



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2020 30 stp

Fakultetet for realfag og teknologi - RealTek

Løsninger for nedbørssimulerende vanningsanlegg på grønne tak

Solutions for rainfall simulator on green roofs

Marta Corazon Bakke

Industriell økonomi – Vann- og miljøteknologi

Forord

Denne oppgaven markerer slutten på en uvanlig lang periode som student. Etter både et kortere og et noe lengre opphold ved henholdsvis NTNU og NHH, begynte jeg å studere industriell økonomi med fordypning innen vann- og miljøteknikk, på NMBU, høsten 2016. Ivrig etter å endelig avslutte utdanningen, komprimerte jeg de første ni semestrene til de tre første årene. Det siste semesteret, med masteroppgaveskrivingen ble dog et langvarig prosjekt. Både personlige utfordringer og en global pandemi har bidratt til forsinkelsen, og over et halvt år etter planlagt kan masteroppgaven endelig leveres inn. Det har vært en utrolig lærerik prosess, og jeg er takknemlig for å ha fått jobbe med et tema som er så aktuelt og spennende.

Det er spesielt to personer jeg kan takke for at enden tross alt ble så god. For det første har min hovedveileder, Vegard Nilsen, vært en uvurderlig støtte. Han har bidratt med faglig kompetanse og engasjement, men kanskje like viktig forståelse og oppfølging.

En stor takk går også til min bror, som lokket meg inn i denne spennende bransjen i utgangspunktet. Jeg kunne ikke hatt en bedre sparringspartner, og han har bidratt med mange gode tilbakemeldinger.

Til slutt vil jeg takke Knut Magne Møen og Anne Kristina Fleig ved NVE, og alle andre som har støttet meg i denne perioden.

Oslo, august 2020

Marta Corazon Bakke

Sammendrag

Klimaendringer og urbanisering har ført til økte utfordringer knyttet til overvannshåndtering. Grønne tak utgjør et viktig bidrag for lokal overvannshåndtering (LOD). Metodene og teknologien rundt grønne tak, kan ikke nødvendigvis overføres fra utlandet til nordiske forhold, det er derfor et stort behov for forskning på effektene av ulike grønne tak i Norge. Våren 2018 ble forskningsinfrastrukturen Bia, bestående av tre forsøksstak, etablert ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) på Ås. Det har blitt registrert data siden sommeren samme år, men resultatene er begrenset til naturlige nedbørshendelser. For å måle effekten spesielt ved mer ekstreme hendelser har det vært et ønske å etablere et vanningsanlegg som kan simulere nedbørshendelser med varierende intensiteter.

I denne oppgaven er potensielle løsninger for et slik vanningsanlegg identifisert. Alternativene som ble vurdert var en sprederslange, svetteslange, hagespreder og ulike industridyser. Det ble gjennomført forsøk og innhentet informasjon om de forskjellige produktene, for å kunne bestemme de relevante egenskapene: Vannføring, trykk og spredning (av vannet over taket).

De ulike alternativene ble vurdert etter metodikk inspirert av KVVU-metoden. Denne metodikken innebar utarbeidelse av krav, som alternativene ble vurdert etter før de ble sammenlignet etter grad av kravoppnåelse.

Ingen av alternativene kan alene produsere et tilstrekkelig stort intervall av intensiteter, men alternativanalysen viser at hagesprederen er det beste enkeltstående alternativet. En kombinasjon av åtte spredere kan produsere intensiteter mellom 0,8 og 3,3 mm/min. Den største fordel for spredere har ovenfor de andre alternativene, er at de er billige og lett tilgjengelige.

En kombinasjonsløsning bestående av tre "moduser", hvorav to består av dyser som kan tilføre lav og middels høy intensitet og den tredje består av spredere, kan produsere alle de relevante intensitetene. Det anbefales imidlertid å først bygge et vanningsanlegg bestående av spredere, og heller supplere med ytterligere intensiteter i etterkant.

Abstract

Climate change and urbanization have led to increased challenges related to surface water management. Green roofs make an important contribution to local surface water management (LOD). The methods and technology related to green roofs cannot necessarily be transferred to Nordic conditions, so the need for research on the effects of different green roofs in Norway is considerable. In the spring of 2018, the research infrastructure Bia, consisting of three experimental roofs, was established at the Norwegian University of Life Sciences (NMBU) at Ås. Data have been recorded since the summer the same year, but the results are limited to natural precipitation events. In order to measure the effect, especially in the event of more extreme events, there has been a desire to establish an irrigation system that can simulate precipitation events with varying intensities.

In this thesis, potential solutions for such an irrigation system are identified. The alternatives that were considered were a sprinkler hose, a soaker hose, a garden sprinkler and various industrial nozzles. Experiments were carried out and information was obtained about the different products, in order to be able to determine the relevant properties: Water flow, pressure and dispersion (of the water on the roof).

The various alternatives were assessed according to a methodology inspired by the KVVU-method. This methodology involved the preparation of requirements, according to which the alternatives were assessed before they were compared according to the degree of achievement of requirements.

None of the alternatives alone can produce a sufficiently large range of intensities, but the alternative analysis shows that the garden sprinkler is the best single alternative. A combination of eight sprinklers can produce intensities between 0.8 and 3.3 mm / min. The biggest advantage of the sprinkler over the other options is that they are cheap and easily available.

A combination solution consisting of three "modes", two of which consist of nozzles that can supply low and medium high intensity and a third consisting of sprinklers, can produce all the relevant intensities. However, it is recommended to first build an precipitation simulator consisting of sprinklers, and rather supplement with additional intensities afterwards.

Innholdsfortegnelse

Figurliste.....	ix
Tabelliste	x
1. Innledning.....	1
1.1. Problemstilling	2
1.2. Rapportstruktur.....	2
2. Bakgrunn	2
2.1. Grønne tak	2
2.2. Bia	4
3. Teori	5
3.1. Nedbør.....	5
3.1.1. Urbanisering.....	6
3.1.2. Klimaendringer.....	7
Intensitet og IVF-kurver	8
3.1.3.....	8
Hyetogram.....	8
3.1.4.....	8
3.2. Eksisterende anlegg for kunstig nedbør	10
3.2.1. Høvringen.....	12
4. Metode.....	14
4.1. Vurderingsmetode	14
4.1.1. Kravspesifikasjoner	15
4.1.2. Alternativanalyse.....	19
4.1.3. Aktuelle alternativer	19
4.2. EPANET.....	21
4.3. Vannføring og trykk	23
4.3.1. Sprederslange og svetteslange	24
4.3.2. Gardena spreder.....	27
4.4. Spredning.....	28
5. Resultater.....	30
5.1. Vannføring og trykk	30
5.1.1. Sprederslange	30
<i>Tabell 7: Målinger av vannføring og tilhørende trykk for sprederslangen.....</i>	<i>30</i>
5.1.2. Svetteslange.....	33
Gardena spreder.....	35
5.1.3.....	35

5.2.	Spredning.....	38
5.2.1.	Spredningsvinkel – Gardena spreder.....	38
5.2.2.	Spredningsalternativer.....	39
5.3.	Total vannføring på taket.....	41
5.4.	Modellering i EPANET.....	42
5.4.1.	Resultater.....	44
6.	Alternativanalyse.....	47
6.1.	Kravoppnåelse.....	47
6.2.	Samlet vurdering	49
7.	Konklusjon	51
8.	Referanser.....	52
9.	Vedlegg	55
	Vedlegg A – Fullstendige resultater vannføring og trykk	55
	Vedlegg B – EPANET spredningsalternativ	59
	Vedlegg C – Epostkorrespondanse NVE vedrørende intensitetskrav	62

Figurliste

Figur 1: Eksempel på oppbygging av grønt tak fra Bergknapp AS (Hege Vatnaland, 2020)	3
Figur 2: Eksempel på grønne tak (Bergknapp AS, 2020).....	3
Figur 3: Oversiktsbilde av forsøktakene på NMBU, Ås (Øyre & Trommald, 2018)	4
Figur 4: De grønne Bia-takenes oppbygging (Øyre & Trommald, 2018)	4
Figur 5: Illustrasjon av den hydrologiske sirkelen (NVE, 2020)	5
Figur 6: Oversvømmelse i Oslo etter kraftig nedbør august 2019 (Audun Braastad, 2019)	6
Figur 7: Prognoser for økt havnivå basert på antagelse om høyt (rød) og lavt (blå) utslipp (Oppenheimer et al., 2019).....	7
Figur 8: Eksempel på et kasseregn utledet fra en IVF-kurve (Markhus et al., 1997).....	9
Figur 9: Eksempel på trekantregn (Chin, 2013)	9
Figur 10: Eksempel på symmetrisk blokkhyetogram (Markhus et al., 1997)	10
Figur 11: Eksempel på en dråpeformende nedbørssimulator(Hudson, 1993)	11
Figur 12: Oppsett for en småskala nedbørssimulator (Kristoffer T. Nielsen et al., 2019)	12
Figur 13: Nedbørssimulerende vanningsanlegg på Høvringen (Øfsti & Solbu, 2019).....	13
Figur 14: De viktigste stegene i KVVU-prosessen (Finansdepartementet, 2010)	14
Figur 15: IVF-kurver fra Oslo – Blindern (Norsk Klimaservicesenter, 2020)	16
Figur 16: BETE dyse av typen EZTF (BETE, 2020)	21
Figur 17: Fullkone spredning (BETE, 2020).....	21
Figur 18: Trykkmåler oppsett, Ås, 14. juli 2020	24
Figur 19: Gardena sprederslange (Gardena, 2020b).....	25
Figur 20: Axley svetteslange (jula.no, 2020)	25
Figur 21: Oppsett for måling av vannføring og trykk for sprederslangen, Ås, 14. juli 2020	26
Figur 22: Oppsett for måling av vannføring og trykk for svetteslangen, Ås, 14.juli 2020.....	26
Figur 23: Detaljbilde av sprederslange, Ås,14. juli 2020	26
Figur 24: Detaljbilde av svetteslange, Ås,14. juli 2020.....	26
Figur 25: Oppsett for måling av vannføring og trykk for sprederen, Ås, 14.juli 2020.....	28
Figur 26: Vannføring langs sprederslangen (test nr.1)	31
Figur 27: Differanse i vannføring mellom innerst og ytterst på slangen (test nr. 2-5)	31
Figur 28: Differanse i vannføring mellom innerst og ytterst på slangen.....	34
Figur 29: Grafisk fremstilling av sammenheng mellom vannføring og kvadratroten av trykk.....	37
Figur 30: Måling 1 - 107 grader, Ås, 14.juli 2020.....	38
Figur 31: MÅling 2 - 106 grader, Ås, 14.juli 2020	38
Figur 32: Måling 3 - 109 grader, Ås, 14.juli 2020.....	38
Figur 33: Måling 4 - 104 grader, Ås, 14.juli 202	38
Figur 25: (Fra venstre) spredningsalternativ A, B og C	39
Figur 26: (Fra venstre) spredningsalternativ D, E og F	40
Figur 27: Nettverk i EPANET for spredningsalternativ A	43
Figur 32: Nettverk i EPANET for spredningsalternativ D	43
Figur 33: Prinsippskisse for vanningsanlegg (Møen, 2020).....	50

Tabelliste

Tabell 1: Returverdi for nedbør fra Oslo - Blindern (Norsk Klimaservicesenter, 2020)

Tabell 2: Minimum- og maksimumintensitet og tilhørende vannføring gitt takets areal på 50 m²

Tabell 3: Skal-krav

Tabell 4: Bør-krav

Tabell 5: Aktuelle BETE-dyser og tilhørende K-faktor, vannføring og spredningsvinkel

Tabell 6: Oversikt over elementer som inngår i EPANET-modellene, med relevant inndata og utdata

Tabell 7: Målinger av vannføring og tilhørende trykk for sprederslangen

Tabell 8: Målinger av total vannføring og tilhørende trykk for sprederslangen

Tabell 9: Målinger av vannføring og tilhørende trykk for svetteslangen

Tabell 10: Målinger av total vannføring og tilhørende trykk for svetteslangen

Tabell 11: Målinger av minimum vannføring (ikke målbart trykk)

Tabell 12: Målinger av minste vannføring med koneformet vannstrøm

Tabell 13: Målinger av trykk, tid og volum med tilhørende beregning av vannføring og K-faktor

Tabell 14: Gjennomsnittlig K-faktor med tilhørende standardavvik

Tabell 15: Målinger av spredningsvinkelen

Tabell 16: Oversikt over spredningsalternativer for Gardena sprederen

Tabell 17: Oversikt over spredningsalternativer for BETE dysene

Tabell 18: Oversikt over total vannføring for hvert spredningsalternativ med Gardena sprederen

Tabell 19: Oversikt over total vannføring for hvert spredningsalternativ med tre ulike BETE dyser

Tabell 20: K-faktor og tilhørende "emitter coefficient"

Tabell 21: Resultater av simuleringer i EPANET for Gardena sprederen

Tabell 22: Resultater av simuleringer i EPANET for BETE dyse EZWL1/4

Tabell 23: Resultater av simuleringer i EPANET for BETE dyse EZWL1

Tabell 24: Resultater av simuleringer i EPANET for BETE dyse EZTF

Tabell 25: Kravoppnåelse for skal-krav

Tabell 26: Kravoppnåelse for bør-krav

Tabell 27: Vannføringene Gardensprederen kan tilføre og tilsvarende intensiteter

Tabell 28: Oversikt over kombinasjonsløsning

1. Innledning

Utfordringene knyttet til håndtering av overvann i urbane områder blir stadig større. Med klimaendringene kommer mer intenst nedbør, samtidig som fortetting i byer medfører flere tette flater. Denne kombinasjonen fører til større belastning på ledningsnettet for overvann, spill- og avløpsvann. Analyser i enkelte byer har vist at dette kan føre til en dobling av flomskader i bygninger samt 50-100 % økning i overløpsutslipp (Lindholm et al., 2008). I møte med disse utfordringene er det viktig med gode løsninger for lokal overvannshåndtering (LOD). I den sammenhengen har tak et stort ubenyttet potensial, da et lag med vegetasjon på takene kan holde igjen noe av nedbørsavrenningen (Lindholm et al., 2008).

Slike såkalte grønne tak benyttes stadig oftere og kunnskapsbehovet øker tilsvarende. Det har vist seg å være vanskelig å overføre metodene og teknologien direkte fra utlandet, så det er nødvendig med forskning rundt hvordan løsningene kan tilpasses ulike klimaforhold og forventede klimaendringer (Hanslin et al., 2018). Våren 2018 ble forskningsinfrastrukturen Bia, bestående av tre forsøksstak, etablert ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) på Ås. To av takene har en kombinasjon av sedum og Leca, mens det tredje taket er et svart referansetak (Øyre & Trommald, 2018).

Det magasinerende sjiktet av Leca gir muligheten til å forsinke og redusere en større andel av avrenningen enn ved tradisjonelle grønne tak, og formålet med Bia er å vurdere effekten av denne løsningen. En av samarbeidspartnerne for prosjektet, Norges vassdrag- og energidirektorat (NVE), har hatt ansvar for instrumenteringen knyttet til prosjektet, og siden sommeren 2018 har forskningsinfrastrukturen logget data for blant annet nedbør, temperatur, avrenning og vind (Trommald et al., 2018). Sommeren 2020 planlegges det å utvide måleprogrammet ytterligere, til å inkludere grunnvannsnivå, jordfuktighet, forbedret vannføring og forbedret vektmåling.

Frem til nå har all forsøksdata basert seg på naturlig nedbør, hvilket har begrenset muligheten til å måle effektene av taket, spesielt ved mer ekstreme hendelser som per definisjon sjeldent oppstår. Det har derfor vært et ønske å etablere et vanningsanlegg som kan simulere nedbørshendelser med varierende intensiteter. Formålet med denne oppgaven er å identifisere potensielle løsninger for et slikt vanningsanlegg. Oppgaven er gjort i samarbeid med Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), og føringene for hvilke tekniske krav et slikt anlegg skal oppfylle er kommet frem til i samarbeid med de

Ved å benytte metodikk inspirert av KVU-metoden skal disse føringene struktureres i kravspesifikasjoner, som videre brukes til å identifisere og vurdere alternative løsninger for vanningsanlegget.

1.1. Problemstilling

Problemstillingen denne oppgaven skal besvare er:

Hvilken løsning for et vanningsanlegg oppfyller kravene med hensyn på intensitet, spredning, trykk og tilgjengelighet best?

Følgende delpunkter inngår i denne problemstillingen:

- I. Bestemme metodikken som skal følges for vurderingen av alternativene.
- II. Kartlegge eksisterende vanningsanlegg for simulering av nedbør.
- III. Identifisere utstyr som kan være aktuelle å benytte.
- IV. Gjennomføre tester for å bestemme utstyrets egenskaper med hensyn på trykk, vannføring og spredning.
- V. Gjennomføre en analyse for å identifisere den beste løsningen.

1.2. Rapportstruktur

Grønne tak generelt og forsøktakene på NMBU beskrives litt mer detaljert i neste kapittel. Det påfølgende kapittelet presenterer det teoretiske grunnlaget for oppgaven. Dette inkluderer en kartlegging av eksisterende vanningsanlegg for nedbørssimulering. I kapittel 4 beskrives metodikken som benyttes for å identifisere den beste løsningen. Kapittelet inkluderer også en gjennomgang av forsøkene som er blitt gjort, for å bestemme de relevante egenskapene til de ulike alternativene. Kapittel 5 presenterer resultatene fra forsøkene og EPANET-simuleringene. I kapittel 6 gjennomføres alternativanalysen, som resulterer i at problemstillingen besvares i konklusjonen i kapittel 7.

2. Bakgrunn

2.1. Grønne tak

Grønne tak benyttes som flomreducerende tiltak ved å fordrøye og holde tilbake vann på tak. Vekstmassene og dreneringssystemet på taket holder tilbake noe av nedbøren (retensjon) som delvis forbrukes i vegetasjonens evapotranspirasjon. Den resterende nedbøren fyller opp vannlageret i vekstmassene og de tekniske løsningene, og tiden dette tar medfører en forsinkelse i avrenning sammenlignet med avrenningen fra et konvensjonelt tak (detensjon). Grønne tak gir derfor både en reduksjon og en forsinkelse i flomtoppen, og er spesielt nyttig i områder hvor avløpet er basert på et fellesystem (Hanslin et al., 2018).



Figur 1: Eksempel på oppbygging av grønt tak fra Bergknapp AS (Hege Vatnaland, 2020)

Ekstensive grønne tak er tak med et tynt lag vekstmasse (5-15 cm) med lavt tilsynsbehov, vanligvis sedumtak. Slike tak kan effektivt fange opp de minste regnhendelsene og bidra til en betydelig forsinkelse og tilbakeholdelse av de mellomstore regnhendelsene. De har derimot begrenset kapasitet når det kommer til å forsinke og redusere flomtappen fra de største regnhendelsene og i perioder med vått tak. Grønne tak utgjør allikevel et viktig bidrag som andre trinn i treleddsstrategien for overvannsdiskonering ved å redusere de totale mengdene avløpsvann som føres til renseanlegg ved fellessystemer og bidra til en mer naturlig vannbalanse i urbane områder ved et forlenget avrenningsmønster (Hanslin et al., 2018).



Figur 2: Eksempel på grønne tak (Bergknapp AS, 2020)

Det er fortsatt mange kunnskapshull som må dekkes for å få mer robuste grønne tak tilpasset nordiske forhold, så behovet for forskning på effekten av grønne tak er stort.

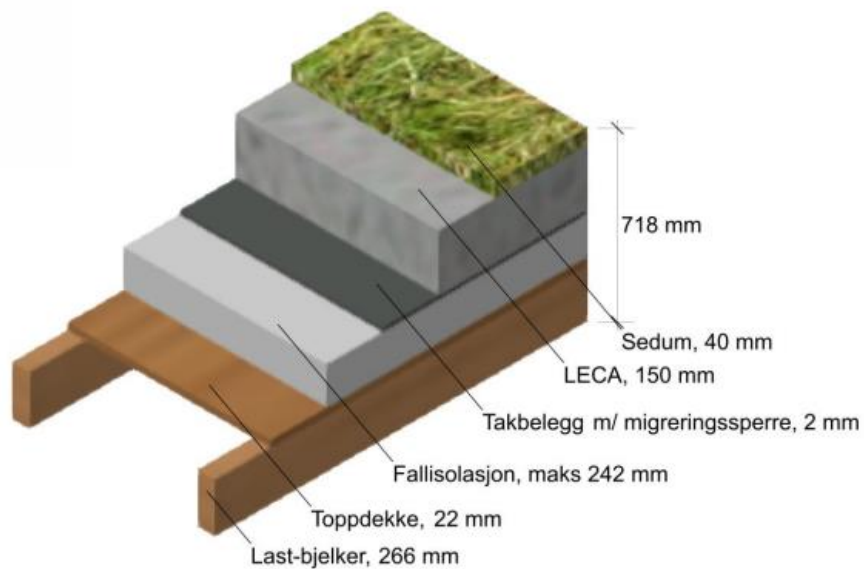
2.2. Bia

Forskningsinfrastrukturen Bia er et samarbeidsprosjekt mellom NVE, Bergknapp AS, Protan AS, Leca og NMBU, og ble etablert som et resultat av masteroppgaven "Etablering av Bia, en forskningsinfrastruktur med grønne tak" våren 2018.



Figur 3: Oversiktsbilde av forsøktakene på NMBU, Ås (Øyre & Trommald, 2018)

Bia består av tre tak, hvorav to er ekstensive grønne tak bygd opp av 15 cm knust leca lettklinker (0-6 mm) og 4 cm tykke sedummatter. Lecalaget fungerer som et magasinerende sjikt ved at vann kan lagres inni og mellom leca-klinkene.



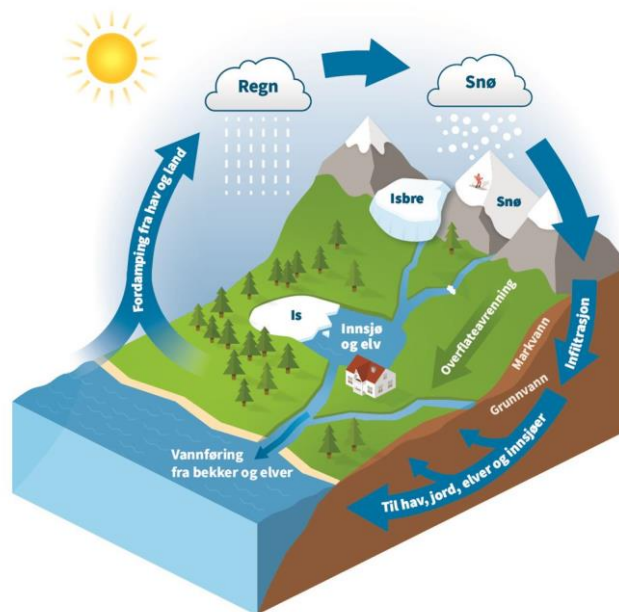
Figur 4: De grønne Bia-takenes oppbygging (Øyre & Trommald, 2018)

3. Teori

Første del av dette kapitlet tar for seg teori knyttet til nedbør. Dette inkluderer framskrivninger av nedbør knyttet til klimaendringer og beskrivelse av nedbør (intensitet, IVF-kurver, modellregn). Den andre delen fokuserer på litteratur og teori rundt eksisterende vanningsanlegg for simulering av nedbør. Det siste delkapitlet som beskriver vanningsanlegget på Høvringen i Trøndelag, er delvis basert på samtaler med prosjektlederen for det anlegget.

3.1. Nedbør

Den hydrologiske sirkelen beskriver hvordan vann beveger seg mellom havene, jordoverflaten og atmosfæren, ved hjelp av en rekke hydrologiske prosesser.



Figur 5: Illustrasjon av den hydrologiske sirkelen (NVE, 2020)

Ferskvann faller på jorda som nedbør i form av regn, snø eller sludd. Noe av vannet fordampes direkte fra vannflater eller jordoverflaten på grunn av oppvarming. Når vannet flyttes gjennom vegetasjon og deretter fordampes kalles det transpirasjon. Resterende vann beveger seg videre enten horisontalt som overflateavrenning til resipienter eller vertikalt ned i jorda ved infiltrasjon. Under jorda foregår det det grunnvannsstrømninger i den mettede sonen under grunnvannsspeilet, som til slutt ender i en resipient (Thorolfsson, 2014).

3.1.1. Urbanisering

Så lenge sivilisasjoner har eksistert har mennesket forsøkt å manipulere vannet til sin fordel. Irrigasjonsnettverk har blitt etablert i forbindelse med jordbruk, elver og innsjøer har blitt demmet opp for energiproduksjon og grunnvannskilder har blitt tømt for å sikre drikkevann, for å nevne noen eksempler. Menneskelig aktivitet har også mer indirekte påvirket vannets kretsløp: I byer og tettsteder har økt urbanisering ført til mer tette flater og mindre grønne flater. De viktigste hydrologiske konsekvensene av dette er mer overflateavrenning i intensitet og volum, redusert infiltrasjon, mindre evapotranspirasjon og lavere grunnvannstand (Markhus et al., 1997).

I større vassdrag er det kraftig nedbør med varighet på 1–10 døgn som forårsaker de største regnflommene, mens det i byer og tettbygde strøk er den kraftige og intensive nedbøren som forårsaker flest skader. De siste årene har oversvømmelser i tettsted forårsaket stadig større skader, grunnvannssenking har ført til setningsskader og økt avrenning i urbane områder medfører en større påkjenning på resipienter i form av både volum og forurensing (Skaaraas et al., 2015).



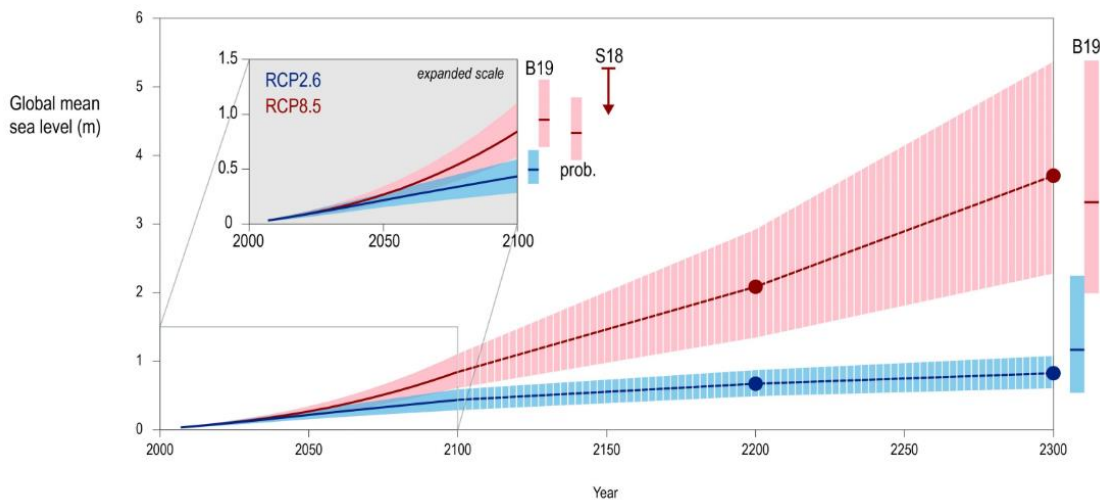
Figur 6: Oversvømmelse i Oslo etter kraftig nedbør august 2019 (Audun Braastad, 2019)

Den eksisterende infrastrukturen har ikke klart å holde tritt med økningen i vannmengdene. Ledningsnettverket er underdimensjonert og løsmasser fra overvannet i kanalene tetter kulverter (Hanssen-Bauer et al., 2016).

Error! Hyperlink reference not valid.

3.1.2. Klimaendringer

I tillegg til den økte urbaniseringen, er klimaendringene en sentral bidragsyter til de økende problemene de seneste tiårene. Klima er definert som det typiske værmønsteret et sted og beskrives ofte med for eksempel gjennomsnittlig nedbørmengde, middeltemperatur og antall ekstreme vindhendelser (Mamen, 2019). Mens været varierer fra dag til dag er klima en langsiktig trend. Globale klimamodeller benyttes for å beregne fremtidens klima og baserer seg på antagelser om hvordan menneskeskapte klimagassutslipp vil utvikle seg fremover. Disse antagelsene kan variere og man skiller gjerne mellom middels og høye utslipp.



Figur 7: Prognoser for økt havnivå basert på antagelse om høyt (rød) og lavt (blå) utslipp (Oppenheimer et al., 2019)

I tillegg til usikkerheten knyttet til fremtidige utslipp, er det globale klimaet et ekstremt komplekst system og vanskelig å modellere. Det er derfor stor usikkerhet i klimaframskrivningene, og det er vanlig å benytte flere klimamodeller som grunnlag for klimautviklingen i Norge (Norsk Klimaservicesenter, n.d.-a).

Prognosene for 2100 tilsier en økning i både årsnedbør, antall dager med kraftig nedbør og nedbørmengde på dagene med kraftig nedbør. Ved antagelser om høye fremtidige utslipp, forventes det en økning på 18 % i årsnedbør, fordobling av dager med kraftig nedbør og 19 % økning i nedbørmengden på dagene med kraftig nedbør. Foreløpige analyser tyder på at økningen i intens nedbør som har kortere varigheter enn ett døgn, kan bli ca. 30 prosent større, og episoder med styrtregn blir kraftigere og vil komme oftere.

Klimamodellenes framskrivninger i årlig nedbør, tilsvarer omtrent den faktiske langtidstrenden fra forrige århundre. Den beregnede temperaturøkning for det kommende århundret er imidlertid 3 til 5

ganger større enn økningen i forrige århundre. Det kan derfor ikke utelukkes at nedbørsøkningen kan bli større enn modellene tilsier (Hanssen-Bauer et al., 2016)

I dimensjoneringen av infrastruktur tar man utgangspunkt i et estimat av ekstreme nedbørsverdier, basert på lange måleserier. For å ta høyde for klimaendringen, anbefales det et klimapåslag på minst 40% for dimensjonerende nedbør med kortere varighet enn 3 timer. For prosjekter med lang levetid er det spesielt viktig å inkludere et klimapåslag (Norsk Klimaservicesenter, n.d.-b)

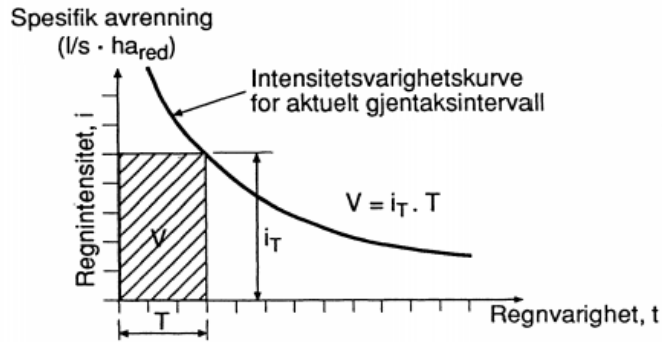
3.1.3. Intensitet og IVF-kurver

Nedbør kan beskrives med flere parametere. Noen av de vanligste er intensitet, varighet og frekvens, der førstnevnte er et mål på nedbørsmengde som har falt i løpet av et bestemt tidsrom. Varighet henviser til hvor lang tid det faller nedbør med en bestemt intensitet og frekvensen sier hvor ofte nedbør med en bestemt intensitet og varighet forekommer i en viss tidsperiode. Kombinasjonen av disse fremstilles ofte som såkalte IVF-kurver. Dette er statistikk som gir et estimat på hvilke intensiteter, for ulike varigheter, som må påregnes å inntreffe for ulike gjentakintervall og er grunnlaget for dimensjonering av urbane vannsystemer. Norsk Klimaservicesenter tilbyr IVF-kurver og statistikk fra norske målestasjoner. Man kan enten få intensiteter angitt i mm eller l/sa*ha, på varigheter mellom 1 minutt til 24 timer og gjentakintervaller på 2, 5, 10, 20, 50, 100 og 200 år.

3.1.4. Hyetogram

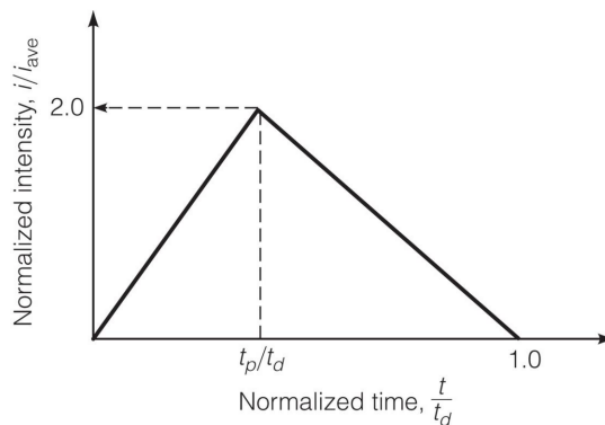
Et nedbørshyetogram er en grafisk fremstilling av hvordan intensiteten i en nedbørshendelse varierer over varigheten av hendelsen. IVF-dataene kan benyttes til å lage kunstige nedbørshyetogram, såkalte modellregn eller typeregner. Hvilken form modellregnet har, kommer an på formålet i beregningen de skal benyttes i. Dersom et rørtverrsnitt skal dimensjoneres, er maksimal vannføring mest interessant, mens det ved beregning av overløpsmengder er viktigere å vite regnets totale volum **Error!**

Hyperlink reference not valid. Den enkleste formen for modellregn er et kasseregner. Man benytter da en konstant intensitet hentet fra IVF-kurven. Siden dette er en midlere intensitet, undervurderer kasseregner maksintensiteten i regnhendelsen (Markhus et al., 1997).



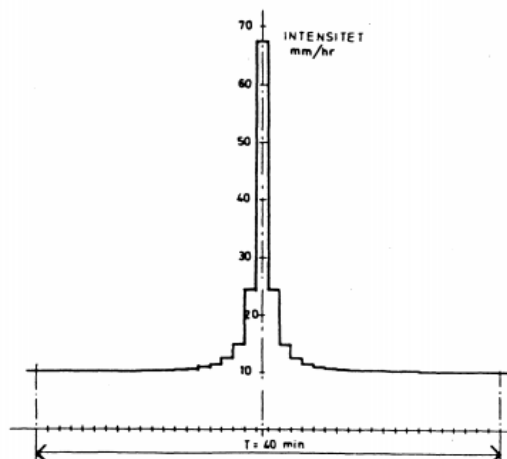
Figur 8: Eksempel på et kasseregnet utledet fra en IVF-kurve (Markhus et al., 1997)

En noe mer realistisk, men fortsatt veldig forenklet variant er trekantregnet. Varigheten er lik varigheten fra IVF-kurven, mens arealet under kurven er lik nedbørssøylen fra IVF-kurven. I et trekantregnet vil maksintensiteten være like det dobbelte av den midlere intensiteten.



Figur 9: Eksempel på trekantregnet (Chin, 2013)

Selv om de forenklete variantene kan være hensiktsmessige i noen sammenhenger, beskriver de dårlig de fleste dimensjonerende nedbørshendelsene. Slike har som regel en veldig høy maksintensitet, som kan inntreffe når som helst i løpet av hendelsen. Et symmetriske regnhyetogram ivaretar alle nedbørintensiteter med varighet mindre enn varigheten til det symmetriske regnet. Nedbørvolumet innenfor hvert tidsintervall som er symmetrisk om midtaksen skal være lik nedbørvolumet fra IVF - kurven med den aktuelle varigheten. I de fleste tilfeller vil det være hensiktsmessig med beregningssteg på 5 minutter. Kortere tidsintervaller vil gi veldig høy spissintensitet.



Figur 10: Eksempel på symmetrisk blokkhyetogram (Markhus et al., 1997)

Error! Hyperlink reference not valid.

Alternativet til å bruke modellregn er å benytte virkelig målte historiske regn. Man må da bestemme hvilket gjentakintervall regnet tilsvarer.

3.2. Eksisterende anlegg for kunstig nedbør

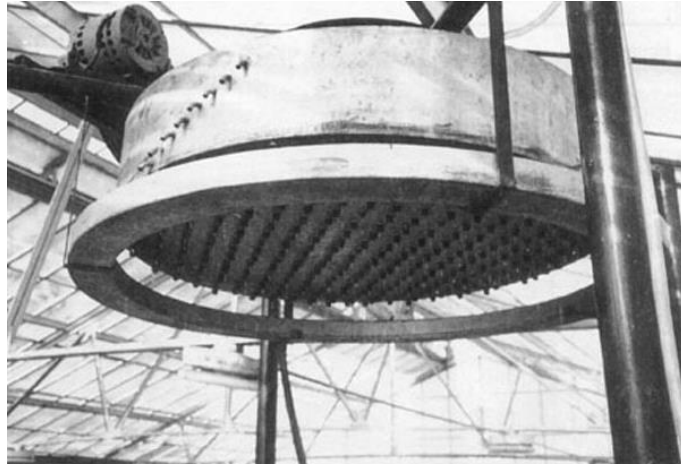
En stor andel av forskningsartiklene som omhandler nedbørssimulerende vanningsanlegg (rainfall simulators) og som er tilgjengelig på internett, er relatert til småskala anlegg benyttet i studier på avrenning og jorderosjon (Kristoffer Tønder Nielsen, 2019).

Innenfor landbruksforskning har nedbørssimulatorer vært i bruk lenge. En rapport utgitt av FNs organisasjon for ernæring og landbruk (FAO) i 1993, beskriver formålet med, typer av og praktiske betraktninger knyttet til dem (Hudson, 1993)**Error! Hyperlink reference not valid.** To av fordelene forfatteren trekker frem er muligheten til å gjøre målinger uten å måtte vente på naturlig regn, samt evnen til å kontrollere formen på nedbøren. Han påpeker også at nytten av en simulator kommer an på hvilken informasjon man ønsker å innhente. Formålet med forsøket er avgjørende for hvilken type nedbørssimulator det er mest hensiktsmessig å velge. Et eksempel som trekkes frem er studier av infiltrasjon og avrenning, hvor det ikke anses som nødvendig at det simulerte regnet har nøyaktig samme karakteristikk som naturlig regn. I erosjonsforskning kan imidlertid karakteristikk som dråpestørrelse, hastighet og kinetisk energi ha stor påvirkning på prosessene man ønsker å studere.

Felles for de fleste av disse anleggene er at regnet produseres enten ved bruk av dyser eller ved drypping. Bruken av dyser innebærer et trykksatt system der dysene tilføres vann ved hjelp av en

pumpe. Denne metoden er mye brukt, da vannføringen bestemmes ved å kontrollere trykket, hvilket gjør systemet relativt enkelt i bruk. Videre gir bruken av dyser muligheten til å vanne større arealer.

Dryppanlegg består av perforerte rør eller overflater, hvor dråpene formes ved av tyngdekraften trekker vannet gjennom hullene.

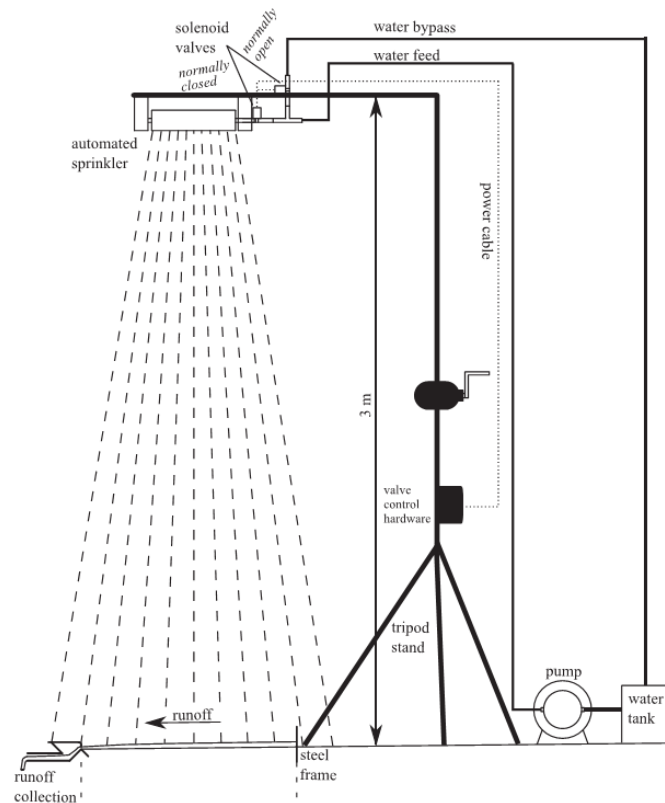


Figur 11: Eksempel på en dråpeformende nedbørssimulator (Hudson, 1993)

Nedbørssimulatorer benyttes både i feltarbeid, hvor man ønsker å studere egenskapene til et spesifikt jordområde, og på laboratorier i studier av for eksempel vanninnholdet i jord og overflatehelning (Kristoffer Tønder Nielsen, 2019).

Selv om nedbørssimulatorer generelt har et bredt anvendelsesområde, har hvert enkelt anlegg vanligvis blitt designet for et ganske spesifikt bruk. Det har blitt gjort få forsøk på å lage et vanningsanlegg som kan simulere et bredt spekter av nedbørintensiteter.

Dette innebærer en åpenbar begrensning, og i sin doktorgradsoppgave beskriver Kristoffer T. Nielsen hvordan bruken av en solenoidkontrollert ventil tillater et bredt intervall av intensiteter. Ved å kjøre en solenoid ventil med forhåndsdefinerte sykluser for når den skal være av og på, kontrolleres den gjennomsnittlige vannføring som produseres i løpet av et tidsintervall. For høyere intensiteter, økes frekvensen av disse syklusene, mens frekvensen reduseres ved behov for lavere intensiteter (Kristoffer T. Nielsen et al., 2019)



Figur 12: Oppsett for en småskala nedbørssimulator (Kristoffer T. Nielsen et al., 2019)

I forbindelse med doktorgraden bygget han et vanningsanlegg som kan reprodusere historiske nedbørshendelser med både konstant og varierende intensitet. Han påpeker at dette gir muligheten til å produsere et bredt spekter av nedbørstyper, som er spesielt viktig i studer at nedbørsavrenning i urbane grønne områder. Anlegget er designet til å produsere nedbør over et areal på én kvadratmeter. Det innebærer at flere simuleringer blir nødvendig for å ta høyde for variasjonene i jordsammensetningen, sammenlignet med vanningsanlegg som dekker større arealer. Men et mindre anlegg er mer mobilt og lettere å bruke i felt, og gir dermed muligheten å studere flere typer overflater innenfor en kortere tidsperiode. Ifølge Nielsen vil et større vanningsanlegg øke kompleksiteten av systemet med hensyn på kontrollstrategier, i den forstand at flere dyser krever koordinering av flere kontrollenheter som bestemmer syklusen til hver dyse.

3.2.1. Høvringen

Mens vanningsanlegget henviset til ovenfor er designet for bruk i felt, eksisterer det et vanningsanlegg som simulerer nedbør på grønne tak her i Norge. På Høvringen avløpsrenseanlegg i Trøndelag ble det i 2016 etablert tre forsøksstak der hensikten er å utvikle og studere fordrøyningskapasiteten til blågrønne og blågrå tak.

Det ene taket består av permeabelt lag med belegningsstein over 10 cm tykt Leca-lag. Det andre taket er et grønt tak, dekt med et lag bergknapp over 10 cm Leca, mens det tredje taket er et svart referansetak. Hvert av takene har et areal på 90 m².

Forsøksfeltet er utstyrt med egen meteorologisk målestasjon og et avansert opplegg for måling av vannmengde som passerer takslukene fra hvert av forsøksfeltene, som gir muligheten til å måle hele spennet av nedbør (Klima 2050, 2016).

Professor ved NTNU, Tone Muthanna er prosjektleder for forsøksstakene på Høvringen. Ifølge henne ferdigstilte de vanningsanlegget sommeren 2018. Designet er relativt enkelt og alt utstyret de benyttet er tilgjengelig på vanlige jernvarebutikker.



Figur 13: Nedbørssimulerende vanningsanlegg på Høvringen (Øfsti & Solbu, 2019)

De benyttet Gardena hagedyser av typen Fox, som gir mindre dråpestørrelser enn vanlig regn. Vanningsanlegget deres er imidlertid bygget kun for å teste ekstremnedbør, hvor dråpestørrelse ifølge henne ikke har særlig betydning. Det eksisterer dyser som kan produsere mer realistiske dråpeformasjoner, men lettere tilgjengelighet og lavere pris talte til fordel for det utstyret de valgte.

Det tok kun noen uker å bygge vanningsanlegget, etter at løsningen var bestemt. Hele anlegget består av fire rader med rør, der hver rad har fire dyser. Dysene er jevnt fordelt over taket, men spredningen blir ikke lik på hver kvadratmeter. Vannføringen ut av hver dyse er den samme, og kan justeres manuelt. En elektronisk vannmåler kontrollerer vannføring både inn og ut av anlegget. De høyeste intensitetene de har produsert så langt er 120 mm/timen, hvilket Muthanna anser som tilstrekkelig.

Anlegget er ikke mobilt, og må nedmonteres om vinteren. Siden vannet som benyttes i anlegget er rent drikkevann, har det så langt krevd lite vedlikehold som følge av forurensing.

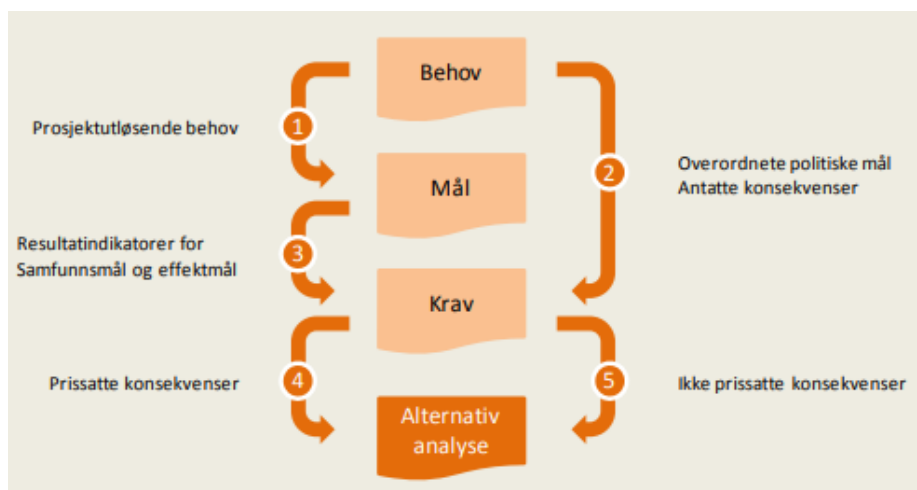
4. Metode

Føringene fra NVE for hvordan vanningsanlegget burde fungere er utgangspunktet for kravspesifikasjonene som presenteres i første del av dette kapittelet. I neste del beskrives metoden som benyttes for å vurdere de ulike alternativene. Deretter presenteres utstyret som utgjør de ulike alternativene, og hvordan de relevante egenskapene er bestemt gjennom testing og beregning. I siste delkapittel er det en kort gjennomgang av programmet EPANET, som i denne oppgaven benyttes til å modellere trykktap.

4.1. Vurderingsmetode

Når man står ovenfor et valg mellom mange alternativer, og der ulike hensyn må tas og veies opp mot hverandre er det nyttig å ha en strukturert tilnærming til beslutningsprosessen. Det finnes mange metoder innenfor prosjektledelse som tilbyr et slikt rammeverk: I store prosjekter brukes ofte konseptvalgutredning (KVU).

KVU er et sett av prosesser der målet er å anbefale et konsept for videre bearbeiding. Først identifiseres behovene, målene og kravene som er utgangspunktet for tiltaket, før potensielle alternativ som kan løse disse behovene avdekkes. Til slutt gjennomføres en alternativanalyse av de mulighetene som oppfyller kravene. (Opak, 2020)



Figur 14: De viktigste stegene i KVU-prosessen (Finansdepartementet, 2010)

KVU-prosessen er en omfattende metode som er påbudt i store statlige investeringsprosjekter, der det er spesielt viktig med et grundig beslutningsgrunnlag. Det ville ikke vært hensiktsmessig å gjennomføre en slik utredning gitt denne oppgavens omfang, men metodikken som benyttes er

inspirert av KVVU-prosessen og følger til de samme overordnede stegene, med hovedfokus på kravspesifikasjonene og alternativanalysen.

De to første stegene i prosessen dekkes i innledningen til og bakgrunnen for denne oppgaven. Som beskrevet der er behovet for vanningsanlegget at man må finne løsninger for overvannshåndtering spesielt tilpasset nordiske klimaforhold. I den sammenhengen forskes det på hvordan grønne tak kan fordrøye og holde tilbake nedbør.

Målet er å etablere et vanningsanlegg som kan bidra i denne forskningen. Mer spesifikt må vanningsanlegget kunne simulere realistisk nedbør, med hensyn på intensitet og uniformitet, som beskrevet i problemstillingen.

Realistisk nedbør vil også kreve automatisert regulering av vannføringen, men dette behandles ikke i denne oppgaven.

4.1.1. Kravspesifikasjoner

Kravspesifikasjonene sammenfatter betingelsene som vanningsanlegget skal oppfylle. Hvert krav formuleres enten som et skal- eller et bør-krav. I selve alternativanalysen brukes førstnevnte til å avgjøre om løsningsalternativer er gyldige, mens bør-kravene benyttes videre til å drøfte egnetheten til de gyldige alternativene.

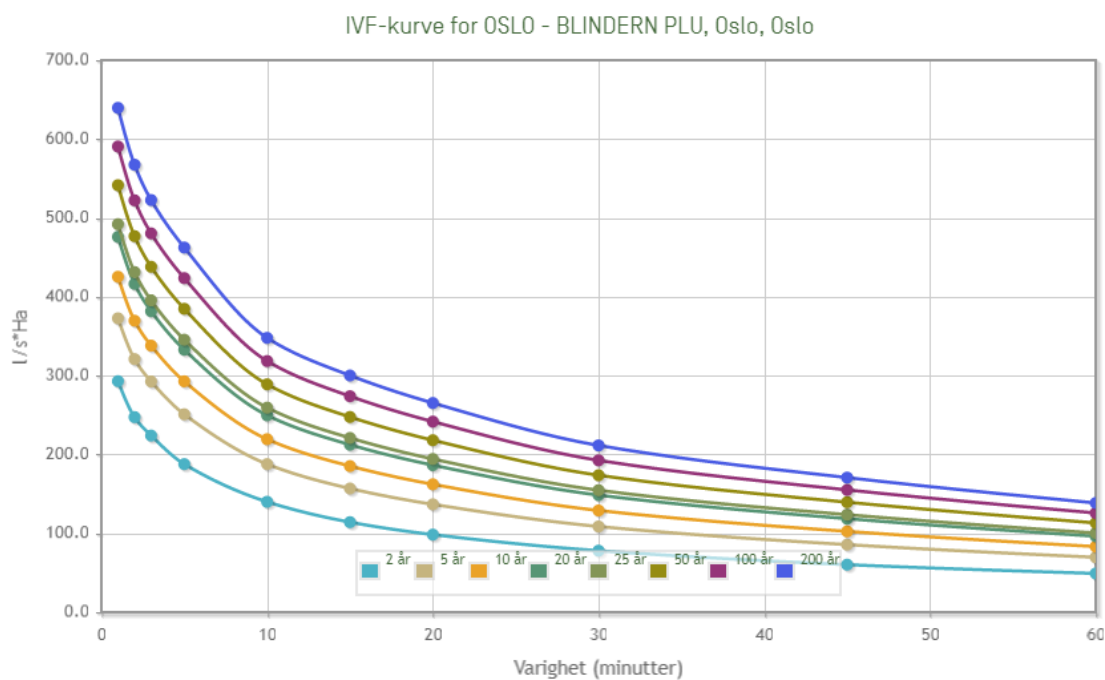
Kravene er kommet frem til i samarbeid med NVE, gjennom møter og epostutveksling (se vedlegg). Avsnittene nedenfor presenterer bakgrunnen for kravene.

Intensitet og vannføring

Tidlig i prosessen uttrykte NVE et ønske om å etablere et vanningsanlegg som kan simulere et bredt spekter av nedbørshendelser: både ulike modellregn og historiske nedbørshendelser, spesielt ekstreme hendelser. Dette innebærer at vanningsanlegget må kunne produsere et stort intervall av trinnløst justerbare intensiteter.

Etter hvert ble det spesifisert at det den maksimale vannføringen skulle tilsvare en nedbørshendelse på 200 års returperiode og en varighet på 2 minutter.

Med utgangspunkt i IVF-kurvene fra Blindern, tilsvarer det en intensitet på 567.5 l/s×ha.



Figur 15: IVF-kurver fra Oslo – Blindern (Norsk Klimaservicesenter, 2020)

Tabell 1: Returverdi for nedbør fra Oslo - Blindern (Norsk Klimaservicesenter, 2020)

Returperiode (År)	Returverdi for nedbør (l/s×ha)			
	Varighet			
	1 min	2 min	3 min	5 min
2	293,00	247,40	224,00	187,80
5	372,70	321,00	292,60	251,00
10	425,40	369,70	338,10	292,80
20	476,00	416,40	381,70	332,90
25	492,10	431,30	395,50	345,60
50	541,50	476,90	438,10	384,80
100	590,60	522,30	480,40	423,70
200	639,60	567,50	522,70	462,50

I nedre område anslo NVE det som realistisk å legge opp til 2 mm/time som minste simulerte intensitet.

Gitt det grønne takets areal på 50 m² (0,005 ha), tilsvarer dette vannføringer i intervallet mellom 1,7 l/min og 170 l/min.

Tabell 2: Minimum- og maksimumintensitet og tilhørende vannføring gitt takets areal på 50 m²

	Intensitet			Vannføring	
	I			Q = I×A	
	mm/time	mm/min	l/s/ha	l/s	l/min
Min	2	0,03	5,6	0,028	1,7
Max	204	3,4	568	2,84	170

I og med et ønske om å simulere faktiske nedbørshendelser, er det nødvendig med intensiteter i et kontinuerlig intervall fra så lavt som mulig (ideelt null) til maksimum intensitet. Det er derfor relevant å identifisere minimum og maksimum vannføring for de ulike alternativene.

Det viktigste er at vanningsanlegget kan simulere ekstreme nedbørshendelser. Hvis lav intensitet er vanskelig å få til, skal derfor høy intensitet prioriteres.

Spredning

Når det kommer til spredningen av vannet over taket, er en uniform spredning ønskelig, men ikke avgjørende. Det oppstod tidlig en forståelse for at det er vanskelig å oppnå en helt jevn fordeling av nedbøren, hovedsakelig fordi vannstrømmen ut av både sprederer og dyser er sirkulær, mens området som skal dekkes er kvadratisk. Samtidig som at uniform spredning får mindre å si, da LECA har såpass høy konduktivitet at vannet fordeler seg rimelig godt i massene. Ved lavere intensitet vil spredningen være av større betydning.

Det er imidlertid veldig viktig at alt vannet havner innenfor taket, da det ellers vil være vanskelig å kontrollere vannføringen ut mot vannføringen inn.

Trykk

For å redusere slitasje på systemet, samt ikke være avhengig av å måtte benytte veldig robuste komponenter og en veldig kraftig pumpe, burde maksimalt trykk ligge rundt 5 bar.

For at intensiteten skal være lik over hele taket, må vannføringen ut av hvert punkt være den samme. Det innebærer at trykket i hver dyse/spreder/hull skal være omtrent den samme over hele systemet.

Hastighet og dråpestørrelse

Behovet for å ta hensyn til hastighet og dråpestørrelse ble diskutert, men da dette ansees som mer relevant i forbindelse med erosjon, og dette ikke er en relevant parameter på forsøksstakene, ble det besluttet å se bort fra dette. Unntaket er at det ikke burde velges utstyr som produserer vann med så liten dråpestørrelse at det i praksis utgjør tåke.

Tid og tilgjengelighet

Det har ikke blitt gitt en spesifikk frist for etableringen av vanningsanlegget, men intensjonen har vært å knytte flere masteroppgaver til forsøk med vanningsanlegget allerede våren 2021. Det er derfor en stor fordel om vanningsanlegget kan ferdigstilles høsten 2020. I den sammenhengen er et fortrinn om utstyret er lett tilgjengelig og designet relativt enkelt. Tilgjengelighet i denne sammenhengen relaterer seg hovedsakelig til hvor lett det er å få tak i utstyret, men også kostnadene av det.

Oppsummering

Føringene presentert ovenfor er spesifisert i følgende krav:

Tabell 3: Skal-krav

Kategori	Skal-krav
Intensitet og vannføring	Den samlede maksvannføringen skal være minst 170 l/min
Trykk	Trykket i systemet skal ikke overskride 10 bar

Det første skal-kravet reflekterer at vanningsanlegget må kunne simulere ekstreme nedbørshendelser. Det andre er relatert til at det ikke er ønskelig med et anlegg som krever spesialisert utstyr som kan tåle høyt trykk.

Tabell 4: Bør-krav

Kategori	Bør-krav
Intensitet og vannføring	Den totale minimumsvannføringen bør være maks 1,7 l/min
	Den samlede vannføringen bør kunne justeres trinnløst
Spredning	Spredningen bør være relativt uniform over taket
Trykk	Trykket i systemet bør ikke overskride 5 bar
	Trykket i hvert utløpspunkt bør være tilnærmet likt over hele systemet
Tid og tilgjengelighet	Utstyret bør være lett tilgjengelig

4.1.2. Alternativanalyse

I den første delen av alternativanalysen beskrives de alternative løsningene. Alternativene skal beskrives på en måte som gjør dem lett å sammenligne, hvilket innebærer at de må beskrives innenfor de samme egenskapene. Disse egenskapene er gitt av kravspesifikasjonene: samlet vannføring, spredning, trykk og tilgjengelighet.

I tillegg til å beskrive de aktuelle alternative, skal det vanligvis beskrives et nullalternativ, som alternativene sammenlignes mot. Nullalternativet er en videreføring av dagens løsning, men siden det ikke eksisterer en løsning for å simulere nedbør på forsøksstakene per i dag, inkluderes det ikke et nullalternativ i denne analysen. Alternativene sammenlignes derfor heller opp mot hverandre.

Grunnlaget for sammenligningen er vurderingen av alternativenes kravoppnåelse. Alternativ som ikke oppfyller skal krav må forkastes, mens de øvrige alternativene vurderes etter i hvor stor grad de oppfyller bør-kravene (ikke oppfylt, delvis eller fullstendig).

Et grovt kostnadsestimat gjennomføres på de mest aktuelle alternativene, som i kombinasjon med den samlede vurderingen av hvilket alternativ som oppfyller kravene best, resulterer i en anbefaling.

4.1.3. Aktuelle alternativer

På bakgrunn av informasjonen om eksisterende vanningsanlegg presentert i teoridelen, er følgende utstyr identifisert som aktuelle løsninger for vanningsanlegget.

- I. Gardena sprederslange
- II. Axley svetteslange
- III. Gardena Fox spreder
- IV. Diverse BETE dyser

De tre første alternativene er alle rimelige og lett tilgjengelig på de fleste byggevarehus. Sprederen fra Gardena er den samme som de har benyttet på vanningsanlegget på Høvringen, og derfor spesielt relevant å vurdere.

Sprederen gir ifølge produsenten en fin spray egnet for vanning av bed og små hageflekker. Rekkevidden er maksimalt 11 m i diameter, men en reduksjon i vanntrykket vil redusere diameteren. (Gardena, 2020a).

Anlegget på Høvringen simulerer ikke nedbør med lav intensitet, og tilbyr derfor ingen erfaring rundt hvordan vannstrømmen fra sprederen oppfører seg ved lav vannføring. Oppgaven inkluderer derfor også en vurdering av svetteslangen og sprederslangen. Begge disse tilfører vann ved lav intensitet, men har større usikkerhet knyttet til trykktap langs slangene.

Sprederslangen er en flat slange med hull på den ene siden, og kan plasseres enten med vannstrålen pekende nedover eller oppover. Ifølge produsenten gir sprederslangen en fin dusj for bed, stier og små områder (Gardena, 2020b). Slangen som testes er 15 m, men kan utvides til maksimum 22,5 m, og forkortes etter ønske.

En svetteslange er en perforert slange som plasseres direkte i bed og langsomt fukter jorden ved at vannet trenger gjennom de små hullene i slangen. Slangen som testes er 15 m og kan forkortes etter ønske.

Produsentene av de tre første produktene oppgir begrenset informasjon om spekteret av vannføring, trykk og spredningen til produktene. Det er derfor nødvendig å gjennomføre målinger for å bestemme dette.

Dysene fra BETE brukes i ulike industrisammenhenger (overflatebehandling, spyling, brannslukking etc), og er betydelig dyrere og vanskeligere å få tak i. De finnes imidlertid i mange varianter, og kan produsere vannstrøm i alle relevante intensiteter. De tekniske spesifikasjonene som er tilgjengelig for dysene, inkluderer blant annet K-faktor, arbeidstrykk og spredningsvinkel, og gjør det mulig å beregne trykktap, vannføring og spredning, og således vurdere de ulike dysenes egnethet.

Dysene er valgt på bakgrunn av minimum og maksimum vannføring. Siden anlegget på Høvringen viser at vanlige Gardena-spredeere kan simulere nedbør med høy intensitet, er det spesielt viktig å inkludere dyser som kan produsere lave og middels høye intensiteter. Videre er det en fordel med dyser som kan produsere et så bredt intervall av vannføringer som mulig. De aktuelle dysene er presentert i tabell 5.

Tabell 5: Aktuelle BETE-dyser og tilhørende K-faktor, vannføring og spredningsvinkel

Dysenavn	K-faktor	Vannføring		Tilgjengelige spredningsvinkler (fullkone) a
		Min (0,2 bar)	Max (5 bar)	
	K l/min $\times \sqrt{\text{bar}}$	Qmin l/min	Qmax l/min	
EZWL 1/4	0,587	0,276	1,25	30°, 60°, 90°, 120°
EZWL1	2,35	1,1	5,01	30°, 60°, 90°, 120°
EZTF10	9,12	4,99	20,4	60°, 90°, 120°, 150°, 170°



Figur 16: BETE dyse av typen EZTF (BETE, 2020)



Figur 17: Fullkone spredning (BETE, 2020)

4.2. EPANET

Et vanningsanlegg som består av rør og dyser eller spredere, vil i praksis utgjøre et trykksatt rørnettverk. Vanningsanlegget denne oppgaven tar for seg, vil derfor delvis være en kandidat for hydraulisk simulering i dataprogrammet EPANET. Sprederslangen og svetteslangen kan ikke simuleres.

EPANET har et vidt spekter av bruksområder - i denne oppgaven benyttes det til å identifiser trykk i vanningsanlegget. Det skal modelleres et enkelt nettverk bestående av rør, noder, en pumpe og en vannkilde. Noen av nodene representerer dysene og spredere. Det gjennomføres simuleringer på modellen, som blant annet vil resultere i vannforbruk og trykk i hver node.

Tabell 6 gir en oversikt over de ulike elementene som skal inngå i modellen. Den viser også den relevante informasjonen som må legges inn (inndata) og noen av resultatene som produseres (utdata).

Tabell 6: Oversikt over elementer som inngår i EPANET-modellene, med relevant inndata og utdata

Element	Beskrivelse	Inndata	Utdata
Rør	En kobling som frakter vann fra et punkt i nettverket til et annet. Antas å alltid være full.	<ul style="list-style-type: none"> • Start- og sluttnode • Diameter • Lengde • Ruhetskoeffisient • Status (åpen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Vannføring • Hastighet • Falltap (D-W)

Noder	<p>Punkt i nettverket hvor rørene kobles sammen og hvor vann tilføres eller tas ut av nettverket.</p> <p>I denne oppgaven er sprederne og dysene representert av noder.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Høyde • Vannforbruk (0) • Utløpskoeffisient 	<ul style="list-style-type: none"> • Vannføring • Trykk
Pumper	<p>En kobling mellom to noder (men uten lengdeutstrekning).</p> <p>Tilfører vannet energi slik at trykkehøyden heves.</p> <p>Strømning gjennom pumpen kan kun gå i én retning og EPANET tillater ikke pumpen å driftes utover pumpekurven.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Start- og sluttnode • Pumpekurve 	
Pumpekurve	<p>Angir forholdet mellom trykk og vannføring en pumpe kan produsere.</p> <p>Må ha avtagende trykk for økende vannføring.</p> <p>Pumpekaraktistikkene benyttet i denne oppgaven er for en pumpe fra Pedrollo (CP210A) (Pedrollo, 2020).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Datapunkt for trykk og tilhørende vannføring (minst to) 	
Vannkilde	<p>En node som representerer en ekstern, "utømmelig" kilde til vann (innsjø, elv eller grunnvannsakvifer, etc).</p> <p>Vannet som skal benyttes til vanningsanlegget på Ås kommer opprinnelig fra Årungen, men i denne simuleringen angis utløpet på ved takene som vannkilden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Høyde 	

(Rossman, 2000)

Ruhetskoeffisient

EPANET-manualen oppgir ulike ruhetskoeffisienter for forskjellige materialer. I denne oppgaven tas det utgangspunkt i at det vil benyttes stålrør, hvilket innebærer en ruhetskoeffisient lik $0,15 \text{ feet} \times 10^{-3}$ eller 0,05 mm.

Utløpskoeffisient

Ved å oppgi en utløpskoeffisient vil noden fungere som en dyse eller spreder. Koeffisienten angir sammenhengen mellom trykk og vannføring ut av noden, med følgende ligning:

$$Q = C \times P^g$$

Q – vannføring C – utløpskoeffisient P – trykk g – trykkeksponent

For dyser og spreder er g lik 0,5, hvilket innebærer at ligningen ovenfor tilsvarer ligningen for K-faktoren:

$$Q = K \times \sqrt{P}$$

4.3. Vannføring og trykk

Metoden for å måle vannføringen er lik for sprederslangen og svetteslangen, og beskrives i første underkapittel. Neste underkapittel beskriver hvordan vannføringen måles for sprederen. Alle testene ble gjennomført på vannlaben på NMBU.

Felles utstyr

- Vannkran
- Slange
- Trykkmåler (Armfield)
- Vekt
- Tidtaker (mobil)

Trykkmåleren som ble benyttet, brukes til vanlig på en av hydraulikkbenkene i vannlaben. For å kunne koble den til utstyret som ble testet, ble det festet et slangetilkoblingsstykke til utløpet av trykkmåleren. Da utløpet i utgangspunktet ikke er kompatibelt med tilkoblingsstykke, benyttet vi et rørstykke med rørleggerteip samt skrutvinger for å holde delene på plass. I innløpet ble trykkmåleren koblet til en slange direkte knyttet til vannkranen.



Figur 18: Trykkmåler oppsett, Ås, 14. juli 2020

Felles formler

Volum

$$V = w/1000$$

w – vekt (g) V – volum (l)

Vannføring

$$Q = V/t$$

Q – vannføring (l/min) t – tid (min) V – volum (l)

4.3.1. Sprederslange og svetteslange

Formålet med disse testene er for det første å bestemme minimum og maksimum vannføring slangene kan tilføre for et gitt trykk. I tillegg skal forsøket identifisere eventuelt trykktap langs slangene.

Trykket måles kun i innløpet, men måling av vannføring ved i start og slutt av slangen, indikerer et eventuelt trykktap langs slangen.



Figur 19: Gardena sprederslange (Gardena, 2020b)



Figur 20: Axley svetteslange (jula.no, 2020)

Utstyr

- Sprederslange
- Svetteslange
- Aluminiumsbokser (lengde 26 cm)
- Stor balje

Prosedyre

For å unngå at adhesjon skulle påvirke tømning av boksene og baljen, ble disse fuktet først.

I den første testen ble vannføringen langs hele slangen målt. Det viste seg imidlertid å være en utfordring å sikre likt antall hull på hvert målepunkt (hver av boksene), siden lengden på hver boks er relativt kort sammenlignet med avstanden mellom hullene. I tillegg så det ut til at avstanden mellom hullene kunne variere. I de påfølgende testene ble derfor fem bokser plassert inntil hverandre henholdsvis innerst og ytterst på slangen. Dette sikrer i større grad likt antall hull på hvert av de to målepunktene ("innerst" og "ytterst").

Med tanke på at formålet her er å identifisere eventuelt trykktap i slangen, og dette trykktapet antas å fordele seg jevnt over slangen (i og med at slangen ikke har noen innsnevringer eller bend), er det like greit å plassere boksene samlet innerst og ytterst, som jevnt fordelt langs slangen.

Utover plasseringen av boksene, var prosedyren for alle testene lik, og som beskrevet nedenfor:

Prosedyre – Måling av vannføring langs slangen

- I. Slå på vann til ønsket trykk og sjekk at vann kommer ut av hele slangen
- II. Flytt slangen over boksene – sjekk at vannet ut av slangen samles i boksene
- III. Ta tiden fra slangen ligger over boksene – her er det viktig å måle over lang nok tid til at feilmarginen ved tidtaking blir relativt liten (i forhold til total tid)

- IV. Avslutt tiden og fjern umiddelbart slangen fra boksen
- V. Vei hver boks for å bestemme volum i hver boks
- VI. Beregn vannføring fra volum og tid



Figur 21: Oppsett for måling av vannføring og trykk for sprederslangen, Ås, 14. juli 2020



Figur 22: Oppsett for måling av vannføring og trykk for svetteslangen, Ås, 14. juli 2020



Figur 23: Detaljbilde av sprederslange, Ås, 14. juli 2020



Figur 24: Detaljbilde av svetteslange, Ås, 14. juli 2020

I tillegg til å måle vannføringen langs slangen, ble det gjennomført målinger av den totale vannføringen.

Prosedyre – Måling av total vannføring

- I. Slå på vann til ønsket trykk
- II. Flytt hele slangen (kveilet) i en stor balje og dekk til med presenning for å hindre at vann spruter utenfor
- III. Ta tiden fra slangen er i balje
- IV. Avslutt tiden og ta slangen umiddelbart ut av baljen
- V. Skru av vann
- VI. Vei baljen for å bestemme volum
- VII. Beregn vannføring fra volum og tid

4.3.2. Gardena spreder

Formålet med dette forsøket er å bestemme den minste vannføringen sprederen kan tilføre, uten at strålen mister en definert spredningsvinkel. I tillegg skal det gjennomføres målinger av trykk og tilhørende vannføringen, som skal benyttes til å beregne K-faktoren. K-faktoren gjør det mulig å modellere et spredere i nettverk i EPANET.



Utstyr

- Gardena Fox spreder
- Bøtte

Prosedyre – Måling av vannføring og trykk

Før første test på fuktet bøtte uten vann først. Sprederen festes til trykkmåleren og plasseres slik at utløpet pekere vertikalt nedover

- I. Slå på vann til ønsket trykk – Begynn på lavest trykk, og øk for hver måling, da dette reduserer muligheten for feil trykkmåling.
- II. Flytt bøtte under spreder
- III. Ta tiden fra når sprederen er over bøtten
- IV. Avslutt tiden og fjern umiddelbart bøtten fra sprederen
- V. Vei bøtten med vann for å bestemme volum
- VI. Beregn vannføring fra volum og tid
- VII. Beregn K faktor ut ifra trykk og volumstrøm



Figur 25: Oppsett for måling av vannføring og trykk for sprederen, Ås, 14.juli 2020

Formel - K-faktor

$$K = \frac{Q}{\sqrt{P}}$$

K – k-faktor (l/min×√bar)

Q – vannføring (l/min)

P – trykk (bar)

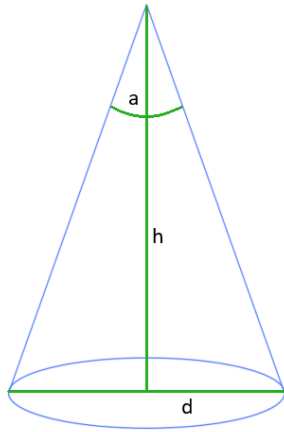
4.4. Spredning

Det er ønskelig med en så jevn spredning av vannet over taket som mulig. I resultatdelen av denne oppgaven presenteres ulike kombinasjoner av dyser/spredere og den tilhørende spredningen de gir. Disse spredningsalternativene utgjør også utgangspunktet for modelleringen av nettverket i EPANET, med hensyn på rørlengde og nodenes høyde over taket.

For å kunne beregne geometrien til spredningen en dyse/spreder tilfører, er det nødvendig å kjenne til spredningsvinkelen. For BETE-dysene er vinklene oppgitt av produsenten. Samtlige dyser kan produsere stråler med forskjellige vinkler (mellom 30° og 170°).

For å estimere vinkelen på vannstrålen til Gardena sprederen, benyttes bilder av den påslåtte sprederen. Bildene importeres i AutoCAD og ved hjelp av et måleverktøy i programmet estimeres vinkelen på strålen.

På grunnlag av spredningsvinkelen og forventet høyde over taket, beregnes arealet vannstrålen teoretisk skal dekke.



a – spredningsvinkel

h – høyde over tak

d – diameter

A – areal strålen dekker

$$d = 2 \times h \times \tan(a/2)$$

$$A = \pi \times (d/2)^2$$

Høyere plassering over taket, gir et større dekningsareal, men større høyde gjør også vannstrålen mer utsatt for vind og annen ytre påvirkning. Vannstrålen kan ikke antas å beholde en konisk form ved alle høyder. Leverandøren av BETE dysene oppga i telefonsamtale at de ikke anbefaler en høyde over 1 meter. Maks høyde over taket settes derfor til 1 meter.

Total vannføring på taket

Spredningsalternativet bestemmer også den totale vannføringen og dermed intensitet over takarealet. Vannføringene som bestemmes i forsøkene beskrevet ovenfor er per spreder, det samme gjelder vannføringen oppgitt av BETE for dysene. De ulike spredningsalternativene har forskjellige antall dyser/spredere, og i resultatdelen presenteres den totale vannføringen for hvert alternativ.

5. Resultater

I dette kapittelet presenteres testresultatene og beregningene, som beskriver hvert alternativenes egenskaper med hensyn på vannføring, spredning og trykk.

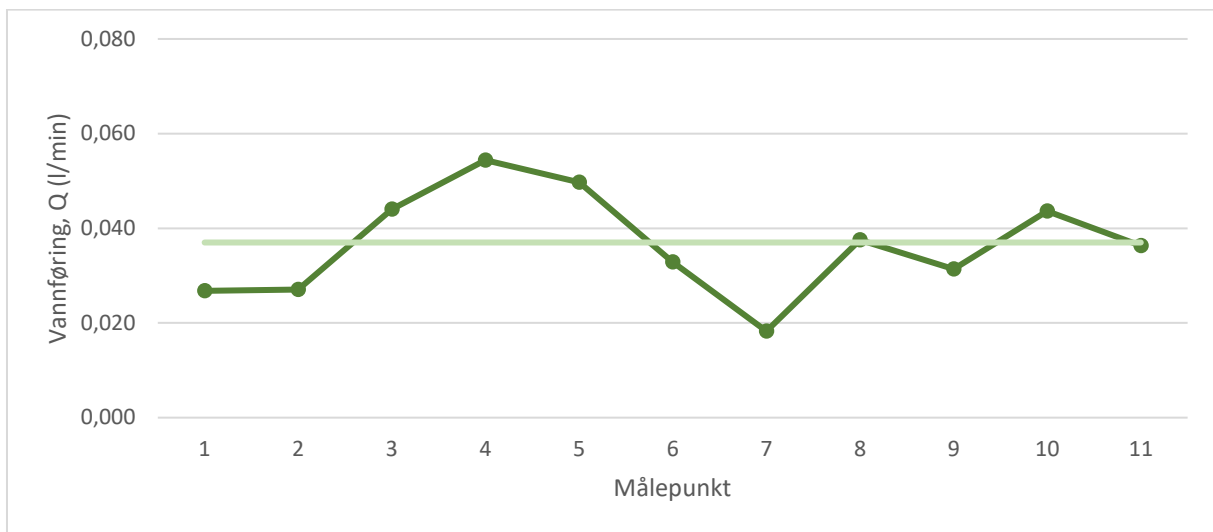
5.1. Vannføring og trykk

5.1.1. Sprederslange

Tabell 7: Målinger av vannføring og tilhørende trykk for sprederslangen

Test	Trykk	Tid	Målepunkt	Gjennomsnittlig vannføring
nr	P bar	t min		Q l/min
1	1,1	15	Hele slangen	0,0366
2	1,1	5	Innerst	0,0976
			Ytterst	0,0924
			%-diff	5,4
3	0,6	15	Innerst	0,0210
			Ytterst	0,0358
			%-diff	41,4
4	1,4	6	Innerst	0,277
			Ytterst	0,196
			%-diff	-29,2
5	Max Q	2	Innerst	0,321
			Ytterst	0,235
			%-diff	-26,9

I den første testen ble vannføringen langs hele slangen målt, som gir en indikasjon på hvordan vannføringen varierer langs slangen. Figur 26 viser at vannføringen langs slangen varierer mellom 0,20 og 0,55 l/min. Denne testen viser imidlertid ingen tydelig trend i variasjonen.



Figur 26: Vannføring langs sprederslangen (test nr.1)

Figur 27 illustrerer trykktapet i de fire påfølgende testene. Ved de to laveste vannføringene, differansen ganske liten. Det er imidlertid et tydelig trykktap, når vannføringen øker. Dette utgjør en stor ulempe i en nedbørssimulerende sammenheng, da det medfører at spredningen av vannet over taket blir uforutsigbar og lite uniform.



Figur 27: Differanse i vannføring mellom innerst og ytterst på slangen (test nr. 2-5)

Målingene av total vannføring, presentert i tabell 8, viser at sprederslangen kan tilføre vannføringer i et relativt stort intervall.

Tabell 8: Målinger av total vannføring og tilhørende trykk for sprederslangen

Test	Trykk	Tid	Volum	Total vannføring
nr	P bar	t min	V l	Qt l/min.
1	0,6	5	4,44	0,888
2	1,2	7	18,6	2,65
3	1,8	3	22,9	7,64
4	2,6	1	10,8	10,84
5	3,5	1	14,5	14,53

Feilkilder

Forsøket ble gjennomført utendørs, og under utførelsen begynte det så vidt å regne. Dette kan ha påvirket volumet i boksene, men regnet var veldig lite sammenlignet med vannføringen ut av slangen. For å redusere påvirkning ytterligere, ble det plassert lokk på boksene i det målingen pågikk. Det var imidlertid en forsinkelse fra når tiden ble startet til når lokkene ble plassert.

Antall hull per målepunkt kan variere og det er vanskelig å identifisere de i forkant da de knapt er synlige, i tillegg kan det forekomme lekkasje i startstykket og endestykket på slangen.

Den største feilkilden på målingene av vannføring langs slangen var trykkmåleren i innløpet. Trykkmåleren viste mest sannsynlig ikke riktig trykk på de fem første målingene, da pilen så ut til å henge seg opp. På de påfølgende målingene (av total vannføring) kunne vi unngå dette ved å kakke på glasset, slik at pilen løsnet.

Resultatene fra de fem første testene vil derfor ikke kunne benyttes til å bestemme en sammenheng mellom trykk og vannføring langs slangen. De er likevel gyldige med hensyn på å identifisere om et trykkfall finner sted.

Det er også en mulighet, dog antatt liten, at variasjonen i vannføring skyldes trykkvariasjon i det kommunale nettet gjennom dagen.

5.1.2. Svetteslange

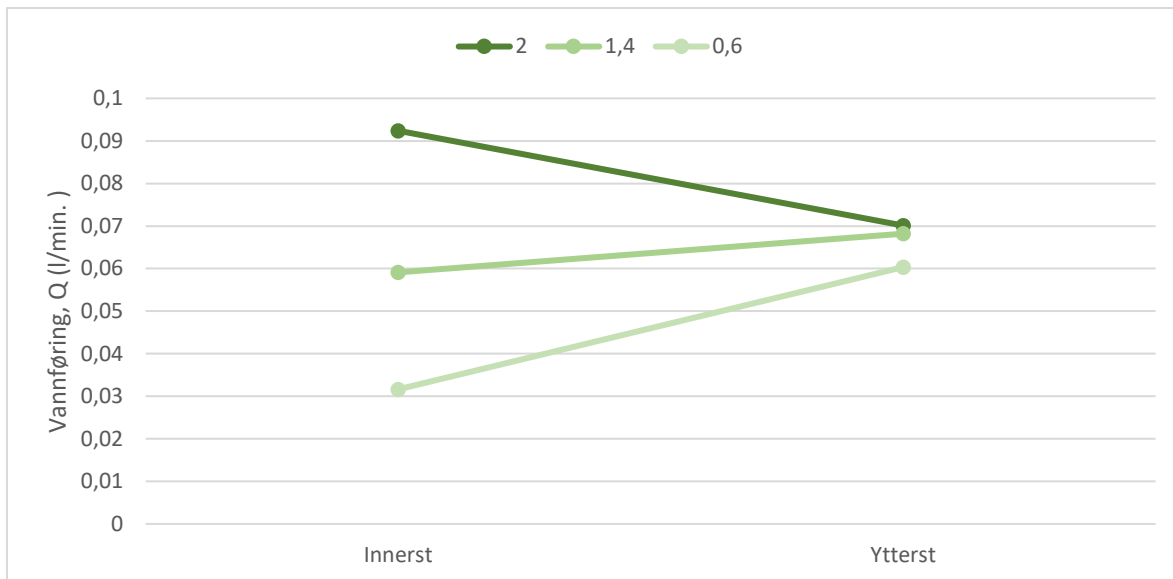
Tabell 9: Målinger av vannføring og tilhørende trykk for svetteslangen

Test	Trykk	Tid	Målepunkt	Gjennomsnittlig vannføring
nr	P bar	t min		Q l/min.
1	2	5	Innerst	0,0924
			Ytterst	0,0701
			%-diff	-24,1
2	1,4	5	Innerst	0,0591
			Ytterst	0,0682
			%-diff	15,4
3	0,6	7	Innerst	0,0316
			Ytterst	0,0603
			%-diff	90,8

Resultatene presentert i tabell 9, viser en enda større variasjon i vannføringene, sammenlignet med de for sprederslangen. Figur 28 illustrerer at vannføringen i slangen fra innerst til ytterst varierer betydelig på alle tre målinger. Et spesielt trekk ved disse resultatene er at vannføringen også varierer retningen, mellom de tre målingene. Ved det høyeste trykket (2 bar) gikk som ventet vannføringen ned fra start til slutt, hele 24,1%. Ved nest høyeste trykk (1,4 bar) gikk vannføringen noe opp (15,4 %), mens det ved laveste trykk (0,6 bar) gikk opp hele 90,8%.

Årsaken til dette er mest sannsynlig at vi har to motstridende effekter med hensyn på trykk i slangen: På den ene siden vil friksjon i slangen føre til trykktap. Samtidig vil vannuttaket underveis i slangen reduserer vannets hastighet, som på sin side fører til økt trykk. Hvis den første effekten er relativt mindre enn den andre, vil man altså se økt trykk og økt vannføring langs slangen. Forholdet mellom disse effektene, ser ut til å variere med trykket: Ved lavt trykk er sistnevnte effekt størst, mens førstnevnte effekt er størst ved høyt trykk.

Sammenhengen mellom disse effektene gjør vannføringen i svetteslangen spesielt uforutsigbar, og enda mindre egnet enn sprederslangen til bruk i et vanningsanlegg.



Figur 28: Differanse i vannføring mellom innerst og ytterst på slangen

Tabell 10 viser resultatet for målingene av total vannføring, og til tross for stor trykkvariasjon, holder vannføringen seg mellom 2,59 og 2,86 l/min. Det korte intervallet av vannføringer, gjør svetteslangen særdeles dårlig egnet i en nedbørssimulerende sammenheng.

Tabell 10: Målinger av total vannføring og tilhørende trykk for svetteslangen

Test nr	Trykk P bar	Tid t min	Volum V l	Vannføring Q l/min.
1	4	3	8,58	2,86
2	1,5	3	7,78	2,59
3	2,9	3	8,20	2,73

Feilkilder

De samme generelle feilkildene knyttet til måleinstrumentene (trykkmåler og vekt) gjelder her som ved de andre forsøkene. I likhet med sprederslangen kan nedbør ha påvirket vannvolumet som ble målt, men også i disse testene forsøkte vi å dekke måleboksene for å hindre uønsket vann.

5.1.3. Gardena spreder

Tabellen nedenfor viser resultatene fra vannføringsmålinger der formålet var å ha så lav vannføring som mulig.

Tabell 11: Målinger av minimum vannføring (ikke målbart trykk)

Måling	Tid	Volum	Vannføring
Nr	t	V	Q
	min	l	l/min
1	0,250	0,600	2,40
2	0,167	0,410	2,46
3	0,167	0,205	1,23

Vannstrålen sprederen produserer er fullkonisk ved høye vannføringer, men mister formen etter hvert som intensiteten avtar. Det ble derfor gjennomført et forsøk for å prøve å identifisere de minste vannføringene det var mulig å ha, uten at vannstrømmen mistet koneformen. Disse vannføringene vil i praksis fungere som minimumsvannføring per spreder, selv om sprederen kan produsere vann med lavere intensitet (som da vil dryppe ut heller en spres jevnt). Resultatene av disse testene er presentert i tabell 12.

Tabell 12: Målinger av minste vannføring med koneformet vannstrøm

Måling	Tid	Tid	Volum	Volum	Q
Nr	t	t	V	V	Q
	s	min	ml	l	l/min
1	15	0,25	1150	1,2	4,6
2	10	0,167	800	0,80	4,8
3	10	0,167	825	0,83	5,0
4	10	0,167	900	0,90	5,4
5	10	0,167	870	0,87	5,2
Snitt					5,0

I den neste delen av forsøket var hensikten å identifisere sammenhengen mellom vannføring og kvadratroten av trykk (K-faktoren). Tabell 13 viser resultatene fra disse testene.

Tabell 13: Målinger av trykk, tid og volum med tilhørende beregning av vannføring og K-faktor

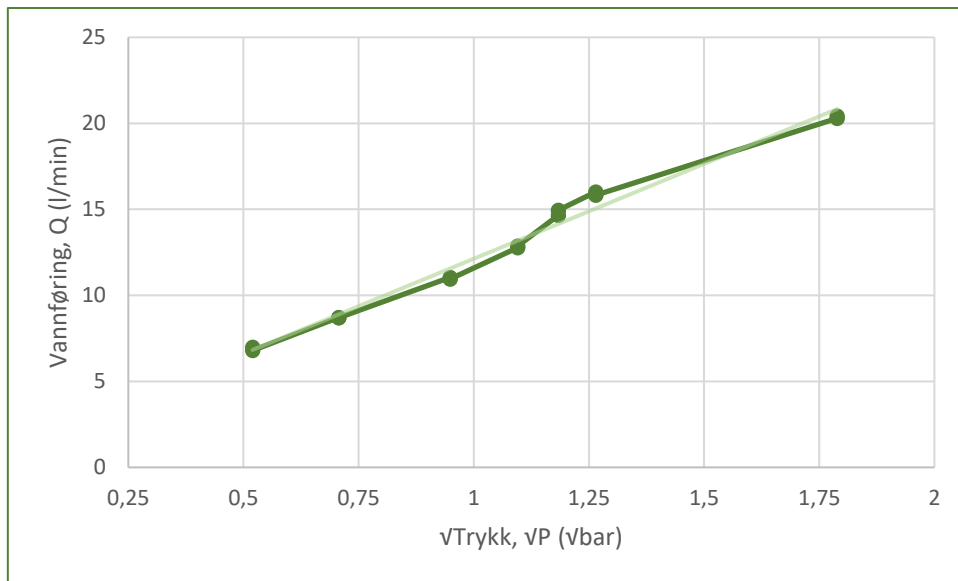
Måling	Trykk	Tid	Volum	Vannføring	K-faktor
nr	P bar	t min	V l	Q l/min	K l/min $\times\sqrt{\text{bar}}$
1	na	0,17	0,663	3,98	na
2	0,27	0,17	1,16	6,98	13,4
3	0,27	0,50	3,40	6,79	13,1
4	0,5	0,50	4,36	8,71	12,3
5	0,5	0,50	4,35	8,69	12,3
6	0,9	0,50	5,52	11,0	11,6
7	0,9	0,50	5,48	11,0	11,5
8	1,2	0,50	6,39	12,8	11,7
9	1,2	0,50	6,44	12,9	11,8
10	1,4	0,52	7,57	14,7	12,4
11	1,4	0,50	7,48	15,0	12,6
12	1,6	0,50	8,01	16,0	12,7
13	1,6	0,50	7,92	15,8	12,5
14	3,2	0,33	6,77	20,3	11,3
15	3,2	0,33	6,81	20,4	11,4

Ikke uventet varierer den beregnede K-faktoren noe. Som vist i tabell 14 er den gjennomsnittlige K-faktoren 12,2 l/min $\times\sqrt{\text{bar}}$, og det relative standardavviket kun 5,11 %. Denne K-faktoren benyttes i modelleringen av sprederen i EPANET.

Tabell 14: Gjennomsnittlig K-faktor med tilhørende standardavvik

Gjennomsnitt	Standardavvik	Relativt standardavvik
μ l/min $\times\sqrt{\text{bar}}$	σ l/min $\times\sqrt{\text{bar}}$	$\sigma^*=\sigma/\mu$
12,2	0,623	5,11 %

Figur 29 gir en grafisk fremstilling av sammenhengen mellom vannføringen og kvadratroten av trykk. En lineær sammenheng indikerer en konstant K-faktor, som er representert ved stigningstallet til regresjonslinjen.



Figur 29: Grafisk fremstilling av sammenheng mellom vannføring og kvadratroten av trykk

Feilkilder

I løpet av de forskjellige forsøkene viste trykkmåleren seg å være noe ustabil. Mer spesifikt hadde pilen en tendens til å henge seg opp når trykket ble redusert (ikke justere seg nedover i takt med redusert vannføring). Ved å starte på laveste trykk, og gradvis øke, unngikk vi i stor grad dette problemet. Trykkmåleren er likevel en betydelig feilkilde,

Utover dette er også forsinkelse mellom tidtaking og flytting av bøtten en relevant feilkilde. Den potensielle feilmarginen knyttet til dette reduseres imidlertid ved å benytte lange nok tidsintervaller: Eventuelle forsinkelser er i størrelsesorden på noen tiendedels sekunder, mens de fleste målingene ble gjort på 30 sekunders intervaller.

5.2. Spredning

5.2.1. Spredningsvinkel – Gardena spreder



Figur 30: Måling 1 - 107 grader, Ås, 14.juli 2020



Figur 32: Måling 3 - 109 grader, Ås, 14.juli 2020



Figur 31: MÅling 2 - 106 grader, Ås, 14.juli 2020



Figur 33: Måling 4 - 104 grader, Ås, 14.juli 202

Tabell 15: Målinger av spredningsvinkelen

Måling Nr	Vinkel grader
1	107
2	106
3	109
4	104
Snitt	107

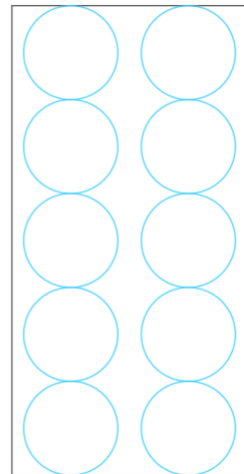
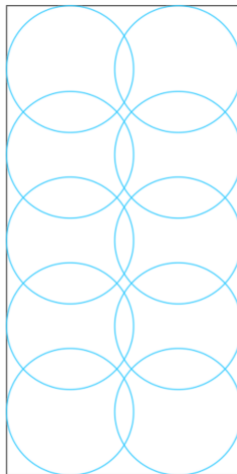
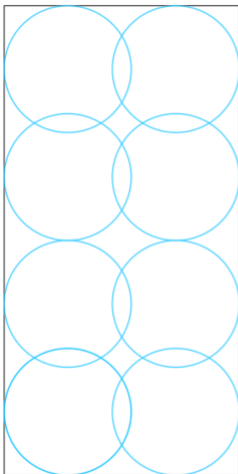
5.2.2. Spredningsalternativer

Gardena spreder

Gitt en vinkel på 107 grader og høyde over taket mellom 0,75 og 1 m, er det utarbeidet tre alternativer for spredning:

Tabell 16: Oversikt over spredningsalternativer for Gardena sprederen

Alt.	Vinkel	Høyde	Diameter per dyse	Areal per dyse	Antall dyser	Totalt areal	Overlappende areal	Udekt areal
	a	h	$d=2 \times h \times \tan(a/2)$	$A=\pi \times (d/2)^2$	n	A_t	A_o	A_u
	grader	m	m	m ²	stk	m ²	m ²	m ²
A	107	1	2,7	5,7	8,0	45,9	3,1	7,3
B	107	1	2,7	5,7	10,0	57,4	11,6	4,3
C	107	0,75	2,0	3,2	10,0	32,3	0	18,6



Figur 34: (Fra venstre) spredningsalternativ A, B og C

BETE dyser

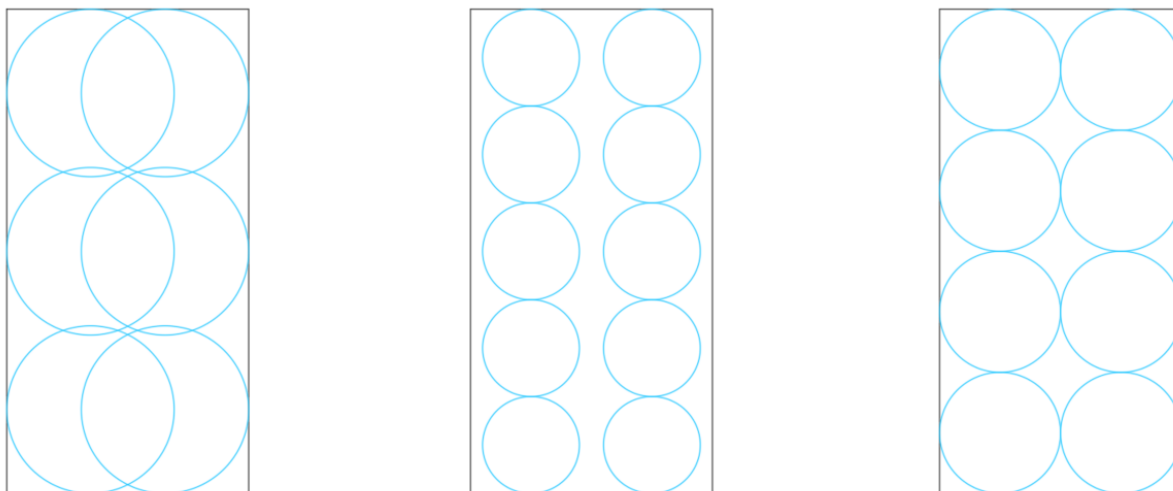
Tabell 17 presenterer tre forskjellige alternativ for sammensetning av dyser. Samtlige av dysene presentert i kapittel 4.3 kunne gi både en vinkel på 90° og 120°, så alternativene nedenfor er gyldige for alle tre dyser.

Tabell 17: Oversikt over spredningsalternativer for BETE dysene

Alt.	Vinkel	Høyde	Diameter per dyse	Areal per dyse	Antall dyser	Totalt areal	Overlappende areal	Udekt areal
	a	h m	$d=2 \times h \times \tan(v/2)$ m	$A=\pi \cdot (d/2)^2$ m ²	n stk	At m ²	Ao m ²	Au m ²
D	120°	1	3,5	9,4	6	56,5	13,3	6,9
E	90°	1	2,0	3,1	10	31,4	0	18,6
F	120°	0,72	2,5	4,9	8	39,3	0	10,7

Den femte kolonnen i tabellen viser hvor stort areal en dyse kan dekke, gitt en vinkel og høyde over taket. Antall dyser nødvendig er valgt på bakgrunn av takets totale areal (50 m²) med hensyn på en så fullstendig dekning av taket som mulig.

Overlappende areal og udekt areal er beregnet i tegneprogrammet AutoCad, som ble benyttet for å illustrere de ulike alternativene, vist nedenfor.



Figur 35: (Fra venstre) spredningsalternativ D, E og F

5.3. Total vannføring på taket

Gardena spreder

Tabell 18 viser de sammenlagte vannføringene for hvert av spredningsalternativene med Gardena sprederen.

Tabell 18: Oversikt over total vannføring for hvert spredningsalternativ med Gardena sprederen

Vannføring per spreder		Spredning	Antall sprederer	Vannføring totalt	
Min (0,2 bar)	Max (5 bar)			Min	Max
Q_{\min} l/min	Q_{\max} l/min	Alt.	n	$Q_{t\min}$ l/min	$Q_{t\max}$ l/min
5	20,4	A	8	40,0	163,2
		B, C	10	50,0	204,0

BETE dyser

Tabellen nedenfor viser den sammenlagte vannføringen til de tre BETE dysene: EZWL1/4, EZWL1 og EZTF10.

Tabell 19: Oversikt over total vannføring for hvert spredningsalternativ med tre ulike BETE dyser

Dysenavn	K-faktor	Vannføring per dyse		Spredning	Antall dyser	Vannføring totalt			
		Min (0,2 bar)	Max (5 bar)			Alt.	n	Min	Max
		Q_{\min} l/min	Q_{\max} l/min					$Q_{t\min}$ l/min	$Q_{t\max}$ l/min
EZWL 1/4	0,587	0,276	1,25	D	6	1,7	7,5		
				E	10	2,8	12,5		
				F	8	2,2	10,0		
EZWL1	2,35	1,1	5,01	D	6	6,6	30,1		
				E	10	11,0	50,1		
				F	8	8,8	40,1		
EZTF10	9,12	4,99	20,4	D	6	29,9	122,4		
				E	10	49,9	204,0		
				F	8	39,9	163,2		

Feilkilder

Beregningene av spredning og vannføring til BETE dysene er utelukkende basert på de tekniske spesifikasjonene produsenten har oppgitt. Eventuelle feilkilder knyttet til disse opplysningene, er utenfor denne oppgavens rammer å vurdere. Men det er naturlig å forvente noen avvik mellom den teoretiske spredningsvinkelen og spredningen dysene vil gi i virkeligheten, da teoretiske verdier vanligvis er kommet frem til under ideelle forhold (uten for eksempel vind og annen forurensing). Det samme gjelder de teoretiske sammenhengene mellom trykk og vannføring.

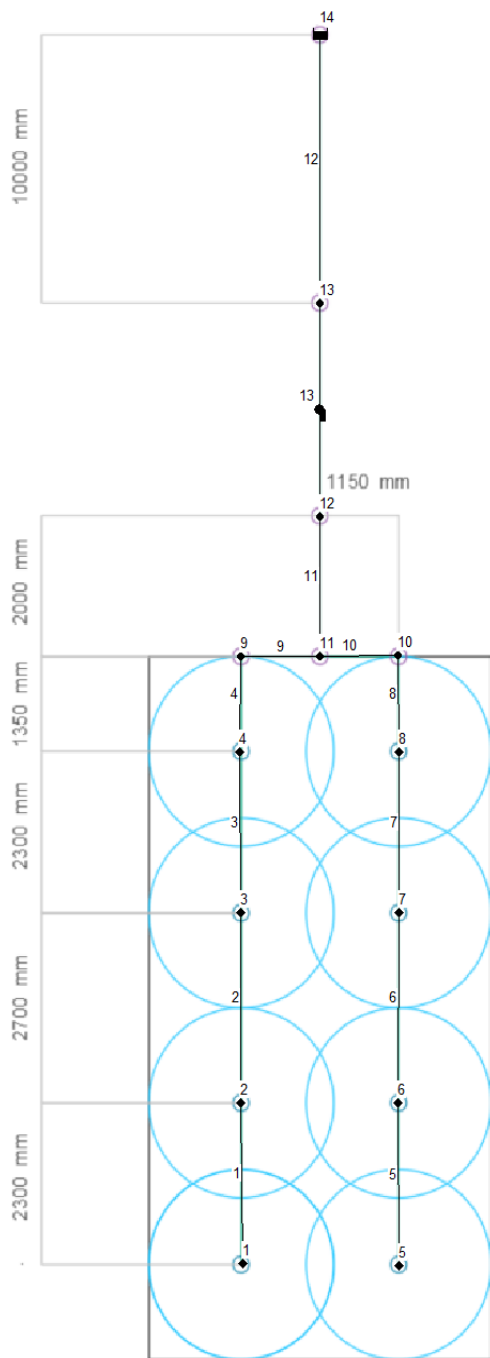
5.4. Modellering i EPANET

For å modellere i EPANET må lengden på koblingene og høyden til nodene legges inn. Både dysene og sprederne er tenkt å plasseres maks én meter over taket (etter anbefaling fra leverandøren). Takene har en høyde på to meter (Øyre & Trommald, 2018), hvilket innebærer at nodene får en høyde på mellom 2,72 og 3 meter, avhengig av spredningsalternativ. Pumpen og vannkilden legges til bakkenivå (0 meter).

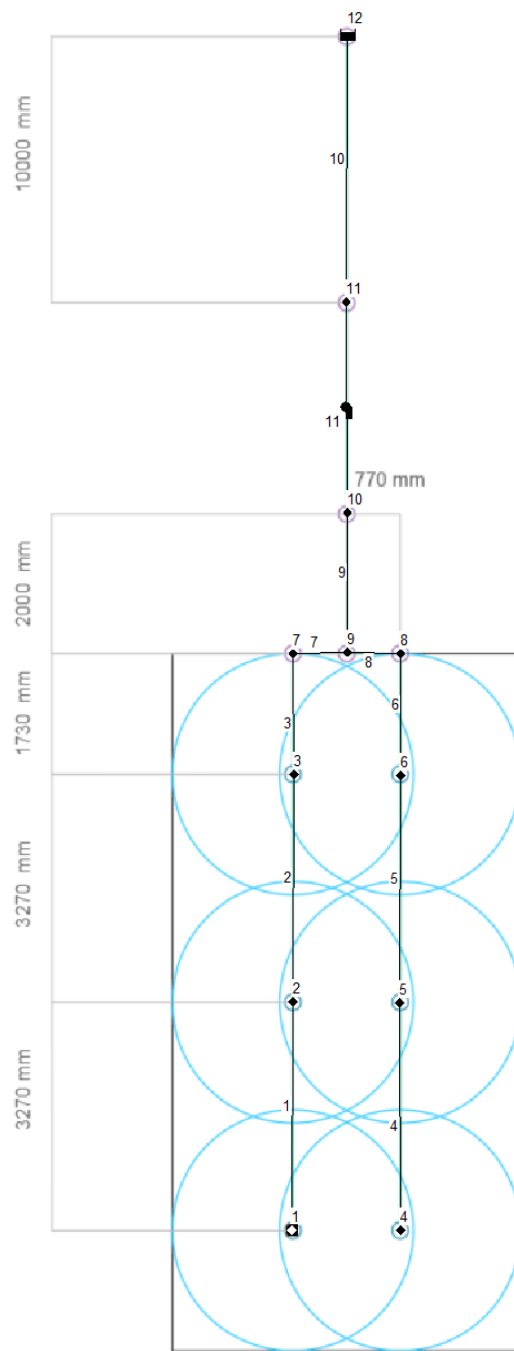
Rørlengdene avhenger av hvor mange dyser/spredere taket består av og fordelingen av disse – altså spredningsalternativet.

Figur 27 og figur 28 viser nettverket i EPANET, med noder, koblinger, pumpe og vannkilde, for henholdsvis spredningsalternativ A og D. Node ID og koblings ID er vist, i tillegg er det lagt AutoCAD tegning av spredningen i bakgrunn for å bedre illustrere vanningsanlegget. Tegningen inkluderer lengden på de ulike rørdelen.

Tilsvarende figurer for alle spredningsalternativene ligger i vedlegget.



Figur 36: Nettverk i EPANET for spredningsalternativ A



Figur 37: Nettverk i EPANET for spredningsalternativ D

Rørdiameteret er avgjørende for trykktapet i nettverket. Simuleringen i EPANET gir også muligheten til å kontrollere at rørdiameteret er stort nok til å unngå signifikant trykktap. Det ble først gjennomført noen simuleringer med forskjellige diametere, for å finne en passende (32 mm), som ble benyttet i de videre simuleringene.

I denne modellen er det sett bort fra singulærtap i bend, siden hastigheten er ganske lav.

Omregning K-faktor til "emitter coefficient" (C)

I EPANET har K-faktoren enheten $l/\text{min} \times \sqrt{m}$, i stedet for $l/\text{min} \times \sqrt{\text{bar}}$. Det er derfor nødvendig å konvertere K-faktorene for sprederen og dysene.

Formelen for statisk trykk gir sammenhengen mellom meter vannsøyle og trykk:

$$P = \rho \times g \times h$$

P – trykk (Pa = $\text{kg}/\text{m} \times \text{s}^2$)

ρ – tetthet ($1000 \text{ kg}/\text{m}^3$)

g – gravitasjon ($9,81 \text{ m}/\text{s}^2$)

h – meter vannsøyle (m)

$$h = \frac{P}{\rho \times g} = \frac{1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \times \text{s}^2}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,000102 \text{ m}$$

$$1 \text{ Pa} = 0,000102 \text{ m} = 0,00001 \text{ bar} \quad \rightarrow \quad 1 \text{ bar} = 0,000102/0,00001 = 10,19368 \text{ m}$$

Omregningsfaktor

$$1/\sqrt{10,19368} = \mathbf{0,313152}$$

Tabell 20: K-faktor og tilhørende "emitter coefficient"

	K-faktor	Emitter coefficient
	K	C
	$l/\text{min} \times \sqrt{\text{bar}}$	$l/\text{min} \times \sqrt{m}$
Spreder	12,2	3,820
EZWL 1/4	0,587	0,184
EZWL1	2,35	0,736
EZTF10	9,12	2,856

5.4.1. Resultater

Det ble gjennomført tre simuleringer for Gardena sprederen, en for hvert av spredningsalternativene (A-C). Det samme gjelder hvert av BETE-dysene, for spredningsalternativ D til F. Totalt ble det altså gjennomført tolv simuleringer. De viktigste resultatene av disse er vist nedenfor. Tabellene gir vannføring og trykk i de nodene som representerer en spreder eller dyse.

Tabell 21: Resultater av simuleringer i EPANET for Gardena sprederen

Gardena spreder			
Spredning	Node ID	Vannføring	Trykk
Alt		l/min	bar
A	1	25,7	4,43
	2	25,7	4,44
	3	25,7	4,45
	4	25,8	4,47
	5	25,7	4,43
	6	25,7	4,44
	7	25,7	4,45
	8	25,8	4,47
B	1	24,2	3,93
	2	24,2	3,93
	3	24,2	3,94
	4	24,3	3,96
	5	24,4	3,98
	6	24,2	3,93
	7	24,2	3,93
	8	24,2	3,94
	9	24,3	3,96
	10	24,4	3,98
C	1	24,2	3,94
	2	24,2	3,95
	3	24,3	3,96
	4	24,3	3,97
	5	24,4	4,01
	6	24,2	3,95
	7	24,2	3,95
	8	24,3	3,96
	9	24,3	3,97
	10	24,4	4,01

Tabell 22: Resultater av simuleringer i EPANET for BETE dyse EZWL1/4

EZWL1/4			
Spredning	Node ID	Vannføring	Trykk
Alt		l/min	bar
D	1	1,41	5,73
	2	1,41	5,73
	3	1,41	5,73
	4	1,41	5,73
	5	1,41	5,73
	6	1,41	5,73
E	1	1,41	5,72
	2	1,41	5,72
	3	1,41	5,72
	4	1,41	5,72
	5	1,41	5,72
	6	1,41	5,72
	7	1,41	5,72
	8	1,41	5,72
	9	1,41	5,72
	10	1,41	5,72
F	1	1,41	5,75
	2	1,41	5,75
	3	1,41	5,75
	4	1,41	5,75
	5	1,41	5,75
	6	1,41	5,75
	7	1,41	5,75
	8	1,41	5,75

Tabell 23: Resultater av simuleringer i EPANET for BETE
dyse EZWL1

EZWL1			
Spredning	Node ID	Vannføring	Trykk
Alt		l/min	bar
D	1	5,61	5,70
	2	5,61	5,70
	3	5,61	5,70
	4	5,61	5,70
	5	5,61	5,70
	6	5,61	5,70
E	1	5,58	5,65
	2	5,58	5,65
	3	5,58	5,65
	4	5,59	5,65
	5	5,59	5,65
	6	5,58	5,65
	7	5,58	5,65
	8	5,58	5,65
	9	5,59	5,65
	10	5,59	5,65
F	1	5,61	5,71
	2	5,61	5,71
	3	5,62	5,71
	4	5,62	5,71
	5	5,61	5,71
	6	5,61	5,71
	7	5,62	5,71
	8	5,62	5,71

Tabell 24: Resultater av simuleringer i EPANET for BETE
dyse EZTF

EZTF10			
Spredning	Node ID	Vannføring	Trykk
Alt		l/min	bar
D	1	20,91	5,26
	2	20,92	5,26
	3	20,94	5,27
	4	20,91	5,26
	5	20,92	5,26
	6	20,94	5,27
E	1	19,51	4,58
	2	19,51	4,58
	3	19,53	4,59
	4	19,55	4,60
	5	19,60	4,62
	6	19,52	4,58
	7	19,51	4,58
	8	19,53	4,59
	9	19,55	4,60
	10	19,60	4,62
F	1	20,31	4,96
	2	20,32	4,96
	3	20,33	4,97
	4	20,36	4,99
	5	20,31	4,96
	6	20,32	4,96
	7	20,33	4,97
	8	20,36	4,99

Oppsummering

Samtlige simuleringer viser at trykket holder seg relativt likt i alle nodene. Gitt det valgte rørdiameteret medfører ingen av alternativene betydelige trykktap i nettverket. Videre holder trykket i systemet seg stort sett under 5 bar for Gardena sprederen og EZTF10-dysen, og under 6 bar for de øvrige dysene.

6. Alternativanalyse

I dette kapitlet gjennomføres selve alternativanalysen på alternativene bestående av sprederen fra Gardena og BETE-dysene. Sprederslangen og svetteslangen forkastes som potensielle alternativer, da forsøkene viste at de begge hadde betydelige og uforutsigbare trykktap langs slangene. Siden det ble gjennomført relativt få tester på slangene, kan det likevel være relevant å gjennomføre flere forsøk ved en senere anledning, for å få mer robuste resultater.

6.1. Kravoppnåelse

Tabellen nedenfor viser hvorvidt hvert alternativ oppfyller de to skal-kravene.

Tabell 25: Kravoppnåelse for skal-krav

Skal-krav	Alternativ			
	Gardena spreder	EZWL1/4	EZWL1	EZTF10
Den samlede maksvannføringen skal være minst 170 l/min				
Trykket i systemet skal ikke være over 10 bar				

Grønt felt indikerer at kravet er oppfylt, mens rødt felt indikerer det motsatte. Det er bare Gardena sprederen og BETE-dysen som oppfyller begge skal-kravene, så det er bare disse to som vurderes videre med hensyn på bør-krav. De to andre dysene, forkastes som alternativer.

Tabell 26 viser grad av kravoppnåelse for hvert av de gjenstående alternativene. Plusstegn (+) indikerer at kravet er oppfylt, minustegn (-) at det ikke er oppfylt, mens parentes (/) indikerer delvis oppfyllelse.

Tabell 26: Kravoppnåelse for bør-krav

Bør-krav	Alternativ	
	Gardena spreder	EZTF10
Den totale minimumsvannføringen bør være maks 1,7 l/min	–	–
Den samlede vannføringen bør kunne justeres trinnløst	+	+
Spredningen bør være relativt uniform over taket	+	+
Trykket i systemet bør ikke være over 5 bar	+	+
Trykket i hvert utløpspunkt bør være tilnærmet likt over hele systemet	+	+
Utstyret bør være lett tilgjengelig	+	/

Ingen av de gjenstående alternativene er i nærheten av å kunne produsere lave nok intensiteter. Sprederen gir vannføringer på 40 og 50 l/min for henholdsvis spredning A og B/C, mens dysen gir vannføringer på mellom 30 og 50 l/min.

I både sprederen og dysen justeres vannføringen ved å regulere trykket som tilføres. Denne sammenhengen er gitt i K-faktoren. Dette tilsier at vannføringen fra de kan justeres trinnvist.

Spredningsarealet er ganske likt for de to alternativene, under ideelle forhold. Dysen tilfører imidlertid med stor sannsynlighet en bedre spredning over hele intensitetsintervallet. I forsøkene som ble gjennomført med sprederen mistet vannstrålen koneformen når vannføringen ble lavere (under ca. 5 l/min). For dysen opprettholdes imidlertid vannstrålen koneformen for de oppgitte minimumsvannføringene (ifølge leverandøren).

EPANET-simuleringene viser at trykkforholdene for begge alternativene er ganske like.

Det er hovedsakelig det siste bør-kravet som skiller de to alternativene. I og med at denne sprederen kan kjøpes i de fleste byggevarerhus og jernvarehandler, er dette alternativet veldig lett tilgjengelig. Dysene må på sin side bestilles gjennom en leverandør (som ikke leverer til privatpersoner). Leveringstiden avhenger av om produktet er på lager eller ikke. Hvis førstnevnte er tilfelle vil

leveringstiden normalt være 2 uker. I motsatt tilfelle må produktet først bestilles fra produsenten i USA, og leveringstiden kan være fra 4-6 uker.

Sprederen er også lett tilgjengelig i den forstand at den er relativt billig sammenlignet med dysen. Vannsprederen koster under 150 kr, mens hver dyse ifølge leverandøren koster mellom 500 og 700 kr (staypro.no, 2020). I en tredje forstand er sprederen mer tilgjengelig ved å være enkel i bruk og lett å finne kompatible deler til.

Tabellen nedenfor viser intensitetene som tilsvarer vannføringene sprederen kan gi.

Tabell 27: Vannføringene Gardensprederen kan tilføre og tilsvarende intensiteter

Vannføring		Intensitet		
l/min	l/s	l/s/ha	mm/min	mm/time
40	0,67	133	0,8	48
163	2,72	543	3,3	196

6.2. Samlet vurdering

Ingen av alternativene som ble vurdert oppfylte alle kravene til et vanningsanlegg som kan simulere de fleste typer nedbør (modellregn og historiske hendelser). Dette skyldes at ingen av de alene er i stand til å produsere store nok intervaller av intensiteter.

Sprederen fra Gardena og BETE-dysen av typen EZTF10, oppfylte de tekniske kravene med hensyn på trykk, intensitet og spredning, omtrent like godt. Sprederen har imidlertid en stor fordel når det kommer til pris og tilgjengelighet. Dette er utslagsgivende for at sprederen fremstår som det beste enkeltstående alternativet.

For å bygge et vanningsanlegg som kan tilfredsstille alle intensitetene, vil det være nødvendig å kombinere alternativene, der to eller tre separate linjer produserer intervaller av intensiteter som overlapper hverandre. Dette tilfører en økt kompleksitet, da man må inkludere ventiler og en reguleringsmekanisme, og tilsvarende mer planlegging.

Et eksempel på en kombinasjonsløsning er presentert i tabell 28.

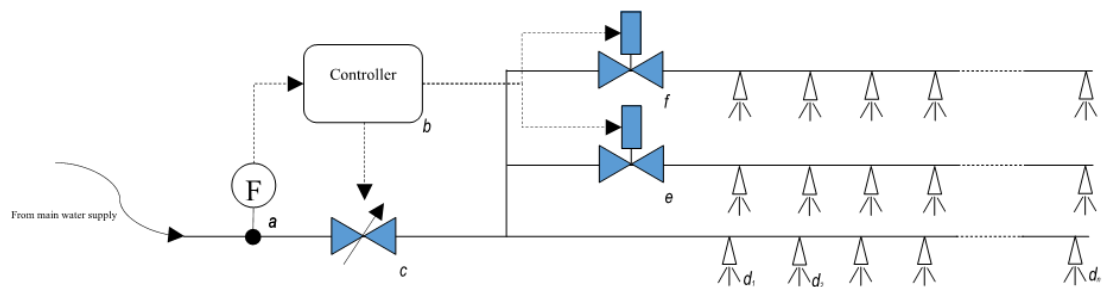
Tabell 28: Oversikt over kombinasjonsløsning

Linje	Dyse/spreder	Q_{\min}	Q_{\max}	Spredning	Antall dyser	Qt_{\min}	Qt_{\max}
		l/min	l/min	A-F	stk	l/min	l/min
1	EZWL 1/4	0,276	1,25	D	6	1,7	7,5
2	EZWL1	1,1	5,01	F	8	8,8	40
3	Spreder	5	20,4	A	8	40	163

Anlegget vil da bestå av tre linjer, hvorav de to laveste intensitetsintervallene produseres av BETE-dyser, mens de høyeste intensitetene produseres av Gardena spreder.

Et slikt anlegg kan imidlertid bygges i flere ulike steg, da etableringen av én linje ikke hindrer tilføringen av ytterligere linjer senere. Siden sprederen fra Gardena fremstår som det beste enkeltalternativet anbefales det at denne bygges først.

En ytterligere fordel med sprederen er at den allerede benyttes på et lignende anlegg, med et tilsvarende formål, på Høvringen. Dette reduserer usikkerheten rundt hvor egnet dette alternativet er, i det minste når det kommer til å produsere ekstreme nedbørshendelser. Det at sprederen er såpass mye billigere enn dysene, innebærer også at konsekvensene ved å velge feil er mindre alvorlige. Begge sistnevnte poeng gjør dette alternativet mindre risikabelt.



Figur 38: Prinsippkisse for vanningsanlegg (Møen, 2020)

7. Konklusjon

Problemstillingen denne oppgaven har besvart er:

Hvilken løsning for et vanningsanlegg oppfyller kravene med hensyn på intensitet, spredning, trykk og tilgjengelighet best?

Den beste enkeltstående løsningen er alternativet med Gardena sprederne.

Det anbefales at et vanningsanlegg med disse sprederne etableres først, slik at man får muligheten til å simulere ekstrem nedbør så snart som mulig.

Siden et slikt anlegg ikke vil kunne produsere intensiteter særlig lavere enn 48 mm/time, som er omtrent 25 ganger høyere enn ønsket minimumintensitet (2 mm/time), anbefales det å etter hvert supplere med flere linjer, der dyser som kan produseres lavere intensiteter benyttes.

8. Referanser

- Audun Braastad. (2019). *Oversvømmelse Oslo*. NTB Scanpix.
<https://www.dagsavisen.no/oslo/styrtregn-ga-oversvommelse-pa-ostlandet-1.1562812>
- Bergknapp AS. (2020). *Grønt på taket*. Bergknapp AS.
<https://www.bergknapp.no/produkter/gr%C3%B8nne-tak>
- BETE. (2020). *BETE: EZTF Nozzles*. BETE.No. <https://www.bete.com/products/eztf>
- Chin, D. (2013). Fundamentals of Surface-Water Hydrology I: Rainfall and Abstractions. In *Water-Resources Engineering* (3rd ed., pp. 401–460). Pearson.
- Finansdepartementet. (2010). *Utarbeidelse av KVU/KL dokumenter*.
<https://www.ntnu.no/documents/1261860271/1263838555/Veileder%20nr%209%20Utarbeidelse%20av%20KVU%20dokumenter.pdf>
- Gardena. (2020a). *Gardena Classic Spray Sprinkler Fox*. Gardena.
<https://www.gardena.com/int/products/watering/sprinkler/classic-spray-sprinkler-fox/900967901/>
- Gardena. (2020b). *GARDENA sprederslange*.
<https://www.gardena.com/no/produkter/vanning/sprinklere/gardena-sprederslange-15-m-gronn/900973301/>
- Hanslin, H. M., Birgitte, O., & Johannessen, G. (2018). *Grønne tak som LOD-og miljøtiltak* (Vol. 4). Miljødirektoratet.
<https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/M1153/M1153.pdf>
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E. J., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J. E. Ø., Sandven, S., Sandø, A. B., Sorteberg, A., & Ådlandsvik, B. (2016). *Klima i Norge 2100 - Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2015*.
https://cms.met.no/site/2/klimaservicesenteret/klima-i-norge-2100/_attachment/10990?_ts=159d5ffcffd
- Hege Vatnaland. (2020). *Grønt tak oppbygging*. Bergknapp AS.
<https://www.bergknapp.no/produkter/gr%C3%B8nne-tak/oppbygning>
- Hudson, N. W. (1993). *Field measurement of soil erosion and runoff: Chapter 6 Rainfall simulators*.
<http://www.fao.org/3/t0848e/t0848e-11.htm>
- jula.no. (2020). *Axley svetteslange*. Jula.No; jula.no. <https://www.jula.no/catalog/hage/vanning-og-drenering/vanning/hageslanger/fuktslange-007690/>

- Klima 2050. (2016). *Beskrivelse av pilotprosjekt blågrønne tak på Høvringen avløpsrensaneanlegg*.
<https://static1.squarespace.com/static/54ff1c6be4b0331c79072679/t/59f05a19fe54ef53a45377c4/1508923930218/20170407+Beskrivelse+pilotprosjekt+p%C3%A5+H%C3%B8vringen+Klima+2050.pdf>
- Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Sægrov, S., Jakobsen, G., & Aaby, L. (2008). *Norsk Vann Rapport 162: Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering*.
- Mamen, J. (2019). *Klima*. Store Norske Leksikon.
<https://snl.no/klima#:~:text=Klima%20er%20det%20typiske%20v%C3%A6rm%C3%B8nsteret,hvor%20ofte%20det%20bl%C3%A5ser%20kraftig>.
- Markhus, E., Bøyum, Å., Eidsmo, T., Lindholm, O., Noreide, T., Semb, T., & Skretteberg, R. (1997). *Urbanhydrologi - NVE*. http://publikasjoner.nve.no/publikasjon/1997/publikasjon1997_10.pdf
- Møen, K. M. (2020). *Suggested design for precipitation simulator*.
- Nielsen, Kristoffer T., Moldrup, P., Thorndahl, S., Nielsen, J. E., Duus, L. B., Rasmussen, S. H., Uggerby, M., & Rasmussen, M. R. (2019). Automated rainfall simulator for variable rainfall on urban green areas. *Hydrological Processes*, 33(26), 3364–3377.
<https://doi.org/10.1002/hyp.13563>
- Nielsen, Kristoffer Tønder. (2019). *Monitoring of rainfall-runoff from urban pervious areas*.
- Norsk Klimaservicesenter. (n.d.-a). *Fremtidig utvikling av kraftig nedbør: Beregning av endring i kraftig nedbør*. Norsk Klimaservicesenter. Retrieved August 27, 2020, from <https://klimaservicesenter.no/faces/desktop/article.xhtml?uri=klimaservicesenteret/dimensjonere-nde-nedbor/fremtidig-utvikling>
- Norsk Klimaservicesenter. (n.d.-b). *Fremtidig utvikling i kraftig nedbør: Oppdaterte klimapåslag for kraftig nedbør*. Norsk Klimaservicesenter. Retrieved August 27, 2020, from <https://klimaservicesenter.no/faces/desktop/article.xhtml?uri=klimaservicesenteret/dimensjonere-nde-nedbor/fremtidig-utvikling>
- Norsk Klimaservicesenter. (2020). *Dimensjonerende nedbør (IVF-verdier) fra målestasjoner*. Norsk Klimaservicesenter. <https://klimaservicesenter.no/faces/desktop/idf.xhtml>
- NVE. (2020). *Hydrologi*. Norges Vassdrags- Og Energidirektorat. <https://www.nve.no/hydrologi/>
- Øfsti, A. W., & Solbu, E. L. (2019). *Når himmelens sluser åpner seg*. NRK.
<https://www.nrk.no/viten/xl/i-fremtiden-ma-vi-ta-grep-for-a-hindre-at-byene-vare-drukner-i-ekstremregn-1.14665615>

- Opak. (2020). *Konseptvalgutredning*. Opak. <https://www.opak.no/tjenester/plan-og-byggesak-2/>
- Oppenheimer, M., Glavovic, B., Hinkel, J., van de Wal, R., Magnan, A. K., & Abd-Elgawad, A. (2019). *Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities*. https://report.ipcc.ch/srocc/pdf/SROCC_FinalDraft_Chapter4.pdf
- Øyre, A. S., & Trommald, J. (2018). *Eablering av Bia, en forskningsinfrastruktur med grønne tak (Masteroppgave)*.
- Pedrollo. (2020). *Pedrollo Centrifugal Pumps CP 1.1 kW-11 kW INSTALLATION AND USE*. https://www.pedrollo.com/public/allegati/CP%20fino%20a%2011%20kW_EN_50Hz.pdf
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2 Users Manual*.
- Skaaraas, H., Hansen, A.-J., Riise, E., Stenersen, J., Refling, D., Johansen, R., Hjelle, H., Ebeltoft, M., Skofteland, H., & Kipperberg, G. (2015). *NOU 2015: 16 Overvann i byer og tettsteder*. www.fagbokforlaget.no/offpub
- staypro.no. (2020). *Gardena Classic Fox vannspreder*. Staypro.No. <https://www.staypro.no/hage-fritid/vanning/vannslanger/vannspredere/gardena-classic-fox-vannspreder-2811353>
- Thorolfsson, S. T. (2014). VA-hydrologi. In *Vann- og avløpsteknikk* (2nd ed., p. 660). Norsk Vann.
- Trommald, J., Nilsen, V., & Berg, R. (2018). *Årsrapport 2018 Grønne tak forskningsinfrastruktur i Landskapslaboratoriet*.

9. Vedlegg

Vedlegg A – Fullstendige resultater vannføring og trykk

Sprederslange

Test	Trykk	Tid	Boks	Volum	Vannføring
nr	P bar	t min	nr	V L	Q lpm
1	1,1	15	1	0,402	0,027
			2	0,406	0,027
			3	0,661	0,044
			4	0,816	0,054
			5	0,746	0,050
			6	0,493	0,033
			7	0,274	0,018
			8	0,563	0,038
			9	0,471	0,031
			10	0,654	0,044
			11	0,545	0,036
2	1,1	5	1	0,251	0,050
			2	0,554	0,111
			3	0,381	0,076
			4	0,687	0,137
			5	0,567	0,113
			6	0,387	0,077
			7	0,532	0,106
			8	0,510	0,102
			9	na	na
			10	0,418	0,084
				Ytterst	0,092
				%-diff	5,4
3	0,6	15	1	0,176	0,012
			2	0,324	0,022
			3	0,248	0,017
			4	0,554	0,037
			5	0,274	0,018
			6	0,492	0,033
			7	0,468	0,031
			8	0,679	0,045
			9	0,705	0,047

			10	0,344	0,023
			Gj.snitt	Innerst	0,021
				Ytterst	0,036
				%-diff	41,4
4	1,4	6	1	1,285	0,214
			2	1,838	0,306
			3	1,813	0,302
			4	1,918	0,320
			5	1,450	0,242
			6	0,939	0,157
			7	1,208	0,201
			8	1,238	0,206
			9	1,577	0,263
			10	0,916	0,153
			Gj.snitt	Innerst	0,277
				Ytterst	0,196
				%-diff	29,2
5	Max Q	2	1	0,237	0,119
			2	0,825	0,413
			3	0,542	0,271
			4	0,827	0,414
			5	0,782	0,391
			6	0,349	0,175
			7	0,426	0,213
			8	0,565	0,283
			9	0,560	0,280
			10	0,448	0,224
			Gj.snitt	Innerst	0,321
				Ytterst	0,235
				%-diff	26,9

Svetteslange

Test	Trykk	Tid	Boks	Volum	Vannføring
nr	P bar	t min	nr	V L	Q lpm
1	2	5	1	0,608	0,122
			2	0,504	0,101
			3	0,431	0,0862
			4	0,392	0,0784
			5	0,375	0,0750
			6	0,508	0,102
			7	0,284	0,0568
			8	0,271	0,0542

			9	0,276	0,0552
			10	0,414	0,0828
			Gj.snitt	Innerst	0,0924
				Ytterst	0,0701
				%-diff	-24,1
2	1,4	5	1	0,386	0,0772
			2	0,296	0,0592
			3	0,249	0,0498
			4	0,256	0,0512
			5	0,291	0,0582
			6	0,341	0,0682
			7	0,403	0,0806
			8	0,353	0,0706
			9	0,267	0,0534
			10	-	-
			Gj.snitt	Innerst	0,0591
				Ytterst	0,0682
				%-diff	15,4
3	0,6	7	1	0,386	0,0551
			2	0,212	0,0303
			3	0,152	0,0217
			4	0,176	0,0251
			5	0,181	0,0259
			6	0,336	0,0480
			7	0,48	0,0686
			8	0,451	0,0644
			9	0,346	0,0494
			10	0,499	0,0713
			Gj.snitt	Innerst	0,0316
				Ytterst	0,0603
				%-diff	90,8

Spreader

Målinger av minimum vannføring – ikke målbart trykk

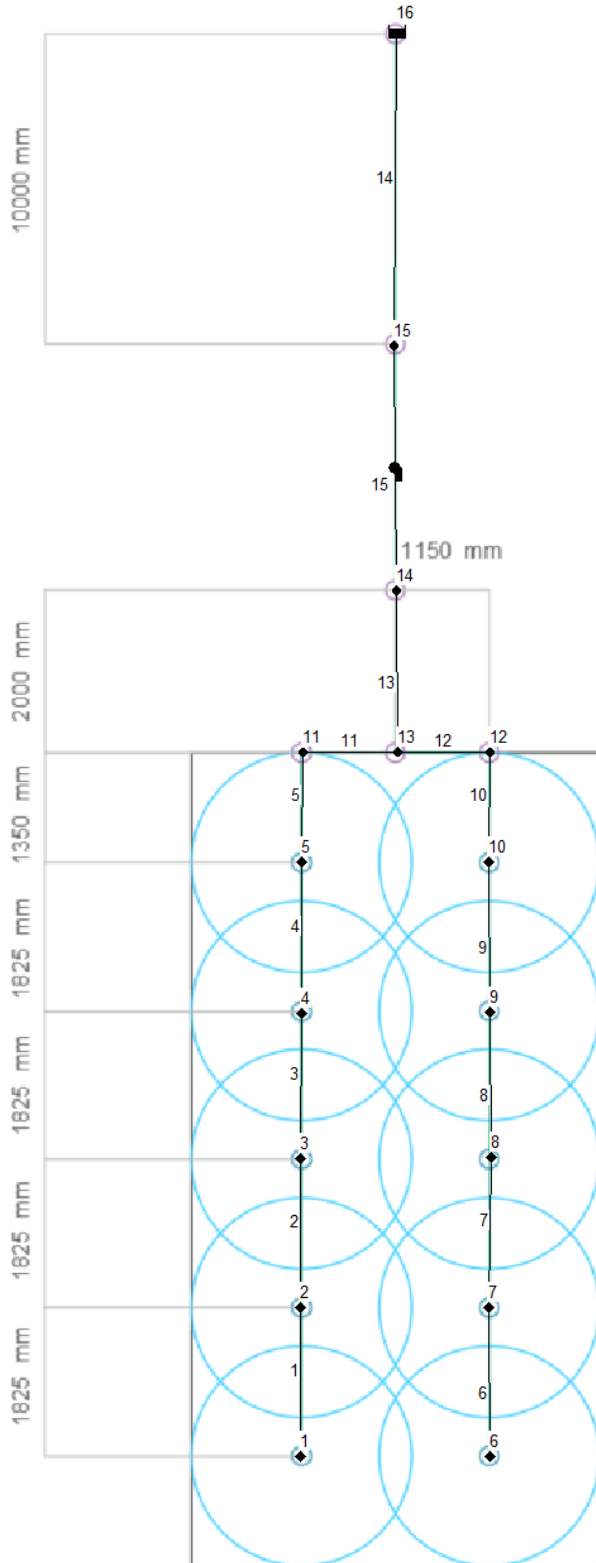
Måling	Tid	Tid	Volum	Volum	Vannføring
Nr	t	t	V	V	Q
	s	min	ml	L	lpm
1	15	0,250	600	0,600	2,40
2	10	0,167	410	0,410	2,46
3	10	0,167	205	0,205	1,23

Målinger og beregning av trykk, vannføring og k-faktor

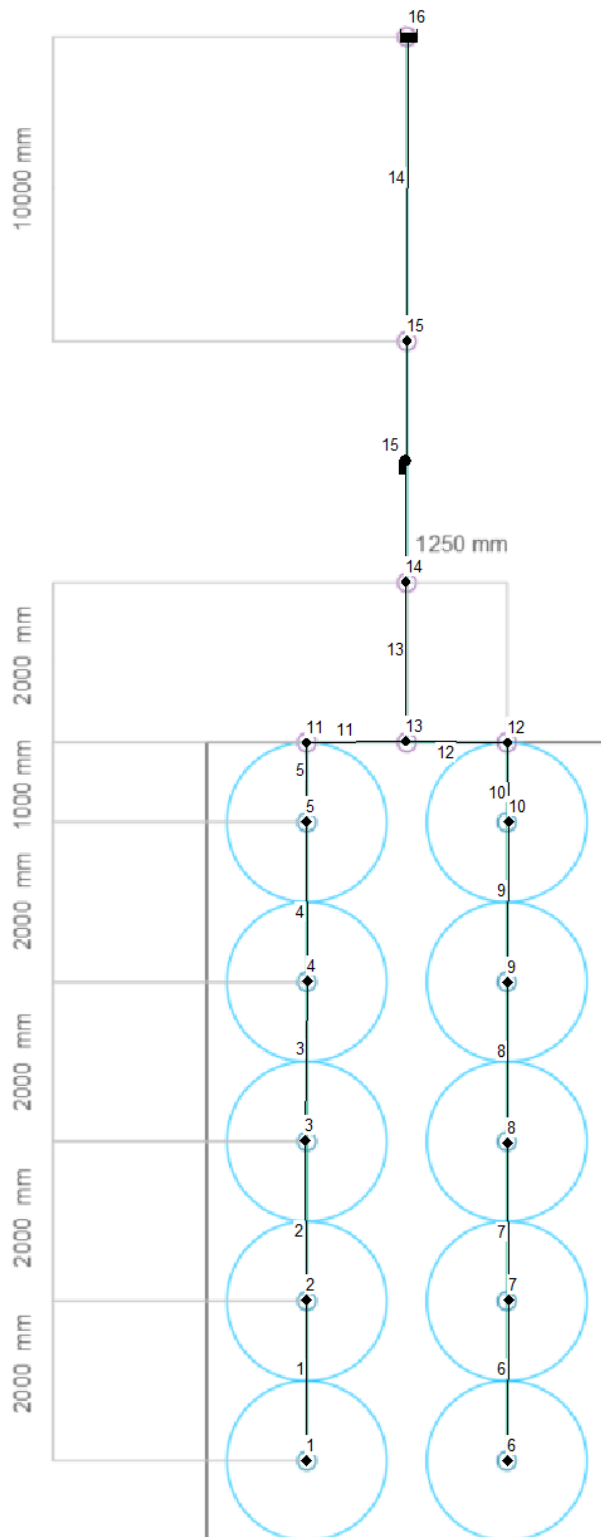
Måling	Trykk	Tid	Tid	Total vekt	Vekt bøtte	Vekt vann	Volum	Vannføring	K-faktor
Nr	P bar	ts s	t=ts/60 min	wt g	wb g	ww = wt -wb g	V = ww/1000 l	Q lpm	K= Q/sqrt(P) lpm/sqrt(bar)
1	na	10	0,17	946	283	663	0,663	3,98	na
2	0,27	10	0,17	1447	283	1164	1,16	6,98	13,4
3	0,27	30	0,50	3680	283	3397	3,40	6,79	13,1
4	0,50	30	0,50	4639	283	4356	4,36	8,71	12,3
5	0,50	30	0,50	4629	283	4346	4,35	8,69	12,3
6	0,90	30	0,50	5807	283	5524	5,52	11,0	11,6
7	0,90	30	0,50	5761	283	5478	5,48	11,0	11,5
8	1,2	30	0,50	6668	283	6385	6,39	12,8	11,7
9	1,2	30	0,50	6720	283	6437	6,44	12,9	11,8
10	1,4	31	0,52	7857	283	7574	7,57	14,7	12,4
11	1,4	30	0,50	7759	283	7476	7,48	15,0	12,6
12	1,6	30	0,50	8290	283	8007	8,01	16,0	12,7
13	1,6	30	0,50	8198	283	7915	7,92	15,8	12,5
14	3,2	20	0,33	7050	283	6767	6,77	20,3	11,3
15	3,2	20	0,33	7089	283	6806	6,81	20,4	11,4

Vedlegg B – EPANET spredningsalternativ

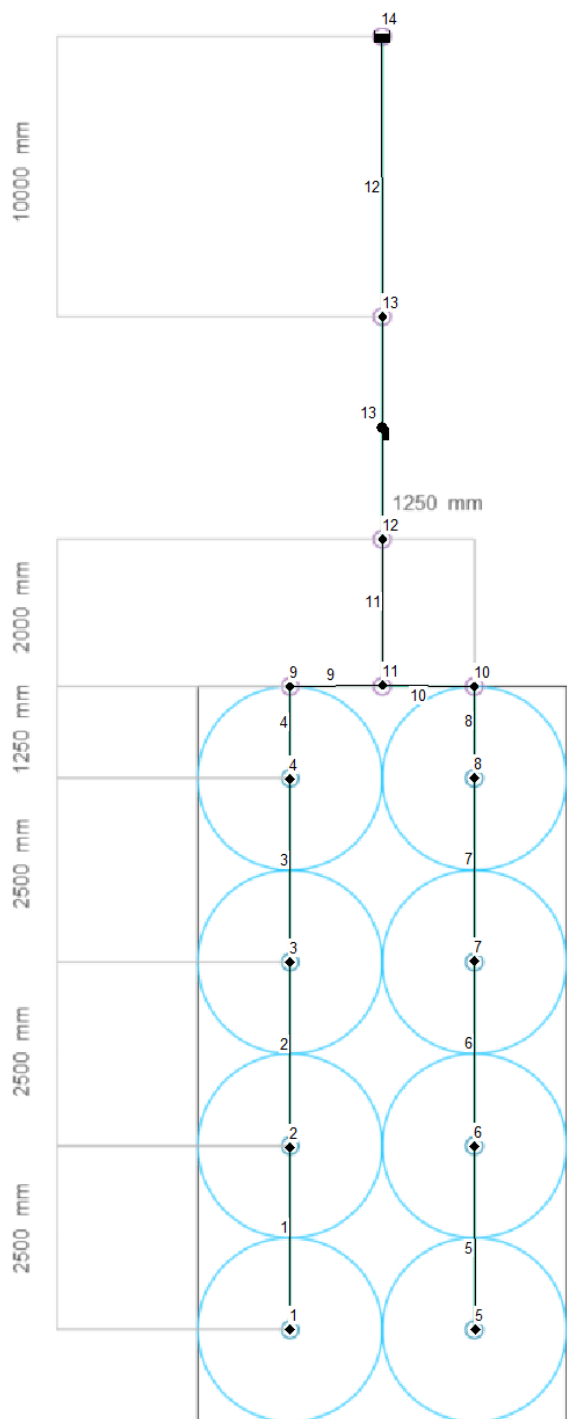
Spredningsalternativ B



Spredningsalternativ C og E



Spredningsalternativ F



Vedlegg C – Epostkorrespondanse NVE vedrørende intensitetskrav

From: Knut Magne Møen <kmm@nve.no>
Sent: 27. januar 2020 17:40
To: Vegard Nilsen <vegard.nilsen@nmbu.no>; Marta Bakke <marta.bakke@live.no>
Cc: Anne Kristina Fleig <afl@nve.no>
Subject: Re: Krav og spesifikasjoner til vanningsanlegg

Hei igjen,

Anne og jeg tok en lynrask kollokvie og foreslår at vi tar utgangspunkt i ekstremhendelser på 200 års returperiode og 2 minutters varighet. Det utgjør ikke noe stor forskjell i nødvendig vannmengde om vi tar 100 eller 200 år, eller 1 eller 2-minutters varighet for den sak skyld. Vi må designe for omlag 2.5-2.8 l/s

Det er vel lite trolig at vi får dagens vannforsyning til å strekke til for denne intensiteten, men vi foreslår likevel at selve spredre-mekanismen designes for denne maks-intensiteten, så får vi se om vi komplettere anlegget med en buffer-tank og ekstra pumpe.

I nedre område tror jeg det er realistisk å legge opp til 2mm/time som minste simulerte intensitet. Det utgjør 0.025l/s og er det vi med en slags presisjon klarer å tyne vår lille flow-rigg i kjelleren til å gi. For riktig små nedbørshendelser tror jeg (basert på magefølelse!) at vi evt kan pulse vanntilførsel (e.g. 5 min på, 5 min av) for å simulere "småregn" over lengre tid, uten at det gir særlig utslag i resultatene.

Så altså: område for total-flow 0.025 - 2.5 l/s (faktor 1::100!) og ta høyde for at intensitet kan justeres trinnløst i hele dette området for å kunne simulere realistiske (faktiske eller kunstige) nedbørs-perioder fra noen minutter til flere dager om nødvendig.

IVF-kurven for Rustadskogen, omregnet til liter/sekund for ett av takene på Ås gir slike tall (og IVF Blinderen i samme størrelsesorden):

RETURPERIODE(År) ¹	Tilført vannmengde (l/s), 50m2 tak									
	VARIGHET (MINUTTER)	2	3	5	10	15	20	30	45	60
2	1,48	1,29	1,16	0,97	0,71	0,57	0,48	0,36	0,26	0,21
5	1,81	1,62	1,47	1,26	0,95	0,76	0,63	0,47	0,36	0,29
10	2,03	1,84	1,68	1,44	1,11	0,88	0,73	0,55	0,42	0,34
20	2,24	2,06	1,88	1,62	1,27	1,01	0,83	0,63	0,48	0,39
25	2,30	2,12	1,94	1,68	1,32	1,04	0,86	0,65	0,49	0,40
50	2,50	2,33	2,13	1,86	1,47	1,16	0,95	0,73	0,55	0,45
100	2,71	2,53	2,32	2,03	1,62	1,28	1,05	0,80	0,61	0,49
200	2,91	2,74	2,52	2,21	1,77	1,40	1,14	0,87	0,67	0,54

mvh

Knut.

Knut M. Møen
Senior Engineer
Team Leader Hydro Technology Group

Hydrology Department, Section for Hydroinformatics
Norwegian Water and Energy Directorate (NVE)

Phone: (+47) 22959246, Mobile: (+47) 91746908
E-mail: knut@nve.no
Web: www.nve.no

From: Vegard Nilsen <vegard.nilsen@nmbu.no>
Sent: 27 January 2020 14:30
To: Knut Magne Møen; Marta Bakke
Cc: Anne Kristina Fleig
Subject: RE: Krav og spesifikasjoner til vanningsanlegg

Hei,

Takk for gode skisser!

Ang. nedbørscenarier – legger ved tidligere drodning vi hadde rundt dette. Noen punkter å tenke på:

- Taket er ment å forebygge urbane flommer, altså bør man kunne teste med de nedbørvarighetene som typisk gir skadeflom i byer, som nok er ned mot 5 minutter på det korteste og opp til noen få timer på det meste
- Foreslår at vi legger IVF-kurvene fra Blindern til grunn selv om takene står på Ås
- IVF-kurvene gir middelintensiteter over oppgitte varigheter – spissintensiteten i en regnhendelse er vanligvis høyere enn middelintensiteten. Er det viktig å ta hensyn til her?
- Eventuelt kan man plukke ut en av de store observerte hendelsene i Oslo og ha som mål å gjenskape denne?
- Klimafaktor bør regnes med
- Iht. masteroppgaven til Astri og Julie har Leca´en en effektiv porøsitet på rundt 50 % og sedum-matten har vannlagringskapasitet på 25 l/m². Det gir totalt porevolum i taket på 5000 l eller 100 mm vannsøyle. Selv om man antar at mye vann holdes tilbake i taket, skal det altså mye til for å fylle det opp 😊

Hilsen
Vegard

From: Knut Magne Møen <kmm@nve.no>
Sent: 27. januar 2020 13:37
To: Marta Bakke <marta.bakke@live.no>
Cc: Vegard Nilsen <vegard.nilsen@nmbu.no>; Anne Kristina Fleig <afl@nve.no>
Subject: SV: Krav og spesifikasjoner til vanningsanlegg

Hei Marta,

Jeg skal ta en prat med Anne Fleig og se om vi kan komme opp med noen tall og scenarier for hva vi kan ønske å simulere. Umiddelbart tenker jeg at intensiteter opp mot 50-års hendelse vil være interessant. Når jeg også ønsket mindre intensiteter, er det for å kunne simulere reelle hendelser med «småregn» i forkant som delvis metter takket før en stor hendelse.

Men du venter på konkrete tall, her er en kort og skjematisk beskrivelse av hvordan jeg tenker en slik simulator realiseres!

Mvh
Knut.

Knut M. Møen
Senior Engineer - Team leader, Hydro Technology Group
Norwegian Water and Energy Directorate (NVE)
Hydrology department, Section for hydroinformatics
Phone: (+47) 91746908 E-mail: knut@nve.no



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway