

Aalborg Universitet - BUILD





AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Department of the Built Environment
Water and Environmental Engineering
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Ø
<http://www.build.aau.dk>

Titel:

Dimensionering af centrale og decentrale regnvandsbassiner ved fremtidige ekstreme regnhændelser

Projekt:

4. Semesterprojekt

Projekt periode:

Februar 2025 - juni 2025

Projekt:

Kandidatspeciale

Forfatter:

Anders Emborg

Vejleder:

Søren Liedtke Thorndahl (AAU)
Michael R. Rasmussen (AAU)

Synopsis:

Dette projekt undersøger anvendelsen af VÆRDI's klimafremskrevne regnserier til dimensionering af et komplekst afløbssystem med både centrale og decentrale løsninger. Projektet fokuserer på, hvordan en 100-års regnhændelse kan estimeres ud fra en 40-årig regnserie. Der er analyseret både passiv styring af et centralt bassin, samt passiv og global reaktiv styring af decentrale bassiner. Resultaterne viser, at decentrale bassiner med passiv udledning kan minimere det nødvendige opmagasineringsvolumen til at håndtere en 100-års hændelse. Global reaktiv styring gav derimod ikke en tilsvarende reduktion i volumenbehovet, men kunne forlænge opholdstiden i bassinerne. Denne øgede opholdstid forbedrer bundfældning af forurenende stoffer og muliggør samtidig håndtering af ekstreme regnhændelser med høje udledninger. Projektets resultater peger på, at decentrale passive løsninger er effektive til at reducere systemets kapacitetskrav, mens global reaktiv styring kan bidrage til bedre vandkvalitet og øget robusthed mod ekstreme vejrbegebenheder.

Sider: 85

Deadline: 04-06-2025

Forord

Dette projekt er blevet udarbejdet af Anders Emborg på 4. semester som speciale fra uddannelsen "Water and Environmental Engineering". Det er lavet i perioden 1/2-2025 - 6/5-2025.

Der skal lyde en stor tak til vejlederne Michael R. Rasmussen og Søren Liedtke Thorndahl for deres løbende vejledningsmøder og konstruktive feedback. En særlig tak rettes også til COWIs afdeling for Hydraulic Modeling for at stille projekteksemplet "Fjordbyen" til rådighed, for muligheden for at sidde hos dem, og for deres hjælp og sparring.

Læsevejledning

Som kildehenvisningsmetode er der brugt nummereret stilart svarende til BibTeX's unsrt-format, hvor der er henvist med efternavn og årstal, hvis årstallet haves. Kilden sættes efter et afsnit, hvor den refererer tilbage til resten af afsnittet. Tabeller, figurer og formler vil nummereres efter kapitel og placering. Der er anvendt softwareprogrammer til udarbejdelse af figurer og modeller. Softwareprogrammerne der anvendt er: AutoCAD, Mike+, PowerPoint, Python, Scalgo, QGIS og VÆRDI's regnserieværktøj V1.0.

Abstract

As climate change increases the intensity and frequency of extreme rainfall events, the need for intelligent and future-proof stormwater management solutions becomes more urgent. This report investigates the potential of intelligent control of stormwater basins within a drainage system in the Holbæk area under both current and projected climate conditions.

The objective of the study is to evaluate how different control strategies affect the system's hydraulic performance and its ability to retain pollutants. Thus, securing urban infrastructure against climate-related stress while improving water quality.

A hydraulic model was developed in MIKE+, based on real topographic and catchment data and driven by synthetically generated, climate-adjusted rainfall series. Four scenarios are analysed: passive discharge with one large basin, local reactive control, global reactive control, and a design prioritizing pollutant retention with reduced contributing area. Each scenario is evaluated through long-term simulations, extrapolation to 100-year events, and assessments of storage demand, overflow volumes, retention time, and fill level.

The results show that passive control with a single basin performs well under extreme events but offers limited water quality benefits. Global reactive control proves more effective during moderate rainfall but needs more fine adjustments to control peak loads efficiently. The highest retention potential is found in the scenario with reduced inflow and low discharge, although this comes at the cost of significantly increased volume requirements.

In conclusion, intelligent control can enhance stormwater system performance, particularly when combined with decentralised retention and reduced hydraulic loading. Future solutions should strike a balance between hydraulic resilience and environmental outcomes, with further potential in predictive, model-based control systems.

Keywords: Intelligent stormwater management, climate adaptation, hydraulic modeling, reactive control, stormwater basins, pollutant retention, extreme rainfall, urban drainage, climate-projected rainfall, water quality, decentralized retention, overflow control

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1	Indledning	1
Kapitel 2	Dimensionering af rørledninger og regnvandsbassiner	3
2.1	Afløbssystemer	3
2.2	Dimensionerings niveauer	4
2.3	Regntyper	4
2.4	Regnvandsbassiner	5
2.5	Dynamisk dimensionering af regnvandsbassiner	7
2.6	Håndtering af vand på terræn	8
2.7	Fremskrivning af regnserier til fremtidens afløbssystemer	9
2.8	Teknologier og strategier for styring af afløbssystemer	11
Kapitel 3	Introduktion til Fjordbyen	13
3.1	Grundens naturlige strømningsretning	14
3.2	Vandaflledning ved jernbane	15
3.3	Geologi i området	16
Kapitel 4	Problemformulering	17
Kapitel 5	Analytisk dimensionering af regnvandsbassiner	18
5.1	Oplandsafgrænsning og befæstelsesgrad	18
5.2	Dimensioneringsregn og bassin volumen	19
5.3	Bassinets udformning	20
5.4	Placeringsmuligheder	20
Kapitel 6	Opbygning af model	22
6.1	Modelopbygning	22
6.2	Ledningssystem, hydraulik og simulering	23
6.3	Undersøgelse af selvrensningsevne	25
6.4	Oversigt over undersøgte scenarier	26
Kapitel 7	Scenarie 1: Centralt bassin med passiv udledning	27
7.1	Bassinkapacitet og udledningskurve	27
7.2	Long-Term Statistics (LTS)	27
7.3	Fremskrivning af ekstreme regnhændelser	28
7.4	Fremtidsscenarier og dimensionering	29
Kapitel 8	Senarie 2: Serie forbundet lokal passiv udledning	32
8.1	Dimensionering og fordeling af volumen	32
8.2	Simulering og resultater fra LTS	34
8.3	Fremskrivning til 100-års hændelser	35
8.4	Fyldningsgrad og udnyttelse af bassinkapacitet	36

Kapitel 9 Scenarie 3: Globalt reaktiv styring	41
9.1 Styringsstrategi og rækkefølge for udledning	41
9.2 LTS-simuleringer af global reaktiv styring	43
9.3 Fremskrivning til ekstreme regnhændelser	44
9.4 Fyldningsgrad for udvalgte ekstrem hændelser	45
Kapitel 10 Scenarie 4: Tilbageholdelse af forurenende stoffer	47
10.1 Modelopstilling og reduceret areal	48
10.2 Dimensionering af Bassin 12	49
10.3 Styringsstrategi	50
10.4 Undersøgelse af opholdstiden i regnvandsbassinet	51
10.5 LTS-simulering	52
10.6 Fremskrivning til ekstreme regnhændelser	53
10.7 Udnyttelse af Volumen	54
10.8 Opholdstid	55
Kapitel 11 Diskussion	57
11.1 Opstuvning til terræn og rør diamter	57
11.2 Inkludering af vådvolumen og modelbaseret styring	57
11.3 Sammenhæng mellem udløbstilladelse og opmagasineringsvolumen	58
11.4 Fremskrivning af opmagasineringsvolumen og brug af VÆRDI-regnserier	59
11.5 Decentral bassinplacering og styret udledning	60
Kapitel 12 Konklusion	62
Kapitel 13 Perspektivering	63
Litteratur	64
Appendiks A Scenarie 2	67
A.1 Opmagasineringsvolumen ved LTS, for scenarie 1 og 2	67
A.2 Ekstrem statistik	68
A.3 Opmagasineringsvolumen for udvalgte hændelser, for Scenarie 1 og 2	69
A.4 Fyldningsgrad af bassiner	71
Appendiks B Scenarie 3	74
B.1 Ekstrem statistik	76
B.2 Fyldningsgrad for hvert bassin	77
Appendiks C Scenarie 4	80
C.1 Volumen for et år, for Scenarie 2 og 4	80
C.2 LTS for Scenarie 1 og 4	81
C.3 LTS for Scenarie 2 og 4	82
C.4 Ekstrem statistik	83
C.5 Vandstanden i bassinerne under en stor hændelse	84

Indledning

1

Danmark oplever i stigende grad ekstreme regnhændelser, da klimaforandringer medfører et varmere og vådere klima. Der forventes øget nedbør i forår, efterår og især vinter, mens sommeren vil byde på flere ekstreme regnskyl. Målinger viser, at den årlige nedbørsmængde er steget med 100 mm over de seneste 100 år [DMI, 2024].

Den høje grad af befæstelse i byområder reducerer naturlig fordampning og nedsivning, hvilket øger behovet for effektive kloaksystemer. Derfor etableres der kloaksystemer til bortledning af regnvand, hvilket resulterer i at regnvandet bliver ført bort hurtigere. I 2021 dækkede bebyggelse og infrastruktur 13,1 % af Danmarks areal, hvilket er en stigning på 4,8 procentpoint fra 2011 til 2021 [Danmarks statistik, u.d.]. Dette skaber et øget behov for at beskytte vandmiljøet, hvorfor der anlægges regnvandsbassiner. Regnvandsbassiner kan have adskillige fordele: De forsinker udledningen af vand for at mindske erosion, og ved etablering af et vådt regnvandsbassin vil der ske en tilbageholdelse af forurenende stoffer [Danva, 2018]. Den fysiske udformning af anlægget skal bestemmes ud fra den hydrauliske belastning i det lokale område. Her skal der både indregnes en sikkerhedsfaktor og en klimafaktor for at sikre tilstrækkelig kapacitet i bassinet [Baaner and Pedersen, 2014].

Vandrammedirektivet har til formål at forebygge yderligere forringelse af vandmiljøet og vandområder, der er direkte afhængige af vandøkosystemerne. Direktivet skal forbedre vandmiljøet ved at reducere udledningen af prioriterede stoffer og samtidig sikre mod oversvømmelse og tørke. I år 2000 vedtog EU Vandrammedirektivet, som fastslog, at alt vand – både overfladevand og grundvand – inden udgangen af 2015 skulle have opnået mindst ”god økologisk” tilstand inden 2015. Dette mål nåede Danmark ikke, hvorfor fristen blev udskudt til 2027 [Miljø og ligestillingministeriet, u.d.].

Kommunen skal give en udledningstilladelse, før der kan udledes regnvand til en recipient. Udledningstilladelser er typisk baseret på maksimale flowgrænser og tager ikke hensyn til timing af udledningen. Alle passivt styrede regnvandsbassiner er trykafhængige; uanset om der bruges vandbremse, droslerør eller spjæld, vil udledningen afhænge af vandstanden i bassinet. Derfor udformes regnvandsbassiner, så den maksimale udledning kun sker, når bassinet er fyldt helt op [Thomsen et al., 2022a].

Når der gives en udledningstilladelse, er fokus ofte på både volumen og stofkoncentrationen i vandet. De parametre, der vurderes, er recipientens størrelse og dens evne til at fortynde regnvandet. Tidspunktet for udledningen har også stor betydning. Om vinteren sker der flere udledninger, hvilket øger fortyndingen. Om sommeren kan der gå længere tid mellem regnhændelser, og i tørre perioder ophobes forurenende stoffer på vejbaner. Dette kan resultere i en større forurening af recipienten, især ved lave vandføringer. Derudover er risikoen for iltsvind større om sommeren, da varmt vand kan indeholde mindre ilt, hvilket

sænker det naturlige iltniveau [Vezzaro et al., 2022].

De seneste år har der været store iltsvind langs de danske kyster. Iltsvind langs kysterne opstår, når vandet tilføres for store mængder næringsstoffer, hvilket fører til opblomstring af alger. Når algerne synker til bunden og rådner bruger nedbrydningsprocessen ilt. Hvis iltsvindet er langvarigt, kan intet andet end svovlbakterier overleve på bunden. Stille og varmt vejr kan accelerere iltsvindet, særligt i områder med stillestående vand. Flere danske fjorde er hårdt ramt, og om sommeren kan bunden af fjordene være helt iltfri [Miljø- og ligestillingministeriet, 2022].

Det er vist, at seriekoblede våde regnvandsbassiner har en positiv indvirkning på fjernelsen af suspenderede stoffer, fosfor og næringsstoffer, det kan bidrage til at mindske iltsvindet [Nielsen, 2017].

Det er stadig vigtigt, at koblede bassiner forhindrer erosion, hvorfor det skal sikres, at der ikke opstår flere overløb fra de koblede regnvandsbassiner. Dette kan ske, hvis nogle bassiner står tomme, mens andre er helt fyldte. Dette kan dog forhindres ved at styre udledningen fra regnvandsbassinet. Før vandet føres videre fra et opstrøms bassin, skal det sikres, at der er plads i de nedstrøms bassiner. Styring af et regnvandsbassin kan have flere fordele, aktiv styring af udledningen giver mulighed for at udnytte udledningstilladelsen bedre, så den ikke kun er trykafhængig, men i stedet tillader større udledning ved lav fyldning af regnvandsbassinet. Det er muligt at mindske bassinstørrelsen med 32 %, når der bruges aktiv styring af bassinet, ved et ikke-koblet bassin uden at påvirke effektiviteten. At kunne sænke volumen er hensigtsmæssigt i byer, hvor der ofte ikke er planlagt plads til regnvandsbassiner, og hvor det samtidig er billigere at anlægge mindre bassiner. Det er muligt at implementere styring i både nye og ældre systemer. Dette er især relevant, hvor der kan være kapacitetsmangler forårsaget af tilkobling af større befæstede områder, eller hvis udledningstilladelsen sænkes [Thomsen et al., 2022a].

Dimensionering af rørledninger og regnvandsbassiner 2

Anlægning af kloakering er en stor investering, og derfor er det vigtigt at planlægge langsigtet. Oversvømmelser af ejendomme og kældre kan have betydelige økonomiske konsekvenser. Gennem tiden er der udarbejdet mange anbefalinger for bedste praksis ved anlæggelse af kloakering. Det er kommunen, der har ansvaret for kloakering uden for skel[DANVA, 2005].

2.1 Afløbssystemer

Der findes to typer regnvandsledninger: fællessystemet, hvor regn- og spildevand løber i samme ledning, og separatsystemet hvor regn- og spildevand ledes i hver sin ledning. Spildevandsmængder varierer mest i løbet af døgnet, og derfor dimensioneres spildevandsledninger derefter, mens regnvand varierer mest over årstiderne og årene. Det er for dyrt at anlægge ledninger, der kan håndtere alle regnhændelser, og derfor dimensioneres der ud fra en bestemt gentagelsesperiode, hvor der må forekomme vand på terræn med f.eks. 1, 2, 5 eller 10 års mellemrum.

Hvis der er spildevand blandet med regnvandet, kan det føre til stor næringsstofudledning til recipienter, ødelæggelse af kældre og bygninger ved oversvømmelser samt sundhedsrisici. Derfor vælger mange kommuner at etablere separatkloakering. Ved separatkloakering tillades det ofte, at der står regnvand på terræn, da dette ikke udgør en sundhedsrisiko. Det giver også mulighed for at planlægge regnvandshåndtering på overfladen [kommune, 2024].

Det er kommunen, der stiller krav til dimensionering af regnvandssystemer, kravene tager typisk udgangspunkt i Spildevandskomiteens anbefalinger. Kommunen kan vælge at indføre skærpede krav, men det skal i så fald gælde hele kommunen. Der stilles forskellige anbefalinger til, hvor ofte separate og fælles spildevandsledninger må være fuldt løbende – det vil sige lige inden der sker opstuvning i brønde. Gentagelsesperioderne fremgår af Tabel 2.1 [Spildevandskomiteen, 2005].

Tabel 2.1. Minimum gentagelsesperiode for fuldløbende rør – gældende for fælles- og separatsystemer.

Systemtype	Gentagelsesperiode [år]
Fælles	2
Separat	1

2.2 Dimensionerings niveauer

Der er forskellige beregningsniveauer, som der kan dimensioneres afløbssystemer efter. Der findes ingen faste regler for valg af beregningsniveau, hvilket afhænger af projektets kompleksitet. Beregningerne skal komme så tæt på virkeligheden som muligt, og derfor indgår der som udgangspunkt ikke en sikkerhedsfaktor i selve beregningsmetoden. Hvis der imidlertid er usikkerheder undervejs i processen, kan man vælge bevidst at anvende en sikkerhedsfaktor. Valget af sikkerhedsfaktor afhænger af systemets karakteristika. Ved store systemer med store oplande eller ved nyanlagte afløbssystemer med stort fald kan en lavere sikkerhedsfaktor anvendes. Derudover kan der inkluderes en ekstra sikkerhedsfaktor for at tage højde for fremtidige klimaforandringer, hvor mere ekstrem nedbør forventes [Spildevandskomiteen, 2005].

De forskellige beregningsniveauer kan beskrives som følgende:

Niveau 1: Den rationelle metode antager konstant intensitet og kortvarige hændelser, og derfor kun egnet til mindre afløbssystemer. Her skal der bestemmes en kritisk regnintensitet for en given gentagelsesperiode. Metoden tager kun højde for den maksimale vandføring i røret og medregner ikke opstuvning i systemet [Spildevandskomiteen, 2005].

Niveau 2: Dynamisk model, hvor der benyttes en Chicago Design Storm rain (CDS-regn). Denne metode anvendes til forholdsvis simple afløbssystemer [Spildevandskomiteen, 2005].

Niveau 3: Dynamisk model kombineret med historiske regndata. Denne metode benyttes til mere komplekse afløbssystemer [Spildevandskomiteen, 2005].

Til de forskellige beregningsniveauer bruges der forskellige nedbørstyper; de har alle forskellige fordele og ulemper.

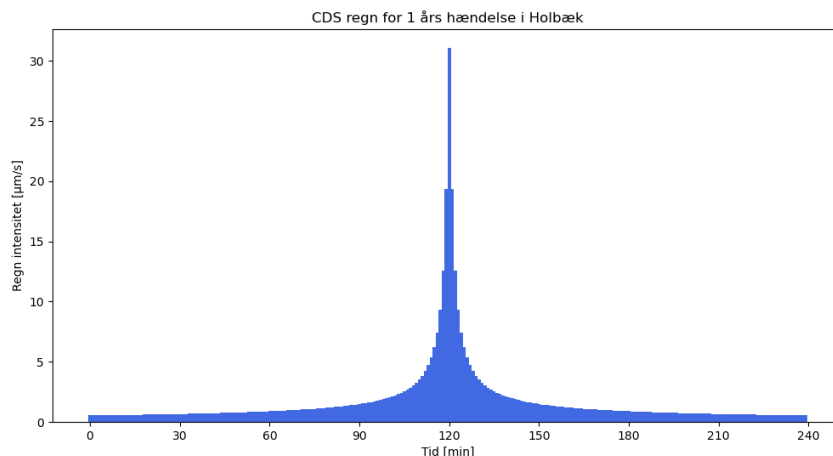
2.3 Regntyper

Nedbørsmængder kan variere meget fra sted til sted, og det er derfor nødvendigt at tage højde for den geografiske placering. Ved hjælp af regnmålere placeret rundt i hele landet er det muligt at analysere den historiske nedbør lokalt. Ekstremregn beskriver de ekstreme værdier af nedbør, og statistisk analyse gør det muligt at forudsige, hvor ofte sådanne hændelser forekommer. Til hvert modelberegningniveau bruges der forskellige regntyper. Der skelnes typisk mellem dimensioneringsregn og højopløselige tidsserier – enten historiske eller syntetiske.

Dimensioneringsregn kan være en kasseregn eller en CDS. Dette er syntetisk regn konstrueret ud fra historiske regndata og statistiske analyser. Den dimensionsgivende regn defineres som en bestemt regnintensitet over en given periode. En kasseregn har en konstant intensitet over hele perioden, mens en CDS-regn har varierende intensiteter, hvor den højeste intensitet falder over den korteste varighed. CDS-regnen giver et bedre billede af, hvornår systemet er mest belastet.

Til konstruktion af en CDS-regn anvendes principperne fra [Keifer and Chu, 1957]. Her

fastlægges, hvilken hændelse der dimensioneres efter, samt en sikkerhedsfaktor, som tager højde for klimatiske usikkerheder. Når den gennemsnitlige årlige nedbør kendes, kan man konstruere en regional regn. Et eksempel på en 1-års hændelse med en sikkerhedsfaktor på 1,3 og en gennemsnitlig årlig nedbør på 689 mm vises i Figur 2.1 [Spildevandskomiteen, 1999].



Figur 2.1. Eksempel på en syntetisk CDS-regn vist over 4 timer, svarende til en 1-års hændelse ved en gennemsnitlig nedbør på 689 mm.

Historiske regnserier anvendes for at vise et mere realistisk og langvarigt forløb. De kan bruges til at simulere overløb fra bassiner og til at vurdere, hvordan systemet belastes under bestemte hændelser. Når man arbejder med historiske regndata, bør man dog være varsom med at fokusere på en enkelt ekstrem hændelse, da en sådan hændelse ikke vil gentage sig på præcis samme måde. Det gør det vanskeligt at vurdere, hvilken gentagelsesperiode systemet egentlig dimensioneres efter [Spildevandskomiteen, 1999].

2.4 Regnvandsbassiner

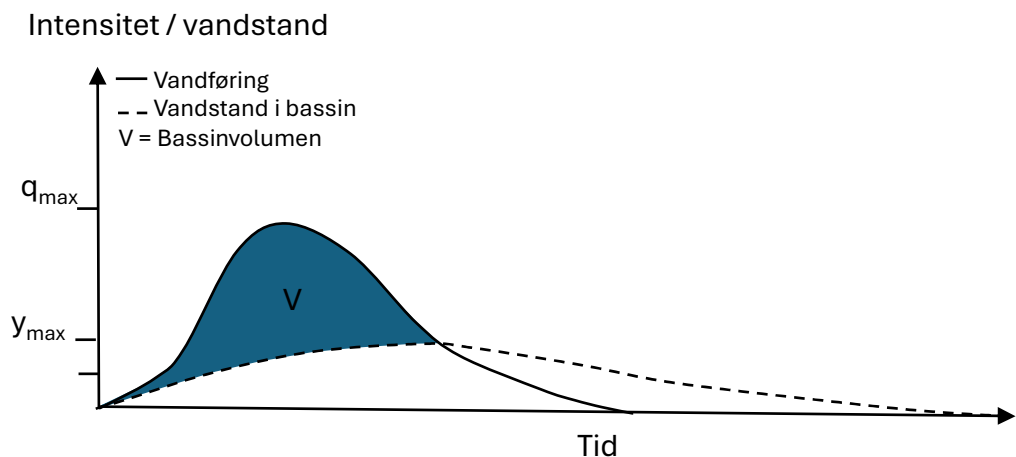
Når afløbssystemer dimensioneres, skal regnvandsbassiner også dimensioneres med henblik på opmagasinering af regnvand. Ved dimensionering af regnvandsbassiner baseres beregningerne på tidligere erfaringer.

Den traditionelle og mest simple metode til dimensionering af bassiner tager udgangspunkt i en kendt udløbstilladelse. På baggrund heraf tilføjes en regnserie for det pågældende område. Kommunen fastsætter krav om opstuvning til kritisk niveau i bassin, afhængigt af hvilket afløbssystem bassinet dimensioneres til. Kravene fremgår af Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Minimum gentagelsesperiode for regnvandsbassiner ved opstuvning til kritisk kote – gældende for fælles- og separatsystemer.

Systemtype	Gentagelsesperiode [år]
Fælles	10
Separat	5

Til dimensionering af regnvandsbassiner bruges ofte kasseregn. Dette skyldes, at man antager, at bassiner primært bliver påvirket af regnens samlede volumen – og ikke variationer i intensitet. Det er muligt at beregne, hvor stor en del af regnmængden der skal opmagasineres, for at regnhændelsen kan afledes til recipienten uden oversvømmelse. En skitse af det kan ses på Figur 2.2, hvor vandføringer til bassinet, der er større end udlødningsstilladelsen, skal opmagasineres.

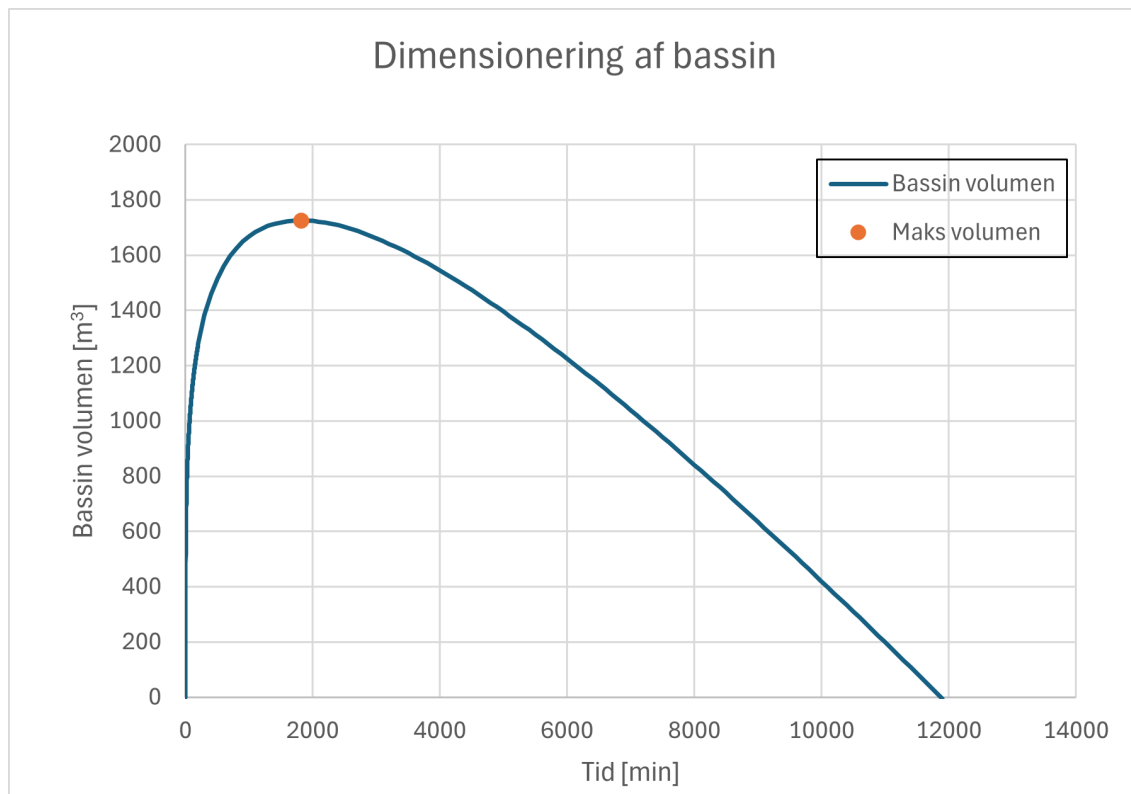


Figur 2.2. Skitsering af, hvordan der dimensioneres det nødvendige opmagasineringsvolumen når der er udvalgt en regnserie [Winther et al., 2011].

Udløbet afhænger ofte af vandstanden i bassinet, hvor udløbet bliver større med en højere vandstand. Ved simpel dimensionering antages der fuld udnyttelse af udløbstilladelsen under hele hændelsen. Når bassinet skal dimensioneres, skal det bidragende areal for området kendes. Her vurderes størrelsen af det befæstede areal, også beskrevet som reduceret areal for området. Der er flere regnskemaer til at beskrive regnintensiteten. Regnintensiteten skal vælges ud fra en bestemt gentagelsesperiode, og hvor i landet man befinder sig. Alt efter udløbstilladelsen og størrelsen på det bidragende areal, vil det være forskelligt, hvilken regnvarighed der bliver dimensionsgivende. Det er muligt at finde nedbørskonstanter, der beskriver regnintensiteten afhængigt af regnvarigheden. Ved hjælp af Ligning 2.1 kan bassinvolumen beregnes, hvis man kender det reducerede areal, sikkerhedsfaktorerne og nedbørskonstanterne for den valgte regnhændelse. Et eksempel på, hvordan en sådan dimensionering kan se ud, er vist i Figur 2.3 [Winther et al., 2011].

$$V = F_{red} \cdot (f \cdot c \cdot t_r^{-\alpha} \cdot t_r - a \cdot t_r) \quad (2.1)$$

V	Basinvolumen
F_{red}	Reduceret areal [ha]
f	Sikkerhedsfaktor [-]
c, α	Nedbørskonstanter fra regnrækkerne [-]
t_r	Regnvarighed [s]
a	Afløbstallet [m^3/s]



Figur 2.3. Skitsering af, hvordan der regnes volumen efter der er udvalgt en regnserie [Vollertsen, 2021].

Her vil den dimensionsgivende regnintensitet være, når det regner i 1.800 min, hvor det nødvendige bassin volumen er 1.725 m³.

SVKs anbefalinger kommer fra tidligere erfaringer, derfor forudsætter det, at det er et simpelt system, der undersøges for. Dette er vist, at SVKs regionale regnrækkeværktøj er robust ved beregning med høje afløbstal. Dette skyldes, at den korte opmagasineringstid reducerer effekten af koblede hændelser, da bassinet når at tømmes inden næste regnhændelse. Ved udløbstal under 0,5 l/s/ha beregnes et for lille volumen, især, hvis tømningstiden overstiger 72 timer [Gregersen et al., 2023].

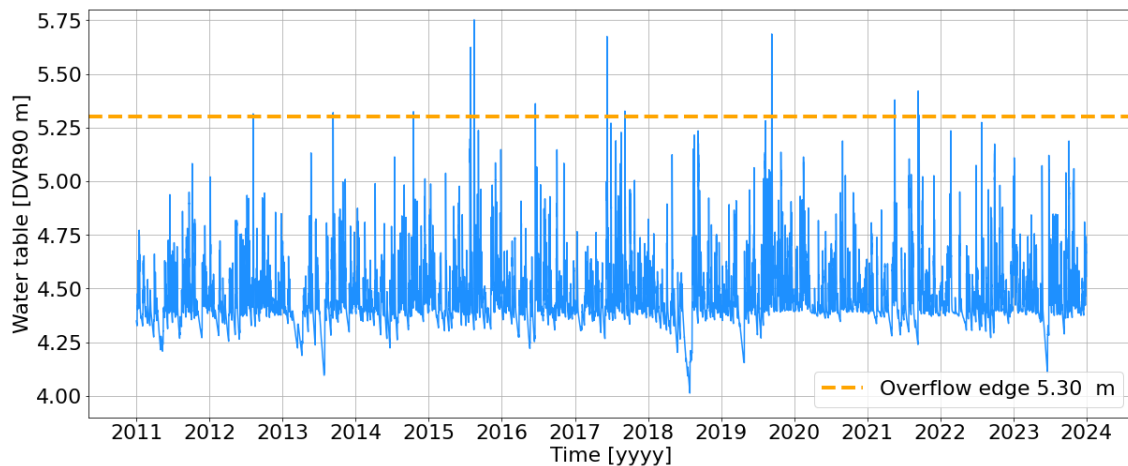
I mange tilfælde tømmes regnvandsbassiner ved gravitation, og afløbstallet vil derfor være størst, når bassinet er fyldt. Ved dimensionering med SVKs regnserie-værktøj bør det nøje overvejes, hvilket udledningstal der anvendes. Det maksimale afløbstal bør ikke nødvendigvis anvendes, da bassinet i praksis ofte ikke er fuldt, og udledningen derfor er lavere [Gregersen et al., 2023].

2.5 Dynamisk dimensionering af regnvandsbassiner

En alternativ metode til dimensionering af regnvandsbassiner er at anvende en dynamisk model af afløbssystemet kombineret med en historisk regnserie over flere år. Denne metode gør det muligt at indregne rørdimensioner, ruhed og transporttid til bassinet, samt at analysere, hvor i systemet der kan ske opstuvning. I den dynamiske model kan der placeres et

bassin i enden af systemet med uendelig volumen, hvilket muliggør at observere vandstanden og bestemme det nødvendige bassinvolumen for at undgå overløb oftere end en bestemt gentagelsesperiode.

Hvis man eksempelvis har en 40-årig regnserie og dimensionerer efter en 5-års gentagelsesperiode, må der statistisk set ske overløb op til 8 gange. Figur 2.4 viser en simuleret vandspejludvikling for et bassin i Frejlev, hvor overløb forekommer 11 gange over 13 år. Hvis kravet er, at overløb højst må ske hver 5. år, må der maks ske to overløb, der skal bassinkanten hæves til omtrent kote 5,7 for at holde antallet af overløb indenfor kravet.



Figur 2.4. Modelleret vandspejl for Frejlev, hvor den historiske regnserie medfører for mange overløb, hvis det valgte bassinvolumen anvendes.

2.6 Håndtering af vand på terræn

Tidligere har vurderingen af serviceniveau primært fokuseret på opstuvning i afløbssystemet. I SVK Skrift 31 introduceres der imidlertid et nyt perspektiv, hvor serviceniveauet i stedet vurderes på terrænniveau. Der tages højde for den vandstand, der kan accepteres på overfladen ved ekstreme hændelser.

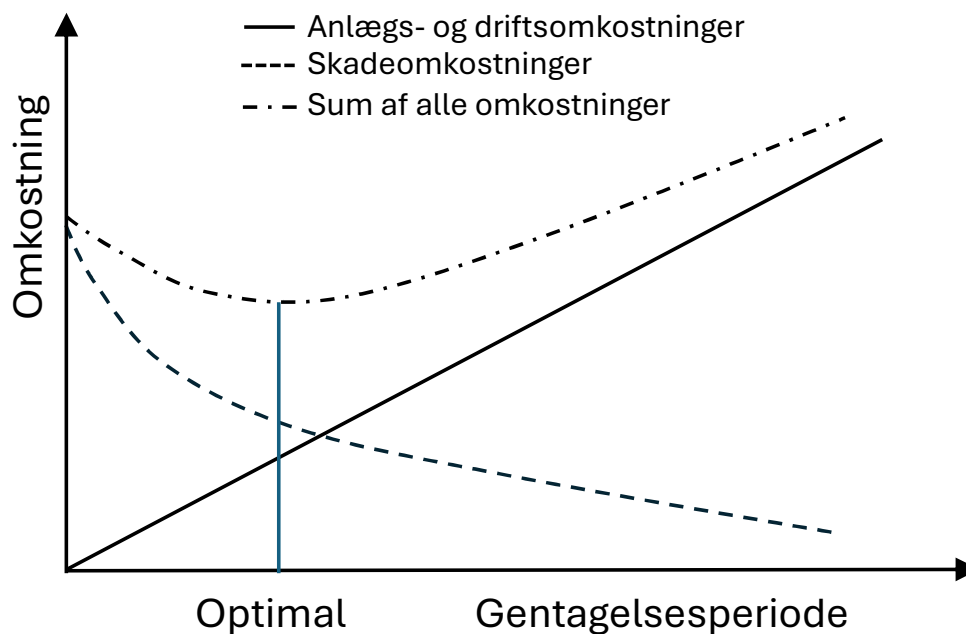
Det er kommunerne, der fastsætter det ønskede serviceniveau for borgerne, dog er det ikke muligt at tilbyde samme serviceniveau overalt, da mængden af vand på terræn afhænger af flere lokale forhold – herunder terrænets fald og udbygningsgraden i området.

Serviceniveauet kan defineres på flere måder. En simpel tilgang kunne være at fastsætte en generel grænse, f.eks. at der maksimalt må være 10 cm vand på terræn ved en 100-års hændelse. Generelle grænser af den art er ofte uhensigtsmæssige, grundet visse områder kræver mere beskyttelse, såsom sygehuse eller byområder med kulturhistorisk værdi. I disse tilfælde kan det være nødvendigt at stille skærpede krav.

Alternativet er, at foretage en økonomisk optimering, hvor man vurderer de potentielle skader, som vand på terræn kan forårsage i det givne område. Skadernes omfang vil variere afhængigt af områdets anvendelse. I en park vil oversvømmelse typisk have lavere skadesomkostninger end i et boligområde.

På baggrund af oversvømmelseskort kan der foretages en analyse, estimerer omfanget af skader en given hændelse vil kunne forårsage. De vigtigste faktorer for skadesomkostningerne er vanddybden, varigheden af oversvømmelsen og graden af forurening i vandet [Spildevandskomiteen, 2017].

Denne optimering kan illustreres med en cost-benefit-analyse, som vist i Figur 2.5. Her fremgår det, hvordan anlægs- og driftsomkostninger til afløbssystemet stiger lineært i takt med højere serviceniveau, mens besparelsen i skadesomkostninger falder logaritmisk. Der vil næsten altid være en risiko for skader ved ekstreme hændelser, hvilket grafen også viser [Spildevandskomiteen, 2017].



Figur 2.5. Optimering af anlæg og drift i forhold til, hvilken gentagelsesperiode systemet kan håndtere [Spildevandskomiteen, 2017].

2.7 Fremskrivning af regnserier til fremtidens afløbssystemer

Skrift 26 introducerede den første større model baseret på historiske regndata. Modellen er siden blevet opdateret i skrifterne 28, 30 og senest 32. Udvalgte datasæt er anvendt for at opnå den bedst mulige repræsentation af forholdene i Danmark. Der er øget fokus på ekstreme regnhændelser, og derfor er der blevet indsamlet mange regnserier fra 2005 og frem. Spildevandskomiteen har dog fravalgt dele af de nyere data for at bevare kontinuiteten i det historiske overblik fra 1880 og frem.

Regnintensiteten steg omkring 2011, og hvis man udelukkende havde anvendt nyere data, kunne det have ført til for høje fremskrivninger. Perioden omkring 2011 var særlig våd, men lignende perioder har tidligere forekommet, og det er ikke sikkert, at tendensen vil fortsætte. Antallet og placeringen af regnmålere varierer geografisk i Danmark –

eksempelvis er Sønderjylland relativt dårligt dækket. Dette skaber usikkerhed i den nationale repræsentation af regndata [Jensen et al., 2023].

Samtidig med udarbejdelsen af SVK Skrift 32, som fokuserer på regional variation i ekstremregn, blev projektet *VÆRDI* igangsat. Målet med projektet er at udvikle et værktøj til udvælgelse og analyse af regnserier, der kan bruges til både nutidig og fremtidig dimensionering. Lange tidsserier er særligt nyttige ved dimensionering af bassiner, da de gør det muligt at identificere koblede hændelser, som ellers risikerer at føre til underdimensionering [DANVA, u.d].

Ved fremskrivning af regn kan der på dimensioneringsregn ganges en klimafaktor på kasseregn og CDS-regn. Det er dog vist, at anvendelse af en klimafaktor på historiske serier ofte medfører overvurdering af årsnedbøren i forhold til de forventede fremtidige nedbørsmønstre [Thorndahl et al., 2020].

Projektet *VÆRDI* – med deltagelse fra bl.a. DTU og AAU – forsøger at imødekomme disse udfordringer ved at generere syntetiske regnserier, der bedre afspejler de forventede ændringer i nedbør, såsom mere intense, kortvarige sommerregn og længere tørkeperioder [Thorndahl et al., 2020].

AAU's tilgang har været at simulere et stort antal regnserier med varierende intensitet, som derefter analyseres i forhold til fremtidige nedbørsparemetre. Nedbørsparemetrene er blevet fastsat ud fra DMI klimaatlas og SVK Skrift 30 for årsnedbør, døgnsnedbør og gentagelsesperioder for forskellige varigheder. Baseret på disse analyser er en række serier blevet udvalgt som repræsentative for fremtidens nedbør i forskellige danske regioner, mens andre er frasorteret. Dette muliggør brug af mere realistiske regnprofiler ved design af afløbssystemer [Thorndahl et al., 2020].

Et digitalt værktøj er udviklet til at understøtte udvælgelsen, hvor brugeren kan angive både geografisk område og ønsket fokus for regnintensitet, varighed og gentagelsesperiode. *VÆRDI*-værktøjet er dog endnu ikke offentligt tilgængeligt, da der pågår interne drøftelser i SVK om dets anvendelighed og nøjagtighed. Der er også bekymringer om, at værktøjet kan blive anvendt ukritisk på komplekse systemer eller til analyser af f.eks. iltvind [Jensen et al., 2023].

Udviklingen af værktøjer, som *VÆRDI*, markerer et vigtigt skridt i retning af bedre klimatilpasning. For at håndtere fremtidens intensiverede regnhændelser er det dog ikke nok at kende deres karakter – det er nødvendigt også at tilpasse og optimere eksisterende afløbssystemer. Her spiller styring en central rolle. Ved at implementere styringssystemer i eksisterende kloaknet kan kapaciteten i bassiner og ledninger udnyttes mere effektivt, hvilket mindsker risikoen for overløb og oversvømmelser. Styring tilføjer dog kompleksitet til beregningerne i større afløbssystemer.

2.8 Teknologier og strategier for styring af afløbssystemer

I større afløbssystemer, hvor flere bassiner skal fungere sammen, er det muligt at styre udløbene fra bassinerne. Med nutidens teknologier er avanceret styring af afløbssystemer blevet mere tilgængelig, hvilket muliggør forebyggelse af overløb fra bygværker og samtidig bedre udnyttelse af bassinkapaciteten [Campisano et al., 2013].

Styringen baseres primært på måling af vandniveauer i bassiner og rør for at overvåge fyldningsgrad, vandflow og detektere overløb. Der findes flere metoder til at måle vandstand:

- **Kapacitive sensorer:** Består af to metalplader, hvor strøm ledes imellem. Luft er en dårlig leder, men når vandet stiger mellem pladerne, ændres ledningsevnen, hvilket anvendes til at bestemme vandstanden. En ulempe er, at sedimenter kan påvirke målingens nøjagtighed [Campisano et al., 2013].
- **Trykmålere:** Placeres nær bunden af et bassin og måler vandstanden gennem trykændringer. Da det atmosfæriske tryk varierer, kræves en referencesensor placeret over vandoverfladen [Campisano et al., 2013].
- **Ultralyds- og mikrobølgesensorer:** Måler afstanden til vandspejlet uden kontakt med vandet. Ultralydssensorer anvender lydbølger, mens mikrobølgesensorer benytter elektromagnetiske bølger. De kræver minimal vedligeholdelse, da de placeres over vandet, men skal installeres korrekt for at undgå fejllæsninger som følge af vægspjlinger, kondens eller vandsprøjt [Campisano et al., 2013].

Til regulering af vandflow kan følgende udstyr benyttes:

- **Pumper:** Kan programmeres til at køre ved bestemte tidspunkter eller vandniveauer [Schutze et al., 2004].
- **Regulerbare vandbremsere:** Justerer åbningen i forhold til det ønskede vandflow i systemet [Schutze et al., 2004].

Der findes to overordnede styringsmetoder:

- **PLC (Programmable Logic Controllers):** Lokale, robuste enheder, der fungerer uafhængigt af et centralt system. De reagerer hurtigt og er meget driftssikre [Campisano et al., 2013].
- **RTU (Remote Terminal Units):** Afhænger af forbindelse til en central enhed. De muliggør fjernovervågning og -styring og gør det lettere og billigere at justere driften [Campisano et al., 2013].

Styring kan udføres på forskellige niveauer, hvor kompleksiteten øges i takt med styringsniveauet. Dette skyldes, at flere komponenter skal samarbejde, og at der kræves mere arbejde med strategiudvikling og vedligeholdelse. Det er derfor vigtigt at analysere og forstå systemet, før man implementerer avancerede styringsmekanismer, for at undgå unødvendig kompleksitet i forhold til den potentielle gevinst [Campisano et al., 2013].

Styringsniveauer kan inddeles som følger, hvor kompleksiteten øges for hvert trin:

- **Lokal styring:** Udledningen styres lokalt uden påvirkning fra andre faktorer [Campisano et al., 2013].
- **Global styring:** Sensorer i flere bassiner sender data til en central enhed, som beregner, hvor meget vand der skal ledes videre [Campisano et al., 2013].
- **Integreret styring:** Udvider den globale styring ved også at inkludere eksterne data som f.eks. vandstand i recipienter eller vejrprognoser [Campisano et al., 2013].
- **Modelbaseret forudsigelsesstyring:** Anvender vejrdato og aktuel systemkapacitet til at forudsige flaskehalse og optimere vandfordelingen [Campisano et al., 2013].

Styringsstrategierne kan desuden kategoriseres mere detaljeret efter lokalitet og kompleksitet:

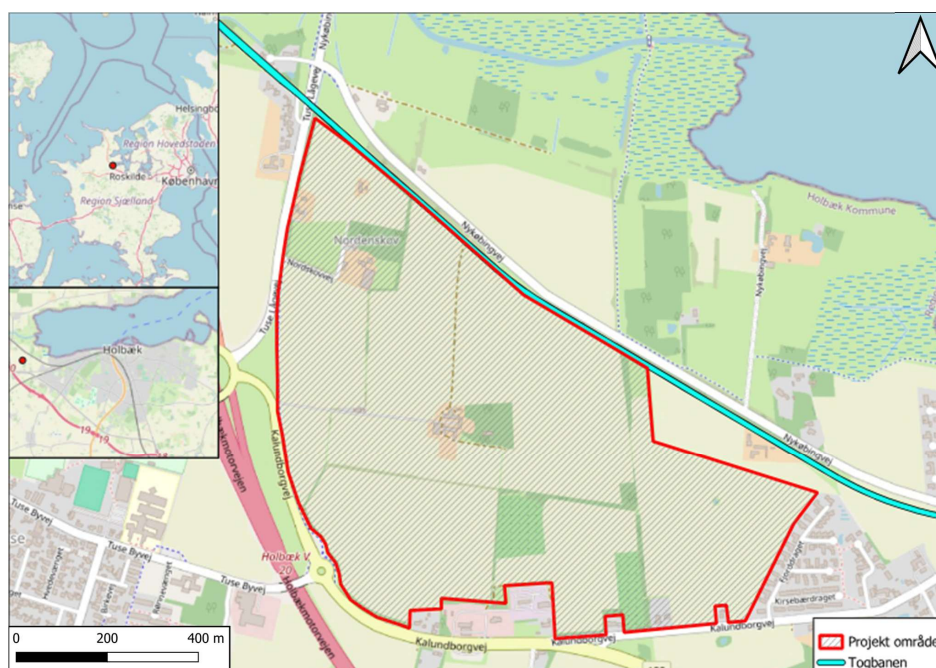
- **Lokal passiv styring** – f.eks. en vandbremse uden sensorer [Campisano et al., 2013].
- **Lokal reaktiv styring** – sensorer aktiverer pumper eller spjæld ved bestemte vandniveauer [Campisano et al., 2013].
- **Global reaktiv styring** – realtidsdata fra flere bassiner koordineres.
- **Integreret reaktiv styring** – kombinerer målinger i både bassin og recipient [Campisano et al., 2013].
- **Global modelbaseret forudsigelsesstyring** – inddrager f.eks. vejrprognoser [Campisano et al., 2013].
- **Integreret modelbaseret forudsigelsesstyring** – kombinerer alle relevante datakilder og modeller [Campisano et al., 2013].

Hyppige driftsfejl kan føre til, at avanceret styring opgives til fordel for mere simple, driftssikre løsninger. Afløbssystemer er hårde miljøer, hvor udstyret skal være modstandsdygtigt over for kondens, korrosion, sediment, olie og affald. Derfor er det afgørende, at sensorer, pumper og spjæld er af høj kvalitet for at minimere risikoen for nedbrud. Hvis der opstår mange fejl, kan det føre til, at man opgiver den avancerede styring og i stedet vender tilbage til en simplere løsning [Campisano et al., 2013].

I det næste afsnit vil der blive kigget på et konkret eksempel, hvor et nyt afløbssystem skal dimensioneres.

Introduktion til Fjordbyen 3

Holbæk Kommune har oplevet en stor tilflytning af nye borgere. For at fastholde tilflytterne er der udarbejdet en plan for arealudlægning til byudvikling. Der er planlagt udvikling flere steder i kommunen, blandt andet i kommunens største by, Holbæk. Her er der afsat et areal på ca. 100 ha vest for Holbæk langs kysten til byudvikling [Holbæk-kommune, 2020].



Figur 3.1. Oversigt over projektgrunden samt togbanen ved den nordlige projektgrænse.

Området ligger ned til Holbæk Fjord mod nordøst og Tuse Ådal mod nord. Det består i dag primært af landbrugsjord. Der er flere visioner for det nye område, som er målrettet familier med børn. Derfor er det essentielt at der etableres velfungerende infrastruktur med nem adgang til bl.a. indkøb, daginstitutioner og motorvejene.

Der er planlagt en variation af parcel- og rækkehuse i 1-4 etager. Langs projektgrundens nordlige grænse løber en togbane. Det er planen at etablere et stoppested tæt på fjordbyen for at skabe en god transportforbindelse. Desuden skal der anlægges et stisystem under togbanen samt etableres en løsning til håndtering af regnvand under skinnerne [Arkitema, 2022].

Arkitema er arkitektfirmaet, der har udviklet situationsplanen for Fjordbyen, som har et bruttoareal på 110 ha. Situationsplanen er ikke endelig, men fungerer som et godt udgangspunkt for, hvor forskellige bygninger kan placeres. Der er udarbejdet en

oversigtsplan, der viser den foreslåede placering af boliger, veje og grønne områder, som kan ses på Figur 3.2.

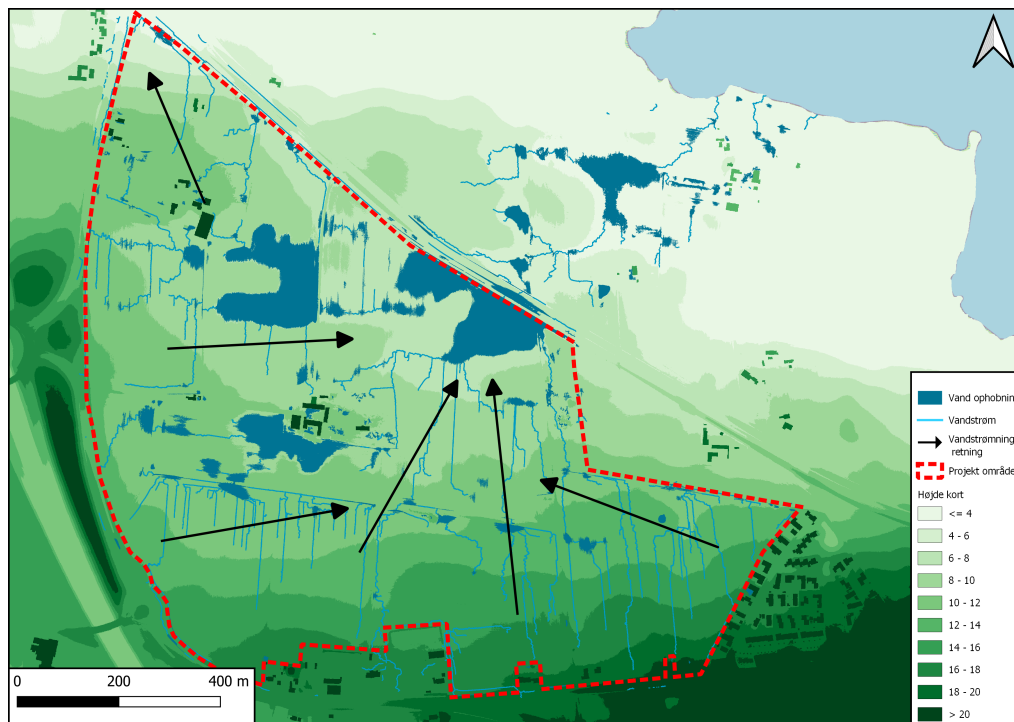
I den nordøstlige del af området står en anden entreprenør for områdets design, hvorfor bygningerne i dette område er sløret. Der forventes en udledningstilladelse fra Holbæk Kommune på 20 l/s/red ha. Desuden stiller Holbæk Kommune krav om tilbageholdelse af en 100-års hændelse på egen grund, hvor der tages højde for klimafaktorer [Bøgsted, 2024].



Figur 3.2. Oversigt over det foreslåede bydesign for Fjordbyen, hvor placeringen af huse, grønne områder, legepladser og søer kan ses. I den nordøstlige del er området sløret, da en anden entreprenør står for designet af dette område [Arkitema].

3.1 Grundens naturlige strømningsretning

Bygherren ønsker at udnytte den naturlige strømningsvej til synlig vandhåndtering. Kraftige regnskyl kan føre store vandmængder med sig på kort tid, hvilket gør det upraktisk at pumpe regnvandet. Projektgrunden har et betydeligt naturligt fald mod nord, ned mod fjorden. I forbindelse med byudviklingen skal der flyttes jord til udgravning af veje, fundamenter og regnvandsbassiner. Målet er at genanvende jorden inden for projektområdet, blandt andet til etablering af en støjvold ved projektgrænsen eller til hævnning af dele af området. Scalgo er anvendt til at kortlægge den naturlige strømningsvej før projektstart, som illustreret i Figur 3.3. Her er der illustreret strømningsvejen og opstuvningen, der vil ske på terrænet, hvis der falder 20 mm regn, hvor der er vist strømningsvejen for et opland, der er større end 1.500 m². Hvor der kun er vist strømmingen inden for projektgrunden og strømningsvejen ned til fjorden fra projektgrunden.



Figur 3.3. SStrømningsvejen er illustreret med blå linjer, og områder med forventet vandophobning er ligeledes markeret. De sorte pile viser den overordnede strømningsretning [Scalgo].

Ud fra strømningsvejen kan det ses, at vandet vil samle sig i midten af den nordlige del af projektområdet, hvor der er en lavning. Her vil det være muligt at opsamle størstedelen af vandet ved hjælp af gravitation, hvilket er fordelagtigt, da der således kun skal graves under banen ét sted. Der er dog et mindre område i den nordvestlige del af projektgrunden, hvor vandet ikke naturligt strømmer i samme retning som resten af området. Hvis dette vand skal ledes til fjorden via samme afløbspunkt som resten af området, skal grunden enten hæves, eller der skal installeres et pumpeanlæg.

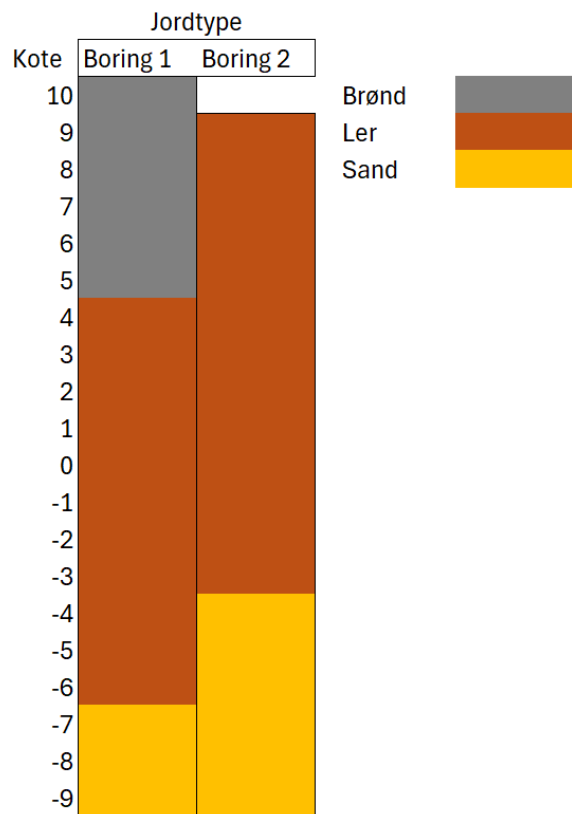
3.2 Vandafledning ved jernbane

Det naturlige topografiske fald mod fjorden bliver afbrudt af togbaneskinneerne, hvilket betyder, at der skal graves under banen for at kunne lede vandet væk. I banenormen BN1-11-1 fra 2006 stilles der krav om, at vandspejlskoten maksimalt må være 0,3 m under råjorden fra banen. Derfor er den maksimale vandspejlsgrænse fastsat til 1,2 m under banens terræn, hvilket også bliver den maksimale vandspejlshøjde i bassinerne. Da togskinneerne forhindrer muligheden for at etablere et overløb af vand, der bliver ført til fjorden, skal der indregnes en ekstra sikkerhedsfaktor [Bøgsted, 2024].

3.3 Geologi i området

Der undersøges for om det er mulighed at anvende nedsivning på projektgrunden. For at nedsivning kan være en effektiv metode til håndtering af regnvand, skal jordbunden have en høj hydraulisk ledningsevne. Den hydrauliske ledningsevne er høj, hvis jordtypen primært består af sand eller grus [Spildevandskomiteen, 2015]. Der er foretaget to borer i området, hvor geologien er beskrevet, placeringen for de to borer kan ses på Figur 3.5. De identificerede jordtyper er blevet beskrevet og visualiseret, som det fremgår af Figur 3.4 [Geus, u.d].

Ud fra Boring 2 kan det konstateres, at jorden i det øverste lag er leret. Boring 1 indeholder ikke en beskrivelse af de øverste jordlag, da brønden er blevet udgravet. Da jorden på projektgrunden overvejende ser ud til at være leret, er nedsivning ikke en hensigtsmæssig løsning til regnvandshåndtering. Derfor skal alt regnvand ledes til fjorden via en regnvandsledning under jernbaneskinnerne.



Figur 3.4. Optegning af jordtyper, for hver boring, til koten.



Figur 3.5. Oversigt over placeringen af de to geotekniske borer.

Problemformulering 4

I forbindelse med byudviklingsprojektet "Fjordbyen" i Holbæk skal der dimensioneres regnvandsbassiner til håndtering af en 100-års regnhændelse på egen grund. I den nordøstlige del af området løber en jernbane, hvor det er et krav om en ekstra sikring, for at undgå vand på skinnerne. For at sikre tilstrækkelig beskyttelse af jernbanen under en 100-års hændelse inddrages både nutidige og klimafremskrevne regndata i vurderingen.

Derudover undersøges muligheden for at etablere både centrale og decentrale bassiner i tilgængelige grønne arealer i området. I den forbindelse vurderes forskellige strategier for styring af udledning fra bassinerne med henblik på at minimere det nødvendige opmagasineringsvolumen og samtidig sikre god tilbageholdelse af forurenende stoffer.

Dette leder frem til følgende problemformulering:

Hvordan kan opmagasineringsvolumen ved en 100-års systembelastning fremskrives og optimeres i et komplekst afløbssystem, hvor styret udledning og placeringen af centrale og decentrale regnvandsbassiner inddrages med henblik på at reducere både volumenbehov og udledningen af forurenende stoffer?

Underspørgsmål:

1. Hvordan kan klimafremskrevne regnserier anvendes til at fremskrive og vurdere opmagasineringsbehovet?
2. Hvordan påvirker forskellige styringsstrategier belastning og opmagasineringsvolumen behovet?
3. Hvordan bidrager centrale/decentrale bassiner med styret udledning til at forbedre vandkvalitet?

Fokusområder:

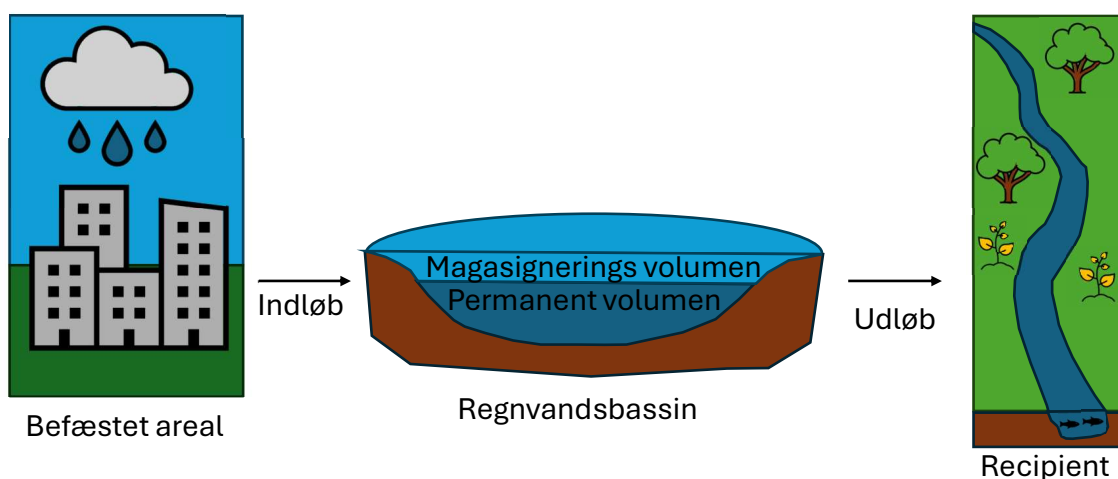
- Effektiviteten af lokal passiv udledning fra decentralt bassiner sammenlignet med ét centralt bassin.
- Gevinster ved at anvende global reaktiv styring frem for lokal passiv styring af et decentral bassiner.

Analytisk dimensionering af regnvandsbassiner

5

Der er undersøgt, hvor stort et bassin der skal dimensioneres, hvis der kun etableres ét enkelt bassin for enden af bakken. Der dimensioneres efter en kasseregn svarende til en 100-års hændelse.

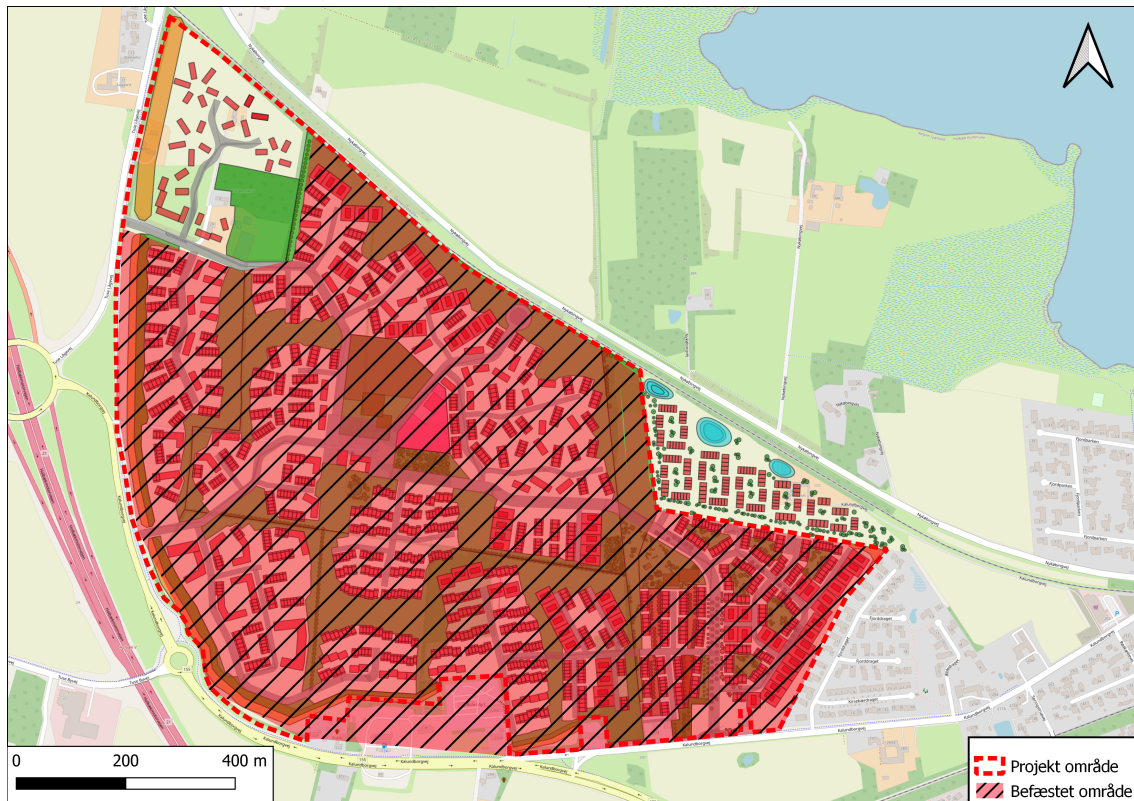
Det antages, at regnen falder direkte ned i regnvandsbassinet, hvorfor der ikke er nogen transporttid fra oplandet. Herefter ledes vandet til en recipient, som illustreret i principskitzen i Figur 5.1 [Winther et al., 2011].



Figur 5.1. Principskitse af et befestet opland, hvor vandet bliver ført til et vådt regnvandsbassin og videre til recipient.

5.1 Oplandsafgrænsning og befæstelsesgrad

Befæstelsesgraden for området er beregnet ved hjælp af situationsplanen, hvor bygninger og veje er vurderet som 100% befæstet. For at kunne sammenligne dimensioneringen af et enkelt bassin med senere beregninger, er det nordvestlige område af grunden samt arealer håndteret af andre bygherrer ikke medtaget. Det beregnede opland kan ses på Figur 5.2. Det giver et samlet befæstet areal på 35 ha. Der er givet en udledningstilladelse på 20 l/s/ha til fjorden, hvilket medfører en maksimal udledning på 700 l/s.



Figur 5.2. Ledningsstrækningen, der er blevet undersøgt.

5.2 Dimensioneringsregn og bassin volumen

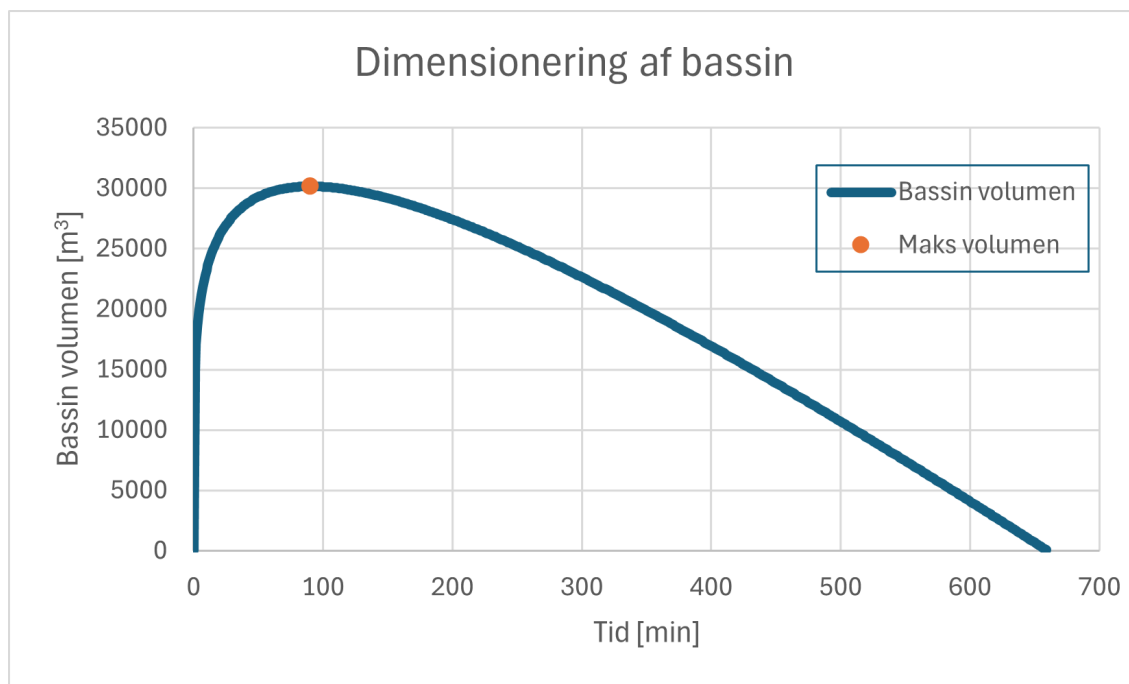
For at bestemme størrelsen på et bassin, der kan håndtere en 100-års historisk regnhændelse, anbefales det at medregne ikke-befæstede områder. Da grunden er skrånende og har begrænset nedsivning, er det valgt at regne med 70% befæstet areal, hvilket også dækker over, at noget regn vil blive opsamlet i lavninger [Spildevandskomiteen, 2014]. Derfor tilføjes yderligere 37,4 ha som værende bidragende areal til bassinet. Det giver et samlet bidragende areal på 72,4 ha.

Der er fundet regnintensitet ud fra SVKs regionale regnrækker, hvor der er taget for en 100-års hændelse, med et gennemsnitligt nedbør om året på 646 mm, det giver nedbørskonstanterne som, kan ses i Tabel 5.1. Der er ikke medregnet en yderligere sikkerhedsfaktor, udover at en del af det permeable areal er inddraget i beregningen. Bassinet kan herefter dimensioneres ved hjælp af Ligning 2.1.

Tabel 5.1. Nedbørskonstanter

α [-]	c [l/s/ha]
0,79	88.685

Bassinvolumen kan ses i Figur 5.3, hvor den nødvendige opmagasineringsvolumen fremgår afhængigt af, hvilken regnintensitet der dimensioneres efter.



Figur 5.3. Dimensionering af regnvandsbassin med forskellige regnintensiteter afhængigt af regnvarigheden.

Der er beregnet en maksimal volumen ved tiden 90 min, hvor bassinvolumenet skal være 30.200 m^3 .

5.3 Bassinets udformning

Bassinet er konstrueret med en skrå hældning på 1:5 af sikkerhedsmæssige årsager, så det er nemt at komme op, hvis man falder i. Det anbefales at anlægge bassinet med en vanddybde mellem 1–1,5 m. Ved for lave vanddybder er der risiko for resuspension, hvorimod for høje vanddybder kan resultere i iltvind. Der findes anbefalinger for rensning af vand i våde bassiner, som foreskriver et vådvolumen på $200\text{--}250 \text{ m}^3/\text{red ha}$ for at opnå optimal rensning. Ved etablering af et større vådvolumen kan der opnås en marginal forbedring i renseseffekten. I disse anbefalinger er der ikke taget højde for den rensning, der kan finde sted i opmagasineringsvolumenet. Hvis der regnes med $250 \text{ m}^3/\text{red ha}$, kræver det et vådvolumen på 8.750 m^3 [Danva, 2018].

5.4 Placeringsmuligheder

Muligheden for at etablere et bassin i den nedre del af projektområdet uden indgreb i eksisterende bygninger er blevet undersøgt. Undersøgelsen omfatter udelukkende anlæggelsen af et opmagasineringsvolumen med en maksimal vanddybde på 1,5 m.

Hvis vådvolumen skulle inkluderes, ville den samlede vanddybde overstige 1,5 m, forudsat at overfladearealet forbliver uændret. Da dimensioneringen tager udgangspunkt i en 100-års regnhændelse, vil vandstande på 1,5 m dog kun opstå meget sjældent. Risikoen for iltvind vurderes derfor som minimal, selv ved denne maksimale dybde.

Med en maksimal vanddybde på 1,5 m og et opmagasineringsvolumen på 30.200 m^3 , vil der være behov for et overfladeareal på cirka 22.000 m^2 ved fuld kapacitet. Et eksempel på, hvordan et sådant bassin kan udformes og placeres på grunden, fremgår af Figur 5.4.



Figur 5.4. Mulig placering af regnvandsbassin ved dimensionering af ét bassin.

Det har ikke været muligt at finde plads til et stort bassin for enden af bakken uden at fjerne bygninger fra grunden.

I det følgende afsnit undersøges mulighederne for at anlægge flere mindre bassiner i området, så bygninger fra situationsplanen ikke behøver at blive fjernet.

Opbygning af model 6

Der er ikke plads til ét stort bassin, derfor undersøges muligheden for at etablere flere mindre bassiner, fordelt på grunden i de grønne områder. Dette er en mere kompleks metode til dimensionering af bassiner. Derfor anvendes simuleringsprogrammet *MIKE+* til at udvikle en model, der kan beskrive situationen med flere bassiner.

Indledningsvis er der udarbejdet en model med ét enkelt bassin, som kan bruges som reference ved sammenligning med modellen med flere bassiner. I modellen medregnes ikke vådvolumen, da det antages, at dette ikke vil have væsentlig indflydelse på bassinet hydraulisk, når opmagasineringsvolumenet skal simuleres.

6.1 Modelopbygning

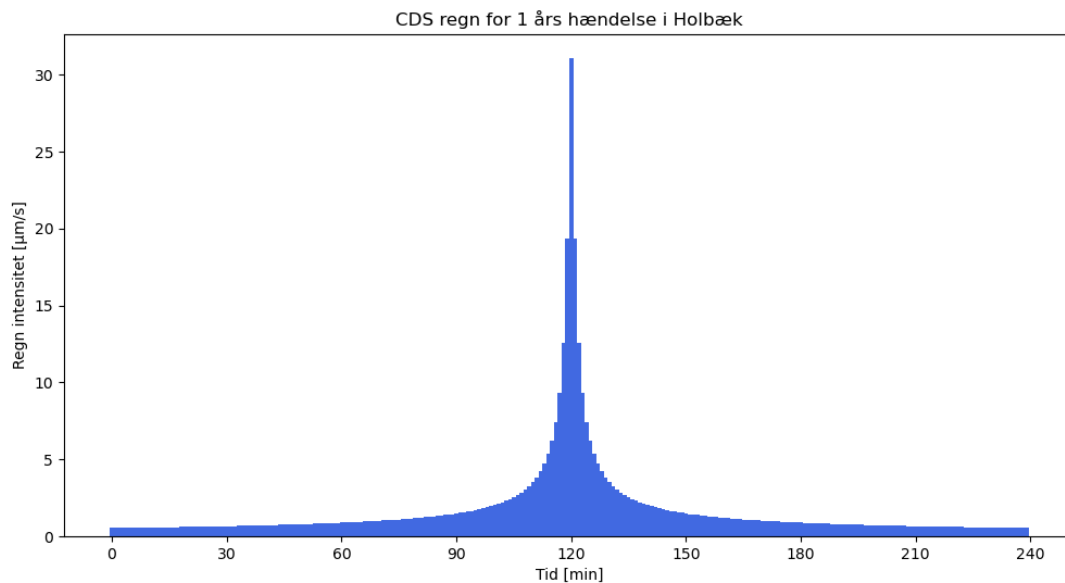
Der er opstillet en model for "Fjordbyen" til dimensionering af et regnvandsbassin, som kan håndtere en 100-års regnhændelse på egen grund. Modellen er baseret på situationsplanen, hvor der er udarbejdet en overordnet placering af de større vandledninger. Små stikledninger til de enkelte bygninger er udeladt for at forenkle modellen og skabe et hurtigere overblik.

Til dimensionering af rørdimensioner er der anvendt CDS-regn for en 1-års hændelse, da der er tale om et separat system. Der regnes med en kortvarig regnhændelse på 4 timer for at identificere de kritiske belastninger i systemet. SVK's regneark er anvendt til at bestemme den årlige gennemsnitsnedbør for Holbæk, som er beregnet til 646 mm. Det forudsættes, at der ikke må forekomme opstuvning i brøndene ved CDS-regn.

Ifølge [Spildevandskomiteen, 2008] anvendes en klimafaktor på 1,15 for dimensioneringsregn ved en 1-års hændelse. Der er valgt en regnvarighed på 3 timer, da afløbssystemer generelt bliver mest belastet ved kortere regnhændelser. Derudover er der anvendt en statistisk usikkerhedsfaktor på 1,2, da oplandet er stort (100 ha) [Spildevandskomiteen, 2005]. Endelig tages der højde for mulig fortætning med en faktor på 1,1 [Spildevandskomiteen, 2005]. Alle anvendte parametre og den samlede usikkerhedsfaktor fremgår af Tabel 6.1. Den anvendte CDS-regn ses i Figur 6.1.

Tabel 6.1. Sikkerhedsfaktorer for CDS-regn ved 1-års hændelse

Sikkerhedsfaktor	Værdi
Statistisk usikkerhed	1,2
Klimapåvirkning	1,15
Fortætning	1,1
Samlet usikkerhed	1,52



Figur 6.1. CDS-regn for en 1-års hændelse, hvor regnintensiteten ses over en 4-timers periode. [Egenproduktion]

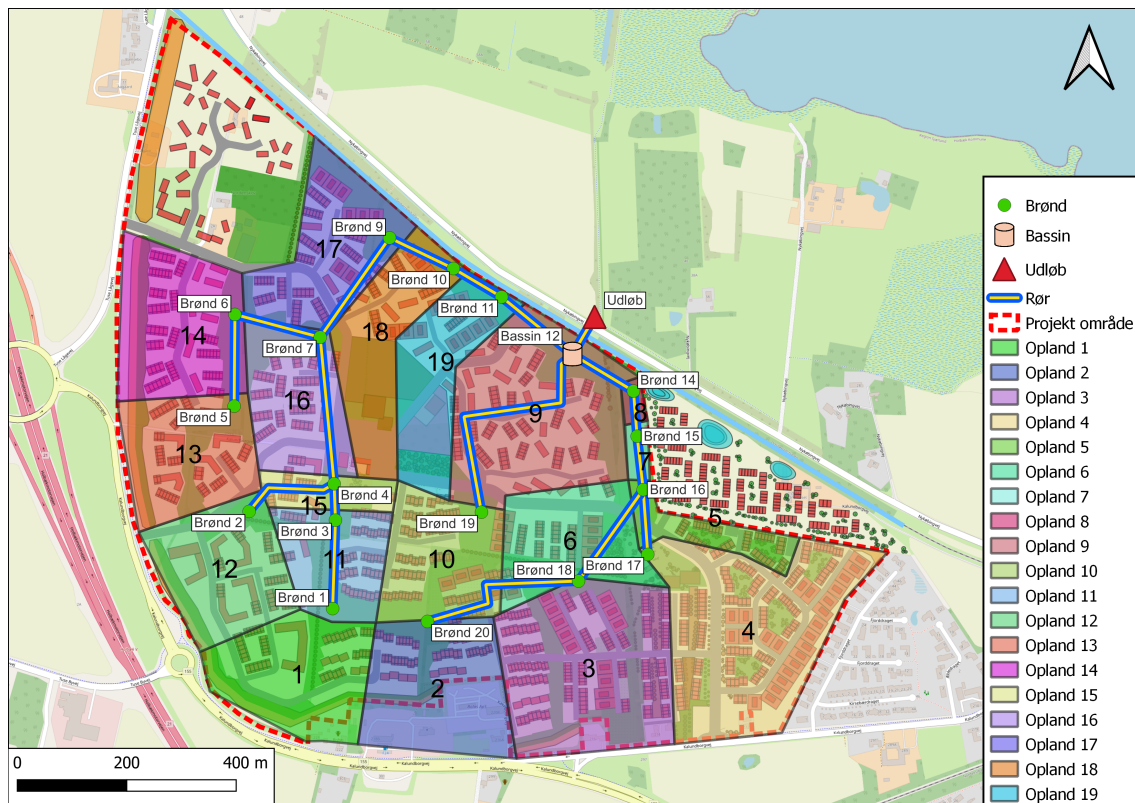
6.2 Ledningssystem, hydraulik og simulering

Rørledningerne lægges med udgangspunkt i det eksisterende terræn og nedgraves til minimum 0,75 m for at sikre frostfri dybde. Ved anlæg i veje anbefales det, at rørene lægges i en dybde på 1,25 m. For separate regnvandsledninger med en diameter over 0,2 m og en vandføring på mere end 1 l/s, kan det vurderes, om selvrensningskravene er opfyldt. Selvrensningskravene kan vurderes opfyldt, såfremt røret har en vandhastighed på over 1 m/s, når røret er fuldtløbende. Dette sikrer, at vandhastigheden allerede ved en fyldning på 1/7 af den maksimale vandføring overstiger 0,6 m/s, hvilket kan anses som værende selvrensende [Winther et al., 2011].

Områdets befæstelsesgrad er beregnet ud fra situationsplanen, hvor hvert delområde er vurderet ud fra bebyggelse og veje. Disse anses for at være 100% impermeable. Ved dimensionering til en 1-års hændelse regnes kun de impermeable overflader med [Spildevandskomiteen, 2014].

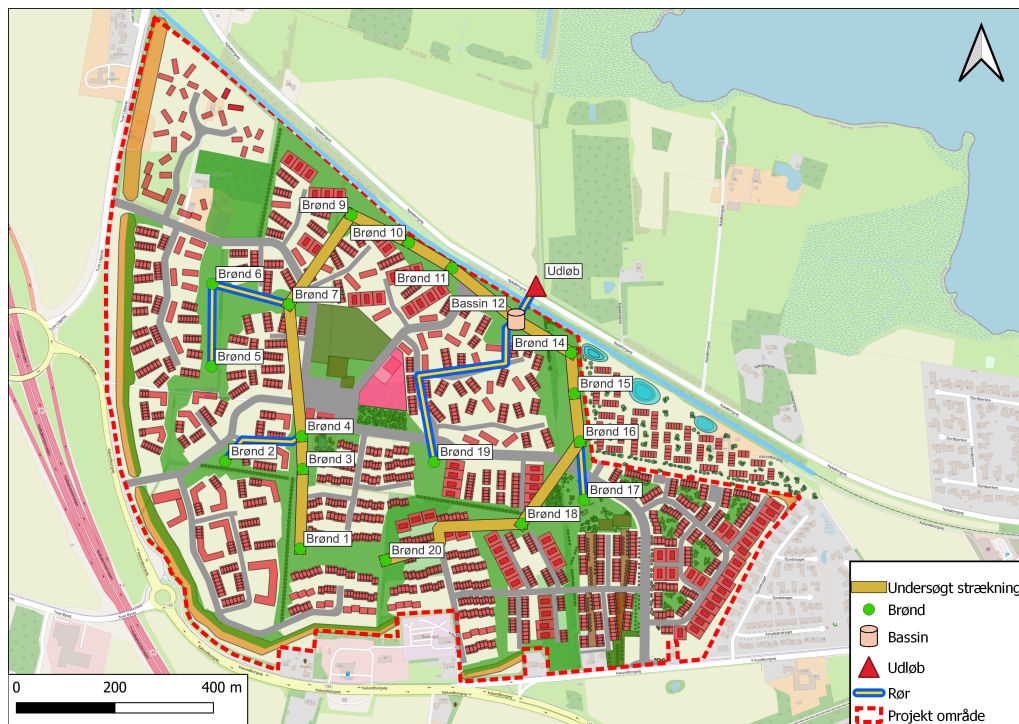
Der anvendes et drosselrør med diameter 800 mm til at styre udledningen fra bassinet i bunden. Udledningen sker, når vandstanden i røret stiger, og den maksimale kapacitet opnås ved fuldt løb. Det er en forenklet model, da en præcis reguleringskurve ville kræve brug af eksempelvis en centrifugalbremse eller drosselledning.

Der er udarbejdet et ledningssystem, som tager højde for terrænet og sikrer, at vandet kan føres til regnvandsbassinet ved gravitation. Hver brønd er tildelt et opland. Et stort bassin placeres i bunden af projektområdet. I den nordvestlige del har det ikke været muligt at lede vandet ved gravitation til hovedbassinet, derfor udelades dette område. Oplandsgrænserne fremgår af Figur 6.2. Der er anvendt tids-areal-metoden i alle oplande.

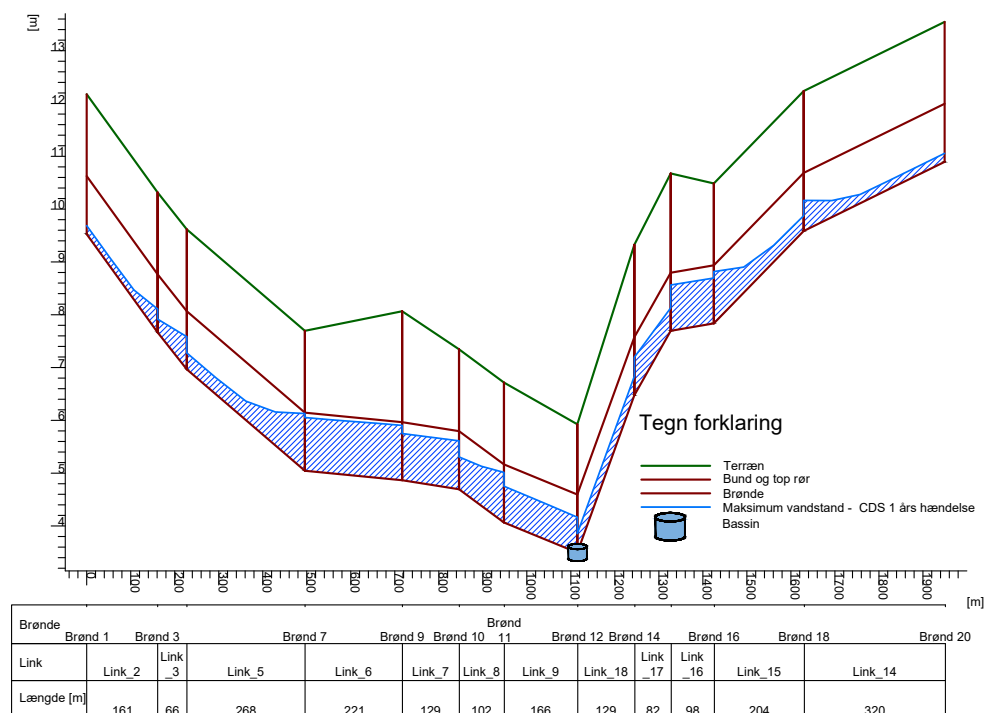


Figur 6.2. Oversigt over oplandsopdeling i Fjordbyen med rørledninger og noder.

Efter simulering med CDS-regn er rørdiameter og -type fastlagt. Der anvendes betonrør med Manning-tal 85, svarende til lav friktion. For at forsimple modellen er samme rørdiameter anvendt i hele systemet: 1100 mm. Dette sikrer, at vandet kan ledes til det nedstrøms bassin uden opstuvning ved en 1-års CDS-regn. Brønde har en diameter på 1800 mm for at sikre tilslutning. Den maksimale vandstand der er simuleret under hændelse fremgår af Figur 6.4, mens strækningen ses i Figur 6.3.



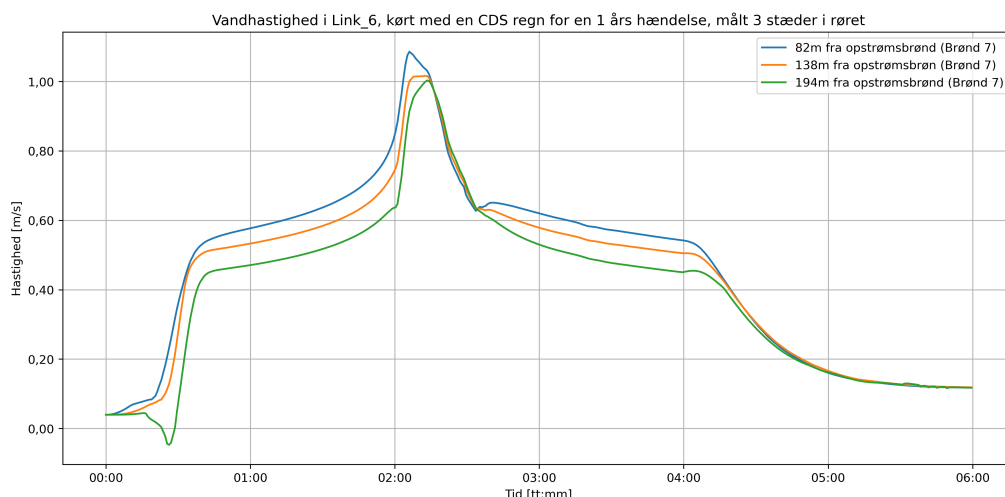
Figur 6.3. Ledningsstrækningen, der er blevet undersøgt.



Figur 6.4. Den maksimale vandstand i rørene ved en CDS-regn for en 1-års hændelse.

6.3 Undersøgelse af selvrensningsevne

Der er undersøgt, om systemet er selvrensende. Røret er fyldt, når der simuleres med CDS-regn for en 1-års hændelse. Vandhastigheden blev målt tre steder langs røret – hhv. 82 m, 138 m og 194 m fra opstrømsbrønd (Brønd 7), hvilket fremgår af Figur 6.5.



Figur 6.5. Simuleret vandhastighed i Link_6 målt tre steder ved CDS-regn for en 1-års hændelse.

Således opnås en maksimal vandhastighed på 1 m/s, derfor vurderes systemet som værende selvrensende.

6.4 Oversigt over undersøgte scenarier

En simpel model er opstillet til analyse af fire forskellige scenarier med varierende styringsstrategier.

Scenarie 1: Centralt bassin med passiv udledning

Der er opstillet et referencesystem bestående af et simpelt afløbssystem med ét centralt bassin. Dette scenarie fungerer som sammenligningsgrundlag for de efterfølgende scenarier.

Scenarie 2: Serie forbundet lokal passiv udledning

Her undersøges anvendelsen af lokal, passiv udledning i flere seriekoblede bassiner. Opmagasineringsvolumenet er fordelt på flere bassiner, hvor hvert bassin har samme opmagasineringsvolumen og udløbsvandføring pr. hektar som i Scenarie 1.

Scenarie 3: Globalt reaktiv styring

Her undersøges brugen af global, reaktiv styring i seriekoblede bassiner med henblik på at opnå en mere effektiv udnyttelse af det samlede opmagasineringsvolumen.

Scenarie 4: Tilbageholdelse af forurenende stoffer

Her undersøges brugen af global, reaktiv styring til at forlænge opholdstiden i bassinerne. Dette gøres ved at reducere udledningen under mindre regnhændelser, mens der stadig er mulighed for øget udledning under ekstreme hændelser. Formålet er at forbedre bundfældning af forurenende stoffer.

Scenarie 1: Centralt bassin med passiv udledning

7

I dette projekt er det valgt at arbejde videre med VÆRDI-værktøjet for at undersøge, hvilke muligheder det giver for syntetisk regnserie-udvælgelse for et specifikt område. Det gør det muligt at analysere både nutidige hændelser, men også fremtidige regnhændelser.

Den valgte regnserier har en længde på 40 år, og på baggrund af den er der lavet statistik over hændelser til at beskrive en 100-års hændelse. En 100-års hændelse udledt fra en regnserie beskriver ikke nødvendigvis, hvad der sker om 100 år, men snarere en hændelse med 1% sandsynlighed sker for den tid regnserien er fra [Jensen et al., 2023].

Til udvælgelsen af regnserien er følgende parametre anvendt: Kommunen er sat til Holbæk, gentagelsesperioder fra 5 til 100 år samt regnvarigheder fra 5 til 1.440 minutter. Den valgte regnserie for nutiden er serie 9100, som har en gennemsnitlig årlig nedbør på 651 mm. Den historiske periode, der analyseres, strækker sig fra 1980 til 2020 og bygger på nutidens regndata.

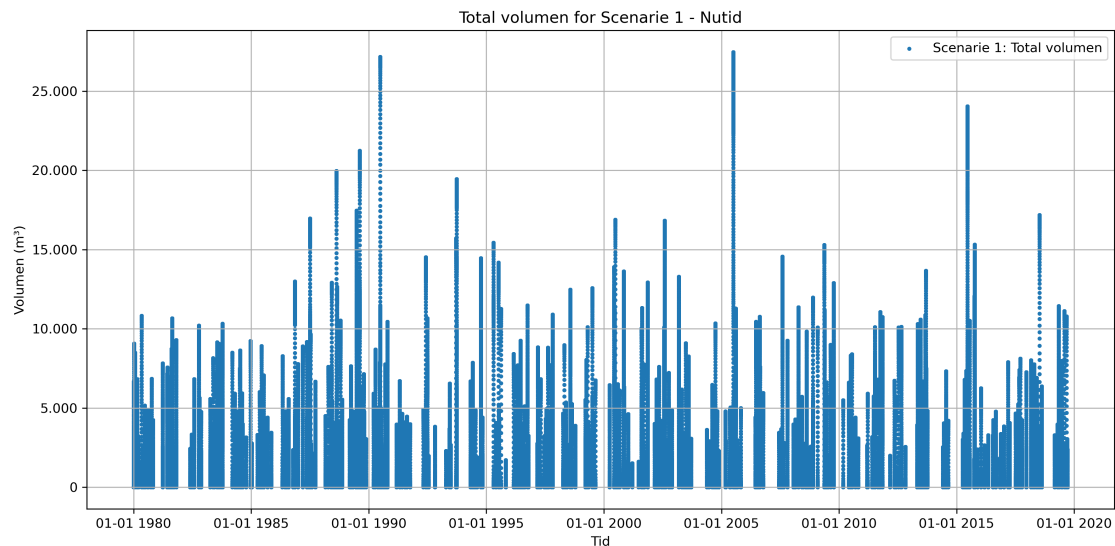
7.1 Bassinkapacitet og udledningskurve

Udledningen fra bassinet reguleres af en vandbremse, som begrænser den maksimale udledning til 700 l/s. Der anvendes en forsimplet udledningskurve, som stiger lineært indtil røret er fuldtløbende. Herefter fastholdes udledningen konstant på 700 l/s. Denne udledningskurve anvendes også i senere afsnit.

Der er tidligere beregnet et bassinvolumen på 30.200 m³, men dette volumen vil blive revideret, når der foretages simuleringer med en regnserie, der repræsenterer Nutid, Nær- og Fjern fremtids nedbørsforhold.

7.2 Long-Term Statistics (LTS)

Til simuleringen er der anvendt Long-Term Statistics (LTS), her udvælges hændelser ud fra opstillet kriterier. Der bliver kun simuleret under store regnhændelser, det gør det muligt at simulere lange tidsserier forholdsvis hurtigt, samt kan der laves statistik på mange års regnserier [Nielsen, 2023]. Følgende parametre er anvendt til LTS: hændelsen skal overstige en vandmængde på 1,3 m³/s i mere end 10 minutter for at blive inkluderet, og afsluttes når flowet falder under 0,05 m³/s i mere end 20 minutter. LTS gør det muligt at identificere de tidspunkter, hvor regnhændelser belaster systemet mest. På Figur 7.1 ses den simulerede vandstand for perioden 1980 til 2020.

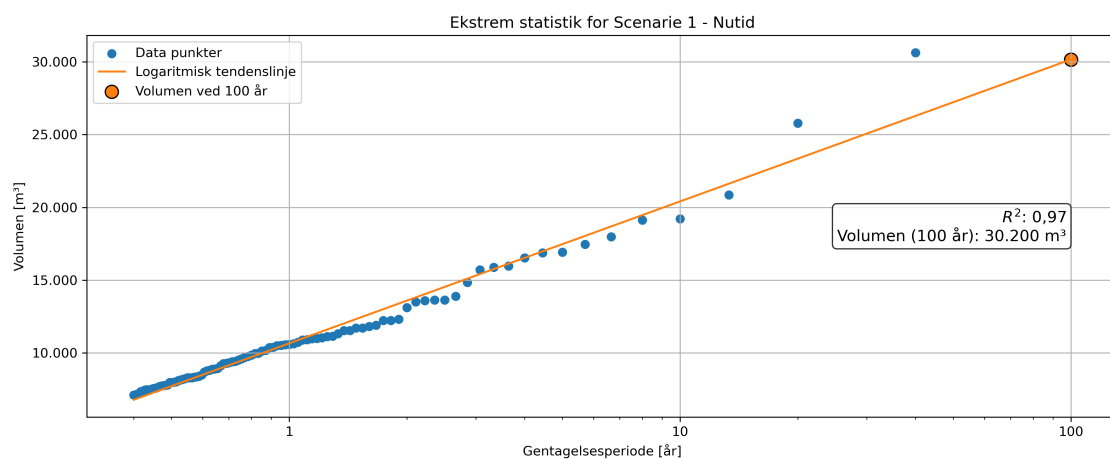


Figur 7.1. Simuleret vandstand ved et enkelt bassin, for perioden 1980–2020.

Den højeste simulerede opmagasineringsvolumen, der kræves er den 25. juni 1990, hvor der skal opmagasineres 27.500 m^3 .

7.3 Fremskrivning af ekstreme regnhændelser

Analysen dækker over 40 års periode. Analysen klarlægger, hvilken gentagelsesperiode hændelsen svarer til, samt prøver at fremskrive hændelsen til en 100-årshændelse. Analysen er gennemført, hvor de 100 største regnhændelser i serien er identificeret og rangeret ud fra deres empiriske gentagelsesperiode. Den største hændelse tilskrives en 40-års gentagelsesperiode, den næststørste en 20-års, og så fremdeles. Resultatet kan ses i Figur 7.2.



Figur 7.2. De 100 største regnhændelser for Nutid med en fremskrivning til en 100-års hændelse, med en logaritmisk-tendenslinje. R^2 -værdien er angivet på grafen, sammen med det beregnede volumen for en 100-års hændelse.

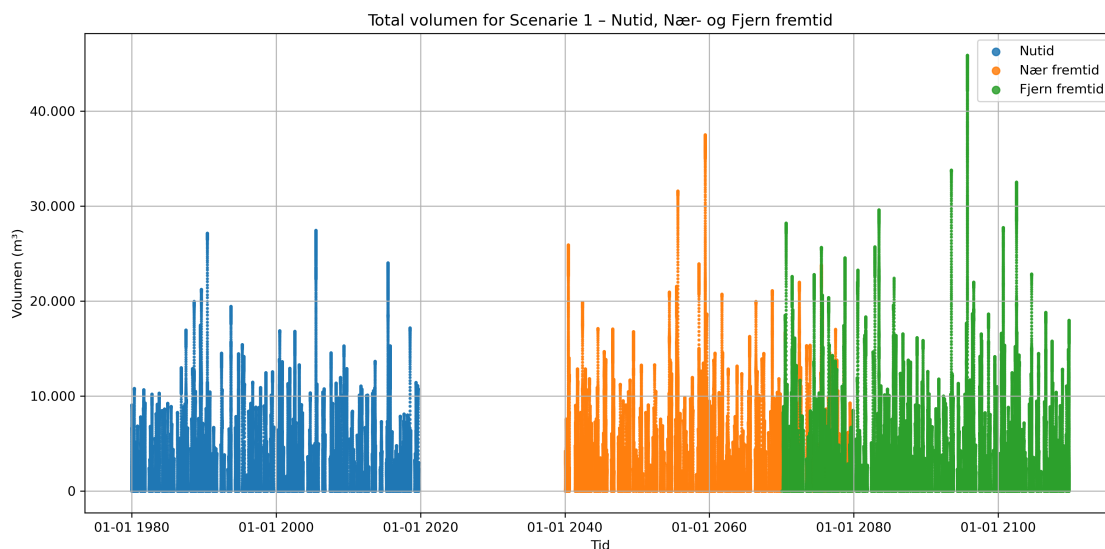
Det har været muligt at lave en god tilpasning med en logaritmisk tendenslinje, med en R^2 -værdi på 0,97. Med tendenslinjen har det været muligt at fremskrive hændelserne til en 100-års hændelse, for nutiden estimeres det nødvendige bassinvolumen at være 30.200 m³. Anvendelsen af de 100 største hændelser i tendenslinjen medfører, at mange mindre hændelser inddrages, hvor den laveste hændelse svarer til en 0,4-års hændelse. Af kurven på Figur 7.2 observeres, at hændelserne for 20 og 13 år ligger over kurven. Såfremt der var indraget færre hændelser, ville det have påvirket fremskrivningen og kunne have resulteret i et større estimat for volumen.

7.4 Fremtidsscenarier og dimensionering

Der stilles yderligere krav til beskyttelse af jernbanen mod overløb. Derfor er det undersøgt, hvilken bassinvolumen der kræves for at tilbageholde en 100-års hændelse i fremtidige klimascenarier. To fremtidige regnserier fra VÆRDI's regnværktøj er anvendt til at analysere klimatilpasning for 2040–2080 og 2070–2110, hvor der er optimeret på samme parameter som tidligere, der er fundet følgende regnsier:

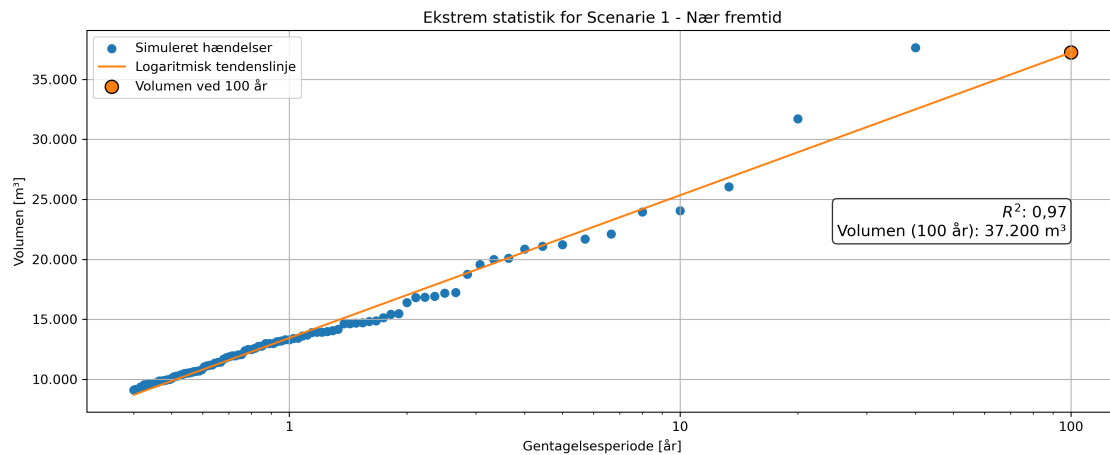
- Nær fremtid (2040–2080): Serie 9075, årlig nedbør 667 mm
- Fjern fremtid (2070–2110): Serie 9101, årlig nedbør 696 mm

På Figur 7.3 vises vandstandene for alle tre regnserier i Bassin 12.

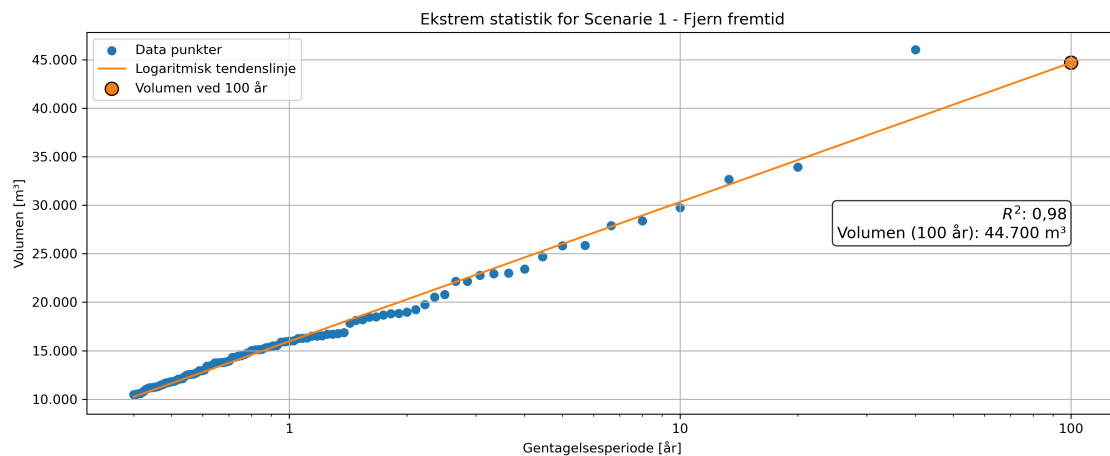


Figur 7.3. Simulerede vandstande i Bassin 12 for Nutid, Nær- og Fjern fremtid.

Ligesom for nutiden er de 100 største hændelser udvalgt, rangeret empirisk, og en logaritmisk tendenslinje er anvendt til fremskrivning, det kan ses på Figur 7.4 og 7.5



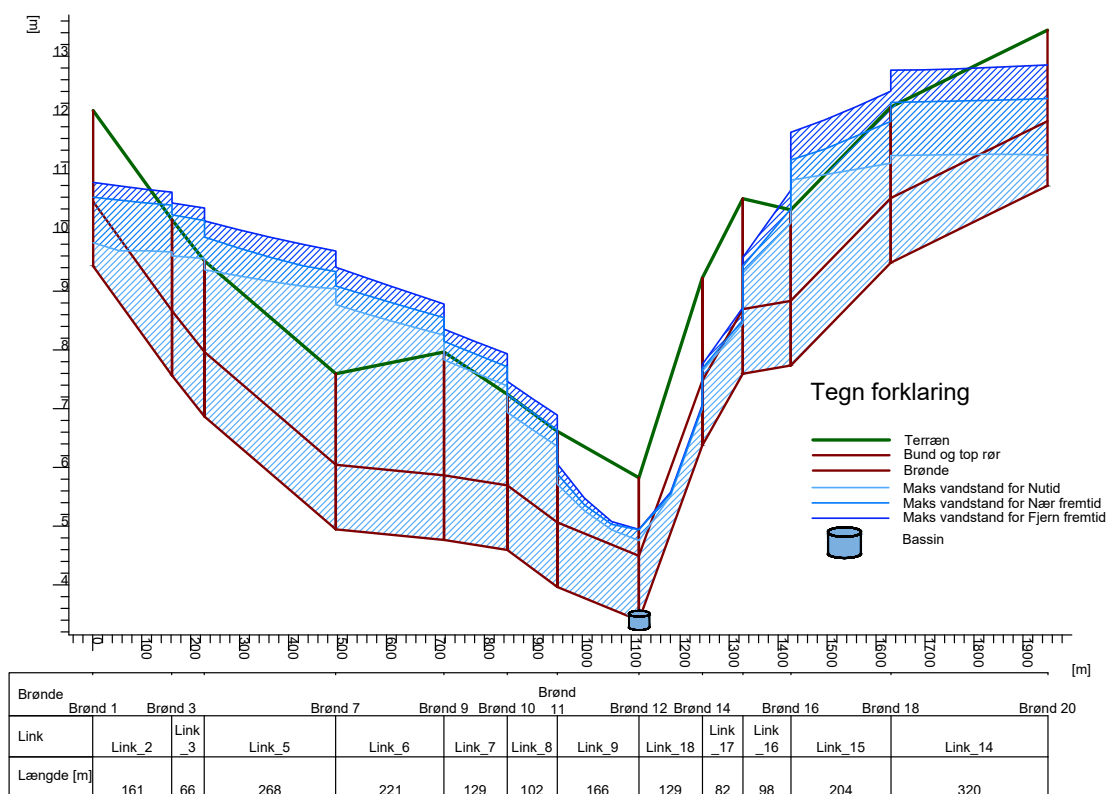
Figur 7.4. De 100 største regnhændelser i den Nær fremtid med en fremskrivning til en 100-års hændelse, med en logaritmisk-tendenslinje. R^2 -værdien er angivet på grafen, sammen med det beregnede volumen for en 100-års hændelse.



Figur 7.5. De 100 største regnhændelser i den Fjern fremtid med en fremskrivning til en 100-års hændelse, med en logaritmisk-tendenslinje. R^2 -værdien er angivet på grafen, sammen med det beregnede volumen for en 100-års hændelse.

Der er igen en god tilpasning med en R^2 -værdi på 0,97 og 0,98 for Nær og Fjern fremtid. Der vil være en regnhændelse, der vil overskride den fremskrevne 100-års hændelse i begge regnserier. Dette indikerer, at der allerede forekommer hændelser med højere intensitet end statistisk forventet, hvilket understreger klimarelateret usikkerhed.

Der er foretaget en undersøgelse af den maksimale vandstand ved simulering med tre 40-års regnserier. Det er vigtigt at bemærke, at der ikke er tale om simulering af en statistisk 100-års hændelse. For nutiden er den største hændelse i regnserien lidt mindre end en statistisk 100-års hændelse, mens den største hændelse i scenarierne Nær og Fjern fremtid overstiger en statistisk 100-års hændelse. Den maksimale vandstand for tidsserierne Nutid, Nær- og Fjern fremtid fremgår af Figur 7.6.



Figur 7.6. Den maksimale vandstand i rørene, når der simuleres med de 3 regn serier, for Nutids, Nær og Fjern fremtid.

Der vil komme vand på terræn, når der regner en 100-års hændelse, det er der også regnet med, når der dimensioneres efter ingen opstuvning ved en 1-års hændelse. Hvilken del af projektgrunden der kommer til at blive oversvømmet er ikke blevet undersøgt yderligere, men kunne eventuelt være blevet gjort med Mike Flood.

Der vil i det næste afsnit blive simuleret videre, med bassinvolumen fremskrevet til en 100-års hændelse. Derfor er bassinvolumen forskelligt alt efter, om der simuleres for Nutid, Nær- eller Fjern fremtidsregnserie. De forskellige volumener kan ses i Tabel 7.1

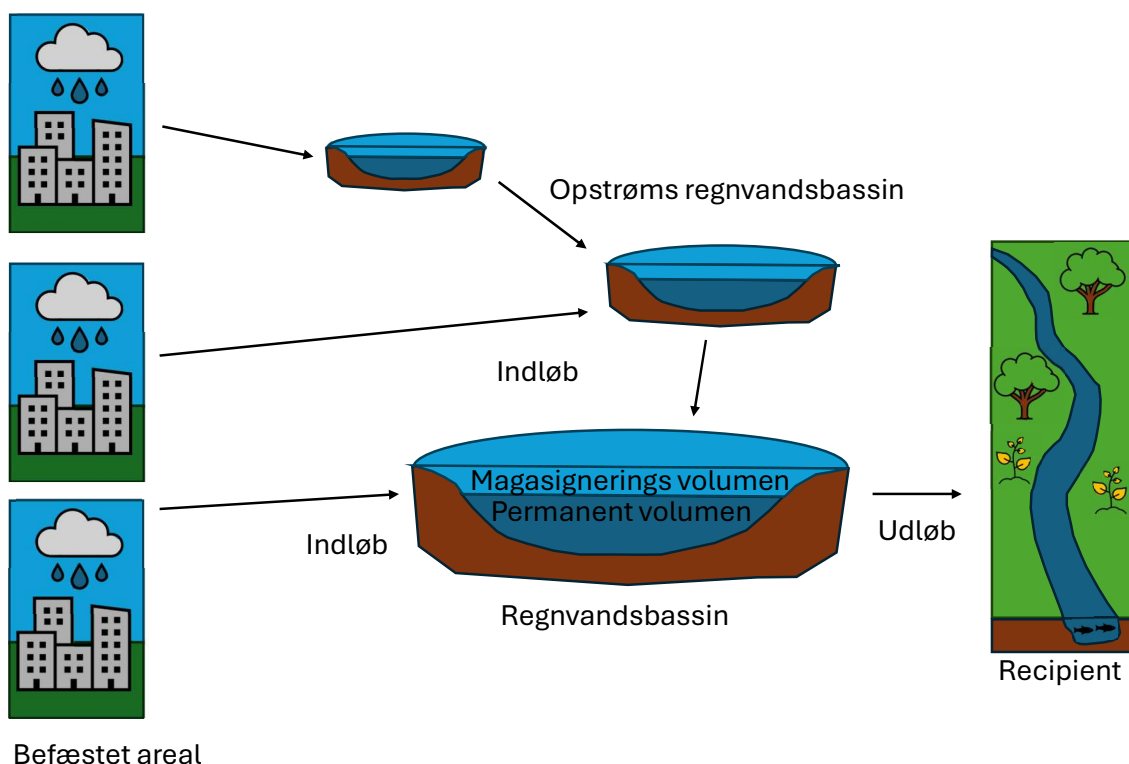
Tabel 7.1. Bassinvolumen simuleret med forskellige tidsserier.

Tidsserie	Bassin volumen [m ³]
Nutid	30.200
Nær fremtid	37.200
Fjern fremtid	44.700

Senarie 2: Serie forbundet lokal passiv udledning

8

Der analyseres et system med flere serieforbundne bassiner, hvor afstrømningen fra hvert opland ledes videre til det næste bassin nedstrøms. Der er tilsluttet et opland til hvert bassin, som vist i principskitzen i Figur 8.1.



Figur 8.1. Principskitse af et befæstet opland, hvor vandet føres til et vådt regnvandsbassin og derefter videre til et nedstrøms bassin, før det ledes til recipienten.

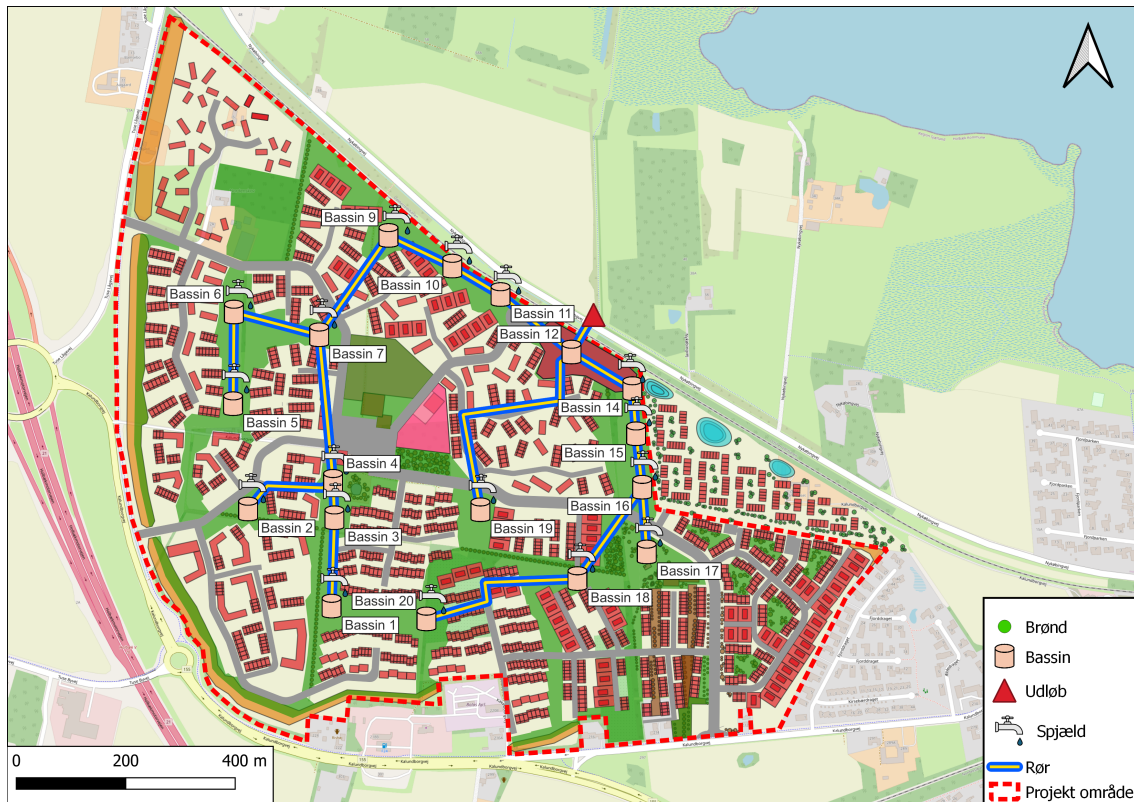
I det følgende afsnit analyseres, hvordan systemet påvirkes, når der placeres flere bassiner, som er serieforbundne.

8.1 Dimensionering og fordeling af volumen

Der etableres 18 bassiner svarende til de 18 planlagte grønne områder, hvor et bassin kan anlægges rekreativt uden at optage byggegrund. Bassinernes placering og antal tager udgangspunkt i [Bøgsted, 2024], som præsenterer et forslag til mulige placeringer, der videreudvikles i dette projekt. Da terrænet er skrånende, må der enten anlægges diger eller

graves dybere for at holde på vandet. Der anvendes den samme oplandsinddeling som vist i Figur 6.2.

En ny hydraulisk model er opbygget med 18 mindre bassiner, der er forbundet sådan at vandet kan strømme ved hjælp af gravitation. Bassinvolumenerne er fastlagt proportionalt med størrelsen af hvert opland. Så hvert bassin har det samme volumen pr. red. ha, men hvilket volumen der er nødvendigt pr. red ha, er forskelligt for hver regnserie. Placeringerne af bassinerne kan ses på Figur 8.2, og de forskellige volumener for hver regnserie fremgår af Tabel 7.1.



Figur 8.2. Oversigt over placeringen af bassiner, samt spjæld til udledning.

Tabel 8.1. Volumen for hvert bassin for Nutid, Nær- og Fjern fremtid. Bassin 8 og 13 er ikke inkluderet i modellen, hvorfor det fremstår, som om der er 20 bassiner.

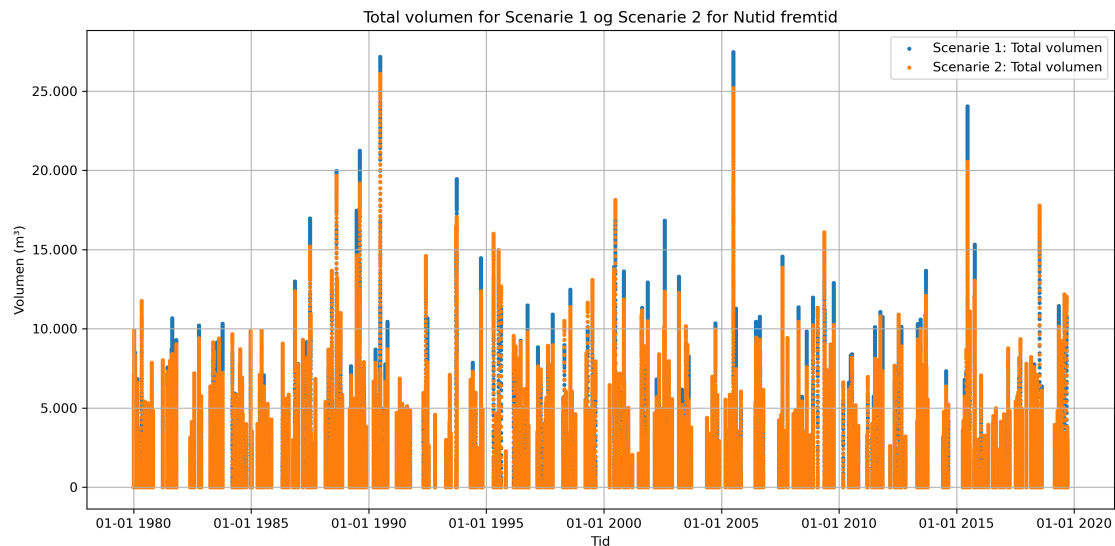
Bassin	Nutid [m ³]	Nær fremtid [m ³]	Fjern fremtid [m ³]
Bassin 1	1.620	1.944	2.403
Bassin 2	1.718	2.062	2.548
Bassin 3	1.170	1.404	1.736
Bassin 4	491	590	729
Bassin 5	1.600	1.920	2.373
Bassin 6	1.982	2.379	2.940
Bassin 7	1.574	1.889	2.335
Bassin 9	1.802	2.163	2.674
Bassin 10	1.700	2.040	2.521
Bassin 11	1.548	1.858	2.297
Bassin 12	3.081	3.698	4.571
Bassin 14	86	104	128
Bassin 15	122	146	180
Bassin 16	2.193	2.631	3.253
Bassin 17	3.634	4.360	5.390
Bassin 18	3.035	3.642	4.502
Bassin 19	1.595	1.914	2.366
Bassin 20	1.048	1.257	1.554
Samlet	30.200	37.200	44.700

Den samlede udledningstilladelse på 700 L/s er fordelt proportionalt mellem bassinerne baseret på oplandsarealerne. Den samlede udledning fra eventuelle oplandsbassiner er beregnet, så der er ens udledning pr. red ha. Der bruges samme linære udløbskurve som ved udløbet fra Bassin 12, hvor den først opnår maksimal udledning ved fuldtløbene rør. De tre regnserier for Nutid, Nær- og Fjern fremtid anvendes på det nye system for at vurdere, om der er behov for yderligere volumen, når bassinerne spredes ud over området.

Analysen tager udgangspunkt i den simpleste styringsmetode: lokal passiv styring. Vandflowet reguleres derfor udelukkende af tyngdekraften – uden brug af sensorer eller ventiler. Dette minimerer risikoen for systemfejl og gør løsningen lettere at implementere [Schutze et al., 2004].

8.2 Simulering og resultater fra LTS

Der undersøges, hvilken effekt det har på systemet at tilføje flere regnvandsbassiner. Undersøgelsen sammenlignes med Scenarie 1, hvor der kun er ét bassin. Der er gennemført LTS-simuleringer for alle tre regnserier for at identificere, hvilke hændelser der belaster systemet mest. I denne analyse er volumen fra alle bassiner lagt sammen for hvert tidsskridt for at finde det samlede volumen. Resultaterne sammenlignes med Scenarie 1 og fremgår af Figur 8.3. De resterende regnserier kan ses i sektion A.1.



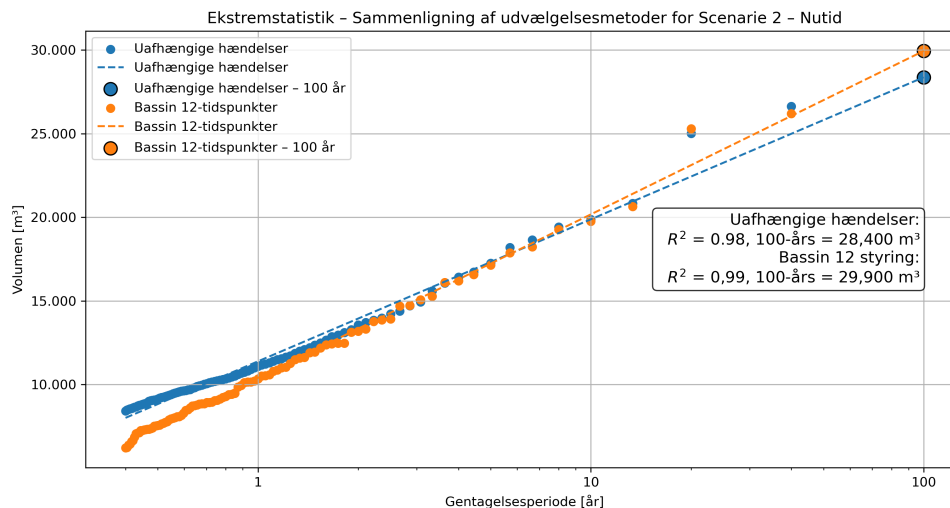
Figur 8.3. Der er kørt LTS på Scenarie 2 for Nutids regn, hvor det totale volumen for alle bassinerne er fundet, der er sammenlinget med Scenarie 1.

Når der er kørt LTS på systemet med passiv udledning, ses det, at der ved de største hændelser skal opmagasineres mindre volumen. Dette indikerer, at en decentral tilgang med passiv styring reducerer opmagasineringsbehovet ved ekstreme hændelser.

8.3 Fremskrivning til 100-års hændelser

Der er fremskrevet på samme måde som i Scenarie 1, for hver hændelse er det samlede bassinvolumen beregnet som summen af volumen fra alle 18 bassiner. Disse data anvendes til at fremskrive et estimat for opmagasineringsbehovet ved en 100-års hændelse. Resultaterne vises som uafhængige hændelser i Figur 8.4 og sektion A.2.

Når hændelserne udvælges som de 100 største i hvert bassin for serielt forbundne bassiner, er det ikke sikkert, at hvert bassin bliver belastet af den samme hændelse. Derfor er det heller ikke nødvendigvis den samme hændelse, der bliver lagt sammen, når man udvælger de største hændelser for hvert bassin. Det betyder, at det samlede volumen kan blive højere, når hændelserne optræder uafhængigt af hinanden. For at undersøge dette er de 100 største hændelser for bassin 12 identificeret, og de tilhørende tidspunkter er anvendt til at beregne volumen i de øvrige bassiner. Dette er vist som "Bassin 12-tidspunkter" på Figur 8.4 og i sektion A.2.



Figur 8.4. De 100 største regnhændelser i den Nutid fremskrevet med to metoder, afhængelig og uafhængelige af tidspunkter. Fremskrevet til en 100-års hændelse, baseret på en logaritmisk tendenslinje. R^2 -værdien er angivet på grafen sammen med det estimerede volumen for en 100-års hændelse.

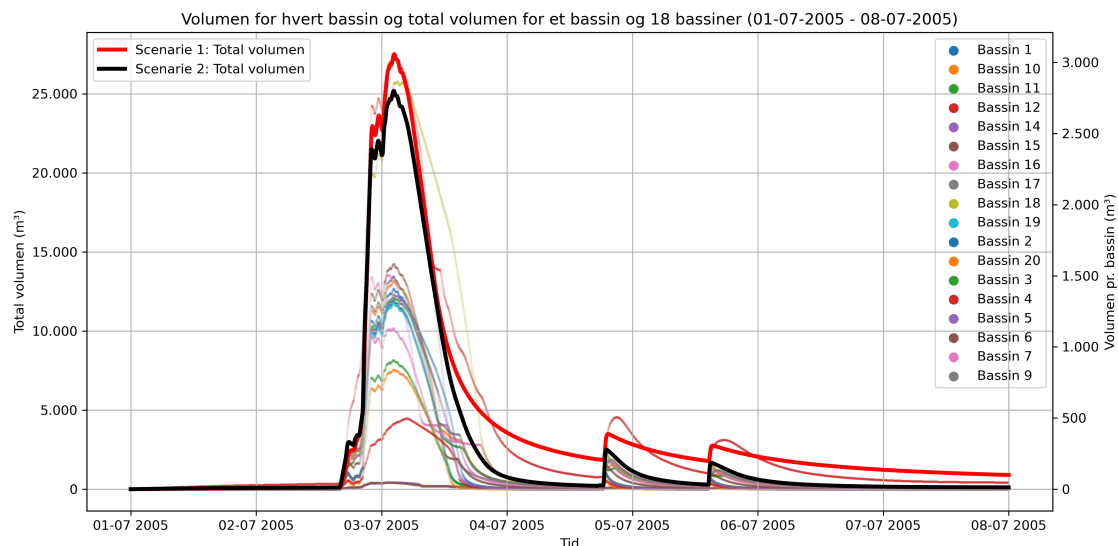
Ved sammenligning med Scenarie 1 fremgår det, at der skal opmagasineres mindre volumen i Scenarie 2, når der fremskrives til en 100-års hændelse for begge metoder.

Selvom næsten alle datapunkter for "Bassin 12-tidspunkter" har lavere volumen, resulterer metoden i en stejlere tendenslinje sammenlignet med de uafhængige hændelser. Dette medfører en højere fremskrivning til en 100-års hændelse.

8.4 Fyldningsgrad og udnyttelse af bassinkapacitet

Til sammenligning af unyttelsen af bassinvolumen er de to største hændelser for hver regnserie udvalgt – det vil sige de hændelser, hvor systemet er mest belastet. Da der ikke findes en entydigt defineret 100-års hændelse i de anvendte tidsserier, anvendes disse største hændelser som et estimat.

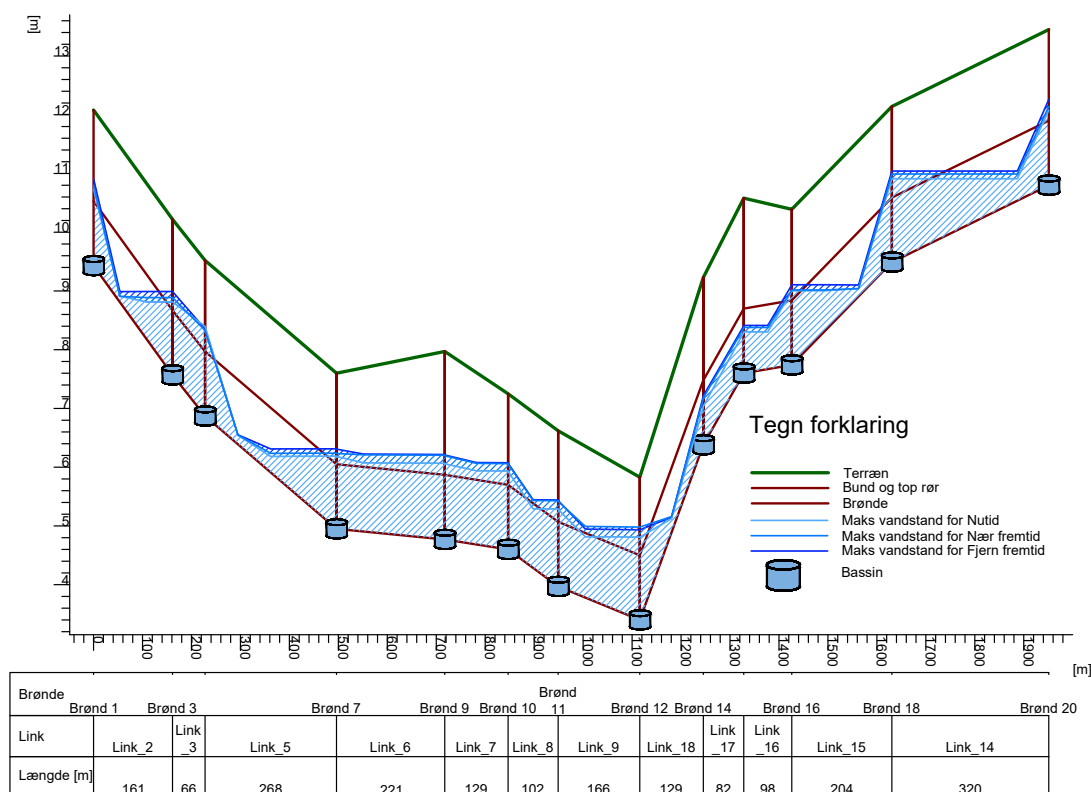
Vandstanden i de 18 bassiner er omregnet til volumen og summeret for hvert tidspunkt for at beregne det samlede opmagasineringsvolumen. Dette sammenlignes med den nødvendige volumen i Scenarie 1. Resultaterne fremgår af Figur 8.5 samt bilag sektion A.3.



Figur 8.5. Sammenligning af opmagasineret volumen for Scenarie 1 med ét bassin og Scenarie 2 med 18 passivstyrede bassiner. Den sekundære akse viser volumenet i hvert af de 18 bassiner.

Af grafen fremgår det, at det samlede opmagasineringsvolumen i Scenarie 2 – med flere bassiner fordelt i området – er mindre. Forsinkelse i oplandet bidrager til, at behovet for opmagasineret på det kritiske tidspunkt reduceres. Det kan observeres, at når der benyttes flere små bassiner, sker tømningen hurtigere ved lav vandstand. Derfor vil koblede hændelser have en mindre indflydelse på dimensioneringen af bassinerne, da bassinet når at blive mere tomt inden næste hændelse.

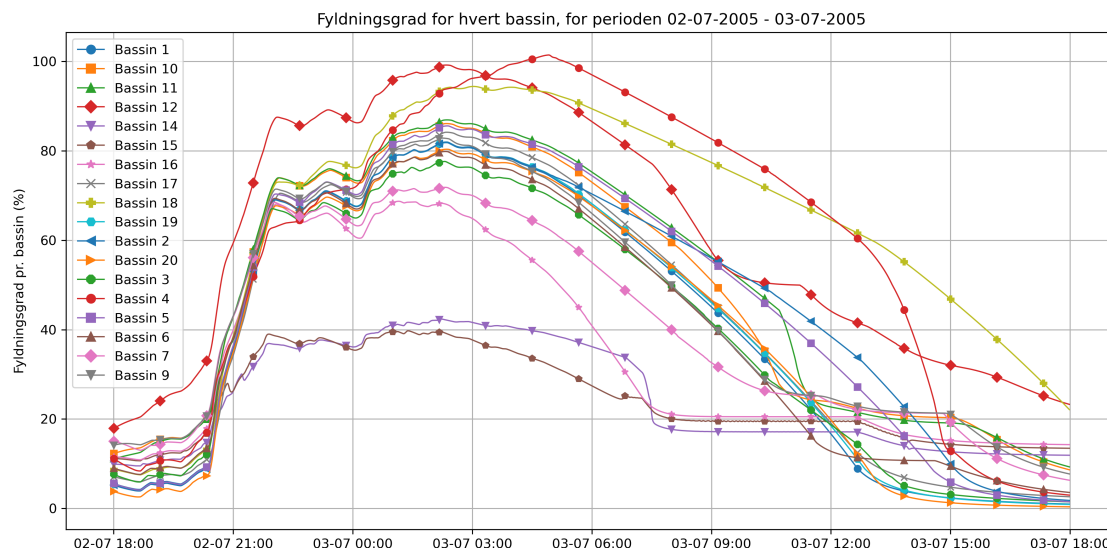
Derudover er det undersøgt, hvordan vandstanden i rørene påvirkes, når der tilføjes flere bassiner. Her er den maksimale vandstand for de tre regnserier analyseret, hvilket fremgår af Figur 8.6.



Figur 8.6. Den maksimale vandstand i rørene ved simulering med tre regnserier for Nutid, Nær- og Fjern fremtid.

Resultaterne viser, at der ikke opstår opstuvning til terræn ved tilføjelsen af flere bassiner. Hvert bassin er dimensioneret til at håndtere en 100-årshændelse for henholdsvis Nutid, Nær og Fjern fremtid.

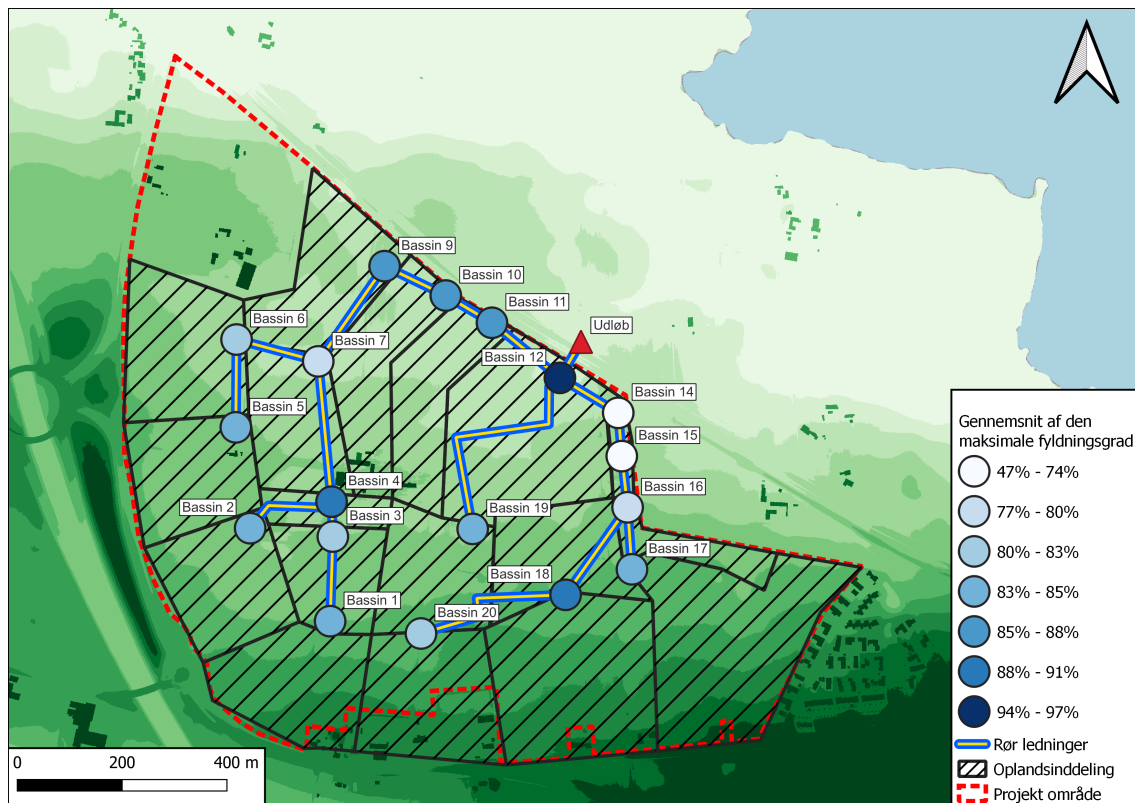
Bassinvolumenet er dimensioneret ud fra, at de har det samme bidragende opland, og derfor burde bassinerne blive lige fyldte, hvis de var parallelt koblet. Da bassinerne i stedet er seriekoblede, behøver det dog ikke være tilfældet. Der er derfor risiko for, at nogle af bassinerne bliver mindre fyldte, mens andre flyder over. Derfor undersøges fyldningsgraden i hvert enkelt bassin for de to største hændelser i hver tidsserie. Her analyseres forholdet mellem det aktuelle volumen i hvert bassin og dets maksimale kapacitet for at vurdere, hvor effektivt bassinerne udnyttes i hvert tidsskridt. Resultaterne fremgår af Figur 8.7 samt bilag sektion A.4.



Figur 8.7. Fyldningsgrad i procent for hvert bassin under udvalgt regnhændelse i Scenarie 2.

Årsagen til, at Bassin 14 og 15 ikke bliver lige så fyldte som de øvrige, er, at de er meget små. Det har ikke været muligt at opretholde samme udformning med 1,5 meters dybde og en skråning på 1:5, og derfor er disse bassiner blevet overdimensioneret. Der ses en variation i fyldningsgraden mellem bassinerne, og det er undersøgt, om der er en sammenhæng mellem bassinets placering i systemet og dets udnyttelsesgrad.

Den maksimale fyldningsgrad for hver af de seks hændelser er anvendt til at beregne et gennemsnit for hvert bassin. Dette er visualiseret på et kort for at identificere eventuelle mønstre i udnyttelsesgraden afhængigt af placering i systemet, som det ses i Figur 8.8.



Figur 8.8. Kort over systemet med angivelse af den gennemsnitlige maksimale udnyttelse af bassinvolumen under de udvalgte regnhændelser.

Det mest fyldte bassin i systemet er det sidste bassin før udløbet. Her strømmer vandet fra alle opstrømsbassiner, samtidig med at det har et relativt stort tilknyttet opland. De næstmest fyldte bassiner er Bassin 4 og Bassin 18. Begge modtager tilløb fra ét eller flere andre bassiner. Bassin 18 har et større opland og derfor et volumen, der afspejler dette. Bassin 4 har derimod et mindre opland og et tilsvarende lavere volumen, men modtager betydelige mængder vand fra opstrøms bassiner. Derfor vil vandstanden her stige hurtigere, hvis der tilføres ekstra vand tidligt i en regnhændelse.

Ud fra Figur 8.8 og Figur 8.7 ses det, at bassiner uden opstrøms tilløb har et ubenyttet potentiale for yderligere opmagasinering under store regnhændelser. Dette potentiale kan udnyttes ved at reducere volumen af disse bassiner og i stedet øge kapaciteten i de nedstrøms bassiner. Alternativt kan man implementere global aktiv styring, hvor vandstanden i de enkelte bassiner overvåges, og udledningen reguleres dynamisk for at sikre optimal udnyttelse af bassinkapaciteten. Dette vil blive behandlet i næste afsnit.

Scenarie 3: Globalt reaktiv styring

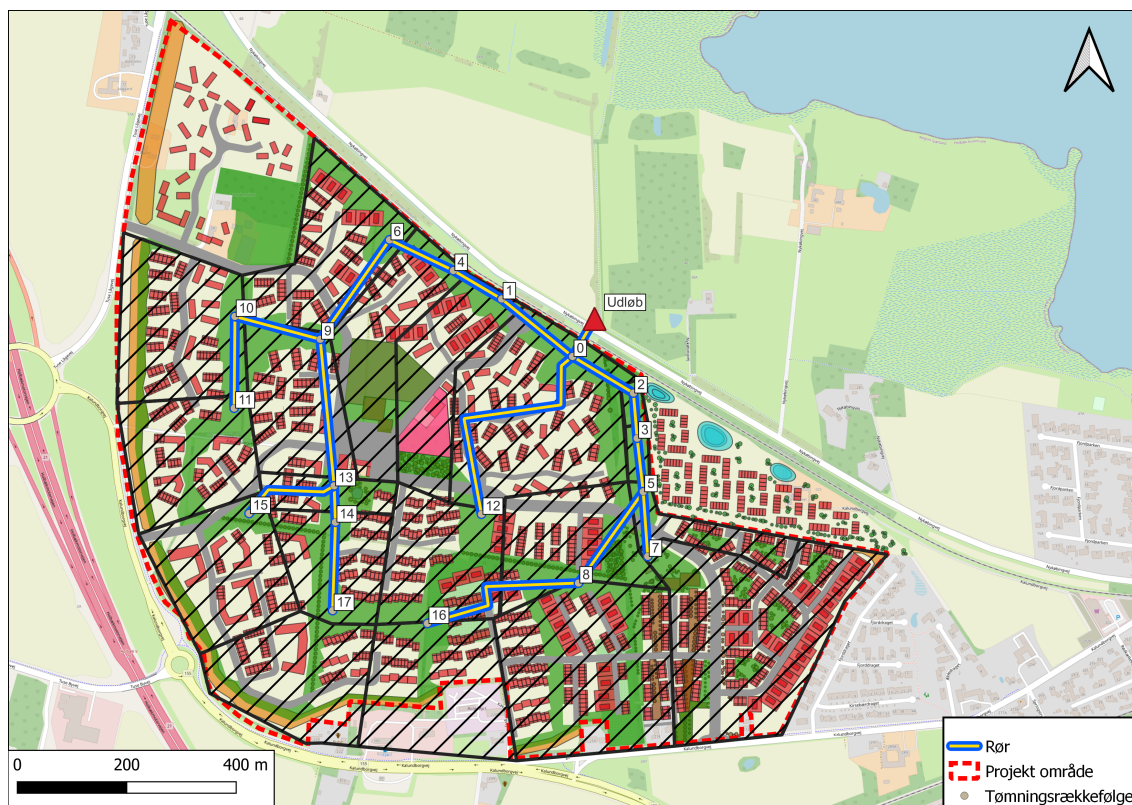
9

Dette afsnit undersøger anvendelsen af global reaktiv styring for at sikre, at ingen bassiner, især de højtliggende, står tomme, mens det sidste bassin inden udløb ved Bassin 12 risikerer at flyde over.

9.1 Styringsstrategi og rækkefølge for udledning

Styringen baseres på vandstanden i det sidste bassin før udløbet, Bassin 12, som fungerer som systemets overordnede styringsparameter. Formålet er at sikre, at udledningen fra de højest beliggende bassiner stoppes i tide, så Bassin 12 ikke flyder over, mens andre bassiner står tomme. Da systemet er baseret på gravitation, kan vand alene bevæge sig nedstrøms, er det nødvendigt at styre udledningen i en rækkefølge, der prioriterer at fylde de højest placerede bassiner først.

Styringsstrategien indebærer, at bassinerne lukker for udledning i rækkefølge fra det højest beliggende bassin til det lavest beliggende. Denne rækkefølge svarer også til den rækkefølge, bassinerne tømmes i efter en ekstrem hændelse, hvor alle bassiner er fuldt opfyldte. Bassin 1 lukker først for udledning, når vandstanden i Bassin 12 overstiger 0,8 m. De resterende bassiner lukker efter samme rækkefølge, med en stigning i aktiveringstrinnet på 0,03 m. Det betyder, at det sidste bassin i rækken, Bassin 11, lukker ved en vandstand på 1,27 m. Når vandstanden i Bassin 12 overstiger 0,8 m, er det ud fra vandbrase udledningskurven muligt at udnytte den maksimale udløbstilladelse på 700 l/s fuldt ud. Vandstandene, hvor de enkelte bassiner lukker for udløb, fremgår af Tabel 9.1, samt kan det ses Figur 9.1 viser den rækkefølge, hvori bassinerne tømmes.



Figur 9.1. Styret udledning, hvor det fremgår i hvilken rækkefølge bassinerne tømmes. Rækkefølgen angives ved tal, hvor 1 er det første bassin.

Tabel 9.1. Vandstand i bassin før hvert bassin starter for udledning igen, hvor 1 starter tømning først til Bassin 12.

Rækkefølge	Bassin	Vandstand [m]
1	Bassin 11	1,27
2	Bassin 14	1,24
3	Bassin 15	1,21
4	Bassin 10	1,18
5	Bassin 16	1,15
6	Bassin 9	1,12
7	Bassin 17	1,09
8	Bassin 18	1,06
9	Bassin 7	1,03
10	Bassin 6	1,00
11	Bassin 5	0,97
12	Bassin 19	0,94
13	Bassin 4	0,91
14	Bassin 3	0,88
15	Bassin 2	0,85
16	Bassin 20	0,82
17	Bassin 1	0,80

Hvis et bassin er ved at blive overfyldt, er der etableret en styring, så der sker et stort udløb fra bassinet på 100 l/s/red ha. Dette sikrer, at hvis der er plads i de nedstrøms

bassiner, kan vandet flyttes derhen. Det er muligt, at udløbet ikke er stort nok til at tømme bassinet hurtigt nok, men hvis det laves for stort, kan det medføre en for hurtig fyldning af det nedstrømsbassin, som igen vil føre til, at bassinet flyder over.

Ved mindre regnhændelser holdes alle bassiner åbne med en konstant udledning på 20 l/s/red ha, til at sikre tømning af bassinerne. Styringsstrategien er opsummeret i Tabel 9.2.

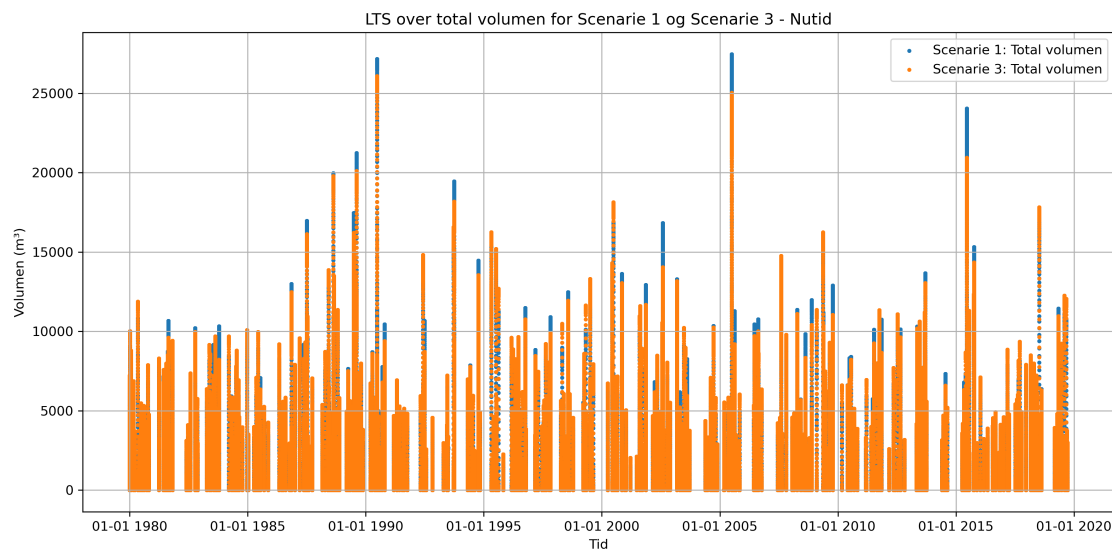
Tabel 9.2. Styringslogik for alle bassiner undtagen Bassin 12

Nr.	Hvis	Aktion
1	Vandstanden i eget bassin overstiger 1,48 m	Start udledning svarende til 100 l/s/red ha
2	Vandstanden i Bassin 12 overstiger et bestemt niveau (se Tabel 9.1)	Luk for udløb fra eget bassin
3	Ingen af ovenstående betingelser er opfyldt	Hold spjældet åben med konstant udledning på 20 l/s/red ha

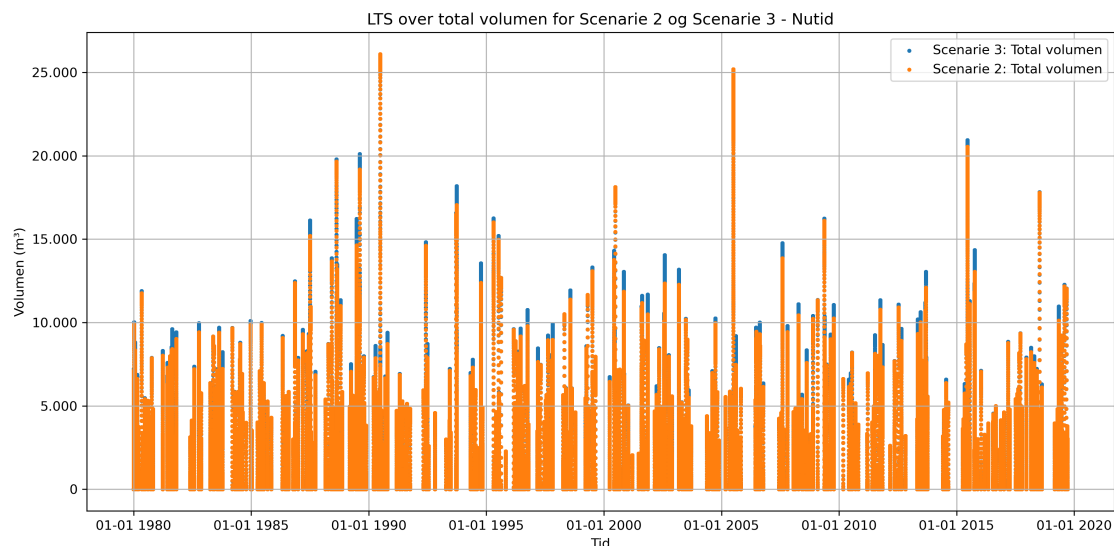
Det er undersøgt, hvilken effekt denne styringsstrategi har på systemet.

9.2 LTS-simuleringer af global reaktiv styring

Der er kørt LTS-simuleringer på systemet for at undersøge, om tidspunkterne med høj opmagasineringsvolumen i Scenarie 3 er de samme for Scenarie 1 og 2. Den simulerede vandstand kan ses i Figur 9.2, Figur B.2 samt i bilag Bilag B.



Figur 9.2. Der er kørt LTS på Scenarie 3 for Nutid fremtids regn, hvor det totale volumen for alle bassinerne er fundet, det er sammenlinget med Scenarie 1.

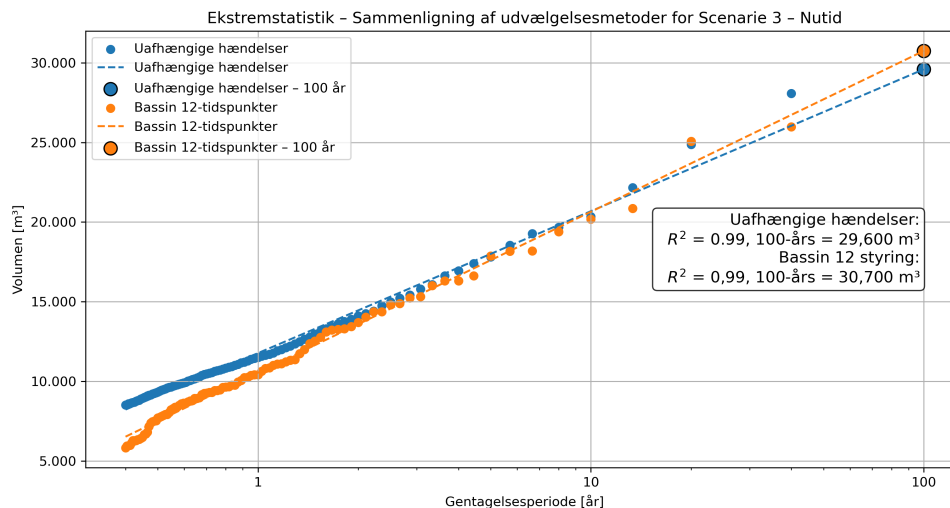


Figur 9.3. Der er kørt LTS på Scenarie 3 for Nutid fremtids regn, hvor det totale volumen for alle bassinerne er fundet, det er sammenlignet med Scenarie 2.

Visuelt ligner det, at opmagasineringsvolumen bliver lavere for de store hændelser ved Scenarie 3, end ved beregning med et stort bassin som i Scenarie 1, og det er muligt at opretholde en høj udledning i længere tid. I nogle tilfælde kræves der mindrereduceres behovet for opmagasineringsvolumen, mens volumen i andre tilfælde overstiger behovet sammenlignet med Scenarie 2.

9.3 Fremskrivning til ekstreme regnhændelser

Der er igen foretaget en fremskrivning af bassinvolumen til en 100-års hændelse. Begge tidligere anvendte metoder – med henholdsvis uafhængige hændelser og tidsafhængelig fra Bassin 12 – benyttes til at vurdere effekten på fremskrivningen, det kan ses på Figur 9.4 samt i sektion B.1.

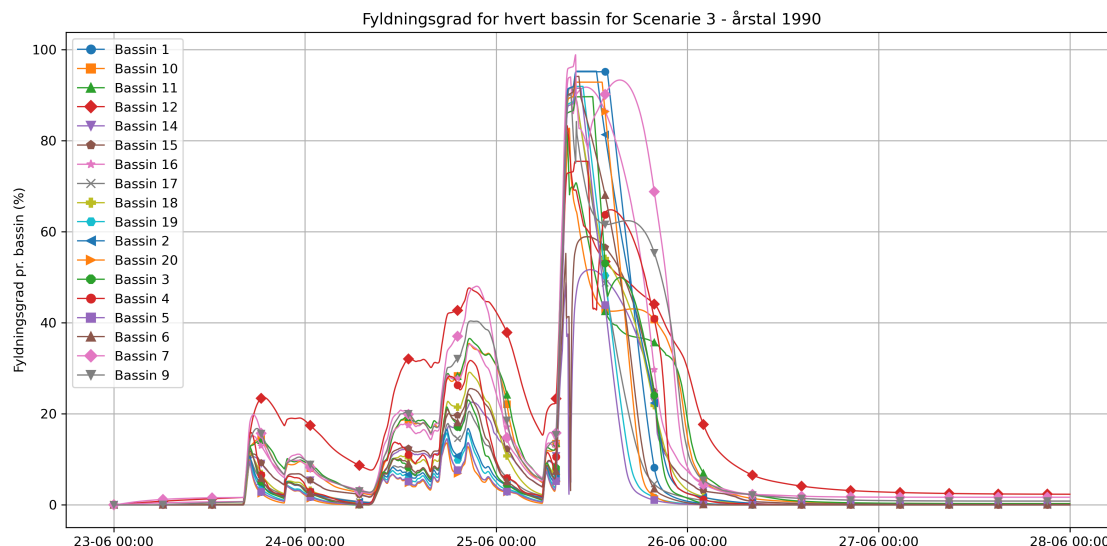


Figur 9.4. De 26 største regnhændelser i den nære fremtid med en fremskrivning til en 100-års hændelse, med en logaritmisk tendenslinje. R^2 -værdien er angivet på grafen sammen med det beregnede volumen for en 100-års hændelse.

Hvis man sammenligner Scenarie 3 med opmagasineringsvolumen for de uafhængige hændelser med Scenarie 1 og 2, ses det, at der generelt skal bruges mere volumen for at tilbageholde den samme hændelse, ud fra begge metoder – med undtagelse af uafhængelige hændelser for Scenarie 1 Nutid. Det indikerer, at implementering af global reaktiv styring er mindre effektiv ud fra denne analysetilgang.

9.4 Fyldningsgrad for udvalgte ekstrem hændelser

Den globale reaktive styringseffekt på fyldningsgraden er analyseret under de to mest ekstreme regnhændelser i hver regnserie. Her er fyldningsgraden blevet analyseret for at vurdere mulighederne for at opmagasinere mere vand i bassinet under ekstreme hændelser. Dette ses for Nutid, for den største hændelse i 1990, i Figur 9.5, og øvrige store hændelser kan ses i sektion B.2.



Figur 9.5. Fyldningsgraden af hvert bassin, under en ekstrem hændelse.

Det ses, hvordan bassinerne forbliver fyldte, indtil de foregående bassiner er blevet tømt. Styringsstrategien kan med fordel finjusteres, da der er et problem med, at Bassin 14 og 15 tømmes for hurtigt. Det betyder, at bassinernes volumen ikke udnyttes optimalt. Da det primært drejer sig om de mindste bassiner, er potentialet for yderligere volumenfrigivelse ved finjustering relativt begrænset. Når styringsstrategien justeres, er det vigtigt, at den ikke kun optimeres til én bestemt regnhændelse, men fungerer effektivt under alle større hændelser.

Hvis man sammenligner LTS-resultaterne for Scenarie 2 og 3, ses det, at der ved nogle af de store hændelser kræves mindre opmagasiningsvolumen i Scenarie 3, mens der ved andre hændelser skal opmagasinere mere. Derfor er gevinsten ved global reaktiv styring for optimering af det hydrauliske system under ekstreme hændelser ikke entydigt stor. Det er i højere grad volumen, der er afgørende for tilbageholdelse af regnvand end selve styringsformen. Den største gevinst opnås derfor ved at anlægge passiv udledning, især i forhold til den øgede kompleksitet, som global reaktiv styring medfører.

På trods af den begrænsede hydrauliske fordel rummer global reaktiv styring potentiale i forhold til vandkvalitet og opholdstid. Når udledningstilladelsen er 20 l/s/red ha, bliver opholdstiden for vandet i bassinerne meget kort. Det betyder, at bundfældningen af forurenende stoffer reduceres. Derfor vil det blive undersøgt, om global reaktiv styring kan bidrage til øget opholdstid og dermed forbedret tilbageholdelse af forurenende stoffer, samtidig med at systemet stadig kan håndtere ekstreme hændelser.

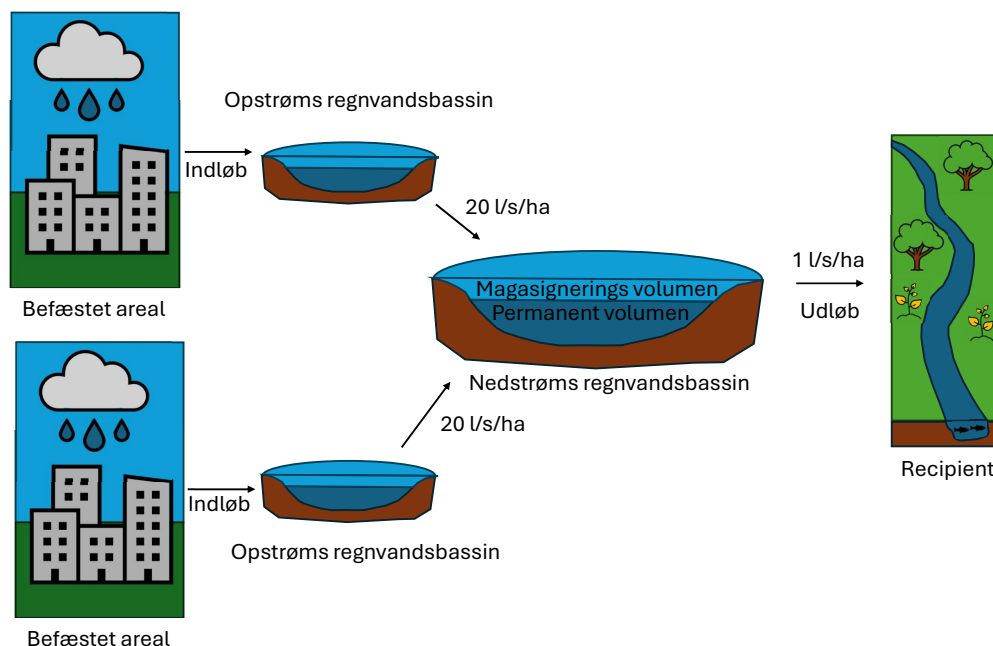
Scenarie 4:

Tilbageholdelse af forurenende stoffer

10

I det følgende afsnit undersøges muligheden for at forlænge opholdstiden for at tilbageholde forurenende stoffer under en regnhændelse, som forekommer hyppigt. Ved at sænke udledningshastigheden kan der ske øget bundfældning i bassinet, før vandet ledes videre til fjorden. Det er også muligt, ved hjælp af styring, at have et primært bassin, hvor størstedelen af bundfældningen foregår. Dette gør vedligeholdelsen både lettere og billigere, da oprensning kun behøver at foretages i ét bassin i stedet for i samtlige 18 bassiner.

I et tidligere projekt blev der undersøgt, hvordan fjernelsen af suspenderet stof, fosfor og kvælstof påvirkes, når flere bassiner seriekobles. Projektet havde et referencesystem bestående af ét bassin for at undersøge fjernelseseffekten for et traditionelt system. Derefter blev forsøgsopstillingen udvidet til at omfatte to yderligere bassiner per opland. Vandet blev her ledt videre med en høj udledning på 20 l/s/red ha ned til et nedstrøms bassin med større opmagasineringsvolumen. Fra dette bassin blev vandet udledt til recipient med en reduceret hastighed på 1 l/s/red ha. Forsøgsopstillingen kan ses i Figur 10.1. Modelberegninger viste, at fjernelsen af suspenderet stof, fosfor og kvælstof øges, når flere bassiner seriekobles [Nielsen, 2017].

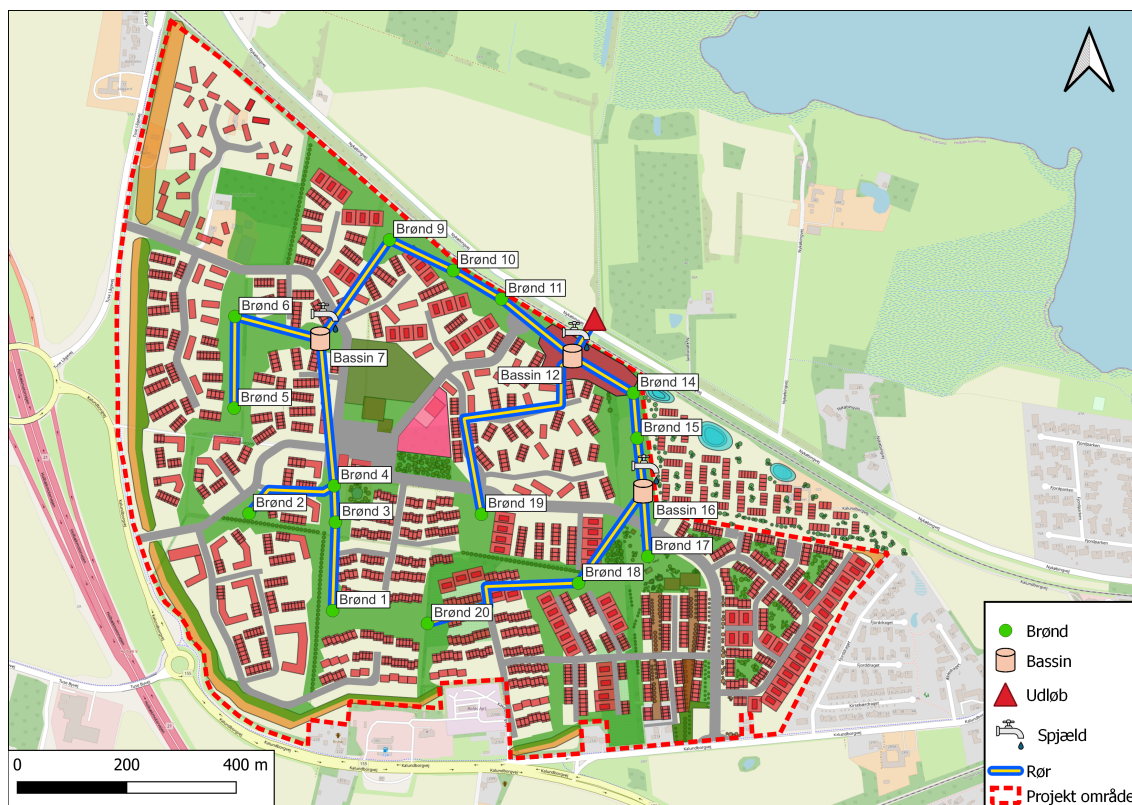


Figur 10.1. Principskitse fra tidligere rapport omkring fjernelse af forurenende stoffer ved brug af seriekoblede bassiner. Figuren viser maksimal vandføring mellem bassinerne og til recipient.

I dette projekt er der derfor udviklet en styringsstrategi, hvor der ved små regnhændelser udledes 20 l/s/red ha fra Bassin 7 og 16 til Bassin 12, hvor udledningen til recipient er begrænset til 1 l/s/red ha. Der anvendes global reaktiv styring til at sikre den lave udledning under normale forhold, med mulighed for at øge udledningen ved ekstreme hændelser såsom en 100-års regn. Dette sikrer, at udledningstilladelsen udnyttes fuldt ud.

10.1 Modelopstilling og reduceret areal

Der er valgt at opstille en forsimplet model, som kun inkluderer tre bassiner for at skabe et mere overskueligt overblik over systemets funktion. Placeringen af bassinerne fremgår af Figur 10.2. Det vil være muligt at erstatte Bassin 7 og 16 med flere mindre bassiner, ligesom det blev gjort i Scenarie 2 og 3.



Figur 10.2. Oversigt over placeringen af bassiner samt spjæld til udledning.

Det reducerede areal for hvert bassin er beregnet under antagelse af, at 70% af de grønne områder er befæstede. Den procentvise fordeling fremgår af Tabel 10.1.

Tabel 10.1. Reduceret areal pr. bassin.

Bassin	Reduceret areal [-]
Bassin 7	34%
Bassin 12	33%
Bassin 16	33%

Det befæstede areal er ligeligt fordelt i hvert område, og derfor skal der ikke tages særlige hensyn til et specifikt område ved dimensionering af bassinerne.

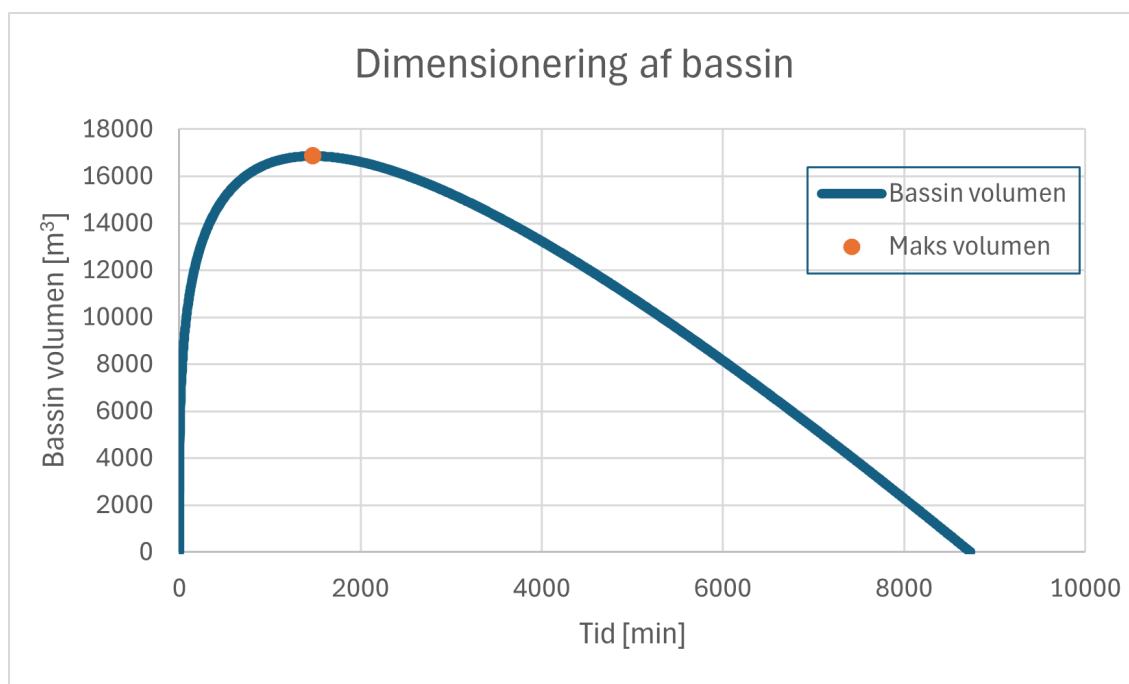
10.2 Dimensionering af Bassin 12

I tørvejr ophobes forurenende stoffer på overflader, hvilket kan føre til høje koncentrationer i den første del af en regnhændelse – det såkaldte first flush-princip. Det er derfor vigtigt at tilbageholde den første del af nedbøren. Bassin 12 dimensioneres således til at kunne tilbageholde en 1-års regnhændelse. Dette sikrer, at størstedelen af den årlige nedbør kan opmagasineres i Bassin 12, uden at der er behov for at benytte opmagasineringsvolumen i de øvrige bassiner. Det muliggør samtidig en alternativ anvendelse af de øvrige bassiner til rekreative formål, såsom legepladser.

Til dimensioneringen af Bassin 12 er der regnet med en udledning på 1 l/s/red ha og en 1-års regnhændelse. Beregningerne er foretaget ved hjælp af SVK's dimensioneringsark for Holbæk. De anvendte nedbørskonstanter til regnkurven fremgår af Tabel 10.2. Der er regnet med et befæstet areal på 72,4 ha. Der er ikke medregnet en egentlig sikkerhedsfaktor, men en andel af det permeable areal er inkluderet i det befæstede areal i beregningen. Det nødvendige volumen fremgår af Figur 10.3.

Tabel 10.2. Nedbørskonstanter

α	c
0,73 [-]	14.043 [l/s/ha]



Figur 10.3. Dimensionering af regnvandsbassin med forskellige regnintensiteter afhængigt af regnvarigheden, til en 1-års hændelse.

Dette betyder, at Bassin 12 skal have et volumen på 16.850 m³ for at kunne tilbageholde en 1-års hændelse. Det resterende opmagasineringsvolumen fordeles mellem Bassin 7 og 16 og afhænger af, hvilken regnserie der dimensioneres efter.

10.3 Styringsstrategi

Bassin 12 er udstyret med både et spjæld og en vandbremse. Dette sikrer, at den maksimale udledning begrænses til 700 l/s, samtidig med at der opnås længere opholdstider under mindre regnhændelser. For at undgå for stor opstuvning i Bassin 12 åbner spjældet helt, når vandstanden overstiger 1 meter. Da en lavere udledningstilladelse øger risikoen for koblede hændelser, er det valgt, at når spjældet først er åbnet, forbliver det åbent, indtil vandstanden igen er under 0,4 meter. Store regnhændelser er ikke afgørende for tilbageholdelsen af forurenende stoffer, da vandet bliver fortyndet. Tømning af bassinet

ned til 0,4 m sikrer dog, at koblede hændelser får mindre betydning for bassinets samlede kapacitet. Styringen af Bassin 12 kan opsummeres i følgende styringstrin:

Tabel 10.3. Styringslogik for Bassin 12.

Nr.	Hvis	Aktion
1	Vandstanden i Bassin 12 overstiger 1 m	Åbn spjældet
2	Vandstanden overstiger 0,4 m, og spjældet er åbent	Bevar spjældet åbent
3	Vandstanden overstiger 0,56 m	Luk delvist for spjældet, så udledningen svarer til 1 l/s/red ha
4	Ingen af ovenstående betingelser er opfyldt	Hold spjældet åbent til 1 l/s/red ha

Der er også implementeret styring i Bassin 7 og 16 for at sikre optimal drift ved mindre regnhændelser. Tidligere undersøgelser viser, at flere forurenende stoffer tilbageholdes, når udledningen fra opstrømsbassinerne holdes på 20 l/s/red ha. Denne værdi er derfor valgt som standardindstilling. Hvis vandstanden i Bassin 12 overstiger 1,1 meter, lukkes udledningen fra Bassin 7 og 16. Da Bassin 12 på dette tidspunkt allerede har åbnet for den fulde udledning, bør Bassin 12 ikke blive mere fyldt end de opstrømsbassiner, da dets bidragsareal er reduceret til en tredjedel.

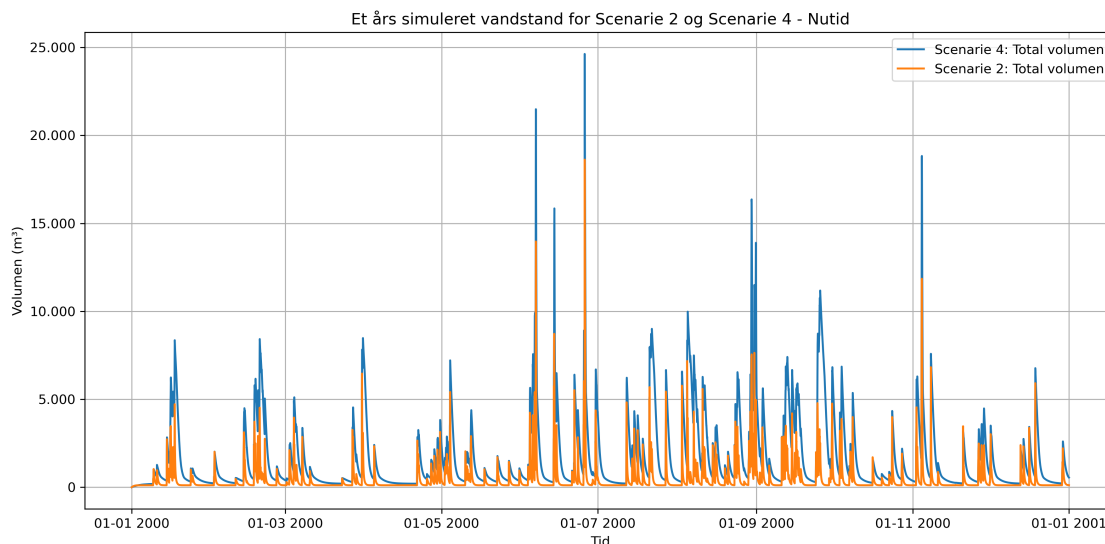
Hvis Bassin 7 og 16 fyldes helt op, mens vandstanden i Bassin 12 stadig er over 1,1 meter i Bassin 12, åbnes de for at sende op til 100 l/s/red ha til Bassin 12. Derved vil risikoen for overløb være størst i Bassin 12. En alternativ strategi kunne være at undersøge vandstanden i Bassin 12, når Bassin 7 og 16 når høje vandstands niveauer, for at sikre, at der er plads til yderligere vand. Dette giver mulighed for at vælge, hvilket område der skal prioriteres i tilfælde af oversvømmelse. Styringstrinene for Bassin 7 og 16 fremgår af følgende:

Tabel 10.4. Styringslogik for Bassin 7 og 16.

Nr.	Hvis	Aktion
1	Vandstanden i eget bassin (7 eller 16) overstiger 1,45 m	Sæt udløb til 100 l/s/red ha
2	Vandstanden i Bassin 12 overstiger 1,1 m	Luk spjældet for udløb fra eget bassin
3	Ingen af ovenstående betingelser er opfyldt	Hold udløb på 20 l/s/red ha

10.4 Undersøgelse af opholdstiden i regnvandsbassinet

Det er undersøgt, om en lavere udledning, indtil vandstanden i Bassin 12 overstiger 1 m, skaber længere opholdstid. Der er derfor analyseret et tilfældigt år – valgt som midteråret i regnserien for hver tidsperiode. Resultatet er sammenlignet med opholdstiden under passiv styring som i Scenarie 2. Vandstanden vises i Figur 10.4 og sektion C.1.



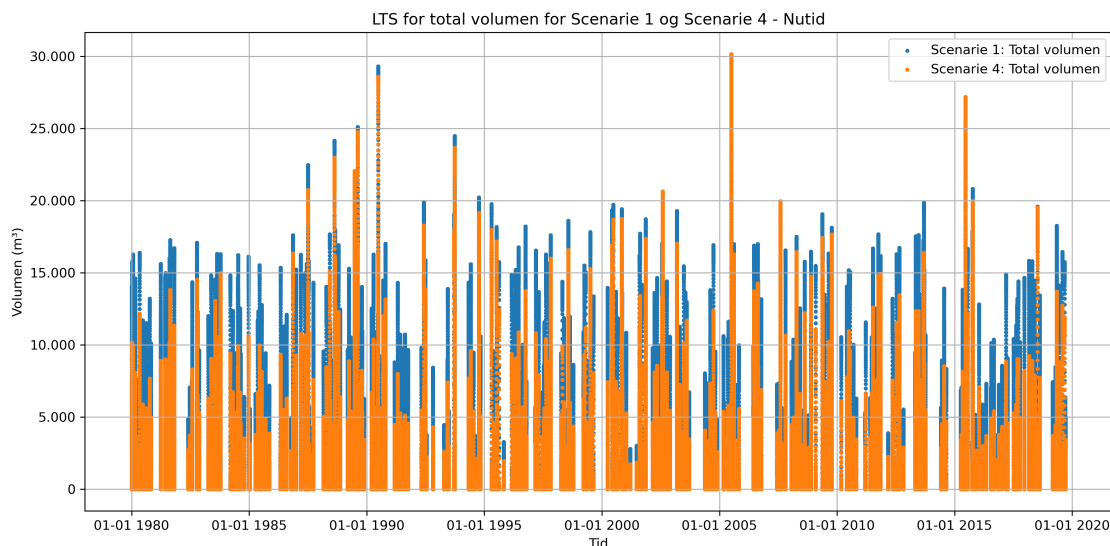
Figur 10.4. Summen af volumen, der bliver opmagasineret for Scenarie 2 og 4. Det maksimale volumen er 30.000 m³, hvorefter der sker overløb.

Det ses, at vandstanden især i vintermånederne bliver højere, da der forekommer koblede hændelser. Om sommeren, når der opstår kraftige regnskyl, sker der først en stor udledning, når vandstanden i Bassin 12 overstiger 1 m. Derfor skal der opmagasineres mere vand for at tilbageholde den samme hændelse.

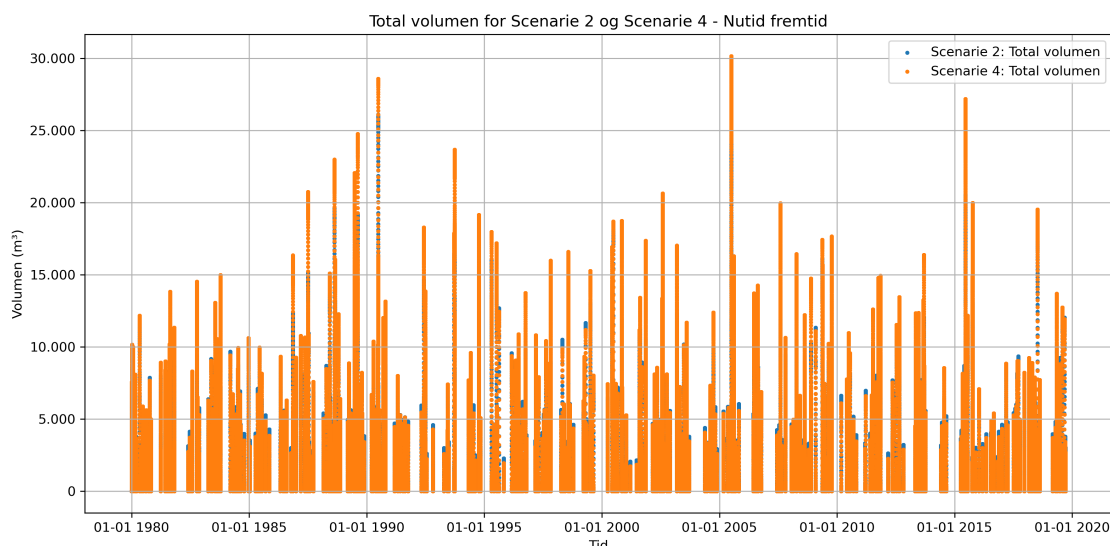
Ved sammenligning af Nutid, Nær- og Fjern fremtid har Bassin 12 det samme volumen i alle regnserier. Derimod er opmagasineringsvolumenet i Bassin 7 og 16 større i den nære og fjerne fremtid. Dette resulterer i længere opmagasineringsperioder, idet hændelser, der tidligere blev hurtigt afledt i Scenarie 2, nu kræver større kapacitet i Scenarie 4 – primært som følge af koblede hændelser.

10.5 LTS-simulering

Der er foretaget en LTS-analyse for hele regnserien for at undersøge, om det er de samme hændelser, der belaster systemet under denne styringsstrategi. Resultaterne fremgår af Figur 10.5, Figur 10.6, sektion C.2 og sektion C.3.



Figur 10.5. Summen af volumen, der bliver opmagasineret for Scenarie 1 og 4. Det maksimale volumen er 30.200 m³, hvorefter der opstår overløb.

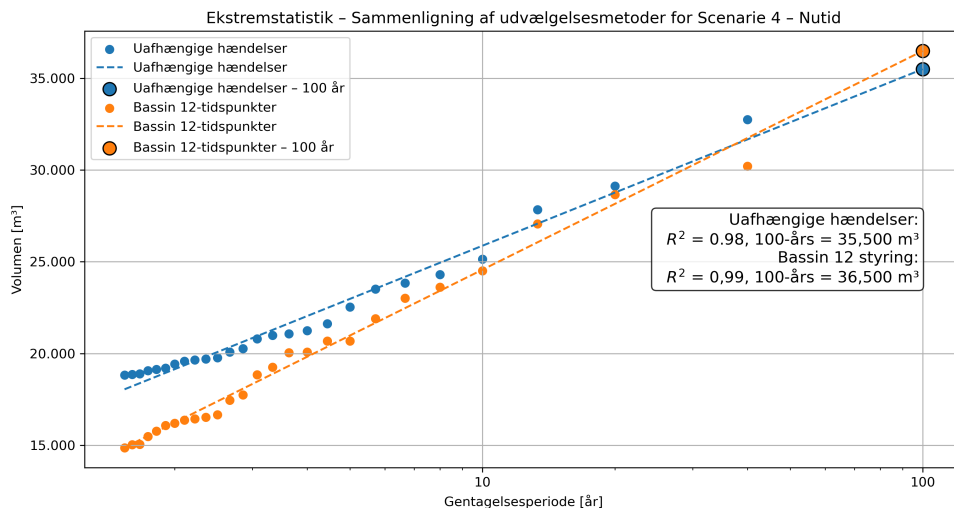


Figur 10.6. Summen af volumen, der bliver opmagasineret for Scenarie 2 og 4. Det maksimale volumen er 30.200 m³, hvorefter der opstår overløb.

Sammenlignet med Scenarie 1, hvor der kun er ét bassin, kan det ses, at der kræves mindre opmagasineringsvolumen for mange af hændelserne i Scenarie 4. Der er dog enkelte tilfælde med koblede hændelser, hvor behovet for volumen overstiger dimensioneringen i Scenarie 1.

10.6 Fremskrivning til ekstreme regnhændelser

Der er igen forsøgt at fremskrive volumen til en 100-års hændelse for at vurdere, hvor meget mere der skal opmagasineres, når der anvendes styring med fokus på tilbageholdelse af forurenende stoffer. Fremskrivningen er udført både tidsafhængigt og tidsafhængigt. Resultaterne kan ses i Figur 10.7 og sektion C.4.

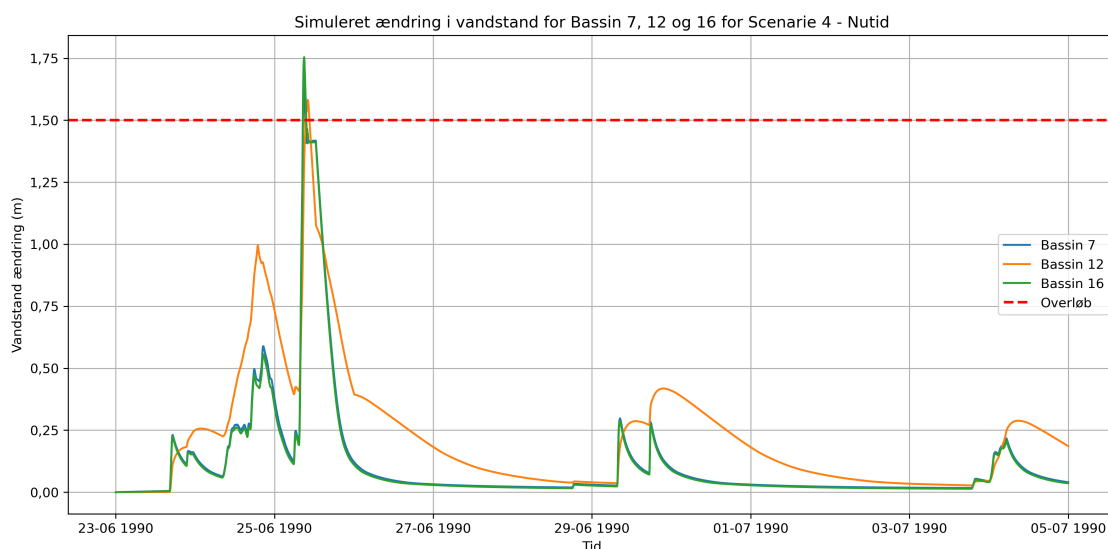


Figur 10.7. De 100 største regnhændelser i den nære fremtid med en fremskrivning til en 100-års hændelse, vist med en logaritmisk tendenslinje. R^2 -værdien er angivet på grafen sammen med det beregnede volumen for en 100-års hændelse.

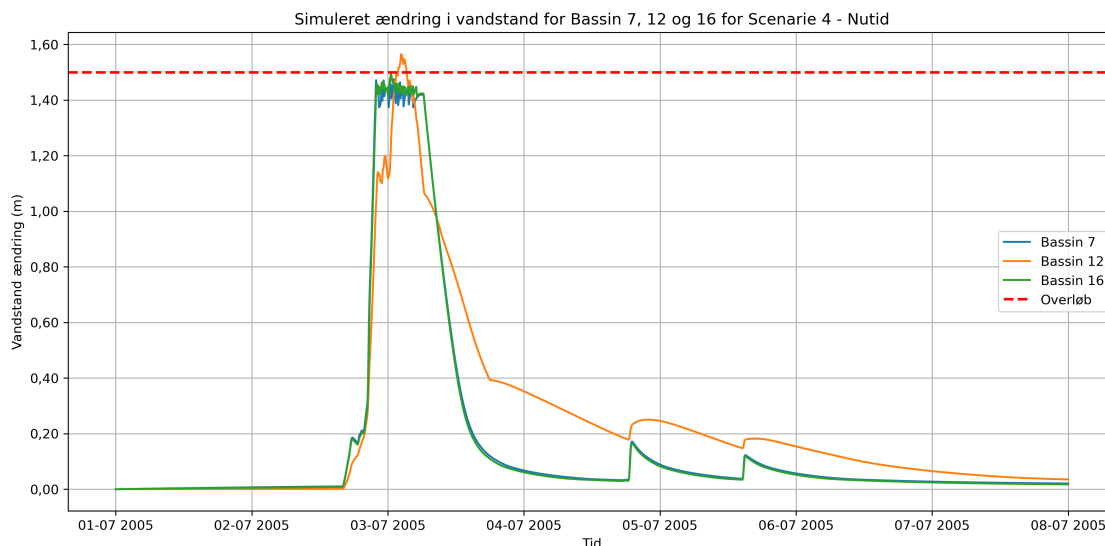
Ved fremskrivning med de samme metoder som tidligere til en 100-års hændelse ses det, at der skal opmagasineres markant mere volumen med denne løsning. Den lave udledning i begyndelsen af hændelsen medfører, at det er nødvendigt at tilbageholde mere vand for at håndtere samme regnhændelse.

10.7 Udnyttelse af Volumen

Det er undersøgt, hvor effektivt volumen udnyttes under ekstreme hændelser. De to største hændelser fra LTS-analysen for hver regnserie er analyseret med fokus på vandstanden i hvert bassin. Resultaterne fremgår af Figur 10.8, 10.9 og sektion C.5.



Figur 10.8. Vandstanden i Bassin 7, 12 og 16 under en stor regnhændelse.



Figur 10.9. Vandstanden i Bassin 7, 12 og 16 under en stor regnhændelse.

De enkelte bassiners volumen udnyttes effektivt ved store regnhændelser. Systemet er konstrueret således, at vand fra Bassin 7 og 16 automatisk ledes til Bassin 12, når vandstanden i disse overstiger 1,45 m. Som følge heraf kan der opstå overløb i Bassin 12 under ekstreme hændelser, hvis det samlede tilførte volumen overstiger dets kapacitet.

10.8 Opholdstid

Der kigges på, hvornår opholdstiden bliver længst i de forskellige scenarier. Det gennemsnitlige volumen og udløbsflow fra Bassin 12 er brugt til at beregne opholdstiden for bassinet eller bassinerne. Beregningerne er baseret på simuleringer over et tilfældigt år, valgt som midteråret i regnserien. Det gennemsnitlige volumen, udløbsflowet og opholdstiden fremgår af Tabel 10.5.

Tabel 10.5. Gennemsnitligt volumen, udløbsflow og opholdstid for scenarier 1–4 under tre klimascenarier.

Klimascenarie	Scenarie	Volumen [m ³]	Flow ud [m ³ /s]	Opholdstid [døgn]
Nutid	1	1.430	0,014	1,16
	2	460	0,014	0,38
	3	552	0,015	0,43
	4	1.697	0,014	1,37
Nær fremtid	1	1.773	0,014	1,50
	2	542	0,013	0,38
	3	449	0,014	0,37
	4	1.994	0,014	1,69
Fjern fremtid	1	2.028	0,012	2,00
	2	616	0,012	0,60
	3	625	0,013	0,57
	4	2.022	0,012	1,93

Opholdstiden i Scenarie 4 er op til tre gange længere end i Scenarie 2 og 3, hvilket forventes at forbedre bundfældningen betydeligt. I Scenarie 1 er den gennemsnitlige opholdstid lang, hvilket skyldes, at der holdes en vandstand, der bevares i lang tid, fordi udløbshastigheden bliver meget lav, selvom der stadig er vand tilbage i bassinet. Den største bundfældning sker, når store vandmængder tilbageholdes i længere tid, frem for når små mængder fastholdes over længere perioder. Derfor forventes en bedre rensning i Scenarie 4, da der tilbageholdes store mængder vand umiddelbart efter hændelser, sammenlignet med Scenarie 1, hvor lidt vand fastholdes over længere tid efter en regnhændelse. Selvom opholdstiden er omtrent den samme, vil rensningen således være bedre i Scenarie 4.

11.1 Opstuvning til terræn og rør diamter

I modellen blev der observeret opstuvning i brøndene, når der kun var ét bassin i Scenarie 1. Denne opstuvning skyldes, at al regnvand skulle transporteres på en gang gennem hovedledningerne til ét samlet lavpunkt, hvilket skabte et hydraulisk pres og dermed opstuvning. Når der derimod blev tilføjet flere bassiner fordelt rundt på grunden, forsvandt denne opstuvning til terræn. I stedet blev vandet tilbageholdt og midlertidigt opmagasineret i bassinerne, hvilket medførte en mere jævn belastning af ledningssystemet.

Det skal dog bemærkes, at modellen udelukkende indeholder hovedledninger og ikke de mindre stikledninger. Det er derfor muligt, at der i en mere detaljeret model kan forekomme lokal opstuvning i disse mindre ledninger.

Derudover er alle ledninger i modellen dimensioneret med samme rørdiameter. I praksis vil det ofte være muligt og hensigtsmæssigt at tilpasse rørdimensionerne efter den forventede belastning i de enkelte dele af systemet. Ved at tilføje flere bassiner reduceres intensiteten på regnen, hvorfor det også er muligt at tilpasse rørdiameteren til hver enkelt løsning. Dette kan potentielt give både økonomiske og tekniske fordele i den endelige udformning af afløbssystemet.

11.2 Inkludering af vådvolumen og modelbaseret styring

Der er på Figur 5.4 vist, hvor meget et bassin udelukkende med opmagasineringsvolumen vil fylde, hvis det placeres for enden af bakken. I denne beregning er vådvolumen, som anbefales for at sikre en tilstrækkelig rensning af regnvandet, ikke medtaget. Derfor vil bassinet i praksis være større end det, der er vist på figuren.

Opmagasineringen er dimensioneret med en maksimal vanddybde på 1,5 meter. Denne begrænsning er valgt for at undgå iltsvind ved bunden, hvilket kan opstå ved dybere og stillestående vand. Det skal dog bemærkes, at så høje vandstande sjældent vil forekomme, og derfor kan bassinerne med fordel graves dybere, så det ikke kommer til at optage mere overfladeareal. Det skaber fleksibilitet i udformningen og tilpasning til terrænet.

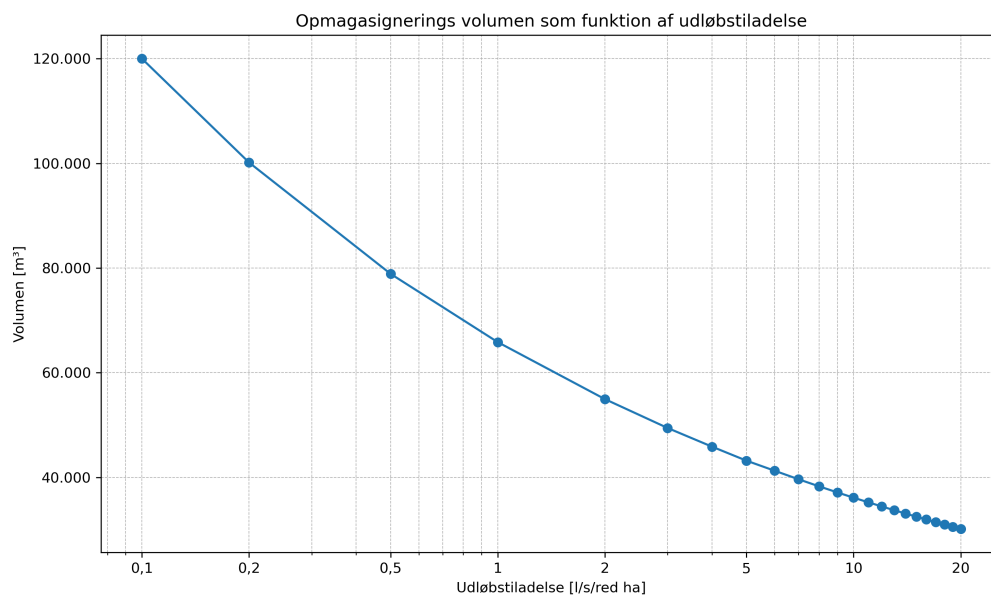
Når vådvolumen indregnes i bassindesignet, åbnes der desuden mulighed for at implementere global, modelbaseret forudsigelsesstyring. Ved hjælp af denne styring kan systemet proaktivt tømme en del af det permanente vådvolumen, hvis det også er muligt at forudsige en kraftig regnhændelse. Dette kan mindske den nødvendige opmagasineringsvolumen, der er nødvendig, hvorfor det bliver billigere at anlægge. Det er et eksempel på, hvordan mere avanceret styring og dimensionering kan bidrage til bedre udnyttelse af bassin volumen.

11.3 Sammenhæng mellem udløbstilladelse og opmagasineringsvolumen

I dette projekt er der arbejdet med en relativt høj udløbstilladelse på 20 l/s/red ha. En så høj tilladelse ses sjældent, men det afhænger af recipienten. Hvor man tidligere arbejdede med en tommelfingerregel på 1 l/s/red ha, gives der i dag oftere tilladelser, der ligger væsentligt under dette niveau. Formålet med de lave udledningstilladelser er at sikre, at udledning af regnvand ikke skaber erosion og forurening af stoffer eller giver forøget risiko for oversvømmelse.

Lave udløbstilladelser medfører imidlertid, at et væsentligt større opmagasineringsvolumen af regnvand. Med den nuværende dimensioneringspraksis kan det betyde, at bassinet stort set aldrig tømmes fuldstændigt, og derfor i praksis mere fungerer som permanente søer end som traditionelle regnvandsbassiner.

Det er undersøgt, hvor meget mere der skal opmagasineres, hvis der gives en lavere udledningstilladelse. Dimensioneringen er i denne sammenhæng gentaget ved brug af SVK's regneark. Beregningen er foretaget med de samme parametre som i sektion 5.2, og tager udgangspunkt i en 100-års regnhændelse. Resultaterne fremgår af Figur 11.1.



Figur 11.1. Opmagasineringsvolumen afhængigt af udløbstilladelse.

Ved en meget lav udledningstilladelse på 0,1 l/s/red ha ses det, at det nødvendige opmagasineringsvolumen bliver omtrent fire gange så stort som ved en udledning på 20 l/s/red ha. Den lave udledning vil muligvis ikke fungere i praksis, fordi den årlige nedbør er for høj. Så lave udledningstilladelser er tidligere blevet givet til andre projekter, og det er derfor ikke usandsynligt, at det kan ske igen.

I det konkrete projekt kan den høje udledningstilladelse dog retfærdiggøres, da udledningen sker til en fjord, hvor den hydrauliske påvirkning vurderes at være minimal. Det bør dog

bemærkes, at en høj udledning kræver øget fokus på rensning og fjernelse af forurenende stoffer.

11.4 Fremskrivning af opmagasineringsvolumen og brug af VÆRDI-regnserier

I dette projekt er VÆRDI-regnserier anvendt til at undersøge, hvordan et afløbssystem kan blive påvirket af fremtidige regnhændelser. VÆRDI-regnserierne er endnu ikke offentligt tilgængelige, da der stadig arbejdes på dokumentationen af deres validering.

Der er udført analyser af systemets respons med både passiv udledning og aktiv styring. Aktiv styring medfører mere komplekse interaktioner, og resultaterne skal derfor fortolkes med en vis forsigtighed.

Til estimering af opmagasineringsvolumen for en 100-års regnhændelse er der gennemført fremskrivninger baseret på tre forskellige regnserier med en varighed på 40 år. Metoden baserer sig på at identificere den største hændelse i hver serie som repræsentativ for en 40-års hændelse, hvorefter der fremskrives til en 100-års hændelse. Denne fremgangsmåde kendes fra beregning af regnintensiteter, men er sjældent anvendt på bassinvolumen. Det vurderes dog, at metoden giver et mere stabilt billede af belastningen, da den tager udgangspunkt i hele volumenet af hændelser fremfor kun intensiteten.

Det skal anerkendes, at et datagrundlag på 40 år er relativt begrænset, hvilket kan betyde, at ekstreme hændelser ikke altid vægtes tilstrækkeligt højt. I nogle tilfælde viste de fremskrevne 100-års volumener sig lavere end enkelte historiske hændelser, hvilket understreger denne udfordring.

Der er anvendt to forskellige metoder til fremskrivning af regndata for Scenarie 2, 3 og 4. Den første metode summerer de største hændelser fra alle bassiner uafhængigt af hinanden, mens den anden metode alene tager udgangspunkt i de største hændelser tidspunkt for Bassin 12, hvor den tager vandstanden på samme tid i de andre rastende bassiner.

Dimensioneringen af opmagasineringsvolumen til fremskrivning af en 100-års hændelse er foretaget ved anvendelse af en logaritmisk tendenslinje, som har vist et godt fit med en R^2 -værdi mellem 0,91 og 0,99. Ved anvendelse af SVK's regneark er det beregnede volumen 30.200 m^3 , hvilket er tilstrækkeligt for Scenarie 1, 2 og 3 under nutidens regnserie og begge fremskrivningsmetoder. For Nær fremtid og Fjern fremtid er dette volumen dog utilstrækkeligt.

Tabellerne Tabel 11.1 og Tabel 11.2 viser det nødvendige bassinvolumen for hvert scenarie og regnserie. Tabellen med uafhængige hændelser viser generelt højere volumen, mens tabellen med data for samme tidspunkt som Bassin 12 viser en mere stejl stigning i volumenbehovet.

Tabel 11.1. Bassinvolumen for Scenarier 1–4 for alle tre regnserier, hvor hændelserne er taget uafhængigt af hinanden.

Scenarie	1 [m ³]	2 [m ³]	3 [m ³]	4 [m ³]
Nutid	30.200	28.400	29.600	35.500
Nær fremtid	37.200	34.200	37.600	44.600
Fjern fremtid	44.700	42.600	45.400	48.400

Tabel 11.2. Bassinvolumen for Scenarier 2–4 for alle tre regnserier, hvor hændelserne vurderes på samme tidspunkt som for Bassin 12.

Scenarie	2 [m ³]	3 [m ³]	4 [m ³]
Nutid	29.900	30.700	36.500
Nær fremtid	35.300	40.200	44.700
Fjern fremtid	44.000	49.000	48.300

Tabellerne viser, at der generelt kræves mindst opmagasineringsvolumen i Scenarie 2 og mest i Scenarie 4. Den lavere udledning i starten af en hændelse i Scenarie 4 medfører behov for større opmagasineringsvolumen, mens hurtigere tømning i Scenarie 2 reducerer det samlede volumenbehov.

Som følge af kravet om ekstra sikkerhed mod oversvømmelse af den nærliggende jernbane er det nødvendigt at tage højde for større og mere intense regnhændelser. Allerede med regnserien for Nær fremtid overstiger opmagasineringsbehovet det beregnede volumen på 30.200 m³, hvilket taler for en mere konservativ dimensionering.

Ønskes systemet dimensioneret til at håndtere fremtidige ekstreme hændelser med længere opholdstid for Fjern fremtid, vil det nødvendige volumen overstige det oprindelige med over 50%. Dette betyder et markant øget pladsbehov og højere anlægsomkostninger for et system, som kun forventes at blive fuldt belastet med en årlig sandsynlighed på 1% i perioden 2070–2110. Dette rejser spørgsmålet om, hvorvidt det er hensigtsmæssigt at anlægge så stort et opmagasineringsvolumen allerede nu, eller om der bør arbejdes med fleksible løsninger, hvor kapaciteten gradvist kan udvides i takt med udviklingen af klimaforandringerne.

11.5 Decentral bassinplacering og styret udledning

I dette projekt er det blevet undersøgt, hvordan anvendelsen af decentrale bassiner med styret udledning kan bidrage til at optimere opmagasineringsvolumen og forbedre stof tilbageholdelse. Resultaterne viser, at decentrale løsninger kan give større fleksibilitet i placeringen af bassiner, hvilket kan være en fordel i tæt bebyggede områder.

Styringsteknikker, hvor bestemte bassiner fyldes oftere end andre, kan udnyttes strategisk for at forlænge opholdstiden og dermed opnå en bedre renseffekt. Disse tiltag er dog afhængige af tilstedeværelsen af aktiv styring, hvilket introducerer en øget kompleksitet i driften. Anlæg af flere decentrale bassiner indebærer dog også øgede anlægs- og mulige driftsomkostninger, både i form af flere konstruktioner og behovet for styringskomponenter som spjæld og vandbremsere. Det skal derfor afvejes, om fordelene i form af enten

reduceret volumenbehov eller bedre stoftilbageholdelse opvejer de øgede omkostninger og systemkompleksiteten. I dette projekt udledes der til Holbæk Fjord, hvor der tidligere har været store problemer med iltsvind. Dette problem kan afhjælpes ved at reducere tilførslen af næringsstoffer, hvilket en forlængelse af opholdstiden vil kunne bidrage til.

De problematikker, der er undersøgt i dette projekt – herunder brugen af centrale og decentrale bassiner samt styret udledning – vurderes at være overførbare til andre byudviklingsområder med lignende hydrologiske og pladsmæssige udfordringer. Dette kan især være relevant i tætbebyggede områder, hvor der stilles høje krav til både pladsudnyttelse og stofreduktion.

På baggrund af SVK's regionale regneark er opmagasineringsvolumen blevet dimensioneret for et simpelt regnvandsbassin. Da denne metode kun er gyldig for simple afløbssystemer, er der ydermere anvendt klimafremskrevne, regionale regnserier fra projektet VÆRDI til at undersøge komplekse afløbssystemer. VÆRDI's regnserier har en længde på 40 år, men da dette projektet har til formål at beskrive en 100-års hændelse, er fremskrivningen foretaget ud fra det hydrauliske opmagasineringsvolumen. Dette blev gjort ved at rangere hændelserne og antage, at den største og næststørste hændelser svarer til henholdsvis en 40- og 20-års regnhændelse også videre. Ved hjælp af en logaritmisk tendenslinje har det været muligt at opnå et godt fit på de 40-års regndata og derved har det været muligt at fremskrive opmagasineringsbehovet for en 100-års hændelse.

Der blev foretaget en sammenligning mellem centrale og decentrale bassiner. Ved passiv udledning og ens dimensionering – det vil sige samme opmagasineringsvolumen og udløb pr. hektar – viste det sig, at decentrale bassiner medførte en hurtigere tømning ved lokal passiv udledning. Dette reducerer systemets følsomhed over for koblede regnhændelser, da bassinerne når at tømmes mellem hændelser og dermed bedre kan håndtere gentagne belastninger. Det resulterer i et lavere nødvendigt opmagasineringsvolumen.

Ved anvendelse af global, reaktiv styring blev der i dette tilfælde ikke opnået en tilsvarende større reduktion i opmagasineringsvolumen end ved passiv udledning. Systemets kompleksitet øges væsentligt, og styringen gav ikke anledning til bedre resultater i det pågældende eksempel. Det vurderes dog, at en mere finjusteret styringsstrategi potentielt kan reducere volumenbehovet yderligere. Der er dog en risiko for, at en specifik styring, der er tilpasset bestemte regnhændelser, som ikke vil finde sted igen, og derfor ikke vil være effektiv under fremtidige nye regnhændelser.

Den hurtigere tømning ved passiv udledning fører også til en kortere opmagasineringsstid. Ved etablering af våde regnvandsbassiner dimensioneres der et vådvolumen for at sikre tilstrækkelig opholdstid, hvilket er nødvendigt for bundfældning og tilbageholdelse af forurenende stoffer. I projektet er det undersøgt, om opholdstiden kan forlænges ved hjælp af global, reaktiv styring. Dette er muligt ved at sænke udledningen under mindre regnhændelser og samtidig åbne for stor udledning under kraftigere regnhændelser. For at tilbageholde en 100-års hændelse med god tilbageholdelse af forurenede stoffer kræves der et større opmagasineringsvolumen for at kunne tilbageholde en 100-års hændelse, da udledningen er lavere i begyndelsen af de største hændelser.

Perspektivering 13

De løsninger, der er undersøgt i dette projekt, bygger på anvendelsen af regulerbare spjæld i regnvandssystemer. Hvis enkelte spjæld sætter sig fast eller ikke reagerer som forventet, kan det føre til overløb, som i værste fald kan medføre skader på bygninger og infrastruktur, som kan overgå de fordele, der er ved brug af en regulerbar vandbremse. Derfor er det relevant at undersøge, hvordan nyere teknologiske løsninger kan øge systemets driftssikkerhed og robusthed.

Et eksempel herpå er projektet ReLeVand StyRing (VUDP), hvor der er udviklet en patenteret Regulerbar Lavenergi Vandbremse. Vandbremsen er designet til at fungere uden ekstern strømforsyning ved hjælp af solceller og batteri og er samtidig udstyret med en sikkerhedsmekanisme, der sikrer, at systemet automatisk overgår til en passiv tilstand ved strømsvigt [Thomsen et al., 2022b].

Ud over at optimere driftssikkerheden muliggør ReLeVand avanceret styring, herunder reaktiv- og modelbaseret forudsigelsesstyring. Dette åbner op for eksempel udledning til vandløb på tidspunkter, hvor vandstanden er lav, og derved reduceres belastningen på vandløbene under peak-perioder. Frem for traditionelle vandbremses er det muligt med regulerbar vandbremse at bruge den fulde udledningstilladelse, selv ved lave vandstande i regnvandsbassinerne. Systemet leverer samtidig realtidsdata, som kan understøtte både forsyningens dokumentation og myndighedernes vurdering af udledningstilladelser [Thomsen et al., 2022b].

På trods af de tekniske fordele peger ReLeVand-projektet dog også på en væsentlig barriere: De nuværende lovgivningsmæssige rammer er ikke tilstrækkeligt tilpasset dynamiske og intelligente udledningssystemer. Derfor anbefales det, at der arbejdes videre med at inddrage myndighederne for at fremme nye retningslinjer, der muliggør en mere fleksibel og klimatilpasset forvaltning af regnvand [Thomsen et al., 2022b].

Denne type teknologi og reguleringspraksis kan i fremtiden udgøre et alternativ til etablering af flere eller større regnvandsbassiner. Det giver anledning til at overveje, hvordan projekter som det foreliggende kan indgå i en bredere, mere dynamisk og datadrevet tilgang til klimatilpasning.

Litteratur

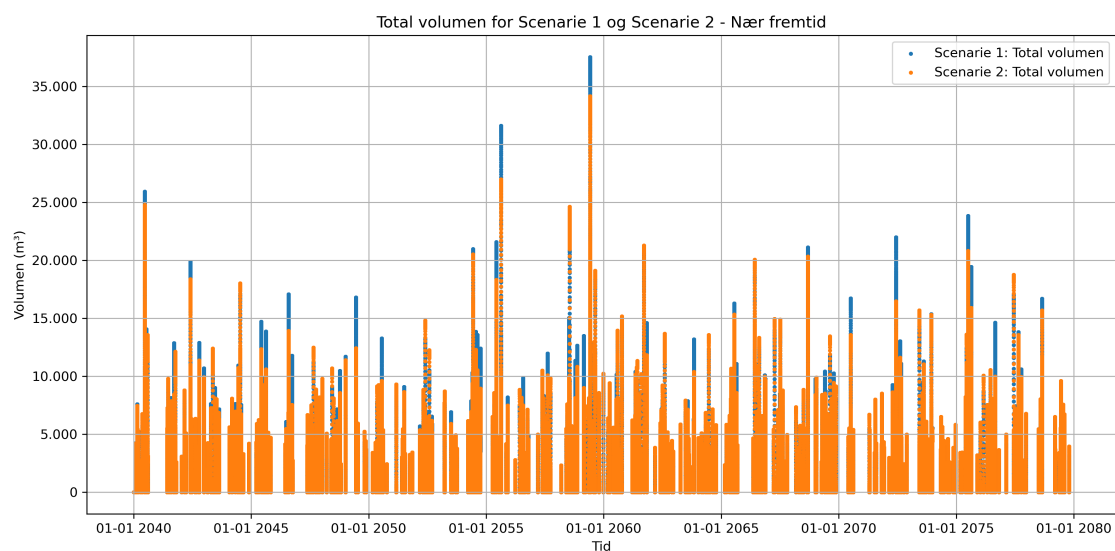
- Arkitema. Holbæk vest fjordbyen. Technical report, Gefion, 2022.
- Lasse Baaner and Bodil Mose Pedersen. Udledningstilladelser for regnvand. <https://regnvandskvalitet-abc.teknologisk.dk/media/1068/vidensblad-udledningstilladelse-regnvand.pdf>, 2014.
- Jeppe Bøgsted. Fjordbyen – regnvandshåndtering – forsinkelse i opland. Technical report, COWI, 2024.
- Alberto Campisano, Jordie Cabot Ple, Dirk Muschalla, Martin Pleau, and Peter A. Vanrolleghem. Potential and limitations of modern equipment for real time control of urban wastewater systems. Urban Water Journal, 10(5):300–311, 2013. doi: 10.1080/1573062X.2013.763996.
- Danmarks statistik. Mere areal med bebyggelse og infrastruktur. <https://www.dst.dk/da/Statistik/nyheder-analyser-publ/nyt/NytHtml?cid=49422>, u.d.
- DANVA. Funktionspraksis for afløbssystemer under regn. Technical report, -, 2005.
- Danva. Designguide for regnvandsbassiner. https://www.danva.dk/media/4817/danva_regnvandsbassiner_designguide_2018_final.pdf, 2018.
- DANVA. VÆRDI. <https://www.danva.dk/viden/vudp/projektuddelinger/v%C3%A6rdi/>, u.d.
- DMI. Vejret i Danmark bliver varmere, vådere og vildere. <https://www.dmi.dk/klima-atlas/om-klimaatlas/vejretidanmarkblivervarmerevaadereogvildere>, 2024.
- Geus. Jupiter-databassen. https://data.geus.dk/geusmap/?mapname=jupiter&lang=da#baslay=baseMapDa&optlay=&extent=664322.632294416,6176470.976241275,668431.4968074644,6178634.550211427&layers=jupiter_boringer_ws&filter_0=kode%3DU%26dgunr%3D%26anlaegsnavn.part%3D%26hovedtype%3D%26kommunenavn.part%3D%26dybde.min%3D%26dybde.max%3D%26aar.min%3D%26aar.max%3D%26formaal%3D%26anvendelse%3D%26dataejer%3D, u.d.
- Ida Bülow Gregersen, Karsten Arnbjerg-Nielsen, Hjalte Jomo Danielsen Sørup, Birgit Paludan, Søren Thorndahl, Ane Loft Møllerup, Toke Sloth Illeris, and Dan Rosbjerg. Bassindimensionering med svks regionale regnrækkeværktøj. Technical report, IDA, 2023.
- Holbæk-kommune. Byudvikling. <https://kommuneplan2021.holbaek.dk/temaer/byudvikling/>, 2020.

- Ditte Marie Reinholdt Jensen, Anja Thrane H. Thomsen, and Karsten Arnbjerg-Nielsen. Spildevandskomitéens skrift 32 om regional variation af ekstremregn, 2023. URL <https://dnnk.podbean.com/e/spildevandskomiteens-skrift-32-om-regional-variation-af-ekstremregn/>. Podcast episode, DNNK.
- C.J. Keifer and H.H. Chu. Synthetic storm pattern for drainage design. ASCE Journal of the Hydraulics Division, 83(HY 4):1332/1–1332/25, 1957.
- Gentofte kommune. Separering af afløbssystemet. <https://gentofte.dk/bolig-og-by/byggeri-og-byplanlaegning/bygge-og-anlaegsprojekter-i-kommunen/fremtidens-afløbssystem-spildevand-for-sig-regnvand-for-sig/#Hvorfor-skal-Gentofte-Kommune-adskille-spildevand-og-regnvand-i-hele-kommunen->, 2024.
- Miljø- og ligestillingministeriet. Kraftigt iltsvind rammer store områder. <https://mst.dk/nyheder/2022/september/kraftigt-iltsvind-rammer-store-omraader>, 2022.
- Miljø og ligestillingministeriet. Vandområdeplanerne. <https://mim.dk/miljoe/vandmiljoe/vandomraadeplanerne>, u.d.
- Asbjørn Haaning Nielsen. Vejledning til beregning af udledte stofmængder fra koblede bassiner og lar-løsninger. Technical report, Aarhus Kommune, 2017.
- Jesper Ellerbæk Nielsen. Modellering med målt historisk nedbør (lts). Forelæsning ved Aalborg Universitet, Byggeri og Anlæg, 2023. 13. marts, kl. 08:15–12:00.
- Manfred Schutze, Alberto Campisano, Hubert Colas, Wolfgang Schilling, and Peter A. Vanrolleghem. Real time control of urban wastewater systems—where do we stand today? Technical report, Sciencedirect, 2004.
- Spildevandskomiteen. Regional variation af ekstremregn i Danmark. Number Skrift 26. Ingeniørforeningen i Danmark, 1999.
- Spildevandskomiteen. Funktionspraksis for afløbssystemer under regn. Number Skrift 27. Ingeniørforeningen i Danmark, 2005.
- Spildevandskomiteen. Forventede ændringer i ekstremregn som følge af klimaændringer. Number Skrift 29. Ingeniørforeningen i Danmark, 2008.
- Spildevandskomiteen. Opdaterede klimafaktorer og dimensionsgivende regnintensiteter. Number Skrift 30. Ingeniørforeningen i Danmark, 2014.
- Spildevandskomiteen. Dimensionering af lar-anlæg. Technical report, -, 2015.
- Spildevandskomiteen. Metoder til bestemmelse af serviceniveau for regnvand på terræn. Number Skrift 31. Ingeniørforeningen i Danmark, 2017.
- Anja Thrane Hejsebæk Thomsen, Michael R. Rasmussen, Peter Dyhre, and Torben Krejberg. Regulerbar lavenergi vandbremse. Technical report, Danva, 2022a.

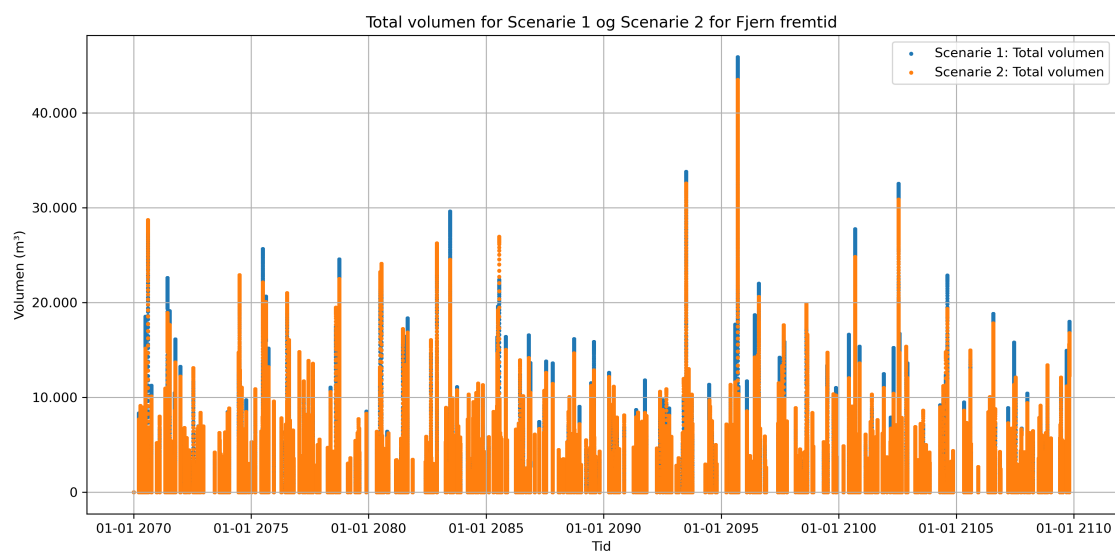
- Anja Thrane Hejselbæk Thomsen, Michael R. Rasmussen, Peter Dyhre, and Torben Krejberg. Relevand: Regulerbar lavenergi vandbremse – vudp projektrapport. Projektrapport Projekt ID: 4317.2018, DANVA, 2022b. URL <https://www.danva.dk/media/10789/relevand-vudp-projektrapport.pdf>.
- Søren Thorndahl, Thomas Røhr Andersen, Karsten Arnbjerg-Nielsen, Ida B. Gregersen, Henrik Madsen, and Jesper E. Nielsen. Klimafremskrivning af målt nedbør til afløbsteknisk anvendelse (klimaks). Technical report, DANVA og Spildevandskomiteen, Danmark, 2020. URL <https://klimaks.dhigroup.com/media/10486/klimaks-slutrapport.pdf>. Slutrapport for projekt KLIMAKS.
- Luca Vezzaro, Karsten Arnbjerg, and Peter Steen Mikkelsen. Hvidbog om udledning af vand fra byer. <https://www.danva.dk/media/8838/hvidbog-om-udledning-af-vand-fra-byer.pdf>, 2022.
- Jes Vollertsen. Bassindimensionering. Technical report, BUILD, 2021.
- Leif Winther, Jens Jørgen Linde, Hans Thorkild Jensen, Leo Lund Mathiasen, and Niels Bent Johansen. Afløbsteknik. Polyteknisk Forlag, 2011. ISBN: 978-87-502-1015-3.

Scenarie 2 A

A.1 Opmagasineringsvolumen ved LTS, for scenarie 1 og 2

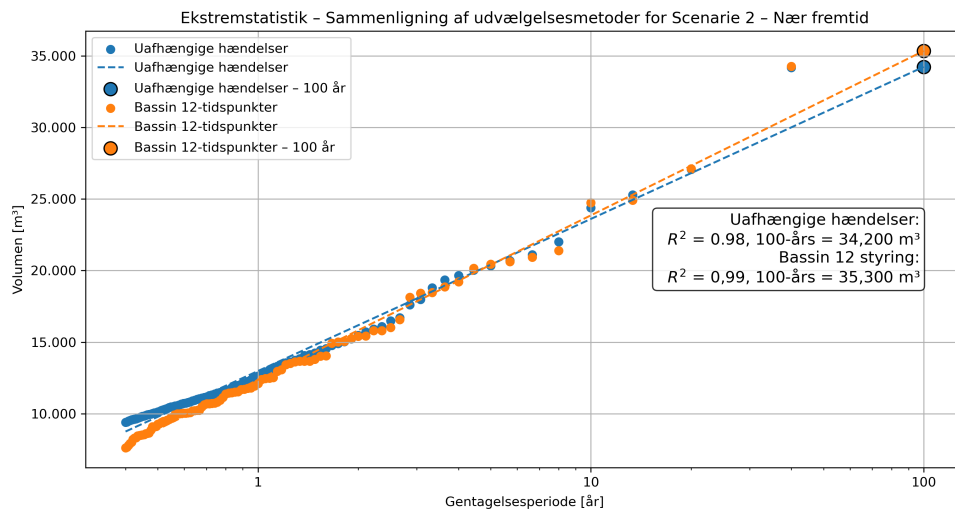


Figur A.1. Der er kørt LTS på Scenarie 2 for Nær fremtids regn, hvor det totale volumen for alle bassinerne er fundet, der er sammenlinget med Scenarie 1.

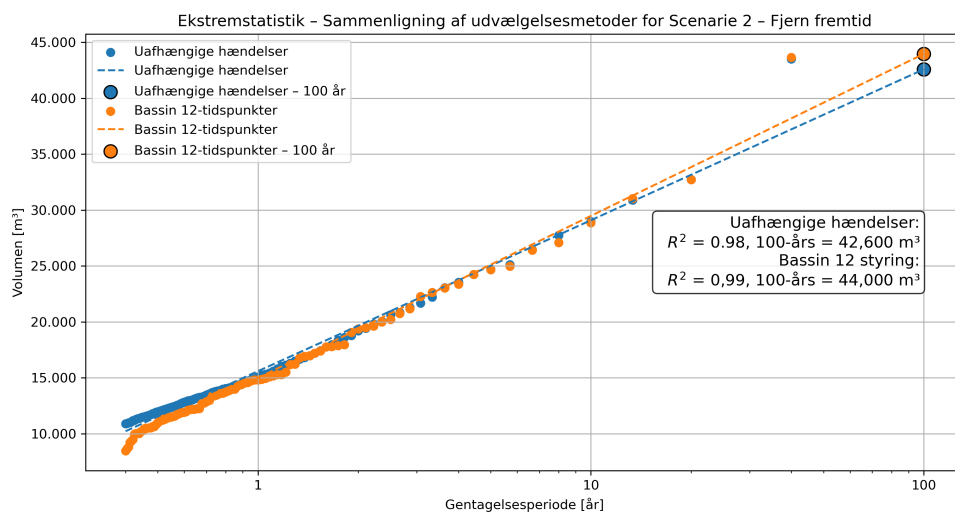


Figur A.2. Der er kørt LTS på Scenarie 2 for Fjern fremtids regn, hvor det totale volumen for alle bassinerne er fundet, der er sammenlinget med Scenarie 1.

A.2 Ekstrem statistik

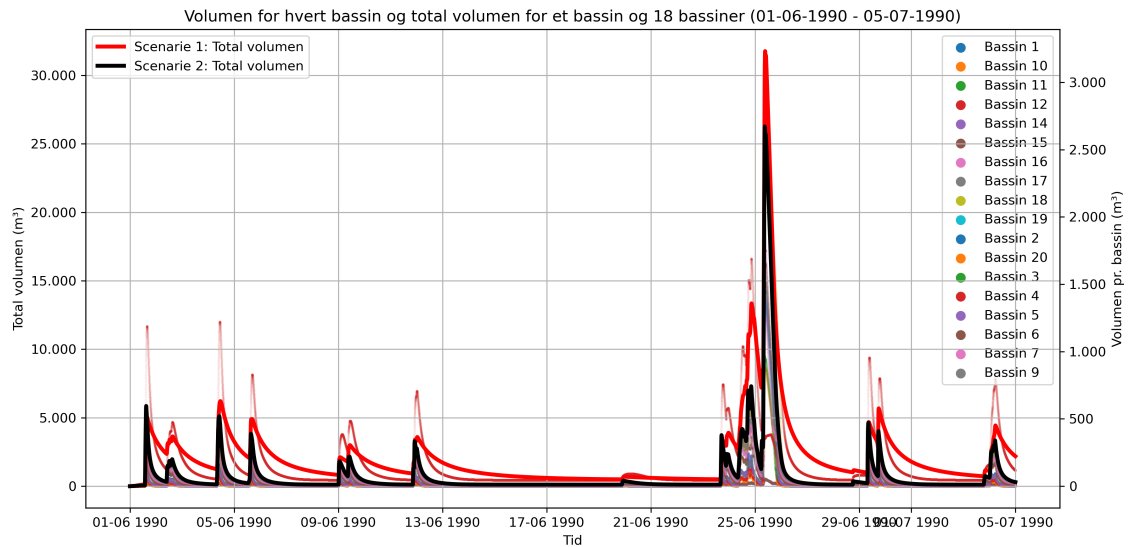


Figur A.3. De 100 største regnhændelser i den Nær fremtid, fremskrevet med to metoder, afhængelig og uafhængelige af tidspunkter. Fremskrevet til en 100-års hændelse, med en logaritmisk-tendenslinje. R^2 -værdien er angivet på grafen, sammen med det beregnede volumen for en 100-års hændelse.

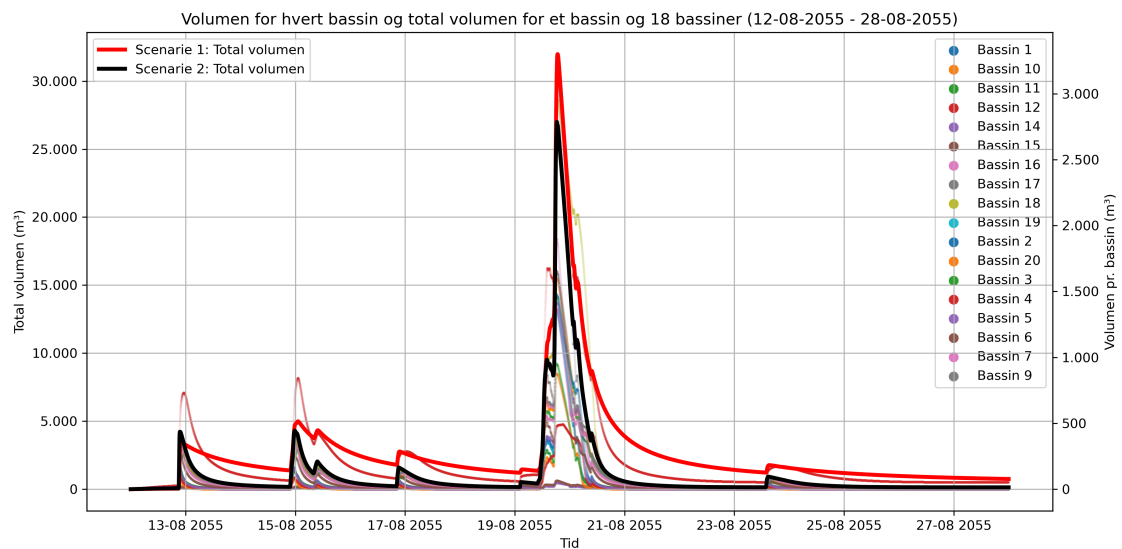


Figur A.4. De 100 største regnhændelser i den Fjern fremtid fremskrevet med to metoder, afhængelig og uafhængelige af tidspunkter. Fremskrevet til en 100-års hændelse, med en logaritmisk-tendenslinje. R^2 -værdien er angivet på grafen, sammen med det beregnede volumen for en 100-års hændelse.

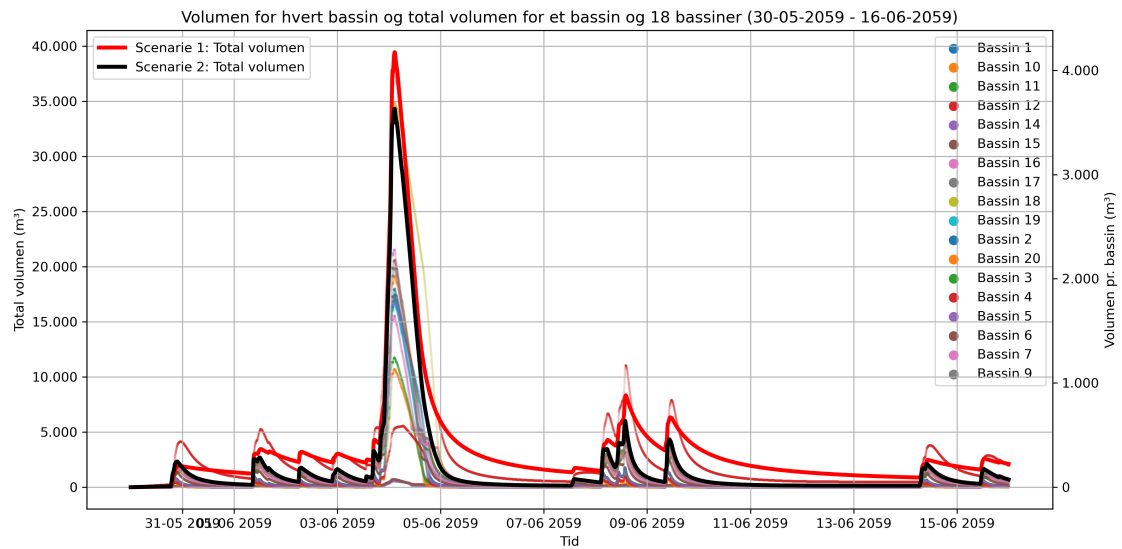
A.3 Opmagasineringsvolumen for udvalgte hændelser, for Scenarie 1 og 2



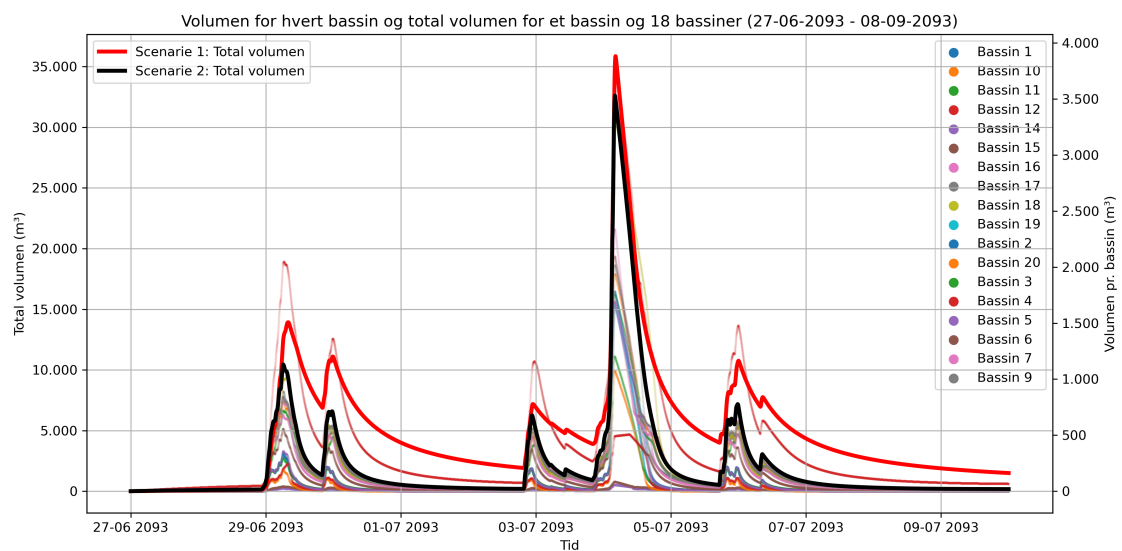
Figur A.5. Sammen ligning af opmagasineret volumen for scenarie 1 med et bassin og scenarie 2 med 18 bassiner passivstyret. På anden aksel kan der ses volumen for hvert af de 18 bassiner].



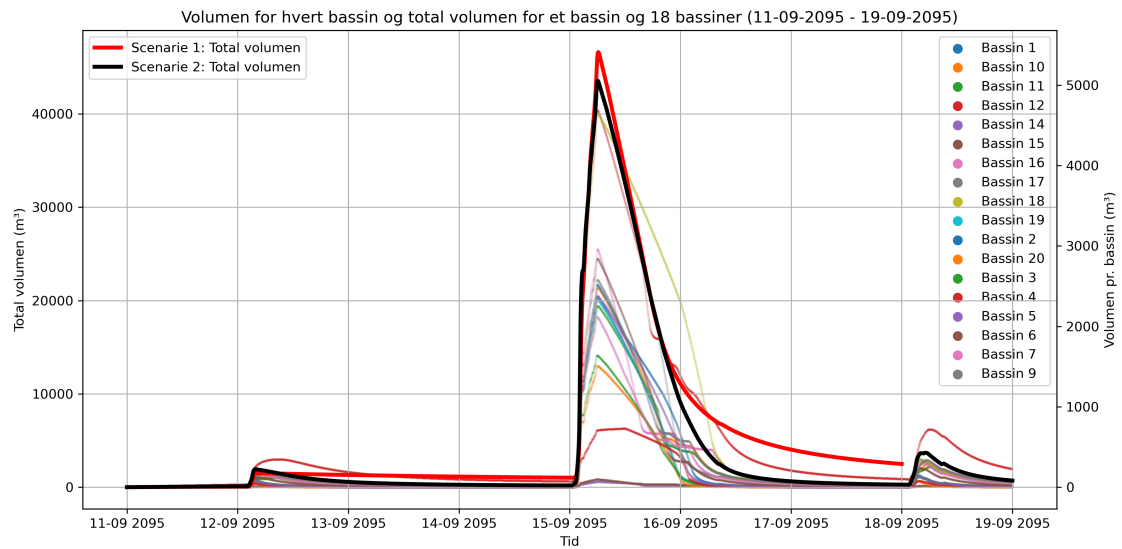
Figur A.6. Sammen ligning af opmagasineret volumen for scenarie 1 med et bassin og scenarie 2 med 18 bassiner passivstyret. På anden aksel kan der ses volumen for hvert af de 18 bassiner.



Figur A.7. Sammen ligning af opmagasineret volumen for scenarie 1 med et bassin og scenarie 2 med 18 bassiner passivstyret. På anden aksel kan der ses volumen for hvert af de 18 bassiner.

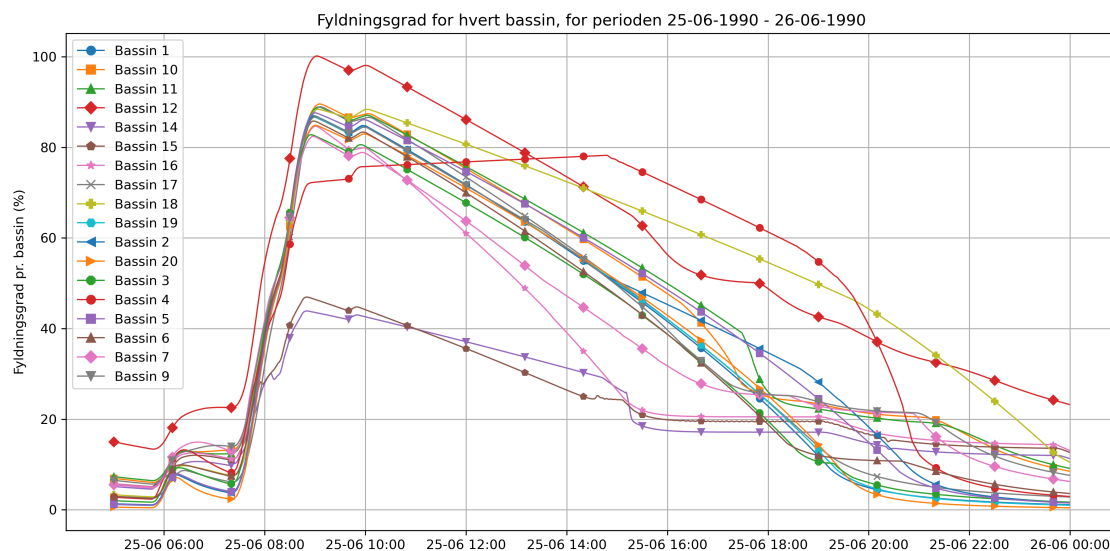


Figur A.8. Sammen ligning af opmagasineret volumen for scenarie 1 med et bassin og scenarie 2 med 18 bassiner passivstyret. På anden aksel kan der ses volumen for hvert af de 18 bassiner.

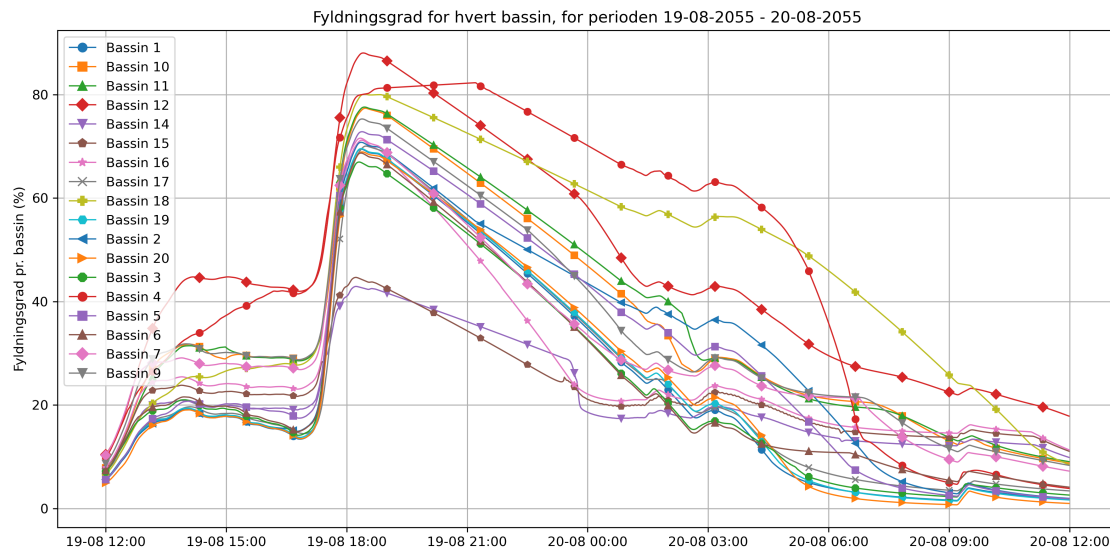


Figur A.9. Sammen ligning af opmagasineret volumen for scenarie 1 med et bassin og scenarie 2 med 18 bassiner passivstyret. På anden akse kan der ses volumen for hvert af de 18 bassiner.

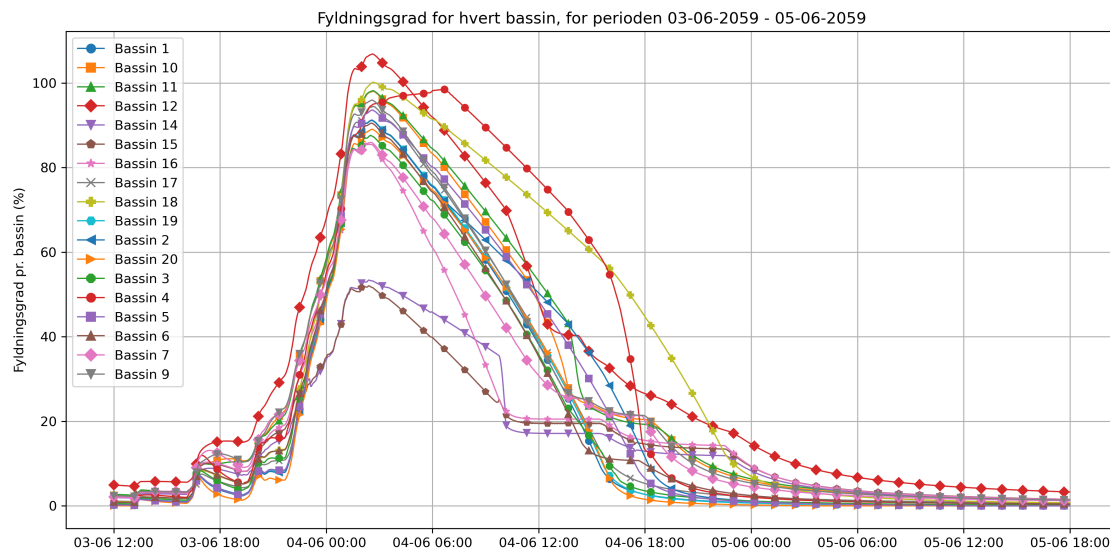
A.4 Fyldningsgrad af bassiner



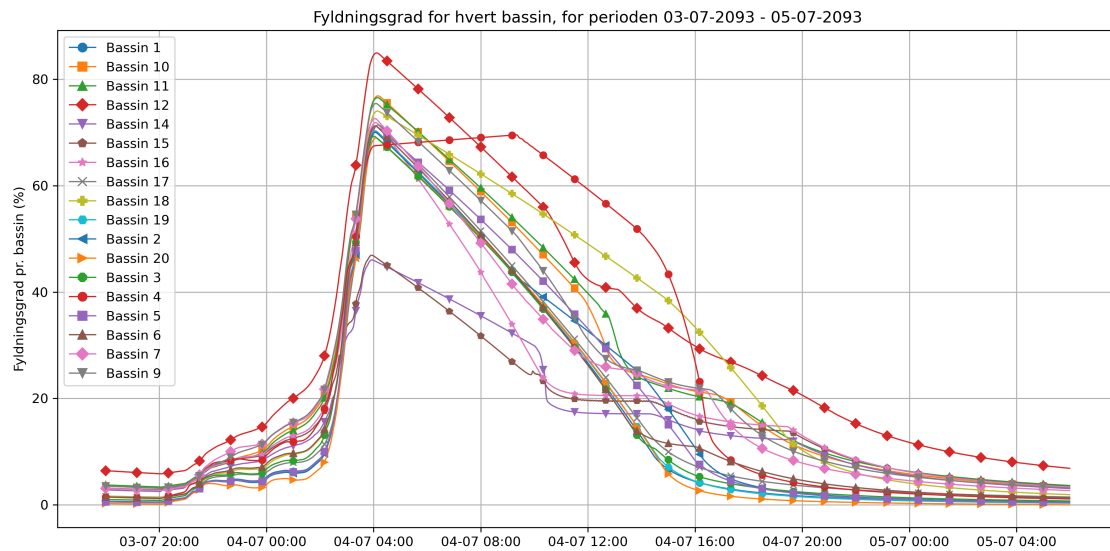
Figur A.10. Procent vist hvor fyldt hvert bassin er under en stor regnhændelse, for Scenarie 2.



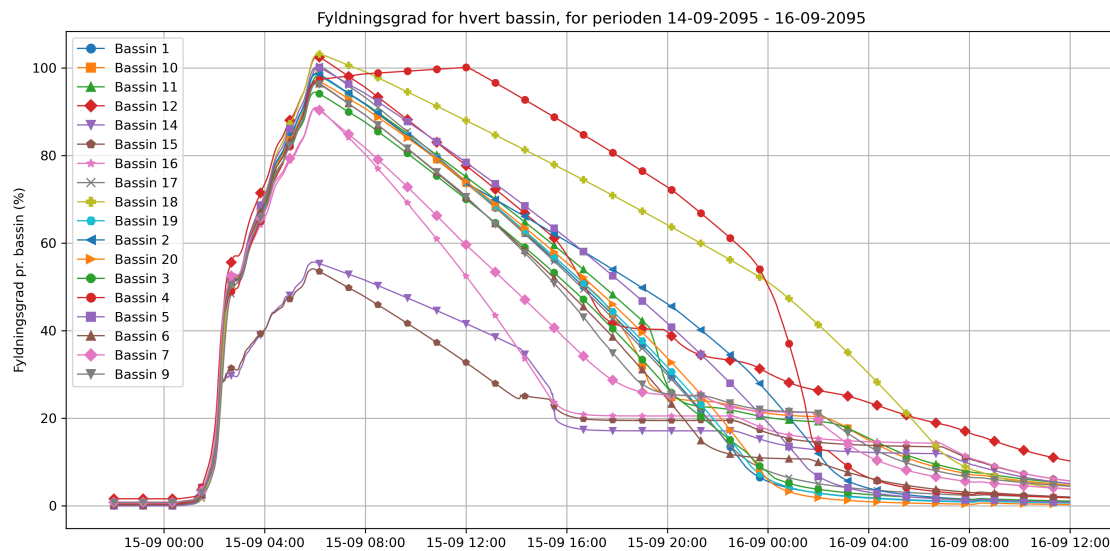
Figur A.11. Procent vist hvor fyldt hvert bassin er under en stor regnhændelse, for Scenarie 2.



Figur A.12. Procent vist hvor fyldt hvert bassin er under en stor regnhændelse, for Scenarie 2.

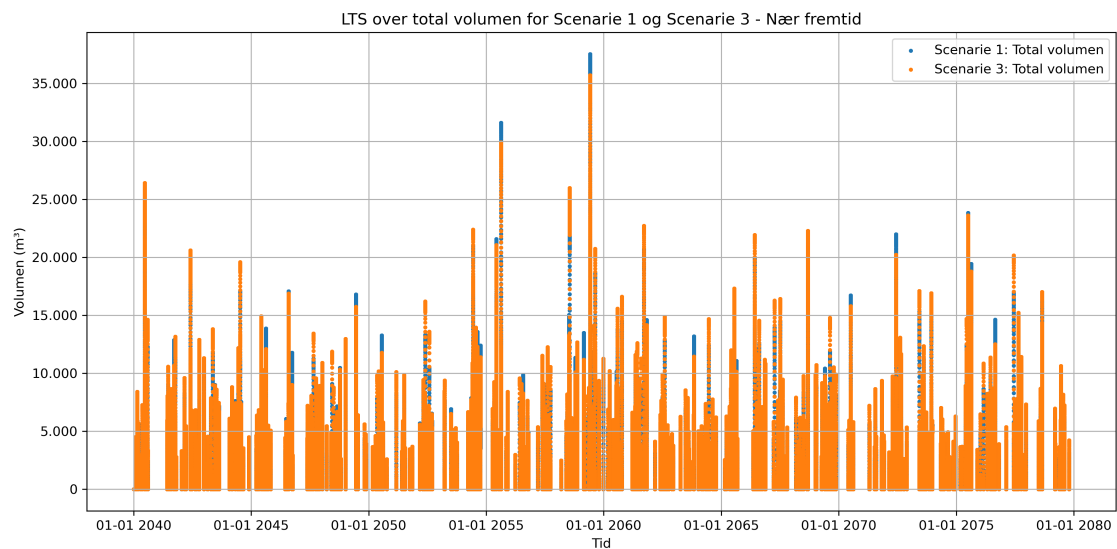


Figur A.13. Procent vist hvor fyldt hvert bassin er under en stor regnhændelse, for Scenarie 2.

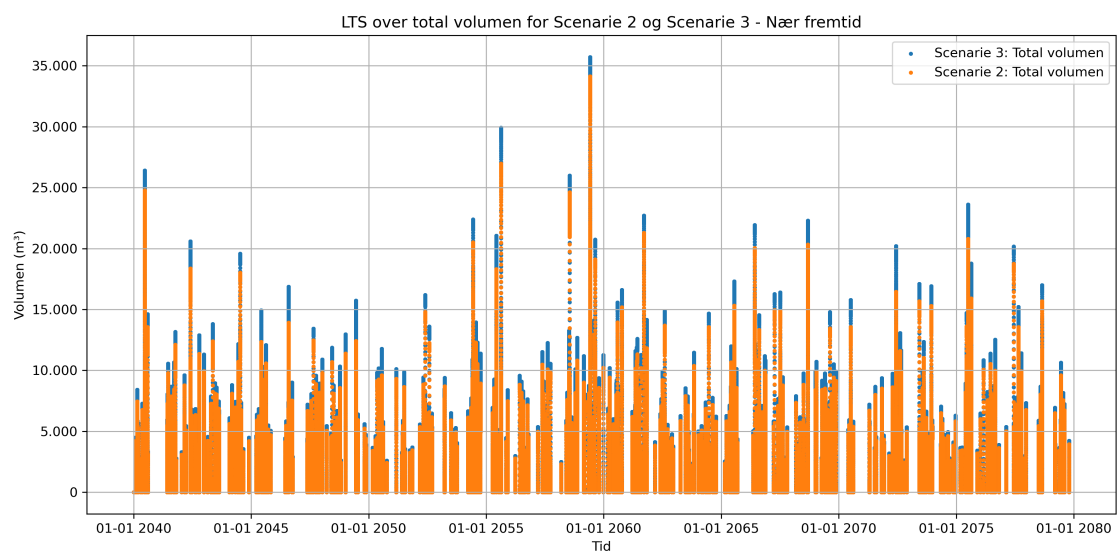


Figur A.14. Procent vist hvor fyldt hvert bassin er under en stor regnhændelse, for Scenarie 2.

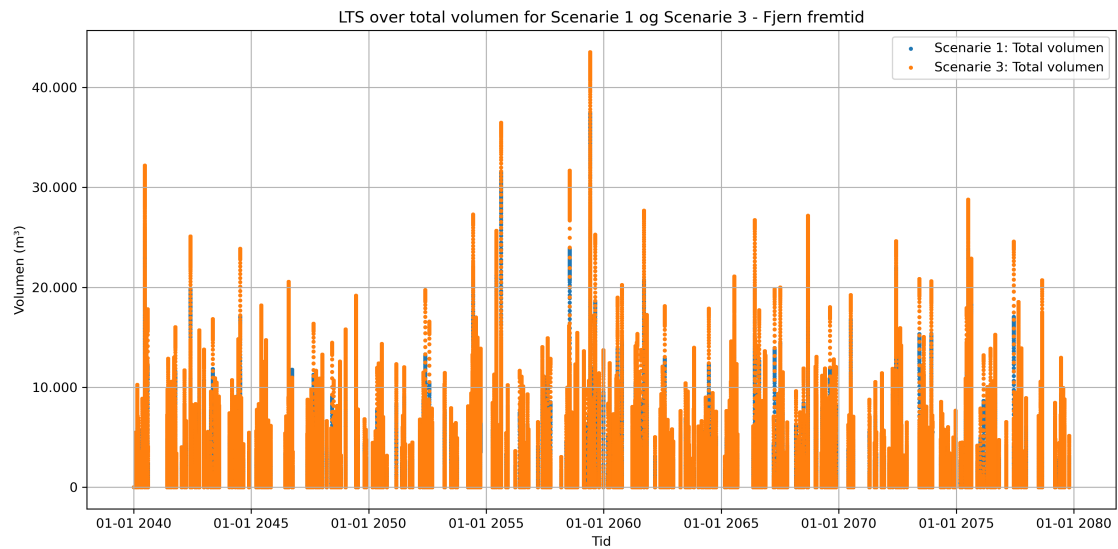
Scenarie 3 B



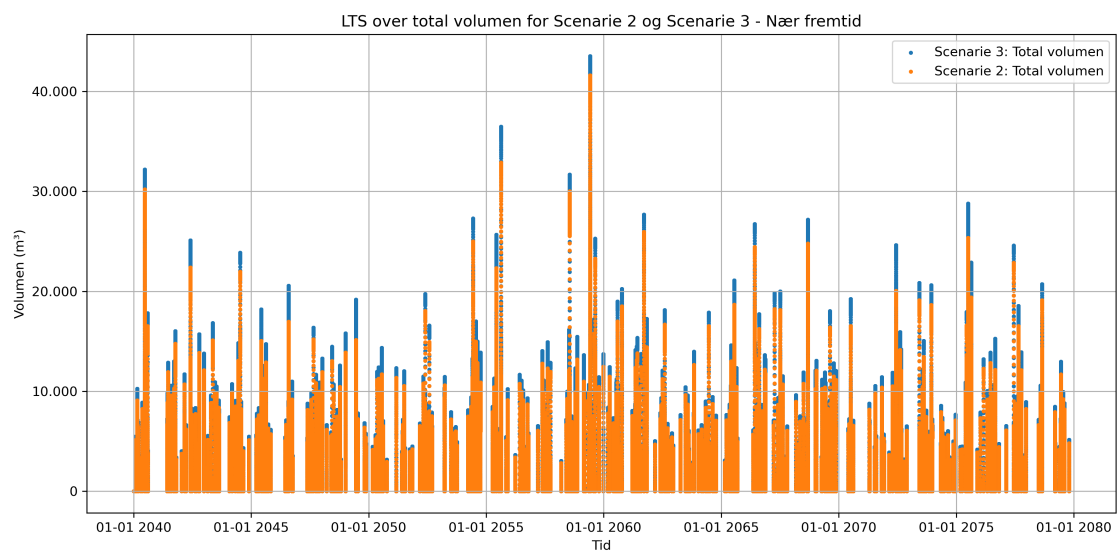
Figur B.1. Der er kørt LTS på Scenarie 3 for Nutid fremtids regn, hvor det totale volumen for alle bassinerne er fundet, det er sammenlinget med Scenarie 1 .



Figur B.2. Der er kørt LTS på Scenarie 3 for Nutid fremtids regn, hvor det totale volumen for alle bassinerne er fundet, det er sammenlinget med Scenarie 2.

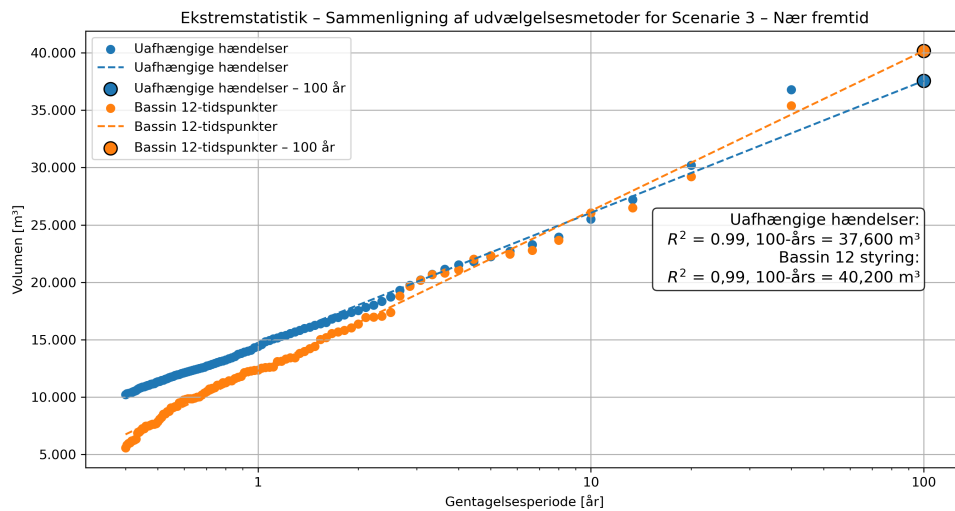


Figur B.3. Der er kørt LTS på Scenarie 3 for Nutid fremtids regn, hvor det totale volumen for alle bassinerne er fundet, det er sammenlinget med Scenarie 1.

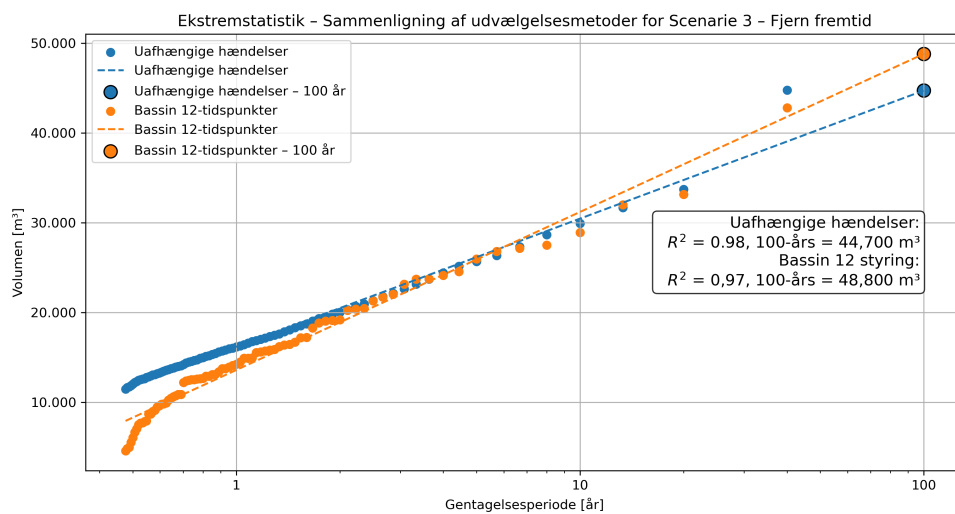


Figur B.4. Der er kørt LTS på Scenarie 3 for Nutid fremtids regn, hvor det totale volumen for alle bassinerne er fundet, det er sammenlinget med Scenarie 2.

B.1 Ekstrem statistik

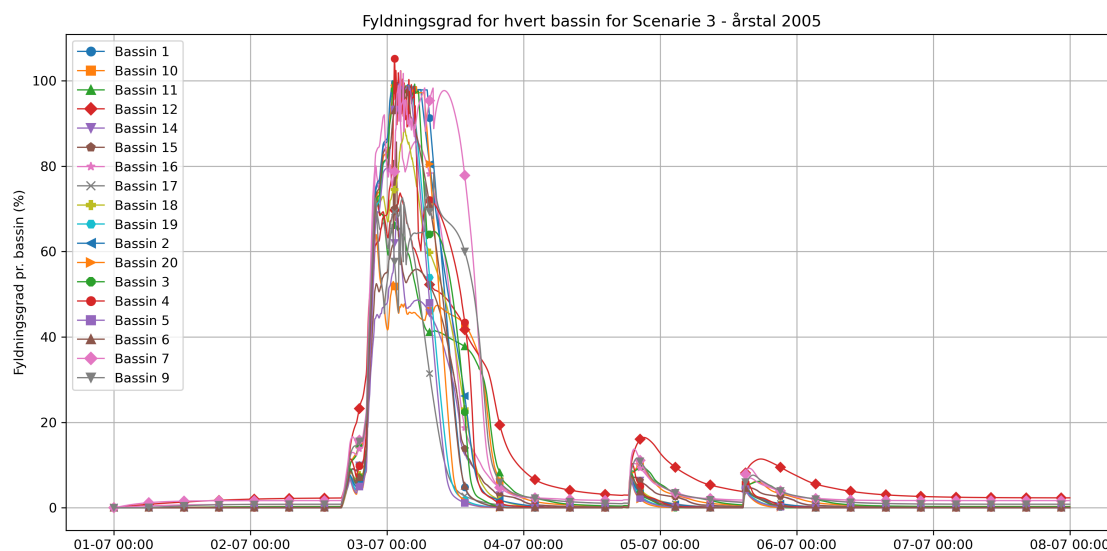


Figur B.5. De 100 største regnhændelser i den nære fremtid med en fremskrivning til en 100-års hændelse, med en logaritmisk-tendenslinje. R^2 -værdien er angivet på grafen, sammen med det beregnede volumen for en 100-års hændelse.

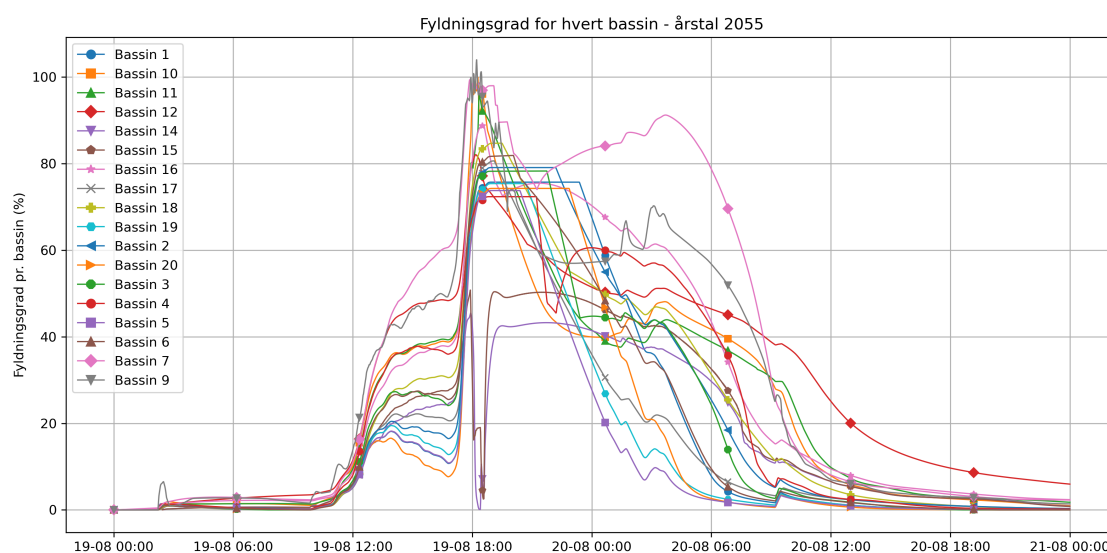


Figur B.6. De 100 største regnhændelser i den nære fremtid med en fremskrivning til en 100-års hændelse, med en logaritmisk-tendenslinje. R^2 -værdien er angivet på grafen, sammen med det beregnede volumen for en 100-års hændelse.

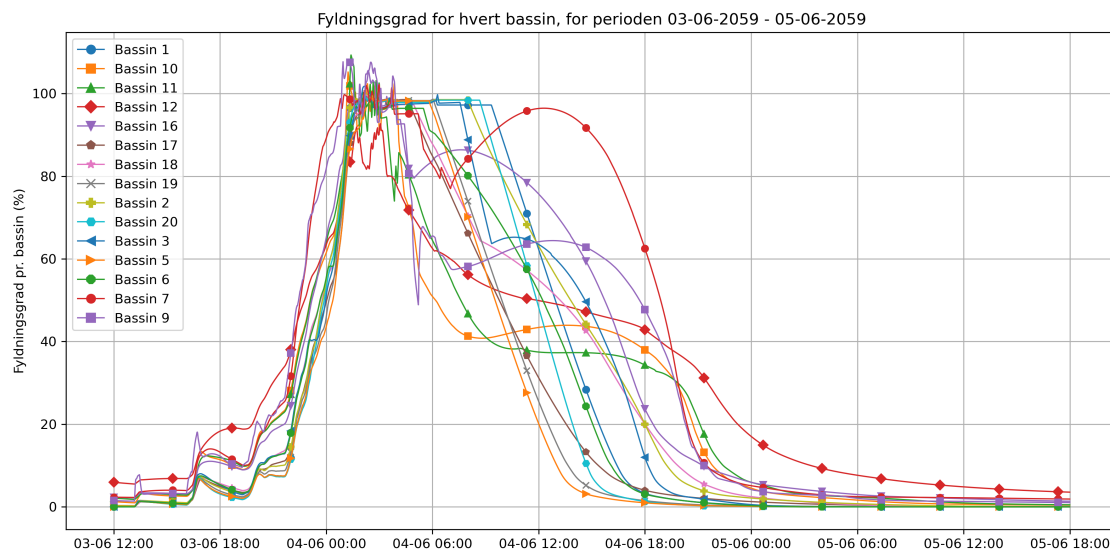
B.2 Fyldningsgrad for hvert bassin



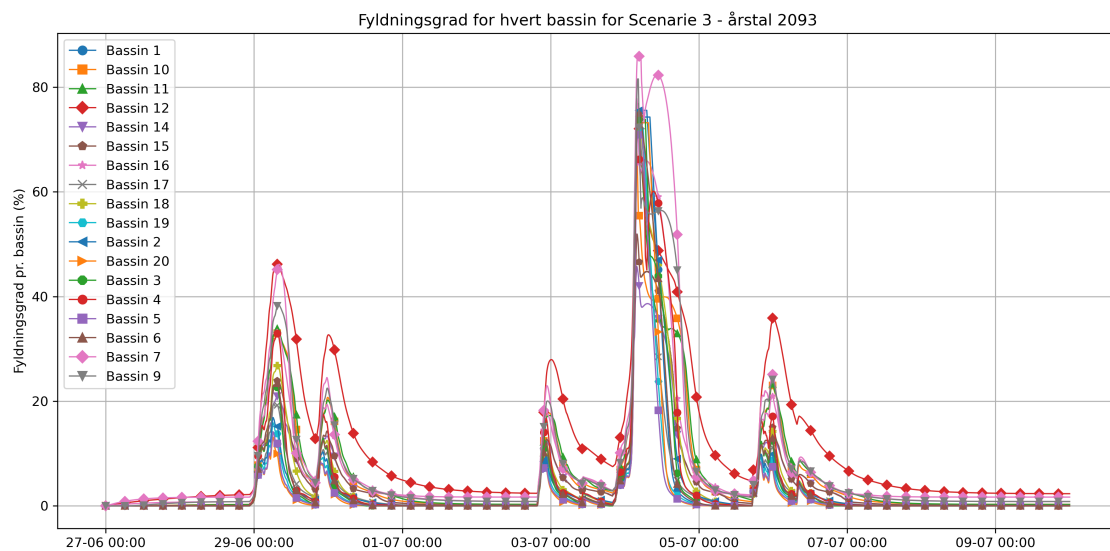
Figur B.7. Fyldningsgraden af hvert bassin, under en ekstrem hændelse.



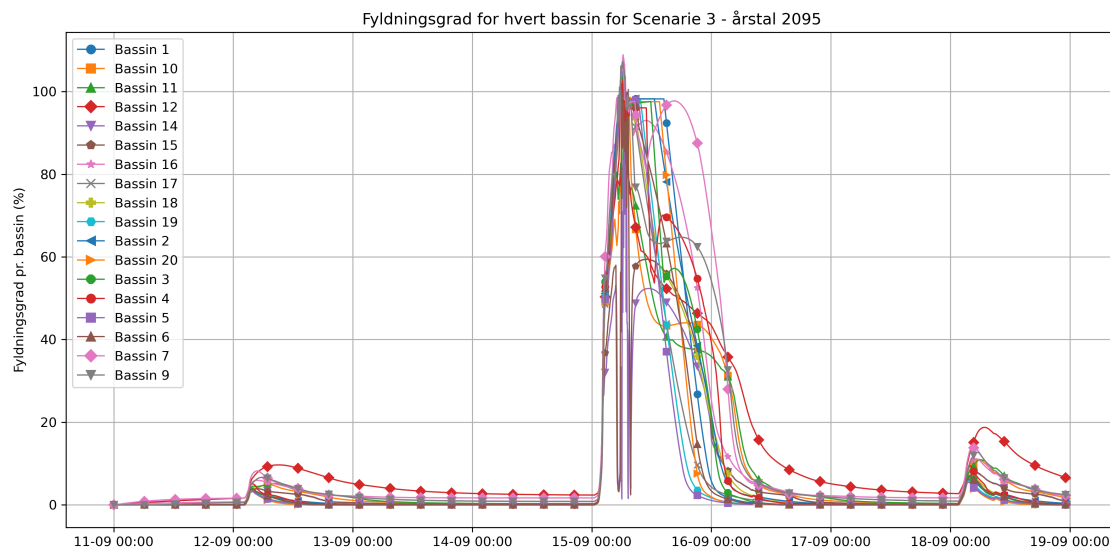
Figur B.8. Fyldningsgraden af hvert bassin, under en ekstrem hændelse.



Figur B.9. Fyldningsgraden af hvert bassin, under en ekstrem hændelse.



Figur B.10. Fyldningsgraden af hvert bassin, under en ekstrem hændelse.

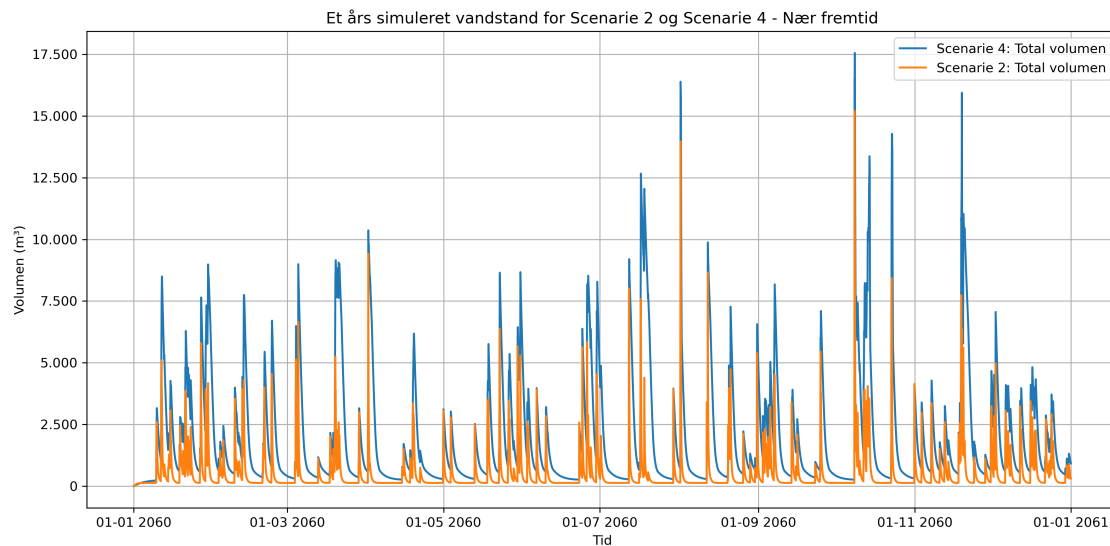


Figur B.11. Fyldningsgraden af hvert bassin, under en ekstrem hændelse.

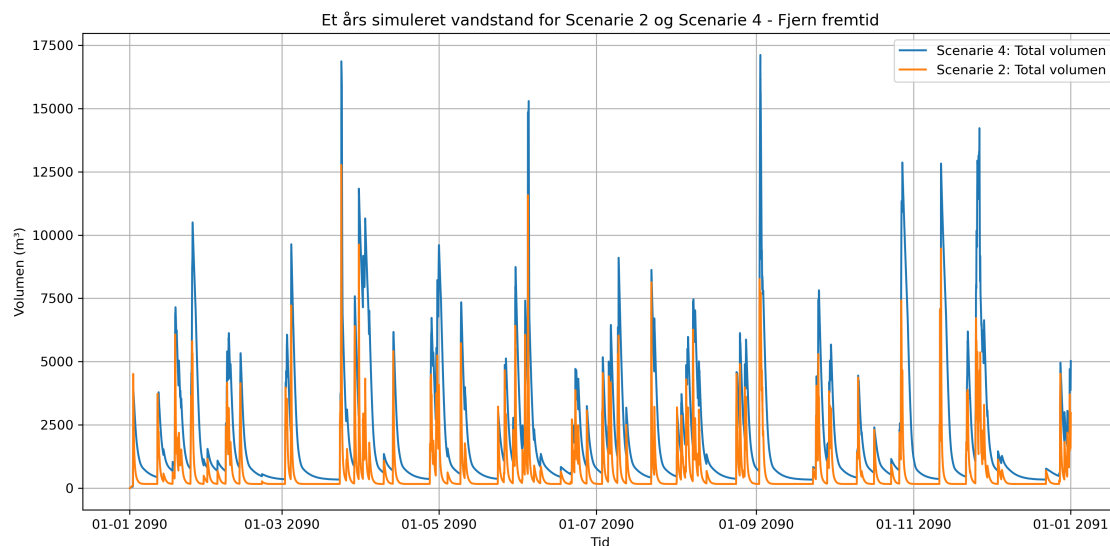
Scenarie 4



C.1 Volumen for et år, for Scenarie 2 og 4

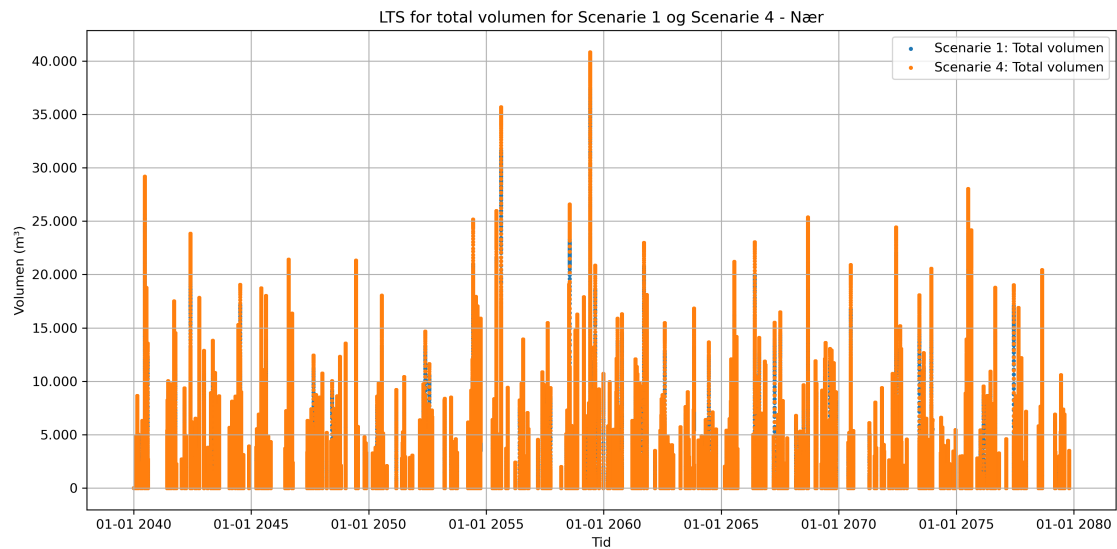


Figur C.1. Summen af volumen der bliver opmagasineret, for Scenarie 2 og 4, hvor der maksimalt kan være et volumen på 37.200 m³ før der sker overløb .

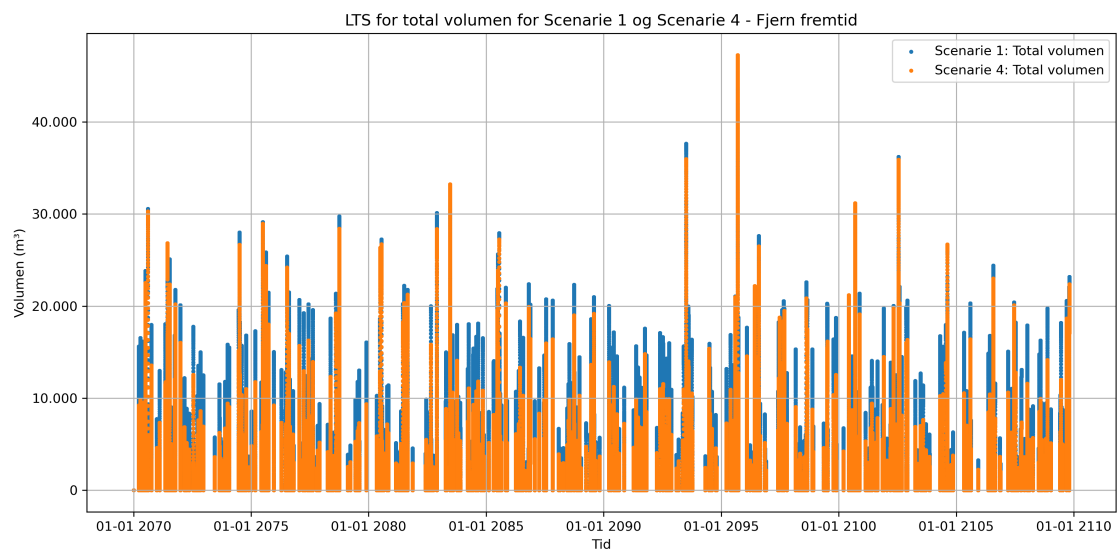


Figur C.2. Summen af volumen der bliver opmagasineret, for Scenarie 2 og 4, hvor der maksimalt kan være et volumen på 44.700 m³ før der sker overløb [Egenproduktion].

C.2 LTS for Scenarie 1 og 4

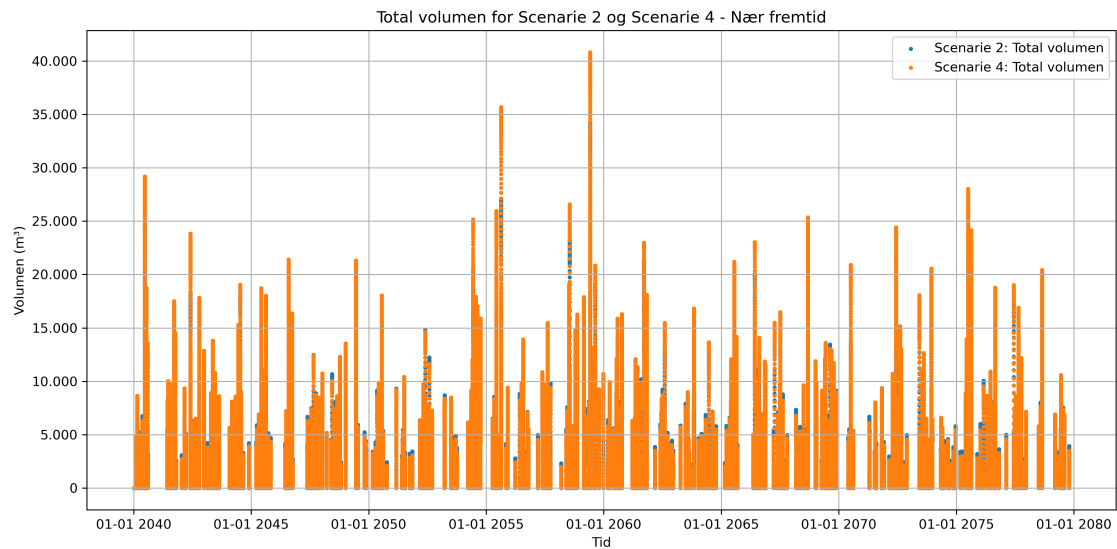


Figur C.3. Summen af volumen der bliver opmagasineret, for Scenarie 1 og 4, hvor der maksimalt kan være et volumen på 37.200 m³ før der sker overløb.

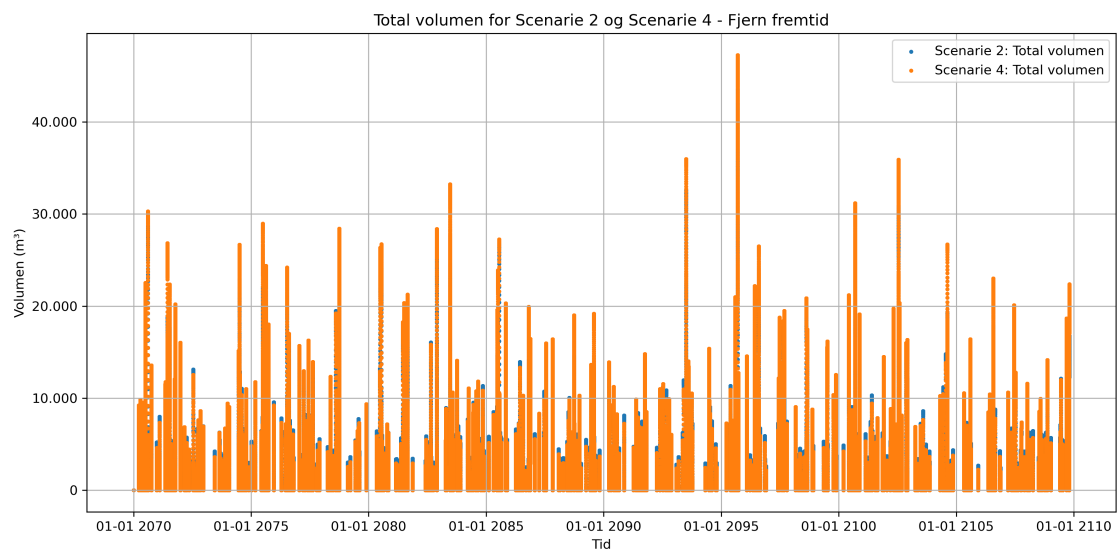


Figur C.4. Summen af volumen der bliver opmagasineret, for Scenarie 1 og 4, hvor der maksimalt kan være et volumen på 44.700 m³ før der sker overløb.

C.3 LTS for Scenarie 2 og 4

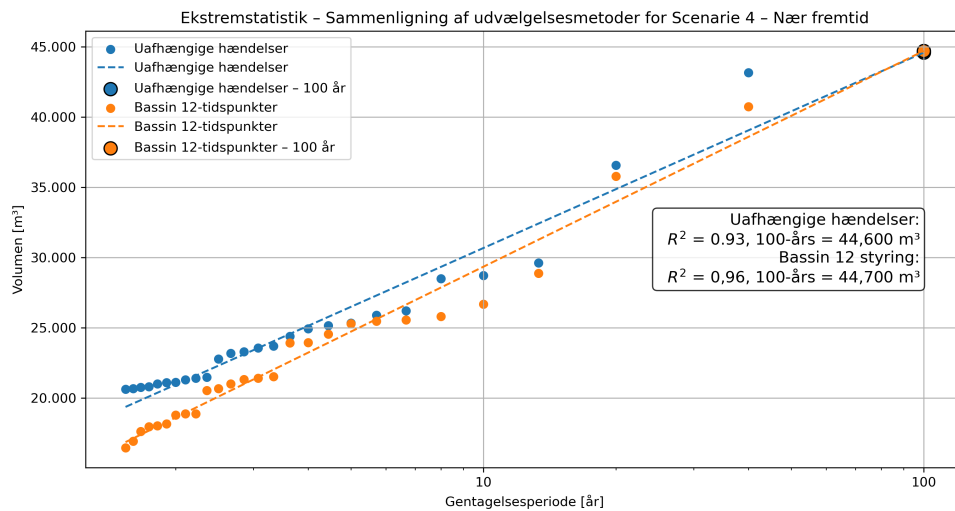


Figur C.5. Summen af volumen der bliver opmagasineret, for Scenarie 2 og 4, hvor der maksimalt kan være et volumen på 37.200 m³ før der sker overløb.

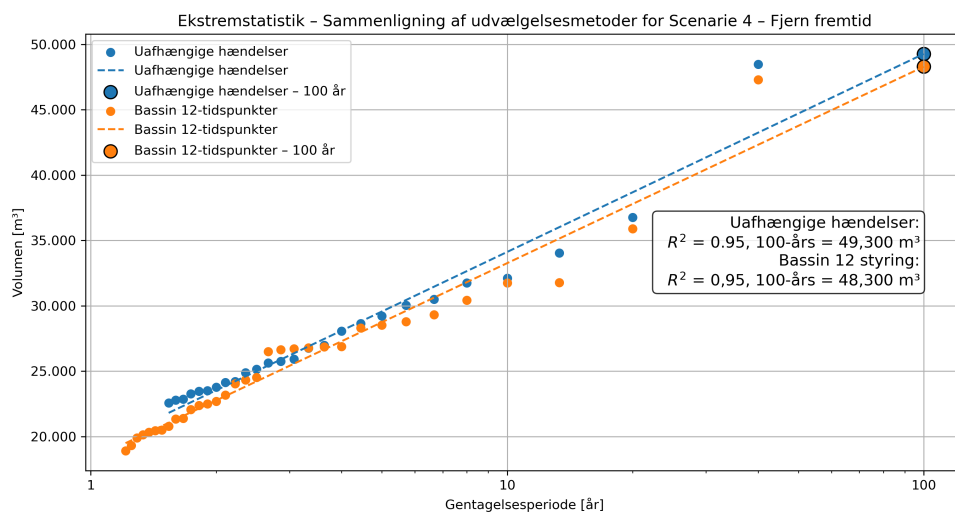


Figur C.6. Summen af volumen der bliver opmagasineret, for Scenarie 2 og 4, hvor der maksimalt kan være et volumen på 44.700 m³ før der sker overløb.

C.4 Ekstrem statistik

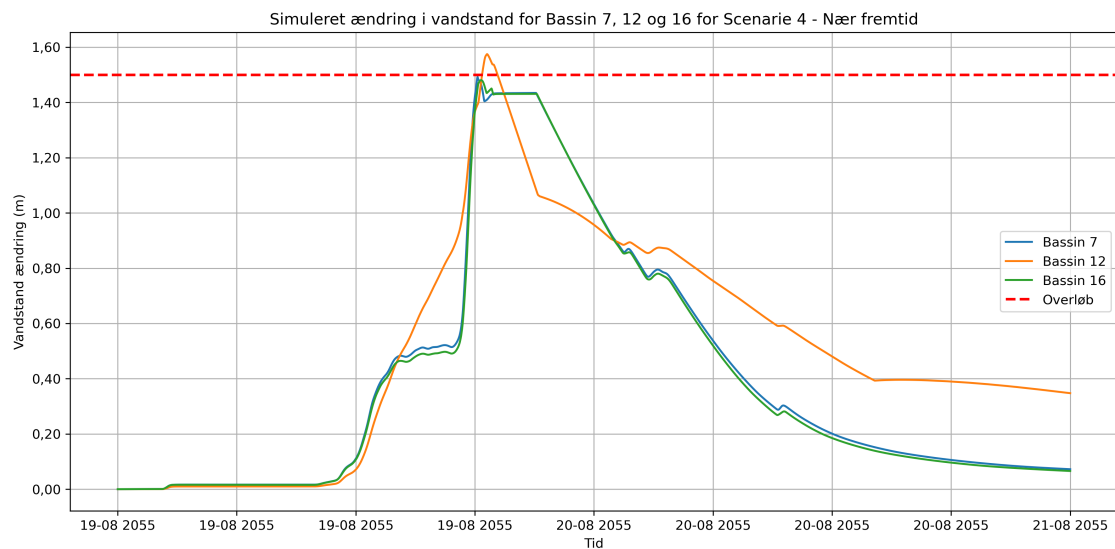


Figur C.7. De 100 største regnhændelser i den nære fremtid med en fremskrivning til en 26-års hændelse, med en logaritmisk-tendenslinje. R^2 -værdien er angivet på grafen, sammen med det beregnede volumen for en 100-års hændelse.

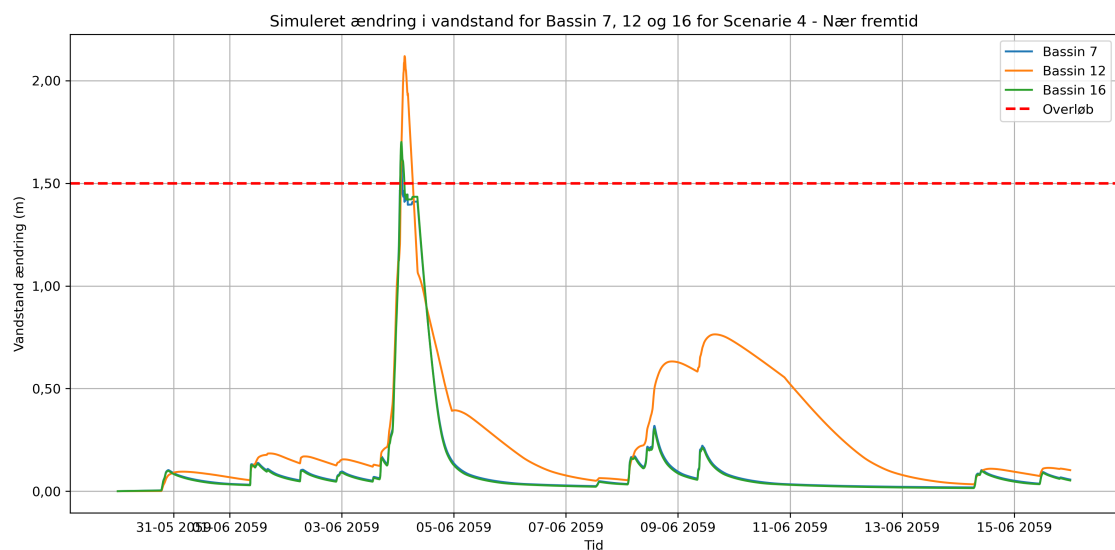


Figur C.8. De 33 største regnhændelser i den nære fremtid med en fremskrivning til en 100-års hændelse, med en logaritmisk-tendenslinje. R^2 -værdien er angivet på grafen, sammen med det beregnede volumen for en 100-års hændelse.

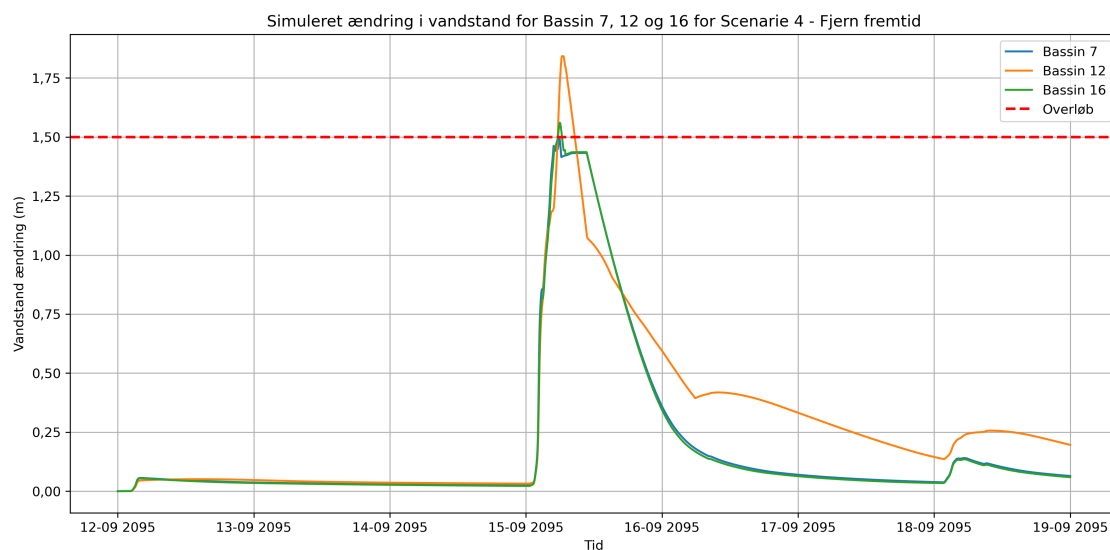
C.5 Vandstanden i bassinerne under en stor hændelse



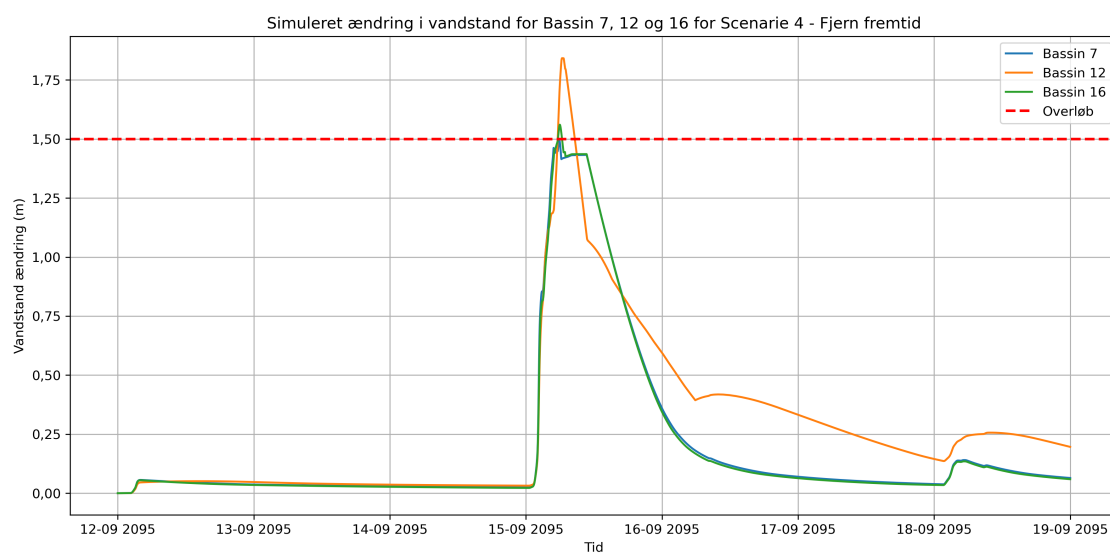
Figur C.9. Vandstanden i Bassin 7, 12 og 16, under en stor regn hændelse.



Figur C.10. Vandstanden i Bassin 7, 12 og 16, under en stor regn hændelse.



Figur C.11. Vandstanden i Bassin 7, 12 og 16, under en stor regn hændelse.



Figur C.12. Vandstanden i Bassin 7, 12 og 16, under en stor regn hændelse.