Varslingssystem imod regnbetingede oversvømmelser

Realtidsmodellering af afløbssystemer

Lasse Dichmann og Jens Martin Eriksen

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Det Teknisk-
Naturvidenskabelige Fakultet
Institut for Byggeri og Anlæg
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Øst
http://www.tek-nat.aau.dk

Titel:

Varslingssystem imod regnbetingede oversvømmelser

Projekttype:

Afgangsprojekt

Projektperiode:

September 2018 - Juni 2019

Forfattere:

Lasse Ehlert Nedergaard Dichmann
Jens Martin Eriksen

Vejledere:

Rasmus Nielsen
Søren Liedtke Thorndahl

Antal sider i hovedrapport: 104
Appendiks: 2
Afsluttet: 7. juni 2019

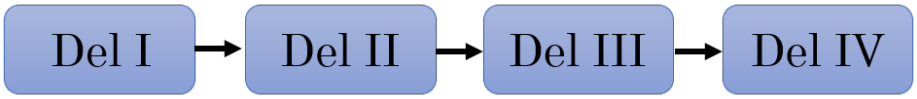
Synopsis:

Der er observeret en intensivering i antallet af regnbetingede oversvømmelser forårsaget af kraftig nedbør, hvilket har store økonomiske konsekvenser for såvel berørte borgere som kommuner og forsikringsselskaber. Ved at varsle imod kommende oversvømmelser, får borgere og beredskab muligheden for at foretage afværgende foranstaltninger, inden uheldet er ude. For at være i stand til at varsle en by imod en kommende regnbetinget oversvømmelse, kræver det en model, der beregner oversvømmelsesudbredelse og vandniveau i realtid.
Kernen i varslingssystemet er realtidsmodellen, som udarbejdes med baggrund i surrogat modellering, hvor der opbygges et katalog af responser via simulering af historisk observeret nedbør, igennem en MIKE FLOOD model. Responserne i kataloget afslører, hvorledes ovsersvømmelsesgivende regnhændelser er korreleret til oversvømmelsesudbredelse samt vandniveauet over terræn. Denne viden anvendes i realtidsmodelleringen, som bygger på metoderne; logistiske funktioner og neurale netværk. Derudover undersøges potentialet for at anvende kunstigt konstrueret nedbør til udarbejdelsen af en realtidsmodel.
Det kan konkluderes, at det er muligt at anvende neurale netværk til modellering af oversvømmelsesudbredelse samt vandniveau over terræn med høj præcision, i realtid. Realtidsmodellen med baggrund i logistiske funktioner har ligeledes vist sig anvendelig til at modellere oversvømmelsesudbredelse. Dette skyldes, at middelintensiteten over forskellige regnvarigheder af en regnhændelse, i høj grad er korreleret til oversvømmelsesudbredelsen.
Desuden konkluderes det, at CDS-regn kan anvendes til opbygning af en realtidsmodel, der med tilfredsstillende præcision modellerer responsen i systemet ud fra en regnhændelse.

Forord

Denne rapport er udarbejdet af Lasse Ehlert Nedergaard Dichmann og Jens Martin Eriksen fra sektionen Vand og Miljø under institut for Byggeri og Anlæg på Aalborg Universitet. Rapporten er udarbejdet i perioden fra september 2018 til juni 2019, som et kandidatspeciale på 9.-10. semester. Rapporten tager udgangspunkt i udarbejdelsen af en realtidsmodel, som beregner responsen af systemet i realtid, uden at gå på kompromis med kompleksiteten og dynamikken af systemet. Der rettes en særlig tak til vores vejledere: Søren Thorndahl og Rasmus Nielsen for vejledning gennem hele projektperioden.

Rapporten er opdelt i fire dele, hvilket illustreres i figuren nedenfor. Del I omhandler rapportens problemstillinger, projektlokalitet og valg af hydraulisk model. Del II omhandler afprøvning af konceptet med opbygning af en realtidsmodel baseret på præsimulerede resultater, samt en undersøgelse af om kunstigt konstrueret nedbør kan anvendes til opbygning af en pålidelig realtidsmodel. Del III omhandler udarbejdelsen af realtidsmodeller, der beregner oversvømmelsesudbredelse samt vandniveau ud fra en given regnhændelse. Del IV omhandler afrunding af rapporten, hvilket inkluderer konklusion og perspektivering.



Til udarbejdelsen af rapporten har Aalborg forsyning udleveret en MIKE URBAN model af afløbssystemet i Kærby og Håndværkerkvarteret, som er revideret af Envidan og Rasmus Nielsen.

Bilagene fremgår bagerst i rapporten. Hele varigheden af regnhændelserne vil i rapporten blive beskrevet som hændelsesvarigheden, mens varighederne i regnhændelserne vil blive beskrevet som regnvarigheder. Akkumuleret nedbør betyder i rapporten regndybden og mængden af vand i en hændelse. I rapporten vil brønde i afløbssystemet blive beskrevet som noder.

Jens Martin Eriksen

Lasse Ehlert Nedergaard Dichmann

Abstract

Intensification of the number of rainfall floods caused by heavy rainfall has been observed, which has major economic consequences for both affected citizens and municipalities. By notifying citizens and preparedness before a servere flooding, they have the opportunity to take precautionary measures, and thereby reducing the consequences. It has been chosen to investigate the potential of a warning system against rain-flooding using a real-time model that calculates the response of the system in real time, without compromising the complexity of the model.

It has been chosen to construct the real-time model based on surrogate modeling, whereby a catalog of responses is produced. The catalog of responses is produced by simulating the MIKE FLOOD model with historical rain series as input. The catalog of responses is analyzed by using two methods; logistic functions and neural network and subsequently examine the methods in relation to describing the respose in the system in real time. In addition, the potential for using artificially constructed precipitation for the production of the real-time model is examined.

It can be concluded that a real-time model can be produced which calculates whether future rainfall events result in flooding in real time, by both methods, where the neural network calculates the response with a greater certainty. In addition, it can be concluded that artificially constructed precipitation in the form of CDS-rain can be used to build a real-time model that calculates the response with satisfying certainty.

Indholdsfortegnelse

I Introduktion af projektområde, metode og inputdata **1**

Kapitel 1 Indledning **3**
1.1 Metode til udarbejdelse af varslingssystem 4

Kapitel 2 Kærby og Håndværkerkvarteret **13**
2.1 Afløbssystemet i Kærby og Håndværkerkvarteret 15
2.2 MIKE URBAN model af projektområde 16
2.3 Forundersøgelse af begyndelsesbetingelser 18

Kapitel 3 Input til varslingsmodel **21**
3.1 Historisk nedbør 22
3.2 Kunstigt konstrueret nedbør 23
3.3 Vandføring i vandløb 26

II Realtidsmodel baseret på resultaterne fra Hydrodynamisk rørmodel **27**

Kapitel 4 Systemnanalyse af hydrodynamisk rørmodel **29**
4.1 Påvirkning fra vandløb 30
4.2 Databehandling af resultater fra historiske nedbør 30
4.3 Databehandling af resultater fra kunstigt konstruerede nedbør 37
4.4 Sammenligning af resultater fra historiske nedbør og kunstigt konstruerede nedbør 39

Kapitel 5 Realtidsmodel - Logistisk funktion **41**
5.1 Opbygning af logistiske funktioner 41
5.2 Realtidsmodel via logistiske funktioner 42

Kapitel 6 Opsummering af del II **49**

III Realtidsmodel baseret på resultater fra MIKE FLOOD model **51**

Kapitel 7 Systemanalyse af MIKE FLOOD modellen **53**

Kapitel 8 Realtidsmodel - Logistisk funktion **61**
8.1 Opbygning af logistiske funktioner 61
8.2 Realtidsmodel via logistiske funktioner 62

Kapitel 9 Realtidsmodel - Neuralt netværk **71**
9.1 Træning og validering af det neurale netværk 72
9.2 Realtidsmodel via neuralt netværk for oversvømmelsesudbredelse 74
9.3 Realtidsmodel via neuralt netværk for vandniveau 80

Kapitel 10 Opsummering af del III **89**

IV Afrunding **93**

Kapitel 11 Konklusion **95**

Kapitel 12 Perspektivering **97**

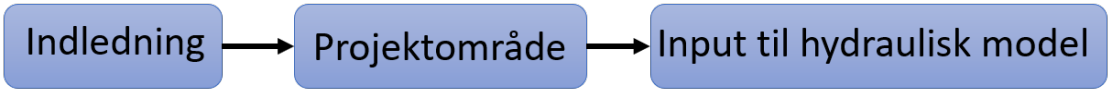
Litteratur **103**

Bilag A Logistiske funktioner for resultater for Kasseregn **105**
A.1 Realtidsmodel via logistiske funktioner 105

Bilag B Logistisk funktion for resultater for CDS-regn **111**
B.1 Realtidsmodel via logistiske funktioner 111

Del I

Introduktion af projektområde, metode og inputdata



I del I af rapporten præsenteres problemstillingerne i forhold til oversvømmelse i urbane områder hvorefter projektområdet beskrives. Herudover fremgår en præsentation af de inputparametre, som skal agere input i udarbejdelsen af realtidsmodeller i del II og III. I rutediagrammet ovenfor ses kapitlerne for del I i kronologisk rækkefølge.

1 Indledning

I Danmark er der, ligesom i resten af verden, observeret en intensivering i antallet af regnbetingede oversvømmelser forårsaget af kraftig nedbør. Disse rammer specielt de urbane områder i byerne, hvilke samtidig er de områder, hvor oversvømmelserne skaber de største økonomiske, samfundsmæssige og sundhedsmæssige problemer. Dette skyldes dels urbanisering som forårsager fortætning, hvilket påvirker områdets opmagasineringsevne og infiltrationsevne, hvorved områderne bliver særligt følsomme overfor højintense regnhændelser [Hatim O. Sharif, 2005]. Dette skyldes, at vandet strømmer på overfladen og strømmer hurtigt til afløbssystemet i stedet for at blive infiltreret i jorden og forsinket. En anden påvirkning på oversvømmelse i byområderne er klimaforandringerne.

Klimaforandringer har påvirket hele verden, da atmosfæren og havene er blevet varmere, mængden af is er blevet reduceret og vandniveauet i havene er steget. Ifølge FN's klimapanel IPCC's femte hovedrapport fra 2013, er den gennemsnitlige årsnedbør og temperatur i atmosfæren globalt set steget med henholdsvis 100 mm og 1,5°C siden 1870. Den opvarmede atmosfære øger mængden af vanddamp, hvilket ifølge rapporten vil forårsage at den årlige nedbør i Danmark vil stige 2-7% i år 2100, afhængig af den menneskelige påvirkning på CO^2 udslippet. Endvidere tyder rapporten på, at sommernedbøren akkumuleret set er på samme niveau, men at der vil komme færre regnhændelser med højere intensiteter. Netop de højintense regn er de hændelser, som afløbssystemerne er særligt følsomme overfor, hvilket tyder på at problemet med oversvømmelse, som følge af ekstremregn i de bynære områder, stiger i fremtiden [Danmarks Meteorologiske Institut, 2019].

I perioden 1998-2002 blev Europa ramt af omkring 100 større ødelæggende oversvømmelser, hvilket ifølge EM-DAT(international database med informationer omkring katastrofer) udgjorde 43% af samtlige katastrofetilfælde i perioden. Disse påvirkede 1,5% af Europas befolkning, kostede 700 menneskeliv og medførte skader for omkring 190 mia. kr. [Det Europæiske Miljøagentur, 2005]. Før 1998 er der også eksempler på kraftige regnhædenlser, som havde katastrofale følger. Nîmes i Frankring blev eksempelvis i 1988 udsat for en kraftig regnhændelse, som resulterede i over 45.000 skadesramte, ti døde og over 600 millioner euro i økonomiske skader [Raymond et al., 2005]. Der blev efter hændelse i 1988 indført et varslingssystem, som varsler borgerne ved anvendelse af vejrprognoser. De mange katastrofale tilfælde er en af bevæggrundene til oversvømmelsesdirktivet, der blev vedtaget i 2007. I kraft af EU's oversvømmelsesdirektiv skulle 22 kommuner i Danmark udarbejde risikostyringsplaner. Disse omfatter ifølge Den Europæiske Unions Tidende [2007] *"alle aspekter af risikostyring med særlig vægt på forebyggelse, sikring og beredskab, herunder oversvømmelsesprognoser og systemer for tidlig varsling."*. Oversvømmelsesprognoser og varslingssystemer har således et stort fokus i EU.

Et af de steder i Danmark, som blev hårdt ramt af en ekstrem regnhændelse i det seneste årti er byen Lystrup, som ligger nord for Aarhus. Det lokale skybrud fandt sted d. 12 august 2012, hvor der ifølge DMI nåede at falde 48 mm på tre timer. Regnhændelsen resulterede i, at flere biler blev fanget i vandmasserne fra nedbøren og Djursmotorvejen blev lukket i flere timer. En anden kraftig regnhændelse, som forårsagede oversvømmelse fandt sted i København d. 2 juli 2011, hvor et skybrud satte mange gader under vand, og lavede store trafikale problemer i hovedstaden i de

følgende dage efter hændelsen. Skybruddet målte en døgnnedbør på cirka 135 mm ifølge DMI og kostede forsikringsselskaber op mod 3 mia. kr. [Theilgaard, 2019].

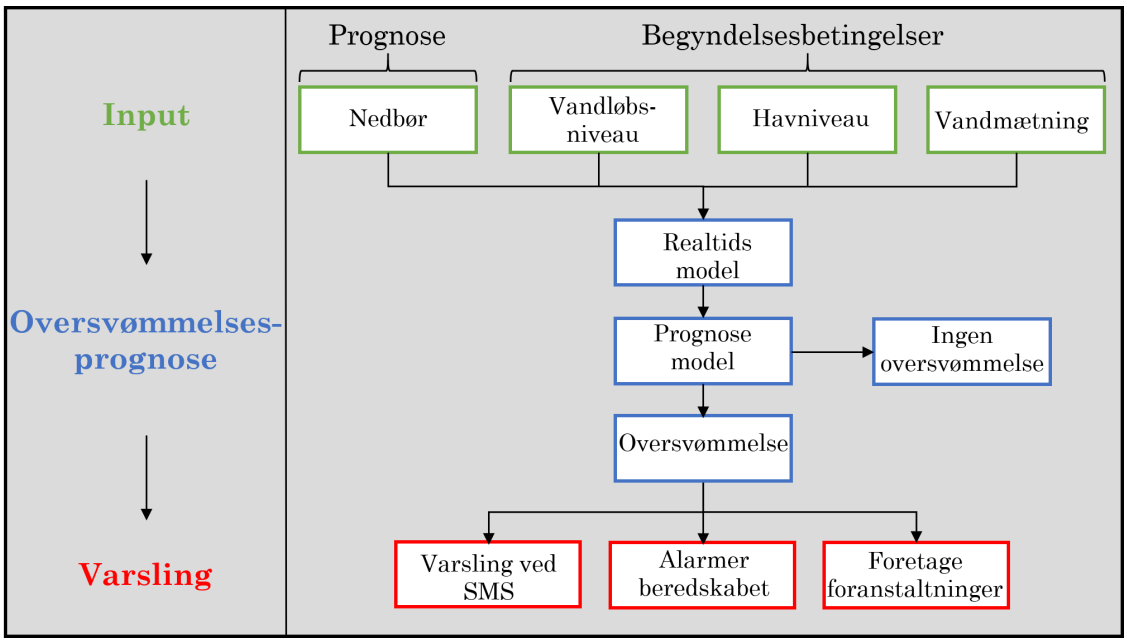
Hver kommune i Danmark har sit eget serviceniveau i forhold til hvor hyppigt der må forekomme vand på terræn. Dette betyder, at en oversvømmelsesrisiko accepteres, hvis det forårsages af en regnhændelse større end en vis gentagelsesperiode. Udfordringen er imidlertid, at udbygning af afløbssystemer sjældent går hurtigere end bytilvæksten, hvilket i kombination med kraftigere højintense regnhændelser, sætter afløbssystemerne under pres, og gør det svært for kommunerne at opretholde et givent serviceniveau.

Derfor er det nødvendigt med varslingssystemer, som kan forudsige en kommende oversvømmelse, og fortælle hvor der vil opstå problemer i systemet. Dette er nyttig viden, da omkostningerne ved oversvømmelsen således kan minimeres, ved at foretage de rette tiltag i rette tid. Der er således et behov for varslingssystemer, hvilket nærværende rapport har til hensigt at udarbejde.

1.1 Metode til udarbejdelse af varslingssystem

Formålet med denne rapport er at udarbejde en realtidsmodel, som med stor sikkerhed er i stand til at modellere oversvømmelsesudbredelse og vandniveau over terræn ud fra forskellige scenarier. Denne realtidsmodel kan implementeres i varslingssystemer, som alarmerer berørte borgere og beredskab, før uheldet er ude. Da metoden potentielt kan anvendes i store byer, er det målet, at være i stand til at beskrive præcist hvor i systemet oversvømmelsen forekommer. Dette kan anvendes til at skærpe beredskabets indsatsområde.

Varslingssystemet består i hovedtræk af input i form af en nedbørsprognose og begyndelsesbetingelser i systemet, en oversvømmelsesprognose, der beregner oversvømmelsesudbredelse og evt. vandniveau i byen i realtid, samt et varslingssystem, som varsler de berørte borgere og det nødvendige beredskab før uheldet er ude. På figur 1.1 ses opbygningen af varslingssystemet.



Figur 1.1. Opbygning af varslingssystem til varsling af oversvømmelse.

Som det fremgår, består begyndelsesbetingelserne af vandniveau i hav og vandløb, samt vandmæt-

ningen i jorden. Disse medtages, da de potentielt kan have indflydelse på systemet, og dermed på varslingssystemet.

Kernen i oversvømmelsesprognosen består af en realtidsmodel, som ud fra et givent input, beregner responsen i systemet og dermed afgør, om der opstår oversvømmelse, samt angive hvor stor udbredelsen bliver deraf. Dermed kan såvel berørte borgere som beredskab iværksætte foranstaltninger i de områder, hvor oversvømmelsen rammer. Dette stiller krav til metoden, der anvendes til at beregne oversvømmelsesudbredelsen af en potentiel oversvømmelse, hvorfor forskellige metoder undersøges i det følgende.

1.1.1 Udvælgelse af realtidsmodel

Realtidsmodellering er modellering af fysiske systemer, der kan modellere en given respons, i realtid. I nærværende rapport anvendes realtidsmodellering til bestemmelse af responsen i et afløbssystem ud fra en fremtidig regnhændelse, i realtid. Det ønskes at udarbejde en realtidsmodel, da

Forskellige realtidsmodeller anvendes i forvejen verden over til varsling af potentielle oversvømmelser. I Bangkok og Barcelona anvendes en realtidsmodel, hvor vejrprognoser anvendes som input i en online hydraulisk model, som beregner påvirkningen fra regnhændelser. For at modellen kan beregne påvirkningen i realtid, er den hydrauliske model simplificeret, hvorfor den er upræcis i forhold til placeringen af oversvømmelsen. I Nîmes i Frankrig anvendes en realtidsmodel, som er opbygget af 44 præsimuleringer. Dette betyder at mange forskellige tidligere regnhændelser er simuleret igennem en hydraulisk model, hvor resultaterne fra simuleringerne anvendes som et katalog for de fremtidige regnhændelser. Der anvendes også realtidsmodeller i Danmark, hvor både DHI´s hovedkontor i Hørsholm og Hvidovre kommune anvender realtidsmodeller basseret på empiriske scenarier. Dette betyder, at varslingssystemet baseres på tidligere erfaringer og tidligere historiske hændelser. [Hénonin et al., 2013]

Realtidsmodellen i dette rapport har som sagt til formål at bestemme, hvor oversvømmelsen opstår, og hvad udbredelsen bliver deraf ud fra en regnhændelse i realtid. Dette stiller krav til udvælgelsen af den model, som skal være baggrund for realtidsmodellen, da den skal være præcis i forhold til modellering af oversvømmelsesudbredelse og vandniveau. Derudover stilles krav til beregningstiden af modellen, da den skal kunne beregne den potentielle oversvømmelse af den indkommende regnhændelse, i realtid. Forskellige metoder undersøges for at finde den metode, der imødekommer kravene på bedste vis.

Simpel konceptuel model

En simpel konceptel model indeholder mange antagelser og simplificeringer, hvorfor modellen har svært ved at beskrive udbredelsen af en oversvømmelse præcist. Modellens styrke er, at den hurtigt giver et groft estimat af hvor store vandmængder der befinder sig i systemet, eller hvor store vandmængder det specifikke modelområde leverer videre i systemet ved anvendelse af en linære reservoir model. Derudover er simuleringstiden meget kort for den simple konceptuelle model, da den ikke indeholder beregningskrævende ligninger. Denne type model anvendes typisk på rensningsanlæg, hvor modellen forudsiger, hvor stor vandføringen ind i anlægget bliver. Hvis en høj vandføring ind i rensningsanlægget forudsiges nogle timer før den opstår, er det muligt, aktivt at ændre driften af anlægget, således mere vand bliver renset i stedet for at sendes direkte ud i havet. Dette er blandt andet tilfældet på rensningsanlægget Lynetten, som er beliggende i København [Thorndahl et al., 2013]. Modellen beregner vandføringen ind i rensningsanlægget ved

at benytte en simpel lineær reservoirmodel, hvor oplandet til Lynetten er opdelt i seks delområder.

Hydrodynamisk rørmodel

En hydrodynamisk rørmodel beregner vandets strømning i afløbssystemet ud fra Saint-Venant ligningerne. Modellen er tilgængelig i kommercielle programmer som MIKE URBAN. Modellen kobler en afstrømningsmodel fra overfladen til afløbssystemet og kan dermed udregne hvor i systemet, der opstår opstuvning til terræn fra afløbssystemet. Da modellen beregner strømningen i afløbssystemet, kan den vise hvor i systemet vandet opstuver fra. Modellen tager kun højde for afløbssystemet og kan derfor ikke anvendes til at beskrive udbredelsen af en oversvømmelse samt hvor vandet samler sig på overfladen. [Maksimovic og Prodanovic, 2001].

2D - Terræn model

Denne metode anvender en model kun bestående af overfladen, hvorved vandmængden i regnhændelsen falder direkte på overfalden hvorefter vandet afstrømmer efter terrænets hældning. Denne type model beskriver meget præcist, hvordan udbredelsen af vandet bliver og hvor vandet samler sig på overfladen. Modellen tager dog ikke højde for vandets strømning i afløbssystemet, hvorfor der skal tages højde for dette ved antagelser eller estimeringer. [Hénonin et al., 2013]

1D-2D - oversvømmelsesmodel

Denne metode anvender en fuldt distribueret hydrologisk model, såsom MIKE FLOOD. Modellen tager både højde for vandets strømning på overfladen og i afløbssystemet, da den beregner strømningen i afløbssystemet og på overfladen i en kombineret dynamisk model. Dette vil sige, at hvis en regnhændelse medfører oversvømmelse, opstuver vandet fra en node, hvorefter det følger hældningen på overfladen og enten strømmer ned i en anden node, eller samles i en lavning. Denne model beskriver dermed præcist, hvor oversvømmelserne opstår i modelområdet, og hvor stor udbredelsen bliver. Denne model har en lang beregningstid på grund af de beregningskrævende ligninger, som modellen anvender til at beskrive dynamikken i hvordan vandet strømmer på overfladen og i afløbssystemet. Til gengæld giver den et realistisk billede af oversvømmelsesudbredelse og vandniveauet over terræn, såfremt modellen er kalibreret og valideret efter tidligere observerede oversvømmelsesudbredelser eller andet Carr og Smith [2006].

Surrogatmodellering

Surrogatmodellering består i at opbygge et katalog af responser, således en simpel responsmodel kan opbygges ud fra en mere kompleks model. Surrogatmodellering kan eksempelvis anvende en hydraulisk model, hvorigennem regnhændelser simuleres. Derved dannes et katalog over mulige responsflader af hvordan modellen responderer på forskellige regnhændelser. Hvis den anvendte model, hvor regnserierne simuleres igennem kan beregne, hvor oversvømmelserne opstår og hvad udbredelsen bliver deraf, kan kataloget af præsimuleringer anvendes til at beskrive oversvømmelsensudbredelse for den fremtidige regnhændelse, i realtid. Denne metode kræver mange forskellige præsimuleringer, således kataloget dækker over de fremtidige regnhændelser. Kataloget er dermed tidskrævende at opbygge, men metoden vil hurtigt kunne beskrive den anvendte models respons i realtid. Den anvendte model kunne eksempelvis være en MIKE FLOOD model, hvor responsen beskriver oversvømmelsensudbredelse. Surrogatmodellering anvendes som nævnt i Nîmes i Frankrig, hvor kataloget består af 44 præsimulerede scenarier [Raymond et al., 2005].

Fordele og ulemper ved metoderne

Fordelen ved den simple konceptuelle model er, at den hurtigt kan estimere påvirkningen i modelområdet af en regnhændelse, men estimatet er upræcist, idet der indgår mange antagelser i

metoden. Den hydrodynamiske model kan anvendes til hurtigt og præcist at beregne strømningen i afløbssystemet og bestemme hvor oversvømmelser opstår, men metoden kan ikke beskrive, hvor vandet strømmer hen efter opstuvning. 2D - terrænmodellen kan derimod anvendes til at beskrive hvordan vandet strømmer på overfladen, men modellen har ingen informationer omkring afløbssystemet, hvorfor den ikke kan anvendes til at beskrive oversvømmelser i byområder, hvor oversvømmelser typisk opstår fra afløbssystemet(med mindre der tages højde for dette ved antagelser eller estimeringer). Derudover er beregningstiden lang, da modellen skal løse beregningskrævende ligninger for at bestemme strømningen på overfladen for hver beregningscelle. En 1D-2D - oversvømmelsesmodel er i stand til at beregne oversvømmelsesudbredelse og vandniveau præcist. Men metoden har en lang beregningstid, grundet modellens beregningskrævende ligninger. Surrogat modellering kan præcist beskrive, hvor oversvømmelsen opstår i modelområdet, og hvad udbredelsen bliver deraf, under forudsætning af, at kataloget af præsimuleringer dækker de fremtidige regnhændelser samt at den anvendte models respons kan beskrive det. Derudover er beregningstiden kort, da metoden ikke anvender beregningskrævende ligninger. Tabel 1.1 viser modellernes muligheder i forhold til hinanden.

Metode	Beregningstid	Opstuvning af node	Udbredelse af oversvømmelse
Simpel konceptuel model	Lav	Nej	Nej
Hydrodynamisk rørmodel	Lav	Ja	Nej
2D - terrænmodel	Middel til høj	Nej	Ja
1D-2D - Oversvømmelsesmodel	Høj	Ja	Ja
Surrogat modellering	Lav	Ja	Ja

Tabel 1.1. Modellernes muligheder og begrænsninger i forhold til hinanden.

Surrogat modellering vælges som baggrund for realtidsmodellen, da den ud fra tabel 1.1 og afsnittet omkring fordele og ulemper, er den metode, der imødekommer kravene på bedste vis, hvis den anvendte model er en 1D-2D-Oversvømmelsesmodel. Hvis præsimuleringerne dækker de fremtidige regnhændelser, vil metoden være præcis i forhold til hvor oversvømmelserne opstår, vandniveauet samt hvor stor udbredelsen bliver deraf. Derudover er beregningstiden lav, da metoden består af et katalog af præsimuleringer, hvorfor ingen beregningskrævende ligninger anvendes. Surrogat modellering kan dermed anvendes til at simulere i realtid uden at gå på kompromis med kompleksiteten og dynamikken af den hydrauliske model.

1.1.2 Input

Input til varslingssystemet, er dels en vejrprognose og dels begyndelsesbetingelser i systemet.

For at udarbejde et varslingssystem, er det en forudsætning at forudsige oversvømmelsen, før den forekommer. I systemer hvor påvirkningen fra regnhændelsen kommer lang tid efter regnhændelsen, kan et varslingssystem bestå af livedata fra SVK målestationer. På den måde kan oversvømmelsen forudsiges med den tid det tager for regnen at opstuve fra afløbssystemet eller vandløbet og føre til oversvømmelse. I byer hvor koncentrationstiden er lav, og der således går kort tid fra regnhændelsen indtræffer, til at oversvømmelsen forekommer, er det nødvendigt at forudsige regnen. Dette er typisk tilfældet i byer, hvor højintense korte regnhændelser skaber oversvømmelserne. Til dette anvendes normalt radarprognoser, som eksempeltvis DMIs C-band radar nowcast, og/eller vejrprognoser, som eksempeltvis DMIs NWP-model(Numerical Weather Prediction). Dette anvendes dog ikke i dette projekt, da det ikke ønskes at introducere flere usikkerheder end højest

nødvendigt i opbygningen af den surrogate model. Der anvendes i stedet observerede regnhændelser fra SVK-målere, som således er observeret i stedet for prognosticeret. Dette skaber de bedste forudsætninger for at undersøge om hvorvidt det er muligt, at udarbejde en realtidsmodel med høj præcision ud fra præsimulerede resultater. Derudover udarbejdes kataloger på baggrund af kunstigt konstrueret nedbør, for at undersøge om historiske regnserier nødvendigvis skal anvendes til udarbejdelsen af et varslingssystem.

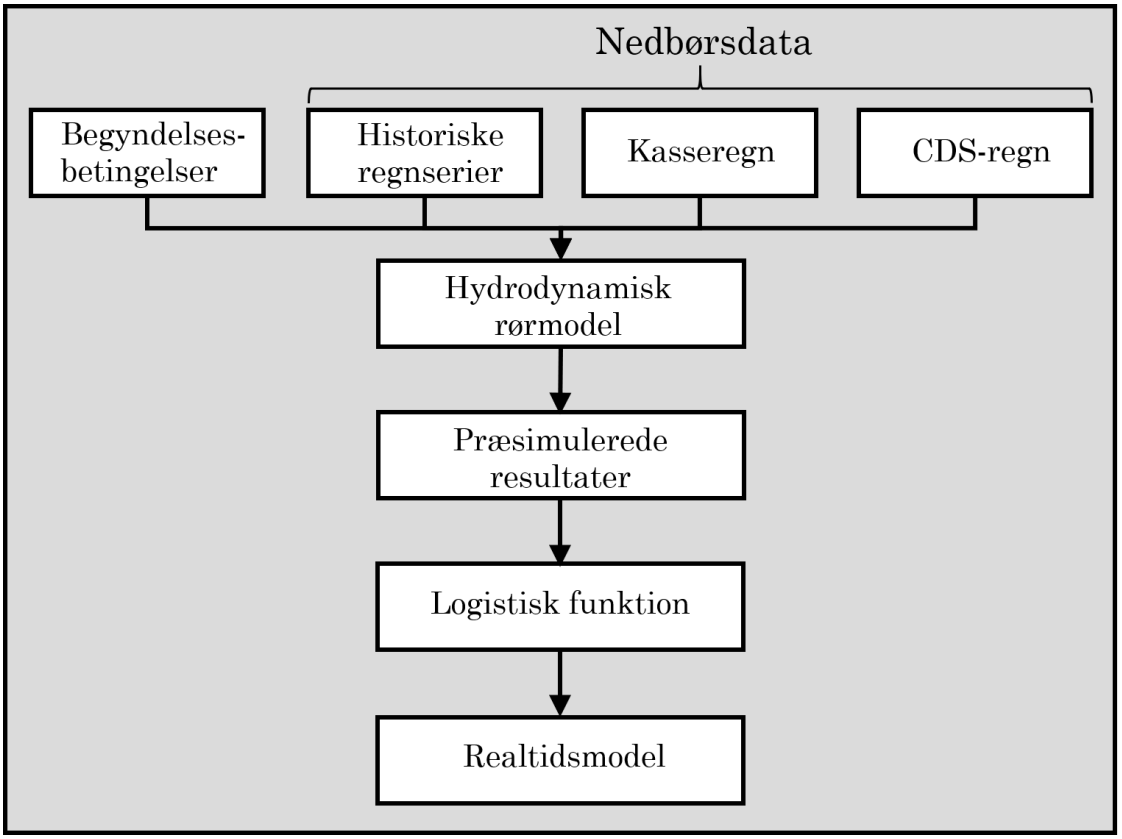
Begyndelsesbetingelserne har til formål at tage højde for de varierende inputs, som hele tiden påvirker systemet, således de medtages i beregningen af en potentiel oversvømmelse. Begyndelsesbetingelserne er, som tidligere nævnt; Vandniveauet i vandløbene, havniveau, samt vandmætningen af jorden. Vandniveauet i vandløbene kan påvirke, hvis vandløbene fungerer som recipient, hvor vandet udløber ved gravitation. Dermed kan vandstanden heri have afgørende betydning for hvor og hvor store oversvømmelser, der forekommer i systemet. Havniveauet kan ligeledes have stor betydning for oversvømmelsen, såfremt havniveauet interagerer med afløbssystemet. Vandmætning i ubefæstede områder kan have indvirkning på oversvømmelsesrisikoen. Hvis jorden i disse områder er vandmættet, vil den del af nedbøren, der ellers infiltrerer på overfladen afstrømme til afløbssystemet i stedet for at opmagasineres i jorden og blive forsinket.

Begyndelsesbetingelsernes påvirkning på systemet og dermed berettigelse som input til realtidsmodellerne, afgøres af afløbssystemets beliggenhed, topografi, anlægning mm. For at klarlægge hvilke inputs, der skal medtages i den hydrauliske model, laves en screening af projektområdets afløbssystem, før der foretages yderligere analyse af systemet, samt før realtidsmodellen udarbejdes. Dette foretages i afsnit 2.3.

1.1.3 Realtidsmodel

Surrogat modellering er som nævnt baggrund for realtidsmodellen, som er beregningskernen i varslingssystemet. Opbygningen af den surrogate model består i at præsimulere forskellige nedbørshændelser til forskellige begyndelsesbetingelser. Præsimuleringerne udarbejdes ved at simulere scenerierne igennem MIKE FLOOD, hvormed et katalog over responderende oversvømmelsesudbredelse samt vandniveauer over terræn udarbejdes. Realtidsmodellen kan modellere i det spænd præsimuleringerne repræsenterer, det er derfor vigtigt at kataloget opbygges af mange regnhændelser med forskellige regnkarakteristika.

Den hydrodynamiske rørmodel er en del af MIKE FLOOD modellen, og det ønskes derfor at starte simpelt og afprøve konceptet af realtidsmodellen, ved at udarbejde en realtidsmodel med udgangspunkt i den hydrodynamiske rørmodel. Fremgangsmåden fremgår af figur 1.2.



Figur 1.2. Metode til udarbejdelsen af realtidsmodel.

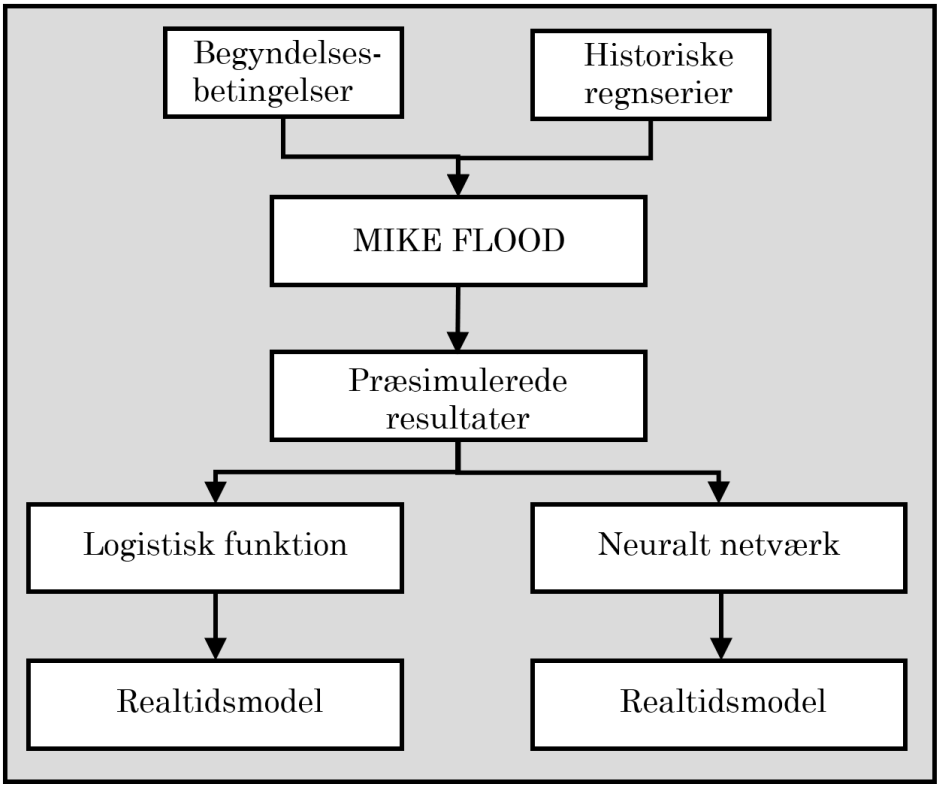
På figur 1.2 fremgår det, at realtidsmodellen består af præsimuleringer af den hydrodynamiske rørmodel med begyndelsesbetingelser og forskellige nedbørsdata. Når de præsimulerede resultater er beregnet, udarbejdes realtidsmodellen igennem en logistisk funktion. Den logistiske funktion bygger på sandsynlighed for oversvømmelse ud fra de præsimulerede resultater. Resultaterne af den hydrodynamiske rørmodel, opdeles i under -og over terræn, som et binært system, hvorfor responsen omdannes fra vandniveauer til enten 1(over terræn) eller 0(under terræn). For at fastsætte en grænseværdi hvorved den logistiske funktion begynder at have en sandsynlighed for oversvømmelse, plottes den sammen med den regnkarakteristika, der er bedst korreleret til vandniveauet i noderne. Den logistiske funktion beskriver derefter sandsynligheden for oversvømmelse i forhold til regnkarakteristika af regnhændelserne og kan dermed beregne responsen i systemet ved at undersøge om grænseværdien for den respektive node er nået. Et eksempel kan være peakintensiteter af de præsimulerede regnhændelser. Hvis man ser på responsen, vil vandniveauet i noden stige, jo højere peakintensiteten af regnhændelserne bliver og ved en vis værdi - grænseværdien - vil noden give opstuvning til terræn.

Den kunstigt konstruerede nedbør medtages som input til den hydrodynamiske rørmodel, for at undersøge om en realtidsmodel med stor sikkerhed kan udarbejdes herudfra. Hvis dette er tilfældet er derfor ikke et krav, at anvende historisk nedbør til udarbejdelsen af kataloget af præsimuleringer, for at udarbejde en realtidsmodel af et afløbssystem.

Den hydrodynamiske rørmodel indgår i MIKE FLOOD modellen, hvor den beskriver i hvilke noder vandet opstuver fra, og dermed hvorfra oversvømmelsen opstår. Derudover har den hydrodynamiske rørmodel en væsentlig lavere simuleringstid, og er dermed hurtigere og simplere at udarbejde, end surrogat modellen baseret på resultaterne fra MIKE FLOOD. Dette muliggør flere

analyser af systemet og databehandling af resultater.

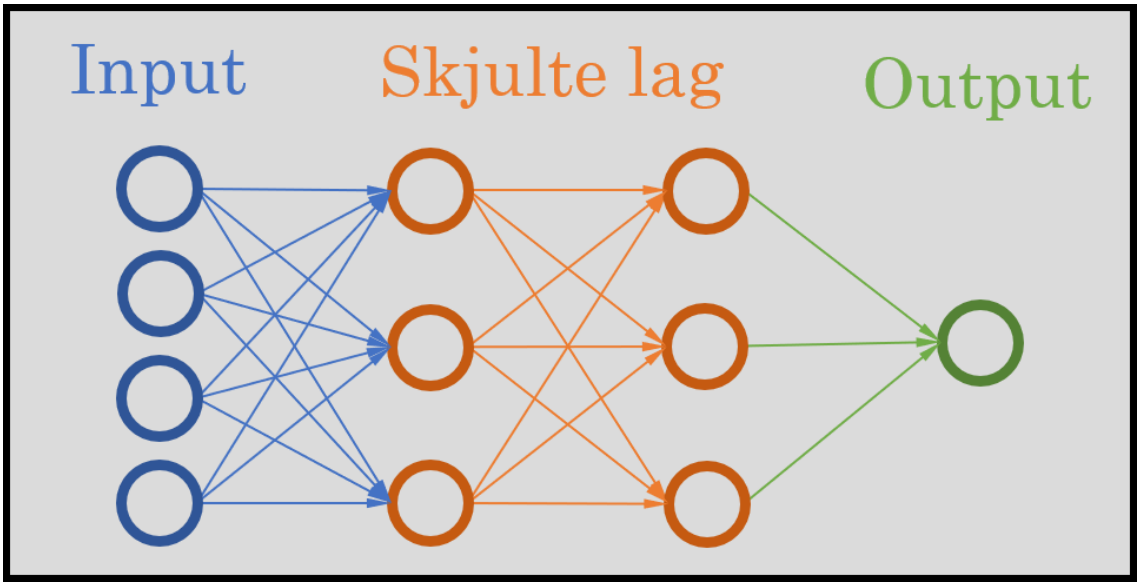
Realtidsmodellen, som baseres på præsimuleringer af historiske regnhændelser i MIKE FLOOD, har til formål at modellere oversvømmelsesudbredelsen af fremtidige regnhændelser, i realtid. Fremgangsmåden fremgår af figur 1.3.



Figur 1.3. Metode til udarbejdelsen af realtidsmodel.

På figur 1.3 fremgår det, at realtidsmodellen består af præsimuleringer af MIKE FLOOD modellen med begyndelsesbetingelser og historiske regnserier. Når de præsimulerede resultater er bestemt, udarbejdes to realtidsmodeller baseret på logistisk funktioner og på neurale netværk.

Neurale netværk består af algoritmer, der finder relationer og mønstre imellem input og output. Dette gør den ved at efterligne måden den menneskelige hjerne opererer på. Fordelen ved at anvende neurale netværk er, at værktøjet finder de mønstre mellem inputtene og outputtene, som er alt for komplekse for den menneskelige hjerne. Metoden for neurale netværk er vist på figur 1.4, som består af input lag, skjulte lag og et output lag.



Figur 1.4. Illustration af Konstruktion af neural netværk.

Cirklerne i hvert lag er neuroner, som består af matematiske funktioner udformet som biologiske neuroner. Neuronerne i hvert lag er forbundet med neuronerne i det næste lag og så fremdeles. Inputtene anvendes i det skjulte lag til at bestemme et "falsk output"ved anvendelse af vægtning og bias. Herefter bestemmes fejlen mellem det "falske output"og det rigtige output, for at se om den er acceptabel. Hvis fejlen er for stor, foretages en ændring af vægtningerne og biaserne, hvorefter et nyt "falsk output"bestemmes og sammenlignes med det rigtige. Dette gøres indtil fejlen mellem de rigtige og falske output er acceptabel. Hvert skjult lag indeholder funktioner, der opdeler inputtene i intervaller, således mønstrene mellem inputtene og outputtene bestemmes. Det neurale netværk er i stand til at modellere og finde mønstre i det data som modellen er trænet efter. Således kan en model der er trænet efter 100 regnhændelsers peakintensitet og tilsvarende respons i form af en oversvømmelse, eller ingen oversvømmelse, kunne modellere responsen i systemet ud fra en peakintensitet af en kommende regnhændelse. Dette eksempel ville give et meget dårligt resultat, da 100 hændelser ikke er tilstrækkeligt til at danne et netværk, som kan modellere ethvert fremtidigt regninput med god præcision. Men tanken er, at netværket kan trænes efter den præsimulerede data, for herved, ud fra et givent regninput at beregne oversvømmelsesudbredelsen og vandniveauet i modelområdet.

1.1.4 Varsling

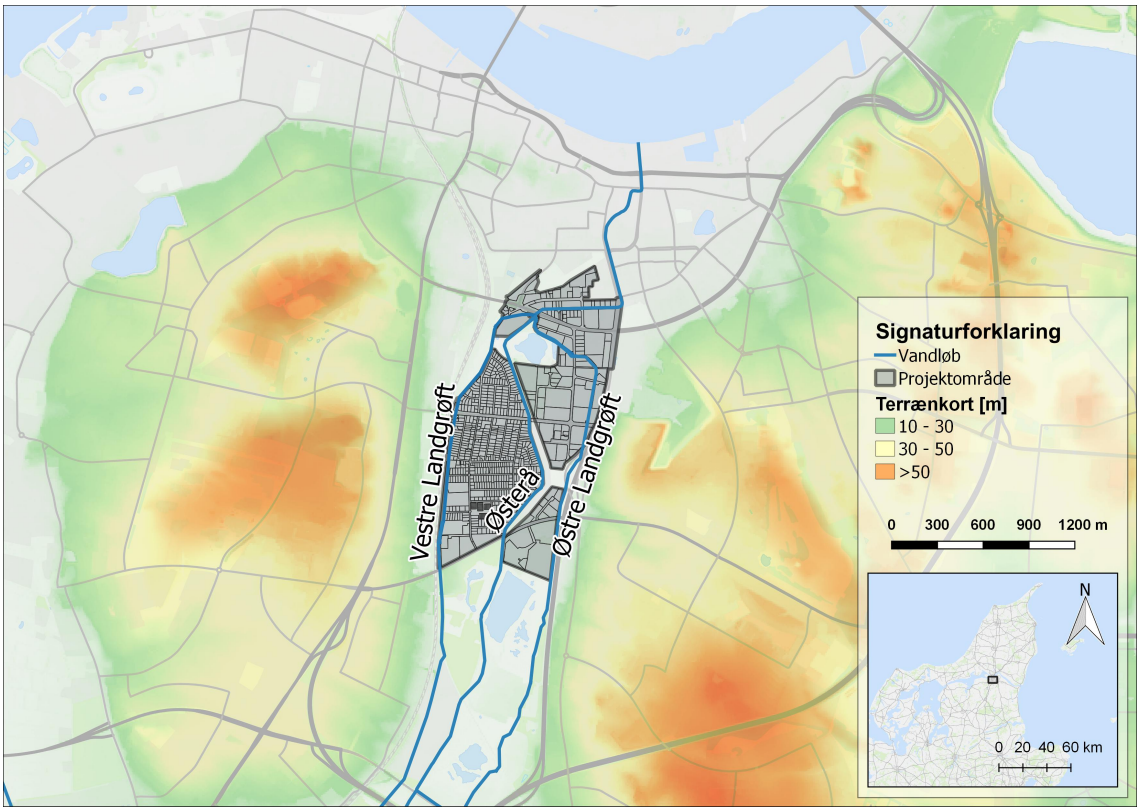
Varslingssystemet skal alarmere potentielle berørte borgere og beredskabet, således foranstaltninger kan foretages inden oversvømmelsen rammer. Varslingen sørger dermed for, at den økonomiske påvirkning fra oversvømmelse bliver reduceret, da det giver de berørte borgere tid til at flytte deres ejendele og sætte sandsække i position. Herudover kan varslingen give beredskabet muligheden for at foretage afværgende foranstaltninger.

Varslingssystemet skal varsle borgerne og beredskabet ved et SMS system, samt en internetplatform. Internetplatformen giver beredskab muligheden, for at følge udviklingen af oversvømmelsesprognosen. SMS systemet giver borgerne muligheden for at reagere før hændelsen indtræffer.

Kærby og Håndværkerkvarteret 2

I dette kapitel beskrives projektområdet og dets afløbsystem. Derudover præsenteres den udleverede MIKE URBAN model og der foretages en forundersøgelse af begyndelsesbetingelserne heri.

Projektområdet, der benyttes til udarbejdelsen af varslingssystemet, er Kærby og Håndværkerkvarteret, som er beliggende i den sydlige del af Aalborg, se figur 2.1.



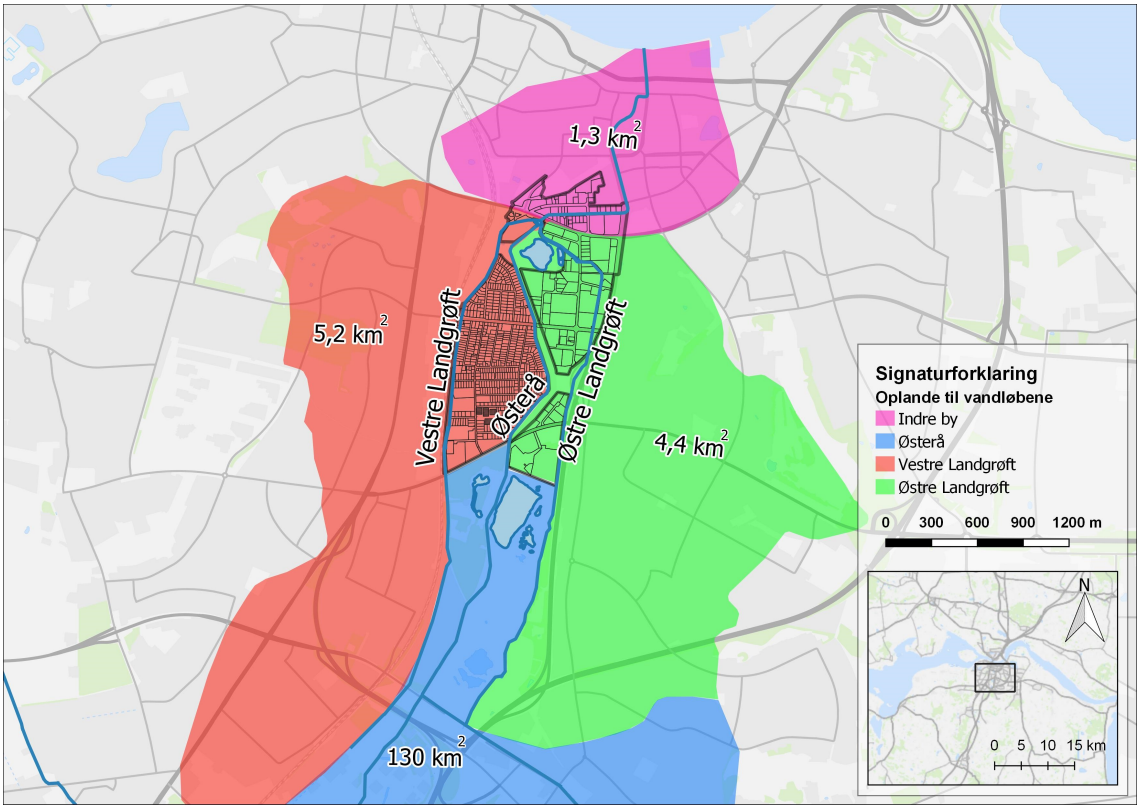
Figur 2.1. Kærby og Håndværkerkvarterets placering.

Området vælges, da der historisk har været mange regnbetingede oversvømmelser i området, og da Aalborg d. 6 august 2012 blev ramt af et skybrud, resulterede det, ifølge Envidan [2012], i 324 udrykninger i hele Aalborg, hvoraf 78 var i Kærby.

Figur 2.2. Håndværkerkvarteret ved Silvan i Aalborg efter hændelsen d. 6 august 2012 [foto: Rene Schütze/Ekstra Bladet, 2012].

Figur 2.2 viser oversvømmelsen i projektområdet forårsaget af hændelsen, der ramte Aalborg d. 6 august 2012. Områdets høje risiko for oversvømmelse, skyldes blandt andet områdets placering i en lavning, interaktion med vandløbene, der omkranser området, samt den høje befæstelsesgrad, der øger overfladeafstrømningen. Områdets placering i en lavning og omkransningen af vandløbene er vist på figur 2.1. Såfremt der er en påvirkning, skal denne tages højde for i den surrogate model, som en begyndelsesbetingelse i systemet. For at kortlægge hvilke påvirkninger, der har betydning for en regnbetinget oversvømmelse i projektområdet, undersøges forskellige påvirkninger på systemet i afsnit 2.3.

Kærby er et villakvarter på cirka 60 ha med omkring 1.900 beboere, mens håndværkerkvarteret er et industriområde på cirka 70 ha, primært bestående af erhvervsbygninger og industri. Derudover er der et højt grundvandsspejl i Kærby, hvorfor jorden har en lille infiltrationskapacitet og overfladearealet i Håndværkerkvarteret er 90% befæstet. Det er dermed kun en brøkdel af nedbøren, som har mulighed for at infiltrere i områderne.



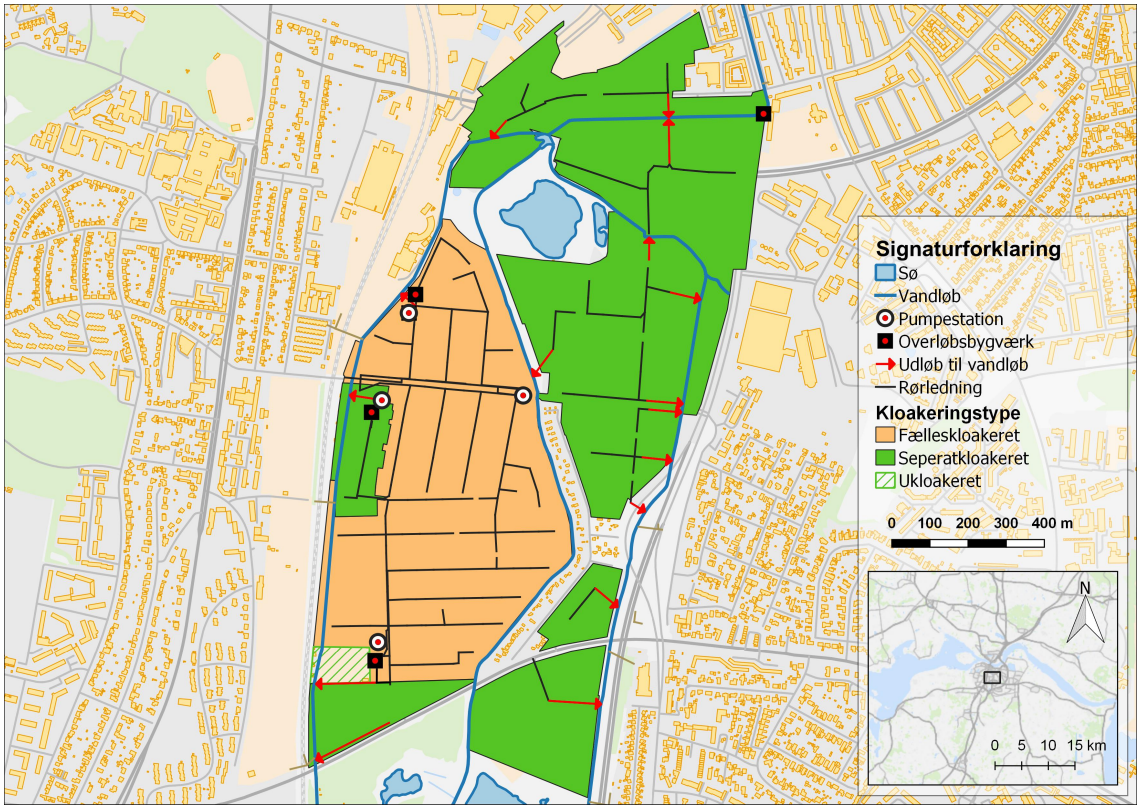
Figur 2.3. Vandløbenes topografiske oplande til Vestre -og Østre Landgrøft og Østerå.

Der løber tre vandløb omkring Kærby og Håndværkerkvarteret; Vestre Landgrøft, Østerå og Østre Landgrøft. Vestre Landgrøft løber vest om Kærby, Østerå løber mellem Kærby og Håndværkerkvarteret og Østre Landgrøft løber øst for Håndværkerkvarteret, se figur 2.3. Dette gør Kærby og Håndværkerkvarteret særligt følsomt overfor vandstanden i vandløbene, i forbindelse med oversvømmelse. Som figuren viser, har vandløbene et samlet opland på over 140 km^2. Men trods dette store opland, er det kun de sidste 11 km^2, som forårsager problemer for Kærby og Håndværkerkerkvarteret, da disse arealer er befæstede, og derfor bidrager med stor tilstrømning under regnhændelser.

Kærby er beliggende 1,5 km fra Limfjorden, hvorfor også havvandstand bør undersøges som en mulig påvirkning på vandløbene, og dermed som en potentiel påvirkning på oversvømmelse fra afløbssystemet.

2.1 Afløbssystemet i Kærby og Håndværkerkvarteret

Afløbssystemet i Kærby er primært fælleskloakeret, se figur 2.4. Dette betyder at regnvandet og spildevandet løber i en fælles rørledning hen til pumpesumpen i det tilknyttede overløbsbygværk, og da Kærby ligger i en lavning, bliver fællesvandet pumpet videre til Aalborg Renseanlæg Vest. Hvis kapaciteten i pumpesumpen til renseanlægget ikke er tilstrækkelig, vil fællesvandet strømme over i overløbssumpen, hvorefter det pumpes til nærmeste vandløb.



Figur 2.4. Afløbssystem for Kærby og Håndværkerkvarteret.

Afløbssystemet i Håndværkerkvarteret er separatkloakeret ligesom to områder i Kærby, hvilket betyder at regnvandet og spildevandet løber i to separate rørledninger. Spildevandet i Håndværkerkvarteret bliver ligesom fællesvandet i Kærby pumpet videre til Renseanlæg Vest, mens det afstrømmet regnvand løber ud i det nærmeste vandløb. Den centralvestlige del som er separatkloakeret i Kærby, er dog stadig koblet sammen med det fælleskloakeret afløbsssytem.

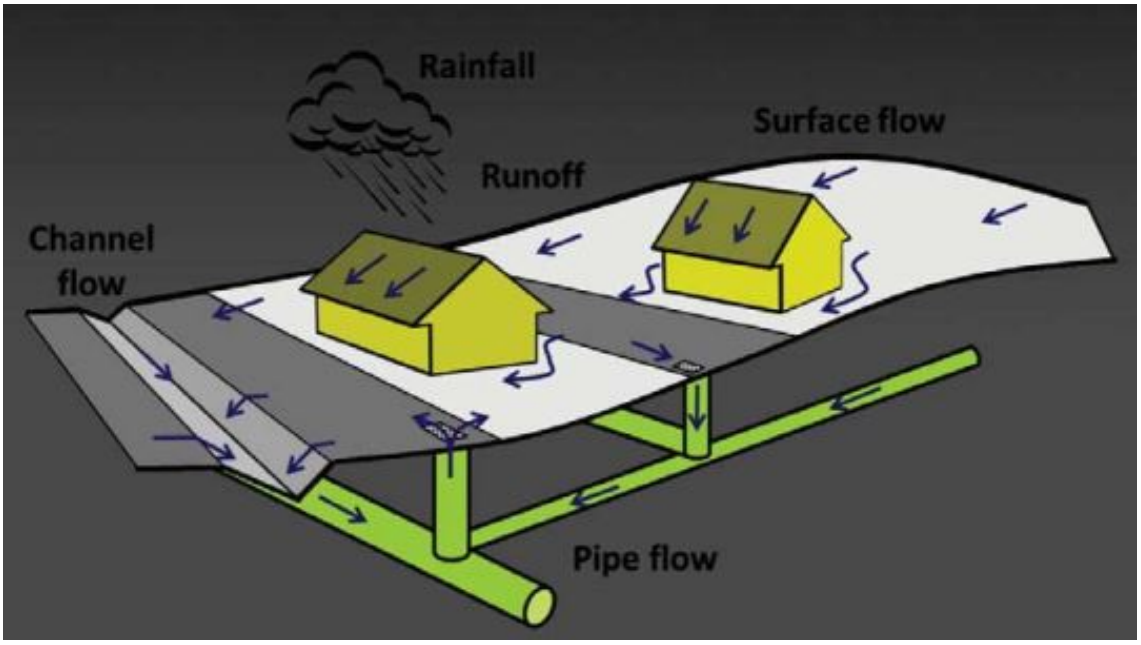
Figuren viser også, at der er 16 udløb til vandløbene fra Kærby og Håndværkerkvarteret. Tre af udløbene udleder opblandet spildevand og regnvand til vandløbene, mens de sidste 13 udleder afstrømmet regnvand. De tre udløb med opblandet spildevand og regnvand kommer fra de tre overløbsbygværker i Kærby, hvor fællesvandet udløber i Vestre Landgrøft, se figur 2.4.

Serviceniveauet i Kærby og Håndværkerkvarteret er fastsat efter kommunens minimumsfunktionskrav for afløbssystemer, hvor gentagelsesperioden for fuldtløbende rør er to år for fællessystemer og et år for separatsystemer, mens gentagelsesperioden for opstuvning til terræn er ti år for fællessystemer og fem år for separatsystemer.

2.2 MIKE URBAN model af projektområde

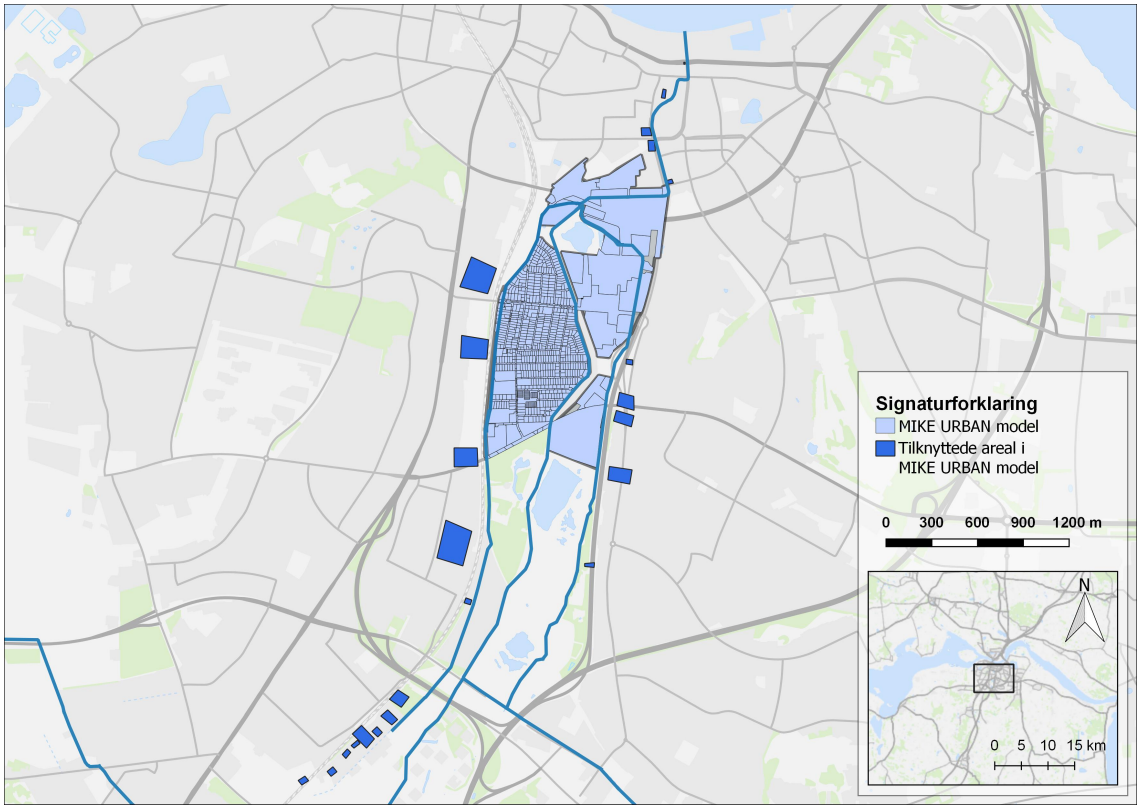
Som baggrund for udarbejdelsen af realtidsmodellen anvendes en kalibreret og valideret MIKE URBAN model, som er udleveret af Aalborg Forsyning og lavet af Envidan og Rasmus Nielsen. Den udleverede model anvender Tid-Areal metoden i MIKE URBAN til at beregne overfladeafstrømningen til afløbssystemet, hvor afstrømningen fra hvert delopland er antaget lineær. Resultaterne fra overfladeafstrømningen anvendes i den hydrodynamiske rørmodel til at beregne vandets strømning i afløbssystemet. Såfremt kapaciteten af systemet opbruges, opstuves vandet fra noderne op i et fiktivt volumen.

Resultaterne fra overfladeafstrømningen anvendes i MIKE FLOOD modellen til at beregne hvordan vandet strømmer i afløbssystemet og på overfladen i en kombineret dynamisk model ved anvendelse af både MIKE URBAN og MIKE 21. Dette betyder, at vandet kan opstuve fra en node, og derefter strømme ned i en anden node efter at have fulgt terrænets hældning. Princippet er vist på figur 2.5, hvor nedbøren lander på overfladen, som derefter afstrømmer ned i afløbssystemet. Hvis kapaciteten i afløbssystemet ikke er tilstrækkelig, vil vandet i afløbssystemet herefter opstuve fra noderne og enten strømme ned i en anden node, eller opmagasineres i en lavning på overfladen. Strømningerne på terræn modelleres i et 10x10 meter grid. Derudover anvendes resultatet fra overfladeafstrømningen i den hydrodynamiske rørmodel, så beregner vandets strømning i afløbssystemet.



Figur 2.5. Princip figur af den hydrodynamiske oversvømmelsesmodel [Dansk Hydraulisk Institut].

Den udleveret MIKE URBAN model af projektområdet er inddelt i 844 deloplande, som dækker over et areal på 130 hektar, hvor 85 hektar er befæstet areal. Derudover indeholder modellen 599 noder og 635 rørledninger, hvor noderne og rørledningerne både anvendes til strømningen af vandet i afløbssystemet og vandløbene. MIKE URBAN modellen af projektområdet er vist på figur 2.6.



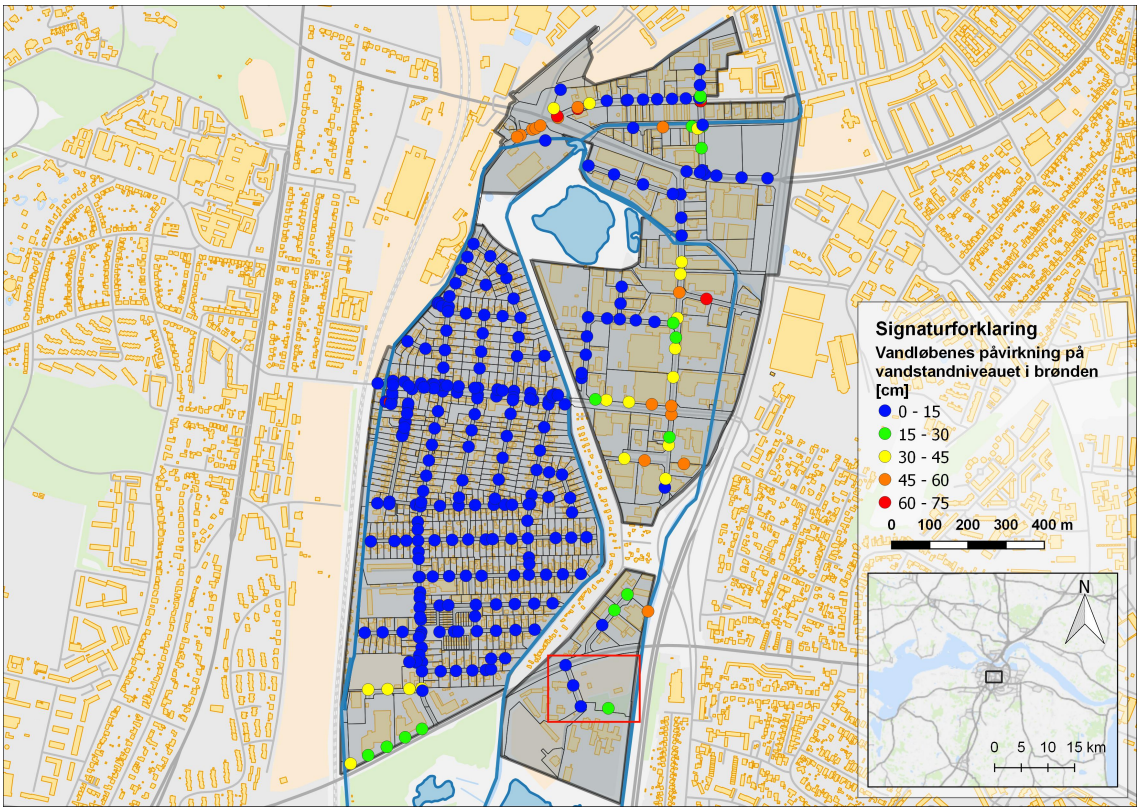
Figur 2.6. Vandløbenes oplande til Vestre -og Østre Landgrøft og Østerå.

Vandløbene omkring projektområderne er koblet til modellen, da de har en indvirkning på afledningen af regnvand/fællesvand. I modellen er vandløbene opdelt i mindre sektioner, hvor hver sektion har en længde på omkring 100 - 200 meter. Der benyttes et konstant baseflow for vandløbene Østre og Vestre Landgrøft i modellen på henholdsvis 0,055 m^3/s og 0,015 m^3/s, mens der for Østerå benyttes en randbetingelse i form af en varierende vandføring. Vandløbene modtager også vand fra de omkringliggende områder, da vandløbene/projektområdet ligger i en lavning, se figur 2.1. Derfor er der i MIKE URBAN modellen tilknyttet 26 deloplande, som samlet dækker over et befæstet areal på 650 hektar, hvilket er syv gange så stort som det befæstede areal i Kærby og Håndværkerkvarteret, se figur 2.3. Der bliver dermed tilført mere vand fra de omkringliggende områder end fra Kærby og Håndværkerkvarteret. Afløbene fra disse områder har en koncentrationenstid på to dage, hvilket dæmper afstrømningen til vandløbene betragteligt.

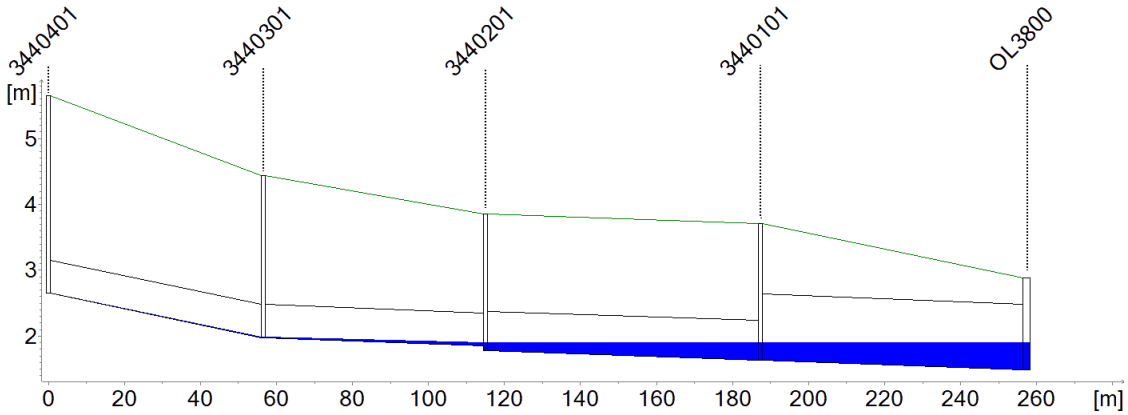
2.3 Forundersøgelse af begyndelsesbetingelser

Der foretages en forundersøgelse af begyndelsesbetingelserne, for at undersøge hvilke, der påvirker projektområdet og dermed skal medtages i oversvømmelsesprognose modellen. Forundersøgelsen foretages på begyndelsesbetingelserne præsenteret på figur 1.1; vandniveauet i vandløbene, havniveau og vandmætning af jorden. Forundersøgelsen af påvirkningen fra vandløbene på Kærby og Håndværkerkvarteret foretages ved at undersøge, om der opstår tilbagestuvning fra vandløbene til afløbssystemet. Undersøgelsen foretages ved anvendelse af MIKE URBAN modellen, hvor der køres en simulering uden regn, således kun vandstanden fra vandløbene kan påvirke systemet. Figur 2.7 viser vandløbenes påvirkning på systemet, hvor det blandt andet fremgår, at der flere steder opstår tilbagestuvning i Håndværkerkvarteret, hvilket skyldes at alt regnvandet udledes til vandløbene via gravitation. I Kærby opstår der kun tilbagestuvning mellem overløbsbygværkerne

og vandløbene, og i det separatkloakeret område i den sydlige del af Kærby. Tilbagestuvning fra vandløbet, Østre Landgrøft, er også vist på figur 2.8, som er et udsnit af afløbssystemet i den sydlige del af Håndværkerkvarteret fra simuleringen i MIKE URBAN modellen (Markeret ved den røde firkant på figur 2.7). På figur 2.8 markerer "OL3800-Østre Landgrøft, mens de fire noder til venstre markerer noderne opstrøms for udløbet. Figuren viser tydeligt, at der opstår tilbagestuvning i systemet.



Figur 2.7. Vandløbenes påvirkning på afløbssystemet. Den røde firkant markerer de noder, som vises som eksempel på tilbagestuvning på figur 2.8.

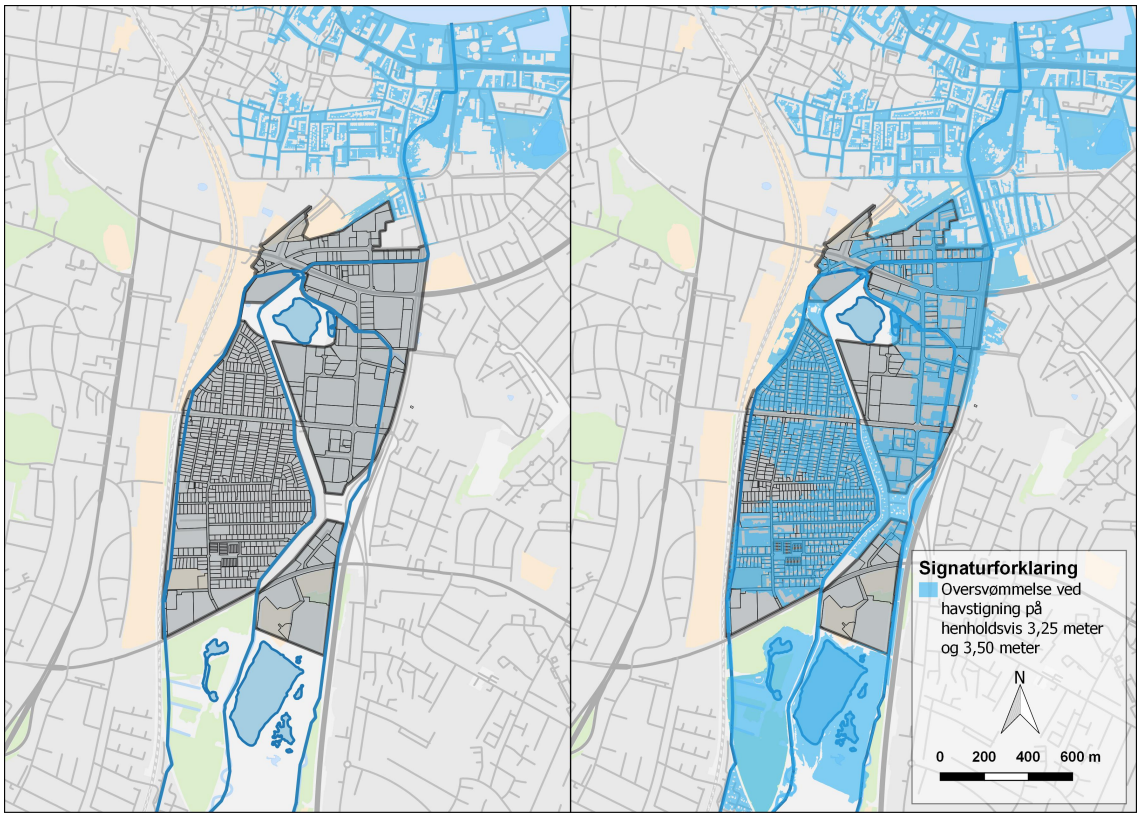


Figur 2.8. Eksempel på tilbagestuvning fra simuleringen i MIKE URBAN modellen.

Som figurene viser, opstår der tilbagestuvning flere stedet i systemet, hvorfor vandløbenes påvirkning medtages i den hydrauliske model.

Forundersøgelsen af påvirkningen fra havniveauet foretages ved at undersøge, hvor meget havniveauet skal stige før projektområdet bliver påvirket. Undersøgelsen er foretaget ved anvendelse

af SCALGO LIVE, som er et online værktøj, der blandt andet kan illustrere risikoen for oversvømmelse ved havstigninger. SCALGO LIVE viser, at havniveauet skal stige over 3,25 meter for at påvirke projektområdet, og derudover vil størstedelen af projektområdet oversvømme ved havstigning på 3,50 meter. SCALGO LIVE viser også, at havniveauet skal stige mere end en meter før det overhovedet vil have en påvirkning på havnefronten. Figur 2.9 viser påvirkningen på projektomtådet ved en havstigning på 3,25 meter og 3,50 meter.



Figur 2.9. Oversvømmelse ved en havstigning på 3,25 meter(venstre) og 3,5 meter (højre).

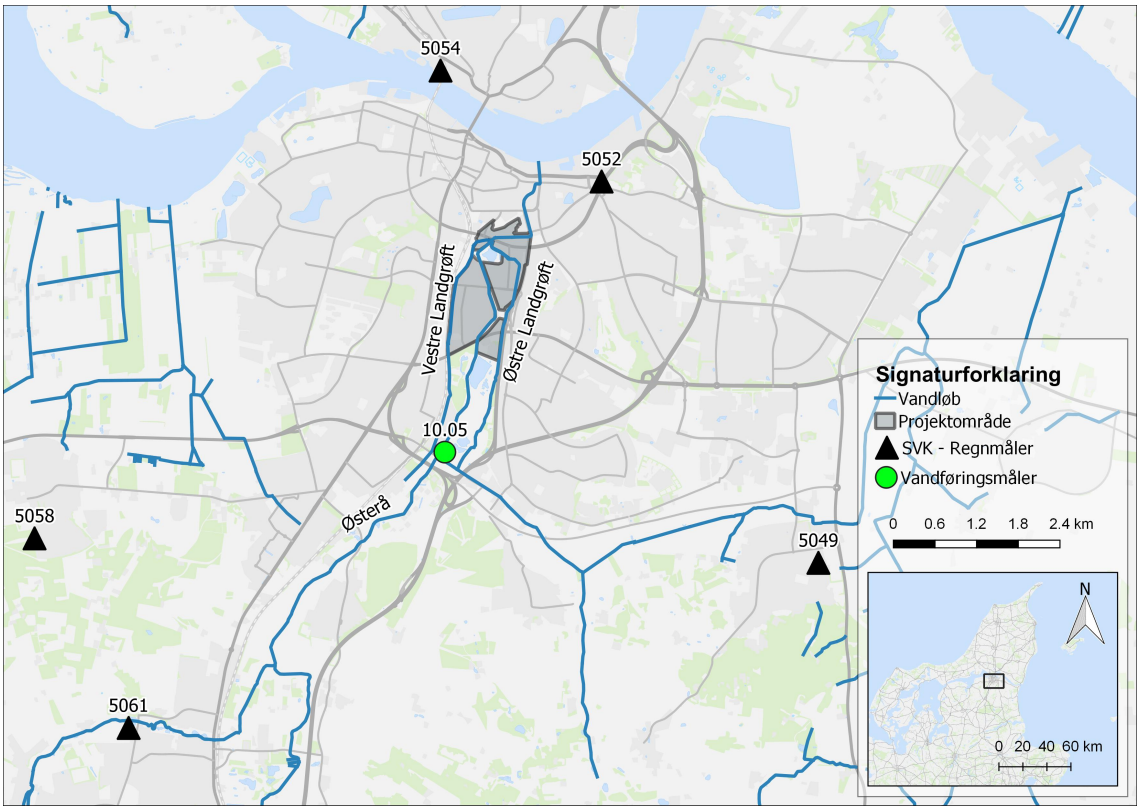
Dermed skal havniveauet stiger mere end 3,25 meter for at påvirke Kærby og Håndværkerkvarteret, og da det ifølge CSIRO [2007] maksimalt stiger 0,8 meter inden 2100, så får det ingen effekt på projektområdet, hvorfor det ikke medtages i oversvømmelsesprognose modellen. Tilbagestuvning kan forekomme, og dermed have en effekt opstrøms i åløbene. Da der er en fisketrappe nord for Kærby, som gør at Østerå falder omkring 30 centimeter, neglicieres tilbagestuvning til Østerå under normale havvandstande. Opstuvningen kan ydermere forekomme i Vestre -og Østre Landgrøft, men dette tages der ikke højde for i modellen.

Betydningen som vandmætning potentielt har på oversvømmelse i projektområdet, er ikke undersøgt i rapporten og medtages derfor ikke som begyndelsesbetingelse i realtidsmodellen.

Input til varslingsmodel 3

I dette kapitel præsenteres nedbørsdata, der anvendes som input i rørmodellen og MIKE FLOOD modellen, således realtidsmodellen kan opbygges på baggrund af præsimulerede resultater. Inputs til realtidsmodellen består dels af begyndelsesbetingelser i systemet, således der kan tages højde for den aktuelle tilstand i systemet, når regnhændelsen rammer og dels nedbør i form af historisk observeret nedbør, samt kunstigt konstrueret nedbør.

Realtidsmodellen består af en MIKE FLOOD model, som via præsimuleringer beregner en maksimalvandstand og udbredelse på terræn og en hydrodynamisk rørmodel, som via præsimuleringer beregner en maksimalvandstand i noderne. Præsimuleringerne skaber grundlaget for den surrogate model, som ud fra et regninput og begyndelsesbetingelser udregner responsen i systemet i realtid. For at opnå mange præsimuleringer, som giver oversvømmelse på terræn, anvendes flere forskellige nedbørsstationer og kunstigt konstruerede regn. Herudover anvendes vandføringen og dermed vandstanden i vandløbene, da dette har betydning på responsen jf. afsnit 2.3. Placeringerne af nedbørsmålere og vandføringsmålere fremgår af figur 3.1.



Figur 3.1. Placering af SVK-målere, samt vandføringsmåler i Østerå.

Der er ikke en SVK-regnmåler i selve modeloplandet. Derfor udvælges de regnstationer der er mest nærliggende for at få et realistisk input i forhold til projektområdet. Betydningen af lokationen af SVK målerne kan i sagens natur neglicieres, da det handler om at opnå et bredt spænd af regnhændelser, for at få et katalog af præsimuleringer, der spænder bredt i forhold til

regnkarakteristika. Endvidere giver de lokale regnstationer det mest realistiske billede af hvordan gængse regnhændelser ser ud i projektområdet.

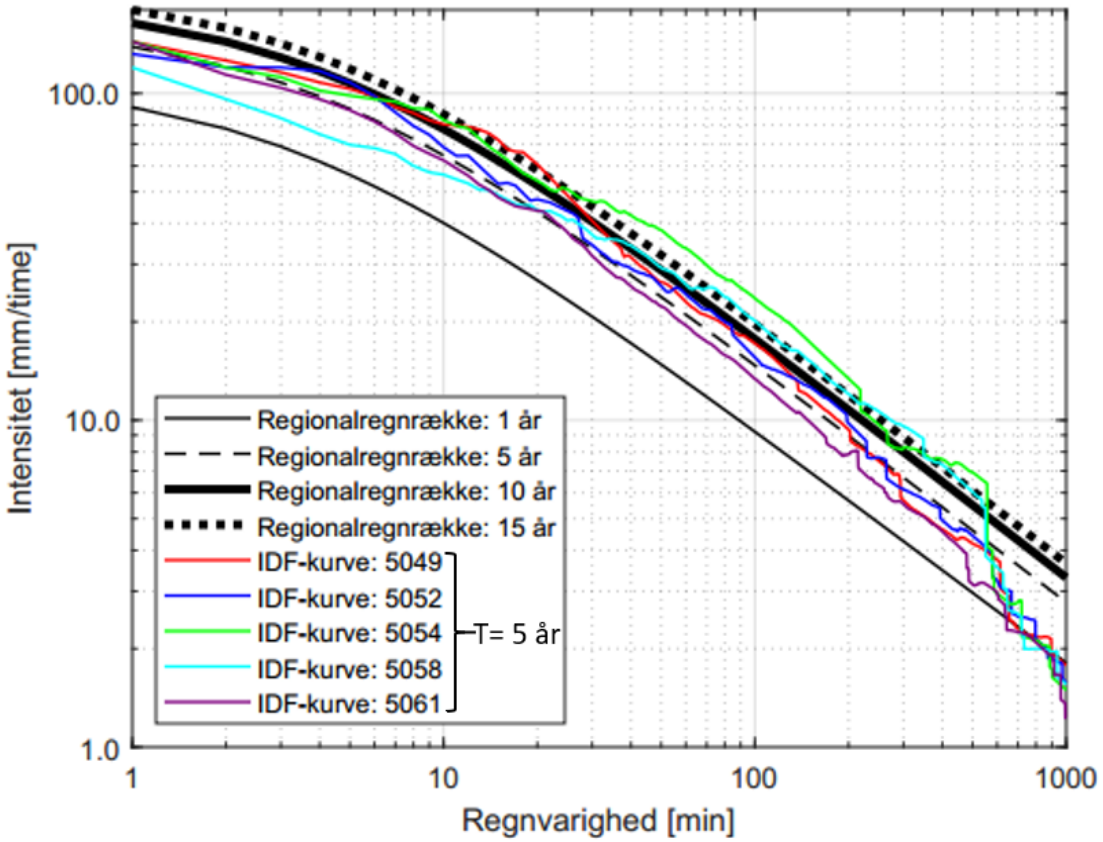
3.1 Historisk nedbør

Der anvendes fire forskellige historiske regnserier til opbygningen af den surrogate model; 5049, 5052, 5054 og 5058. Regnserierne er dannet ved måling af nedbøren i SVK-regnmålere, som blandt andet er opstillet i omegnen omkring Aalborg. SVK-målerne er blevet opstillet i et samarbejde siden 1979 mellem Spildevandskomitéen og Danmarks Meteorologiske Institut, som har sørget for etableringen og vedligeholdelse af et automatisk regnmålersystem på landsdækkende plan [Danmarks Meteorologiske Institut, 2018]. Samarbejdet har indtil videre ført til opstillingen af 145 SVK-målere i Danmark. SVK-Regnmåleren anvender et vippekarsystem, som registrerer en nedbørsmængde hver gang der opstår et vip i vippekaret. Hvert vip indeholder 0,2 mm nedbør og der måles med et minuts mellemrum, hvilket betyder at hvis der er fem vip på et minut, så vil SVK-måleren vise at der er faldet én mm i det pågældende minut. De anvendte historiske regnserier dækker forskellige perioder, da SVK-regnmålerne ikke nødvendigvis hverken er opstillet, eller har målt på samme tidspunkt. Dette betyder blandt andet, at SVK-regnmåler 5061 indeholder et større datasæt, da den har målt siden 1990, hvorimod 5049 kun har målt siden 1999. Tabel 3.1 viser længden af de anvendte historiske regnserier samt deres årsmiddelnedbør.

SVK-måler	**5049**	**5052**	**5054**	**5058**	**5061**
Længde af regnserie [År]	17	27	19	20	30
Årsmiddelnedbør [mm]	576	554	567	565	546

Tabel 3.1. De anvendte regnseriers længder og årsmiddelnedbør.

IDF-kurver for de anvendte historiske regnserier ved en gentagelsesperiode på 5 år og regional regnerækken for gentagelsesperiode på 1, 5, 10 og 15 år er vist på figur 3.2 [Gregersen et al., 2014]. IDF-kurver viser regnhændelsernes middelintensitet i forhold til regnvarighederne og hvor hyppigt de forekommer.



Figur 3.2. IDF-kurver for de fem anvendte historiske regnserier ved en gentagelsesperiode på 5 år og regionalregnerækken for gentagelsesperiode på 1, 5, 10 og 15 år. De fem historiske regnserier anvendes både i den hydrodynamiske rørmodel og MIKE FLOOD.

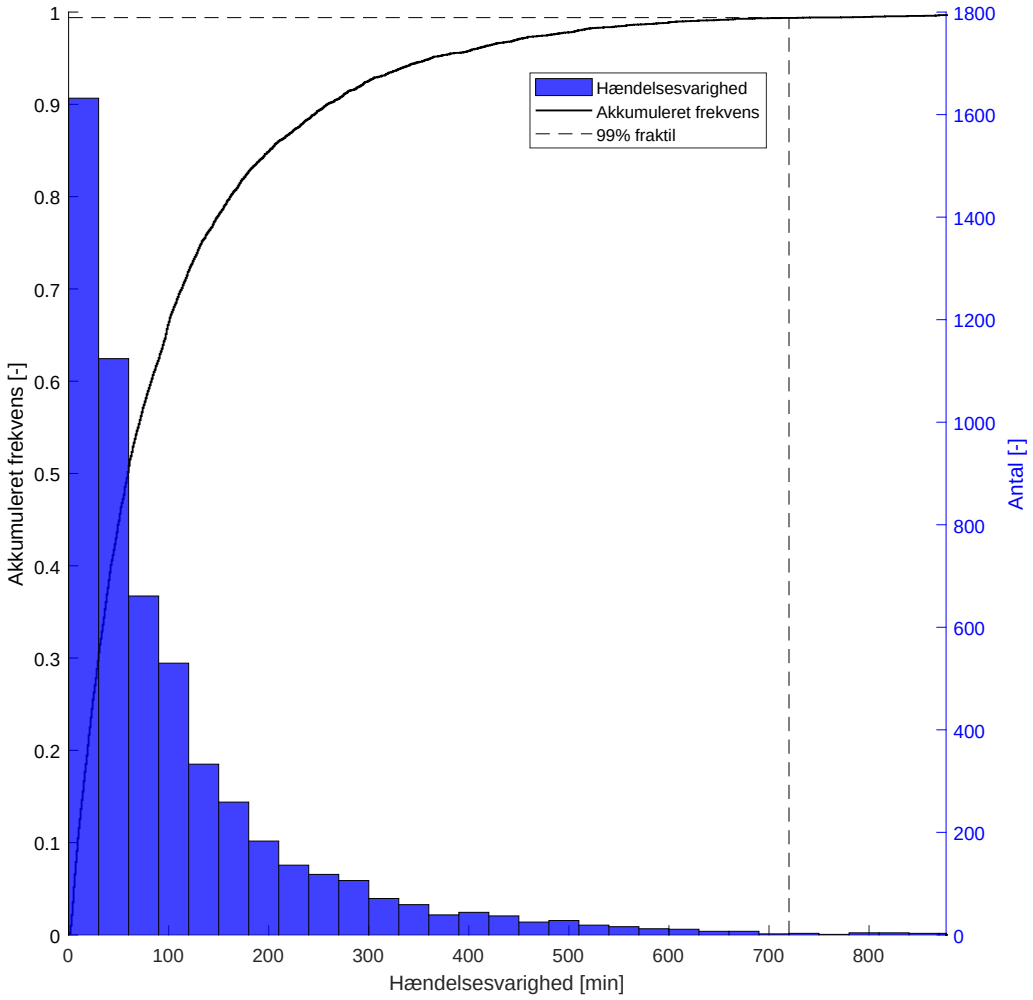
Figur 3.2 viser, at de anvendte historiske regnserier generelt ligger over gentagelsesperioden på 5 år for de regionalregnerækker, især i intervallet 10-300 minutters regnvarighed, hvor SVK-regnmåler 5049, 5054 og 5058 blandt andet ligger over gentagelsesperioden på 15 år for de regionale regnerækker. Dette betyder, at de anvendte historiske regnserier generelt set har højere middelintensiteter i forhold til en regnvarighed end den regionale regnerække.

3.2 Kunstigt konstrueret nedbør

Derudover anvendes kasseregn og CDS-regn til opbygningen af realtidsmodellerne ud fra resultaterne fra den hydrodynamiske rørmodel. Dette gøres for at undersøge kunstigt konstruerede regn kan anvendes i stedet for historiske regnhændelser. Kasseregn og CDS-regn simuleres igennem rørmodellen i MIKE URBAN for at undersøge hvordan resultaterne forholder sig i forhold til resultaterne fra de historiske regnhændelser. Kasseregn og CDS-regn er kunstige konstruerede regnhændelser baseret på region vest regnerækken. Kasseregn opbygges med en konstant regnintensitet under hele hændelsen, hvorfor kasseregn dermed indeholder én regnvarighed svarende til længden af hændelsen. De kunstigt konstruerede CDS-regn har en asymmetri koefficient på 0,5 og stiger dermed i regnintensitet ind mod peaket i midten, hvorefter intensiteten falder. CDS-regn er sammensat af mange kasseregn, således alle regnvarigheder kan gennemregnes på en gang i stedet for at simulere hver regnvarighed igennem en ad gangen.

Kasseregns og CDS-regns hændelsesvarighed opbygges på baggrund af den historiske regnserie

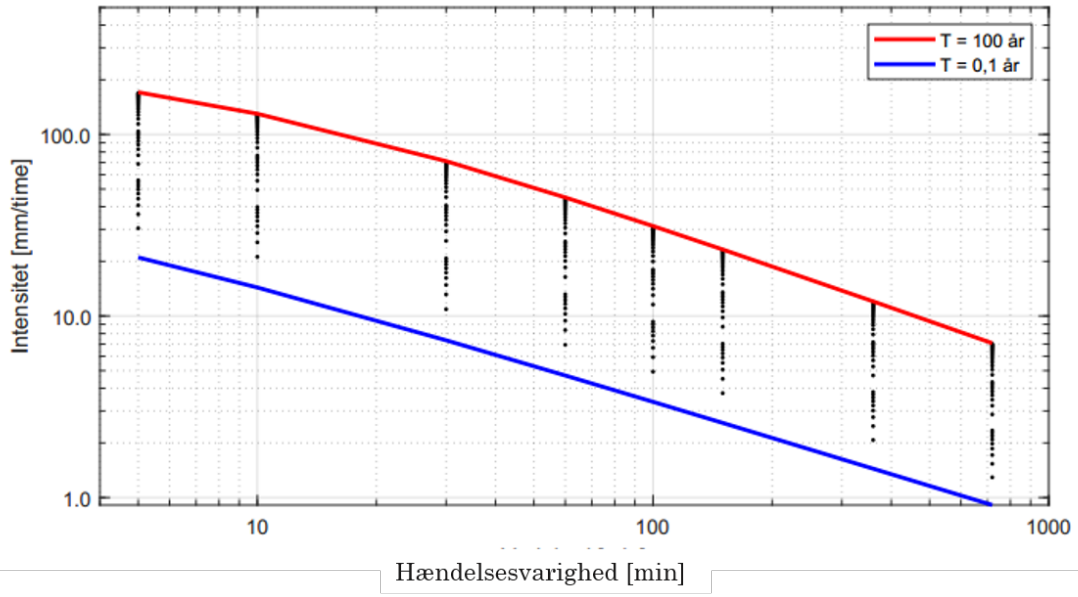
fra SVK regnmåler 5052, for at de repræsenterer virkeligheden på bedste vis i forhold til de regnhændelser, der kan forventes i systemet i virkeligheden. Regnserien er 27 år lang, og indeholder 5517 godkendte regnhændelser. Disse regnhændelser opdeles i hændelsesvarigheder, hvorefter der udarbejdes et histogram over antallet af hændelser, der er observeret til en given hændelsesvarighed, se figur 3.3.



Figur 3.3. Histogram over antallet af regnhændelser med en given hændelsesvarighed for SVK-regnmåler 5052.

Som det fremgår af figur 3.3, er 99% af hændelsesvarighederne mellem 1-720 minutter, hvorfor den øvre grænse for intervallet af hændelsesvarigheder sættes til 12 timer(720 minutter) for kasseregn, mens alle CDS-regn sættes til en hændelsesvarighed på 720 minutter. Intervallet for regnintensiteten bestemmes i forhold til gentagelsesperioden, hvor den øvre grænse sættes til en 100 års hændelse og den nedre til en 0,1 års hændelse. For kasseregn er den mindste hændelsesvarighed 5 minutter, hvorved den maksimale regnintesitet bliver 171,3 mm pr. time for 100 års hændelsen og den mindste regnintensitet ved denne hændelsesvarighed er 21,1 mm pr. time svarende til en 0,1 års hændelse. Figur 3.4 viser de 296 kasseregn, som anvendes til undersøgelsen om kasseregn og CDS-regn kan anvendes i stedet for historiske regnserier til opbyggelsen af

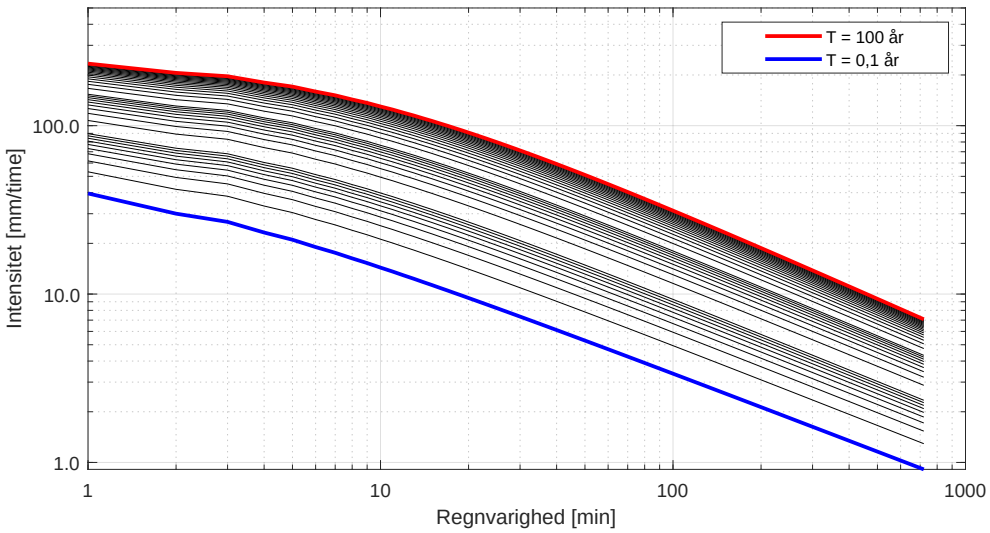
oversvømmelsesprognose modellen.



Figur 3.4. Oversigt over de 296 kasseregn, der anvendes som input i den hydrodynamiske rørmodel.

Figur 3.4 viser, at kasseregn er inddelt i hændelsesvarighederne 5, 10, 30, 60, 100, 150, 360 og 720 minutter. Der er 37 forskellige regnintensiteter fordelt på 8 forskellige hændelsesvarigheder, hvilket samlet giver 296 forskellige kasseregn.

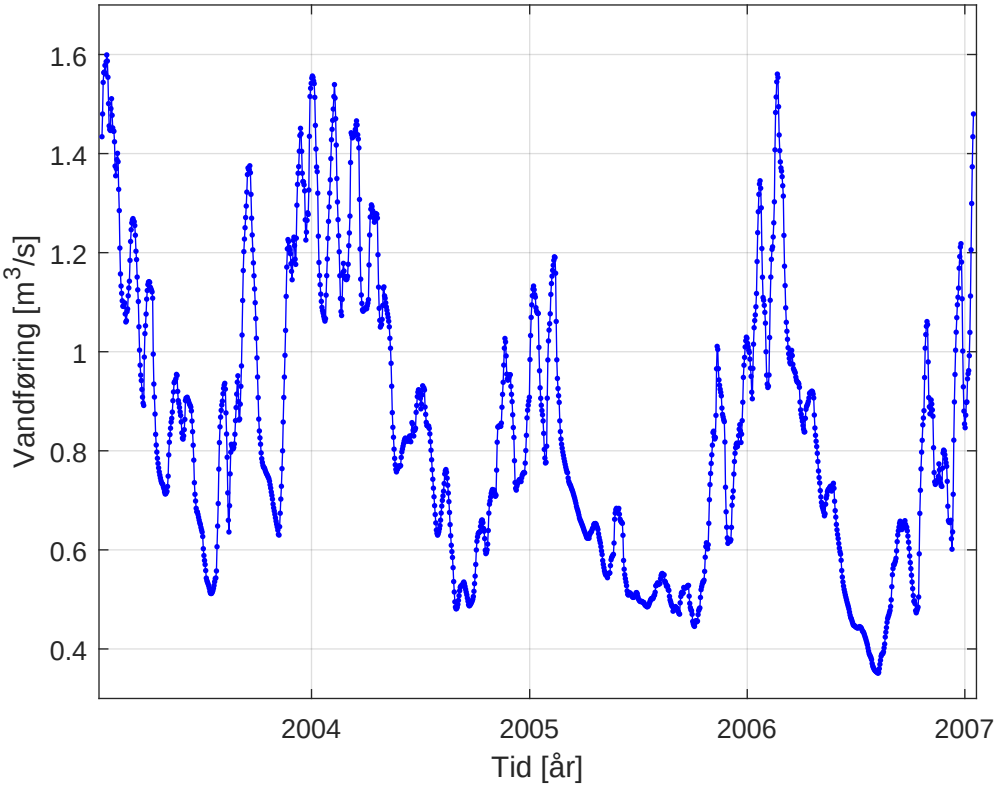
Alle CDS-regn sættes som sagt til en hændelsesvarighed på 720 minutter, hvorved hver CDS-regn indeholder 720 forskellige regnvarigheder og middelintensiteter. For CDS-regn er den mindste regnvarighed 1 minut, hvorved den maksimale regnintesitet bliver 233,6 mm pr. time for 100 års hændelsen og den mindste regnintensitet ved denne regnvarighed er 39,6 mm pr. time svarende til en 0,1 års hændelse. Figur 3.5 viser de 37 CDS-regn, som skal anvendes til undersøgelsen om kasseregn og CDS-regn kan anvendes i stedet for historiske regnserier til opbyggelsen af realtidsmodellen.



Figur 3.5. Oversigt de 37 CDS-regn, der anvendes som input i den hydrodynamiske rørmodel.

3.3 Vandføring i vandløb

Da vandniveauet i vandløbene jf. afsnit 2.3 har en betydning for responsen i modellen, præsenteres vandføringsdataene for vandløbene. Vandføringen i Østre -og Vestre Landgrøft er beskrevet tidligere ved et konstant baseflow på henholdsvis 0,055 m^3/s og 0,015 m^3/s i MIKE URBAN modellen mens vandføringsdataene er varierende i Østerå. Vandføringsdataene på figur 3.6, viser vandføringen i Østerå hver dag mellem år 2003 og 2007. Den maksimale vandføring i Østerå er 1,6 m^3/s, mens den mindste er 0,3 m^3/s. Vandføringen i Østerå er dermed større end vandføringen i både Østre -og Vestre Landgrøft, hvorved Østerå bliver dominerende og dermed styrer vandstanden i vandløbene.

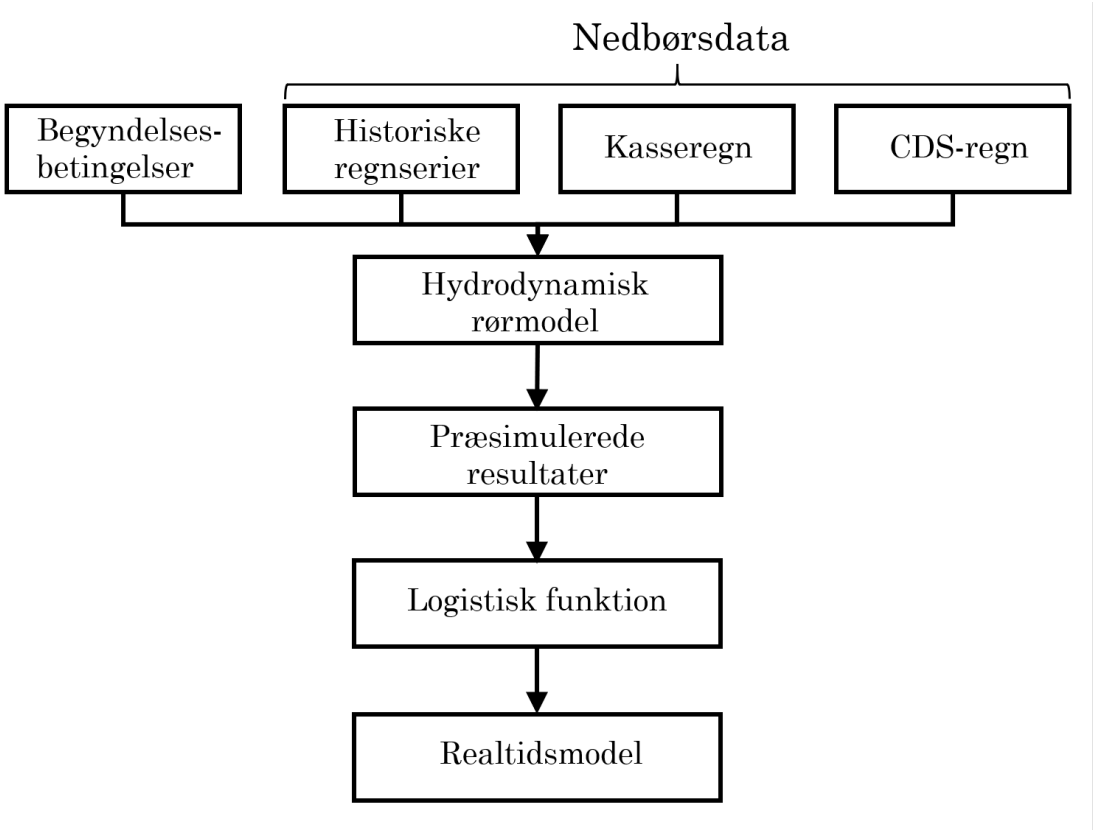


Figur 3.6. Vandføringsdata for Østerå, som anvendes i MIKE URBAN modellen.

For at være i stand til at simulere de historiske hændelser, sættes tidsserien over vandføringen efter hinanden, således vandføringen beskriver alle år, hvor der er observeret nedbør i de anvendte SVK målere. Figur 3.6 viser, at vandføringen generelt er høj om vinter og lav om sommerem, derudover er der en stor variation i vandføringsdataene i løbet af årene.

Del II

Realtidsmodel baseret på resultaterne fra Hydrodynamisk rørmodel

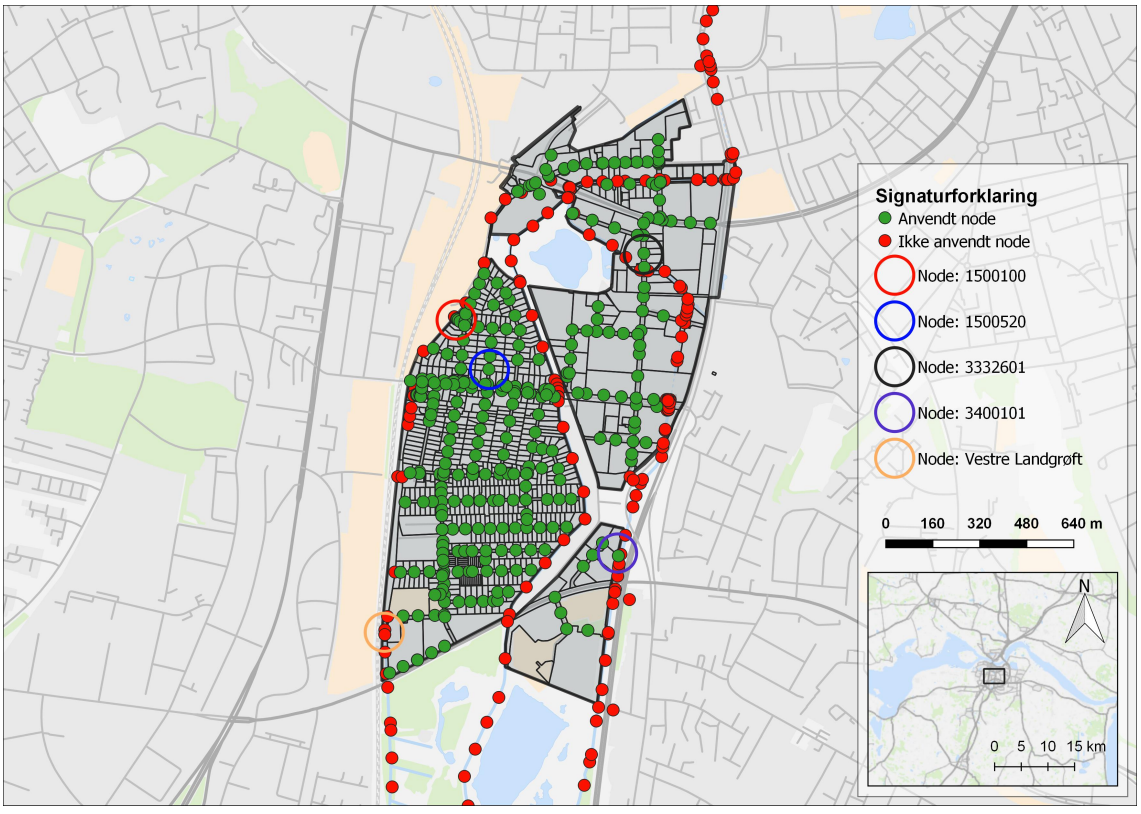


I del II af rapporten simuleres de historiske regnserier, kasseregn, og CDS-regn igennem den hydrodynamiske rørmodel i MIKE URBAN. Herefter analyseres resultaterne for at få en forståelse af afløbssystemet og der udarbejdes en realtidsmodel baseret på resultaterne ved anvendelse af logistisk funktion. Formålet med del II er, at den hydrodynamiske rørmodel skal anvendes til at afprøve konceptet med opbygning af en realtidsmodel baseret på præsimulerede resultater. Derudover er formålet at belyse responsen i systemet ud fra de inputparametre, som anvendes til udarbejdelsen af realtidmodellen. Udover en generel forståelse af systemet, kan det tilmed anvendes til udvælgelsen af de oversvømmelsesgivende regnhændelser, som bliver simuleret i MIKE FLOOD i del III. I rutediagrammet ovenfor fremgår metoden til udarbejdelsen af realtidsmodellen baseret på resultaterne af præsimuleringerne af den hydrodynamiske rørmodel. De præsimulerede resultater af de historiske regnserier, kasseregn, og CDS-regn resulterer i tre realtidsmodeller ved anvendelse af logistisk funktion, hvilke udarbejdes og evalueres i det følgende.

Systemnanalyse af hydrodynamisk rørmodel 4

I dette kapitel foretages en analyse af afløbssystemet, for at få en forståelse af det samt finde sammenhænge imellem vandstandsniveauet i noderne og karakteristika af regnhændelserne. Analysen af afløbssystemet anvendes også til at bestemme hvilke regnhændelser, der skal medtages i terrænmodellen således, at det kun er de regnhændelser, der fører til oversvømmelse, som simuleres igennem MIKE FLOOD modellen.

Analysen af systemet foretages ved anvendelse af rørmodellen i MIKE URBAN, hvor de maksimale vandniveauer i hver node bestemmes ved simulering af hver regnhændelse. De maksimale vandniveauer bestemmes kun for noderne i selve afløbssystemet i MIKE URBAN modellen, hvorfor det kun bestemmes for 310 ud af 599 noder. De resterende noder forbinder de åbne rørledninger, som agerer vandløb i modellen. Figur 4.1 viser de 310 noder i MIKE URBAN modellen, hvor det maksimale vandniveau bestemmes ved hver regnhændelse. Denne model tager således ikke højde for oversvømmelse via vandløbene, men kun vandløbenes påvirkning på afløbssystemet, hvorfra vandet kan opstuve til terræn.

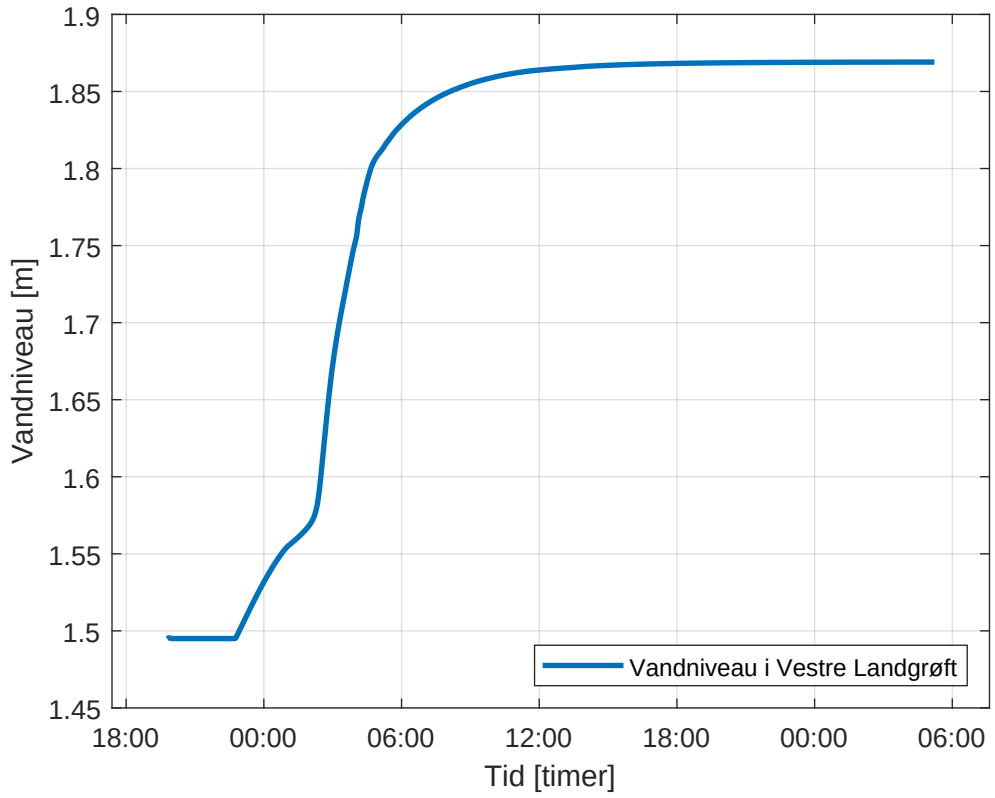


Figur 4.1. De 310 noder(markeret med grøn), hvor det maksimale vandniveau bestemmes og resten af noderne(markeret med rød), hvor det ikke bestemmes. Derudover er de noder, som anvendes til at vise responsen fra rørmodellen i MIKE URBAN markeret.

De fem markerede noder på figur 4.1, anvendes i dette kapitel til at vise responsen fra rørmodellen i MIKE URBAN.

4.1 Påvirkning fra vandløb

Det blev i afsnit 2.3 vist, at vandniveauet i vandløbene påvirker afløbssystemet, da der sker tilbagestuvning. Men for at MIKE URBAN modellen tager højde for dette, skal der anvendes en begyndelsesbetingelse i simuleringerne, således vandløbene er fyldt ved simuleringsstart. Dette skyldes, at det tager over 24 timer for at vandniveauet i vandløbene stabiliserer i MIKE URBAN modellen, hvorfor vandløbene under de korte regnhændelser, ikke stabiliserer og dermed ikke giver opstuvning i afløbssystemet. Figur 4.2 viser tidserien for en node i den sydlige del af Vestre Landgrøft(markeret ved orange cirkel på figur 4.1), hvor der er kørt en simulering uden regn. Figuren viser, at det tager over 24 timer før vandniveauet er stabiliseret i denne node.



Figur 4.2. Tidserie for en node i den sydlige del af Vestre Landgrøft, hvor der er kørt en simulering uden regn igennem MIKE URBAN modellen.

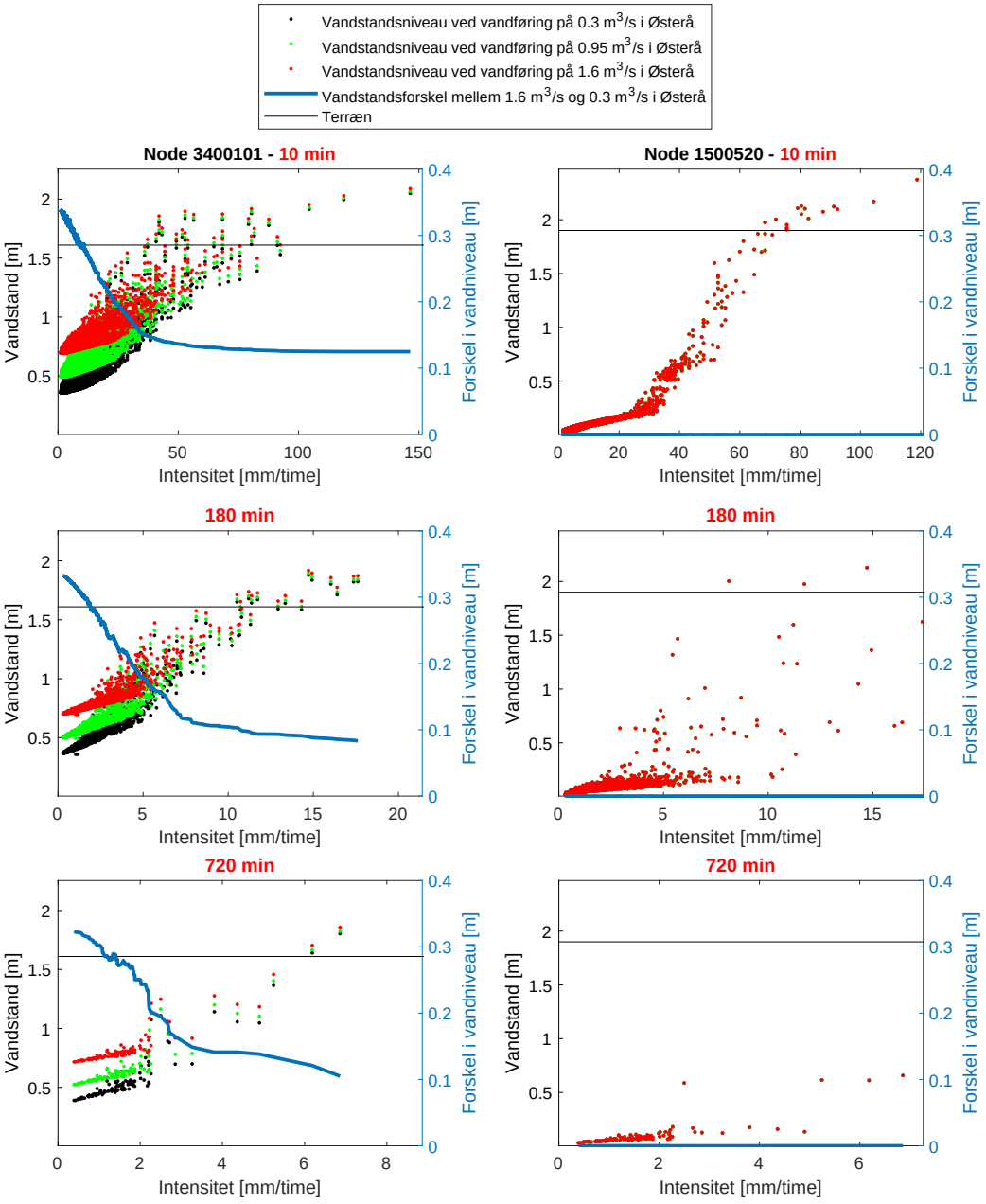
Da vandføringen varierer i Østerå jf. afsnit 3.3, anvendes tre forskellige begyndelsesbetingelser i MIKE URBAN modellen, således der tages højde for høje og lave vandføringer i Østerå. De tre begyndelsesbetingelser anvender den mindste, middel og største vandføring jf. vandføringsdataene i Østerå. Den maksimale vandføring er 1,6 m^3/s, mens middelvandføringen er 0,95m^3/s og den mindste vandføring er 0,3 m^3/s. De tre begyndelsesbetingelser anvendes herefter som simuleringsstart sammen med de historiske -og de kunstigt konstruerede regnserier i rørmodellen i MIKE URBAN, hvor de maksimale vandniveauer bestemmes for de 310 noder i afløbssystemet.

4.2 Databehandling af resultater fra historiske nedbør

Databehandlingen udføres ved at simulere fire historiske regnserier igennem rørmodellen i MIKE URBAN og analysere resultaterne. De fire historiske regnserier er SVK; 5049, 5052, 5054 og

5058.

Figur 4.3 viser de maksimale vandniveauer for node 3400101 og 1500520 for de historiske regnserier ved regnvarighederne 10, 180 og 720 minutter ved de tre anvendte begyndelsesbetingelser. Node 3400101 er beliggende i den sydlige del af Håndværkerkvarteret og markeret med lilla cirkel på figur 4.1. Node 1500520 er beliggende i den nordlige del af Kærby og markeret med blå cirkel på figur 4.1. Såfremt en hændelsesvarghed for en given regnhændelse er kortere end den anviste regnvarighed på figur 4.3, indgår denne historiske hændelse ikke på figuren.

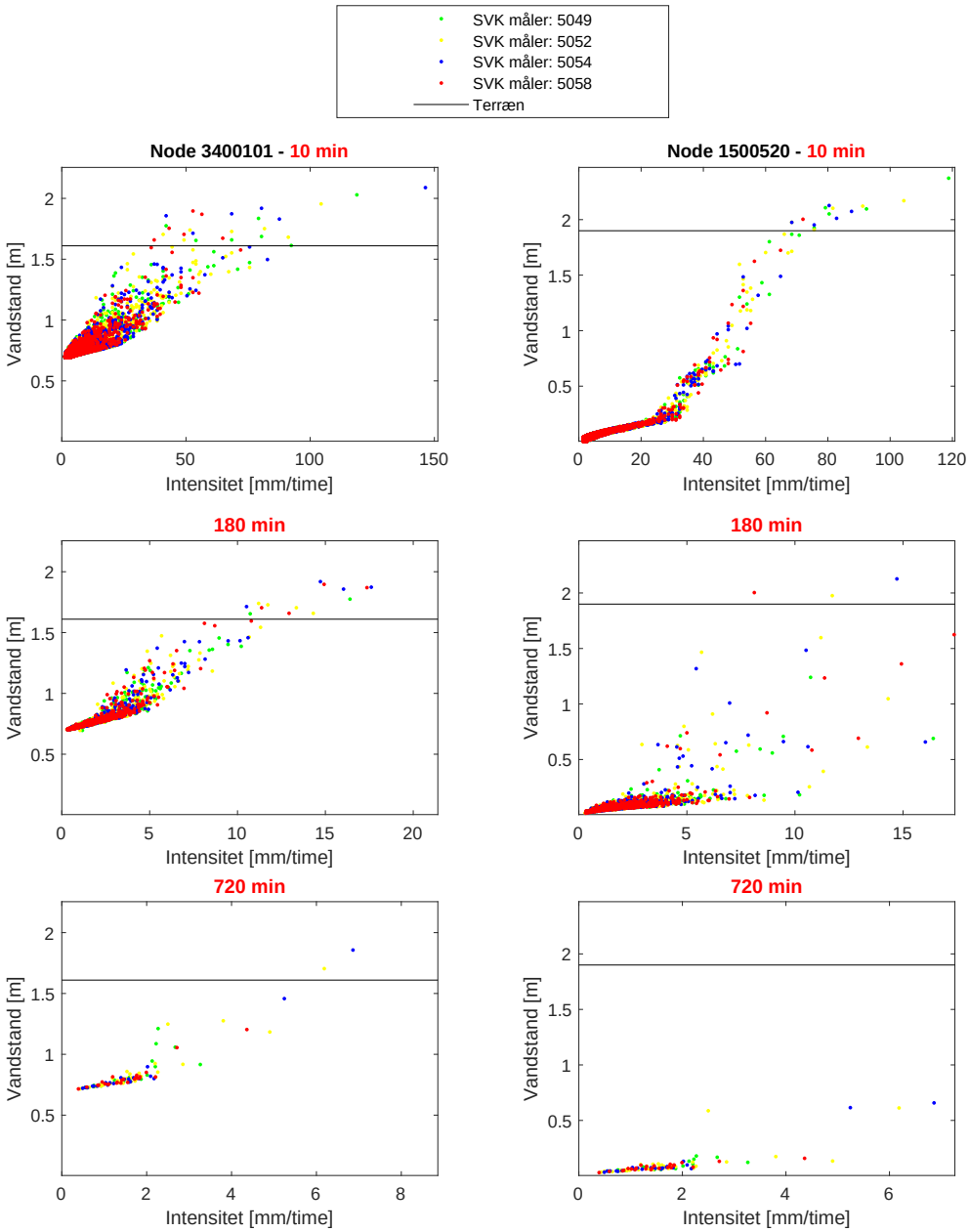


Figur 4.3. Vandstandsniveauer i node 3400101 og 1500520 ved tre forskellige regnvarigheder og 4 forskellige inputs i form af historiske regnserier. Node 3400101 er beliggende i sydlige del af Håndværkerkvarteret og node 1500520 er beliggende i nordlige del af Kærby. Node 3400101 er markeret med lilla cirkel på figur 4.1 og Node 150520 er markeret med blå cirkel på figur 4.1.

Figur 4.3 viser, at noden beliggende i den sydlige del af Håndværkerkvarteret påvirkes af den

varierende vandføring i Østerå, mens noden i den nordlige del af Kærby ikke bliver påvirket. Påvirkningen fremgår specielt ved lavintense regnhændelser, hvor der for node 3400101 er en forskel på 35 centimeter for de tre viste regnvarigheder. Forskellen er derimod mindre ved højintense regnhændelser, hvor der er omkring ti centimeter for den valgte node. Den mindre forskel ved højintense regnhændelser skyldes, at regnhændelser bliver mere dominerende i systemet, og styrer dermed vandniveauerne i noderne i højere grad end opstuvningen fra vandløbet. Node 1500520 påvirkes som nævnt ikke, hvilket skyldes, at der ikke er et direkte udløb til vandløbene, hvorved vandføringen i vandløbene ikke påvirker vandstandsniveuaet i noden.

Figur 4.3 viser også, at vandniveauerne i noderne stiger i forhold til middelintensiteten ved specifikke regnvarigheder for alle de anvendte historiske regnserier, men vandniveauerne er sporadiske, hvilket skyldes den varierende regnkaristika for de forskellige historiske regnhændelser. Dette illustreres også ved figur 4.4, som viser responsen fra de samme noder, hvor der kun indgår begyndelsesbetingelser med vandføringen på 1,6 m^3/s i Østerå. Denne figur viser også, at regnhændelserne fra de anvendte SVK målere følger hinanden, og der dermed er en sammenhæng mellem middelintensiteten ved en specifik regnvarighed og vandstandsniveauet i noden.



Figur 4.4. Vandstandsniveauer i node 3400101 og 1500520 ved tre forskellige regnvarigheder og 4 forskellige inputs i form historiske regnserier. Node 3400101 er beliggende i sydlige del af Håndværkerkvarteret og node 1500520 er beliggende i nordlige del af Kærby. Node 3400101 er markeret med lilla cirkel på figur 4.1 og Node 150520 er markeret med blå cirkel på figur 4.1.

Resultaterne ved simuleringen med de historiske regnserier 5049, 5052, 5054 og 5058, hvor de tre forskellige begyndelsesbetingelser anvendes, vises i tabel 4.1, tabel 4.2 og tabel 4.3. Tabellerne viser, at 5049 og 5054 oversvømmer omkring halvdelen af noderne i projektområdet, mens 5058 og 5052 kun oversvømmer omkring 25% af noderne. Derudover viser tabellen, at omkring 5-8% af alle regnhændelser ved alle begyndelsesbetingelser fører til opstuvning. Ved en begyndelsesbetingelse på 1,6 m^3/s har 5054 den største procentdel af oversvømmelsesgivende hændelser med 7,4%, mens 5058 har den laveste med 6,1%.

SVK-måler	**5049**	**5052**	**5054**	**5058**	**Samlet**
Antal regnhændelser i regnserie [-]	3.637	5.517	3.832	3.968	16.954
Oversvømmende regnhændelser [-]	197	287	215	187	886
Procentdel af oversvømmende regnhændelser [%]	5,4	5,2	5,6	4,7	5,2
Antal af oversvømmende noder [-]	140	89	128	70	
Procentdel af oversvømmende noder [%]	45,2	28,7	41,3	22,6	

Tabel 4.1. Antal oversvømmede noder og regnhændelser for de anvendte historiske regnserier ved en vandføring på 0,3 m^3/s i Østerå.

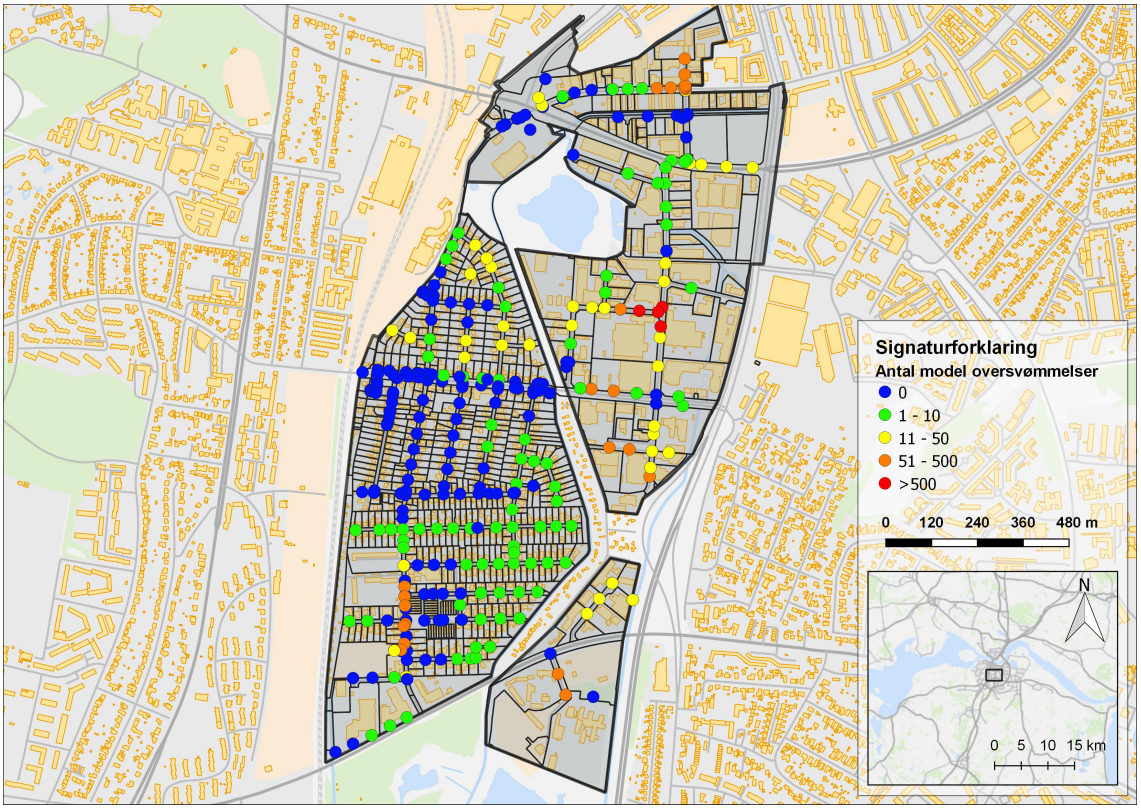
SVK-måler	**5049**	**5052**	**5054**	**5058**	**Samlet**
Antal regnhændelser i regnserie [-]	3.637	5.517	3.832	3.968	16.954
Oversvømmet regnhændelser [-]	219	318	241	208	986
Procentdel af oversvømmende regnhændelser [%]	6,1	5,7	6,3	5,2	5,8
Antal af oversvømmende noder [-]	142	92	133	71	
Procentdel af oversvømmende noder [%]	45,8	29,7	42,9	22,9	

Tabel 4.2. Antal oversvømmede noder og regnhændelser for de anvendte historiske regnserier ved en vandføring på 0,95 m^3/s i Østerå.

SVK-måler	**5049**	**5052**	**5054**	**5058**	**Samlet**
Antal regnhændelser i regnserie [-]	3.637	5.517	3.832	3.968	16.954
Oversvømmende regnhændelser [-]	253	364	285	242	1.144
Procentdel af oversvømmende regnhændelser [%]	6,9	6,6	7,4	6,1	6,7
Antal af oversvømmende noder [-]	144	93	133	71	
Procentdel af oversvømmende noder [%]	46,5	30	42,9	22,9	

Tabel 4.3. Antal oversvømmede noder og regnhændelser for de anvendte historiske regnserier ved en vandføring på 1,6 m^3/s i Østerå.

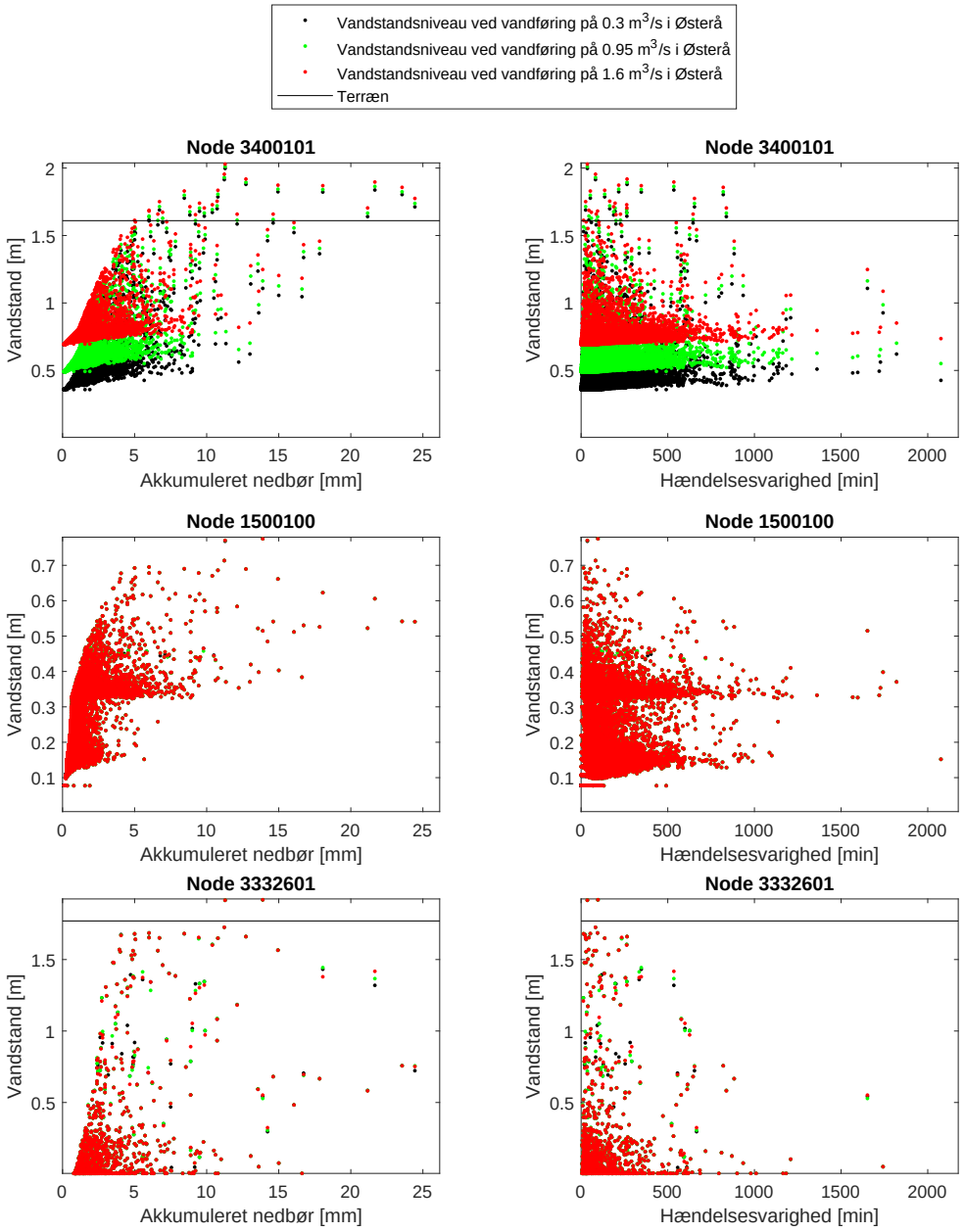
Den større procentdel af noder, som oversvømmer ved de historiske regnserier 5049 og 5054 end ved de to andre regnserier skyldes, at 5049 og 5054 indeholder regnhændelser, hvor den maksimale regnintensitet er meget højere end regnintensiteterne i de andre regnserier. Størstedelen af de oversvømmede regnhændelser skyldes fire noder i den centrale del af Håndværkerkvarteret, se figur 4.5, da de hver oversvømmer hhv. 1144, 1096, 1090 og 907 ud af de 1144 oversvømmelsesgivende regnhændelser. Dette område oversvømmes typisk under ekstremregn og er det samme område, som ses oversvømmet på figur 2.2 i afsnit 2. Den node, der oversvømmer femte mest, oversvømmer 288 gange, hvilket er omkring 25% af det samlede antal oversvømmelsesgivende regnhændelser. Derudover oversvømmer 27% af noderne kun mellem en til ti gange, og 50% af noderne i projektområdet oversvømmer slet ikke ved simulering af rørmodellen i MIKE URBAN med de fire historiske regnserier som input. Figur 4.5 viser hvilke noder, der oversvømmer ved de historiske regnserier ved begyndelsesbetingelsen med vandføring på 1,6 m^3/s i Østerå. Derudover viser figuren, hvor mange gange hver node oversvømmer i løbet af de historiske regnhændelser.



Figur 4.5. Oversvømmede noder ved de historiske regnserier 5049, 5052, 5054 og 5058.

Figur 4.5 viser, at der er flere noder, der oversvømmer i Håndværkerkvarteret end i Kærby og noderne oversvømmer også oftere i Håndværkerkvarteret end Kærby. De regnhændelser, der resulterer i opstuvning, anvendes i kapitel 7 til udarbejdelsen af en realtidsmodel ved hjælp af MIKE FLOOD modellen.

Udover at undersøge de maksimale vandniveauer i forhold til middelintensiteterne for de forskellige regnvarigheder, undersøges sammenhængen mellem de maksimale vandniveauer og hændelsvarighed, samt den akkumuleret nedbør i regnhændelsen, se figur 4.6.



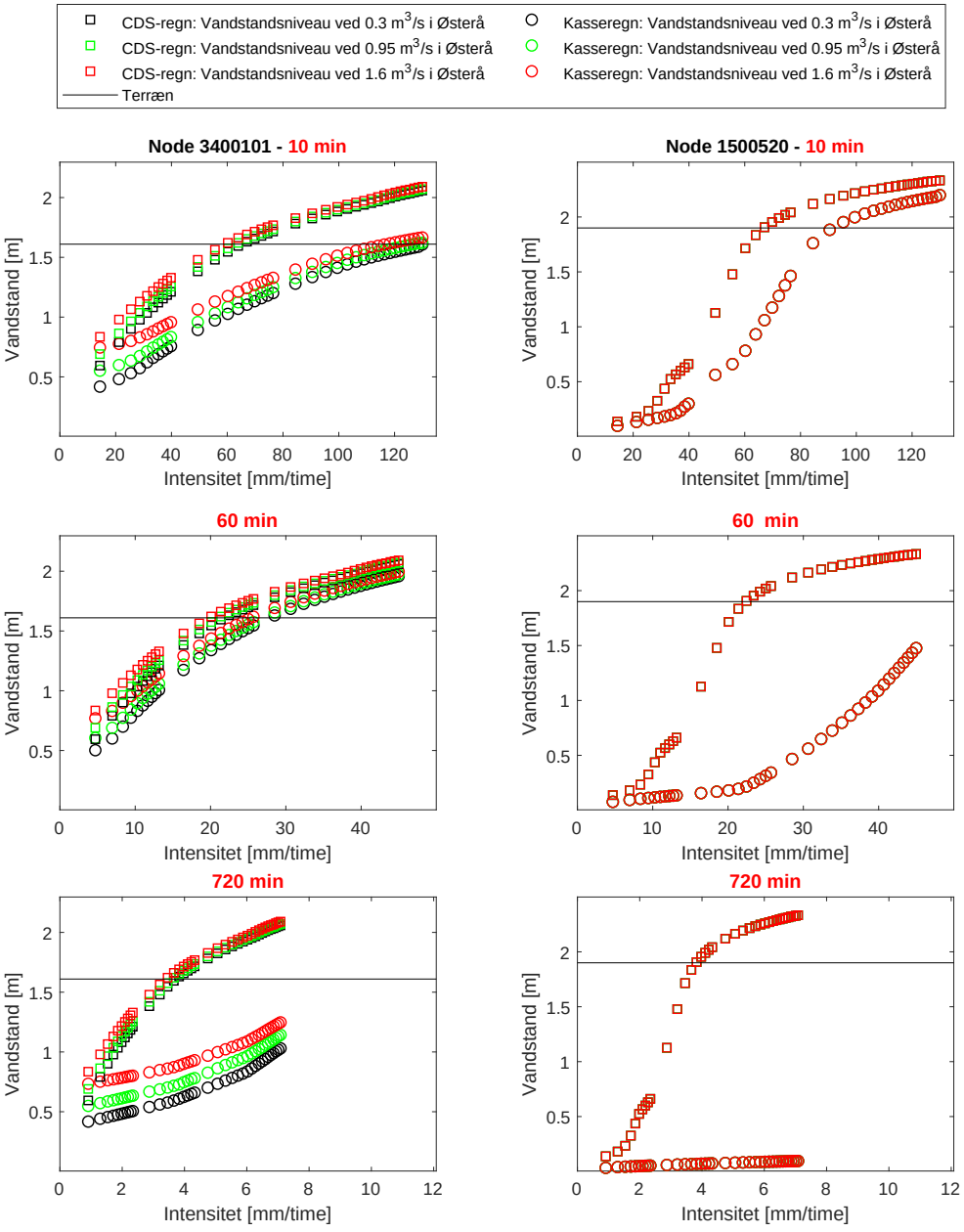
Figur 4.6. Vandstandsniveauer i node 3400101, node 1500100 og node 3332601 i forhold til akkumuleret nedbør i regnhændelsen og hændelsesvarigheden. Node 3400101 er beliggende i den sydlige del af Håndværkerkvarteret, node 1500100 er beliggende i den nordlige del af Kærby og 3332601 er beliggende i den nordlige del af Håndværkerkvarteret. Node 3440101 er markeret med lilla cirkel på figur 4.1, og terrænkoten er 3,13. Node 1500100 er markeret med rød cirkel på figur 4.1. Node 3332601 er markeret med sort cirkel på figur 4.1.

Figur 4.6 viser, at vandstandsniveauet i noderne stiger i forhold til den akkumuleret nedbør i en regnhændelse, men det er mere sporadisk end ved at korrelere vandniveauet til middelintensiteten. Figuren viser også, at der er en dårlig sammenhæng mellem vandstandsniveauet i noderne og hændelsvarigheden, hvor alle hændelsesvarigheder resulterer i både store og små vandstandsniveauer. Hvis node 1500100 betragtes, ser det ud til, at der opstår noget dynamik i systemet, som afspejles i vandniveauet i forhold til akkumuleret nedbør og hændelsesvarigheder for de respektive regnhændelser. Denne dynamik skyldes i dette tilfælde, at noden er placeret tæt ved et overløbsbygværk, hvor overløbskanten er placeret svarende til 0,3 meter over bunden af noden. Der er således en del

dynamik i systemet, hvilket medtages i præsimuleringerne.

4.3 Databehandling af resultater fra kunstigt konstruerede nedbør

Udover de historiske regnserier, er de kunstigt konstruerede regnserier også simuleret igennem rørmodellen i MIKE URBAN. De maksimale vandstandsniveauer for kasseregn og CDS-regn er vist på figur 4.7 ved regnvarighederne på henholdsvis 10, 60 og 720 minutter.



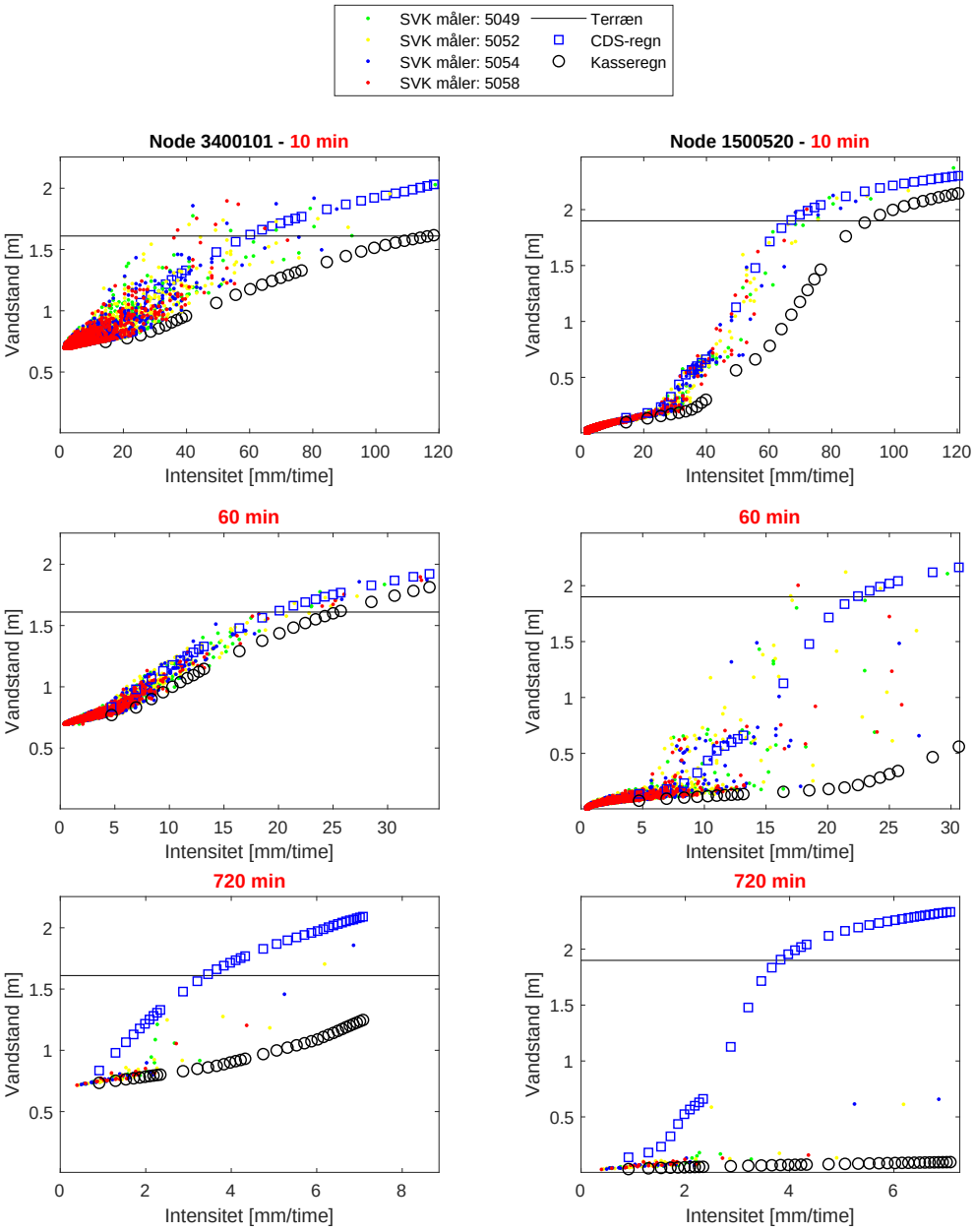
Figur 4.7. Vandstandsniveauer i node 3400101 og 1500520 ved tre forskellige regnvarigheder bestemt udfra CDS-regn og kasseregn. Node 3400101 er beliggende i sydlige del af Håndværkerkvarteret og node 1500520 er beliggende i nordlige del af Kærby.

Figur 4.7 viser, at selvom CDS-regn og kasseregn indeholder de samme regnintensiteter, så er vandstandsniveauerne bestemt ved CDS-regnene højere end vandstandsniveauerne bestemt ved kasseregn. Dette kan skyldes, at noderne i afløbssytemet fyldes op ved CDS-regn, da alle CDS-

regn har en hændelsesvarighed på 720 minutter og derfor indeholder større akkumuleret nedbør. Samtidig kan CDS-regn resultere i højere vandstandsniveauer, da den indeholder alle regnvarigehder. Derudover viser figuren, at forskellen mellem CDS-regn og kasseregn er størst ved regnvarigheden på 720 minutter, hvilket skyldes at de udvalgte noder er mere følsomme overfor korte højintense regnvarigheder i forhold lange lavintense regnvarigheder. Vandstandsniveauerne for node 1500520 påvirkes som nævnt ikke af vandløbene, hvorfor regnhændelserne til de tre begyndelsesbetingelser giver samme respons. Det fremgår også af figur 4.7, at node 3400101 er mere kritisk overfor middelintensiteter ved en regnvarighed på 60 minutter, da vandstandsniveauerne bestemt ved kasseregn er højest ved denne regnvarighed. Node 1500520 er derimod kritisk ved en regnvarighed på 10 minutter. Dette skyldes, at node 1500520 er placeret i det nordlige Kærby hvor ledningsnsdimensionerne er omkring 0,2m, hvilket skaber en flaskehals opstrøms i systemet ved en kort højintens regnhændelse. Node 3400101 er derimod placeret i det sydlige Håndværkerkvarter, hvor ledningerne har dimensioner omkring 0,5-1m, hvilket betyder, at der skal længere regnvarigheder og dermed større regndybde til, før der opstår en flaskehals i systemet.

4.4 Sammenligning af resultater fra historiske nedbør og kunstigt konstruerede nedbør

Figur 4.8 viser vandstandsniveauerne for CDS-regn og kasseregn i forhold til vandstandsniveauerne bestemt ved de historiske regnserier; 5049, 5052, 5054 og 5058 ved vandføringen på 1,6 m^3/s i Østerå.



Figur 4.8. Vandstandsniveauer i node 3400101 og 1500520 ved tre forskellige regnvarigheder bestemt udfra de historiske regnserier, CDS-regn og kasseregn. Node 3400101 er beliggende i sydlige del af Håndværkerkvarteret og node 1500520 er beliggende i nordlige del af Kærby.

Figur 4.8 viser, at CDS-regn agerer maksimum for størstedelen af vandstandsniveauerne, mens kasseregn agerer minimum. Vandstandsniveauer bestemt ved de historiske regnserier ligger generelt mellem CDS-regn og kasseregene. Det fremgår, at vandstandsniveauerne bestemt ved CDS-regn og kasseregn stemmer bedst overens med responsen for de historiske regnhændelser ved de

regnvarigheder, som er mest kritiske for noderne. Hér vist ved regnvarigheder på 60 minutter og 10 minutter for node 3400101 og 1500520 henholdsvis.

Generelt kan det konkluderes, at den bedste sammenhæng i forhold til vandniveauet er middelintensiteter over forskellige regnvarigheder i forskellige noder. Både akkumuleret nedbør og hændelsesvarighed har vist en relativ dårlig sammenhæng i forhold til vandniveauet i noderne. Derudover viste resultaterne at CDS-regn og kasseregn er bedst korreleret med historiske regnserier ved middelintensiteter over de kritiske regnvarigheder, hvilket er forskelligt fra node til node. Der er imidlertid nogle noder, som grundet opstrøms bygværker, pumper eller andet, som gør responsen mindre korrellerbar overfor middelintensiteter eller andre regnkarakteristika. Denne dynamik i systemet medtages i realtidsmodellerne, hvormed disse er i stand til at tage højde for netop denne dynamik og kompleksitet i systemet.

Realtidsmodel - Logistisk funktion 5

I dette kapitel opstilles en realtidsmodel ved anvendelse af de præsimulerede resultater fra rørmodellen i en logistisk funktion. Realtidsmodellen er baseret på de historiske regnserier og opstilles kun på baggrund af resultaterne ved en vandføring på 1,6 m^3/s i Østerå. Der udarbejdes logistiske funktioner for de noder, der opstuver i kapitel 4. Appendiks A og B viser opstillingen af realtidsmodellerne for henholdsvis kasseregn og CDS-regn. De logistiske funktioner for historiske regnserier, kasseregn og CDS-regn sammenlignes i delkonklusionen i kapitel 6. Først udarbejdes og evalueres realtidsmodellen baseret på logistiske funktioner med baggrund i præsimuleringer af historisk nedbør.

5.1 Opbygning af logistiske funktioner

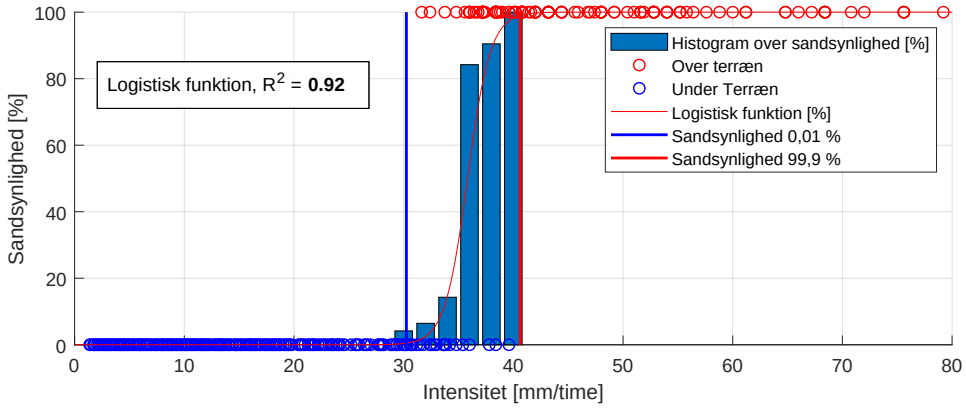
Logistisk funktion er en funktion, som er kendetegnet ved, at den har et minimum og et maksimum som den stiger imod, hvilket i dette tilfælde er nul og et. Funktionen stiger til at starte med, som en eksponentiel funktion, og flader derefter ud jo mere den nærmere sig maksimum. Den logistiske funktion bestemmes for resultaterne fra den hydrodynamiske rørmodel ved anvendelse af ligning 5.1, hvor Matlab bestemmer værdien a og b ved metoden "Fitglm".

$$P(x) = \frac{e^{a \cdot x + b}}{e^{a \cdot x + b} + 1} \tag{5.1}$$

hvor:

P	Sandsynlighed [%]
x	Uafhængig variabel [-]
a	Konstant bestemt af Matlab [-]
b	Konstant bestemt af Matlab [-]

Resultaterne fra den hydrodynamiske rørmodel for de historiske regnserier opdeles i over eller under terræn, således vandniveauer omdannes til enten 1 (over terræn) eller 0 (under terræn). Resultaterne plottes i forhold til en middelintensitet for en given regnvarighed, da vandstandsniveauet i noderne viste den bedste sammenhæng i forhold middelintensiteten jf. kapitel 4. Derefter bestemmes en logistisk funktion i forhold til resultaterne ved anvendelse af ligning 5.1, hvor middelintensiteten er den uafhængige variabel, x. Den logisktiske funktion viser sandsynligheden for opstuvning og er vist på figur 5.1 i forhold til middelintensiteten ved en regnvarighed på 10 minutter for node 3440301.



Figur 5.1. Sandsynligheden for opstuvning i node 3440201 bestemt ved logistisk funktion. Node 3440201 er beliggende i den sydlige del af Håndværkerkvarteret.

Figur 5.1 viser, at der med 99,9% sandsynlighed vil opstuve vand fra noden, hvis en regnhændelse har en middelintensitet ved en regnvarighed på10 minutter på over 40 mm pr. time. Herudover er der 0,01% sandsynlighed for opstuvning, hvis en regnhændelse har en middelintensitet over 10 minutter på under 30 mm pr. time. I mellem 30 og 40 mm pr. time er sandsynligheden for opstuvning beskrevet ved den logistiske funktion. R^2-værdien repræsenterer, hvor godt den logistiske funktion passer på fordelingen af histogrammet af de præsimulerede hændelser fra rørmodellen i MIKE URBAN i den respektive node.

5.2 Realtidsmodel via logistiske funktioner

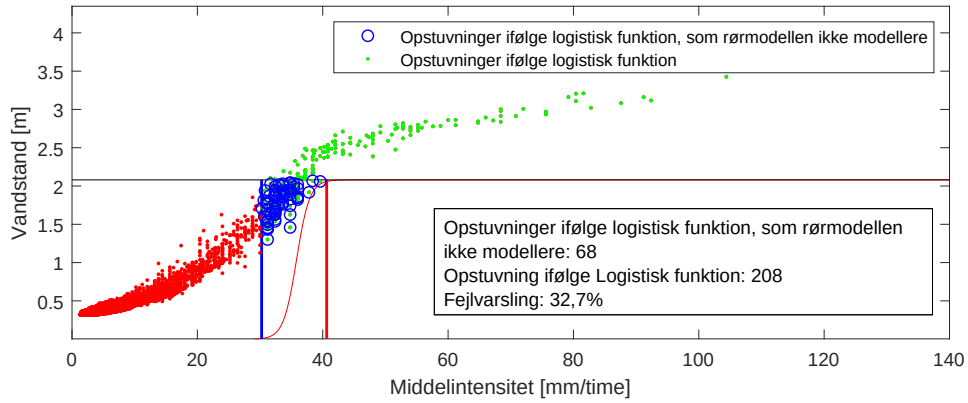
Det vælges, at realtidsmodellen baseret på den logistisk funktion skal varsle imod opstuvning ved en sandsynlighed over 0,01%(markeret ved den blå linje på figur 5.1). Dette vælges, da realtidsmodellen dermed har den største sandsynlighed for at varsle imod potentielle opstuvninger. Dette er et konservativt valg, idet det samtidig betyder, at den logistiske funktion varsler mange hændelser over terræn, som ikke er over terræn, ifølge rørmodellen i MIKE URBAN.

Det vægtes derfor højere, at der varsles imod en opstuvning i forhold til at øge antallet af fejlvarslinger. En fejlvarsling defineres som en regnhændelse, der varsles fra den logistiske funktion, som ikke resulterer i opstuvning ifølge rørmodellen i MIKE URBAN. Fejlvarslingerne består med andre ord, af de punkter, som er under terræn på figur 5.1, og som har en højere middelintensitet over den givende regnvarighed end intensiteten svarende til en sandsynlighed på 0,01%.

Da den logistiske funktion er forskellig fra regnvarighed til regnvarighed, forsøges det at optimere modellen ved at ændre på regnvarigheden som middelintensiteten midles over. Ved at udvælge den regnvarighed, hvor der er færrest punkter under terræn med højere middelintensiteter end den logistiske funktion ved 0,01%, findes altså det mindste antal fejlvarslinger.

Det procentvise antal fejlvarslinger bestemmes ved at finde antallet af regnhændelser, som ikke oversvømmer ifølge rørmodellen i MIKE URBAN, men hvor der ifølge den logistiske funktion opstuver vand. Dette antal divideres med alle de regnhændelser, som ifølge den logistiske funktion opstuver. Bestemmelsen af det procentvise antal fejlvarslinger illustreres ved figur 5.2, hvor 68 regnhændelser fører til opstuvning ifølge den logistiske funkton, men som ikke oversvømmer ifølge rørmodellen i MIKE URBAN. Og der er i alt 208 regnhændelser, som ifølge den logistiske

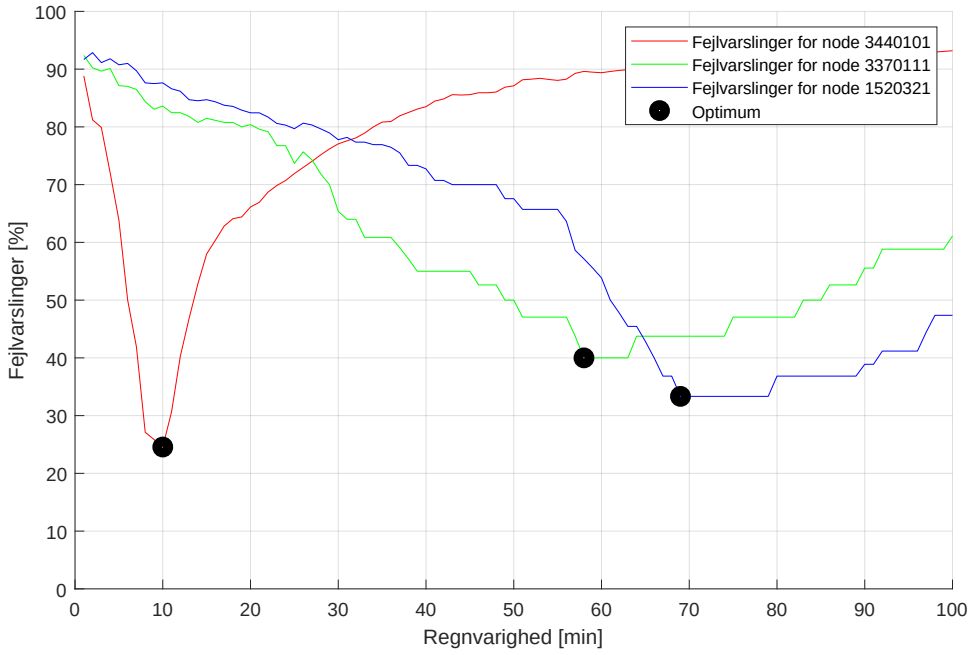
funktion opstuver. Dermed bliver fejlvarslingsprocent 32,7% for noden.



Figur 5.2. Illustrering af bestemmelse af fejlvarsling til optimering.

Som det fremgår af figur 5.2 er den logistisk funktion dermed konservativ i forhold til at varsle hændelser over terræn.

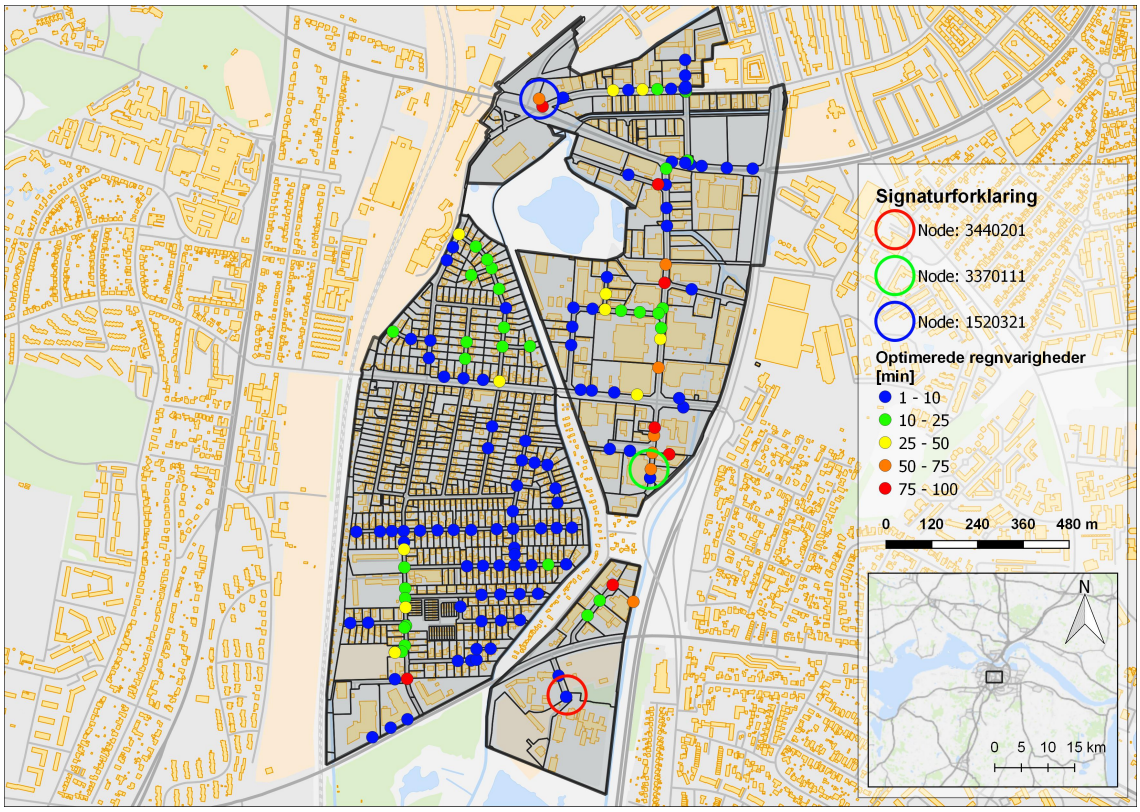
Da sammenhængen imellem middelintensiten og vandniveauet i noden er forskellig fra regnvarighed til regnvarighed, ønskes det at optimere den logistiske funktion i forhold til fejlvarslinger ved at ændre regnvarigheden der midles over i hver hændelse. Figur 5.3 viser optimeringen af den logistiske funktion for node 3440101, 3370111 og 1520321, hvor den logistiske funktions fejlvarslingsprocent er afbildret i forhold til MIKE URBAN modellen.



Figur 5.3. Optimering af den logistiske funktion for node 3440101, 3370111 og 1520321. Node: 3440201, node: 3370111 og node: 1520321 er markeret med cirkler på figur 5.3.

Figur 5.3 viser, at de regnvarigheder, hvor de logistiske funktioner har det laveste procentvise antal fejlvarslinger er ved henholdsvis 10, 58 og 69 minutter. Ved disse regnvarigheder har de logistiske funktioner henholdsvis en fejlvarslingsprocent på 23%, 40% og 32%. Denne optimering foretages

for alle logistiske funktioner i de noder, der oversvømmes ved de fire historiske regnserier i systemet jf. kapitel 4. Således findes den regnvarighed hvorudfra den logistiske funktion præsterer bedst for hver node, se figur5.3.



Figur 5.4. Optimerede regnvarigheder for de noder, der oversvømmes ved de fire historiske regnserier i projektområdet.

Figur 5.4 viser de optimerede regnvarigheder for noderne i projektområdet. Figuren viser, at størstedelen af noderne har en optimeret regnvarighed mellem 1 til 10 minutter. De korte optimerede regnvarigheder skyldes i høj grad, at disse noder oversvømmes ved nogle meget højintense regnhændelser. Derfor bliver de logistiske funktioner i de respektive noder mere lodret, hvorved antallet af hændelser imellem 0,01% og 99,9% for de logistiske funktioner minimeres. Herudover er der næsten ingen andre hændelser med lige så høj intensitet, der ikke fører til opstuvning, hvorfor antallet af fejlvarslinger bliver meget lavt. Derudover viser figuren, at Håndværkerkvarteret generelt har højere optimerede regnvarigheder end Kærby. De højere optimerede regnvarigheder skyldes generelt, at middelintensiteten til disse regnvarigheder er bedst korreleret med vandniveauet. Dette minimerer antallet af hændelser under terræn imellem 0,01% og 99,9%, hvilket minimere antallet af fejlvarslinger.

5.2.1 Validering

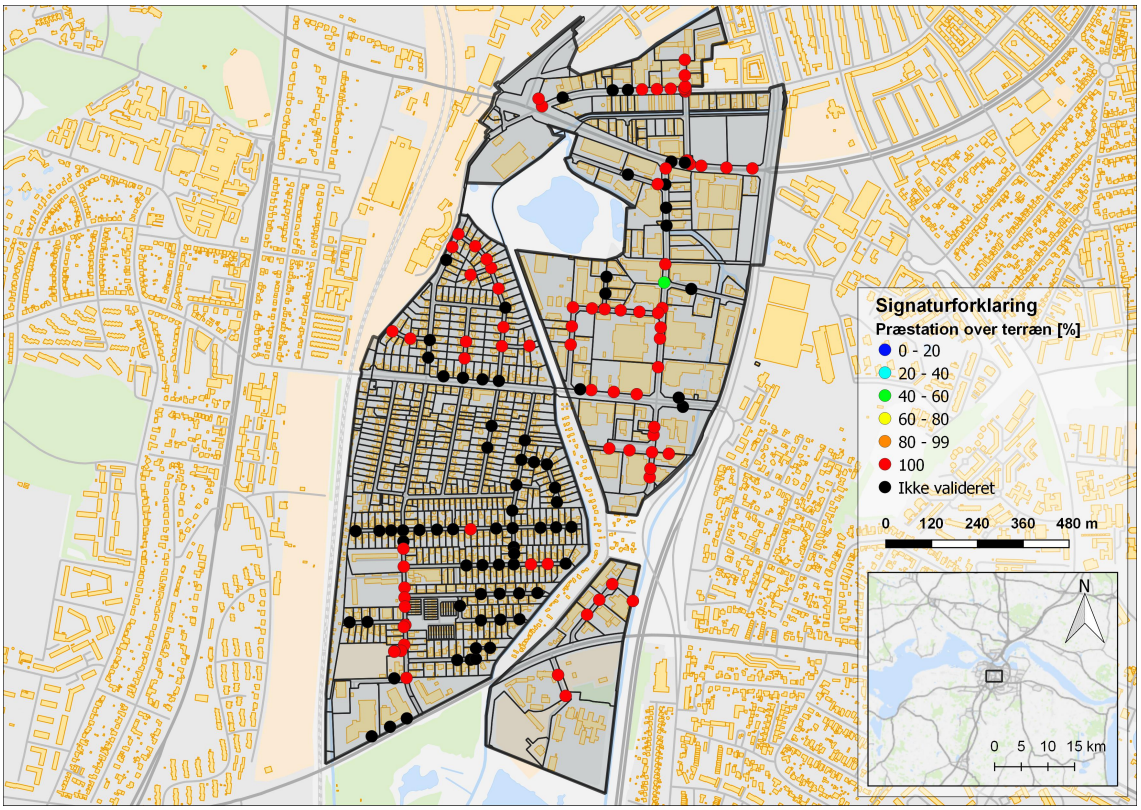
Validering foretages ved at simulere regnhændelserne fra den historiske regnserie 5061 igennem MIKE URBAN, og derefter kategorisere hændelserne i forhold til under og over terræn. Herefter opdeles hver regnhændelse i middelintensiteter over forskellige regnvarigheder, og anvendes som input i de logistiske funktioner i noderne. Hver node har en optimeret regnvarighed, hvorved modellen præsterer bedst, hvorfor middelintensiteten over den optimerede regnvarighed er input i den respektive node. Dermed kan de logistiske funktioner beregne om en given regnhændelse

resulterer i opstuvning i afløbssystemet i hver node ud fra valideringsresultaterne. Derefter sammenlignes resultaterne fra MIKE URBAN modellen med resultaterne fra de logistiske funktioner. Valideringen foretages ved at bestemme om de logistiske funktioner varsler imod de opstuvninger, som rørmodellen viser med den historiske regnserie 5061 som input. Bestemmelsen af dette vises ved hjælp af tabel 5.1, som er et tænkt eksempel for rørmodellen i MIKE URBAN i forhold til den logistiske funktion for en node. Valideringen for noden bestemmes ved at tage de 400 regnhændelser, som både er over terræn i rørmodellen og den logistiske funktion og dividere med antallet af hændelser over terræn ifølge rørmodellen, hvilket er 420 hændelser. Præstationen over terræn for noden blider dermed 95%. Præstationen over terræn vil i rapporten blive beskrevet som P_{OT}.

Validering		**MIKE URBAN rørmodel**	
		Under terræn	Over terræn
Logistisk funktion	Under terræn	5000	20
	Over terræn	50	400

Tabel 5.1. Eksempel for rørmodellen i MIKE URBAN i forhold til den logistiske funktion.

De logistiske funktioners præstation over terræn for noderne i projektområdet er vist på figur 5.5.

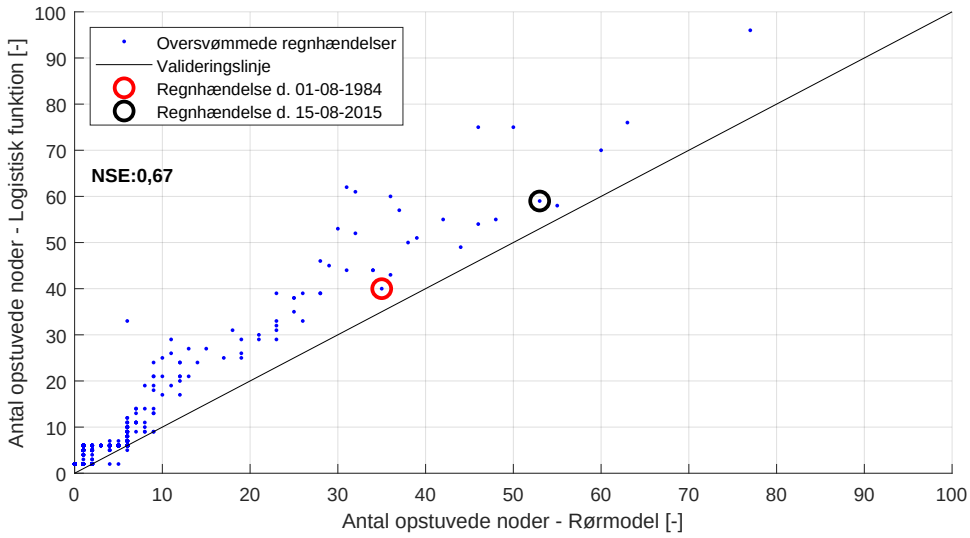


Figur 5.5. Præstationen over terræn(P_{OT}) for noderne i projektområdet, som repræsenterer de logistiske funktionernes evne til at varsle imod de opstuvninger, som rørmodellen viser. Noderne markeret med sort kan ikke valideres ved anvendelse af den historiske regnserie 5061.

Figur 5.5 viser, at den logistiske funktions præstation over terræn er 100% for alle noderne i projekområdet med undtagelse af én. Dermed vil de logistiske funktioner altid varsle, hvis der forekommer opstuvning i noderne, hvorved de kan anvendes til varslingen af fremtidige opstuvninger. De logistiske funktioners evne til at varsle imod de opstuvninger, der forekommer ved simulering af 5061 i rørmodellen i MIKE URBAN, er i gennemsnit 99%.

De sorte noder på figur 5.5, er noder, som ikke kan valideres med regnserien 5061. Dette skyldes, at valideringstidsserien - SVK 5061 - ikke giver anledning til opstuvning i disse noder, mens SVK målerne, der anvendes til opbygning af de logistiske funktioner, giver opstuvning. Dette skyldes at der optræder nogle enkelte hændelser, som giver opstuvning i 5049, 5052, 5054 og 5058 end i SVK 5061.

En anden måde at analysere præstationen af de logistiske funktioner, er ved at undersøge antallet af opstuvninger i noderne pr. oversvømmelsesgivende regnhændelser, se figur 5.6. Desuden markeres de valideringshændelser, der anvendes som eksempler på validering af modellen igennem rapporten.

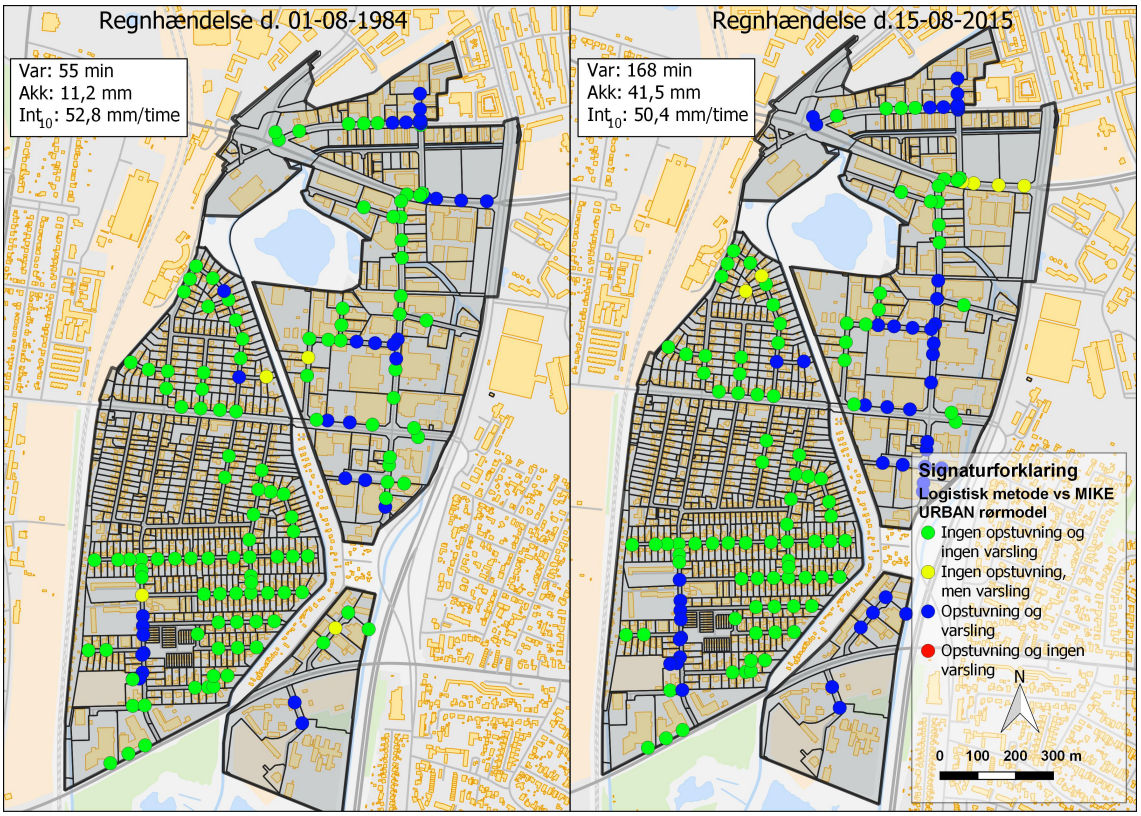


Figur 5.6. Antallet af opstuvninger fra noderne i rørmodellen i MIKE URBAN i forhold til de Logistiske funktioner med den historiske regnserier 5061 som input.

Figur 5.6 viser, at der generelt er flere noder, som opstuver ved de logistiske funktioner end ved rørmodellen i MIKE URBAN. Dermed har de logistiske funktioner mange fejlvarslinger, hvorved der varsles imod en indkommen regnhændelse, som ikke fører til opstuvning i virkeligheden, såfremt MIKE Urban modellen afspejler virkeligheden. Dette kan potentielt forårsage at de berørte borgere mister tiltroen til metoden, da de ofte vil foretage foranstaltninger, uden det er nødvendigt. Hvis man derimod ikke varsler de regnhændelser, som har en sandsynlighed for opstuvning under 25% ifølge den logistiske funktion i den respektive node, så ville man undgå mange fejlvarslinger idet størstedelen af de regnhændelser, der varsles med en sandsynlighed for opstuvning på under 25%, ikke opstuver ifølge rørmodellen i MIKE URBAN. Der ville dog samtidig være en større risiko for, at en opstuvning ikke bliver varslet. Koefficienten for Nash-Sutcliffe model Effektivitet(NSE) fremgår også af figur 5.6, som viser hvor godt resultaterne fra de logistiske funktioner passer på resultaterne fra rørmodellen i MIKE URBAN. NSE kan variere fra -∞ til 1, hvor 1 repræsenterer den bedste mulige tilpasning til de observerede data og -∞

den dårligste. Dermed passer resultaterne fra de logistiske funktioner i forhold til resultaterne fra rørmodellen i MIKE URBAN relativt godt, da der er en NSE på 0,67.

Figur 5.7 viser, hvordan den logistiske metode præsterer i forhold til rørmodellen i MIKE URBAN ved to regnhændelser, som resulterer i opstuvning. Disse to regnhændelser er valgt for at vise, hvordan den logistiske funktion præsterer ved en regnhændelse med få opstuvninger og en regnhændelse med mange opstuvninger.



Figur 5.7. Logistiske funktioner vs rørmodellen i MIKE URBAN ved to udvalgte regnhændelser.

Figur 5.7 viser, at de logistiske funktioner rammer det samme som rørmodellen i MIKE URBAN for størstedelen af noderne. Der er dog nogle noder, hvor den logistiske funktion varsler imod opstuvning, hvor MIKE URBAN ikke viser opstuvning. Dette passer med figur 5.6, som viser, at der er mange fejlvarslinger. Der er ingen opstuvninger fra noderne i MIKE URBAN, som de logistiske funktion ikke varsler.

De logistiske funktioner baseret på de historiske regnserier, har en præstation over terræn på 100% for størstedelen af noderne i projektområdet. De logistiske funktioner varsler dermed altid, hvis der er risiko for opstuvning ifølge rørmodellen i MIKE URBAN. De logistiske funktioner baseret på de historiske regnserier har desuden mange fejlvarslinger, hvorved de logistiske funktioner varsler imod opstuvning, som ikke forekommer i virkeligheden, såfremt MIKE Urban modellen afspejler virkeligheden. Præstationen over terræn er i gennemsnit 99% for noderne i projektområdet. NSE værdien er 0,67 og viser, at resultaterne fra de logistiske funktioner i forhold til resultaterne fra rørmodellen i MIKE URBAN, passer relativt godt sammen. I appendiks A og B er præstationen af de logistiske funktioner baseret på kasseregn og CDS-regn vist.

Opsummering af del II 6

De logistiske funktioner kan beregne om en given regnhændelse resulterer i opstuvningen med en beregningstid på 5 sekunder, hvor de logistiske funktioner baseret på historiske regnserier og CDS-regn beregner med stor sikkerhed. Det er derfor muligt at anvende logistiske funktioner til udarbejdelsen af realtidsmodeller, hvorved konceptet med opbygning af en realtidsmodel baseret på præsimulerede resultater er eftervist. Dette skyldes den gode korrellering imellem vandniveauer i noderne og middelintensiteten over en given regnvarighed.

Tabel 6.1 sammenligner præstationen over og under terræn for de logistiske funktioner baseret på historiske regnserier, kasseregn og CDS-regn. Præstationen under terræn(P_{UT}) indikerer, hvor stor procentdel af varslingerne fra de logistiske funktioner, som resulterer i opstuvninger ifølge rørmodellen i MIKE URBAN. Dette vil vise, at hvis der er 100 varslinger fra den logistiske funktion, men kun 60 af varslingerne resulterer i opstuvning, så vil P_{UT} blive 60%.

	Historiske regnserier	**Kasseregn**	**CDS-regn**
P_{OT} [%]	99	22	90
P_{UT} [%]	40	96	59
NSE [-]	0,67	0,21	0,81

Tabel 6.1. Gennemsnitlig præstation over og under terræn for de logistiske funktioner baseret på historiske regnserier, kasseregn og CDS-regn.

Tabel 6.1 viser, at resultaterne for de logistiske funktioner baseret på de historiske regnserier og CDS-regn viser de bedste resultater i forhold til præstationen over terræn med en præstation i gennemsnit på henholdsvis 99% og 90% for projektområdet. De logistiske funktioner baseret på kasseregn er derimod dårlig til at varsle imod opstuvninger, som rørmodellen viser, da dens præstation over terræn kun er 22%. I forhold til præstationen under terræn, så resulterer 40% af varslingerne fra de logistiske funktioner baseret på de historiske regnserier i opstuvning ifølge rørmodellen i MIKE URBAN, hvorved 60% af varslinger resulterer i fejlvarslinger. For de logistiske funktioner baseret på CDS-regn er præstationen under terræn 59% og 96% for kasseregn. Desuden er NSE-værdien for de historiske regnserier og CDS-regn henholdvis 0,67 og 0,81, hvorved resultaterne fra de logistiske funktioner i forhold til resultaterne fra rørmodellen i MIKE URBAN passer relativt godt sammen. Derimod viste NSE-værdien for kasseregn 0,21, hvilket indikerer en dårlig sammenhæng.

Den vigtigste parameter er P_{OT}, da det vægtes højest, at de logistiske funktioner altid varsler imod en potentiel opstuvning, hvilket de logistiske funktioner baseret på de historiske regnserier og CDS-regn er bedst til at beskrive, se tabel 6.1.

Derudover viser de logistiske funktioner baseret på resultaterne for CDS-regn, at disse kunstigt konstruerede regnserier kan anvendes til udarbejdelsen af en realtidsmodel, da de logistiske funktioner beskriver responsen med forholdsvis stor sikkerhed.

Realtidsmodellerne baseret på de logistiske funktioner for de historiske regnserier og CDS-regn kan varsle de fleste regnhændelser med høj præcision og dermed varsle borgere omkring

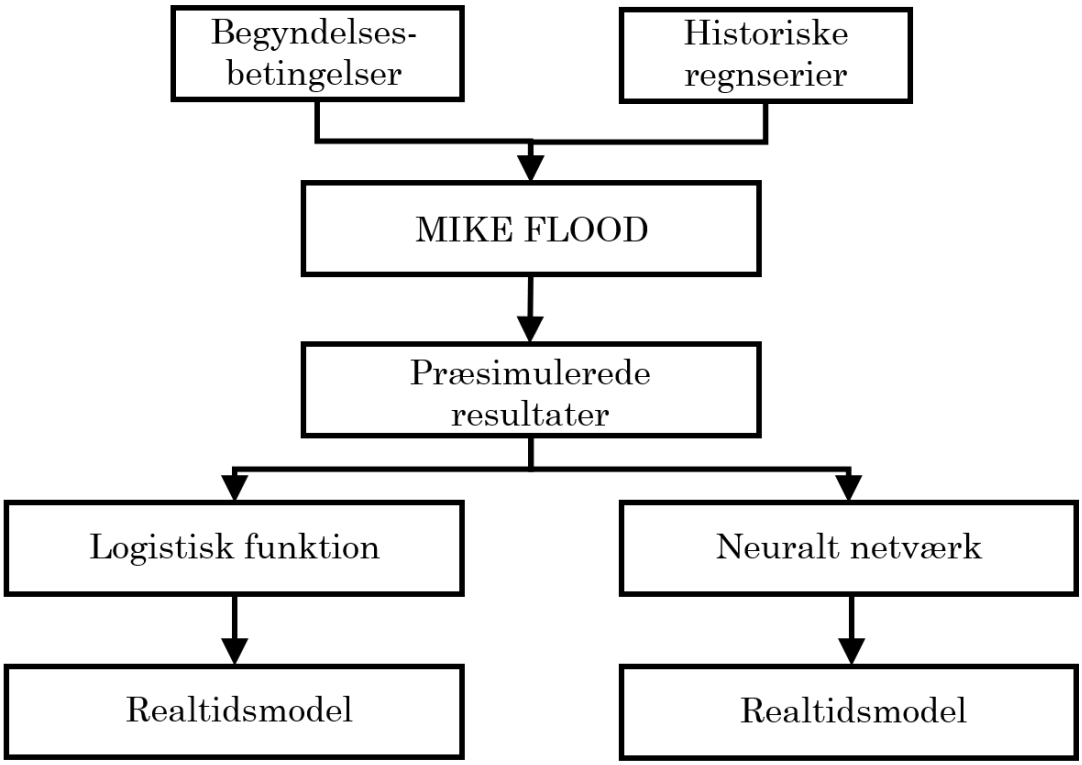
opstuvning fra noderne. Men begrænsningen er også, at disse modeller kun varsler opstuvning fra noderne, og dermed ikke fortælle borgerne, hvor vandet strømmer hen på overfladen. Disse modeller kræver dermed, at modelområdet er fladt, således vandet bliver i de områder det opstuver fra, for at kunne varsle imod oversvømmelse.

De logistiske funktioner varsler imod opstuvning ved en sandsynlighed over 0,01%, hvilket er meget konservativt, da der dermed vil blive varslet mange hændelser over terræn som i virkeligheden ikke vil forekomme. Hvis der derimod vælges først at varsle imod opstuvning ved en sandsynlighed over 25%, så ville man undgå mange fejlvarslinger, da størstedelen af de regnhændelser, der varsles med en sandsynlighed for opstuvning på under 25%, ikke opstuver ifølge rørmodellen i MIKE URBAN. Der ville dog samtidig være en større risiko for, at en opstuvning ikke bliver varslet.

Udover at afprøve konceptet med opbygning af en realtidsmodel baseret på præsimulerede resultater, er responsen i systemet blevet belyst ud fra forskellige inputparametre. Responsen i systemet for de historiske regnserier viste, at vandniveauerne i noderne stiger i forhold til middelintensiteten ved specifikke regnvarigheder. Der er også en sammenhæng mellem vandstandsniveauet i noderne og den akkumuleret nedbør i en regnhændelse, men denne sammenhæng er mere sporadisk end ved anvendelse af middelintensiteten. Derudover er der en dårlig sammenhæng mellem vandstandsniveauet i noderne og hændelsvarigheden.

Del III

Realtidsmodel baseret på resultater fra MIKE FLOOD model



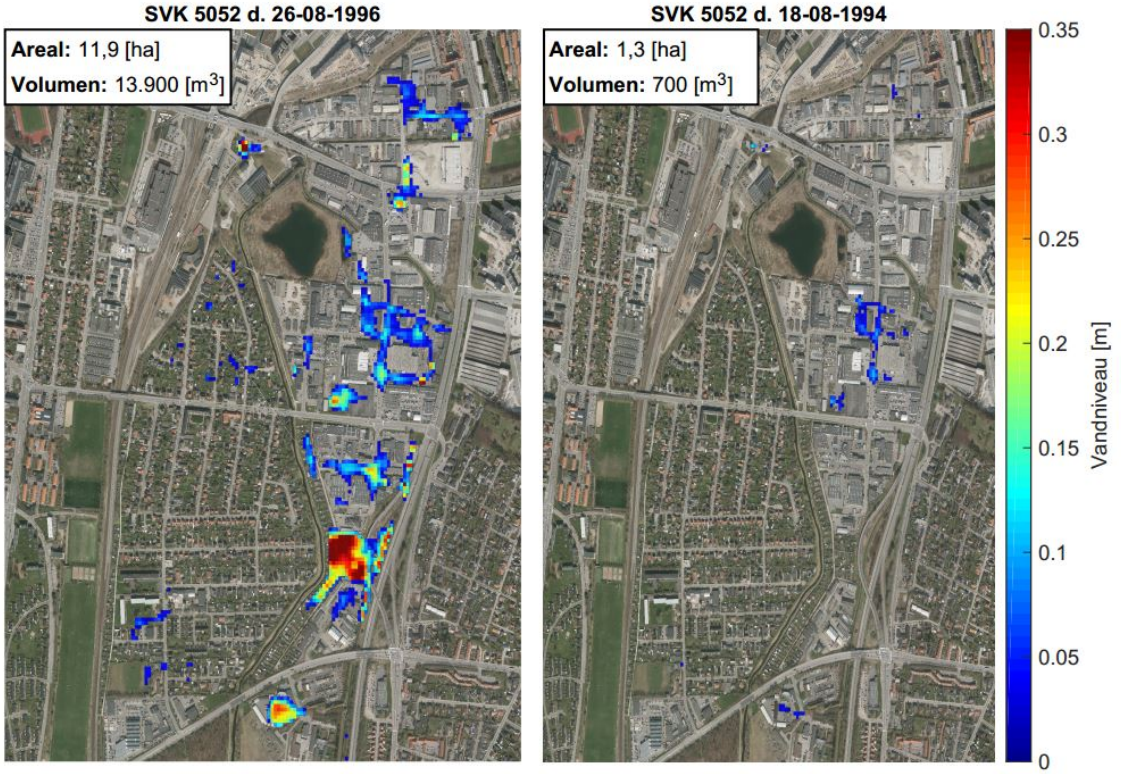
I del III præsimuleres de historiske regnserier igennem MIKE FLOOD modellen, hvor resultaterne analyseres og der udarbejdes realtidsmodeller baseret på disse resultater ved anvendelse af logistisk funktion og neuralt netværk. Formålet med del III er at udarbejde realtidsmodeller, som kan beregne oversvømmelsesudbredelse samt vandniveau ud fra forskellige regnhændelser. Formålet med realtidsmodellerne, som ligger til grund for varslingssystemet er hermed, at være i stand til at modellere oversvømmelsesudbredelsen samt vandniveauet over terræn i realtid. Oversvømmelsesudbredelsen kan af beredskab anvendes til at finde de områder i byen, som oversvømmes. Vandniveauet kan anvendes til at finde de mest kritiske områder i byen, hvor vandet står højest, hvormed der er en forøget risiko for at vandet løber over fortovskante [Olsen et al., 2007]. I rutediagrammet ovenover fremgår metoden til udarbejdelsen af realtidsmodellen baseret på resultaterne fra MIKE FLOOD modellen. De historiske regnserier simuleres igennem MIKE FLOOD modellen og der udarbejdes to realtidsmodeller baseret på deres resultater ved anvendelse af logistisk funktion og neuralt netværk. Der præsenteres kun resultater for simuleringer med en vandføring på 1,6 m^3/s i Østerå i del III.

Systemanalyse af MIKE FLOOD modellen 7

I dette kapitel undersøges hvorledes vandniveauet over terræn er korreleret med regnkarakteristika for historisk nedbør. Dette undersøges for at udarbejde den bedst mulige realtidsmodel, der er i stand til at beskrive oversvømmelsesudbredelse og vandniveau i realtid.

Undersøgelsen foretages ved at simulere de fire historiske regnserier igennem MIKE FLOOD modellen, hvor oversvømmelsesudbredelsen og vandniveauet bestemmes. De dynamiske beregningerne af strømningerne på terræn udføres i et 10x10 meter grid. Herudfra kan regnkarakteristika sammenlignes med resultaterne af modellen, for at se hvorledes forskellige karakteristika er korreleret med oversvømmelsesudbredelsen og vandniveauet. En regnhændelses karakteristika, er parametre som hændelsvarighed, akkumuleret nedbør og middelintensiteter over forskellige regnvarigheder. For at se eksempler på hændelser med forskellige regnkarakteristika, analyseres to regnhædelser.

På figur 7.1 fremgår dels den mest ekstreme regnhændelse fra SVK 5052 i forhold til oversvømmelsesudbredelse, som blev observeret d. 26-08-1996 og dels en mindre ekstrem hændelse i forhold til oversvømmelsesudbredelse, som blev observeret d. 18-08-1994 fra samme målestation.



Figur 7.1. MIKE FLOOD simuleringer af en ekstrem regnhændelse observeret d. 26-08-1996 af SVK 5052 og en mindre ekstrem regnhændelse observeret d. 18-08-1994 af samme regnmåler.

Som det fremgår af figuren resulterede begge regnhændelser, ifølge MIKE FLOOD modellen, i oversvømmelser i større eller mindre grad. Realtidsmodellerne skal være i stand til at forudsige

begge typer af oversvømmelser, hvorfor regnhændelsernes karakteristika analyseres. Et udvalg af regnhændelsernes karakteristika fremgår af tabel 7.1.

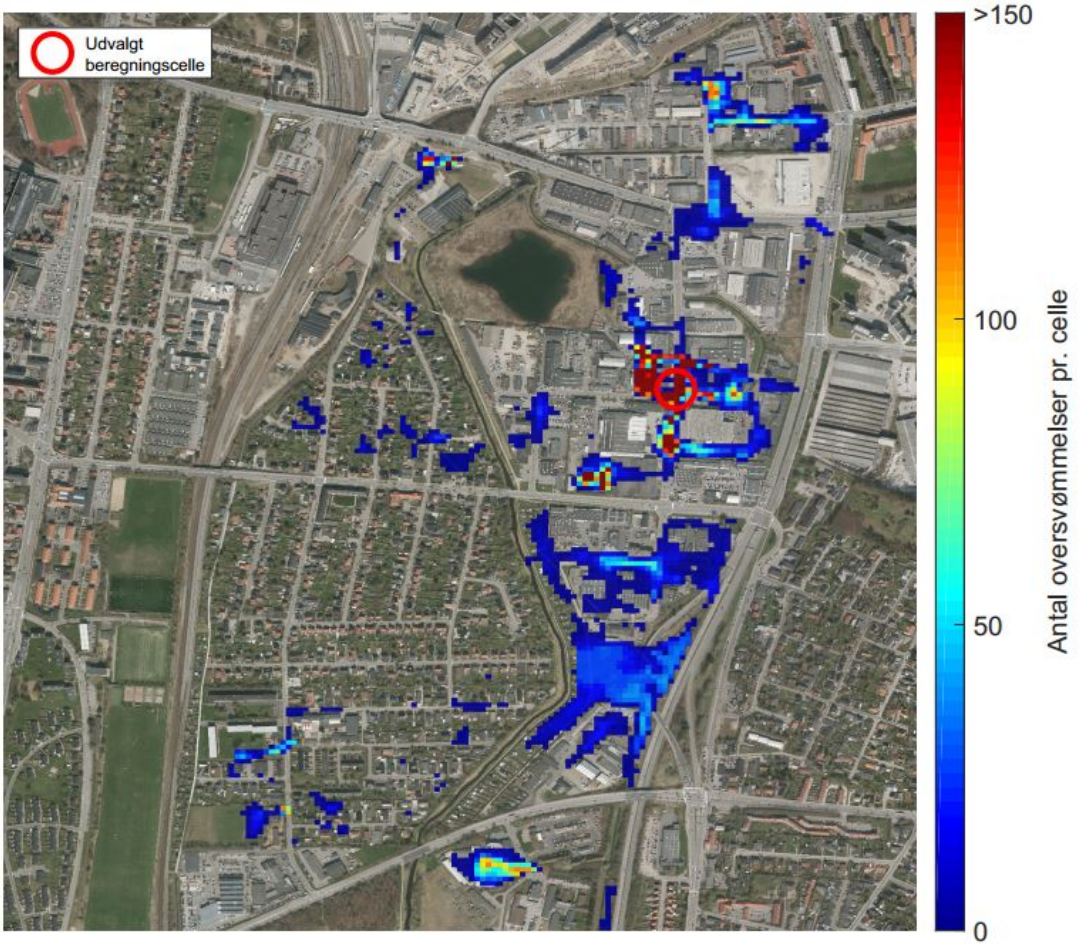
Karakteristika	**26-08-1996**	**18-08-1994**
Hændelsesvarighed [min]	83	341
Akk. nedbør [mm]	40,3	22,4
$\text{Intensitet}_{1\text{min}}$ [mm/time]	144,0	84,0
$\text{Intensitet}_{30\text{min}}$ [mm/time]	69,3	18
$\text{Intensitet}_{120\text{min}}$ [mm/time]	20,2	8,7

Tabel 7.1. Udvalgte regnkarakteristika for regnhændelserne d. 26-08-1996 og d. 18-08-1994 for SVK måler 5052.

Som det fremgår af tabel 7.1, var den mest ekstreme hændelse en kortvarig højintens regnhændelse, med en høj akkumuleret nedbør over kort tid. Hændelsen d. 18-08-1994 var en længere regnhændelse med mindre akkumuleret nedbør og lavere middelintensiteter over de angivne regnvarigheder. Dette er eksempler på to forskellige regnhændelser, som begge giver vand på terræn. Oversvømmelser i projektområdet kan altså både være resultat af kortvarig ekstremregn og længere varende hændelser, med væsentligt lavere middelintensitet og akkumuleret nedbør. Den endelige realtidsmodel skal beskrive begge typer hændelser, samt kende forskel på en regnhændelse, der resulterer i oversvømmelse og en som ikke gør. Derfor undersøges i det følgende hvorledes oversvømmelsesgivende hændelser er forskellige fra hændelser, som ikke fører til oversvømmelse.

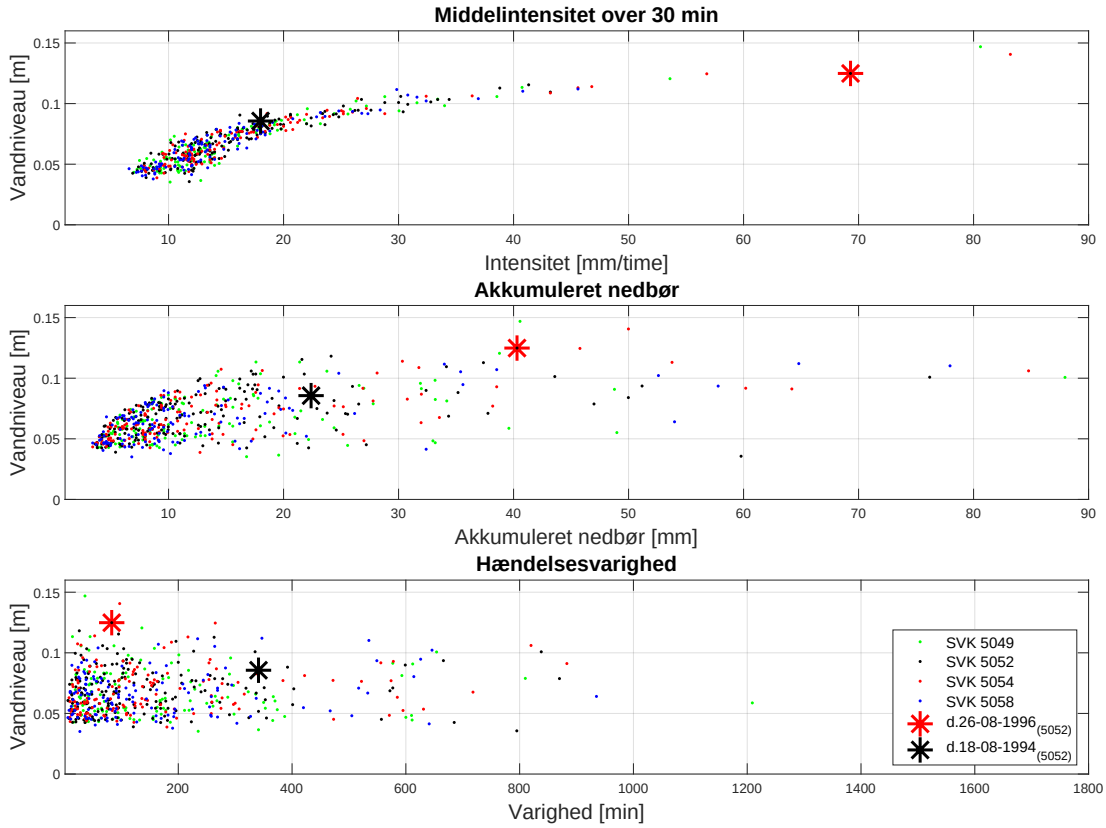
Da MIKE FLOOD simuleringer er beregningstunge og tidskrævende, ønskes det at minimere antallet af simuleringer. Dette gøres ved at udvælge de hændelser, som i rørmodellen i MIKE URBAN resulterede i vand på terræn, se tabel 4.3 i afsnit 4. Det antages hermed, at de hændelser, som giver vand på terræn i 1D modellen, resulterer i vand på terræn i den koblede 1D/2D MIKE FLOOD model. Da MIKE FLOOD modellen er koblet til 1D rørmodellen, er denne antagelse udmærket. Dette giver 1.144 regnhændelser udfra de fire historiske regnserier; 5049, 5052, 5054 og 5058 og ved en begyndelsesbetingelse for vandføringen i Østerå på 1,6 m^3/s. Responsen ud fra andre begyndelsesbetingelser end en vandføring på 1,6 m^3, undersøges ikke nærmere.

Hver celle er 10x10 meter og modellen giver forskellige vandniveauer til forskellige hændelser i hver celle. Vandniveau over terræn på under 2 centimeter antages ikke for en oversvømmelse og neglicieres. For at give et overblik over hvilke celler, der oversvømmes, samt hvilke områder, der typisk oversvømmes, summeres antallet af oversvømmelser i hver celle ud fra MIKE FLOOD modellen med de historiske regnserier 5049, 5052 og 5054 og 5058 som input, se figur 7.2.



Figur 7.2. Antallet af gange celler i projektområdet oversvømmes for de fire historiske regnserier SVK; 5049, 5052, 5054 og 5058. Responsen i den udvalgte beregningscelle analyseres i det følgende.

Som det fremgår af figuren, oversvømmes det nordlige og sydlige Kærby, samt store dele af Håndværkerkvarteret ud fra de 1.144 simulerede hændelser. Derudover oversvømmer den centrale del af Håndværkerkvarteret flest gange, hvor nogle af cellerne i området oversvømmer over 800 gange. De resterende celler i området, oversvømmer mellem en og 70 gange ud af de fire regnserier, der er simuleret igennem MIKE FLOOD modellen. På figur 7.3 fremgår karakteristika for samtlige regnhændelser, der ifølge MIKE FLOOD modellen giver vand på terræn i én udvalgt celle.

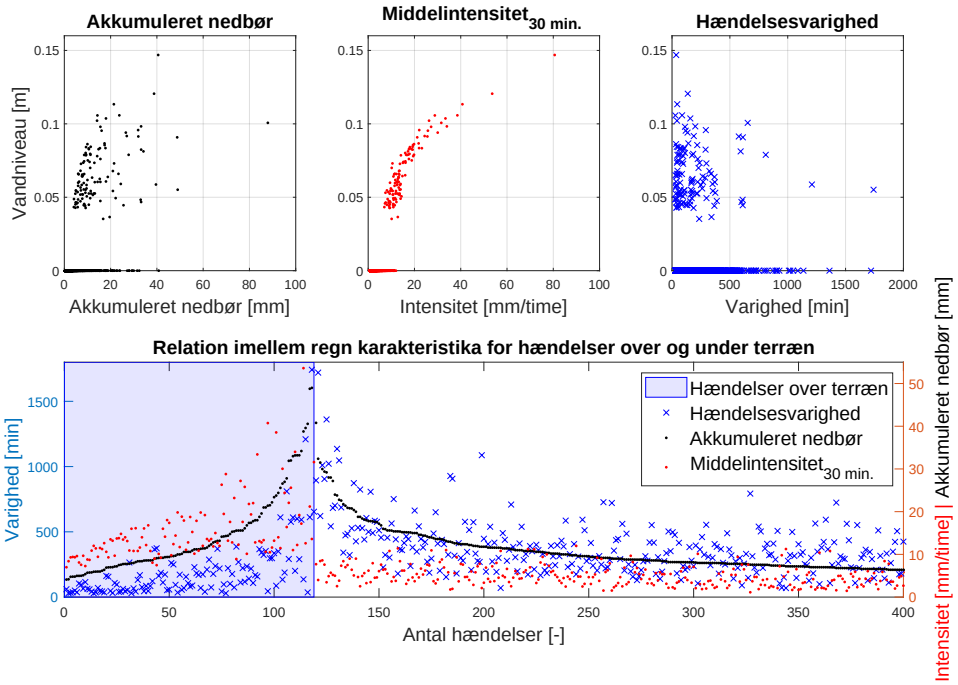


Figur 7.3. Resultater for oversvømmelsesgivende regnhændelser for den udvalgte celle, markeret med ◯ på figur 7.2. Relation imellem vandniveau og middelintensitet over 30 min, akkumuleret nedbør, samt varigheden af regnhændelserne fremgår på figuren til højre. Her fremgår tilmed de to hændelser vist på figur 7.1 illustreret ved ∗ for hændelsen d. 26-08-1996 og ∗ for hændelsen d. 18-08-1994.

Figur 7.3 viser, at den bedste relation med vandniveauet i cellen er middelintensiteten, her vist for en regnvarighed på 30 minutter. Endvidere viser figuren, at vandniveauet stiger jo højere den akkumuleret nedbør er, men tendensen er ikke entydig i samme grad som middelintensiteten ved en regnvarighed på 30 minutter. Hændelsesvarigheden af de forskellige regnhændelser er ikke korreleret med vandniveauet i cellen. Det bemærkes dog, at de oversvømmelsesgivende hændelser oftere er relative korte hændelser, end langvarige. Responsen i denne celle viser, at der relativt nemt opstår oversvømmelse, hvilket antallet af oversvømmelser i denne celle tilmed bevidner. Generelt er vandniveauet bedre korreleret med korte middelintensiteter end både den akkumulerede nedbør og varigheden. Dette skyldes, at cellen primært oversvømmes af kortvarige kraftige regnhændelser, hvorved jo større regnintensiteten er, desto højere vandniveau. Et skybrud defineres af DMI som en regnhændelse, hvor der falder mere end 15 mm på 30 min [Danmarks Meteorologiske Institut]. Dette svarer, ved en middelintensitet over 30 min, til 30 mm pr. time. Da denne cellen på figur 7.3 allerede oversvømmer ved 10 mm pr. time ved en regnvarighed på 30 minutter, skal der i teorien 1/3 skybrud til at oversvømme cellen, hvilket gør den udsat for oversvømmelser. Relationen imellem vandniveauet i cellen og regnhændelsernes karakteristika er naturligvis forskellige fra celle til celle. Overordnet set er middelintensiteten bedst korreleret med vandniveauet i cellerne.

For at sammenligne de regnhændelser, som giver oversvømmelse med dem som ikke gør, visualiseres regnhændelsernes karakteristika for den udvalgte celle, for samtlige regnhændelser i SVK

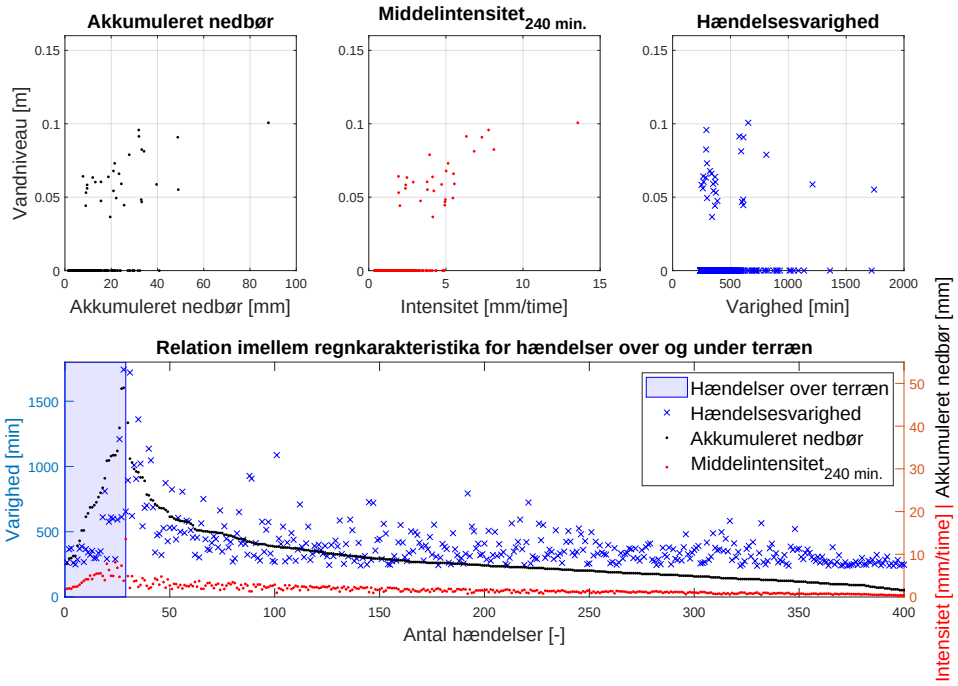
5049, med middelintensitet over 30 min og 240 min se hhv. figur 7.4 og 7.5.



Figur 7.4. Analyse af korrelationen imellem regnhændelsernes karakteristika for en udvalgt beregningscelle. De øverste 3 figurer viser regnenes karakteristika i forhold til vandniveauet i cellen. Den nederste figur viser sammenhængen imellem de regnhændelser, som er over terræn og dem som er under. Dataene er sorteret efter den akkumulerede nedbør og kun vist op til 500 hændelser, for at synliggøre sammenhængen.

Figuren viser, at vandniveauet i cellen er fint korreleret med middelintensiteten for en regnvarighed på 30 minutter. Dette fremgår af øverste billede i midten samt på den nederste figur, at regnhændelser med middelintensiteter på under 10 mm pr. time stort set alle ligger under terræn og vice versa. På den nederste figur fremgår det, at den akkumulerede nedbør ligger i samme størrelsesorden over og under terræn, hvilket betyder, at denne parameter er svær at relatere til en potentiel oversvømmelse, da en akkumuleret nedbør i en regnhændelse på 5-30 mm både kan resultere i oversvømmelse og ingen oversvømmelse. Endvidere fremgår det, at hændelser under terræn har højere varigheder og lavere middelintensiteter, hvilket er årsagen til at den akkumulerede nedbør er relativ ens for hændelser over og under terræn. Regnvarigheden for de oversvømmelsesgivende hændelser er for det meste under 400 minutter(omkring 7 timer). For den udvalgte celle er det således kortvarige højintense regnhændelser, der oftest leder til oversvømmelse.

For at analysere forskellen på responsen i cellen ud fra forskellige middelinsiteter, fremgår responsen ud fra en middelintensitet på 240 min, hvilket samtidig betyder, at regnhændelser under 240 min frasorteres, se figur 7.5.

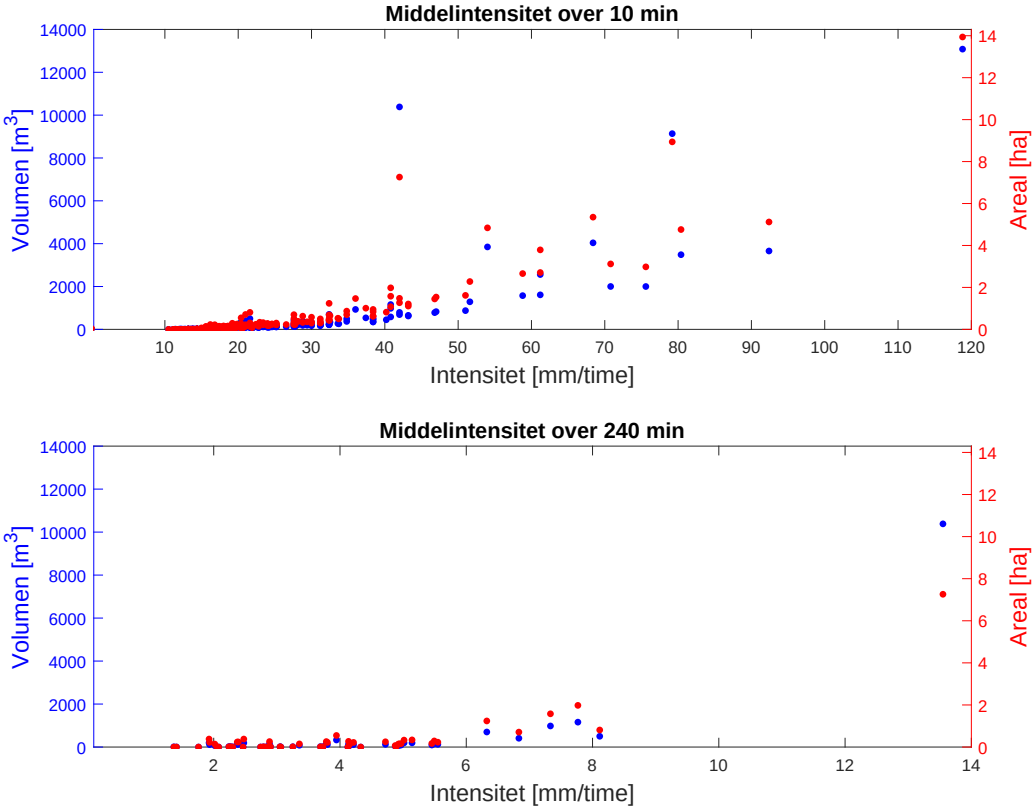


Figur 7.5. Analyse af korrelationen imellem regnhændelsernes karakteristika for en udvalgt beregningscelle. De øverste 3 figurer viser regnenes karakteristika i forhold til vandniveauet i cellen. Den nederste figur viser sammenhængen imellem de regnhændelser, som er over terræn og dem som er under. Dataene er sorteret efter den akkumulerede nedbør. Figuren viser middelintensiteten over 240 minutter, hvorfor antallet af hændelser bliver 400, da hændelser under 240 min frasorteres.

Figur 7.5 viser til forskel fra figur 7.4 med middelintensitet for en regnvarighed på 30 minutter, at middelintensiteten er mindre korreleret med vandniveauet i cellen. Herudover fremgår det, at kun omkring 30 hændelser med en regnvarighed over 240 minutter skaber oversvømmelse i cellen. På den nederste figur, fremgår det, at det er svært at adskille regnhændelser over terræn med hændelser under. Det er derfor svært at finde en sammenhæng imellem længerevarende regnhændelser og en potentiel oversvømmelse.

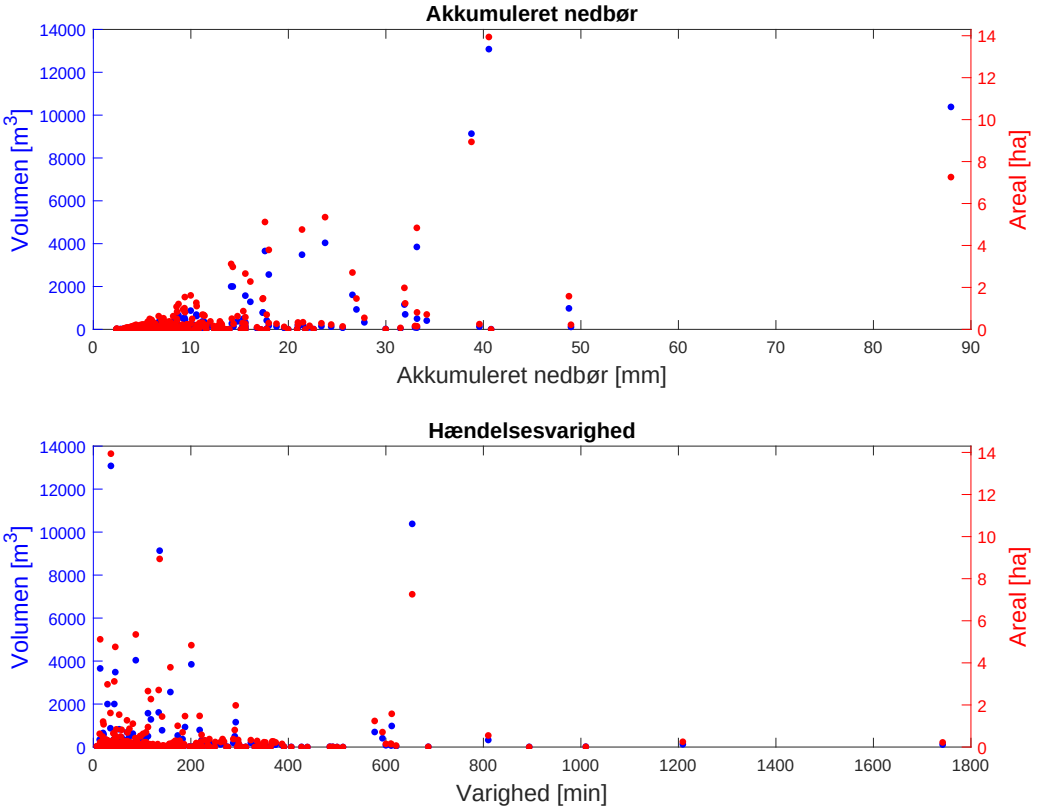
Overordnet kan det ud fra de to foregående figurer konkluderes, at cellen oftere oversvømmes af højintense korte regnhændelser, hvilket betyder, at vandniveauet og oversvømmelsen er korreleret med korte middelintensiteter for den udvalgte celle. Dette muliggør udarbejdelse af realtidsmodeller, hvor regnhændelsernes karakteristika og respons i systemet anvendes til at beregne, om der opstår oversvømmelse i projektområdet.

Dette er en analyse af én beregningscelle og kan variere afhængig af hvilken celle der undersøges. En mere generel analyse kan vurderes ud fra oversvømmet areal og volumen, se figur 7.6.



Figur 7.6. De oversvømmelsesgivende regnhændelsers sammenhæng med areal og volumen for oversvømmelsesgivende hændelser i SVK 5049 for hele projektområdet.

Det fremgår på figur 7.6, at det oversvømmede areal og volumen af de oversvømmelsesgivende hændelser er korreleret med middelintensiteten for en regnvarighed på både 10 og 240 minutter. Derudover er der større oversvømmelses arealer og volumener ved middelintensiteter over 10 minutter i forhold til 240 minutter. Dette skyldes, at projektområdet hovedsageligt oversvømmes af relativt kortvarige regnhændelser. Sammenhængen imellem oversvømmelsesudbreldelse og volumen i forhold til akkumuleret nedbør og hændelsesvarighed fremgår på figur 7.7.



Figur 7.7. De oversvømmelsesgivende regnhændelsers sammenhæng med areal og volumen for oversvømmelsesgivende hændelser i SVK 5049 for hele projektområdet.

På figur 7.7 fremgår det, at der ikke en nogen sammenhæng med hændelsesvarigheden. Med undtagelse af 5 hændelser med en hændelsesvarighed på omkring 600 minutter, er de oversvømmelsesgivende hændelsesvarigheder under 300 minutter. I forhold til sammenhængen med den akkumuleret nedbør, er der en sammenhæng, men den er mere sporadisk end relationen til middelintensiteterne over forskellige regnvarigheder.

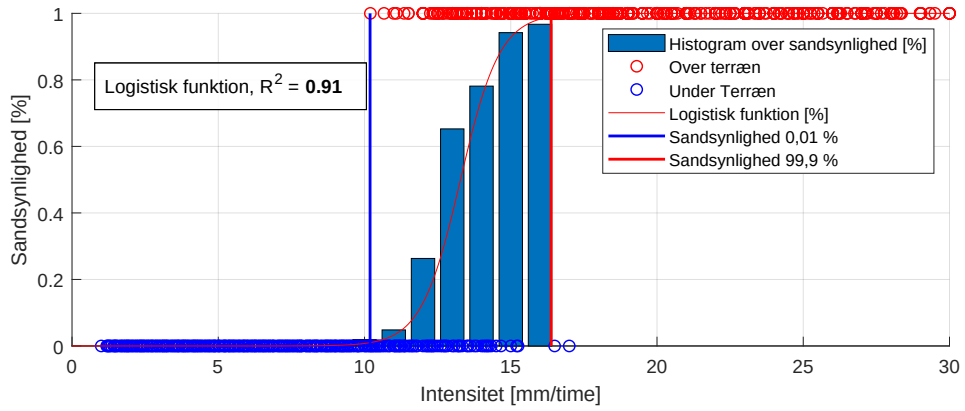
Generelt konkluderes det, at projektområdet oversvømmes af relative korte højintense regnhændelser. Derudover er der den bedste sammenhæng mellem middelintensiteten for en specifik regnvarighed i forhold til vandniveauet i cellen. Denne konklusion stemmer overens med konklusionen af systemanalysen i 1D rørmodellen i kapitel 4.

Realtidsmodel - Logistisk funktion 8

I dette kapitel udarbejdes en realtidsmodel ved brug af logistiske funktioner med formålet at modellere oversvømmelsesudbredelsen ud fra en given regnhændelse. Realtidsmodellen opstilles ved anvendelse af de præsimulerede resultater fra simuleringerne i MIKE FLOOD med de historiske regnserier som input. De logistiske funktioner bestemmes ligesom de logistiske funktioner for resultaterne i rørmodellen.

8.1 Opbygning af logistiske funktioner

Resultaterne fra MIKE FLOOD modellen for de historiske regnserier opdeles i over eller under terræn. Vandniveauer over to centimeter får værdien 1 (over terræn) og alt under to centimeter tildeles værdien 0 (under terræn). Resultaterne plottes i forhold til en middelintensitet over en given regnvarighed, da vandstandsniveauet i cellerne viste den bedste sammenhæng i forhold middelintensiteten jf. kapitel 7. Derefter bestemmes en logistisk funktion i forhold til resultaterne ved anvendelse af ligning 5.1, hvor middelintensiteten er den uafhængige variabel, x. Den logisktiske funktion viser sandsynligheden for oversvømmelse og er vist på figur 8.1 i forhold til middelintensiteten ved en regnvarighed på 10 minutter, for en celle i centrum af Håndværkerkvarteret. Der opstilles logistiske funktioner, for de celler, der oversvømmede ved de historiske regnserier 5049, 5052, 5054 og 5058.



Figur 8.1. Sandsynligheden for oversvømmelse for en celle i centrum af Håndværkerkvarteret bestemt ved logistisk funktion i forhold til en middelintensitet over en regnvarighed på 10 minutter.

Figur 8.1 viser, at der med 99,9% sandsynlighed vil være oversvømmelse i den udvalgte celle, hvis regnitensiteten er over 16 mm pr. time for en regnvarighed på 10 minutter. Der er 0,01% sandsynlighed for oversvømmelse i cellen, hvis regnintensiteten er under 10 mm pr. time. I mellem 10 og 16 mm pr. time er sandsynligheden for oversvømmelse beskrevet ved den logistisk funktion. R^2-værdien repræsenterer, hvor godt den logistiske funktion passer på fordelingen af resultaterne af de præsimulerede hændelser fra MIKE FLOOD modellen i den respektive celle. Fordelingen er afbilledet ved et histogram.

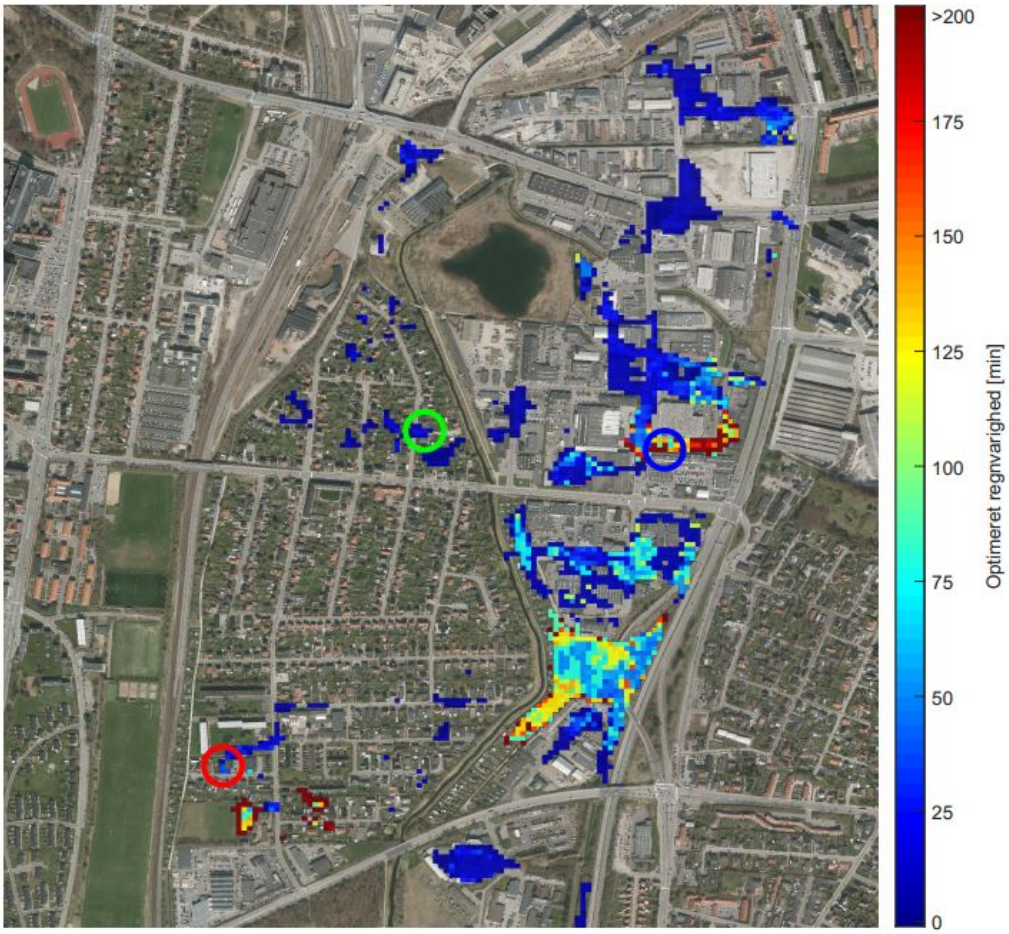
8.2 Realtidsmodel via logistiske funktioner

Det vælges, at realtidsmodellen baseret på den logistisk funktion skal varsle imod oversvømmelse ved en sandsynlighed over 0,01%(markeret ved den blå linje på figur 8.1). Dette vælges, da realtidsmodellen dermed har den største sandsynlighed for at varsle imod potentielle oversvømmelser. Dette er et konservativt valg, idet det samtidig betyder, at den logistiske funktion varsler mange hændelser over terræn, som ikke er over terræn, ifølge MIKE FLOOD modellen.

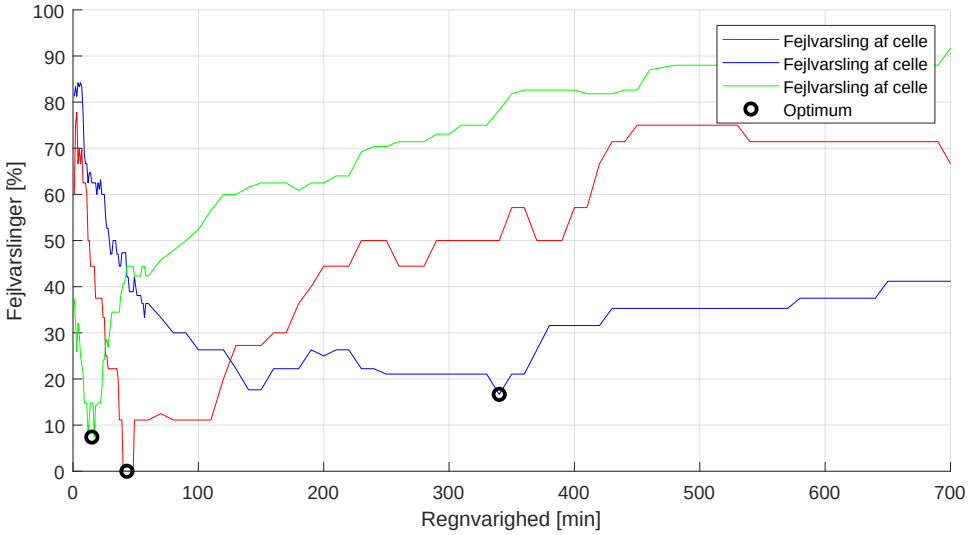
Det vægtes derfor højere, at der varsles imod en oversvømmelse i forhold til at øge antallet af fejlvarslinger. En fejlvarsling defineres som en regnhændelse, der varsles fra den logistiske funktion, som ikke resulterer i oversvømmelser ifølge MIKE FLOOD modellen. Fejlvarslingerne består med andre ord, af de punkter, som er under terræn på figur 8.1, og som har en højere middelintensitet over den givende regnvarighed end intensiteten svarende til en sandsynlighed på 0,01%.

Da den logistiske funktion er forskellig i en celle fra regnvarighed til regnvarighed, forsøges det at optimere modellen ved at ændre på regnvarigheden som middelintensiteten midles over. Ved at udvælge den regnvarighed, hvor der er færrest punkter under terræn med højere middelintensiteter end den logistiske funktion ved 0,01%, findes altså det mindste antal fejlvarslinger, uden at gå med kompromis med at varsle de hændelser, som resulterer i oversvømmelse.

Det procentvise antal fejlvarslinger bestemmes ved at finde antallet af regnhændelser, som ikke oversvømmer ifølge MIKE FLOOD modellen, men hvor der ifølge den logistiske funktion sker oversvømmelse. Dette antal divideres med alle de regnhændelser, som ifølge den logistiske funktion resulterer i oversvømmelse. Eksempel på bestemmelse af præstation til optimering er vist i kapitel 5. De optimerede regnvarigheder er vist på figur 8.2. Figur 8.3 viser optimeringen af den logistiske funktion for tre celler. Placeringen af de tre celler er markeret med blå, rød og grøn cirkel på figur 8.2.



Figur 8.2. Optimerede regnvarigheder for cellerne i modelområdet. De tre cirkler markerer placeringen af de tre celler på figur 8.3.

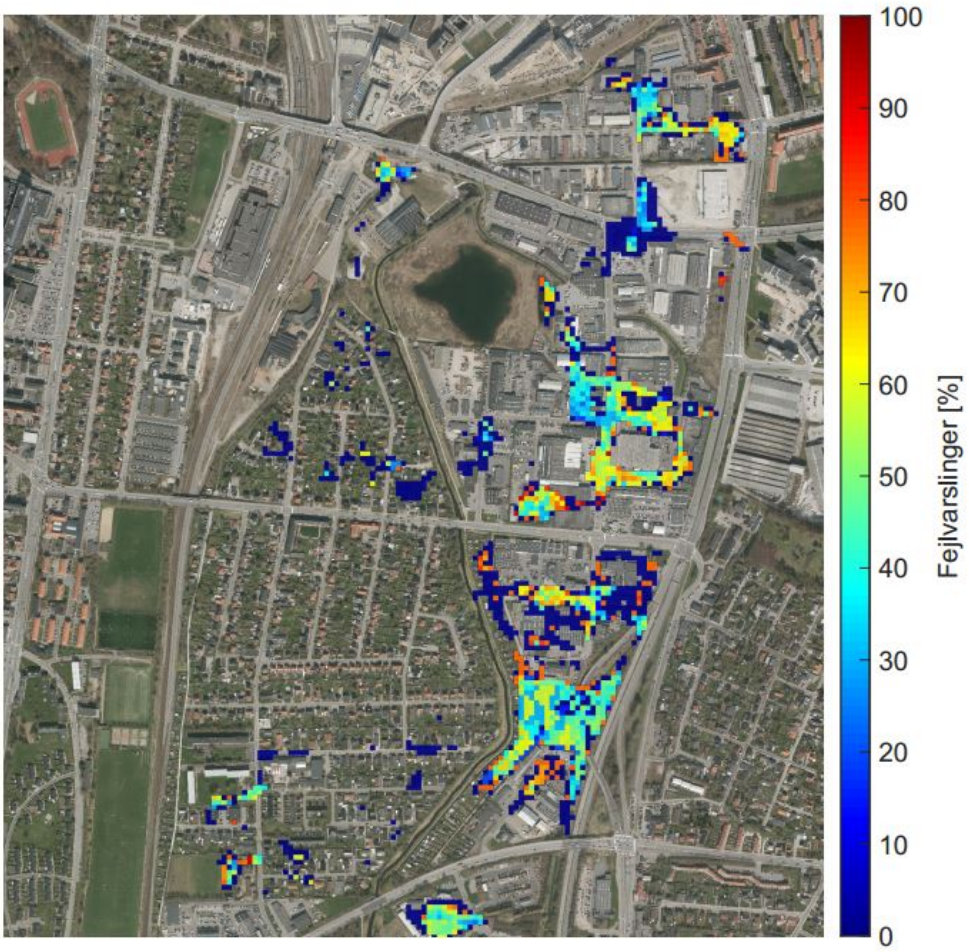


Figur 8.3. Optimering af den logistiske funktion for tre celler.

Figur 8.3 viser, hvordan regnvarigheden påvirker den logistiske funktions præstation i forhold til MIKE FLOOD, hvor nogle af cellerne har en bedre præstation ved lave regnvarigheder, mens

andre præsterer bedre ved en høj regnvarighed. Figur 8.3 viser, at de regnvarigheder, hvor de logistiske funktioner præsterer bedst for de udvalgte celler er henholdsvis 15, 43 og 340 minutter. Ved disse regnvarigheder har de logistiske funktioner en fejlvarslingsprocent på 8%, 0% og 16%.

Figur 8.4 viser fejlvarslingsprocenten for alle de oversvømmede celler for den logistiske funktion i forhold til resultaterne fra MIKE FLOOD.



Figur 8.4. De logistiske funktioners fejlvarslingsprocenter i forhold til MIKE FLOOD modellen for hver celle.

Figur 8.4 viser, at de logistiske funktioner i cellerne har varierende fejlvarslingsprocenter i forhold til MIKE FLOOD modellen.

Hvis man sammenligner med figur 7.2, fremgår det, at de celler, som oversvømmes få gange har en lav fejlvarslingsprocent, mens de celler, som ofte oversvømmer har en relativ højere fejlvarslingsprocent på omkring 50%. Dette skyldes, at der i cellerne med mange hændelser over terræn, bliver varslet endnu flere hændelser over terræn ifølge de logistiske funktioner, da de allerede varsler imod oversvømmelse ved en sandsynlighed på 0,01%. Dette skyldes at korrelationen imellem vandniveau og middelintensitet, ikke entydigt kan afgøre om en given middelintensitet over en specifik regnvarighed i en regnhændelse, fører til vand på terræn.

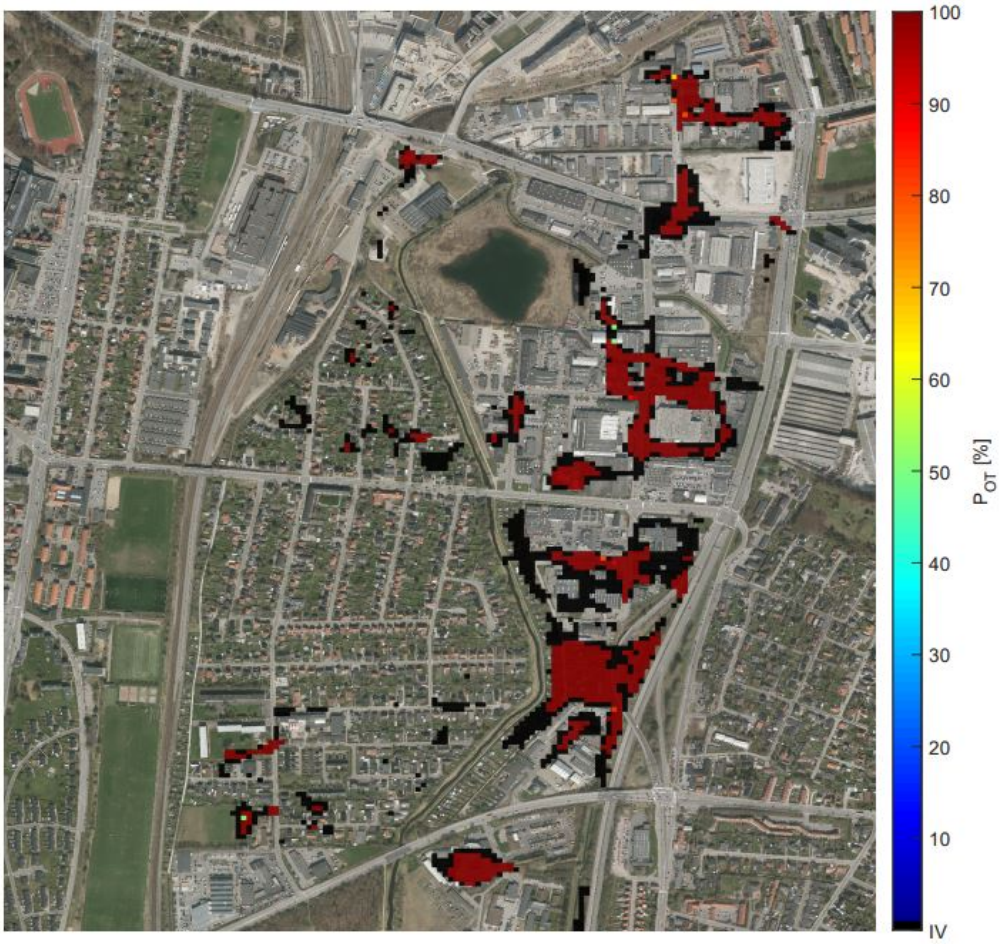
8.2.1 Validering

Validering foretages ved at simulere regnhændelserne fra den historiske regnserie 5061 igennem MIKE FLOOD, og derefter kategoriserer hændelserne i forhold til under og over terræn. Herefter opdeles hver regnhændelse i middelintensiteter over forskellige regnvarigheder, og anvendes som input i de logistiske funktioner i cellerne. Hver celle har en optimeret regnvarighed, hvorved modellen præsterer bedst, hvorfor middelintensiteten over den optimerede regnvarighed er input i den respektive celle. Dermed kan de logistiske funktioner beregne om en given regnhændelse resulterer i oversvømmelse i afløbssystemet ud fra valideringsresultaterne. Derefter sammenlignes resultaterne fra MIKE FLOOD modellen med resultaterne fra de logistiske funktioner. Valideringen foretages ved at bestemme om de logistiske funktioner varsler imod de oversvømmelser, som MIKE FLOOD modellen viser med den historiske regnserie 5061 som input. Bestemmelsen af dette vises ved hjælp af tabel 8.1, som er et tænkt eksempel for MIKE FLOOD modellen i forhold til den logistiske funktion for en celle. Valideringen for cellen bestemmes ved at tage de 400 regnhændelser, som både er over terræn i MIKE FLOOD modellen og den logistiske funktion og dividere med antallet af hændelser over terræn ifølge MIKE FLOOD, hvilket er 420 hændelser. Præstationen over terræn for cellen bliver dermed 95%. Præstationen over terræn vil i rapporten blive beskrevet som P_{OT}.

Validering		**MIKE FLOOD modellen**	
		Under terræn (5050)	Over terræn (420)
Logistisk funktion	Under terræn	5000	20
	Over terræn	50	400

Tabel 8.1. Eksempel for MIKE FLOOD i forhold til den logistiske funktion.

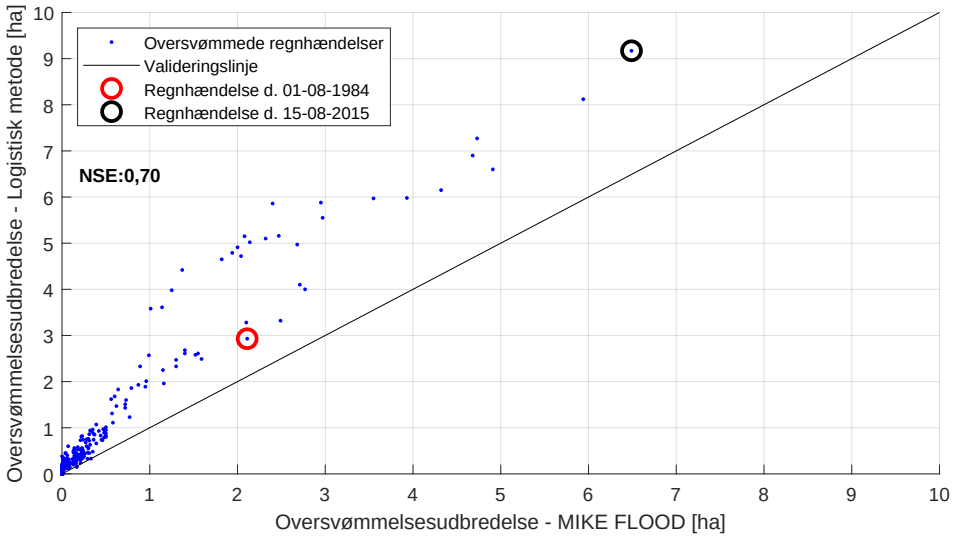
De logistiske funktioners præstation over terræn, P_{OT}, for cellerne i projektområdet er vist på figur 8.5.



Figur 8.5. Dee logistiske funktioners evne til at modellere de samme hændelser over terræn, som MIKE FLOOD simuleringerne ved anvendelse af den historiske regnserie 5061. IV = Ikke validering.

Figur 8.5 viser, at de logistiske funktioners præstation over terræn er 100% for alle cellerne i projektområdet med undtagelse af et par stykker. Dermed vil de logistiske funktioner altid varsle, hvis der forekommer oversvømmelse i cellerne, hvorved de kan anvendes til varslingen af fremtidige oversvømmelser. De logistiske funktioners evne til at varsle imod de oversvømmelser, som MIKE FLOOD modellen viser er i gennemsnit 98%. De sorte celler på figur 8.5, er celler, som ikke kan valideres med regnserien 5061. Dette skyldes, at valideringstidsserien - SVK 5061 - ikke giver anledning til oversvømmelse i disse celler, mens SVK målerne, der anvendes til opbygning af de logistiske funktioner, giver oversvømmelse. Dette skyldes, at der optræder nogle enkelte hændelser, som giver større oversvømmelsesudbredelse i 5049, 5052, 5054 og 5058 end i SVK 5061.

En anden måde at analysere præstationen af de logistiske funktioner, er ved at undersøge oversvømmelsesudbredelsen af de oversvømmelsesgivende hændelser. På figur 8.6 fremgår forskellen på oversvømmelsesudbredelsen fra MIKE FLOOD simuleringerne og de logistiske funktioner. Desuden markeres de valideringshændelser, der anvendes som eksempler på validering af modellen igennem rapporten.

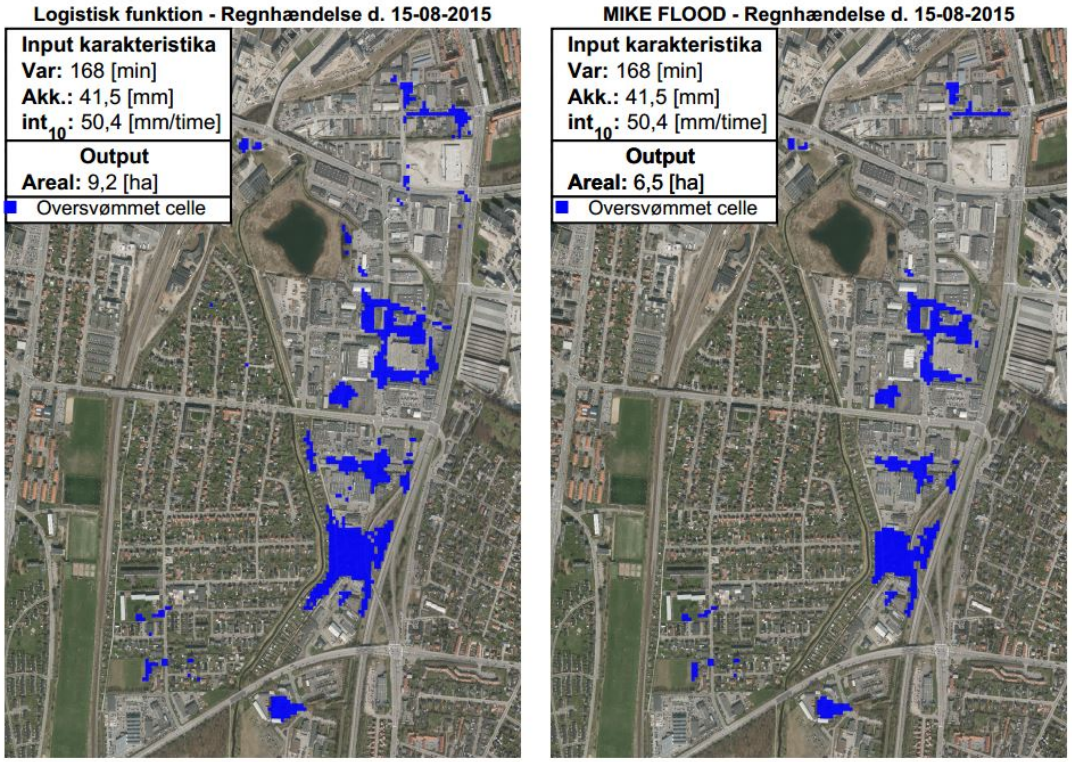


Figur 8.6. Oversvømmelsesudbredelse af præsimulerede MIKE FLOOD resultater kontra de logistiske funktioners beregnede oversvømmelsesudbredelse af de samme hændelser. De viste oversvømmelsesgivende hændelser stammer fra SVK 5061, som de logistiske funktioner ikke er trænet efter og derfor betragtes som uafhængig data

Det fremgår af figur 8.6 , at de logistiske funktioner overestimerer oversvømmelsesudbredelsen i forhold til MIKE FLOOD simuleringerne. Dette skyldes, at de logistiske funktioner varsler efter en sandsynlighed på 0,01%, hvorved mange hændelser, som ifølge MIKE FLOOD, er under terræn, varsles som en oversvømmelse. Der er således en del fejlvarslinger, hvilket resulterer i overestimeret oversvømmelsesudbredelse. I SVK 5061 er der 280 regnhændelser, som resulterer i oversvømmelse og 5829 regnhændelser, som ikke gør. Ud af de 280 regnhændelser, som MIKE FLOOD modellen modellerer oversvømmelse ved, modellere de logistiske funktioner 278 af de hændelser over terræn, svarende til 99,2%. Disse to regnhændelser, som de logistiske funktioner burde modellere oversvømmelse ved, har i gennemsnit en oversvømmelsesudbredelse på 0,01 hektar med en spredning på 0 hektar. Der er dermed kun tale om oversvømmelse i én beregningscelle, som de logistiske funktioner ikke varsler imod. I forhold til de 5829 regnhændelser, som MIKE FLOOD modellen ikke modellere oversvømmelse ved, modellere de logistiske funktioner oversvømmelse ved 153 regnhændelser, svarende til 2,6%. Disse 151 regnhændelser har i gennemsnit en oversvømmelsesudbredelse på 0,047 hektar med en spredning på 0,055 hektar. Der er altså i gennemsnit tale om 0-10 beregningsceller, som de logistiske funktioner modellerer oversvømmelse ved, som ikke, ifølge MIKE FLOOD modellen, giver anledning til oversvømmelse. Disse 153 regnhændelser betyder også, at der i alt varsles oversvømmelse for 431 regnhændelser ifølge de logistiske funktioner. Derved er der 35% flere regnhændelser, som resulterer i oversvømmelse ifølge de logistiske funktioner end ved MIKE FLOOD modellen.

Figur 8.7 og figur 8.8 viser, hvordan den logistiske funktion præsterer i forhold til MIKE FLOOD modellen ved to regnhændelser(markeret på figur 8.6), som resulterer i oversvømmelse. Disse to regnhændelser er valgt for at vise, hvordan den logistiske funktion præsterer ved en regnhændelse med et lille oversvømmet areal og en med et stort oversvømmet areal.

Figur 8.7. Eksempel på de logistiske funktioners evne til, at modellere en regnhændelse observeret af SVK 5061 d. 01-08-1984



Figur 8.8. Eksempel på de logistiske funktioners evne til, at modellere en regnhændelse observeret af SVK 5061 d. 15-08-2015.

Det fremgår af figur 8.7 og 8.8, at de celler, som oversvømmer ifølge MIKE FLOOD modellen,

også oversvømmer ved de logistiske funktioner. Derudover viser figurene også, at de logistiske funktioner modellerer oversvømmelse i flere celler end MIKE FLOOD modellen. Dette fremgår også i oversvømmelsesudbredelsen, hvor den ene hændelse varsler 0,8 ha for meget, og den anden varsler 2,7 ha for meget.

Realtidsmodellen med baggrund i logistiske funktioner modellerer oversvømmelse i projektområdet ved de samme hændelser som MIKE FLOOD modellerer oversvømmelse ved. Modellen modellerer til gengæld oversvømmelse ved for mange regnhændelse, end der oversvømmer i MIKE FLOOD modellen. Hvis denne realtidsmodel implementeres i varslingssystemet, vil det derfor resulterer i, at de berørte borgere varsles imod en fremtidig regnhændelse, som ikke reelt fører til oversvømmelse. Dette kan potentielt forårsage, at de berørte borgere mister tiltroen til varslingssystemet, da de ofte vil foretage foranstaltninger uden nytte. De logistiske funktioner kan beregne responsen i systemet på fem sekunder, hvorfor metoden kan beregne i realtid.

Da de logistiske funktioner indeholder relativt mange fejlvarslinger, forsøges det at anvende neurale netværk til udarbejdelsen af realtidsmodellen. De mange fejlvarslinger skyldes, at sammenhængen imellem oversvømmelse i en celle og middelintensiteten ikke entydigt kan afgøre om der forekommer oversvømmelse ud fra en given middelintensitet. Dette kan potentielt imødekommes ved anvendelse af flere inputparametre. Dette er muligt i et neuralt netværk, som kan finde mønstre imellem flere inputparametre i form af regnkarakteristika for regnhændelserne. Dette undersøges nærmere i næste kapitel.

Realtidsmodel - Neuralt netværk 9

I dette kapitel udarbejdes to realtidsmodeller ved brug af neurale netværk. Der udarbejdes dels et netværk med det formål at modellere oversvømmelsesudbredelsen ud fra forskellige regnhændelser, og dels et netværk med formålet at modellere vandniveauet samt oversvømmelsesudbredelsen ud fra forskellige regnhændelser, se hhv. afsnit 9.2 og 9.3. De neurale netværk opbygges af data fra SVK 5049, 5052, 5054 og 5058. For at validere modellen og vurdere modellens egnethed i at modellere fremtidige regnhændelser, modelleres hændelserne fra SVK 5061 igennem netværket.

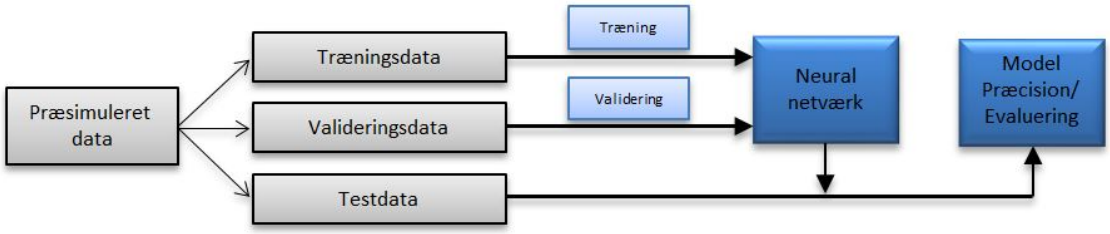
Neurale netværk består i at træne et netværk af matematiske algoritmer til at genkende et givent mønster. I denne rapport forsøges det at genkende de regnhændelser, som fører til oversvømmelse i projektområdet. Til dette formål har netværket brug for observationer, der beskriver om en given regnhændelse fører til oversvømmelse. Disse observationer kaldes *target* og består af de præsimulerede MIKE FLOOD resultater fra afsnit 7. Udover target opbygges netværket af *input*, som skal være korreleret med target. Inputs, der er korreleret til oversvømmelse, er værdier som hændelsesvarigheden, akkumuleret nedbør, samt middelintensiteter over forskellige regnvarigheder af regnhændelserne. Det neurale netværk trænes med input og target, for at lære hvordan disse regnkarakteristika er korreleret med oversvømmelser i projektområdet.

Det neurale netværk består af algoritmer, som søger den mindste fejl, målt i MSE, imellem output af netværket og targetværdierne. Mean Square Error, MSE, anvendes som evalueringsparameter i modelen, da denne parameter straffer store fejl mere end eksempelvis Mean Absolut Error gør. Dette skyldes, at fejlen imellem modelleret og observeret data er i anden potens. Denne evalueringsparameter sikrer således i højere grad, at store afvigelser fra target undgås, idet det resulterer i en dårlig performance/evaluering af netværket.

Et fænomen, der kan være problematisk for et neuralt netværk, er *overfitting*. Overfitting betyder, at det neurale netværk ikke er i stand til at modellere et præcist output ud fra datinput som er uafhængig af træningsdataet, men derimod har en høj præcision på det data, som netværket trænes efter. Dette er problematisk i denne rapport, da det neurale netværk har til formål at varsle imod en ukendt fremtidig regnhændelse, som fører til oversvømmelse. Hvis netværket ikke er i stand til at beregne et præcist output ud fra ukendt data, er modellen værdiløs i forhold til at varsle imod oversvømmelse af endnu ukendte regnhændelser. Denne problemstilling undgås ved af foretage løbende validering. Netværket valideres med uafhængig data efter hver iteration af træningen, og forhindrer yderligere træning af netværket, såfremt fejlen bliver større i valideringen, mens træningen stadig forbedres. Hvis fejlen imellem output og target bliver større i valideringen og samtidig falder i træningen, kan det nemlig være et tegn på, at modellen er ved at overfitte. Der er således en balance imellem at have et godt trænet netværk, og et netværk, som kan modellere andre hændelser, end dem netværket er trænet efter.

Efter netværket er færdigtrænet, findes præcisionen af modellen, ved at køre den færdige model igennem med uafhængig data i forhold til træningsdataet, dette kaldes *testdata*. Til udarbejdelsen af det neurale netværk opdeles de præsimulerede resultater i tre dele. En del til træning, en del til validering og den sidste del til test. Et rutediagram over fremgangsmåden til at udarbejde et

neuralt netværk fremgår af figur 9.1.



Figur 9.1. Fremgangsmåde i modellering af neural netværk.

Måden datasættet opdeles imellem træning, validering og test, har betydning på resultatet. Hvis eksempelvis træningsdataet ikke indeholder nogen regnhændelser, som resulterer i oversvømmelse, trænes netværket kun efter hændelser under terræn, og får derfor svært ved at modellere oversvømmelsesgivende hændelser. Der anvendes en inddeling på 70% til træning, 15% til validering og 15% til test.

9.1 Træning og validering af det neurale netværk

Træningen og valideringen af det neurale netværk er selve kernen i netværket og består af de træningsalgoritmer, der finder sammenhængen imellem input og target. Der findes et væld af forskellige algoritmer til at finde en løsning, som giver den mindste fejl imellem modeloutput og target. I denne rapport er netværkets træningsalgoritme Levenberg-Marquardt backpropagation, som først finder en løsning via forward propagation og efterfølgende mindsker fejlen, i forhold til MSE via backpropagation.

Dette gøres ved en fremadrettet beregning, som søger en løsning fra input til target ved at give neuronerne i de forskellige skjulte lag vægte, biaser og frihedsgrader, for at tilpasse targetværdierne. Efter den fremadrettet beregning i den første iteration, benyttes backpropagation til at mindske fejlen imellem output og target. Modellen minimerer fejlen efter hver iteration, indtil et givent stopkriterie bliver mødt for at undgå overfitting.

Stopkriterier evalueres i forhold til fejlen imellem modeloutput og targetværdierne bestemt ud fra valideringsdatasættet. Et eksempel på et stopkriterie er fejlende valideringstjek, som betyder, at modellen stoppes hvis MSE i valideringen stiger i en række iterationer i træk. I denne model sættes antallet af fejlede valideringstjek til 6, hvorefter modellen antager, at forøgelsen af MSE og dermed forringelse af modellen, ikke længere er tilfældigt og forhindrer derfor yderligere iterationer.

9.1.1 Input

De fire SVK regnserier, som danner grundlag for modellen indeholder 16.954 hændelser hvoraf 1.144 fører til oversvømmelse. Modellen trænes ud fra 70%, valideres med 15% og testes med 15%, svarende til hhv. 11.868, 2.543 og 2.543 hændelser af de fire SVK regnserier, der danner grundlaget for det neurale netværk.

Som det fremgår af figur 7.2, oversvømmes nogle gridceller flere gange end andre, mens andre gridceller slet ikke oversvømmes, når de fire SVK-målere simuleres igennem MIKE FLOOD modellen. For at opbygge en realtidsmodel af de præsimulerede data, som hurtigt og præcist kan varsle en potentiel oversvømmelse ved brug af neural netværk, udarbejdes et neuralt netværk for hver oversvømmet gridcelle. Der er 1.898 gridceller, svarende til omkring 19 hektar, hvor der

opstår oversvømmelse ved simulering af de fire SVK målere 5049, 5052, 5054 og 5058, hvilket betyder at der skal udarbejdes 1.898 unikke neurale netværk, som til sidst samles i én model, som kan beregne responsen i systemet ud fra karakteristika af en prognosticeret regnhændelse, i realtid. Hændelser, som MIKE FLOOD simulerer under 2 centimeter anses ikke for at være en oversvømmelse.

For at modellen kan modellere hændelser, som ikke resulterer i oversvømmelse, skal modellen trænes for såvel hændelser under terræn som over. Derfor medtages alle hændelser for de fire SVK målere til opbygningen og træningen af netværket. De hændelser, som ikke giver oversvømmelse får en værdi på -1, mens værdier over terræn får en værdi på 1. Et neuralt netværk kan, afhængig af hvilke data der trænes på, være følsom overfor forskellige inputs og struktur af netværket. Hvis modellen får for mange inputparametre og/eller for mange neuroner og skjulte lag, vil den have større risiko for at "overfitte".

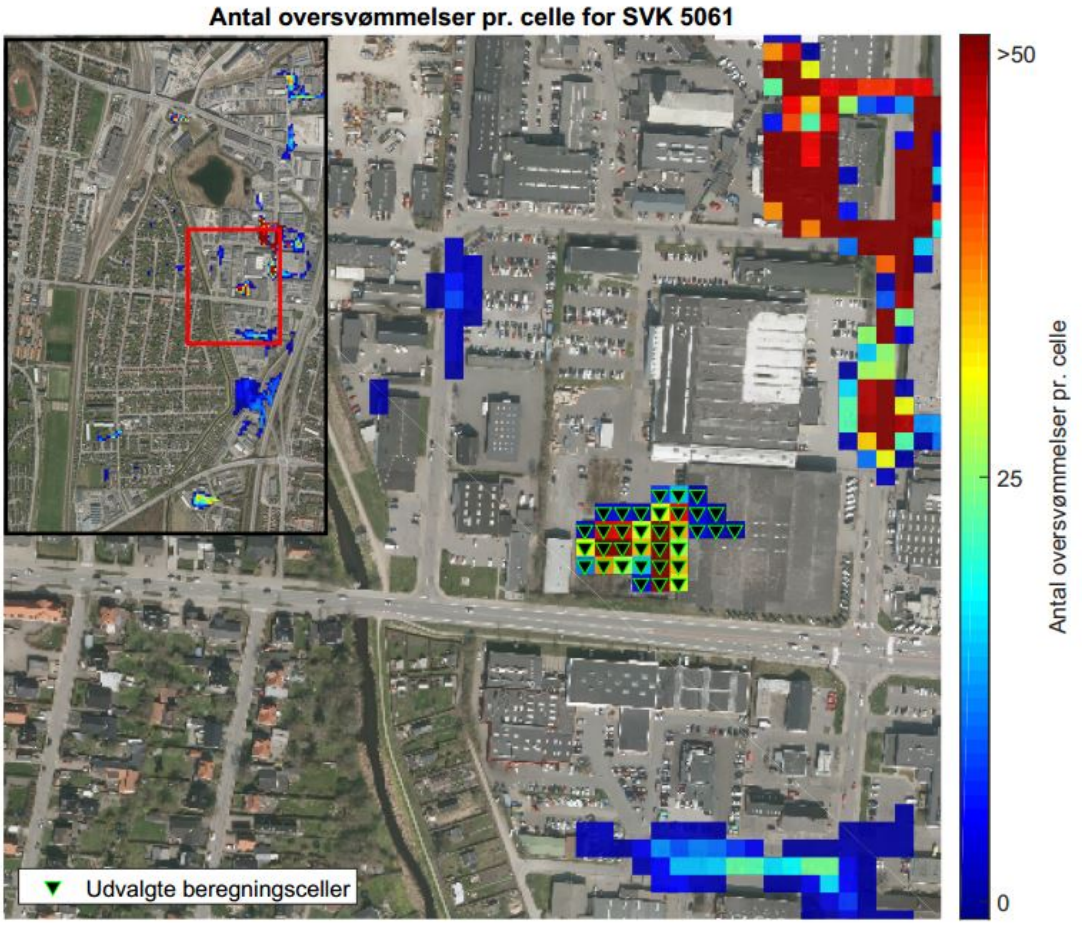
Da opbygningen af det neurale netværk og inputtet dertil er af stor betydning på modellens respons og præcision, forsøges med forskellige typer input, samt struktur af netværket. De forskellige strukturer, der undersøges, er netværk med 2, 10 og 20 neuroner i 1, 2 og 3 skjulte lag. Der opbygges neurale netværk for forskellige inputs, dvs. de regnkarakteristika, som agerer input i modellen for hver regnhændelse. Fælles for inputtene er, at alle består af hændelsesvargheden og akkumuleret nedbør. Herudover medtages middelintensiteter over forskellige regnvarigheder af regnhændelserne, disse fremgår af tabel 9.1.

Inputnavn	**I_{var} [min]**		**Antal inputs**
$Input_{1,120min}$	1	45,60:30:120	7
$Input_{1:15,120min}$	1:1:15	45, 60:30:120	21
$Input_{1:45,120min}$	1:1:45	60:30:120	50
$Input_{1,720min}$	1	45, 60:30:720	27
$Input_{1:15,720min}$	1:1:15	45, 60:30:720	41
$Input_{1:45,720min}$	1:1:45	60:30:720	70

Tabel 9.1. Input til det neurale netværk, som består af hændelsvarigheden, akkumuleret nedbør, samt middelintensiteter over forskellige regnvarigheder af regnhændelsen, I_{var}.

Som det fremgår af tabellen, undersøges forskellige inputs, hvor inputtene i de første 3 rækker anvender inputdata for de første 2 timer, med forskellige intervaller i middelintensiteterne op til regnvarigheder på 45 minutter. De efterfølgende 3 rækker anvender middelintensiteter af regnhændelserne op til regnvarigheder på 12 timer med samme intervaller i middelintensiteter op til 45 minutter. Hvis inputtet eksempelvis er $Input_{1,120min}$ og modellen performer godt ud fra dette, betyder det, at en fremtidig regnhændelse kan beregnes med høj præcision ud fra akkumuleret nedbør, hændelsesvarigheden, samt værdier for middelintensiteter over regnvarigheder på 1, 45, 60, 90 og 120 minutter af hændelsen.

De forskellige inputs har til formål at finde den ideelle struktur af netværket, således det mest optimale netværk kan udarbejdes. Der udvælges et område i projektområdet, hvor den løsning med den mindste fejl mellem output og target for det neurale netværk bestemmes. Området vælges, da det er beregnings -og tidskrævende at modellere samtlige celler i projektområdet. Da netværket afslutningsvis valideres med data fra SVK 5061, udvælges området efter de beregningsceller, som oversvømmer via SVK 5061, se figur 9.2.



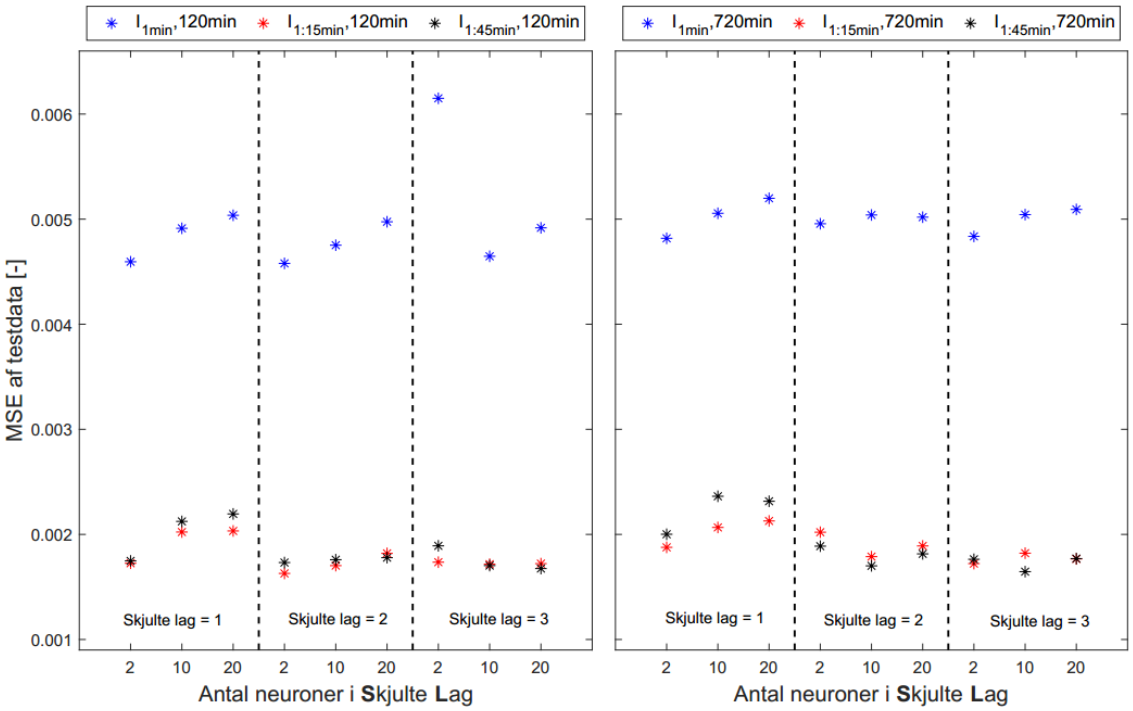
Figur 9.2. Udvalgt testområde, til analyse af struktur og inputs til det neurale netværk. Desuden fremgår antal oversvømmede celler ifølge MIKE FLOOD simuleringer af SVK 5061.

Testområdet fremgår af figuren og indeholder 34 celler. Først udarbejdes et neuralt netværk, som har formålet at beregne oversvømmelsesudbredelsen i realtid ud fra regnkarakteritika.

9.2 Realtidsmodel via neuralt netværk for oversvømmelsesudbredelse

Dette netværk udarbejdes ved at omdanne vandniveauerne større end 2 centimeter til 1 og vandniveauer under 2 centimeter til -1. De hændelser som ikke fører til oversvømmelse får tilmed -1 som targetværdi.

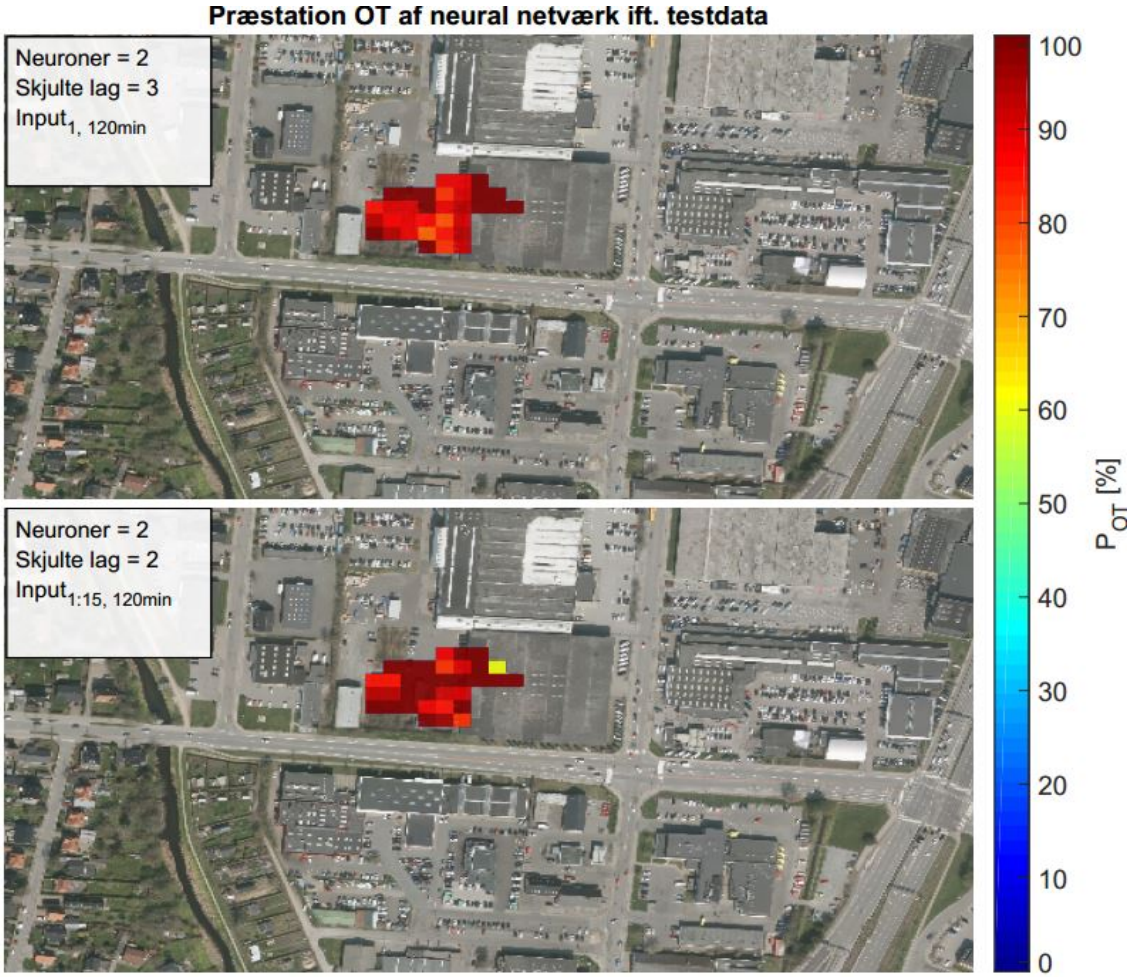
Der udarbejdes neurale netværk for hver input og netværksstruktur beskrevet i afsnit 9.1.1, inputene fremgår af tabel 9.1. Ved at tage gennemsnittet af MSE på testdataet, af de respektive neurale netværk, af de 34 celler i testområdet, kan det mest optimale netværk findes. Herudover kan følsomheden af strukturen af og inputtet til netværket tilmed undersøges, se figur 9.3



Figur 9.3. Fejlen fra modeloutput til targetværdi af testdataet, målt i MSE. Der tages gennemsnit af de 34 celler i testområdet.

Figur 9.3 viser, at $\text{Input}_{1,120\text{min}}$ og $\text{Input}_{1,720\text{min}}$ giver højere MSE på 0,005 og dermed et dårligere netværk end de resterende inputs på omkring 0,002 MSE, uagtet strukturen af netværket. Betydningen af denne forskel på omkirng 0,003 MSE kan være svær at afgøre i forhold til netværkenes evne til at modellere oversvømmelsesgivende hændelser korrekt, dette undersøges i det følgende. Herudover fremgår det, at forskellen fra inputs med middelintensiteter op til regnvarigheder på 120 minutter i forhold til regnvarigheder op til 720 minutter er lav. Dette betyder i praksis, at netværket ikke performer bedre ved at tilføje flere inputværdier i form af flere middelintensiteter over længere varigheder. Middelintensiteter op til 2 timer er tilstrækkeligt. Det fremgår tilmed, at det bedste netværk består af 2 neuroner i 2 skjulte lag med input lig $\text{Input}_{1:15,120\text{min}}$.

For at undersøge hvilken betydning en forskel i MSE på 0,003 har på modelresultatet, undersøges det bedste og dårligste netværk fra figur 9.3. Det vigtigste for netværkene er, at de modellerer oversvømmelse ved de samme hændelser, som MIKE FLOOD simuleringerne beregner oversvømmelse ved. Derfor sammenlignes netværkene i forhold til hvor mange procent hvert netværk i hver celle rammer hændelser over terræn korrekt. Hvis en celle eksempelvis oversvømmes 10 gang i forhold til testdataets targetværdier, men det neurale netværk i cellen modellerer oversvømmelse 8 gange, opnår cellen en præstation over terræn på 80%. De to udvalgte netværksstrukturers evne til at modellere hændelser over terræn korrekt, fremgår af figur 9.4.



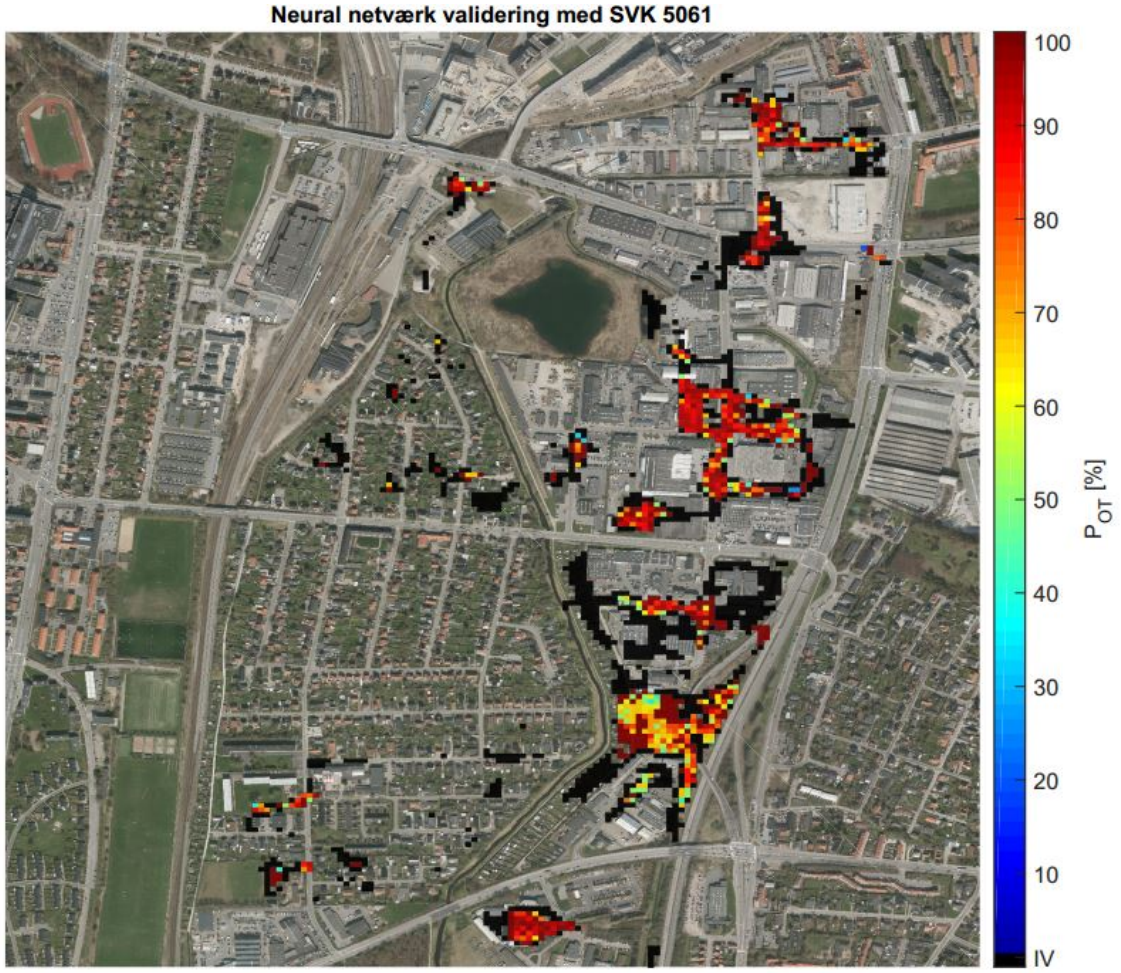
Figur 9.4. Præstation over terræn af 2 forskellige neurale netværk for de udvalgte celler i testområdet.

Figur 9.4 viser, at den netværksstruktur og input, som giver den højeste MSE i forhold til testdata tilmed giver den ringeste præcision i forhold til at modellere hændelser over terræn. Denne netværksstruktur og input giver færre rigtige modellerede hændelser over terræn end den netværksstruktur og input, som giver de laveste MSE værdier og dermed den bedste model i forhold til figur 9.3. En forskel på 0,003 MSE viser sig således at betyde en del for antallet af hændelser over terræn, som det neurale netværk modellere korrekt. Det fremgår desuden, at strukturen med 2 neuroner i 2 skjulte lag med $\text{Input}_{1:15,120\text{min}}$ rammer størstedelen af cellerne tætved 100% korrekt i forhold til hændelser over terræn.

Det bedste netværk er fundet i forhold til struktur og input. For yderligere at vurdere netværkets evne til at gengive de samme oversvømmelsesudbredelser som MIKE FLOOD simuleringerne, simuleres netværket med input af SVK 5061 i det følgende.

9.2.1 Validering

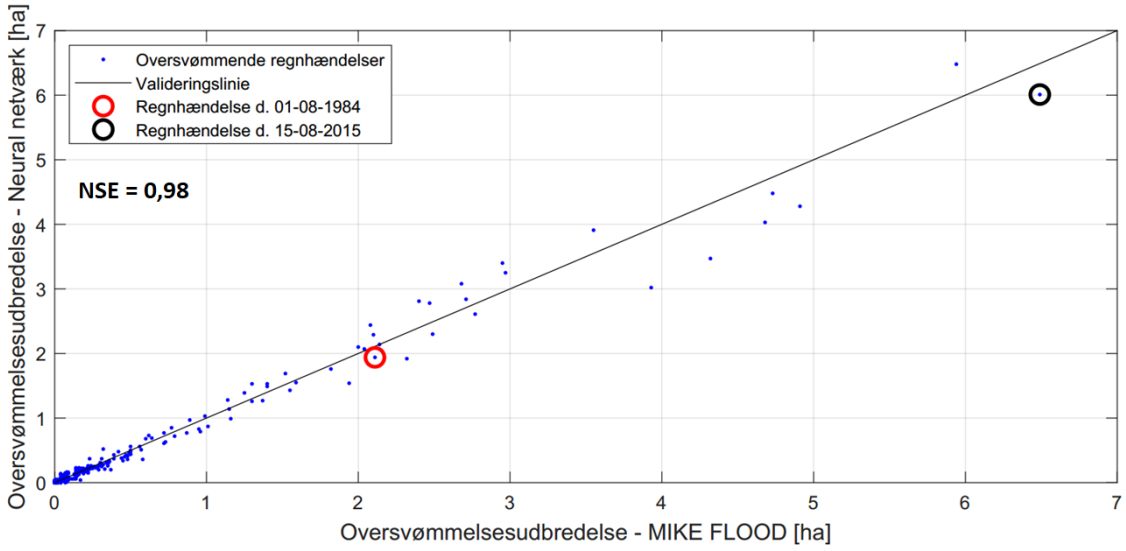
Samtlige oversvømmelsesgivende celler for de 4 SVK målere, som modellen opbygges efter, modelleres med det neurale netværk bestående af 2 neuroner i 2 skjulte lag med $\text{Input}_{1:15,120\text{min}}$, da testdataet resulterede i den mindste MSE imellem modeloutput og target. Dette netværk valideres ud fra uset data i form af SVK 5061. Samtlige cellers præstation i forhold til hændelser over terræn, fremgår af figur 9.5.



Figur 9.5. Det neurale netværks evne til at modellere de samme hændelser over terræn, som MIKE FLOOD simuleringerne af SVK 5061. IV = Ikke Validereret.

Som det fremgår af figur 9.5, præsterer langt de fleste celler godt, med en præcision op mod 100%. Dette betyder, at de fleste celler modellerer de samme hændelser over terræn, som de præsimulerede MIKE FLOOD simuleringer af SVK 5061. De sorte celler, betyder at cellen ikke kan valideres med SVK 5061. Dette skyldes, at valideringstidsserien - SVK 5061 - ikke giver anledning til oversvømmelse i disse celler, mens SVK målerne, der anvendes til opbygning af det neurale netværk, giver oversvømmelse. Dette skyldes at der optræder nogle enkelte hændelser, som giver større oversvømmelsesudbredelse i 5049, 5052, 5054 og 5058 end i SVK 5061.

En anden måde at analysere præstationen af det neurale netværk, er ved at undersøge oversvømmelsesudbredelsen af de oversvømmelsesgivende hændelser. På figur 9.6 fremgår forskellen på oversvømmelsesudbredelsen fra MIKE FLOOD simuleringerne og det neurale netværk. Desuden markeres de valideringshændelser, der anvendes som eksempler på validering af modellen igennem rapporten.



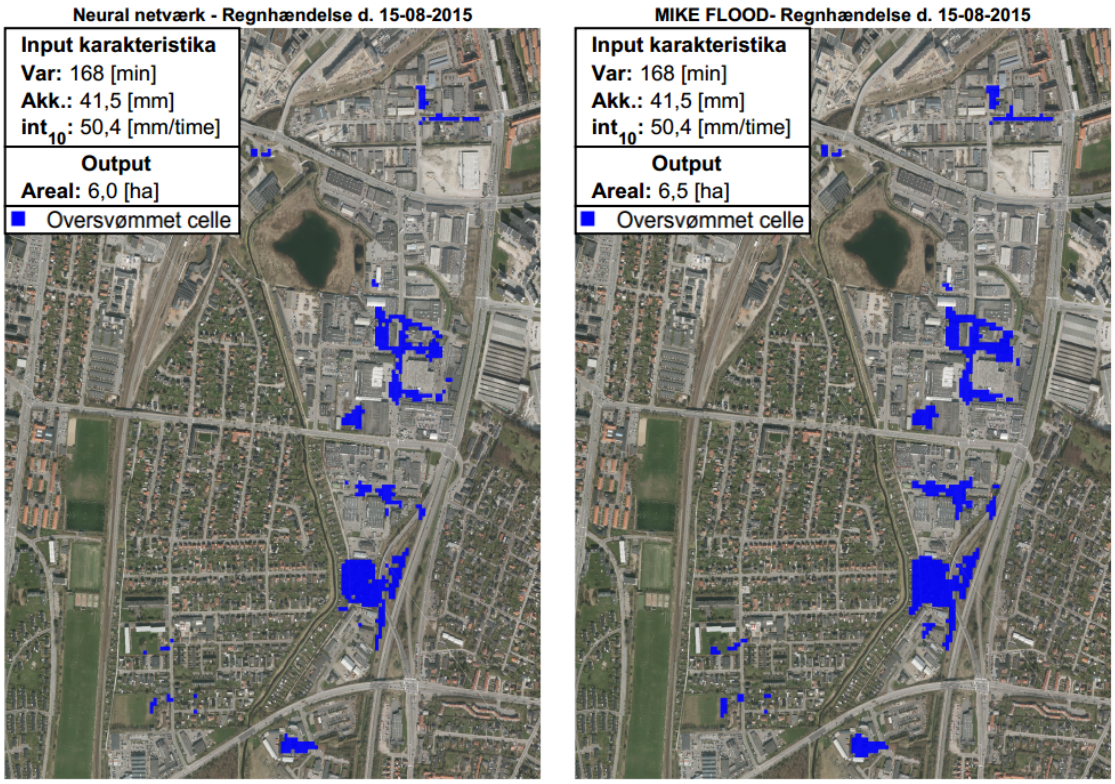
Figur 9.6. Oversvømmelsesudbredelse af præsimulerede MIKE FLOOD resultater kontra det neurale netværks beregnede oversvømmelsesudbredelse af de samme hændelser. De viste oversvømmelsesgivende hændelser stammer fra SVK 5061, som det neurale netværk ikke er trænet efter og derfor betragtes som uafhængig data.

Figur 9.6 viser, at det neurale netværk med høj præcision i forhold til oversvømmelsesudbredelse er i stand til at modellere oversvømmelsesgivende regnhændelser i SVK 5061. En NSE på 0,98 angiver tilmed, at der en en meget lille forskel imellem modelleret oversvømmelsesudbredelse i det neurale netværk i forhold til MIKE FLOOD simuleringerne. I SVK 5061 er der 280 regnhændelser, som resulterer i oversvømmelse og 5829 hændelser, som ikke gør. Ud af de 280 hændelser, som MIKE FLOOD modellen modellerer oversvømmelse ved, modellerer det neurale netværk 249 hændelser over terræn, svarende til 88%. De 31 regnhændelser, som det neurale netværk burde modellere oversvømmelse ved, har en gennemsnitlig oversvømmelsesudbredelse på 0,015 ha, med en spredning på 0,013 ha. Der er altså tale om meget begrænsede oversvømmelsesudbredelser, som det neurale netværk fejler i at modellere. I forhold til de 5829 regnhændelser, som MIKE FLOOD ikke modellerer oversvømmelse ved, modellerer det neurale netværk oversvømmelse ved 8 hændelser, svarende til 0,1%. Disse 8 regnhændelser har i gennemsnit en oversvømmelsesudbredelse på 0,016 ha med en spredning op 0,011 ha. Der er altså i gennemsnit tale om 1-3 beregningsceller, som det neurale netværk modellerer oversvømmelse ved, som ikke, ifølge MIKE FLOOD modellen, giver anledning til oversvømmelse. Generelt vurderes det, at det neurale netværk er i stand til at modellere oversvømmelsesudbredelsen for hændelser over terræn med høj præcision. Det kan konkluderes, at det neurale netværk opbygget af et biassystem, med 2 neuroner i 2 skjulte lag med $\text{Input}_{1:15,120\text{min}}$, stemmer godt overens med MIKE FLOOD modellen, hvorfor det konkluderes at denne metode giver et godt grundlag for at udregne en fremtidig hændelse i realtid.

For at vise eksempler på hvilken respons det neurale netværk er i stand til at give, samt med hvilken præcision, vises de to valideringshændelser, se figur 9.7 og 9.8. De to regnhændelser er udvalgt for at vise, hvordan det neurale netværk præsterer ved en regnhændelse med et lille oversvømmet areal og en med et stort oversvømmet areal.

Figur 9.7. Eksempel på det neurale netværks evne til, at modellere en uset hændelse, her vist for en hændelse observeret af SVK 5061 d. 01-08-1984.

Det neurale netværk stemmer godt overens med MIKE FLOOD simuleringen og der er en forskel i oversvømmelsesudbredelse på 0,2 ha, hvilket svarer til 20 beregningsceller.



Figur 9.8. Eksempel på det neurale netværks evne til, at modellere en uset hændelse, her vist for en hændelse observeret af SVK 5061 d. 15-08-2015.

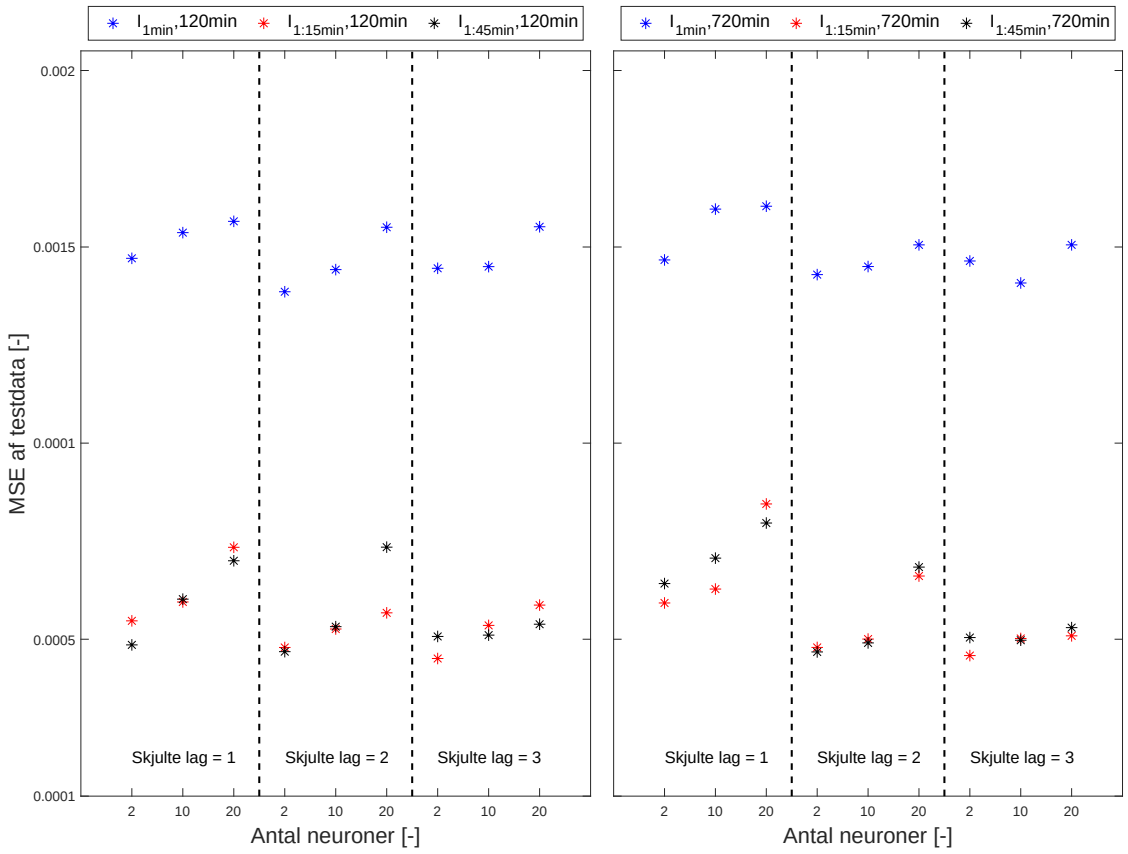
Denne hændelser viser, at det neurale netværk stemmer godt overens med MIKE FLOOD simuleringen med en forskel på 0,5 ha.

Det tager 14 s for det neurale netværk at udregne responsen i systemet ud fra regnkarakteristika i form af $I_{1:15,120\text{min}}$ med 2 neuroner i 3 skjulte lag af en regnhændelse. Overordnet set kan det konkluderes, at det neurale netværk er udmærket at anvende som realtidsmodel til at simulere oversvømmelseudbredelse i realtid, da det beregner responsen hurtig og med en høj præcision. I det følgende udarbejdes neurale netværk, som kan modellere oversvømmelsesudbredelsen samt vandniveauet.

9.3 Realtidsmodel via neuralt netværk for vandniveau

I det følgende udarbejdes et neuralt netværk, som kan beregne om der opstår oversvømmelse ud fra en given regnhændelse, samt i tilfælde af oversvømmelse, bestemme vandniveauet i hver beregningscelle.

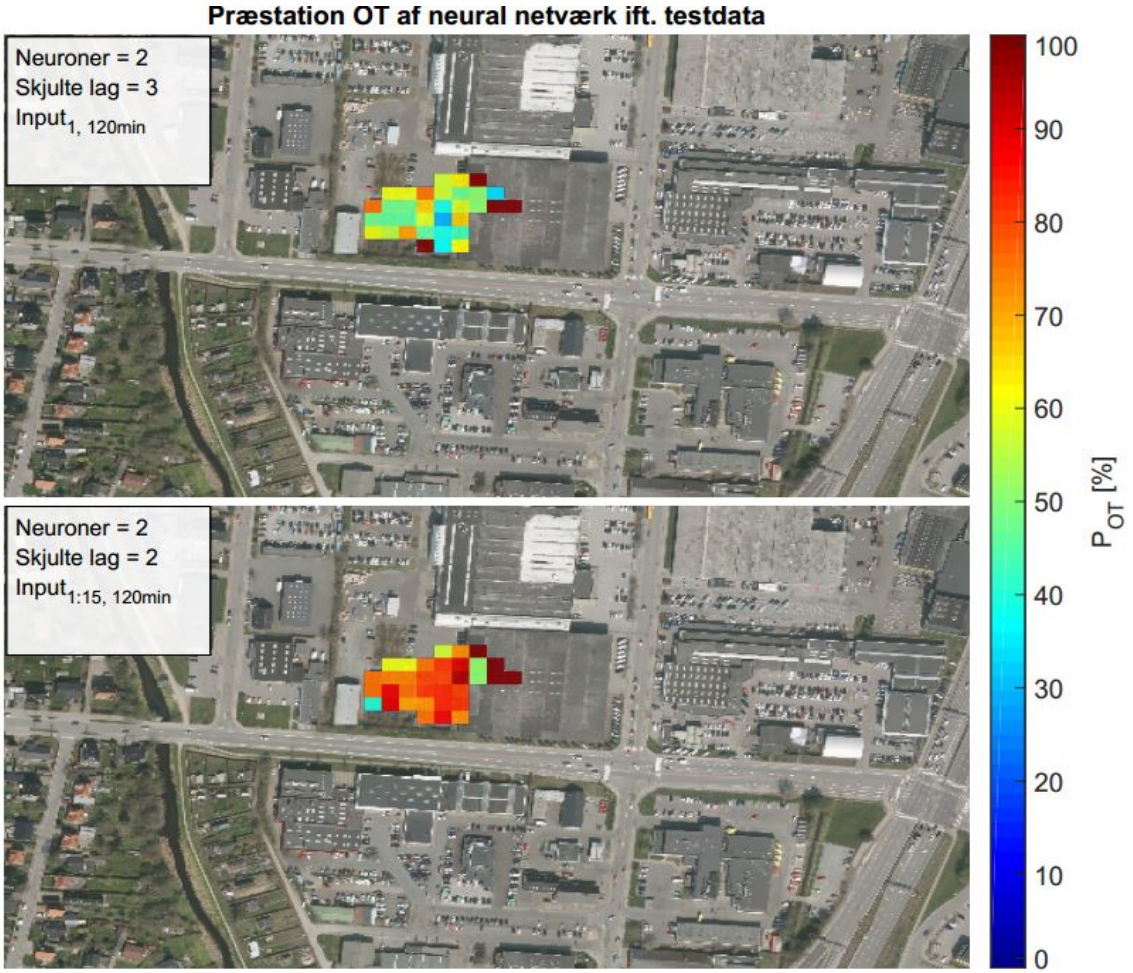
Fremgangsmåden er den samme som beskrevet i afsnit 9.2. Det vil sige, at det samme testområde anvendes til at finde det bedste netværk og de samme strukturer og inputs til de neurale netværk testes. Targetværdien i hver beregningscelle tildeles det simulerede vandniveau fra MIKE FLOOD modellen i forhold til hændelserne over 2 centimeter, mens hændelserne under tildeles værdien -1. På figur 9.9 fremgår forskellige netværks evne til at modellere de hændelser, som ifølge MIKE FLOOD modellen er over terræn. Det vil sige, hvor godt modeloutput passer med targetværdier i forhold til testdataet. For at sammenlignes de neurale netværk udføres træningen, valideringen og testene på de samme hændelser i hvert netværk.



Figur 9.9. Fejlen fra modeloutput til targetværdi af testdataet, målt i MSE. Der tages gennemsnit af de 34 celler i testområdet.

På figur 9.9 fremgår det, at de neurale netværk med $\text{Input}_{1,120\text{min}}$ og $\text{Input}_{1,720\text{min}}$ har en større fejl imellem modeloutput og target, uagtet strukturen af det neurale netværk. Desuden fremgår det, at fejlen generelt mindskes, når der medtages middelintensiteter over mere end én regnvarighed. Dette skyldes, at det primært er middelintensiteter over korte regnvarigheder, der er korreleret til oversvømmelse i projektområdet. Et neuralt netværk med 2 neuroner præsterer generelt bedre end et netværk med 20 neuroner, uagtet antallet af skjulte lag og input.

For at vurdere forskellen ved en fejl på 0,0015 MSE i forhold til en fejl omkring 0,0005 MSE, undersøges to netværks præstation i forhold til at ramme hændelser over terræn, P_{OT}, se figur 9.10.

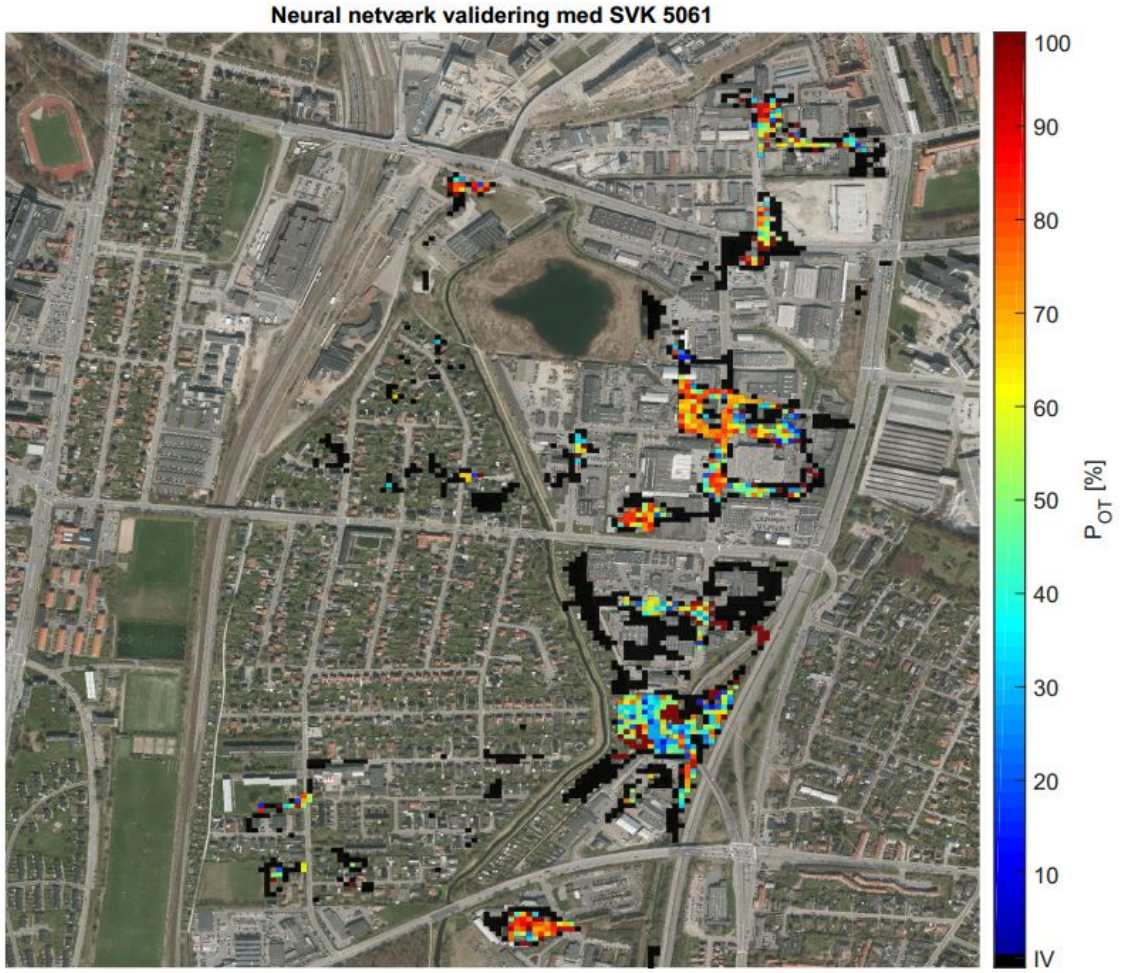


Figur 9.10. Præstation over terræn af 2 forskellige neurale netværk for de udvalgte celler i testområdet.

Figur 9.10 viser, at den relative lille forskel på 0,001 MSE fra et netværk med en høj MSE i forhold til en lav MSE, resulterer i en stor forskel i forhold til præstationen af hændelser over terræn. Det er derfor afgørende at udvælge det rette netværk med det rette input, for at udarbejde det mest optimale netværk. Netværket bestående af 2 neuroner i 3 skjulte lag med $\text{Input}_{1:15,120\text{min}}$ vælges som det mest optimale neurale netværk.

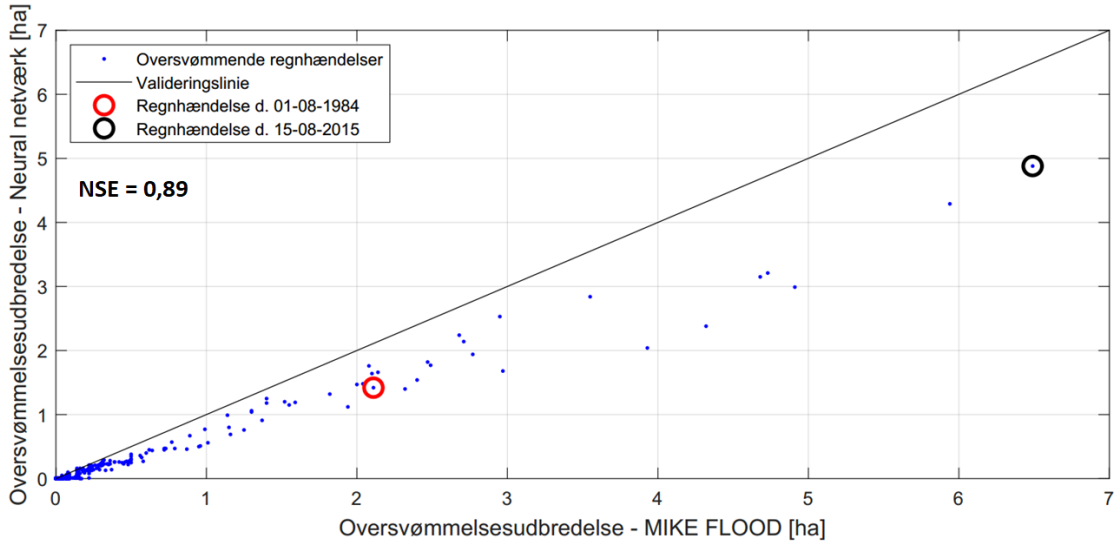
9.3.1 Validering

Valideringen foretages på samme vis som i resten af rapporten, ved at gennemkører hændelserne fra SVK 5061 i modellen. Hver oversvømmet celle i projektområdet modelleres det neurale netværk med 2 neuroner i 3 skjulte lag med $\text{Input}_{1:15,120\text{min}}$. Præstationen på hændelser over terræn, fremgår af figur 9.11.



Figur 9.11. Det neurale netværks evne til at modellere de samme hændelser over terræn, som MIKE FLOOD simuleringerne af SVK 5061. IV = Ikke Validereret.

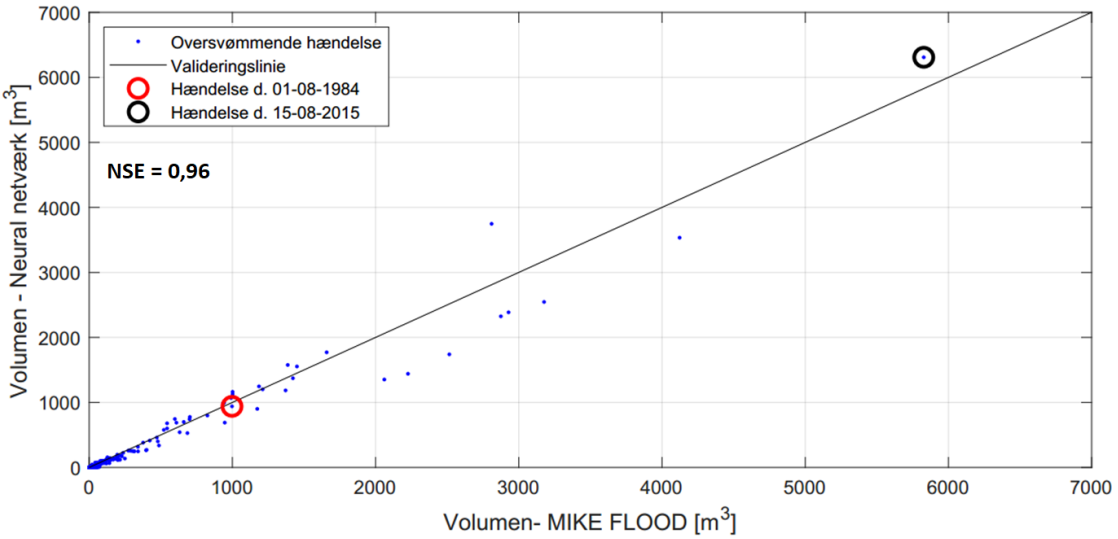
Som det fremgår af figur 9.11, præsterer modellen relativt godt i forhold til at simulere hændelser over terræn, da de fleste celler præsterer omkring 70%. Dette betyder, at det neurale netværk modellerer omkring 70% korrekt af hændelserne over terræn i SVK 5061. For at analysere hvordan det neurale netværk præsterer i forhold til hver hændelse i valideringstidsserien SVK 5061, beregnes oversvømmelsesudbredelsen ved hver hændelse. De modellerede oversvømmelsesudbredelser sammenlignes med oversvømmelsesudbredelserne fra MIKE FLOOD, se figur 9.12.



Figur 9.12. Oversvømmelsesudbredelse af præsimulerede MIKE FLOOD resultater kontra det neurale netværks beregnede oversvømmelsesudbredelse af de samme hændelser. De modellerede oversvømmelsesudbredelser af det neurale netværk, findes ved at simulere netværkene i hver celle igennem med inputkarakteristika fra hændelserne i SVK 5061. Der sammenlignes med de tilsvarende præsimulerede regnhændelser i MIKE FLOOD.

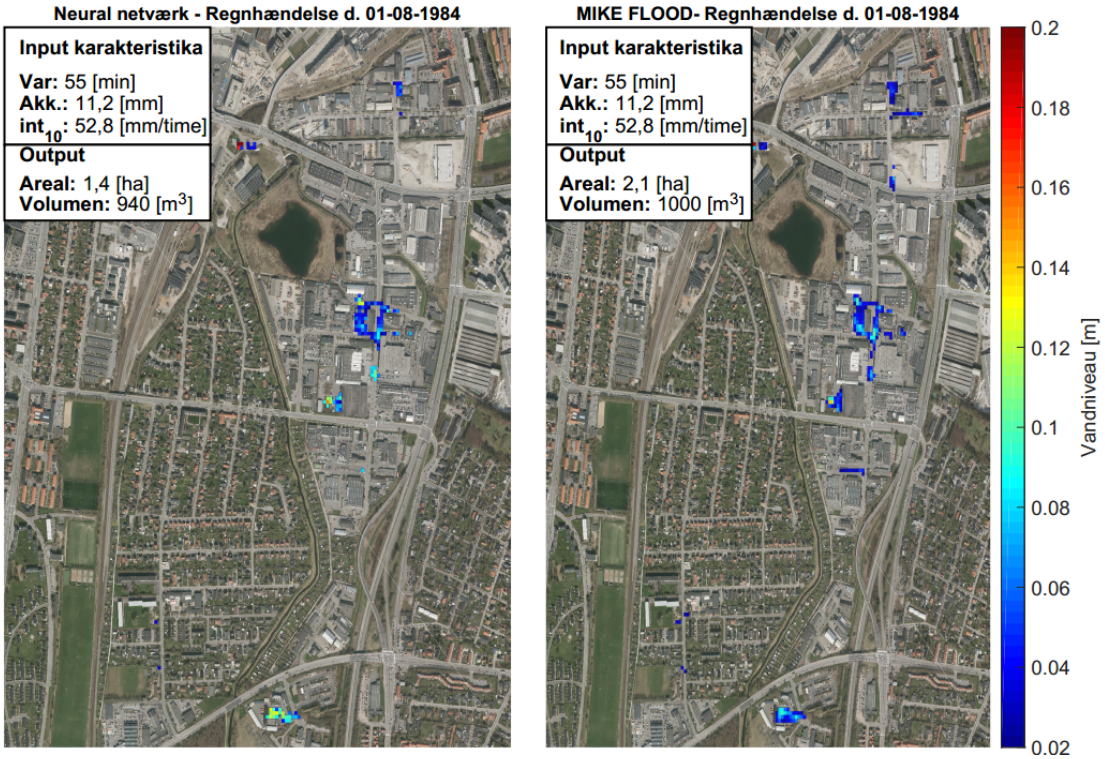
På figur 9.12 fremgår det, at det neurale netværk modellerer mindre oversvømmelsesudbredelse end de præsimulerede MIKE FLOOD simuleringer. NSE på 0,89 vidner tilmed om, at de modellerede oversvømmelsesudbredelser afviger fra de præsimulerede MIKE FLOOD simuleringer. Dette stemmer overens med den procentvise præcision over terræn på figur 9.11. Her fremgår det nemlig, at det neurale netværk ikke rammer alle hændelser over terræn, der er dog store forskelle fra celle til celle. På figur 9.12 fremgår det, at det neurale netværk modellerer oversvømmelse ved de regnhændelser, som fører til store oversvømmelser, det er imidlertid ikke lige så stor en oversvømmelsesudbredelse. Ud af de 280 hændelser, som ifølge MIKE FLOOD giver oversvømmelse, modellerer det neurale netværk oversvømmelse i 204 af dem. Dette betyder, at 76 regnhændelser, svarende til 27% fejlvarsles og varsles dermed heller ikke imod oversvømmelse, såfremt det var prognosticeret nedbør i en varslingsmodel. Disse 76 regnhændelser består dog i gennemsnit af en oversvømmelsesudbredelse på 0,03 ha, svarende til 3 beregningsceller, med en spredning på 0,032 ha. De regnhændelser, der ikke modelleres oversvømmelse ved i det neurale netværk, er altså relative små oversvømmelsesudbredelser. Det neurale netvæk modellerer ingen hændelser over terræn ud af de 5829 regnhændelser, som ikke oversvømmer ifølge de præsimulerede regnhændelser fra SVK 5061.

En anden måde at vurdere det neurale netværk på, er ved at undersøge oversvømmelsesvolumet, se figur 9.13. Præcisionen i vandniveau er vigtigt i forhold til at beredskab iværksætter foranstaltninger i de mest kritiske områder, hvor der kommer til at stå mest vand på terræn.



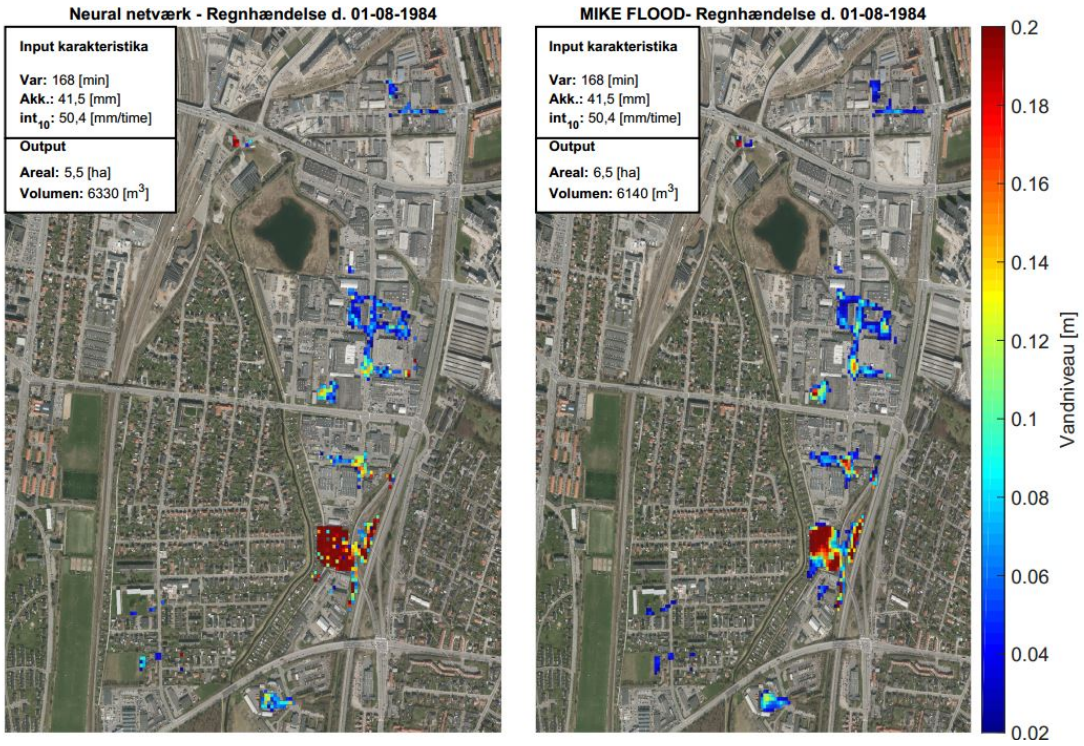
Figur 9.13. Oversvømmelsesvolumen af præsimulerede MIKE FLOOD resultater kontra det neurale netværks beregnede oversvømmelsesvolumen af de samme hændelser. De viste oversvømmelsesgivende hændelser stammer fra SVK 5061, som det neurale netværk ikke er trænet efter.

På figur 9.13 fremgår det, at det neurale netværk modellerer oversvømmelsesvolumen i samme størrelsesorden som MIKE FLOOD simuleringer af de samme hændelser. Når oversvømmelsesvolumen kommer over 2000 m^3, modellere det neurale netværk med større fejl i forhold til præsimuleringerne i MIKE FLOOD. Generelt er der en god overensstemmelse imellem modelleret oversvømmelsesvolumen og præsimuleret oversvømmelsesvolumen i MIKE FLOOD. For at få et visuelt indtryk af hvad fejlen i oversvømmelsesudbredelse samt oversvømmelsesvolumen, betyder for den samlede model, vises de to udvalgte regnhændelser dels ved beregning af neural netværk via inputkarakteristika og dels simulering af hændelserne i MIKE FLOOD, se figur 9.14 og 9.15.



Figur 9.14. Modelleret vandniveau i neural netværk vs. simuleret vandniveau i beregningscellerne i MIKE FLOOD for regnhændelsen observeret d. 01-08-1984 af SVK 5061.

På figur 9.14 fremgår det, at såvel oversvømmelsesudbredelse som vandniveau modelleret i det neurale netværk stemmer overens med oversvømmelsesudbredelsen og vandniveauet simuleret i MIKE FLOOD. Der er en forskel på 0,7 ha i oversvømmelsesudbredelse og 60 m^3 i oversvømmelsesvolumen, hvilket hhv. svarer til 67% og 94%. Det fremgår at det er de samme områder som oversvømmes i begge modeller.



Figur 9.15. Modelleret vandniveau i neural netværk vs. simuleret vandniveau i beregningscellerne i MIKE FLOOD for regnhændelsen observeret d. 15-08-2015 af SVK 5061.

På figur 9.15 fremgår det, at forskellen imellem de to modeller er 1,7 ha i oversvømmelsesudbredelse og 480 m^3 i oversvømmelsesvolumen, hvilket hhv. svarer til 75% og 92% præcision.

På figur 9.14 fremgår det, at en forskel på 0,7 ha oversvømmelsesudbredelse, er svær at få øje på i forhold til den samlede oversvømmelsesvolumen. På figur 9.15 er det tydeligt, at en forskel på omkring 500 m^3 heller ikke viser sig, som en stor afvigelse fra simuleringen i MIKE FLOOD. Det neurale netværk rammer begge hændelser nogenlunde, både hvad angår oversvømmelsesudbredelse og oversvømmelsesvolumen. For begge hændelser gælder det, at det er de samme områder i projektområdet, som oversvømmes ved begge modeller, hvorfor også den stedslige fordeling af oversvømmelsen modelleres præcist.

Overordnet set præsterer det neurale netværk, som er trænet efter præsimuleret vandniveauer fra MIKE FLOOD modellen, godt i forhold til at ramme den samme oversvømmelsesudbredelse samt oversvømmelsesvolumen. Modellen underestimerer oversvømmelsesudbredelsen ved oversvømmelsesgivende hændelser med omkring 30%, men da det typisk er de samme områder, der oversvømmes og det blot er et spørgsmål om udbredelsen, accepteres dette. Ud af valideringstidsserien SVK 5061, er der omkring 30% af de oversvømmelsesgivende hændelser, som det neurale netværk ikke modellerer oversvømmelse ved. Disse 30% består i forhold til MIKE FLOOD af meget små oversvømmelser på 0,03 ha i gennemsnit, hvilket svarer til 3 beregningsceller, hvorfor det ikke opfattes som problematisk. Generelt præsterer det neurale netværk godt og kan anvendes som

realtidsmodel idet det tager 15 sekunder at simulere hver hændelse igennem de 1.898 beregningsceller i neurale netværk, som tilsammen udgør det samlede netværk.

Opsummering af del III 10

Realtidsmodellerne baseret på logistiske funktioner og neurale netværk kan beregne oversvømmelsesudbredelsen ud fra en given regnhændelse med en beregningstid på henholdsvis 5 og 14 sekunder med stor sikkerhed. Derfor er det muligt at anvende både logistiske funktioner og neuralt netværk til udarbejdelsen af realtidsmodleler.

Realtidsmodellerne er valideret med SVK 5061 regnserien, som består af observerede regnhændelser over en 20 års periode. Dette betyder, at de resultater, der fremlægges i realiteten beskriver realtidsmodellernes præstation, hvis de blev interageret i et varslingssystem og det kørte over en 20 års periode.

Resultaterne fra de logistiske funktioner viser, at hvis en regnhændelse resulterer i oversvømmelse i en celle, så vil den logistiske funktion for cellen også varsle oversvømmelse. Derudover viser resultaterne, at de logistiske funktioner ofte varsler oversvømmelse imod regnhændelser, som ikke resulterer i oversvømmelse i virkeligheden, hvorved der ofte vil være fejlvarslinger. Derfor varsles der oversvømmelse for et meget større areal ved de logistiske funktioner end i virkeligheden. P_{OT} for de logistiske funktioner er i gennemsnit 98%. Der er to regnhændelser, som resulterer i oversvømmelse ifølge MIKE FLOOD, som de logistiske funktioner ikke varsler imod. Disse to regnhændelser oversvømmer kun 0,01 hektar hver. Derudover varsler de logistiske funktioner imod oversvømmelse ved 153 regnhændelser, som ikke oversvømmer ifølge MIKE FLOOD, hvor der i gennemsnit oversvømmer 0,047 hektar med en spredning på 0,055 hektar.

Resultaterne fra dette neurale netværk viser, at netværket er i stand til at modellere 88% af de oversvømmelsesgivende regnhændelser fra SVK 5061 over terræn. Derudover viser resultaterne, at oversvømmelsesudbredelsen pr. regnhændelse i det neurale netværk nærmest rammer det samme som MIKE FLOOD modellen. Dette understreger en NSE-værdi på 0,98 om, da det betyder en minimal forskel imellem resultaterne. Der er 31 regnhændelser, som resulterer i oversvømmelse ifølge MIKE FLOOD, som det neurale netværk ikke modellerer. Disse 31 regnhændelser oversvømmer i gennemsnit 0,015 hektar med en spredning på 0,013 hektar. Dermed er der tale om en meget begrænset oversvømmelsesudbredelse, som det neurale netværk fejler i at modellere. Derudover varsler det neurale netværk imod oversvømmelse ved 8 regnhændelser, som ikke oversvømmer ifølge MIKE FLOOD. Disse oversvømmes i gennemsnit 0,016 hektar med en spredning på 0,011 hektar.

Udover udarbejdelsen af et neuralt netværk, der kun beskriver oversvømmelsesudbredelsen, er der udarbejdet et neuralt netværk, som både beskriver oversvømmelsesudbredelsen og vandniveauet på terræn. Resultaterne fra dette neurale netværk viser, at netværket modellerer omkring 70% af de oversvømmelsesgivende regnhændelser fra SVK 5061 over terræn. Derudover viser resultaterne, at oversvømmelsesudbredelsen pr. regnhændelse i dette neurale netværk underestimeres i forhold til MIKE FLOOD modellen, da oversvømmelsesudbredelsen pr. regnhændelse for det neurale netværk ligger under valideringslinjen og har en NSE på 0,89. Der er 76 regnhændelser, som resulterer i oversvømmelse ifølge MIKE FLOOD, som det neurale netværk ikke modellerer. Disse 76 regnhændelser oversvømmer i gennemsnit 0,03 hektar med en spredning på 0,032 hektar.

Dermed er der tale om en meget begrænset oversvømmelsesudbredelse, som det neurale netværk fejler i at modellere. Dette neurale netværk modellere ingen hændelser over terræn, som ifølge MIKE FLOOD modellen heller ikke giver oversvømmelse. I forhold til vandniveauet, kan dette måles i forhold til det oversvømmede volumen. Forskellen imellem resultaterne af simulering af SVK 5061 imellem det neurale netværk og MIKE FLOOD simuleringerne, viser en minimal forskel på oversvømmelsesvolumenerne med en NSE lig 0,96.

Tabel 10.1 sammenligner præstationen over og under terræn for de logistiske funktioner og de neurale netværk .

	Logistiske funktioner	**Neurale netværk**	
		Oversvømmelsesudbredelse	**Vandniveau**
$\mathbf{P}_{OT}$ [%]	98	86	68
$\mathbf{P}_{UT}$ [%]	33	96	100
NSE [-]	0,70	0,98	0,89

Tabel 10.1. Gennemsnitlig præstation over og under terræn for de logistiske funktioner og de neurale netværk baseret på det binære system med 1=over terræn og 0=under terræn. For at sammenligne modeller på tværs, er det neurale netværk for vandniveau kun vist for oversvømmelsesudbredelse og ikke ud fra volumen og vandhøjder.

Tabel 10.1 viser, at de neurale netværk samlet præsterer bedre end de logistiske funktioner. Dette fremgår især ved NSE i forhold til oversvømmelsesudbredelsen, hvor den er 0,70 for de logistiske funktioner, mens de neurale netværk er henholdsvis 0,98 og 0,89. Dermed passer resultaterne fra de neurale netværk rigtigt godt i forhold til oversvømmelsesudbredelsen af resultaterne fra MIKE FLOOD modellen med SVK 5061 som input. Dette betyder, at realtidsmodellerne i høj grad er i stand til at modellere den samme oversvømmelsesudbredelse som de præsimulerede MIKE FLOOD resultater, hvilket betyder at modellerne med høj præcision kan modellere præcis hvor i projektområdet der opstår oversvømmelser. Ved implementering i en varslingsmodel er det derfor muligt at varsle borgere i præcis disse områder, samt give beredskab muligheden for at skærpe indsatsen i disse indsatsområder.

Det neurale netværk baseret på vandniveau resultaterne fra MIKE FLOOD modellen er også undersøgt i forhold til at bestemme oversvømmelsesvolumen pr. regnhændelse. Her viser resultaterne, at dette neurale netværk modellerer oversvømmelsesvolumen i samme størrelsesorden som MIKE FLOOD simuleringer af de samme hændelser, hvorved der generelt er god overensstemmelse imellem modelleret oversvømmelsesvolumen og præsimuleret oversvømmelsesvolumen i MIKE FLOOD, mens der samtidig er god overensstemmelse i forhold til oversvømmelsesudbredelse. Da vandniveauerne er i samme størrelsesorden, kan implementeringen af denne realtidsmodel i et varslingssystem betyde, at beredskabet kan øge fokusset i områder med særligt højt vandniveau på terræn. Er vandstanden over 10 centimeter, som svarer til højden på fortovskanter, er der større risiko for at oversvømmelsen breder sig fra noderne på vejene, til andre steder i området.

Udover opbygningen af realtidsmodeller baseret på præsimulerede resultater, er responsen i systemet blevet belyst ud fra forskellige inputparametre. Responsen på terræn for de historiske regnserier viste, at vandniveauerne i cellerne stiger i forhold til middelintensiteten ved specifikke regnvarigheder. Der er også en sammenhæng mellem vandstandsniveauet i cellerne og den akkumuleret nedbør i en regnhændelse, men denne sammenhæng er sporadisk i forhold til middelintensiteten. Derudover er der en dårlig eller ingen sammenhæng mellem vandstandsniveauet i cellerne og

hændelsvarigheden.

De logisketiske funktioner og det neurale netværk præsterer generelt rigtigt godt i forhold til at modellere hændelserne over og under terræn. Dette kan skyldes, at de historiske regnserier, som anvendes til opbygningen af modellerne og den historiske regnserie, som anvendes til validering er lokaliseret forholdsvis tætved hinanden, hvorved en regnhændelse kan være observeret i mere end én SVK måler. Dette kan betyde, at den endelige validering ikke nødvendigvis består af uafhængig data. Dette kan potentielt være årsagen til den høje præcision af modellen.

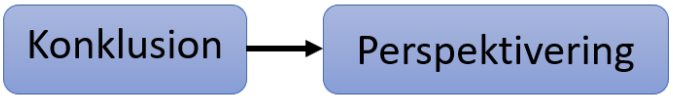
Det er valgt, at de neurale netværk anvender 70% af de præsimulerede resultater til opbygningen af modellerne. Dette kan have konsekvenser i forhold til at "overfitte", da størstedelen af dataene anvendes til opbygningen af modellen. Dermed er der kun 30% data, til at validere og teste modellen. Dette kan potentielt forårsage, at de neurale netværk ikke er i stand til at modellere et præcist output ud fra et ukendt datainput, men derimod kun være i stand til opnå en høj præcision på det data, som netværket trænes efter. Grundet det store datagrundlag på grund af præsimuleringer af hændelserne i 4 SVK regnserier, vurderes det, at modellerne ikke bliver "overfittet". 30% af datagrundlaget svarer til omkring 5000 hændelser.

Da rapporten undersøger muligheden i at anvende præsimuleringer til udarbejdelsen af et varslingssystem imod ekstremregn, er der truffet en række beslutninger og antagelser. Først og fremmest antages den udleverede MIKE URBAN model at være valid og afspejle virkeligheden, da den på forhånd er kalibreret og valideret i forhold til overløbsvolumener fra bygværker, samt vandføring i vandløbene omkring Kærby. Modellen er således hverken kalibreret eller valideret i forhold til oversvømmelsesudbredelse og oversvømmelsesdybde. Dette betyder, at MIKE FLOOD simuleringerne ikke nødvendigvis afspejler virkeligheden.

En anden antagelse eller afvigelse fra virkeligheden, er at MIKE FLOOD simuleringerne er opbygget af 10x10 meter gridceller, hvilket minimerer detaljegraden i simuleringerne. Dette påvirker det maksimale vandniveau i hver celle, da vandniveauer midles over hele gridcellen. Dermed vil en oversvømmelse resultere i højere vandniveauer i virkeligheden end det neurale netværk viser. Derudover påvirker det også oversvømmelsesudbredelsen, som bliver større. De store gridceller forhindrer imidlertid, at vandets transport til en lavning medtages, idet resultaterne evalueres efter det maksimale vandniveau. Det er derfor utænkeligt, at vandets transport fra en node til en lavning på terræn, giver et højere vandniveau end 2 centimeter, hvorfra modellen definerer oversvømmelse.

Del IV

Afrunding



I del IV belyses først de væsentligste konklusioner af rapporten. Herefter kommer en perspektivering, som beskriver de fremtidige perspektiver der er for varslingssystemet.

Konklusion 11

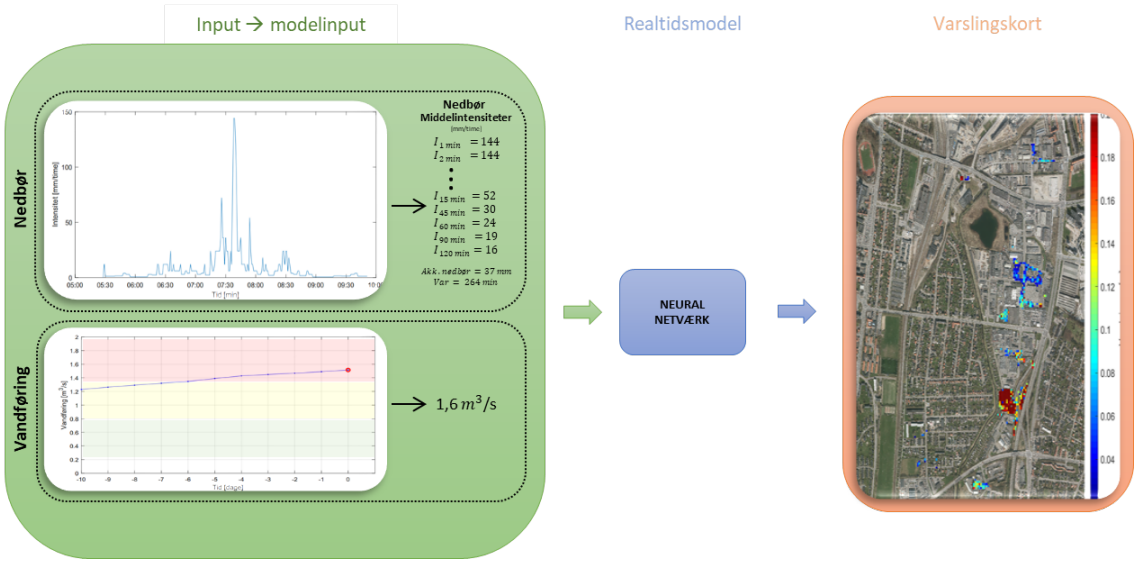
Det overordnede formål med projektet har været, at udarbejde en realtidsmodel, som beregner oversvømmelsen i projektområdet i realtid, uden at gå på kompromis med kompleksiteten af systemet og dermed præcisionen af modellen. Formålet med realtidsmodellen er, at den skal indgå i et varslingssystem, som er i stand til at varsle imod kommende regnbetingede oversvømmelser med høj præcision i et byområde.

For at afprøve realtidskonceptet via en surrogat metode, blev realtidsmodellering først afprøvet ved præsimulering af historiske regnserier, kasseregn og CDS-regn, igennem en rørmodel i MIKE URBAN. Denne model er derfor i stand til at afgøre i hvilke områder af projektområdet der oversvømmer og ikke hvor stor oversvømmelsesudbredelsen eksempelvis bliver deraf. Det viste sig, at realtidsmodellerne som baseres på logistiske funktioner af responserne i noderne, præsterede i varierende grad. Realtidsmodellen med baggrund i præsimuleringer af kasseregn modellerede 20% af de oversvømmelsesgivende hændelser i SVK 5061, og havde en fejlvarslingsprocent på 4%. Realtidsmodellen med baggrund i præsimulerede CDS-regn modellerede 90% af de oversvømmelsesgivende hændelser med en fejlvarslingsprocent på 40%. Realtidsmodellen med baggrund i historiske regnhændelser modellerede 99% af de oversvømmelsesgivende hændelser med en fejlvarslingsprocent på 60%. Det konkluderes, at kasseregn ikke er anvendeligt til udarbejdelse af en pålidelig realtidsmodel. Analysen viste, at realtidsmodellerne med baggrund i præsimuleringer af CDS-regn og historisk nedbør begge præsterede godt i forhold til at modellere de oversvømmelsesgivende hændelser. Dette skyldes, at det ved optimering af regnvarigheden, som middelintensiteten beregnes over, til den kritiske regnvarighed for hver node, er fundet, at CDS-regn og historisk data er meget nær hinanden, når det gælder responsen i noderne i systemet. Derfor modellerer de to realtidsmodeller også stort set de samme hændelser over terræn. Der er således et potentiale i anvendelsen af CDS-regn og/eller historisk nedbør til udarbejdelse af responssystemer og realtidsmodeller i afløbssystemet i projektområde,t udfra præsimuleringer af rørmodellen i MIKE URBAN.

For at beskrive oversvømmelsen på terræn, opbygges den endelige realtidsmodel af præsimuleringer i en MIKE FLOOD model med forskellige SVK-målere i nærområdet som input. Disse præsimuleringer anvendes i realtidsmodellen ved logistiske funktioner og neurale netværk. Realtidsmodellen baseret på logistiske funktioner i hver beregningscelle, modellerer oversvømmelse ved 431 regnhændelser ud fra de 6109 regnhændelser i SVK 5061, som modellen valideres efter. MIKE FLOOD modellen modellerer til sammenligning oversvømmelse ved 280 regnhændelser. Realtidsmodellen ud fra logistiske funktioner varsler imod stort set alle oversvømmelsesgivende regnhændelser, men har mange fejlvarslinger. I forhold til oversvømmelsesudbredelse, overestimerer denne realtidsmodel, men de områder hvor oversvømmelsen opstår, er de samme områder som MIKE FLOOD modellerer oversvømmelse. Det neurale netværk er både udarbejdet som et biassystem, som er i stand til at modellere oversvømmelsesudbredelse, samt efter numeriske værdier, der beskriver oversvømmelsesudbredelse samt vandniveau. Begge realtidsmodeller er i stand til at modellere stort set den samme oversvømmelsesudbredelse, som MIKE FLOOD. Det neurale netværk, som er i stand til at modellere oversvømmelsesudbredelse og vandniveau, modellerer

oversvømmelse ved 204 regnhændelser af de 280 regnhændelser som MIKE FLOOD modellerer oversvømmelse ved. De 76 regnhændelser det neurale netværk fejler i at modellere, består i gennemsnit af oversvømmelsesudbredelse på 0,03 ha med en spredning på 0,03 ha. Dette betyder i praksis, at modellen varsler alle de store oversvømmelser korrekt, mens de mindre lokale oversvømmelser på under 100 m^2 ikke varsles i mange tilfælde. I forhold til modelleret oversvømmelsesvolumen er dette næsten 1 til 1 lig oversvømmelsesvolumen i de præsimulerede hændelser i MIKE FLOOD modellen. Denne realtidsmodel vælges som den endelige model, der skal indgå i et varslingssystem, da den på 15 sekunder og med høj præcision modellerer både oversvømmelsesudbredelse og vandniveau for en given regnhændelse. For at gøre dette skal det neurale netværk have input i form af; middelintensiteter over 1:1:15, 45, 60, 90 og 120 minutter samt hændelsesvarighed og akkumuleret nedbør for regnhændelsen.

For at illustrere hvordan den endelige realtidsmodel kan indgå i et varslingssystem, vises en figur, der beskriver input i form af målt vandføring og prognosticeret nedbør, realtidsmodel og output i form af en varsling ud fra en kommende regnhændelse.



Figur 11.1. Eksempel på implementering af realtidsmodellen i et varslingssystem.

Inputtet i form af målt vandføring i Østerå afgør hvilket neuralt netværk der udvælges. Der er udarbejdet tre realtidsmodeller og derfor tre neurale netværk, for vandføringer lig 0,3, 0,95 og 1,6 m^3/s. Der vælges den model, som den observerede vandføring er tættest på. Inputtet i form af nedbør omdanner den prognosticerede regnhændelse til de inputparametre, som det neurale netværk er opbygget efter. Netværket er opbygget af middelintensiteter over 1:15, 45, 60, 90 og 120 min regnvarigheder, samt akkumuleret nedbør og hændelsesvarigheden. Varslingskortet viser responsen i systemet ud fra regnhændelsen og kan anvendes af borgere og beredskab, til at foretage foranstaltninger imod oversvømmelsen. Dette kan mindske konsekvensen af oversvømmelsen og spare penge for borgere, forsikringsselskaber og kommunen.

Perspektivering 12

I det følgende beskrives forskellige perspektiver og udviklingspotentialer, som nærværende rapport har, men som ikke er belyst heri.

Forbedring af MIKE URBAN model
Nærværende rapport bygger på præsimuleringer igennem en MIKE URBAN model, som er kalibreret og valideret efter overløbsvolumener. Derfor repræsenterer modellen ikke nødvendigvis virkeligheden. Det er derfor et perspektiv for rapporten, at lave præsimuleringerne ud fra en MIKE URBAN og dermed MIKE FLOOD model, som er kalibreret og valideret i forhold til oversvømmede arealer og volumener.

Desuden er der et perspektiv i at forfine opløsningen af gridcellerne i MIKE FLOOD modellen. Præsimuleringerne bør foretages for mindre gridceller i MIKE FLOOD modellen, for i højere grad at tage højde for terrænets topografi. Hvis griddet forfines til 2x2 meter gridceller, ville det tage det neurale netværk 6 minutter, at simulere responsen fra en regnhændelse. Det vurderes, at 6 minutter stadig er tilfredsstillende i forhold til at anvende det neurale netværk som realtidsmodel.

Topografi - en faktor i realtidsmodellering
Nærværende rapport omhandler et fladt område, beliggende i en ådal. Det er derfor ikke nødvendigvis sikkert, at en tilsvarende præcis realtidsmodel kan opbygges for andre typer områder. En anden type område, kan være et mere stejlt område, som ikke nødvendigvis giver de samme tydelige sammenhænge imellem middelintensiteten og vandniveauet både i noderne i MIKE URBAN modellen og på terræn i MIKE FLOOD modellen. Det vil derfor være væsentligt at anvende metoden på et andet område, som foreksempel har en stejlere topografi. Dette kunne foreksempel være Lystrup, som ligger nord for Aarhus. Dette område har en stejl topografi og har ligesom Kærby og håndværkerkvarteret oplevet mange regnbetingede oversvømmelser.

Ved flade modelområder er det potentielt muligt kun at anvende rørmodellen i MIKE URBAN til udarbejdelsen af den endelige realtidsdmodel. Dette skyldes, at det vand, der opstuver fra noderne ikke vil afstrømme til andre områder på grund af terrænets flade hældning. Denne realtidsmodel ville dog ikke varsle omkring oversvømmelse i borgernes huse, men blot af noderne omkring borgernes huse.

Klimasikret realtidsmodel
Realtidsmodellerne er opbygget på baggrund af observerede regnhændelser fra fem SVK målere. Der bliver dermed ikke taget højde for, at regnhændelserne bliver mere ekstreme i fremtiden på grund af klimaforandringerne [Danmarks Meteorologiske Institut, 2019]. En perspektiv for rapporten kunne derfor være, at gange en klimafaktor på de observerede regnhændelser, således kataloget af responser tager højde for de fremtidige ekstreme hændelser.

Varslingssystemets platform
For at varslingssystemet er anvendeligt for borgere i området, samt beredskabet, kan der udarbejdes en internetplatform. På denne platform ville det være muligt med automatisk opdaterede radar- og flowinput, at vise hvordan en kommende oversvømmelsesgivende regnhændelse påvir-

ker området. Modellen kunne sende en SMS til de berørte borgere, hvorefter de kan gå ind på internethjemmesiden, for at følge med i oversvømmelsesprognosen og se de berørte områder på et kort over projektområdet.

Radar nowcast og NWP forecast som input til neuralt netværk

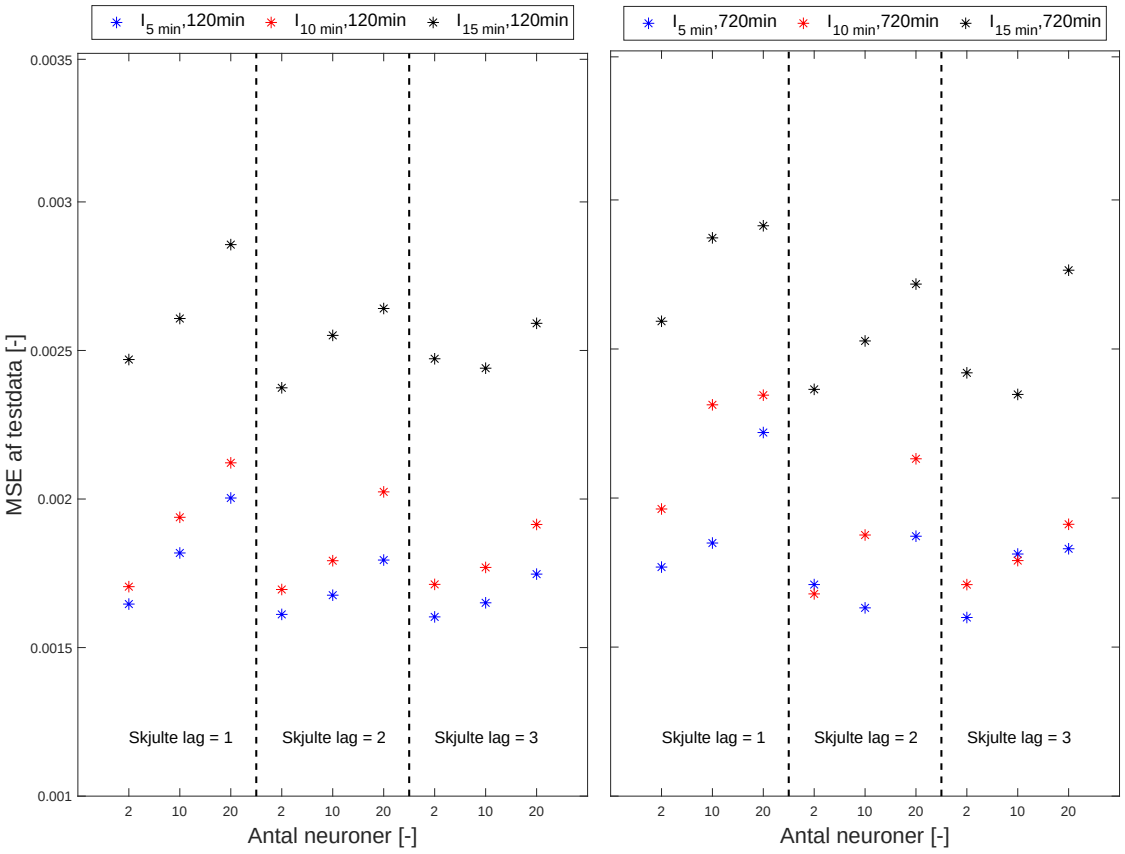
Denne rapport har belyst perspektiverne og potentialet for at anvende logistiske funktioner og neurale netværk til at udarbejde et varslingssystem på baggrund af præsimuleret data. Dette er gjort på baggrund af regnhændelser fra SVK-målere. SVK-målerne består af observerede regnhændelser, hvorfor de udarbejdede realtidsmodeller ikke er i stand til at give en varsling imod en kommende oversvømmelse. For at udarbejde et varslingssystem, som rent faktisk er i stand til at varsle, kræves prognosticeret nedbør. Prognosticeret nedbør kan bestå af vejrmodeller, som på stor skala beskriver nedbøren langt ud i fremtiden. Den kan også bestå af et radar nowcast, som giver en mere præcis og lokal beskrivelse af nedbøren, over en kortere tidshorisont. Ved at kombinere disse to nedbørsprognoser, således radar nowcast anvendes til at beskrive nedbøren den første time, hvorefter NWP dataet anvendes til at beskrive den efterfølgende nedbør for en regnhændelse, vil det være muligt at prognosticere nedbør med en lang leadtime. Jo længere leadtime, desto bedre forudsætning har beredskab og borgerne for at foretage de fornødne afværgende foranstaltninger.

For at undersøge potentialet i anvendelsen af prognosticeret nedbør i det neurale netværk, analyseres udarbejdelsen af et neuralt netværk ud fra de inputs, som er tilgængelige fra radar nowcast og NWP. Det neurale netværk opstilles med formålet at modellere oversvømmelsesudbredelsen, hvorfor targetværdierne er 1 for oversvømmelse og 0 for ingen oversvømmelse. Det antages, at et radar nowcast giver et tilfredsstillende præcist forecast af nedbøren den første time, og at vejrmodellen kan give tilfredsstillende forecast op til 12 timer. Radar nowcast haves typisk i 5, 10 og 15 minutters intervaller, mens NWP forecast typisk haves i timeintervaller eller halve timer. Det antages, at varigheden af hændelsen og den akkumulerede er for upræcise til at kunne indgå i modellen, hvorfor der kun medtages middelintensiteter som input. Ud fra disse forudsætninger opstilles et neuralt netværk, med den samme opbygning, som beskrevet i rapporten. Inputtene til netværket fremgår af tabel 12.1.

Inputnavn	**I$_{var}$ [min]**		**Antal inputs**
Input$_{5,120\text{min}}$	1,5:5:55	60:30:120	15
Input$_{10,120\text{min}}$	1,10:10:50	60:30:120	9
Input$_{15,120\text{min}}$	1,15:15:45	60:30:120	7
Input$_{5,720\text{min}}$	1,5:5:55	45, 60:30:720	35
Input$_{10,720\text{min}}$	1,10:10:50	60:30:720	29
Input$_{15,720\text{min}}$	1,15:15:45	60:30:720	27

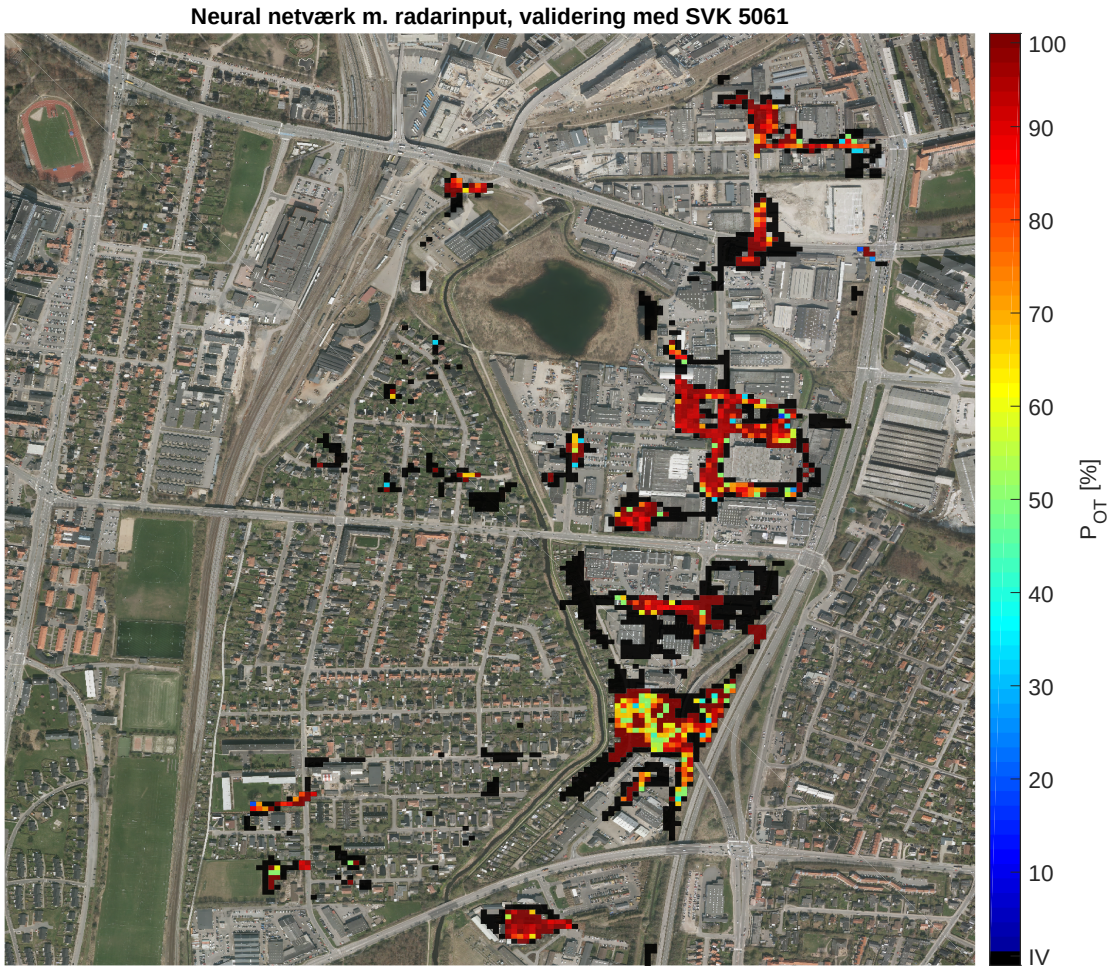
Tabel 12.1. Input til det neurale netværk, som består af middelintensiteter over forskellige regnvarigheder af regnhændelsen, I$_{var}$.

Inputtene modelleres i forskellige strukturer af det neurale netværk. Evalueringen af netværket i forhold til MSE fremgår af figur12.1.



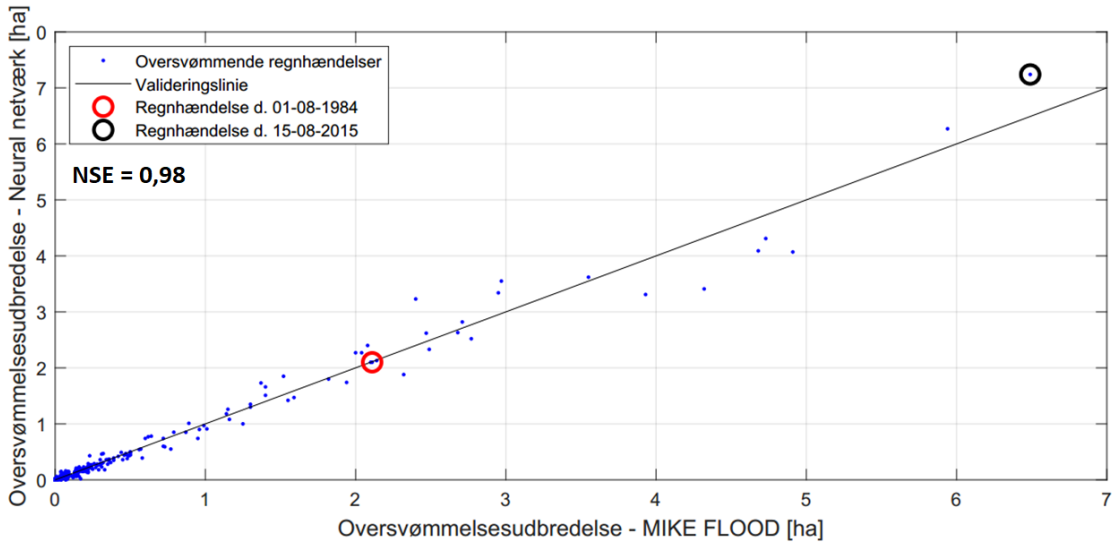
Figur 12.1. Fejlen fra modeloutput til targetværdi af testdataet, målt i MSE. Der tages gennemsnit af de 34 celler, der er i testområdet, beskrevet i afsnit 9.1.1.

På figur 12.1 fremgår det, at input med intervaller for nowcastet på 5 og 10 minutter op til 60 minutter, præsterer nogenlunde lige godt (markeret ved blå og rød prik på figur 12.1). Når netværket får 15 minutters intervaller den første time og efterfølgende halvtimes intervaller af middelintensiteten, præsterer modellen dårligere (markeret ved sort prik på figur 12.1). For at stille mindre krav til inputtet, uden at gå kompromis med præcision, udvælges 10 minutters intervaller for nowcastet. Desuden fremgår det, at der ingen forskel er på, at få NWP forecast på to timer i forhold til 12 timer, hvor to timer vælges. Det netværk der vælges opbygge på baggrund af 10 minutters intervaller den første time og herefter intervaller på 30 minutter op til to timer. Den sidste middelintensitet, der anvendes som input, afgør i hvor god tid varslet kan udstedes, og afhænger i høj grad af præcisionen på NWP forecastet. For at vurdere hvor godt netværket præstere på ukendt data, simuleres det neurale netværk igennem SVK 5061, som i rapporten anvendes som valideringsserie, se figur 12.2.



Figur 12.2. Det neurale netværks evne til at modellere de samme hændelser over terræn, som MIKE FLOOD simuleringerne af SVK 5061. IV = Ikke Validereret.

På figur 12.2 fremgår det, at det neurale netværk præsterer særdeles godt, da stort set alle beregningsceller, som ifølge MIKE FLOOD simuleringerne giver oversvømmelse, tilmed modelleres som oversvømmelse af det neurale netværk. For at undersøge det neurale netværket mere generelt, sammenlignes oversvømmelsesudbredelsen for de præsimulerede MIKE FLOOD resultater med oversvømmelsesudbredelsen modelleret af det neurale netværk, se figur 12.3.



Figur 12.3. Oversvømmelsesudbredelse af præsimulerede MIKE FLOOD resultater kontra neurale netværks beregnede oversvømmelsesudbredelse af de samme hændelser.

På figur 12.3 fremgår det, at det neurale netværk, med en NSE på 0,98, stort set modellerer den samme oversvømmelsesudbredelse som MIKE FLOOD resultaterne. Ud af de 280 regnhændelser som fører til oversvømmelse i SVK 5061, modellere det neurale netværk oversvømmelse ved 260. De 20 hændelser, som ikke varsles, oversvømmer ifølge MIKE FLOOD i gennemsnit 0,015 ha med en spredning på 0,015 ha. Dette betyder, at det er meget begrænsede oversvømmelser, som reelt ikke skaber gene i projektområdet. Ud af de 5829 hændelser, som ikke burde give oversvømmelse, modellere det neurale netværk oversvømmelse ved 15 af dem. Udover to hændelser der modelleres en oversvømmelsesudbredelse på 0,02 ha, modelleres de resterende 13 hændelser med en oversvømmelsesudbredelse på 0,01 ha.

Generelt præsterer dette neurale netværk godt, hvis ikke bedre end modellen opstillet i rapporten. Dette neurale netværk anvender også mere realistiske inputs i forhold til hvad der kan forventes, når der skal anvendes regnkarakteristika af prognosticeret nedbør som input. Det er således bevist, at neural netværk kan anvendes til at udarbejde et varslingssystem. En ting, som ikke tages højde for her, er den stedslige variation i nedbøren, som kan medtages i radar nedbøren. Den stedslige variation i nedbøren spiller naturligvis en rolle, navnlig ved større oplande. Et perspektiv for rapporten kunne derfor være, at opbygge kataloget af præsimuleringer ud fra stedsligt varierende nedbør i MIKE FLOOD modellen. På den måde, kan stedsligt varierende nedbør være input i det neurale netværk, hvormed der tages højde for den stedslige variabilitet i varslingssystemet.

Litteratur

Carr og Smith, **2006**. R. S. Carr og G. P. Smith. *Linking of 2D and pipe hydraulic models at fine spatial scales*, 2006.

CSIRO, **2007**. CSIRO. *IPCC AR4 sea-level projections*, 2007. URL http://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_proj_21st.html. Besøgt 23-04-2019.

Danmarks Meteorologiske Institut, **2019**. Danmarks Meteorologiske Institut. *Fremtidige klimaforandringer i Danmark*, 2019. URL https://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/Rapporter/DKC/2014/Klimaforandringer_dmi.pdf. Besøgt 05-03-2019.

Danmarks Meteorologiske Institut, **2018**. Danmarks Meteorologiske Institut. *Spildevandskomitéens regnmålersystem*, 2018. URL https://www.dmi.dk/erhverv/anvendelse-af-vejrdata/spildevandskomiteens-regnmaalersystem/. Besøgt 3-11-2018.

Danmarks Meteorologiske Institut. Danmarks Meteorologiske Institut. *Hvad skal du forvente, når DMI varsler skybrud?* URL https://www.dmi.dk/nyheder/2018-aeldste/hvad-skal-du-forvente-naar-dmi-varsler-skybrud/. Besøgt 03-06-2019.

Dansk Hydraulisk Institut. Dansk Hydraulisk Institut. *DHI*. URL https://www.dhigroup.com/. Besøgt 24-04-2019.

Den Europæiske Unions Tidende, **2007**. Den Europæiske Unions Tidende. *EUROPA-PARLAMENTETS OG RÅDETS DIREKTIV 2007/60/EF*. 2007.

Det Europæiske Miljøagentur, **2005**. Det Europæiske Miljøagentur. *Klimaændringer og flodoversvømmelser i Europa*. Det Europæiske Miljøagentur, 2005.

Envidan, **2012**. Envidan. *Regnhændelsen den 6. august 2012*, 2012. URL http://apps.aalborgkommune.dk/images/teknisk/PLANBYG/KOMPLAN/00/Regn06082012.pdf. Besøgt 28-03-2019.

foto: Rene Schütze/Ekstra Bladet, **2012**. foto: Rene Schütze/Ekstra Bladet. *Oversvømmelser i Aalborg efter skybrud*, 2012. URL https://ekstrabladet.dk/112/article4018929.ece. Besøgt 28-03-2019.

Gregersen et al., **2014**. Ida Bülow Gregersen, DTU, Henrik Madsen, DHI, Jens Jørgen Linde, Krüger og Karsten Arnbjerg-Nielsen. *Spildevandskomiteen, Skrift nr. 30*, IDA Spildevandskomiteen, 2014.

Hatim O. Sharif, **2005**. Rita Roberts og Cynthia Mueller Hatim O. Sharif, David Yates. *The Use of an Automated Nowcasting System to Forecast Flash Floods in an Urban Watershed*. American Meteorological Society, 2005.

Hénonin et al., **2013**. Justine Hénonin, Ole Mark, Beniamino Russo og Philippe Gourbesville. *Real-time urban flood forecasting and modelling - A state of the art*, 2013.

Maksimovic og Prodanovic, **2001**. Cedo Maksimovic og Dusan Prodanovic. *Modelling of Urban Flooding—Breakthrough or Recycling of Outdated Concepts*, 2001.

Olsen et al., **2007**. Ander Skovgård Olsen, Gitte Godsk Dalgaard, Birgit Paludan, Ole Mark, Anne Laustsen, Jens Jørgen Linde, Carsten Jakobsen, Kristian Friis, Morten Hundahl, Dan Rosbjerg, Peter Steen Mikkelsen og Karsten Arnbjerg-Nielsen. *Spildevandskomiteen, Skrift nr. 31*, IDA Spildevandskomiteen, 2007.

Raymond et al., **2005**. M. Raymond, N. Peyron, M. Bahl og A. Martin. *ESPADA, a unique flood management tool: first feedback from the September 2005 flood in Nîmes*, 2005.

Theilgaard, **2019**. Jesper Theilgaard. *Skybrud i Den Store Danske, Gyldendal*, 2019. URL `http://denstoredanske.dk/index.php?sideId=488236`. Besøgt 10-02-2019.

Thorndahl et al., **2013**. Søren Thorndahl, Troels Sandar Poulsen, Thimas Bøvith, Morten Borup, Malte AHM, Jesper Ellerbæk Nielsen, Morten Grum, Michael R. Rasmussen, Rasphall Gill og Peter Steen Mikkelsen. *Comparison of short-term rainfall forecasts for modelbased flow prediction in urban drainage systems*, Aalborg Universitet, 2013.

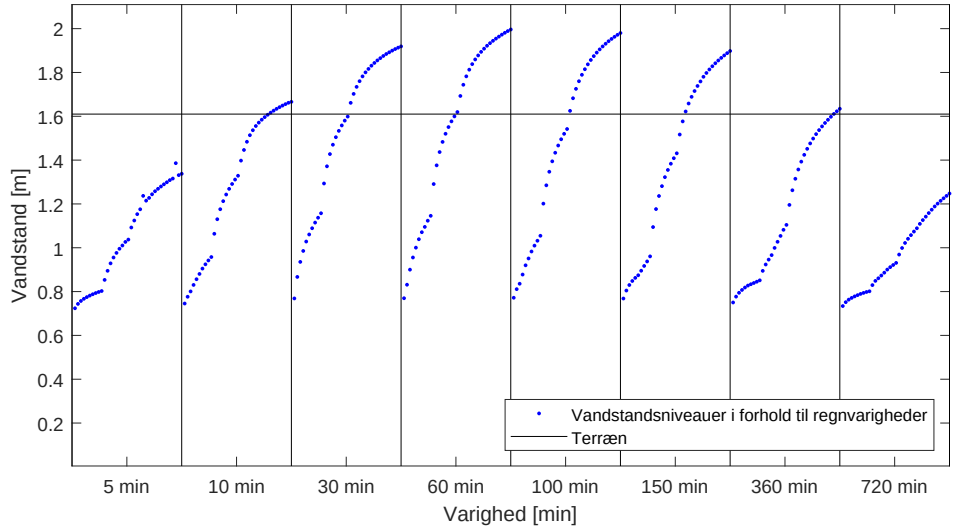
Logistiske funktioner for resultater for Kasseregn

A

De logistiske funktioner for kasseregn opstilles ligesom de logistiske funktioner for de historiske renserier, hvor resultaterne opdeles i under og over terræn og plottes i forhold til en regnintensitet, og der bestemmes en logistisk funktion i forhold til resultaterne.

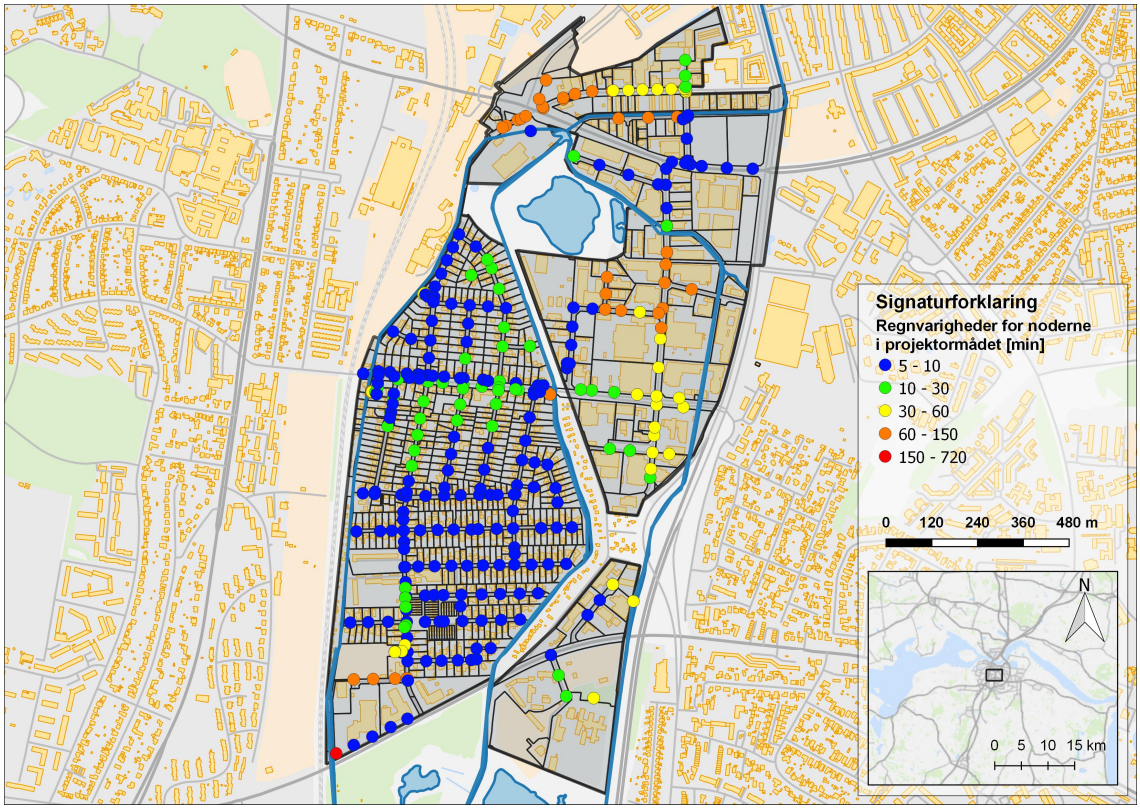
A.1 Realtidsmodel via logistiske funktioner

Regnvarigheden bestemmes ved at finde den kritiske regnvarighed for hver node. Den kritiske varighed er den regnvarighed, der resulterer i det højeste vandstandsniveau og da hver kasseregn kun indeholder en regnvarighed, bestemmes den kritiske regnvarighed, som den kasseregn, der resulterer i det højeste vandstandsniveau. Der er 37 kasseregn for hver regnvarighed. Intensiteterne er bestemt ved regnrækkerne, hvor intensiteten svarende til en gentagelsesperiode på 0,1 år er den mindste kasseregn over hver regnvarighed, og intensiteten svarende til en gentagelsesperiode på 100 år er den største. Figur A.1 viser vandstandsniveauerne for alle kasseregn for node 3400101, som er beliggende i den sydlige del af Håndværkerkvarteret.



Figur A.1. Vandstandsniveauer for node 3400101 for alle kasseregn ved en begyndelsesbetingelse på 1,6 m^3/s i Østerå.

Figuren viser, at den regnvarighed, som resulterer i det højeste vandstandsniveau er 60 minutter, hvor niveauet stiger over to meter fra bunden af noden. Dermed bliver den kritiske regnvarighed 60 minutter for denne node. Dette gøres for alle noderne i projektområdet og regnvarighederne er vist på figur A.2.



Figur A.2. Kritiske regnvarigheder for hver node, som anvendes til opstllingen af den logistiske metode.

Figur A.2 viser, at de kritiske regnvarigheder, som resulterer i de højeste vandstandsniveauer, oftest er lavest opstrøms og bliver højere jo mere nedstrøms man befinder sig i systemet. Dette betyder, at noderne opstrøms i systemet er mere følsomme overfor kort intense regn, mens noderne nedstrøms påvirkes mere af de længere regnhændelser. Dette skyldes, at koncentrationstiden og nodernes dimensioner er mindre opstrøms end nedstrøms, hvorfor nedbøren hurtigere opstuver sig opstrøms.

Herefter opstilles de logistiske funktioner for de noder i projektområdet, der oversvømmer ved anvendelse af kasseregn som input og valideres i forhold til vandstandsniveauerne bestemt udfra den historiske regnserie 5061.

A.1.1 Validering

Valideringen af de logistiske funktioner for kasseregn foretages ligesom valideringen af de logistiske funktioner for de historiske regnserier.

Validering foretages ved at simulere regnhændelserne fra den historiske regnserie 5061 igennem MIKE URBAN, og derefter kategorisere hændelserne i forhold til under og over terræn. Herefter opdeles hver regnhændelse i middelintensiteter over forskellige regnvarigheder, og anvendes som input i de logistiske funktioner i noderne. Hver node har en kritisk regnvarighed, hvorved modellen præsterer bedst, hvorfor middelintensiteten over den kritiske regnvarighed er input i den respektive node. Dermed kan de logistiske funktioner beregne om en given regnhændelse resulterer i opstuvning i afløbssystemet ud fra valideringsresultaterne. Derefter sammenlignes resultaterne fra MIKE URBAN modellen med resultaterne fra de logistiske funktioner. Valideringen foretages ved at bestemme om de logistiske funktioner varsler imod de opstuvninger, som rørmodellen viser med den historiske regnserie 5061 som input. Bestemmelsen af dette vises ved hjælp af tabel A.1,

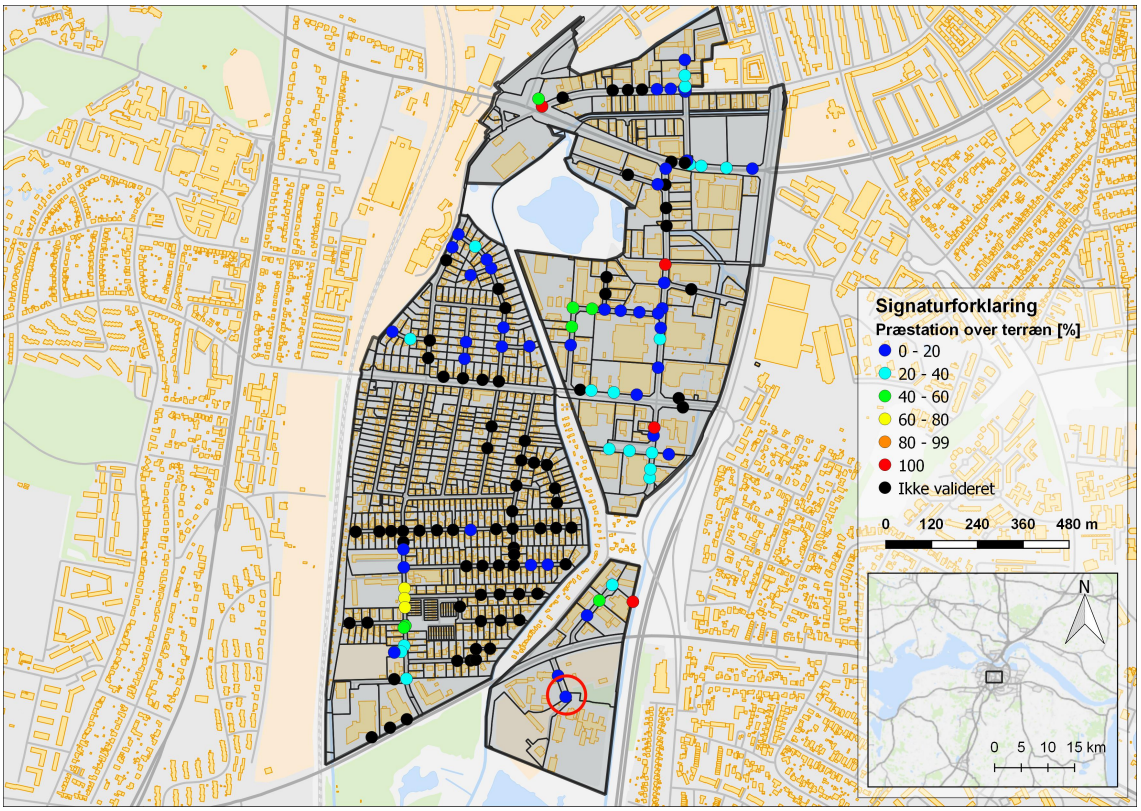
som er et tænkt eksempel for rørmodellen i MIKE URBAN i forhold til den logistiske funktion for en node. Valideringen for noden bestemmes ved at tage de 400 regnhændelser, som både er over terræn i rørmodellen og den logistiske funktion og dividere med antallet af hændelser over terræn ifølge rørmodellen, hvilket er 420 hændelser. Præstationen over terræn for noden blider dermed 95%. Præstationen over terræn vil i rapporten blive beskrevet som P_{OT}.

	Validering	**MIKE URBAN rørmodel** Under terræn	Over terræn
Logistisk funktion	Under terræn	5000	20
	Over terræn	50	400

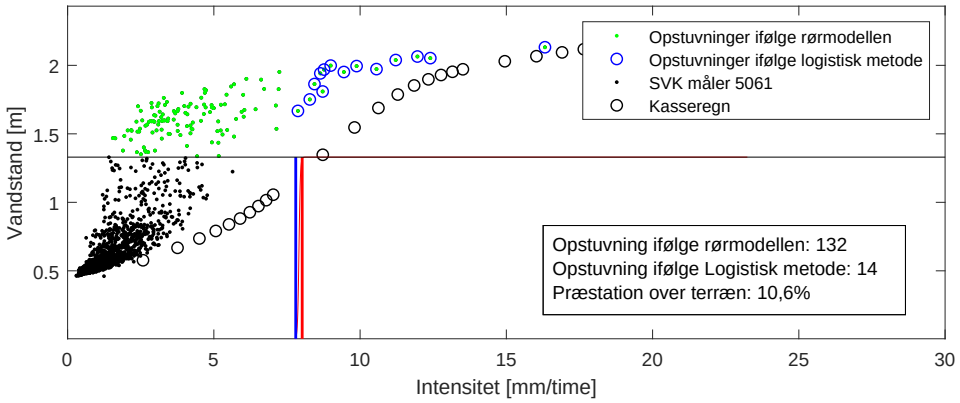
Tabel A.1. Eksempel for rørmodellen i MIKE URBAN i forhold til den logistiske funktion.

De logistiske funktioner præstation over terræn er vist på figur A.3.

Figur A.3 viser præstationen for den logistiske funktion bestemt udfra kasseregn i forhold til rørmodellen i MIKE URBAN ved den historiske regnserie 5061 for noderne i projektområdet. Figur A.4 viser den logistiske funktion for node 3340501 bestemt udfra kasseregn og vandstandsniveauerne bestemt udfra den historiske regnserie 5061.

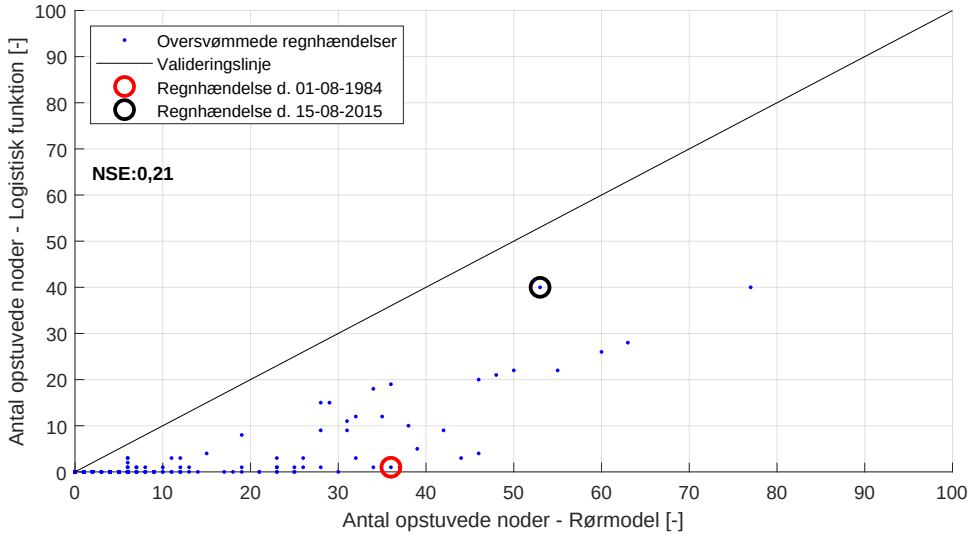


Figur A.3. Præstationen over terræn(P_{OT}) for noderne i projektområdet, hvilket betyder de logistiske funktionernes evne til at varsle imod de opstuvninger, som rørmodellen viser. Noderne markeret med sort kan ikke valideres ved anvendelse af den historiske regnserie 5061.



Figur A.4. Logistisk funktion for node 3340501 bestemt udfra resultaterne med kasseregn som input. Node 3340501 er beliggende i den centrale del af Håndværkerkvaret.

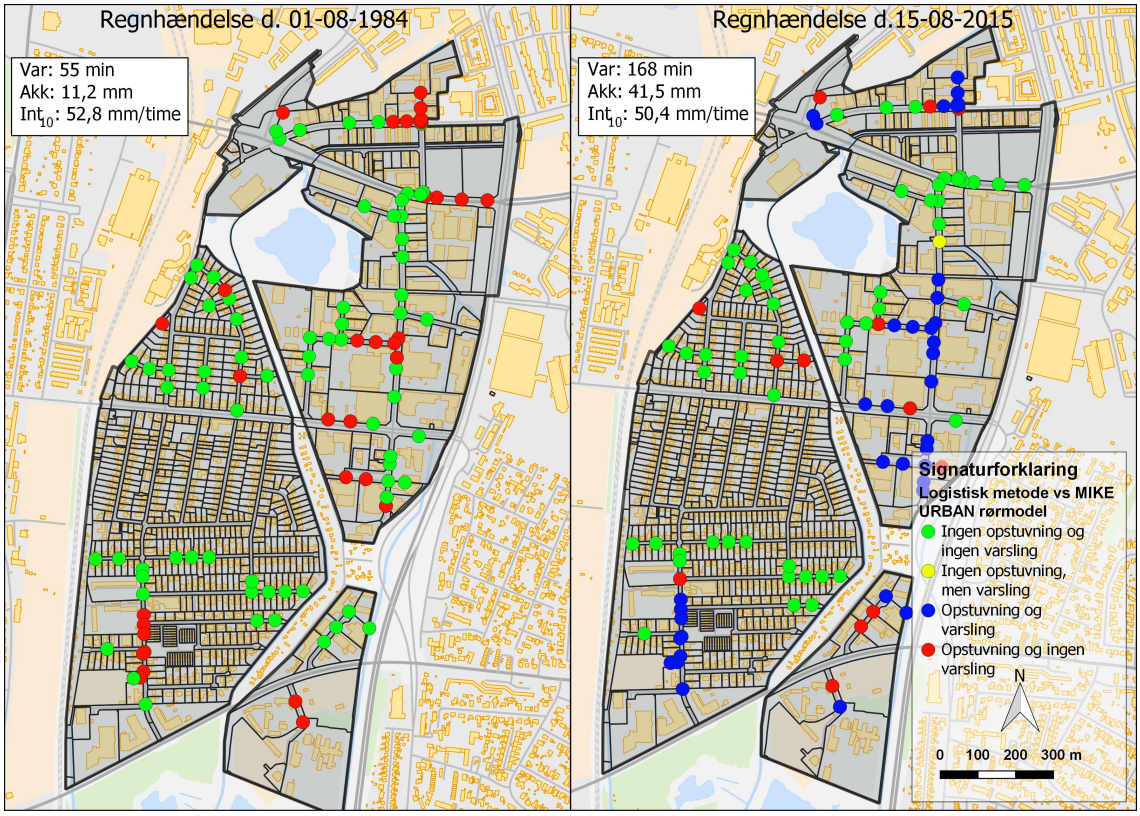
Figur A.3 viser, at de logistiske funktioners prsætation over terræn er 0-20% for størstedelen a noderne i projektområdet. Dette skyldes, at vandstandsniveauerne bestemt ved kasseregn agerer som et slags minimum for de historiske regnserier. Dermed skal regnitensiteten være højere for de logistiske funktioner for kasseregn, før der varsles imod opstuvning end ved de logistiske funktioner for de historiske regnserier. Dette er også illustreret på figur A.4, hvor vandstandsniveauerne bestemt 5061 allerede oversvømmer ved en regnintensitet på 1,5 mm pr. time for en regnvarighed på 150 minutter, mens den logistiske funktion først varsler mod oversvømmelse ved en regnintensitet på 7,8 mm pr. time. De logistiske funktioner vil dermed næsten aldrig varsle, hvis der forekommer opstuvning i noderne. De logistiske funktioners evne til at varsle imod de opstuvninger, som rørmodellen viser er i gennemsnit 22%. Præstationen over terræn (P_{OT}) er bestemt ved tage antallet af opstuvninger ifølge de logististiske funktioner, som også opstuver ifølge rørmodellen og dividerer med antallet af opstuvninger ifølge rørmodellen. Der er 14 opstuvninger ifølge de logistiske funktioner, som også resulterer i oversvømmerlse ifølge rørmodellen, mens der er i alt er 132 opstuvninger ifølge rørmodellen. Dermed bliver P_{OT} noden 10,6%. En anden måde at analysere præstationen af de logistiske funktioner, er ved at undersøge antallet af opstuvninger i noderne af de oversvømmelsesgivende hændelser, se figur A.5. Desuden markeres de valideringshændelser, der anvendes som eksempler på validering af modellen igennem rapporten.



Figur A.5. Antallet af opstuvninger fra noderne i rørmodellen i MIKE URBAN i forhold til de Logistiske funktioner med den historiske regnserier 5061 som input.

Figur A.5 viser, at der er flere noder, der opstuver i rørmodellen i MIKE URBAN end ved de logistiske funktioner. Dette stemmer godt overens med figur A.3, som viser præstationen over terræn, da størstedelen af noderne præsterer mellem 0-20%, hvorved en potentiel opstuvning ikke bliver varslet. Desuden er NSE koefficienten 0,21, hvorved resultaterne fra de logistiske funktioner er dårlige til at beskrive resultaterne fra rørmodellen i MIKE URBAN.

Figur A.6 viser, hvordan den logistiske metode for kasseregn præsterer i forhold til rørmodellen i MIKE URBAN ved to forskellige regnhændelser. Disse to regnhændelser er valgt for at vise, hvordan den logistiske funktion præsterer ved en regnhændelse med få opstuvninger og en regnhændelse med mange opstuvninger.



Figur A.6. Logistiske funktioner vs rørmodellen i MIKE URBAN ved to udvalgte regnhændelser.

Figur A.6 viser, at de noder, hvor der opstår oversvømmelse ifølge rørmodellen i MIKE URBAN, ikke bliver varslet imod ved den logistiske metode i forhold til regnhændelsen repræsenteret til venstre på figuren. I forhold til regnhændelse repræsenteret til højre på figuren, så rammer den logistiske metode det samme som rørmodellen i MIKE URBAN for størstedelen af noderne. Der er dog nogle noder, hvor der ifølge rørmodellen i MIKE URBAN opstår oversvømmelse, som ikke bliver varslet imod ved den logisktiske metode.

Den logistiske funktion baseret på kasseregn præsterer dårligt, da størstedelen af noderne i projektområdet har en præstation over terræn på under 20% i forhold til rørmodellen i MIKE URBAN ved den historiske regnserie 5061. Dermed vil den logistiske metode baseret på kasseregn ikke varsle mod størstedelen af de regnhændelser, som vil fører til opstuvning.

Logistisk funktion for resultater for CDS-regn

B

De logistiske funktioner for CDS-regn opstilles ligesom de forrige logistiske funktioner. Resultaterne opdeles i under og over terræn og plottes i forhold til en regnintensitet, og der bestemmes en logistisk funktion i forhold til resultaterne.

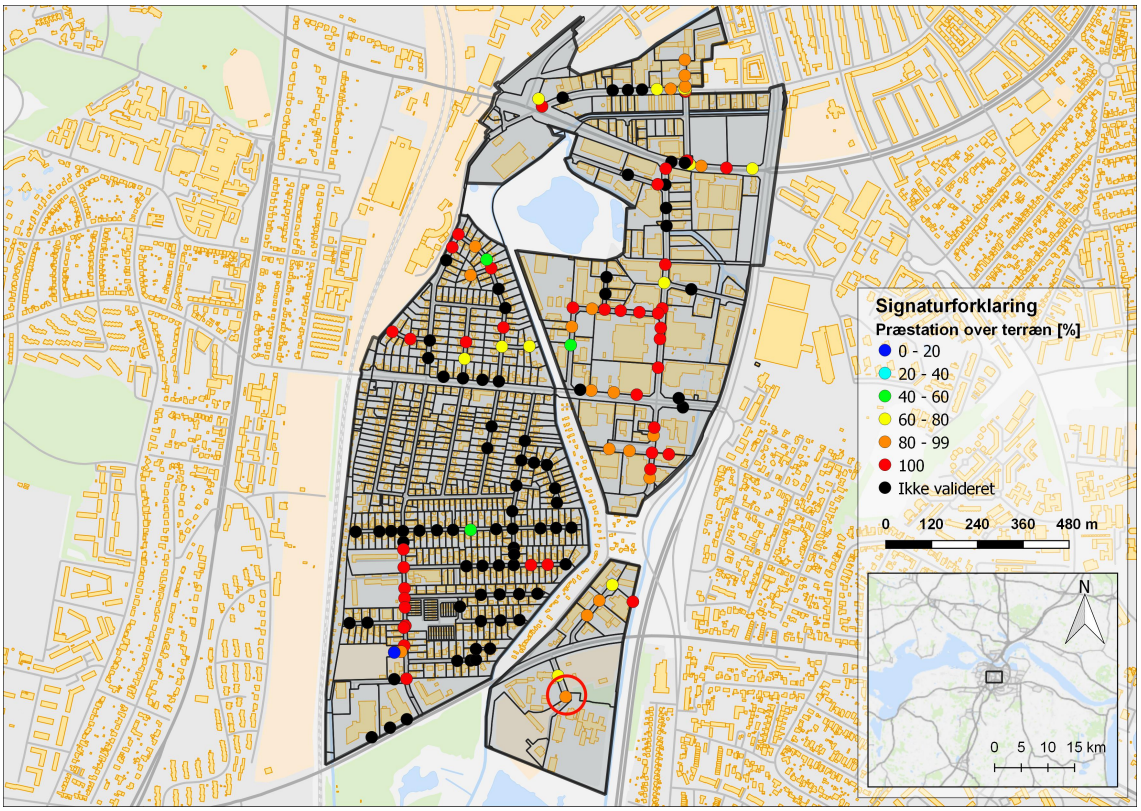
B.1 Realtidsmodel via logistiske funktioner

Til opstillingen af de logisktiske funktioner for resultaterne af CDS-regn, anvendes de kritiske regnvarighed, som blev bestemt i opstillingen af de logistiske funktioner for kasseregn.

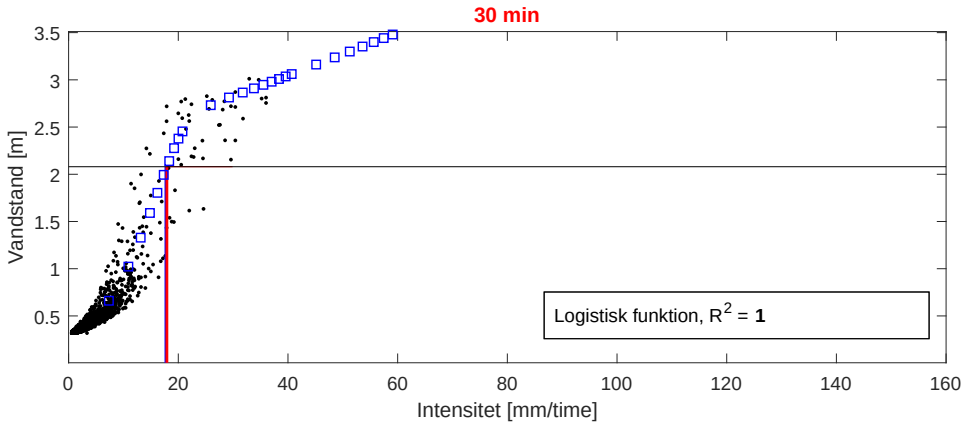
B.1.1 Valideringen

Valideringen af de logistiske funktioner for CDS-regn foretages ligesom valideringen af de logistiske funktioner for de historiske regnserier og kasseregn.

Figur B.1 vise præstationen for de logistiske funktioner bestemt udfra CDS-regn i forhold til rørmodellen i MIKE URBAN ved den historiske regnserie 5061 for noderne i projektområdet. Figur B.2 viser den logistiske funktion for node 3440201 bestemt udfra CDS-regn og vandstandsniveauerne bestemt udfra den historiske regnserie 5061.



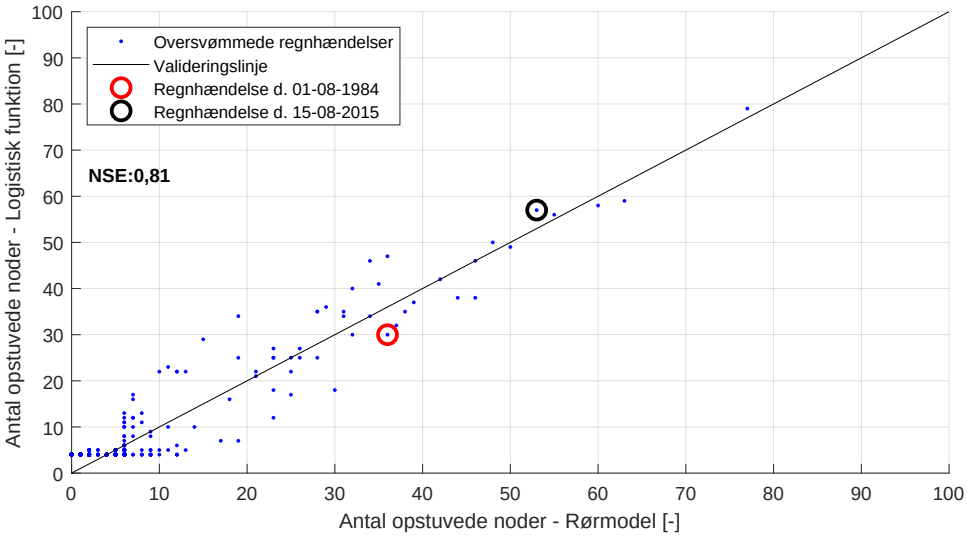
Figur B.1. Den logistiske funktions præstation i forhold til rørmodellen i MIKE UBRAN ved den historiske regnserie 5061 for hver node. Den røde cirkel viser placeringen af node 3440201.



Figur B.2. Logistisk funktion for node 3440201 bestemt udfra resultaterne med kasseregn som input. Node 3440201 er beliggende i den sydlige del af Håndværkerkvaret og markeret med rød cirkel på figur B.1.

Figur B.1 viser, at de logistiske funktioners præstation over terræn er 100% for størstedelen af noderne i projektområdet. Dermed vil de logistiske funktioner varsle størstedelen af gangene, hvis der forekommer opstuvning i noderne, hvorved de kan anvendes til varslingen af fremtidige opstuvninger. De logistiske funktioners evne til at varsle imod de opstuvninger, der forekommer ved simulering af 5061 i rørmodellen i MIKE URBAN, er i gennemsnit 90%.

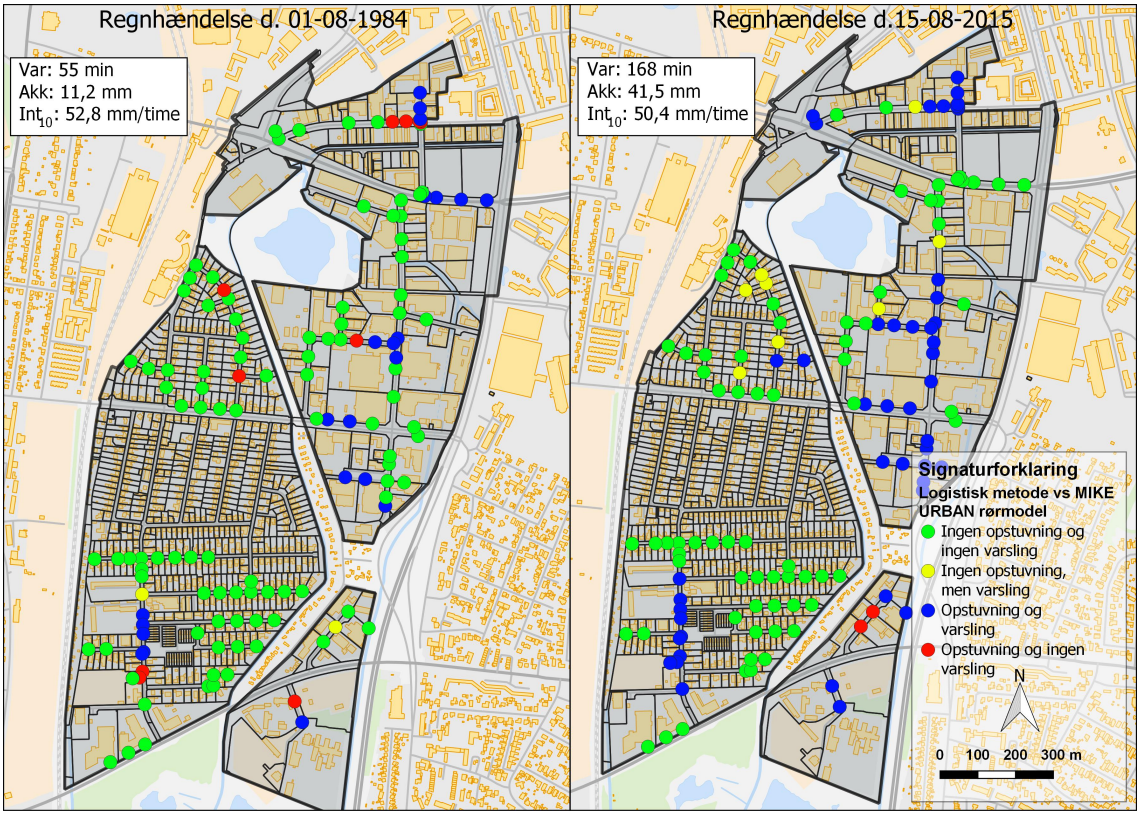
En anden måde at analysere præstationen af de logistiske funktioner, er ved at undersøge antallet af opstuvninger i noderne af de oversvømmelsesgivende hændelser, se figur B.3. Desuden markeres de valideringshændelser, der anvendes som eksempler på validering af modellen igennem rapporten.



Figur B.3. Antallet af opstuvninger fra noderne i rørmodellen i MIKE URBAN i forhold til de Logistiske funktioner med den historiske regnserier 5061 som input.

Figur B.3 viser, at der generelt opstuver omkring det samme antal noder pr. regnhændelser ifølge de logistiske funktioner som ved rørmodellen i MIKE URBAN. Dette fremgår også ved NSE-værdien på 0,81, hvorved resultaterne fra de logistiske funktioner passer godt i forhold til resultaterne fra rørmodellen i MIKE URBAN.

Figur B.4 viser hvordan den logistiske metode for kasseregn præsterer i forhold til rørmdellen i MIKE URBAN ved to forskellige regnhændelser. Disse to regnhændelser er valgt for at vise, hvordan den logistiske funktion præsterer ved en regnhændelse med få opstuvninger og en regnhændelse med mange opstuvninger.



Figur B.4. Logistiske funktioner vs rørmodellen i MIKE URBAN ved to forskellige regnhændelser.

Figur B.4 viser, at der er ni oversvømmelser fra regnhændelsen til venstre på figuren, som ikke bliver varslet imod ved den logistiske metode. Derudover er der to noder, som varsler mod oversvømmelse, hvor det ikke opstår ifølge rørmodellen. I forhold til regnhændelsen til højre på figuren, så er der to oversvømmelser, som ikke bliver varslet imod ved den logistiske metode. Og otte noder, som varsler mod oversvømmelse, hvor det ikke opstår ifølge rørmodellen. Ellers rammer den logistiske metode alle oversvømmelser fra rørmodellen for begge regnhændelser.

Den logistiske funktion baseret på CDS-regn præsterer meget godt, da størstedelen af noder i projektområdet præsterer mellem 80-100% i forhold til rørmodellen i MIKE URBAN med den historiske regnserie 5061 som input. Derudover vil den logistiske metode baseret på CDS-regn næsten altid varsle, hvis der er sandsynlighed for oversvømmelse.