldes opbygningen af indløbet på Viby Rensning anlæg. Det vides, at når bassinet tømmes, er der overskydende kapacitet på rensning anlægget, og derved er der ingen tilløb til bassinet, jf afsnit 3.1. Derfor vil der i det følgende blive opsat en soft sensor for volumenmængden i Viby Bassin ud fra niveaumålinger.

Opsætning af soft sensor for volumen i Viby Bassin

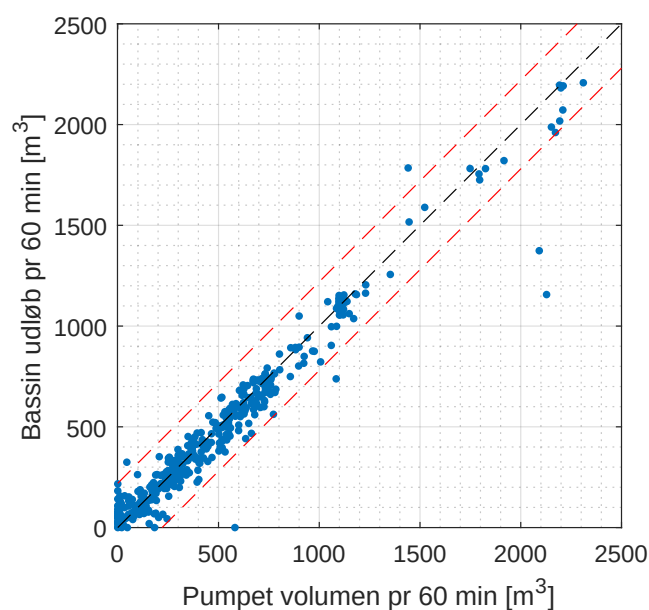
For at kunne opsætte en soft sensor for volumen, kræves det, at bassinets geometri kendes. Da Viby Bassinet ikke er simpelt udformet, er det nødvendigt med en graf over bassinets udformning. Grafen beskriver bassinets overfladeareal til en bestemt vandstand. Det har ikke været muligt at finde en entydig geometri. For at soft sensoren kan anvendes til redundans, kræves det, at bassingeometrien kendes nøjagtigt. Derfor er en bassingeometri blevet beregnet i forbindelse med dette projekt. Den er fundet på baggrund af pumpeflowet. Beregningsmetoden kan ses i appendiks D. Resultatet kan ses på figur 6.16, hvor den orange linje angiver den anvendte bassingeometri og tilsvarende medianen af datapunkterne.



Figur 6.16. Graf over bassingeometri af Viby Bassin. Den orange linje angiver den anvendte bassingeometri.

Redundans mellem flowmåling og soft sensor

Efter bassingeometrien er blevet fastlagt, kan der oprettes en soft sensor, som kan bruges til redundanskontrol mellem den og flowmåleren efter pumperne. Forholdet mellem disse to sensorer skal være 1:1. Kontrollen kan ses på figur 6.17.



Figur 6.17. Redundans mellem flowmåler og soft sensor fra Viby Bassin.

Da kontrollen skal anvendes til at opfange drift på sensorerne, er det valgt at anvende en tids-horisont på 60 minutter, således afvigelser fra usikkerheder på målingerne og bassingeometrien udglattes. Af samme årsag er det valgt at bruge et godkendelsesinterval, hvori størstedelen af punkterne accepteres. Grundet der kun skal meldes fejl, hvis der opstår drift, vil kontrollen kun melde fejl, hvis fem efterfølgende punkter ligger uden for godkendelsesintervallet. På figur 6.17 ligger enkelte punkter uden for godkendelsesintervallet. Årsagen til disse skyldes sensornedbrud og perioder, hvor niveauet er begyndt at stige igen under en tømning. Da afvisningerne ikke er forårsaget af drift, og ønskes derfor ikke markeret.

Anvendelse og diskussion af evalueringsværktøj 2.0

Efter evalueringsværktøjet 2.0 er blevet opsat, foretages en evaluering af data, og resultaterne præsenteres. Efterfølgende diskuteres evalueringsværktøjet og dets metoder, ligeledes berøres potentielt videre arbejde kort.

7.1 Anvendelse af evalueringsværktøj 2.0

Efter metoderne er blevet opdateret og kontrollerne opsat for de enkelte sensorer, er evalueringsværktøjet blevet anvendt på det tilgængelig data. Valideringen består af en on/off kontrol der opfanger udfald i data. En kontrol for hvorvidt data ligger inden for et fysisk muligt interval, for Jarlsmindevej er dette 0 - 180 l/s, for Ringvej 0 - 230 l/s og for Viby Bassin 0 - 10 meter. Efterfulgt af en kontrol for konstant værdi over 24 time, hvilket vil indikere om sensoren er blokeret. Endeligt valideres data på baggrund af tolerancebåndet. På niveau 1 anvendes der ikke information fra andre sensorer. På niveau 2 anvendes det kontekstklassificerede tolerancebånd. Resultatet af evalueringsniveau 1 og 2 for sensorerne kan ses i tabellerne 7.1, 7.2 og 7.3.

Jarlsmindevej	Niv 1	Niv 2
On/off	0%	0%
Fysisk interval	2,44%	2,44%
Konstant værdi	0%	0%
Tolerancebånd	5,48%	2,01%
Godkendte datapunkter	92,08%	95,55%

Tabel 7.1. Valideringsresultat for flowmåleren ved Jarlsmindevej. Procentandelen angiver mængden af datapunkter der er fejlet den givne kontrol.

For flowmåleren i Jarlsmindevej er en periode på 110 dage evalueret. 5,48% af perioden markeres tvivlsom af tolerancebåndet på niveau 1. På niveau 2 sammenholdes data med regnmåleren, og derved falder afvisningsprocenten til 2,01% af perioden. Ved undersøgelse af disse perioder vises det at afvisningerne er korrekte, da afvisningerne består af spikes, samt befinder sig i perioden med kondens på sensoren. Perioderne der afvises af det fysiske interval, skyldes at målingen er lig nul.

Ringvej	Niv 1	Niv 2
On/off	1,06%	10,6%
Fysisk interval	10,58%	10,58%
Konstant værdi	0%	0%
Tolerancebånd	14,69%	7,16%
Godkendte datapunkter	73,67%	81,20%

Tabel 7.2. Valideringsresultat for flowmåleren ved Ringvej. Procentandelen angiver mængden af datapunkter der er fejlet den givne kontrol.

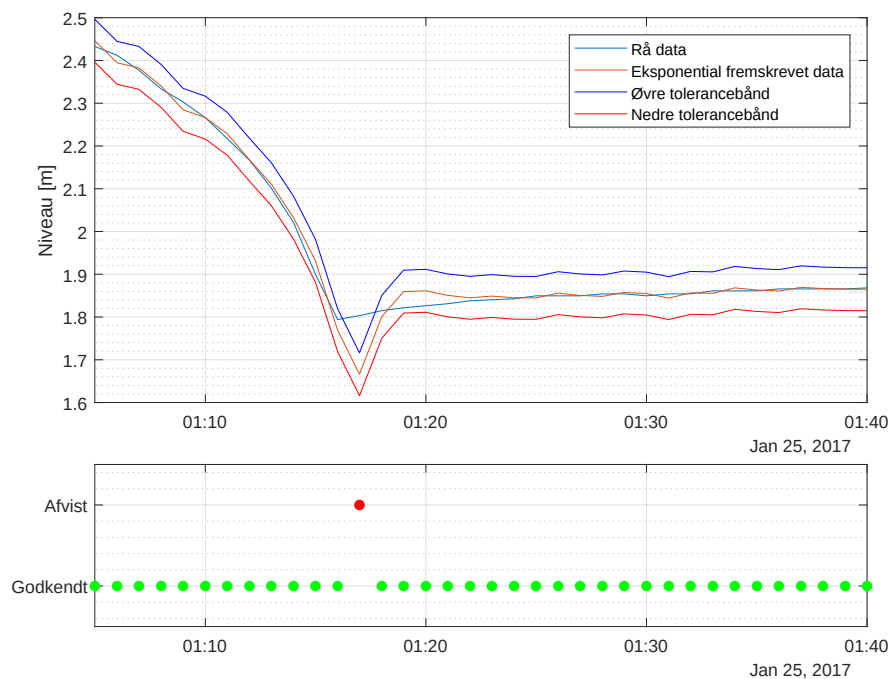
For flowmåleren i Ringvejen er en periode på 110 dage også evalueret. Her afvises 14,69 % af perioden af tolerancebåndet på niveau 1, efterfølgende på niveau 2 falder mængden til 7,16%. Dette er mindre end forventet, da flere perioder indeholder ustabil data som beskrevet i appendiks C.

På begge flowmålere opstår der kondens, hvilket forårsager et spring i data. Af denne årsag havde det været forventet med længere perioder af afvisninger, da perioden med kondens afviger fra normalsituationen. Dette er ikke tilfældet, da eksponentialfremskrivningen adopterer et ændret niveau, og kun kan afvise data når der forekommer pludselige ændringer. Der har dog været tilstrækkelige med afvisninger til at en undersøgelse ville være naturlig. I forbindelse med denne undersøgelse ville springet der forekommer opdages, og problemet ville derved kunne løses.

Viby Bassin	Niv 1	Niv 2
On/off	1,24%	1,24%
Fysisk interval	0,16%	0,16%
Konstant værdi	0%	0%
Tolerancebånd	9,04%	0,75%
Godkendte datapunkter	89,56%	97,85%

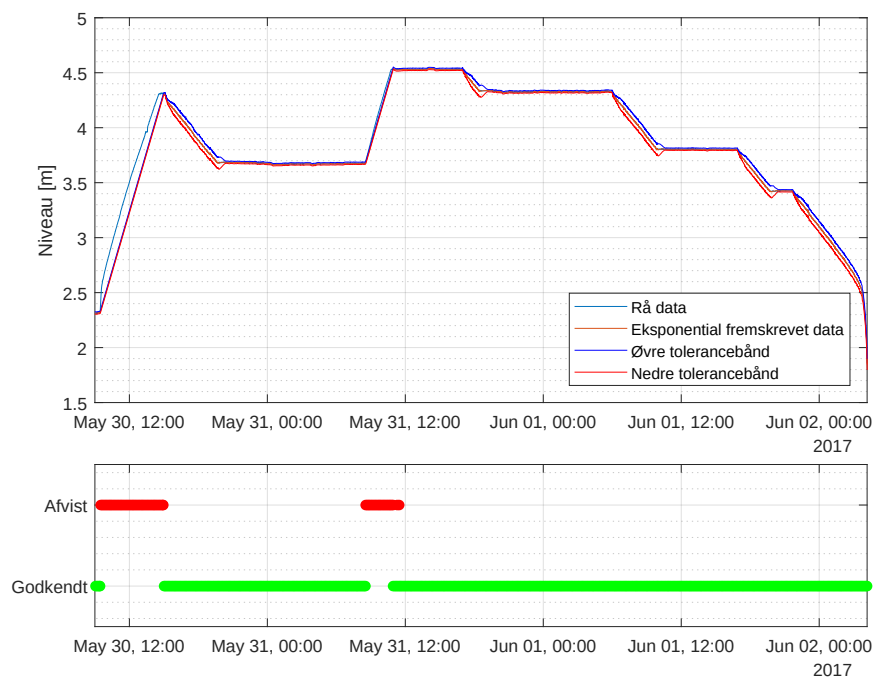
Tabel 7.3. Valideringsresultat for niveaumåleren i Viby Bassin. Procentandelen angiver mængden af datapunkter der er fejlet den givne kontrol.

Evalueringen af niveaumåleren i Viby Bassin er foretaget for 1 års data. Resultatet viser, at der har været udfald svarende til 4,5 dage, en periode på 12 timer har været uden for det fysisk mulige interval, og yderligere markeres 9,04% af datapunkterne tvivlsomme på baggrund af tolerancebåndet. Denne andel falder til 0,75% efter at kontrollen modtager information omkring regn- og pumpeperioder. Efter visuel inspektion af afvisningerne fremgår det, at flere af afvisninger skyldes problemer med den eksponentiale fremskrivning. Problemet opstår efter en tømning af bassinet. Her ses en stor negativ gradient i data, hvilket pludseligt ændres. Dette kan den eksponentiale fremskrivning ikke forudse, og medfører derfor en afvisningen af data. Det er ikke muligt at tilføje et minimumsniveau for fremskrivningen, da bassinet ikke tømmes til samme niveau ved hver tømning. På figur 7.1 illustreres problematikken med fremskrivning. Udover afvisninger forbundet med bassintømning, er der perioder, hvor der forekommer pludselige spring, hvorfor afvisningen anses for at være korrekt. Årsagen til disse spring kendes desværre ikke.



Figur 7.1. Illustration af fremskrivningens problem ved kraftige ændringer i data.

Endeligt er der afvisninger i forbindelse med en bassinfyldning, hvor der ikke er registreret regn i regnmåleren på Viby Rensning anlæg, jf. 7.2. Derfor er to yderligere regnmålere i Aarhus blevet kontrolleret for, hvorvidt der er registreret regn i disse. Dette var ikke tilfældet, derfor antages det, at bassinfyldningen er forårsaget af vand fra rensningsanlægget, hvilket også bakkes op af fyldningsforløbet, som kan ses på figur 7.2. Det er netop i situationer som denne, at data ønskes markeret, da det bidrager til større forståelse.



Figur 7.2. Episode hvor vandstanden i bassinet stiger, uden at der er faldet regn.

Ovenstående resultater af evalueringsværktøjet viser evnen til at opfange fejl og afvigelser i data, og derved forårsage en undersøgelse af fejlene, hvilket bidrager til en øget forståelse for systemet. Samtidig forefindes dog elementer, hvor et videre arbejde er nødvendigt, specielt den eksponentiale fremskrivning. Fremskrivningen kan ikke beskrive de kraftige ændringer, der forekommer ved pumpestop, eller ved en kraftig regn. Dette afspejles i nødvendigheden for, at ændre den tidlige opløsning af flowmålingerne fra Jarlsmindevej og Ringvejen.

7.2 Diskussion

Det nødvendigt med datavalidering således en datakvalitet kan sikres, og data trygt kan anvendes til styring og andre formål. Datakvalitet kan dog ikke anses for enten blot at være god eller dårlig, men afhænger af hvad data skal anvendes til. I dette projekt evalueres hvert enkelt datapunkt og markeres godkendt eller afvist. Evalueringsværktøjet skelner ikke imellem, hvorvidt en fejlet kontrol skyldes en sensorfejl eller datapunktet afviger fra hvad der var forventeligt. Dette er anvendeligt til en overvågning af systemet, da en afvigelse i data giver anledning til en undersøgelse af fejlen, og potentielt øge forståelse af systemet. Ønskes det at kontrolleres for defekte sensorer anbefales en redundanskontrol.

Evalueringsværktøjet har i dette projekt været anvendt på to typer sensorer, og er kalibreret ind på netop disse typer sensorer samt deres omgivelser. Skal evalueringsværktøjet anvendes på et andet system, vil det være nødvendigt med en re-kalibrering af metoderne i forhold til sensortypen. Der ville bl.a. skulle tages højde for de omkringliggende forhold, og den tidlige opløsning. Det formodes at de præsenterede metoders anvendelighed mindskes i takt med en grovere tidlig opløsning. Konsekvensen af dette vil være et bred tolerancebånd, hvilket vil øge risikoen for, at der accepteres fejlbehæftet data.

Evalueringsværktøjet indholder også et evalueringsniveau 3, hvilket kun har været behandlet kort. Niveauet anvendes til, at give en grafisk oversigt over hvordan en MIKE URBAN model har præsteret. Dette giver muligheden for, at overvåge hvorvidt modellen er opsat korrekt, ellers hvor forbedringer ville være nødvendigt.

Der vil altid være uforudsete udfordringer, som kan kræve yderligere kontrol af data. Da evalueringsværktøjet er bygget op således, at kontrollerne foretages efter hinanden, kan det blot tilføjes ekstra kontroller til evalueringsværktøjet, og derved højne troværdigheden af data. I dette projekt er der udelukkende blevet fokuseret på data som flow, niveau eller regn, men målinger som foreksempel temperatur, turbiditet, strømforbrug og vandkvalitet kan også anvendes til at validere data. Udover validering af data, vil rekonstruktion af data være en oplagt funktion at tilføje til evalueringsværktøjet.

Konklusion

Formålet med dette projekt var at validere flow- og niveaumålinger, for efterfølgende at anvende denne datavalidering til at opbygge en større forståelse af afløbssystemet, hvori at evalueringsværktøjet er installeret.

Valideringen af data er opdelt i to niveauer. Første niveau anvendes til at opfange udfald i data, om data ligger uden for et fysisk muligt interval, eller om sensoren er blokeret og derfor måler en konstant værdi. Endelig anvendes et tolerancebånd til at opfange, hvis data afviger fra normalsituationen, disse data markeres tvivlsom af kontrollen. På niveau 2 skal disse tvivlsomme data valideres ved hjælp af information fra andre sensorer, til dette anvendes et kontekstklassificeret tolerancebånd. Det kontekstklassificerede tolerancebånd anvender information fra andre sensorer i oplandet. Datavalideringen af flowmålingerne anvender derved information om hvornår der falder regn. Dette gøres, da en afvigelse fra normalsituationen forventes, og kontrollen gøres indstillet dertil. Kan data ikke valideres på baggrund af det kontekstklassificerede tolerancebånd, bør årsagen til dette undersøges. Tolerancebåndet bygger på en eksponentialfremskrivning af data, som skal kalibreres for, at opnå det optimale resultat af valideringen. Det har vist sig vanskeligt at udvikle en generel valideringsmetode, da metoderne vil afhænge af den enkelte sensor og de fysiske forhold omkring den. Derfor er det vigtigt med en omhyggelig kalibreringsfase. Den anvendte fremskrivning har dog problemer med at beskrive kraftige ændringer i data, hvilket enkelte steder medfører, at korrekt data fejlagtigt afvises. Det er muligt at se bort fra disse afvisninger, men optimalt skal metoden finjusteres eller en anden type fremskrivning skal anvendes.

Udover de ovenstående metoder er der opsat en korrelationen mellem flowet fra tømme-pumperne og en soft sensor for volumenet i Viby Bassin. Korrelationen er opsat med en tidshorizont på 60 minutter, således at mindre afvigelser udglattes, derfor vil et eventuelt drift fremstå tydeligere.

Evalueringsværktøjet er anvendt på det tilgængelige data og et eksempel på hvordan datavalideringen kan bidrage til en forståelse af afløbssystemet. Eksemplet er fra Viby Bassin, jf. 7.2. Her fremgår en bassinfyldning som ikke er forårsaget af regn, og derfor afvises data. Årsagen til bassinfyldningen er efterfølgende blevet undersøgt, og det vurderes at fyldningen er forårsaget af procesvand fra Viby Rensning anlæg.

Det konkluderes derfor, at det er muligt at opsætte en datavalidering, der kan bidrage til en større forståelse af afløbssystemer. Metoderne er ikke generelle og kræver derfor en grundig kalibrering, for at opnå det bedste resultat af datavalideringen. Valideringen af data bliver ikke bedre end den udførte kalibrering.

Litteratur

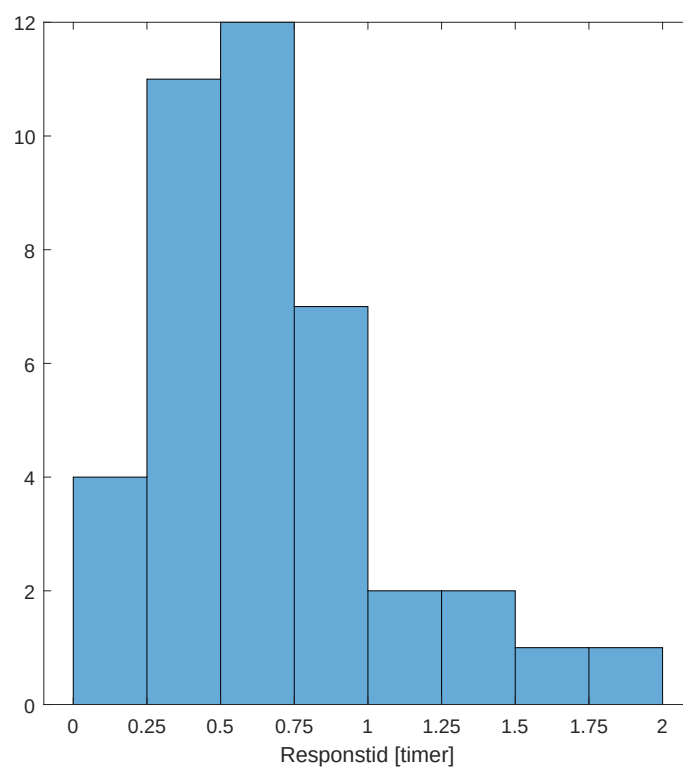
- Aarhus Vand A/S (2018). Projektplan donut - distributed online monitoring of the urban water cycle. Tech. rep.
- Achton-Boel, A. (2017). Evalueringsværktøj til kvalitetssikring af sensorer samt opbygning af kendskab til afløbsystemer. 9. semesters virksomhedsopholdsrapport, Institut for Byggeri og Anlæg v/ Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet, Aalborg Universitet.
- Ahm, M., Thorndahl, S., Nielsen, J. E., & Rasmussen, M. R. (2016). Estimation of combined sewer overflow discharge: a software sensor approach based on local water level measurements. *Water science and technology*, 74, 2683–2696.
- Alferes, J., & Vanrolleghem, P. A. (2016). Efficient automated quality assessment: Dealing with faulty on-line water quality sensors. *AI Communications*, 29, 701–709.
- Bijnen, M. V., & Korving, H. (2008). Application and results of automatic validation of sewer monitoring data. *11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK*, (pp. 1–10).
- Branisavljević, N., Kapelan, Z., & Prodanović, D. (2011). Improved real-time data anomaly detection using context classification. *Journal of Hydroinformatics*, 13(3), 307.
- Branisavljević, N., Prodanović, D., & Pavlović, D. (2010). Automatic, semi-automatic and manual validation of urban drainage data. *Water Science and Technology*, 62(5), 1013–1021.
- Brorsen, M., & Brorsen, M. (2003). *Lærebog i hydraulik*. Aalborg: Aalborg Universitetsforlag.
- DANOVA (2018). Flowmåling efter Korrelationsprincippet. <https://danova.dk/produkt-kategori/flowmaaling/korrelation/>. [Online; tilgået 05-juni-2018].
- Deletic, A., Dotto, C. B. S., McCarthy, D. T., Kleidorfer, M., Freni, G., Mannina, G., Uhl, M., Henrichs, M., Fletcher, T. D., Rauch, W., Bertrand-Krajewski, J. L., & Tait, S. (2012). Assessing uncertainties in urban drainage models. *Physics and Chemistry of the Earth*, 42-44, 3–10.
- Dürrenmatt, D. J., Del Giudice, D., & Rieckermann, J. (2013). Dynamic time warping improves sewer flow monitoring. *Water Research*, 47(11), 3803–3816.

- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135–143.
- Henze, M., & Henze, M. (2006). *Teoretisk spildevandsrensning : biologiske og kemiske processer*. Lyngby: Polyteknisk Forlag, 3. udg. ed.
- Høgh, J., Ahm, M., Thorndahl, S. L., Nielsen, J. E., Rasmussen, M. R., Mikkelsen, P. S., Vezzaro, L., Lynggaard-Jensen, A., Eisum, N., & Bassø, L. (2015). Avanceret online måling af overløbskvalitet (amok). Tech. rep., Aarhus Vand A/S.
- Innovationsfonden (2018). Dansk vandteknologi i front med intelligent styring og overvågning. <https://innovationsfonden.dk/da/presse/dansk-vandteknologi-i-front-med-intelligent-styring-og-overvaagning>. [Online; tilgået 08-april-2018].
- MATLAB Financial Toolbox (2017). Matlab financial toolbox. The MathWorks, Natick, MA, USA.
- McCarthy, D. T., Deletic, A., Mitchell, V. G., Fletcher, T. D., & Diaper, C. (2008). Uncertainties in stormwater E. coli levels. *Water Research*, 42(6-7), 1812–1824.
- Montgomery, D. C. (2009). *Introduction to statistical quality control*. John Wiley & Sons (New York).
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Mourad, M., & Bertrand-Krajewski, J. L. (2002). A method for automatic validation of long time series of data in urban hydrology. *Water Science & Technology*, 45(4-5), 263–270.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part i – a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290.
- Piatyszek, E., Voignier, P., & Graillot, D. (2000). Fault detection on a sewer network by a combination of a Kalman filter and a binary sequential probability ratio test. *Journal of Hydrology*, 230(3-4), 258–268.
- Schilperoort, R. P. S., Dirksen, J., & Clemens, F. H. L. R. (2008). Practical aspects for long-term monitoring campaigns : pitfalls to avoid to maximize data yield. *International Conference on Urban Drainage*, 11th, 1–10.
- Siao, S., Krajewski, J.-L., Lynggaard-Jensen, A., Van den Broeke, J., Edthofer, F., Almeida, M. d. C., Silva, R. A., & Menaia, J. (2011). Literature Review of Data Validation Methods. *PREPARED*.
- Thorndahl, S. L., & Løvgaard, A. (2018). Regninput til regnvandsdisponering i Aarhus Vands forsyningsområde: Metoder til beregning af bidrag fra grønne og ubefæstede arealer. Aalborg: Aalborg Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg. DCE Technical Memorandum, No. 66.

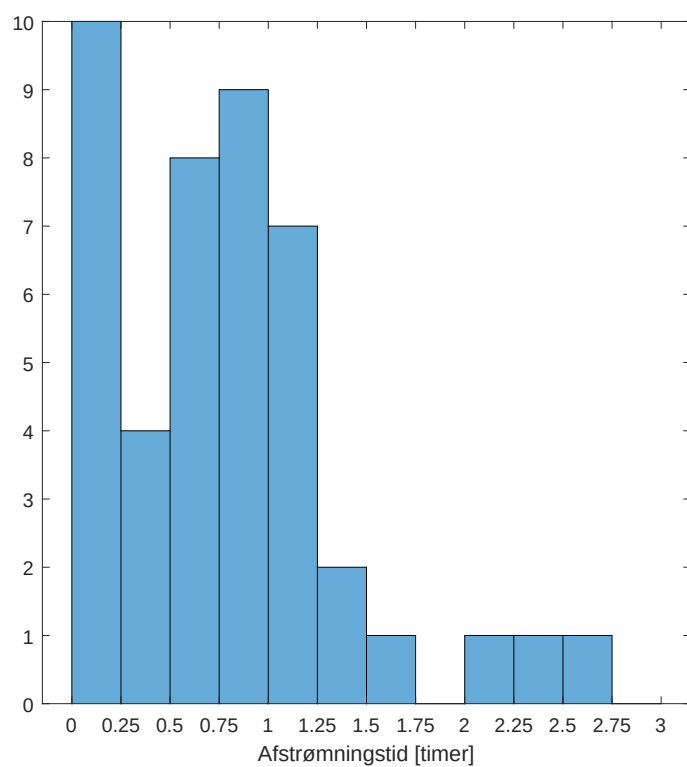
Respons- og afstrømningstid

I dette appendiks præsenteres histogrammer af respons- og afstrømningstider fra de anvendte sensorer. Tiderne er fundet som illustreret på figur 6.3 på side 28.

A.1 Jarlsmindevej

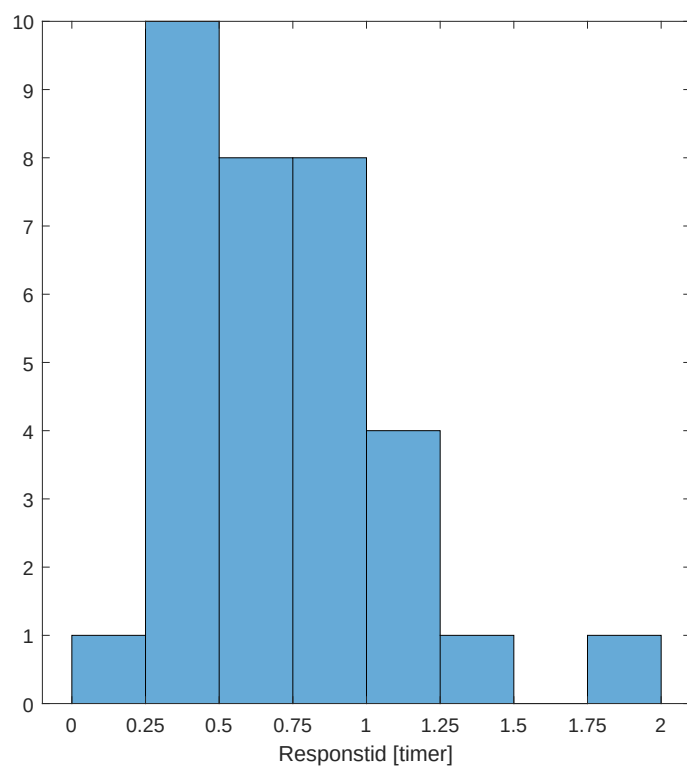


Figur A.1. Histogram af responstiderne for Jarlsmindevej.

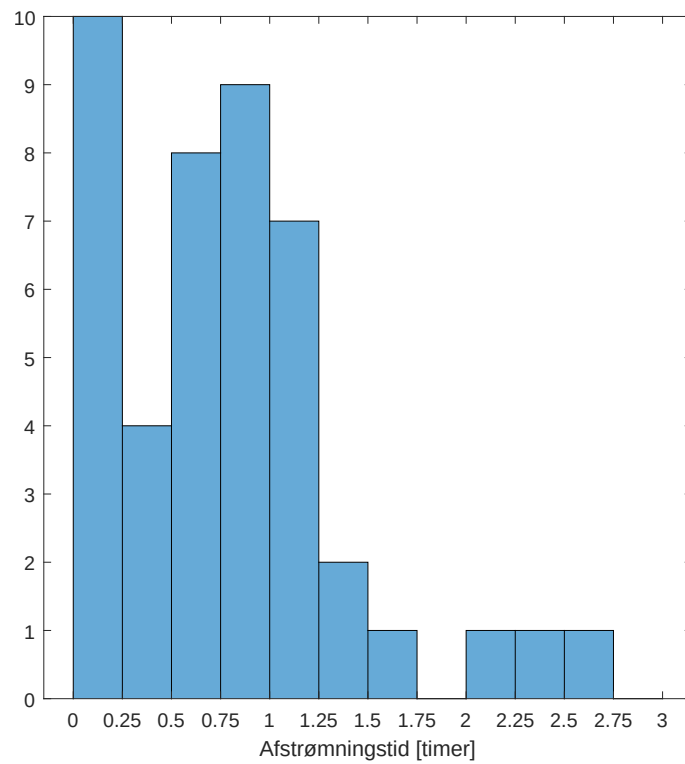


Figur A.2. Histogram af afstrømningstiderne for Jarlsmindevej.

A.2 Ringvej

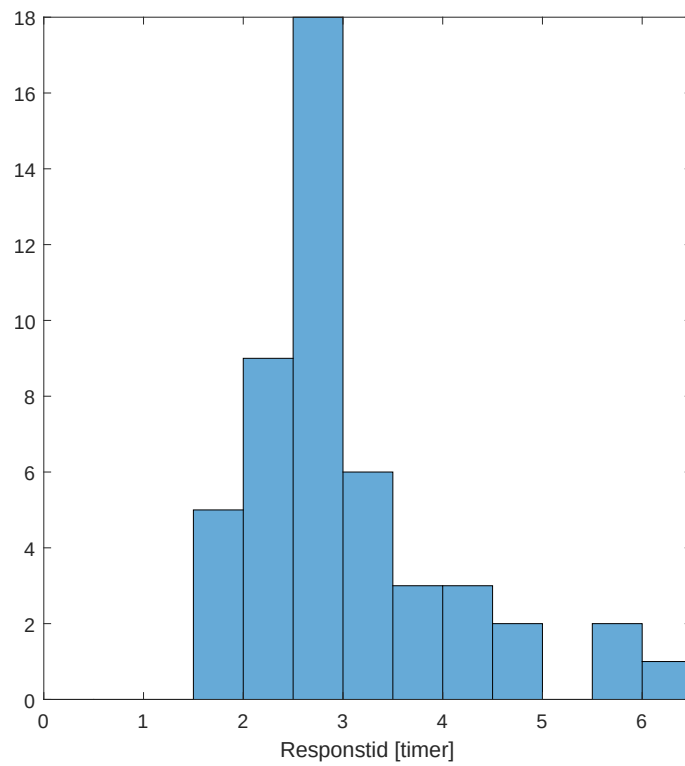


Figur A.3. Histogram af responstiderne for Ringvej.

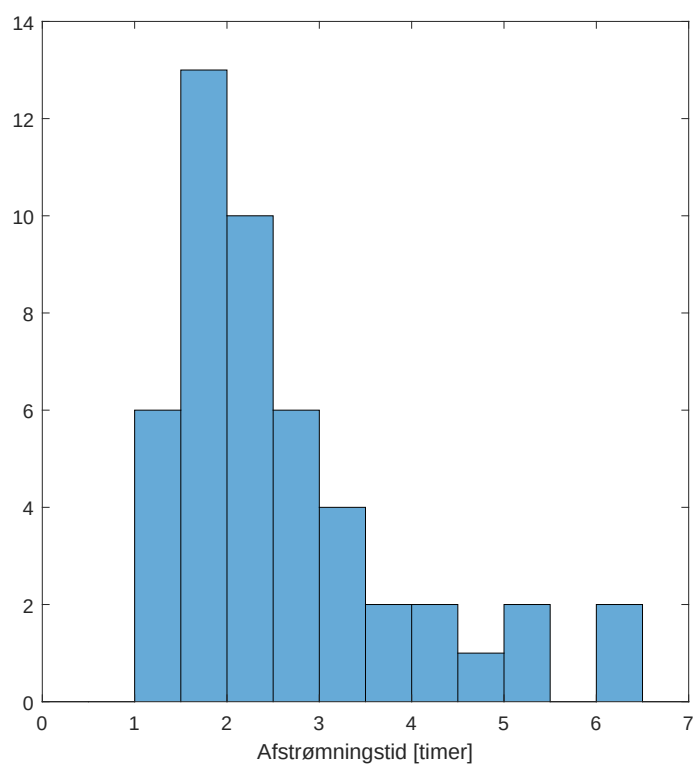


Figur A.4. Histogram af afstrømningstiderne for Ringvej.

A.3 Viby Bassin



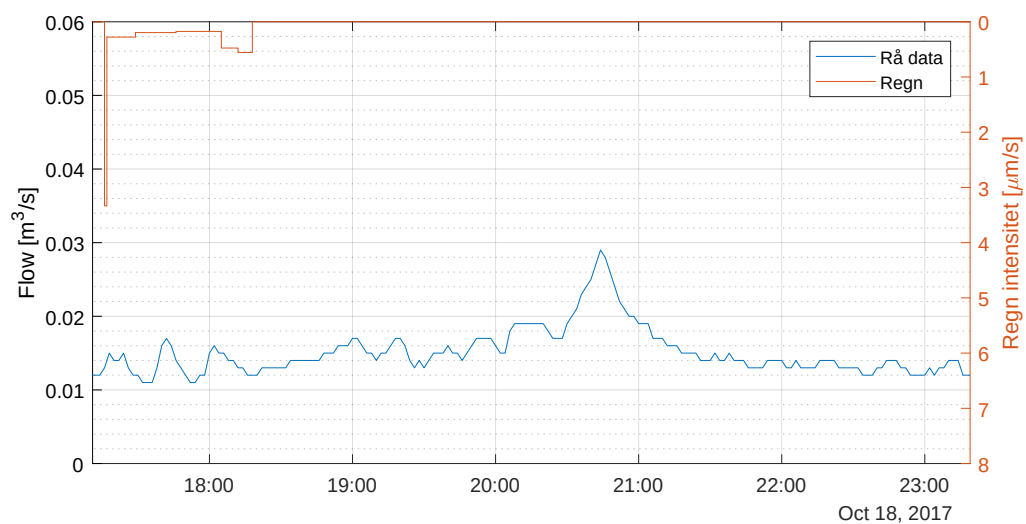
Figur A.5. Histogram af responstiderne for Viby Bassin.



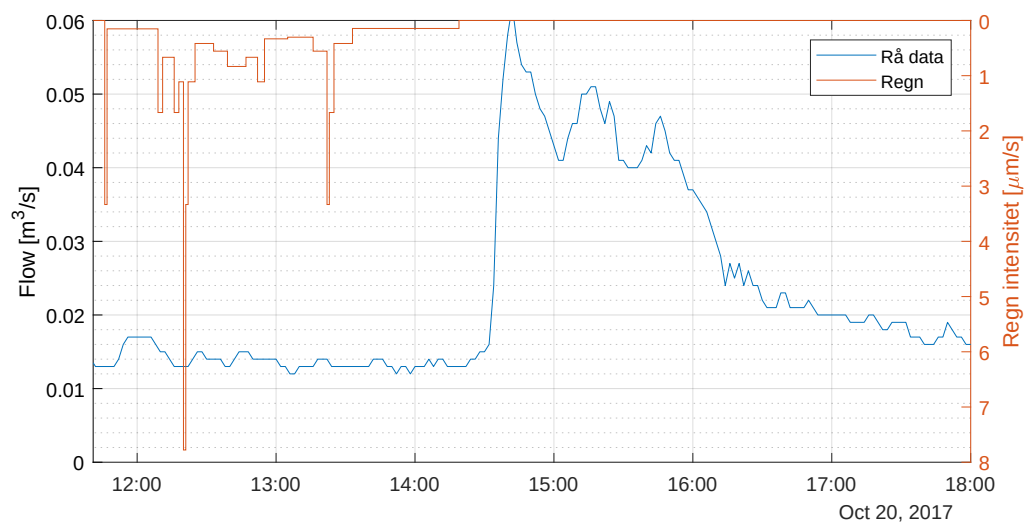
Figur A.6. Histogram af afstrømningstiderne for Viby Bassin.

Kalibrering af kontekstklassificeret tolerancebånd

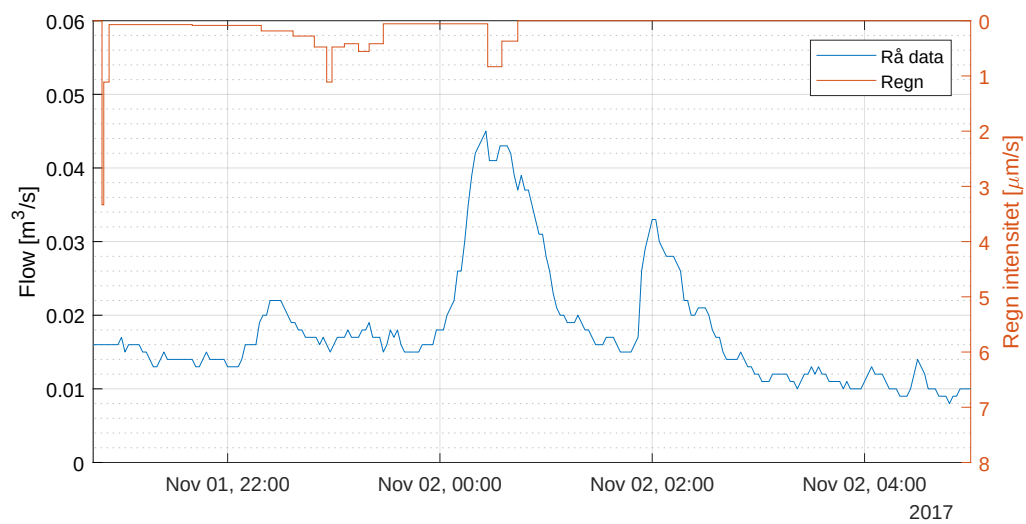
B.1 Regnhændelser ved Jarlsmindevej



Figur B.1. Jarlsmindevej - regnhændelse 1.

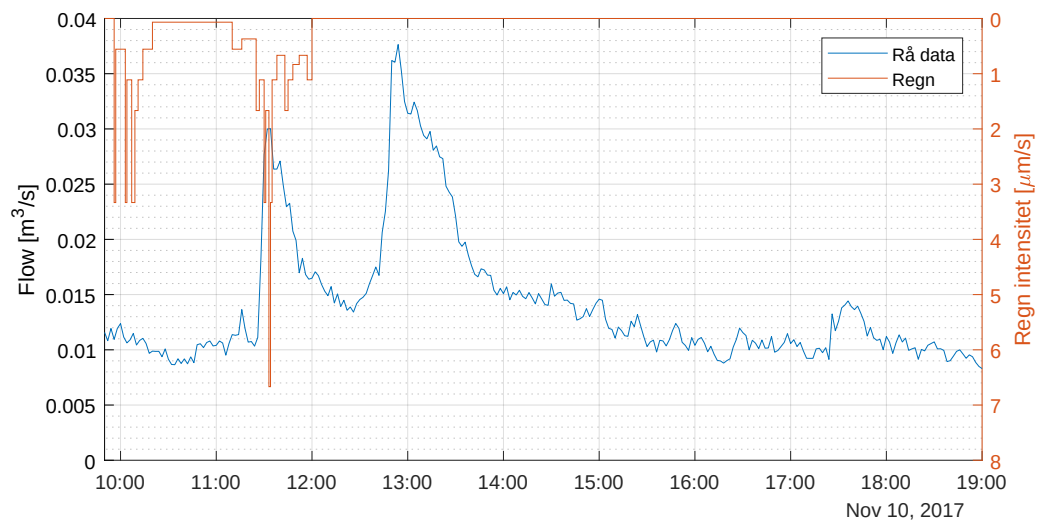


Figur B.2. Jarlsmindevej - regnhændelse 2.

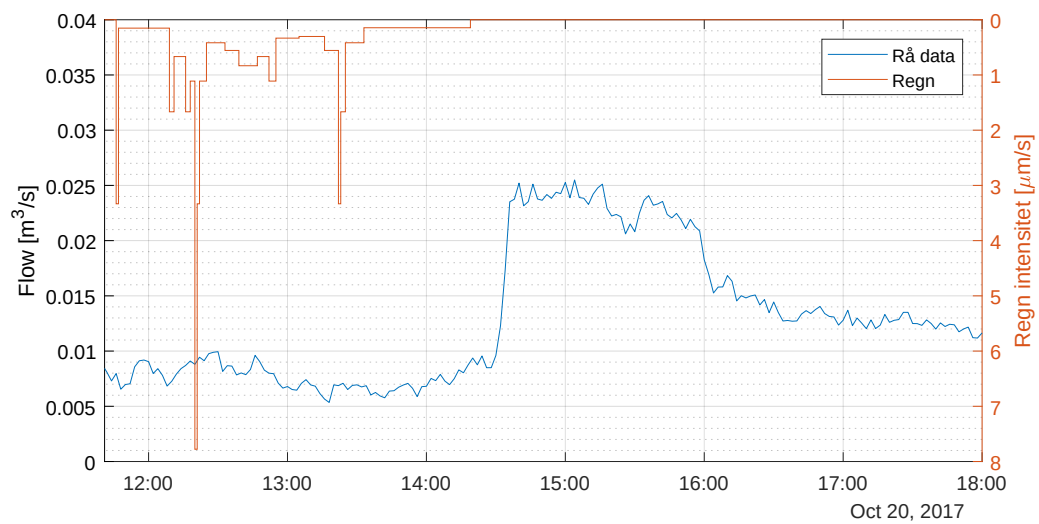


Figur B.3. Jarlsmindevej - regnhændelse 3.

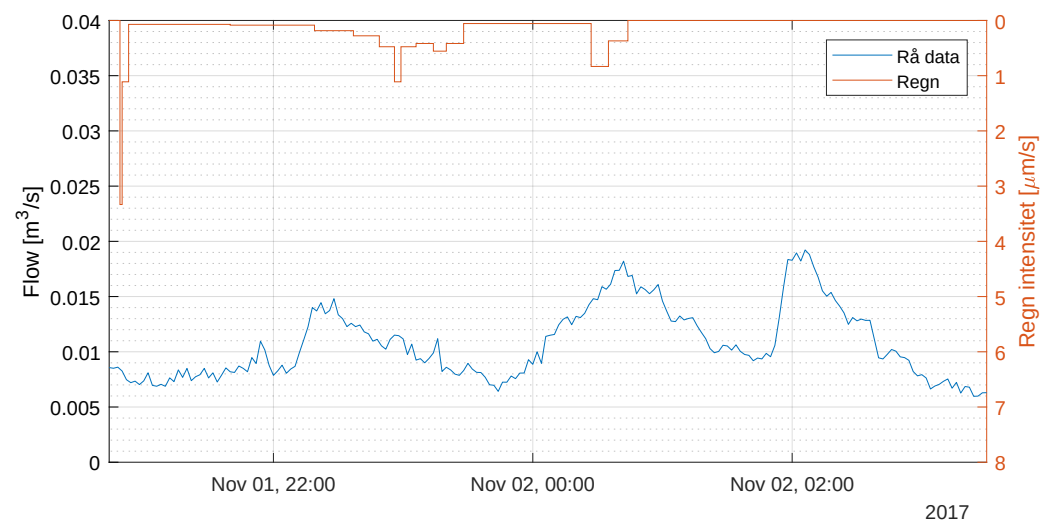
B.2 Regnhændelser ved Ringvej



Figur B.4. Ringvej - regnhændelse 1.



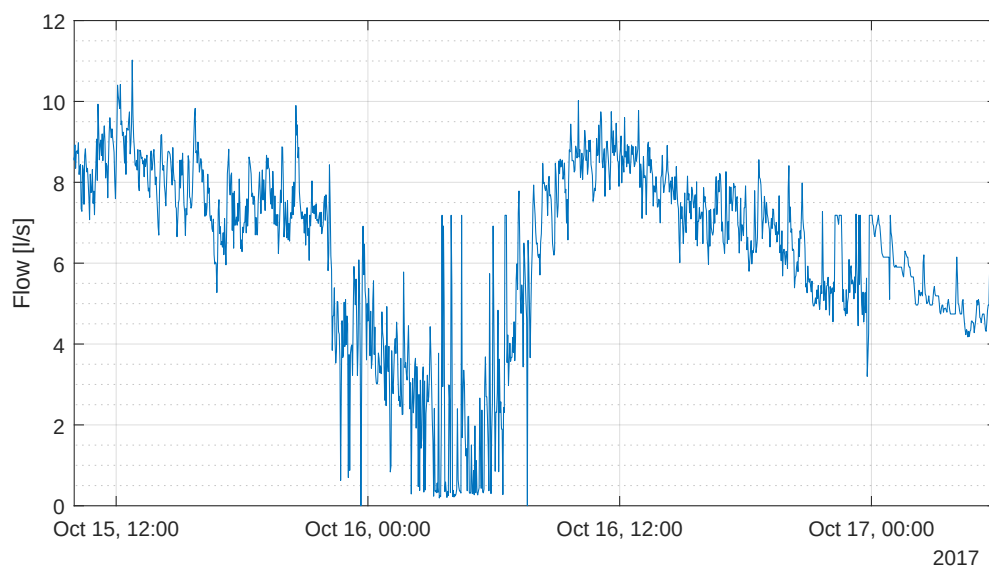
Figur B.5. Ringvej - regnhændelse 2.



Figur B.6. Ringvej - regnhændelse 3.

Vandstandsanalyse i Ringvejen

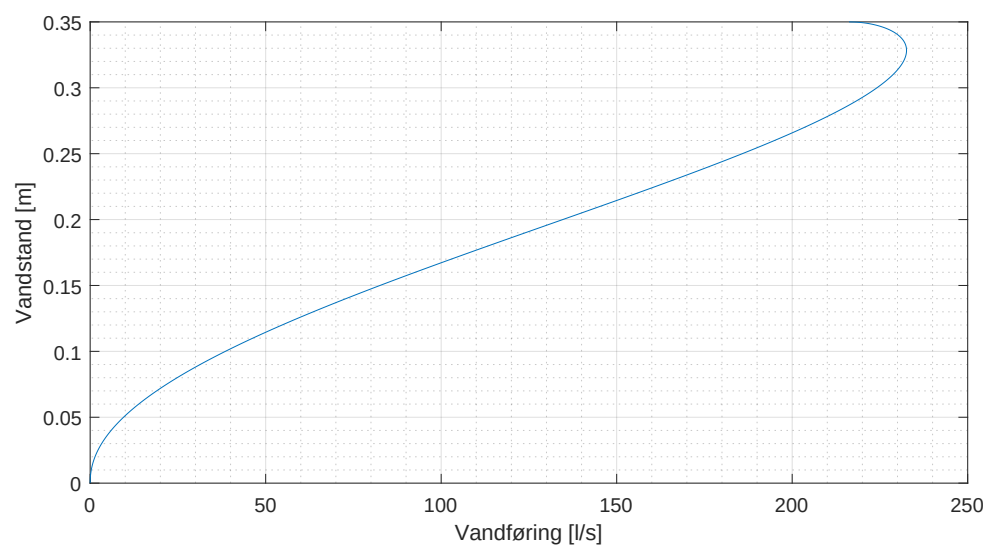
Data fra flowmåleren i Ringvejen indeholder store fluktuationer, når flowet falder til omkring 5 l/s. Et eksempel på dette kan ses på figur C.1. Disse fluktuationer kan skyldes, at når flowet falder til omkring 5 l/s, er der en lav vandstand i ledningen, hvilket kan medføre usikre målinger. Målingerne er foretaget af DANOVA, som oplyser at vandstanden skal være højere end 3,5 cm for, at målingerne er præcise.



Figur C.1. Data fra flowmåler i Ringvejen, hvor der tydeligt ses fluktuationer hen over natten.

For at undersøge problemstillingen er den naturlige vanddybden relativt til flowet udregnet. Udregningen er foretaget på baggrund af Manningformlen, og kan findes i Brorsen & Brorsen [2003]. Specifikationer på ledningen er fundet i Aarhus Vands interne database. Ledningen er en ø350 betonledning med et fald på 13 ‰, og der er anvendt et Manningtal på 100 m^{1/3}/s.

Resultatet af udregningerne kan ses på figur C.2. Grafen viser, at når vandføringen falder til omkring 5 l/s er vandstanden 3,5 cm, hvilket stemmer overens med oplysningerne fra DANOVA [2018].



Figur C.2. Relation mellem vandstand og vandføring i ledningen i Ringvejen.

Beregning af Viby Bassinets geometri

Da det ikke var muligt at finde en entydig bassingeometri for Viby Bassin, er der beregnet en ny. Bassingeometrien er blevet fundet på baggrund af flowmåleren, der er placeret efter tømmepermerne. Den nye bassingeometri kan ses på figur 6.16 på side 39.

Beregningerne er foretaget over et interval på 10 minutter, således at variationer fra støj udglattes. Punktdiagrammet er fundet ved beregningerne herunder.

$$A_i = \frac{\text{middel}(Q_i + Q_{i-n}) \cdot \Delta t}{H_{i-n} - H_i} \quad (\text{D.1})$$

$$H_i = \text{middel}(H_i + H_{i-n}) \quad (\text{D.2})$$

Hvor:

A	Gennemsnitlig overfladearealet over tidsintervallet
H	Gennemsnitlig vanddybde over tidsintervallet
n	Antal tidsskridt beregningen foretages over
Q	Målt pumpeflow
Δt	Tidsinterval