DANVA

MONITERING AF OVERFLADE-AFSTRØMNING FRA GRØNNE OMRÅDER II (MOTO)

DANVA VUDP PROJEKTRAPPORT

MONITERING AF OVERFLADEAFSTRØMNING FRA GRØNNE OMRÅDER TO (MOTO) DANVA VUDP PROJEKTRAPPORT

DATO: 11. august 2022

Projekt ID:
4297.2018

Udgiver:
Dansk Vand og Spildevandsforening (DANVA)

Udarbejdet af:
Kristoffer Tønder Nielsen, Aarhus Vand
Lene Bassø Duus, Aarhus Vand
Michael Robdrup Rasmussen, Aalborg Universitet
Søren Thorndahl, Aalborg Universitet
Per Moldrup, Aalborg Universitet
Rikke Smetana Svenningsen, EnviDan
Mads Uggerby, EnviDan
Søren Højmark Rasmussen, EnviDan

Finansiering:
Monitering af Overfladeafstrømning fra grønne områder TO (MOTO), er støttet af VUDP, Vandsektorens Udviklings- og Demonstrationsprogram

Samarbejdspartnere:
Aarhus Vand A/S
Aalborg Universitet
EnviDan A/S

Kategori (Spildevand, drikkevand eller klimatilpasning):
Spildevands og klimatilpasning

Forord

Denne rapport er udgivet af Dansk Vand og Spildevandsforening (DANVA). Rapporten er skrevet af Aarhus Vand, Aalborg Universitet og EnviDan, som i en årrække har haft et samarbejde omkring udviklingsprojekter vedrørende afstrømning fra byens grønne områder. Arbejdet med MOTO udspringer af søsterprojektet MOGO, som var støttet af Vandsektorens Teknologi- og Udviklingsfond (VTUF). MOTO skulle fortsætte arbejdet med at sætte lys på effekterne af afstrømning fra byens grønne områder.

Rapporten beskriver resultaterne og den metodik der er blevet brugt til henholdsvis at monitere regnafstrømningen fra grønne områder og dernæst, hvordan denne er forsøgt modelleret med kendte regnafstrømnings- og infiltrationsmodeller. Projektgruppen håber, at rapporten vil belyse de udførte undersøgelser for vandsektoren og derved skubbe til en fortsat udvikling omkring, hvordan afstrømning fra byens grønne områder i fremtiden skal indgå i dimensioneringen af de danske afløbssystemer.

Projektet er støttet af Vandsektorens Udviklings- og Demonstrationsprogram (VUDP). Der bringes en stor tak til en række specialestuderende, herunder Camilla Skipper-Jørgensen med projektet *Afstrømning fra ubefæstede arealers påvirkning på afløbssystemet* (2019), Frederik Gade Kjærgaard og Rasmus Skovby Bjørn med projektet *Modellering af afstrømningen fra et ubefæstet areal og påvirkningen heraf på eksisterende afløbssystem* (2021), og Mikkel Solskov Langagergaard med projektet Modellering af afstrømning fra grønne urbane arealer (2022). Projekterne har bidraget til at gøre MOTO endnu mere spændende og indsigtsfuldt, og tilmed betydet at projektet har kunnet tage nogle ekstra vidensskridt med deres hjælp. Endeligt bringes en tak til Ph.D.-studerende Christoffer Bang Andersen for hans hjælp i forbindelse med arbejdet omkring modellerne og vejledning af de ovennævnte specialestuderende.

Indholdsfortegnelse

1	**Sammenfatning**	**4**
2	**English summary**	**5**
3	**Introduktion**	**6**
4	**Projektets betydning for vandbranchen**	**8**
4.1	Marked og/eller anvendelsesmuligheder	8
4.2	Næste skridt	8
4.3	Formidlingsplan	9
5	**Projektet**	**11**
5.1	Formål	11
5.2	Output	12
5.3	Projektresultat 1 – Optimeret sensorpakke	12
5.4	Projektresultat 2 - Vejledning til modellering	28
5.5	Projektresultat 3 - Vidensopbygning i den danske vandsektor	33
5.6	Konklusion	33
6	**Litteraturliste**	**35**

1 Sammenfatning

I de seneste år er der kommet et øget fokus på effekterne af regnafstrømning fra byens grønne og ubefæstede områder. Vandbranchen er blevet opmærksomme på de potentielle konsekvenser denne form for afstrømning kan have på dimensionering og styring af afløbssystemer.

I projektet *Monitering af Overfladeafstrømning fra grønne områder II (MOTO)* arbejder en projektgruppe bestående af Aarhus Vand, Aalborg Universitet og EnviDan på at blive klogere på effekterne af denne form for afstrømning ved hjælp af et intensivt måleprogram. I projektet er der etableret et fuld-skala forsøgsanlæg, som skal måle afstrømning fra et grønt område i Viby-bydelen i Aarhus.

Forsøgsanlægget har vist, at afstrømningen fra dette område sker relativt hyppigt og på en anden måde end det blev set i det tidligere udviklingsprojekt *Monitering af Overfladeafstrømning fra Grønne Områder (MOGO)*. Afstrømningen er mere dynamisk og uden megen forsinkelse i afstrømningen, som det ellers blev observeret i MOGO. Derved har projektgruppen fundet en ny forsøgslokalitet, der giver et nyt perspektiv på, hvordan afstrømning fra grønne områder kan påvirke byens vandkredsløb.

I projektet er det forsøgt at modellere den målte afstrømning og infiltration ved hjælp af forskellige infiltrationsmodeller. Herunder særligt Green-Ampt- og MMS-modellen, der hver især har forskellige tilgange til at modellere infiltrationsforholdene i jorden. Det er lykkedes, særligt med MMS-modellen, at opnå en god tilnærmelse til måledataene. Der er dog, grundet kompleksiteten af infiltrationsprocesserne, ikke muligt på nuværende tidspunkt at opstille et parametersæt til en mere generel anvendelse af modellerne.

Projektet har været en succes. Det er lykkedes at udvikle et mere solidt koncept til fuldskalamålinger af afstrømning fra grønne områder. Forsøgslokaliteten i MOTO har tilmed givet et nyt perspektiv på, hvordan afstrømning fra grønne områder i fremtiden skal inddrages i arbejdet i den danske vandbranche. Derudover har projektgruppen fundet modelleringsmetoder, der potentielt kan finde bredere anvendelse ved yderligere udvikling og forskning på området. Endeligt er MOTO et vigtigt trin i den vidensudbredelse der er sket, og fremadrettet skal ske, i den danske vandsektor, således vandbranchen bliver rustet til at håndtere denne form for afstrømning i fremtiden.

2 English summary

In the recent years the focus on rainfall-runoff from urban pervious areas has increased. The Danish Water Sector has become aware of the potential consequences of this type of runoff when urban drainage systems are designed.

In this project, *Monitoring of Rainfall-Runoff from Urban Pervious Areas II (MOTO)*, a project group consisting of Aarhus Vand, Aalborg University and EnviDan studies the effects of urban pervious rainfall-runoff with an intensive measurement program where a full-scale experimental facility is established to continuously measure rainfall-runoff from a grass covered area in Aarhus, Denmark.

The full-scale experimental facility has shown that rainfall-runoff from the specific location occurs frequently. Additionally, the rainfall-runoff dynamics are rather different than previously measured at another project location in the previous project *Monitoring of Rainfall-Runoff from Urban Pervious Areas (MOGO)*. The rainfall-runoff processes are significantly more dynamic without much retention in the catchment. Therefore, the project location in MOTO adds a whole new perspective on the effects of pervious surface runoff in the urban water cycle.

Several infiltration models have been applied to seek out an existing model capable of modelling the runoff- and infiltration processes. The Green-Ampt and MMS infiltration models has been tested an especially the MMS model has come close to replicating the measured runoff and infiltration data from the project location. However, due to the high complexity of the infiltration processes, it is not possible to assemble a generic set of parameters for broader application outside of the project location.

The project has been successful with a solidly designed experimental facility to make continues in-situ measurements of rainfall-runoff from an urban pervious area. The measurements have added a new perspective on the dynamics of rainfall-runoff from urban pervious areas and how this must be accounted for in the future design of urban drainage systems. The project group has found modelling methods which potentially make the foundations for better design of urban drainage systems in the future. Finally, MOTO is an important step on the knowledge ladder in terms of making the knowledge on urban pervious surface runoff more commonly available in the Danish Water Sector.

3 Introduktion

I Aarhus Vands forsyningsdistrikt observeres der i perioder i dag en forøget afstrømning under og efter regnhændelser. Afstrømningen kan ikke forklares udelukkende ved at se på afstrømningen fra befæstede overflader og indsivning. Afstrømningen må derved også indeholde andre bidrag af uvedkommende vand, herunder afstrømning fra grønne områder som eksempelvis ses på Figur 1. Denne type afstrømning ses som en stadigt større udfordring for afløbssystemerne, særligt i de seneste års regnfulde vintre. Problematikken vil sandsynligvis øges i takt med at klimaforandringerne sætter sit præg på regnmønstrene, og derfor er det vigtigt, at kendskabet til denne type afstrømning udbygges og anvendes i dimensioneringspraksis. Dette er afgørende, således afløbssystemer ikke designes forkert, for at varslingsmodeller ikke bliver misvisende, og for at styring af renseanlæg kan gøres på en godt vidensgrundlag. Herved mindskes risikoen for overbelastning af afløbssystemet, hvorved der vil ske færre overløb og oversvømmelser til gene for borgere og miljø.

Figur 1. Afstrømning fra et grønt område langs en vej, hvor afstrømningen fortsætter et stykke tid efter, at afstrømningen fra de befæstede områder er stoppet.

I projektet *Monitering af Overfladeafstrømning fra Grønne områder II (MOTO)* er der etableret et fuld-skala forsøgsanlæg til realtidsmonitering af jordens vandindhold og overfladeafstrømning fra et grønt område i oplandet til Viby Renseanlæg. Projektet bygger videre på erfaringerne fra det tidligere projekt *Monitering af Overfladeafstrømning fra Grønne Områder (MOGO)*, som var det første skridt i en erkendelse af, at vandbranchen er nødt til at vide mere om fænomenet *afstrømning fra grønne og ubefæstede områder.*

Projektet MOTO er udført i et samarbejde mellem Aarhus Vand, Aalborg Universitet – BUILD og EnviDan. Aalborg Universitet har arbejdet med den teoretiske og analytiske del af de indsamlede data. EnviDan har projekteret forsøgsanlægget samt indarbejdet idéer og løsninger omkring overfladeafstrømning fra grønne områder i den måde, der tænkes på, når der løses planlægningsopgaver vedrørende afløbssystemer. Aarhus Vand har stået for projektledelsen og er den grundlæggende part, hvor den nye viden skal forankres, fordi den viden vil få betydning for deres afløbssystem og størrelsen heraf. Endeligt foregår der løbende et arbejde hos Aarhus Vand med, hvordan afstrømning fra grønne områder kan inddrages på en mere standardiseret måde.

4 Projektets betydning for vandbranchen

Afstrømning fra grønne ubefæstede områder i byerne kan udgøre et vigtigt bidrag ift. overløb og oversvømmelser, hvorfor det er af stor betydning at medtage dette bidrag i dimensioneringen af afløbssystemer fremadrettet. Emnet har hidtil været relativt uudforsket, og der er behov for mere viden og i sidste ende vejledninger omkring dette for at sikre en fælles forståelse for problematikken i vandbranchen.

4.1 Marked og/eller anvendelsesmuligheder

I MOTO monitoreres de hydrologiske processer i et grønt ubefæstet område i byen. MOTO er en overbygning på MOGO og udvider vandbranchens forståelse for afstrømning fra grønne områder ved at måle den konkrete afstrømning fra en in-situ forsøgsopstilling. Der har de seneste år været et generelt behov i vandbranchen, samt et øget fokus fra Spildevandskomiteen, om at forbedre kendskabet til afstrømningen fra de grønne urbane områder. Forståelsen for denne type afstrømning kan bruges til at forbedre hydrauliske modeller og dimensioneringspraksis og dermed optimere de anlægsinvesteringer, der foretages.

Den grundlæggende udfordring med hydrauliske modeller er at forudsige regnafstrømningen til et givent hydrologisk system og dermed også responsen i afløbssystemet, baseret på oplandets geomorfiske sammensætning. Herunder udgør de grønne og permeable overflader i byen typisk en stor andel af det samlede overfladeareal (40 – 60 %). I dag benyttes der i bedste fald modeller med input fra standardjordtyper set ud fra et globalt perspektiv. I værste fald - og i de fleste tilfælde - benyttes der ikke nogen model til at modellere afstrømningen fra de grønne områder overhovedet.

Der er et massivt forbedringspotentiale i de modeller og den tilgang, der benyttes til modellering af afstrømning fra grønne områder i dag. MOTO bidrager i første omgang til lokal indsigt, men den skabte viden kan på sigt implementeres i hele Danmark såvel som internationalt.

4.2 Næste skridt

Det tidligere projekt MOGO og nu MOTO har begge vist, at hver gang vi finder ud af noget nyt omkring afstrømning fra grønne områder, åbner det også op for flere spørgsmål. I MOGO blev det eksempelvis påvist, at afstrømningen fra forsøgsområdet foregik under overfladen, hvor infiltreret regnvand strømmer horisontalt i den øverste del af jordmatricen for senere igen at strømme ud på overfladen, fordi der opstår fuld vandmætning i jordlaget nedstrøms. De dertil knyttede afstrømningsprofiler var meget langstrakte (mange dages varighed). Med MOTO var udgangspunktet at undersøge, om vi

kunne få bekræftet disse observationer et andet sted. Dette skete ikke, men i stedet har forsøgsområdet i MOTO vist, at afstrømningen foregår på en helt anden måde, nemlig som en meget mere dynamisk og direkte afstrømning på jordoverfladen. Afstrømningen er dog også her styret af den kompakte topjord, som danner en barriere for infiltration til dybere jordlag. På trods af en grovsandet jord, hvorpå man ikke normaltvist ville forvente overfladeafstrømning, ses der afstrømning på både overflade og i topjord på grund af kompakteringen. Kompakteringen stammer fra den brugssål der dannes i topjorden når cyklister og fodgængere færdes over området.

I projektets startfase var den grundlæggende hypotese at overfladesafstrømningsbidrag primært ville ske under kraftig regn, hvor jordens infiltrationskapacitet ville blive opbrugt hurtigt. Denne proces sker også, men der sker i høj grad også afstrømningsbidrag under regn med lavere regnintensiteter, men hvor topjorden er vandmættet pga. regn i den forudgående periode. Derfor er problemstillingen ikke kun relevant under kraftig sommerregn eller skybrud, men i høj grad også i vinter og forårsperioder, hvor jorden er vandmættet.

Derfor er de skabte målingerne foretaget i MOTO vigtig viden om, hvordan en sandet og befærdet jord opfører sig under regnbelastning. Dette kan anvendes som en guideline til andre lignende lokaliteter, hvor der kan være potentiale for overfladeafstrømning fra grønne og ubefæstede arealer. Dog bør det anbefales at der altid laves en undersøgelse af den aktuelle jordtype. En generalisering til dimensioneringspraksis for alle jordtyper er svær, men noget tyder på, at både sandede og lerede arealer i byen kan bidrage signifikant til overfaldeafstrømning og bør derfor ikke negligeres i dimensioneringssammenhæng.

Næste skridt er at fortsætte arbejdet, udviklingen og forskningen indenfor området i nye udviklingsprojekter. Til det formål ansøgte en større projektgruppe, inklusiv partnerne i dette projekt, om midler til et nyt udviklingsprojekt, som skulle dække et større geografisk område med en større diversitet i overflade- og jordtype. På baggrund af dette blev MUDP-udviklingsprojektet *Varsling, modellering og kvantificering af situationsafhængig afstrømning (VandKant)* født. VandKant har til formål fortsat at undersøge de relativt ukendte konsekvenser af afstrømning fra byens grønne områder og udbrede denne viden til flere forsyninger og virksomheder rundt omkring i landet.

4.3 Formidlingsplan

Der var oprindeligt planlagt en række formidlingsaktiviteter både indenfor og efter projektperioden som vist på Figur 2. Formidlingsaktiviteter bestod af henholdsvis mundtlige og skriftlige indlæg ved konferencer og fagblade. Derudover var det også ønsket, at arbejdet i MOTO i sidste ende skulle resultere i en peer-reviewet artikel til et videnskabeligt tidsskrift og give input til udarbejdelsen af en vejledning om afstrømning fra grønne områder under Spildevandskomitéen.

Det er i vid udstrækning lykkedes at leve op til den oprindelige formidlingsplan med mundtlige indlæg på hhv. Dansk Vand konferencen og ved et EVA-arrangement, hvortil der også er skrevet en artikel til det tilknyttede fagblad. COVID19-pandemiens indtog i årene 2020 og 2021, har dog været en hæmsko for særligt de mundtlige formidlings-aktiviteter i selvsamme periode. Projektgruppen fik blandt andet optaget et abstract med poster præsentation til IWA 2020 i København, som dog senere blev udskudt til 2022.

Det er stadig forventningen, at de formidlingsaktiviteter, som oprindeligt var planlagt til at foregå efter projektet afslutning, stadig er relevante. Derfor forventes der fortsat deltagelse med det indsendte abstract ved IWA 2022, resultaterne fra MOTO vil, så vidt muligt, indgå i udarbejdelsen af en peer-reviewet artikel og slutteligt, vil resultaterne indgå i det videre arbejde i arbejdsgruppen for initial- og randbetingelser under spilde-vandskomitéen, som netop arbejder med, hvordan vandbranchen kan blive bedre til at håndtere afstrømning fra byens grønne områder.

	År 1				**År 2**				**Efter projekt**
	Q1	**Q2**	**Q3**	**Q4**	**Q1**	**Q2**	**Q3**	**Q4**	
Formidlingsplan									
Mundtligt indlæg på Dansk Vand konference 2018 og 2019									
Mundtligt indlæg på NORDIWA 2019 (Estimeret tidspunkt)									
Mundtligt indlæg ved EVA-arrangementer (Estimeret tidspunkt)									
Artikler til EVA-bladet									
IWA 2020 i København									
Peer-reviewed artikel									
Input til udarbejdelse af vejledninger under Spildevandskomiteen									
Input fra og formidling til følgegruppen	WS1			WS3				WS5	

Figur 2. Oprindelig formidlingsplan for projektet.

5 Projektet

5.1 Formål

Formålet med MOTO er at undersøge effekterne af afstrømning fra byens grønne områder på afløbssystemet. MOTO skal give et indblik i de bagvedliggende hydrologiske processer, således at vandsektoren fremadrettet bliver bedre til at modellere, varsle og forstå konsekvenserne af denne type afstrømning. Dette sker igennem et omfattende måleprogram, hvor sammenhængen mellem afstrømningen fra et grønt område og jordens vandindhold undersøges. MOTO skal hermed bidrage til, at der kan udvikles nye standarder for, hvordan vandsektoren kan medtage afstrømning fra grønne områder, når afløbssystemer dimensioneres.

MOTO tager sit afsæt helt tilbage i 2015, hvor projektet MOGO, støttet af Vandsektoren Teknologi- og Udviklingsfond (VTUF), startede med en mission om at blive bedre til at forstå, kvantificere og modellere afstrømning fra byens grønne områder. MOGO viste, at afstrømningen fra de grønne områder i udpræget grad foregik på en måde, som var uden for rammen af den daværende forståelse af denne type afstrømning i det urbane vandkredsløb [4,5]. De afstrømmende vandmængder var tilmed så store, at effekterne af disse på stor skala kan have store konsekvenser for vores afløbssystemer og klimaanlæg i fremtiden. En af de helt essentielle overraskelser i MOGO var, at afstrømningen fra den udpegede forsøgslokalitet forgik under overfladen, for senere at blive presset op til overfladen igen. Såkaldt overfladenær afstrømning. Afstrømningen var meget langstrakt og kunne bidrage med et potentielt højt afstrømningsvolumen over mange dage, men ikke nødvendigvis høje flowværdier, som kan påvirke ledningskapaciteten i afløbssystemet nævneværdigt. Resultaterne ændrede opfattelse af dynamikken i afstrømningen fra grønne områder. Derfor var det tydeligt, at MOGO kun tog det første skridt på vejen til et fuldstændigt billede af afstrømningsdynamikken

MOTO blev derved sat i søen med støtte fra Vandsektorens Udviklings- og Demonstrationsprogram (VUDP) i et fortsat partnerskab mellem Aarhus Vand, Aalborg Universitet og EnviDan. Projektet skulle følge op på MOGO og fortsætte arbejdet med at kortlægge omfanget og betydningen af afstrømning fra byens grønne områder. MOTO har derfor også et overordnet formål om at eftervise, at observationerne fra MOGO kan bekræftes af observationer andre steder i Aarhus Vands forsyningsdistrikt. Altså – *er overfladeafstrømningen fra de grønne områder målbar, og opfører den sig ligesom den målte afstrømning fra MOGO*?

5.2 Output

Projektgruppen gik fra projektets start ind til opgaven med en række forventninger til projektets output, herunder:

1. en optimeret sensorpakke til monitering af afstrømning fra grønne områder
2. input til en ny vejledning til modellering af afstrømning fra grønne områder
3. vidensopbygning i den danske vandsektor om afstrømning fra grønne områder

Resultaterne tilknyttet til disse output, præsenteres i de følgende afsnit 5.3 til 5.5.

5.3 Projektresultat 1 – Optimeret sensorpakke

Erfaringerne fra MOGO blev brugt til udviklingen af en ny fuldskala forsøgsopstilling til monitering af overfladeafstrømningen fra et grønt område i byen. Nærmere bestemt blev forsøgsanlægget etableret i Viby-bydelen i Aarhus, mens der i det tilstødende opland blev målt på jordens fugtighed i udvalgte punkter. På Figur 3 ses et oversigtskort over forsøgsanlægget, som anvender mange af de principper og erfaringer, der blev tillært under det tidligere udviklingsprojekt MOGO.

På Figur 3 ses det, at det grønne område, hvorfra der måles overfladeafstrømning er afgrænset af en kantsten og et linjedræn. Kantstenen, som også ses på Figur 4, har til formål at sørge for, at de omkringliggende befæstede områder ikke bidrager med afstrømning ind på det grønne områder, fordi dette kan forurene målingen af overfladeafstrømningen fra det grønne område.

I bunden af bakken er der anlagt et linjedræn (se Figur 4), som skal opsamle det overfladeafstrømmende regnvand. Såfremt der opstår overfladeafstrømning ved regnvejr, ledes vandet gennem rør igennem et sandfang for til sidst at strømme igennem en specialdesignet flowmålerbrønd som vist på billederne i Figur 5. Flowmåleren består af et vippekarsprincip, som det også kendes fra regnmålere, blot i større skala, og er i projektet udviklet af Aalborg Universitet. Vippekarsmåleren opsamler den afstrømmende vandmængde i små kar, og når et kar er fyldt, vil dette få vippekaret til at vippe. Hver gang vippekaret vipper repræsenterer dette et vandvolumen, og derved kan det afstrømmende vandvolumen kvantificeres ved at tælle antallet af vip.

Vandindholdet måles samtidigt i oplandets jord med to vandindholdsmålere i den angivne sensorklynge på Figur 3. Vandindholdssensorerne er monteret i jorden i hhv. 10 og 20 cm dybde. Vandindholdsmålingerne fortæller hvor mange kubikmeter vand, der er i hver kubikmeter jord. På Figur 6 ses en etableret sensorklynge hvor to vandindholdsmålere er monteret i jorden og forbundet til en datalogger i den nærliggende stålkasse.

Endeligt er der foretaget en stor mængde jordprøver til karakterisering af jordtypen. Jordprøverne viser at jorden er sandet, men meget kompakt. Det er grundlæggende

denne kompakthed, der er begrænsende for jordens evne til at infiltrere regnvand og ikke som udgangspunkt den sandede jordtype.

Forsøgsanlægget er forbedret på en række fronter sammenlignet med det tidligere forsøgsanlæg fra MOGO. Forbedringerne er relativt lavpraktiske, men har betydet at anlægget er nemmere at drifte og kræver mindre vedligehold. Mange af de forbedringer og erfaringer, der er gjort i forbindelse med etableringen af forsøgsanlægget, beskrives i punktform i det følgende og derefter mere detaljeret:

- **Afgrænsning af måleområde med kantsten.** Afgrænsningen med kantsten som ses på Figur 4 falder fint i et med omgivelserne og er en god måde at undgå uønsket regnafstrømning i forsøgsopstillingen.
- **Etablering af linjedræn som kantstenslinjedræn i beton.** Det solide materialevalg til linjedrænet har været meget holdbar over måleperioden, og egner sig godt til befærdede steder. Linjedrænet er oprindelig udviklet til at erstatte kantsten, således at der er en indbygget regnvandsledning i kantsten langs veje.
- **Udvikling af nyt vippekarsflowmålerkoncept.** Projektgruppen har afprøvet er relativt ukendt måde til at måle flow. Projektgruppen udviklede et forstørret vippekar, som kan måle selv meget små flow relativt præcist. Dette er en udfordring med traditionelle flowmålingsmetoder.
- **Udvikling af vandindholdssensorklynge.** I det tidligere udviklingsprojekt MOGO blev det klart, at vandindhold er en af de vigtigste parametre i forhold til at forudsige, om der kan ske afstrømning fra grønne områder i den nærmeste fremtid. Derfor arbejdede projektgruppen ud fra et princip om, at der skulle udvikles en sensorklynge med en central datalogger, hvorfra der skal kunne trækkes flere vandindholdssensorer. Sensorklyngen skulle være robust og det skulle være muligt at følge med i dataene online ved hjælp af en datalogger samtidig med at driften heraf var minimal. Dette var en udfordring med opsætningen fra MOGO, fordi opsætningen derfra krævede meget drift og vedligehold. Dette er lykkedes og uddybes nærmere senere i dette afsnit.

I de følgende afsnit beskrives det, hvordan de enkelte delkomponenter af forsøgsopstillingen er optimeret, således at in-situ målingerne af overfladeafstrømning fra grønne områder har kunnet blive observeret mere optimalt.

Figur 3. Oversigtskort over forsøgsopstillingen i Viby, Aarhus.

Figur 4. Billeder af forsøgsanlægget i Viby, Aarhus. På billederne ses tre punkter med løs jord, hvor der er foretaget en detaljeret jordkarakterisering.

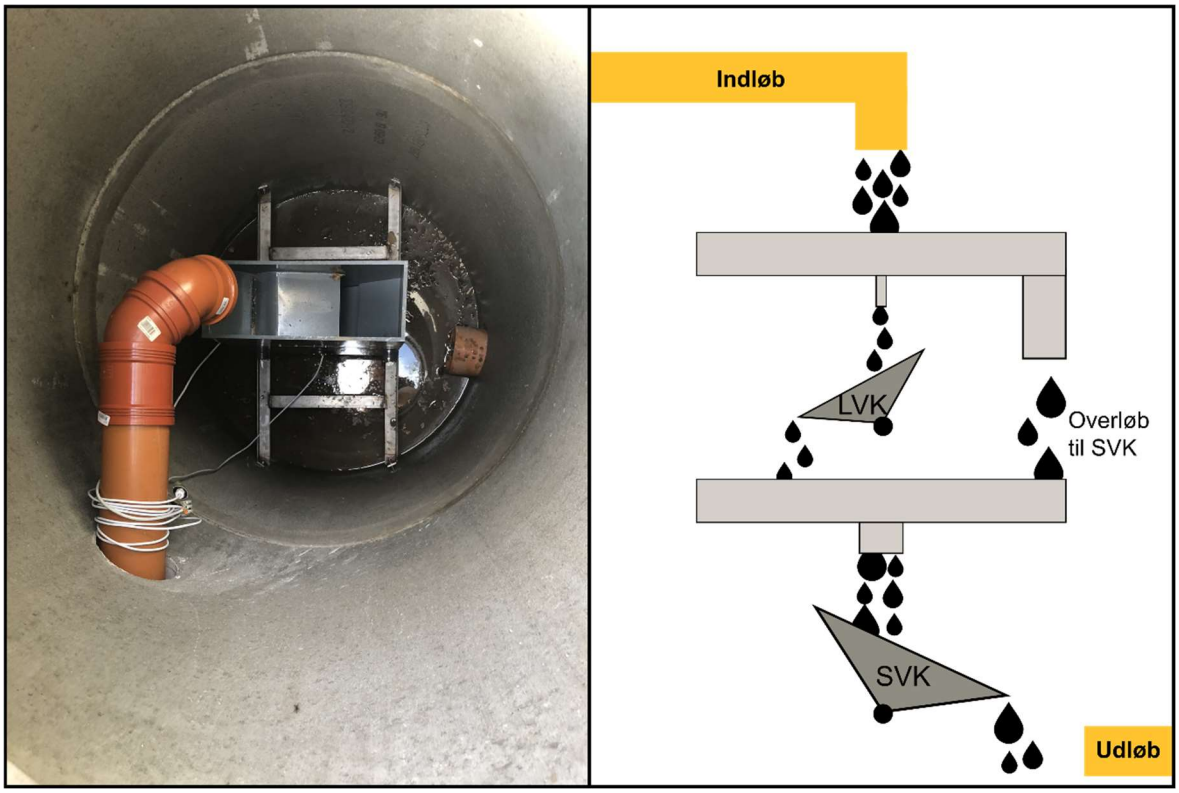
Figur 5. Brønd til monitering af flow fra det grønne område. Flowet måles ved hjælp af en stor vippekarsmåler.

Figur 6. Sensorklynge til måling af vandindhold. Nærværende sensorklynge er placeret på Viby Renseanlæg i Aarhus.

Figur 7. Udtagning af intaktprøver til analyse af jordens porøsitet og kompakthed.

Vippekarsmåler som flowmålerkoncept

Til at måle afstrømningen fra den grønne forsøgslokalitet, blev der udviklet en stor vippekarsmåler. Målekonceptet kendes også fra vippekarsregnmålerne. I dette tilfælde er de kar, der samler regnvandet op dog noget større. Vippekarsmålerprincippet fremstår skitseret på Figur 8, hvor det ses, at der er to vippekar – et lille (LVK) og et stort (SVK). Som det fremgår af Figur 8, så hælder indløbet først afstrømmende vand til det lille vippekar. Kapaciteten i det lille vippekar er dog begrænset. Når kapacitet overskrides, går det afstrømmende vand derved i overløb (se Figur 9) og hældes direkte over til det store vippekar. Det store vippekar modtager både vand fra det lille vippekar og "overløbs"-vand. Der sker derved en dobbeltbestemmelse af noget af afstrømningen. Jo oftere de to kar vipper desto mere afstrømning sker der. Årsagen til, at der bruges to forskellige størrelser vippekar er, at det lille vippekar kan måle de helt små afstrømninger, mens det store vippekar kan håndtere at måle større flows.



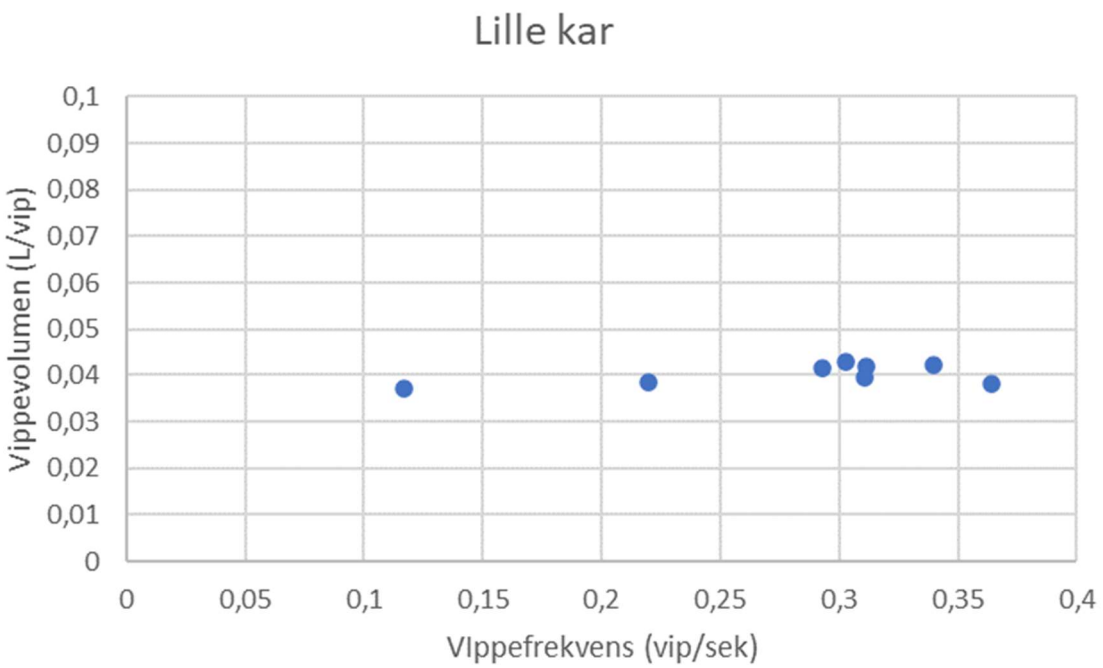
Figur 8. Principtegning over det anvendte vippekarsprincip ude i Viby, Aarhus (LVK = lille vippekar, SVK = stort vippekar).

Vippekarsmåleren er kalibreret ved forskellige flows. Dette blev gjort ved at tilføre vand ved forskellige konstante flows, vandet blev efter gennemløb af vippekarsmåleren opsamlet i en beholder, som efter en periode kunne vejes. Vægten af vandet kunne derved omsættes til et volumen og sammenholdes med antallet af vip under målingen og den tid det havde taget at opsamle vandet.

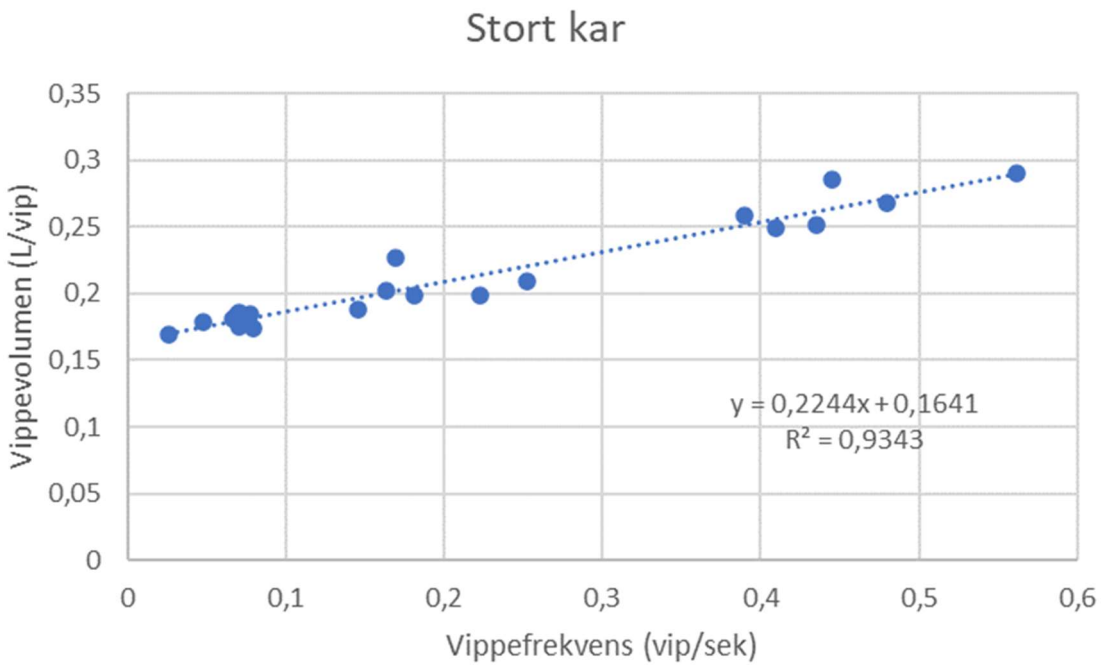
Kalibreringen resulterede i to kalibreringskurver for henholdsvis det lille og store vippekar, som ses af hhv. Figur 11 og Figur 12. Det ses, at det lille vippekar måler et relativt konstant vandvolumen på 0,04 L/vip jævnfør Figur 11. Det store vippekar er derimod afhængig af vippefrekvensen (vip/sek.) som vist på Figur 12. Det vil sige, at karet i det store vippekar når at blive fyldt mere jo større et flow der er gennem vippekarsmåleren. Kalibreringsdataene er overordnet set meget stabile, og vidner om et godt og solidt koncept til måling af små flows.

Figur 9. Eksempel på lille flow i vippekarsmåleren der hældes ned i det lille kar (billede til venstre) og eksempel på stort flow, hvor det lille vippekar ikke kan følge med og derved går i overløb til det store vippekar.

Figur 10. Vandpåfyldning af det store vippekar.



Figur 11. Kalibreringsdata fra det lille vippekar.



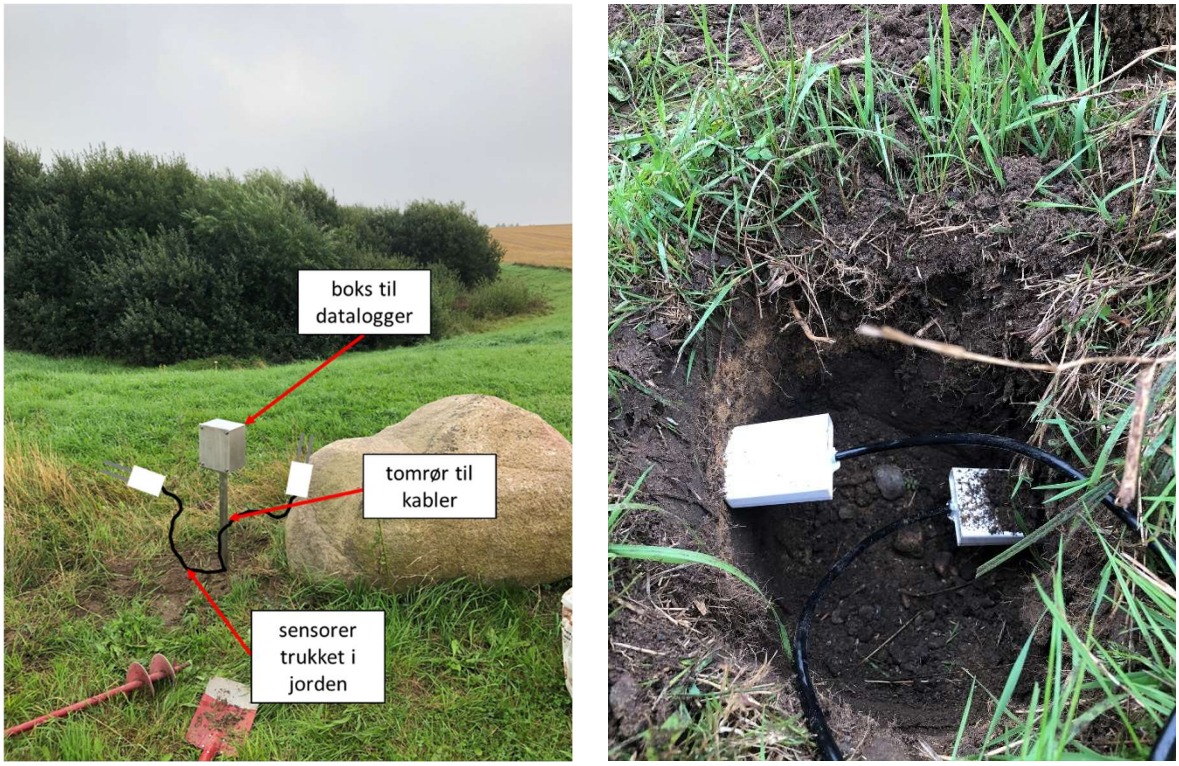
Figur 12. Kalibreringsdata fra det store vippekar.

Forbedret brug af vandindholdssensorer

Som nævnt er der i projektet arbejdet med at skabe en robust sensorklynge til monitering af jordens vandindhold. Vandindholdsmålinger er i dag ikke særlig udbredt i den danske vandsektor, men de kan skabe stor værdi til forståelse af det urbane vandkredsløb. For at opnå en stabil og robust løsning, var der specielt to faktorer, der gjorde sig gældende:

1. Et solidt fysisk setup, hvor vandindholdsmålerne er beskyttet fra omgivelserne, således at hærværk og andre skader undgås, og
2. Mulighed for at følge med i vandindholdsmålingerne i realtid.

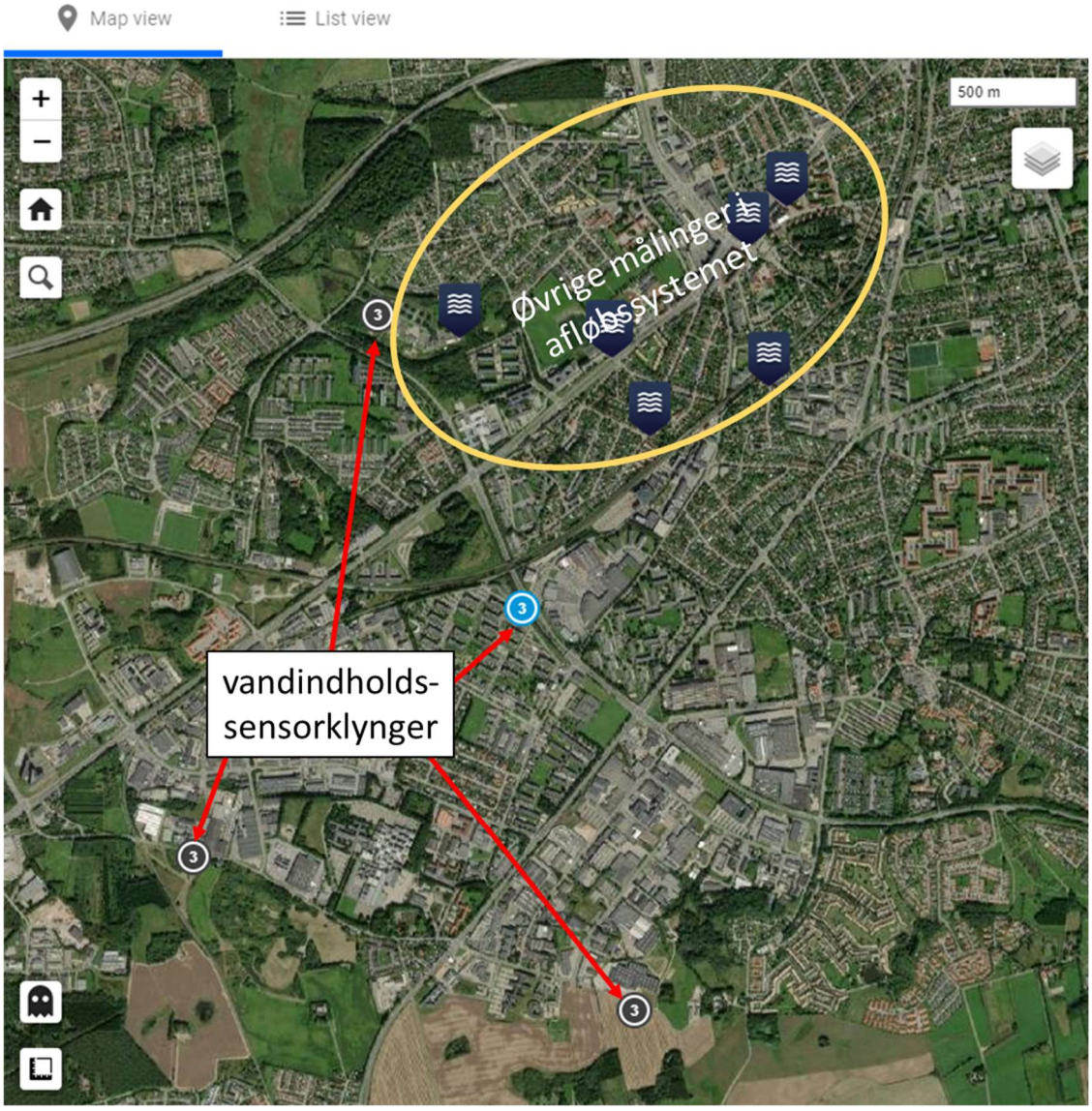
Den solide fysiske opsætning ses på Figur 13 hvor dataloggeren er placeret inde i en rustfri stålboks, derfra kan kabler til sensorer trækkes igennem er tomrør af rustfrit stål. Tomrøret har cirka en længde på 70 cm under terræn. Standeren monteres ved at udbore et hul, nedsætte standeren og støbe den fast i beton. Kabler til sensorer kan trækkes ud af tomrøret under terræn, dog over støbningen, og derefter trækkes under jorden til det sted, hvor det ønskes at måle vandindhold. Udformningen betyder, at der ikke er nogen blottede sensorer, kabler eller dataloggere.



Figur 13. Sensorklyngeopsætning og in-situ monterede vandindholdsmålere.

Såfremt vandindholdsmåleren skal være værdiskabende i realtidssammenhæng og i sin helhed blive værdiskabende for den danske vandsektor, så er det nødvendigt at disse også udbydes af danske sensor- og dataloggerleverandører. Dette lykkedes ved at inddrage leverandøren Dryp A/S, som udviklede deres datalogger til også at kunne håndtere vandindholdsmålere. Endvidere gør dette det muligt at analysere dataene på deres platform, eller trække dataene ud af deres platform og over på egne platforme ved hjælp af dertilhørende API'er.

På Figur 14 ses et overblik over de monterede sensorklynger og øvrige tilstødende målinger i afløbssystemet. Dryp-platformen gør det muligt at lave en direkte sammenligning af flowet i afløbssystemet og det målte vandindhold.



Figur 14. Udklip fra Dryp's dataplatform over datapunkter. På kortet ses placeringen af sensorklyngerne til måling af vandindhold i MOTO. Derudover ses andre datapunkter som primært består af flowmålinger.

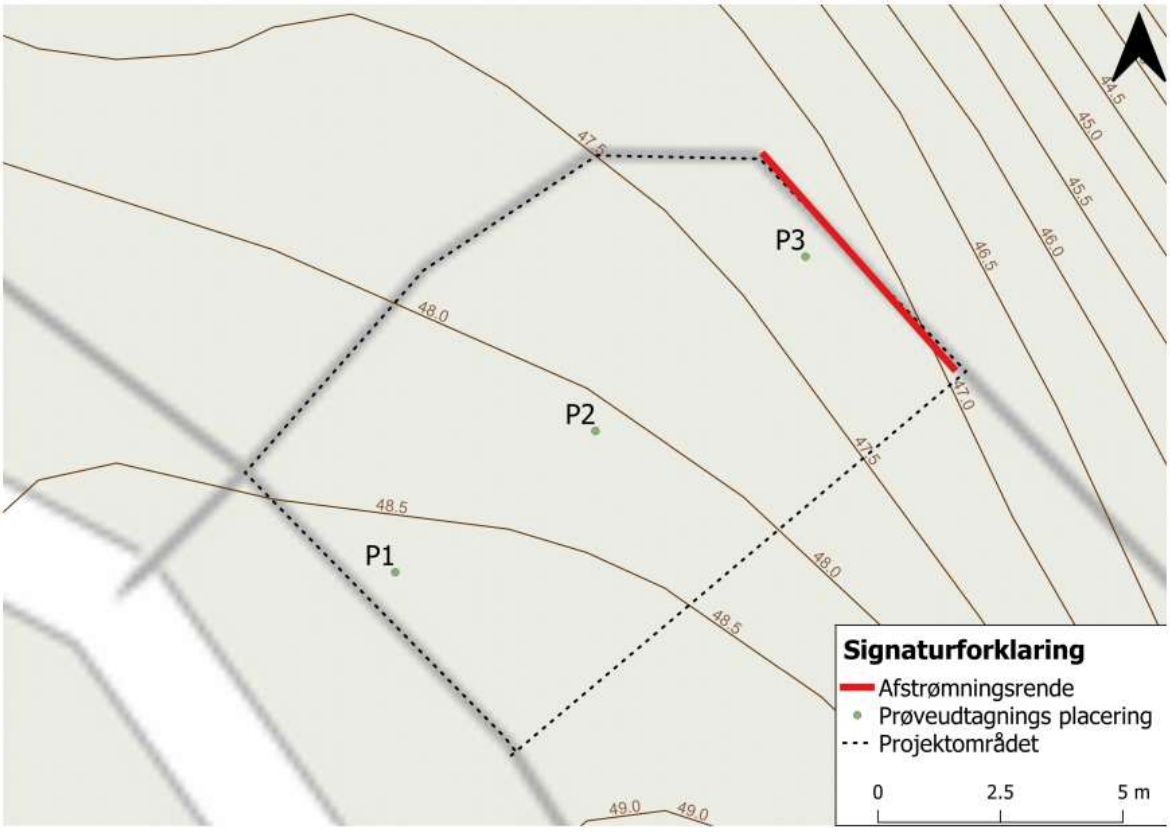
Jordkarakterisering

Der er gennemført en omfattende jordkarakterisering af området, som endte med at blive mere omfattende end det indledningsvist var tiltænkt. Dette skyldes, at afstrømningen fra området havde en væsentlig anderledes afstrømningsdynamik end den observerede afstrømning i projektet MOGO. Derfor var det også nødvendigt at prioritere projektets ressourcer mod dette, fordi det er afgørende at kende jordens sammensætning, hvis projektets resultater skal kunne ekstrapoleres ud på andre områder fremadrettet. Jordkarakteriseringen foregik primært i punkterne vist på Figur 15 som også

ses udgravet på billederne i Figur 4. I punkterne er der foretaget intaktprøver, løsprøver og infiltrometertest.

Intaktprøverne bruges til at undersøge jordens egenskaber i forhold til kompakthed, herunder jordens totale og effektive porøsitet. Dette er vigtige jordparametre, fordi de fortæller noget om, hvor god jorden er til henholdsvis at magasinere og lede vand.

Løsprøverne anvendes til at bestemme jordtypen, som kan fortælle hvorvidt jorden er sandet eller leret, hvilket kan hjælpe med at overføre den skabte viden fra denne lokalitet til andre geografiske områder. Endeligt anvendes infiltrometertestene til at undersøge jordens hydrauliske ledningsevne.



Figur 15. Prøvetagningssteder til karakterisering af jordparametre. Illustration af [3].

Resultaterne af jordkarakteriseringen afslører, at jorden er meget kompakt tæt på overfladen. Særligt i punktet P3 på Figur 15 er jorden meget kompakteret. Det ses også på oversigtskortet på Figur 3, at jorden i dette areal af måleområdet ser ud til at være særligt udpint uden megen vegetation. Den effektive porøsitet og hydrauliske ledningsevne er også mindst ved P3, som viser, at der i bunden af måleområdet tættest på linjedrænet også er overflader med de dårligste egenskaber i forhold til at infiltrere regnvand.

Sigtanalyser af jorden viser, at jorden kan kategoriseres som sand, da det primære indhold af jorden er groft sand.

De detaljerede jordanalyser er et godt eksempel på, hvorfor en helhedsforståelse for jordens egenskaber er meget vigtig. Et traditionelt udgangspunkt til at bestemme jordens karakteristika kunne have været blot at tage løse jordprøver og derpå gennemføre en sigteanalyse for at bestemme jordtypen. På baggrund af jordtypen kunne man være fristet til blot at bruge standardparametre for eksempelvis en sandet jords hydrauliske egenskaber. Dette ville dog være forkert i dette tilfælde, da målinger af den hydrauliske ledningsevne viser, at jorden nærmere har egenskaber som en jord med et væsentligt siltindhold.

Var de hydrauliske egenskaber blot estimeret på baggrund af en jordkarakterisering, altså rent sand, var der risiko for, at den hydraulisk ledningsevne var blevet fastsat en faktor 15 til 50 for højt. Dette kan potentielt have en afgørende betydning for afløbssystemers kapacitet, fordi det i ovenstående tilfælde ville betyde, at jorden ville blive tilskrevet en meget større evne til at nedsive regnvand end den egentlig har. Derfor er der i ovenstående tilfælde risiko for en underdimensionering af afløbssystemet.

Såfremt der ønskes en detaljeret gennemgang af jordanalyserne, henvises der til afgangsprojektet *Modellering af afstrømningen fra et ubefæstet areal og påvirkningen heraf på et eksisterende afløbssystem* skrevet af Frederik G. Kjærgaard og Rasmus S. Bjørn [1].

Afstrømning fra det grønne område

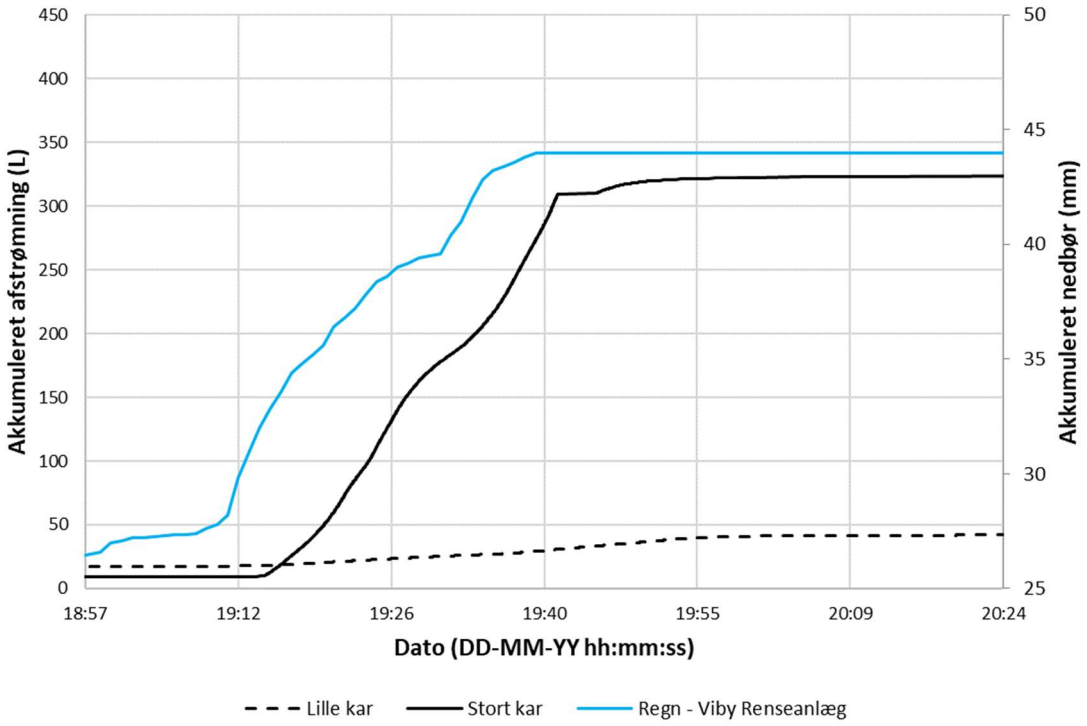
Der blev observeret afstrømning fra det grønne måleområde. Dette ses eksempelvis på Figur 16 og Figur 17, hvor afstrømningsprofilet fra en hændelse d. 26. august 2020 ses optegnet. Afstrømningen har dog nogle væsentligt anderledes karakteristika end de der blev observeret i det tidligere udviklingsprojekt MOGO. Ved den nye forsøgsopstilling er afstrømningen meget mere dynamisk. Det ses eksempelvis på Figur 16 og Figur 17, at afstrømningen starter umiddelbart efter, at det er begyndt at regne. I forlængelse heraf ses det også, at afstrømningen aftager hurtigt umiddelbart kort tid efter at regnen er stoppet. Dette vidner altså om, at afstrømningsprocessen ikke er forsinket i nævneværdig grad. Dette står i klar kontrast til observationerne i MOGO, hvor afstrømningen kunne fortsætte i adskillelige døgn, og i nogle tilfælde længere tid end en uge, hvor afstrømningen her stopper efter 20 minutter.

Det stod altså hurtigt klart i MOTO, at der blev observeret en helt anden afstrømningstype end den fra MOGO, hvorfor observationerne derfra ikke kunne bekræftes, men i stedet udbygges. Dette skyldes, at vi nu er i stand til at observere, og har data om, de tre primære afstrømningstyper, nemlig:

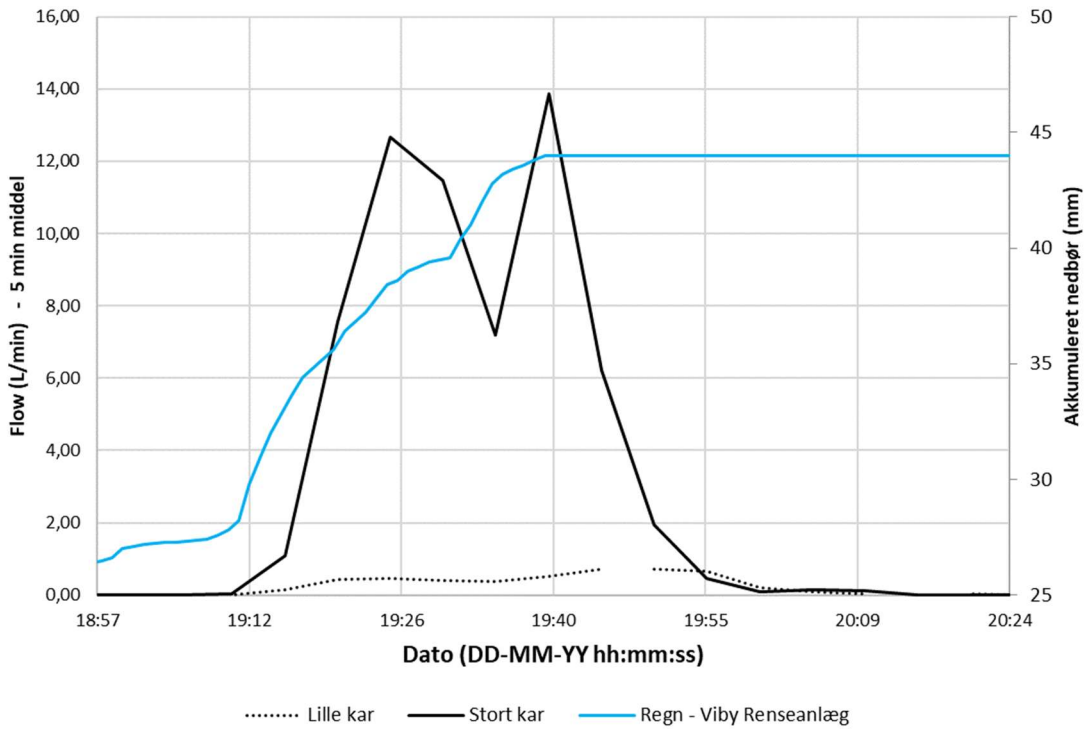
- Den vandmætningsbetingede afstrømning, hvor jorden er helt vandmættet og derved ikke kan rumme mere vand (observeret i MOGO)

- Overfladenær afstrømning, hvor afstrømningen foregår i jorden og senere bliver presset op på overfladen (observeret i MOGO)
- Den infiltrationsbetingede afstrømning, hvor regnintensiteten overskrider jord-overfladens infiltrationskapacitet (observeret i MOTO)

Derved findes der nu to forsøgslokaliteter, hvor de tre primære afstrømningsprocesser fortsat kan studeres, hvilket er altafgørende for den fremtidige udvikling og forskning om afstrømning fra grønne områder.

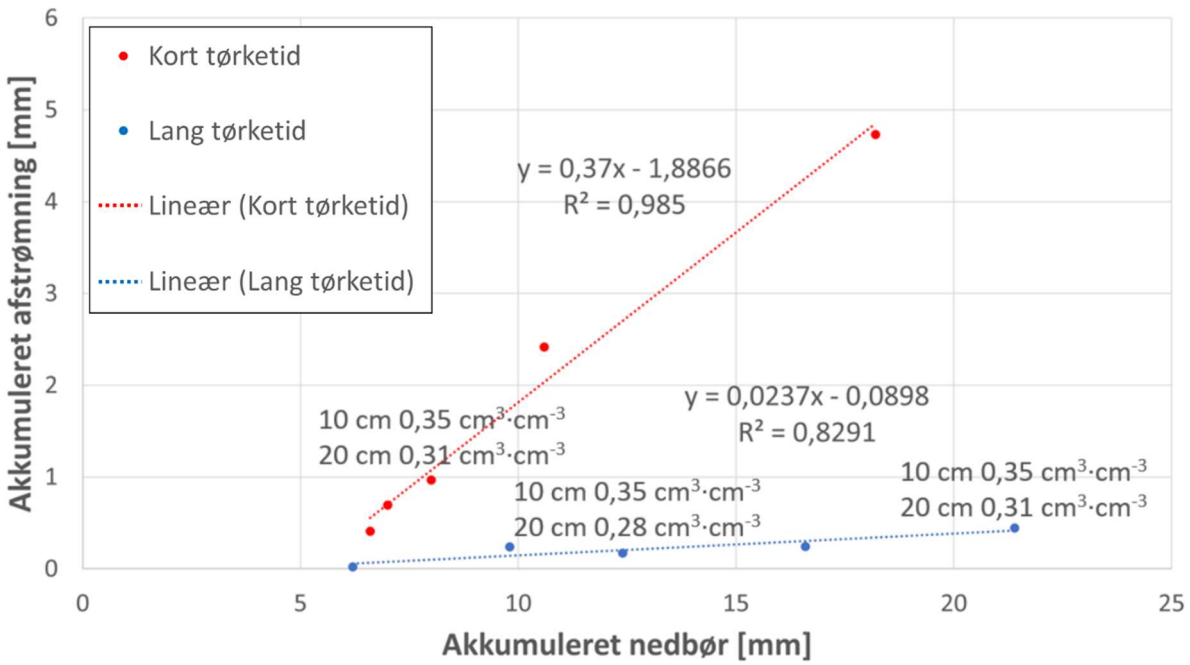


Figur 16. Akkumuleret afstrømning målt med det lille og store vippekar, og målt akkumuleret nedbør i Spildevandskomitéens regnmålerstation ved Viby Renseanlæg.



Figur 17. Målt flow med det lille og store vippekar, og målt akkumuleret nedbør i Spildevandskomitéens regnmålerstation ved Viby Renseanlæg.

Der har undervejs i projektet været tekniske problemer med at få vandindholdssensorerne til at køre stabilt. Dette har skabt udfordringer i forhold til at studere sammenhængen mellem vandindhold og afstrømning så detaljeret, som det var ønsket. Dog har det vist sig, at tørvejrsperioden mellem regnhændelser har en effekt på det afstrømmende vandvolumen. På Figur 18 ses det eksempelvis at ved afstrømningshændelser, hvor der kun har været en kort mellemliggende tørvejrsperiode, der afstrømmer en større andel af regnvandet også. Ved et overstået initialtab på ca. 5 mm afstrømmer cirka 37 % af nedbøren.



Figur 18. Sammenhæng mellem akkumuleret afstrømning og akkumuleret nedbør ved henholdsvis lange (over 40 timer) og korte (under 23 timer) tørvejrsperioder [3].

Online datavisualisering

For at nå et skridt videre i forhold til at operationalisere brugen af vandindholdsmålere, var det vigtigt at de opsamlede data kunne aflæse i realtid. Derfor brugte projektgruppen også den eksterne leverandør Dryp. Dryp tilpassede deres datalogger, således at denne nu også er i stand til at håndtere vandindholdsmålere. Derved kan data nu opsamles med deres produkt og analyseres på deres platform til online datavisualisering. På platformen kan dataene tilmed sammenstilles med data fra andre datapunkter så som flowmålinger i afløbssystemet. Dette er afgørende for at gøre vandindholdsmålingerne værdiskabende. Fremadrettet bør der være fokus på forskellige metoder til dataanalyse, således at det på en forholdsvis standardiseret måde, er muligt at kvantificere effekten af afstrømning fra byens grønne områder i forskellige dele af det hydrologiske kredsløb. Endeligt anses Dryp's engagement i forhold til at tilpasse deres platform til også at kunne håndtere vandindholdsmålere som et vigtigt skridt i forhold til at udbrede brugen af vandindholdsmålere i vandsektoren.

Figur 19. Online datavisualisering på Dryp's dataplatform. Øverst ses flowet målt in indløbet til Viby Renseanlæg og nederst ses det målte vandindhold ved forsøgsopstillingen i Rosenhøj i 10 og 20 cm jorddybde.

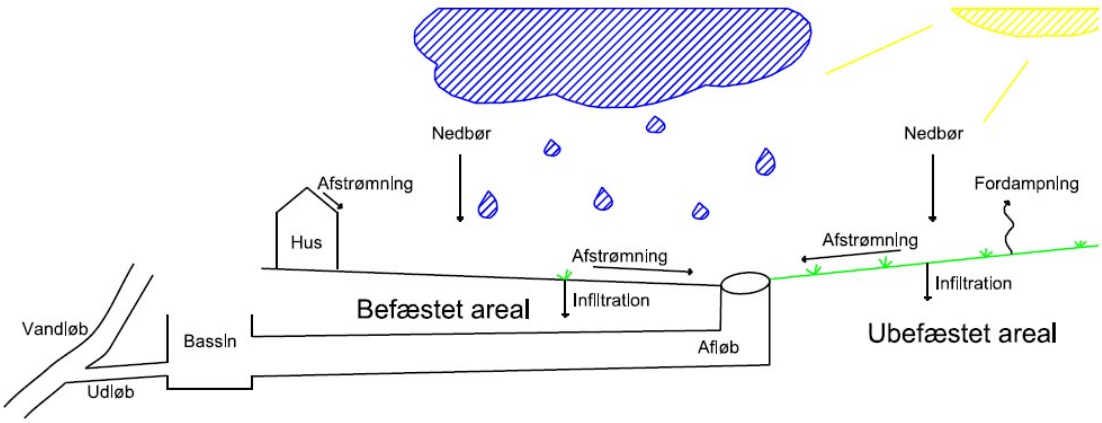
5.4 Projektresultat 2 - Vejledning til modellering

I løbet af MOGO og MOTO er det blevet tiltagende tydeligt, at desto mere vi undersøger emnet omkring afstrømning fra grønne områder, desto mere finder vi ud af, vi ikke ved. Med andre ord; der opstår hele tiden flere spørgsmål end svar. MOTO har givet endnu en af de brikker, som skal bruges til det samlede puslespil om afstrømning fra byens grønne områder.

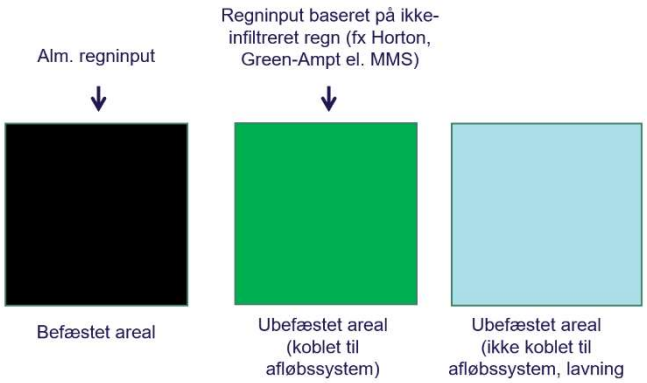
Det har i MOGO især været en øjenåbner, at vi ikke kan betragte jordmatricen som homogen i dybden, men at denne skal opdeles i forskellige lag alt afhængigt af lagenes jordtype og kompaktering. Netop på lokaliteten i MOTO, hvor jorden ellers er grovsandet, og hvor man normalt ville antage en høj infiltrationskapacitet, betyder det underliggende kompakterede jordlag at infiltrationskapaciteten nedsættes signifikant. Udover selvfølgelig at forstå infiltrationsprocesserne og jordfysikken skal de modeller, vi vil bruge til at simulere afstrømningsbidrag til afløbssystemet, også kunne repræsentere dette.

Modelleringen af afstrømningsbidrag til afløbssystemet tager udgangspunkt i to delkomponenter:

1) En modellering af nedbørens infiltration i jordmatricen på ubefæstede områder. Den andel af nedbøren, der ikke infiltrerer kan regnes som bidrag til afløbssystemet.
2) En implementering af afstrømningsbidrag fra de ubefæstede arealer i kommercielle afløbsmodeller (eksempelvis Mike Urban og MIKE+). Her bruges bidraget fra 1) til at modificere regnserie- inputs, så afløbsmodellen kan håndtere både befæstede og ubefæstede arealer (Figur 20 og Figur 21).



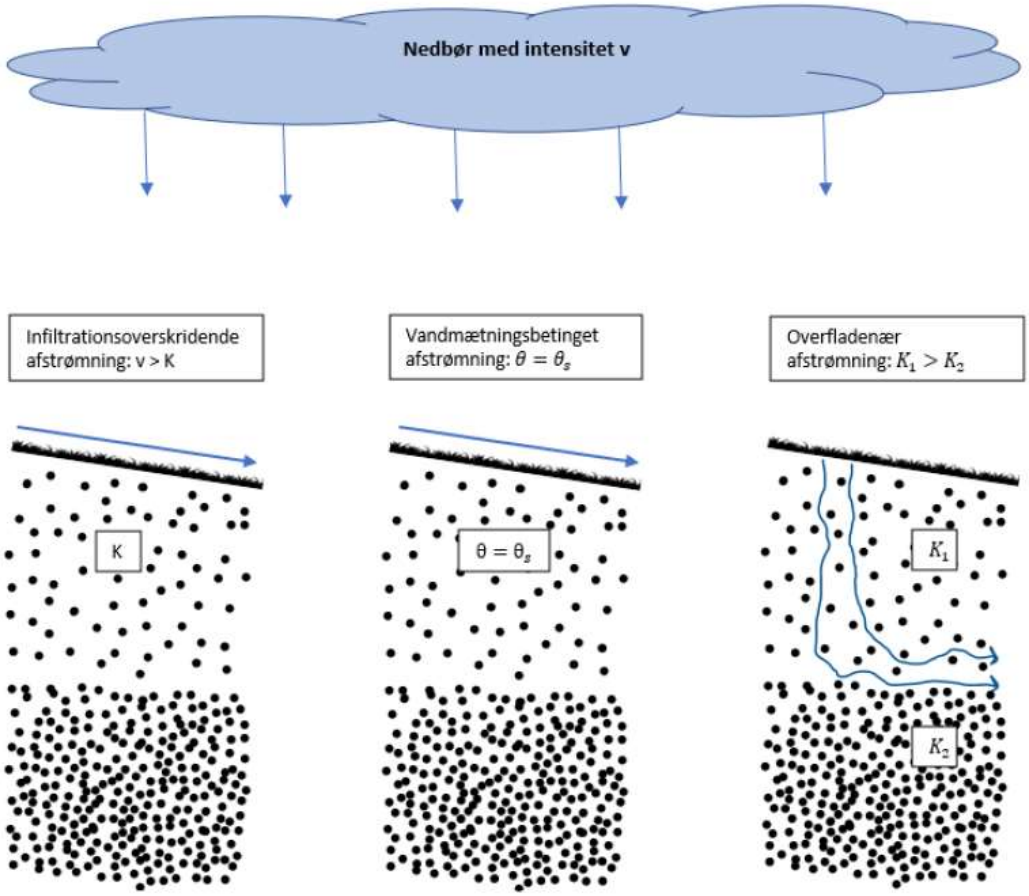
Figur 20. Principskitse af modelleringskoncept [6].



Figur 21. Implementering i kommerciel afløbsmodel.

I projektet er infiltrationsmodellen Green-Ampt indledningsvist brugt. Denne model er generelt anerkendt og benyttet i hydrologisk modellering, men har nogle begrænsninger i forhold til at kunne modellere heterogene jordlag. Efter delvist succesfulde forsøg på at modificere Green-Ampt-modellen [6] blev det besluttet at ændre modelkonceptet.

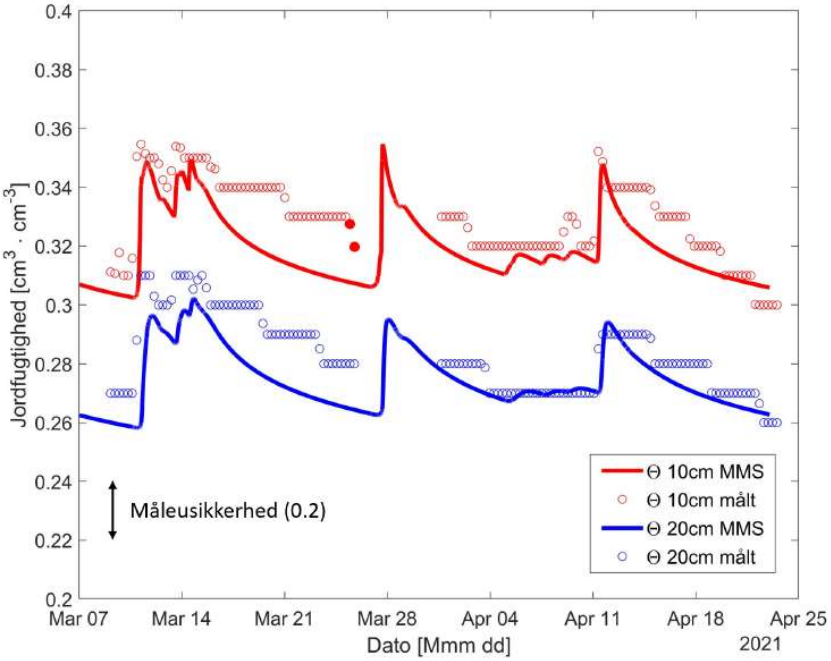
Derfor blev den mere avancerede Moving Mean Slope model [3] anvendt. Denne model er karakteriseret ved at kunne håndtere jordens tryk (sug), vandindhold og hydrauliske ledningsevne under både mættede og umættede forhold. Desuden kan modellen håndtere lagdelte jorde med forskellige jordfysiske parametre. Med MMS-modellen kan de infiltrationsprocesser, der er vist på Figur 22, simuleres.



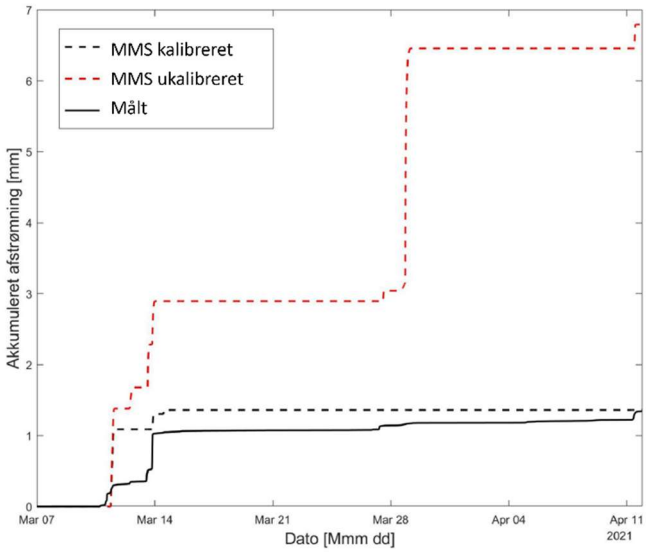
Figur 22. Skitse af afstrømningsprocesser [2].

I MMS-modellen anvendes de målte jordfysiske parametre som inputs og modellen kalibreres op imod vandindholdsmålinger (Figur 23) og målt overfladeafstrømning (Figur 24 og Figur 25).

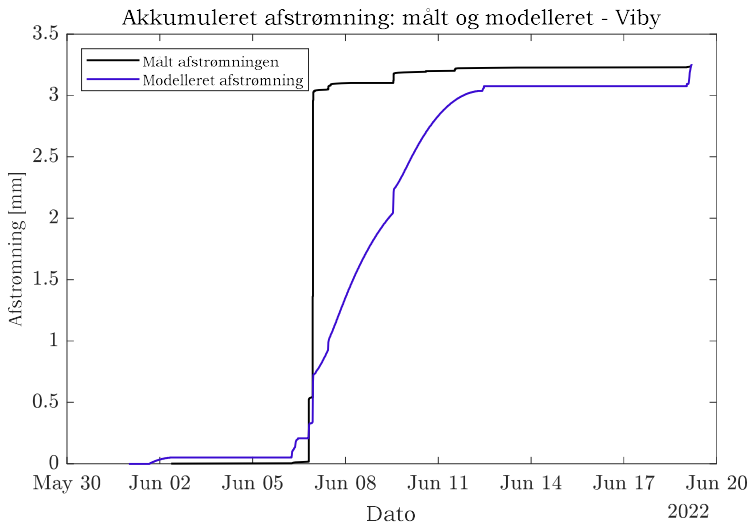
På Figur 26 kan ses eksempler på de hydrauliske kurver, der er anvendt i opsætningen af MMS-modellen. Som eksempel kan ses en generelt lavere hydraulisk ledningsevne for kompakte jordlag samt underjord.



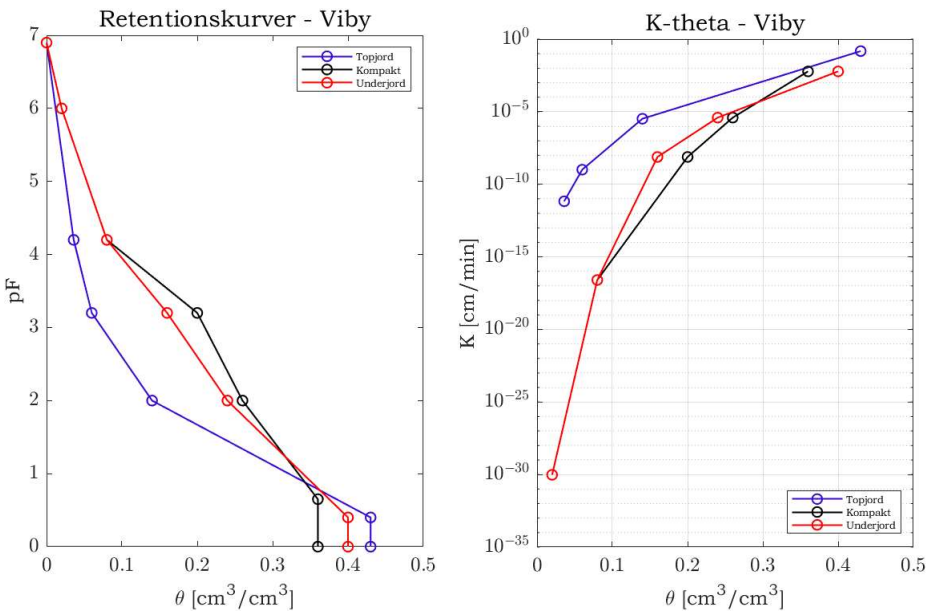
Figur 23. Eksempel på målt og modelleret vandindhold i topjorden [1].



Figur 24. Eksempel på målt og modelleret afstrømning [1].



Figur 25. Eksempel på målt og modelleret afstrømning [2].



Figur 26. Eksempel på hydrauliske kurver anvendt i MMS-modellen; t.v. sammenhæng mellem jordens vandindhold og trykpotentiale (sug); t.h. sammenhæng mellem vandindhold og hydraulisk ledningsevne [2].

Fra projektets ansøgnings- og startfase var der et ønske om at kunne opstille et generelt modelleringskoncept, som kunne udbredes til forskellige lokaliteter, jordtyper, mv. Netop modelleringskonceptet er således på plads, men på grund af de beskrevne komplekse infiltrationsprocesser har det ikke i projektet være muligt at opstille parametersæt til en mere generel anvendelse af modelleringskonceptet ud over projektlokaliteten. For at dette skal lykkes, skal der fortsat indsamles flere data - ikke bare i Aarhus, men

flere steder i landet. Dette er også en af årsagerne til, at Aarhus Vand i samarbejde med en række samarbejdspartnere rundt omkring i landet er gået sammen om MUDP-udviklingsprojektet VandKant, som skal fortsætte arbejdet med afstrømning fra de grønne områder.

5.5 Projektresultat 3 - Vidensopbygning i den danske vandsektor

Videnstanken indenfor afstrømning fra byens områder har hidtil været en gabende hul, hvor vandsektoren i bedste fald har brugt meget simple antagelser til at bestemme afstrømningen fra de grønne områder. En af de mest velkendte metoder er at antage, at de grønne områder har en afløbskoefficient på 10 % og derved afleder 10 % af den nedbør, der falder på overfladen. Herefter antages det, at afstrømningen opfører sig ligesom en befæstet overflade i forhold til afstrømningsdynamikken. Med andre ord er der et stort behov for vidensopbygning, hvis vandsektoren skal være i stand til at håndtere denne type afstrømning i fremtiden med korrekt dimensionerede afløbssystemer. MOTO bidrager i vid udstrækning til denne vidensopbygning med sit unikke måleprogram. Måleprogrammet giver lokal indsigt i afstrømningsforholdene ved in-situ måling, og har været en succes i forhold til at registrere afstrømningen fra det grønne område. Derved er det igen blevet påvist, at afstrømning fra grønne områder er et reelt tilstedeværende fænomen. Målingerne i MOTO har endvidere vist, at afstrømningen kan ske mere direkte end det, der blev målt i MOGO. Derfor har MOTO endnu en gang lagt et lag ovenpå den kompleksitet der arbejdes med, når der skal beregnes eller forudsiges hvor meget regn, der strømmer af de grønne områder i byen.

5.6 Konklusion

På baggrund af ovenstående vurderes det, at projektet i vid udstrækning har været en succes. Det er lykkedes at optimere den nye forsøgsopstilling på baggrund af erfaringerne fra det tidligere udviklingsprojekt MOGO. Herunder er:

1) den fysiske udformning af opstillingen gjort mere robust med et andet materialevalg,
2) der er udviklet et flowmålerkoncept med et vippekar, som kan måle selv meget små afstrømningsmængder relativt præcist, og
3) det er lykkedes at få en kommerciel aktør til at tage vandindholdssensorer til sig, og implementeret dem i deres platform, hvilket har gjort vandindholdssensoren nemmere at bruge og operationalisere i fremtiden

Projektgruppen har undersøgt forskellige modellers egnethed i forhold til at modellere den målte afstrømning. Undersøgelserne kan fungere som input til en fremtidig vejledning til modellering af afstrømning fra grønne områder i byen. Det vurderes dog, at der

fortsat mangler empiriske data, som kan understøtte denne udvikling, således modellerne rammer det rigtige leje i forhold til, hvor meget afstrømning det vurderes, at afløbssystemet belastes med fra byens grønne områder.

MOTO har i høj grad bidraget til vidensopbygning og -udbredelse i vandsektoren. Empiriske studier tager som regel lang tid, og i MOTO er det lykkedes at finde et forsøgsområde, hvor afstrømningsdynamikken kan observeres på en anden måde end den kunne i VTUF-projektet MOGO. Derfor er vandsektoren nu i besiddelse af viden om alle tre dominerende afstrømningstyper, herunder 1) infiltrationsbetinget afstrømning (MOTO), 2) vandmætningsbetinget afstrømning (MOGO), og 3) overfladenær afstrømning (MOGO).

MOTO har været med til at skabe en så bred interesse for problemstillingen omkring afstrømning fra grønne områder, at det er lykkedes at samle en projektgruppe på i alt 11 partnere omkring et nyt MUDP-projekt. I blandt de 11 partnere befinder sig forsyninger, kommuner og private virksomheder, som alle er interesserede i at blive klogere på afstrømning fra grønne områder og udvikle både teoretiske og kommercielle løsninger, således at det sikres, at afstrømning fra grønne områder i fremtiden kan medtages på en effektiv og optimal måde i dansk dimensioneringspraksis for afløbssystemer.

6 Litteraturliste

1. Bjørn R. S. & Kjærgaard F. G. (2021). Modellering af afstrømningen fra et ubefæstet areal og påvirkningen heraf på eksisterende afløbssystem. *Aalborg Universitet*

2. Langagergaard, M. S. (2022). Modellering af afstrømning fra grønne urbane arealer. *Aalborg Universitet*

3. Moldrup, P., Rolston, D.E. og Hansen, J.AA. (1989). Rapid and numerically stable simula-tion of one-dimensional, transient water flow in unsaturated, layered soils. *Soil Science*, 3(148), 219–226.

4. Nielsen, K. T., Moldrup, P., Thorndahl, S., Nielsen, J. E., Uggerby, M., & Rasmussen, M. R. (2019). Field-scale monitoring of urban green area rainfall-runoff processes. *Journal of Hydrologic Engineering*, *24*(8), 04019022.

5. Nielsen, K. T., Moldrup, P., Thorndahl, S., Nielsen, J. E., Duus, L. B., Rasmussen, S. H., ... & Rasmussen, M. R. (2019). Automated rainfall simulator for variable rainfall on urban green areas. *Hydrological Processes*, *33*(26), 3364-3377.

6. Skipper-Jørgensen, C. (2019). Afstrømning fra ubefæstede arealers påvirkning på af-løbssystemet. *Aalborg Universitet*