



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2023 30 stp**

Fakultet for realfag og teknologi

# **Utvikling og produksjon av ledningsgrøftmodell for undervisning og forskning på transport av mikroorganismer**

Development and production of a model pipe trench  
for education and research on the transport of  
microorganisms

**Christian Fredrik Solenes Madsen**

Vann- og miljøteknikk



# Forord

Denne oppgaven er mitt avsluttende arbeid på masterprogrammet Vann- og miljøteknikk ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Oppgaven har blitt utarbeidet over et tidsrom på 5 måneder og omfatter 30 studiepoeng. Det er et hyggelig, lærerikt og inkluderende miljø her på NMBU som virkelig kan anbefales.

Jeg ønsker å rette en stor takk til min veileder, Vegard Nilsen, for god faglig veiledning og støtte. Uten din veiledning og tilbakemeldinger hadde ikke prosessen med denne oppgaven vært den samme. Jeg vil også takke Øyvind Hansen og resten av verkstedet ved NMBU for behjelpelighet og nyttige innspill.

Franzefoss Pukk AS avd. Vinterbro fortjener en takk for deres bidrag av løsmasser. Og en takk til Brødrene Dahl AS for bidraget deres med rørsystemer.

Avslutningsvis vil jeg også gjerne takke familie og venner for deres støtte og motivasjon gjennom arbeidet med denne masteroppgaven, og mine flotte studieår her på Ås.

Ås, juni 2023

Christian Fredrik Solenes Madsen



## Sammendrag

Det norske ledningsnett har høyere lekkasjeprosent enn det nasjonale målet, noe som kan gi en stor risiko for krysskontaminering. Lekkasje på både drikkevanns- og avløpsledninger utgjør en fare for innsug av avløpsvann inn til drikkevannsnett. Det er behov for mer forskning på risikoen for forurensning av mikroorganismer i grøftesystemer. Mangel på kunnskap om overlevelsessevnen og transportevnen til mikroorganismer kan gi store helsemessige konsekvenser.

I håp om videre forskning på hvordan et felles grøftesystem fungerer, og hvilke konsekvenser lekkasjer i et slikt system kan gi, vil denne oppgaven beskrive utviklingen og produksjon av et simulert grøftesystem. Det simulerte grøftesystemet skal kunne simulere vertikal transport, uten horisontal grunnvannsstrømning, av mikroorganismer i de forskjellige sonene i en representativ norsk grøft ved ulike grunnvannsstand og nedbørintensitet.

Grøftesystemet har et areal på 0,45 m<sup>2</sup> og en høyde på 1 m. Det er påført ett lekkasjehull på både drikkevannsledningen og avløpsledningen med diameter på 0,7 mm og 0,5 mm. En pumpe tilfører vann til drikkevannsledningen og ga en vannføring på 1 ml/s ut av lekkasjehullet ved en hastighet på 5 RPM på pumpa uten grøftemasser tilført systemet. Avløpsledningen får tilførsel gjennom en transparent slange der en kan holde oversikt over volum tilført grøftesystemet. Resultatene fra tester viser en vannføring på omtrent 0,4 ml/s ut av lekkasjehullet uten grøftemasser tilført, og en vannføring på omtrent 0,15 ml/s med grøftemasser, ved en trykkehøyde på 1 m. Selve grøftekassa er plassert under en nedbør-avløpssimulator som kan justere grunnvannstand og nedbørhendelser.

Utformingen av systemet gir mulighet til visualisering av et representativt grøftetverrsnitt for et praktisk alternativ til undervisning. Grøftesystemet er brukervennlig og med muligheter for enkle justeringer for trykk på ledningsnett, grunnvannsstand, nedbør, og utskiftninger av grøftemasser, ledningstyper og lekkasjestørrelser for videre forskning på mikroorganismers transport- og overlevelsessevne.

Resultatene gir grunnlag for, og viser til muligheter for videre forskning, og videre datagrunnlag for risikoanalyser, for innsug av mikroorganismer i drikkevannsnett ved lekkasjer på avløpsnett.



## Summary

The Norwegian pipeline network has a higher leakage percentage than the national goal, which can pose a significant risk of cross-contamination. Leaks in both drinking water and wastewater pipelines present a danger of sewage ingress into the drinking water system. There is a need for further research on the risk of microbial contamination in pipe trench systems. Lack of knowledge about the survival and transport capabilities of microorganisms can have significant health consequences.

In hope of advancing research on how a common pipe trench system functions and the implications of leaks in such a system, this study will describe the development and production of a simulated pipe trench system. The simulated trench system aims to simulate vertical transport, without horizontal groundwater flow, of microorganisms in the different zones of a representative Norwegian trench at varying groundwater levels and rainfall intensities.

The pipe trench system has an area of 0,45 m<sup>2</sup> and a height of 1 m. Leakage holes with diameters of 0,7 mm and 0,5 mm have been applied to both the drinking water and wastewater pipelines, respectively. A pump supplies water to the drinking water pipeline, resulting in a flow rate of 1 ml/s out of the leakage hole at a pump speed of 5 RPM without trench materials added to the system. The wastewater pipeline receives supply through a transparent hose that allows monitoring of the volume supplied to the trench system. Test results indicate a flow rate of approximately 0,4 ml/s out of the leakage hole without trench materials added and a flow rate of approximately 0,15 ml/s with trench materials, at a pressure head of 1 m. The trench box itself is positioned beneath a rainfall-drainage simulator that can adjust groundwater levels and precipitation events.

The design of the system allows for visualization of a representative pipe trench cross-section as a practical teaching alternative. The pipe trench system is user-friendly and offers opportunities for simple adjustments to pressure on the pipeline network, groundwater levels, precipitation, and replacements of trench materials, pipe types, and leakage sizes for further research on microbial transport and survival capabilities.

The results provide a basis for and highlight opportunities for further research and additional data for risk assessments regarding the ingress of microorganisms into the drinking water system through leaks in the wastewater network.





# Innholdsfortegnelse

Forord.....	II
Sammendrag .....	IV
Summary .....	VI
Figurer.....	X
Tabeller.....	XII
<b>1. Introduksjon .....</b>	<b>1</b>
1.1    Motivasjon.....	1
1.2    Problemstilling .....	2
<b>2. Bakgrunn .....</b>	<b>3</b>
2.1    VA-ledningsnett .....	3
2.2    Rørteknologiens utvikling .....	4
2.3    Lekkasjer på VA-ledningsnett.....	7
2.4    Grunnforhold i grøftesystemer .....	8
2.4.1    Grøftesystemets oppbygning .....	9
2.5    Mikrobiologiske forhold i grøftesystemer.....	12
2.5.1    Indikatororganismer.....	12
2.5.2    Overlevelsessevne i grunnen.....	14
2.5.3    Transport av mikroorganismer .....	16
2.6    Kontaminering av ledningsvann.....	18
2.7    Tidligere norsk studie.....	20
<b>3. Metode .....</b>	<b>23</b>
3.1    Utvikling av grøftesystemet .....	24
3.1.1    Valg av grøftemasser .....	25
3.1.2    Dimensjonering av grøftesystemet .....	26
3.1.3    Arbeidstegning av grøftesystemet .....	30
3.1.4    Plassering av tappingspunkt og stigerør .....	31
3.1.5    Lekkasje på ledninger.....	32
3.2    Testing av grøftesystemet.....	36

3.2.1	Test uten grøftemasser .....	36
3.2.2	Test med grøftemasser .....	39
<b>4.</b>	<b>Resultater .....</b>	<b>40</b>
4.1	Ferdigstilt grøftesystem .....	40
4.2	Testresultater .....	42
<b>5.</b>	<b>Diskusjon.....</b>	<b>50</b>
5.1	Grøftesystemets utforming .....	50
5.2	Grøftesystemets funksjonalitet .....	52
5.3	Sammenligning med det tidligere norske studiet .....	54
5.4	Videre arbeid .....	55
<b>6.</b>	<b>Konklusjon .....</b>	<b>56</b>
	<b>Referanser.....</b>	<b>57</b>
	<b>Vedlegg .....</b>	<b>60</b>
	Vedlegg A. Uttrykk for beregning av volumstrøm som funksjon av trykkhøyde. ....	60
	Vedlegg B. Uttrykk for beregning av trykkhøyde som funksjon av tid. ....	61
	Vedlegg C: Koeffisienter for karakterisering av funksjonen til blender. ....	62
	Vedlegg D: Formel benyttet for beregning av Reynolds´ tall. ....	63
	Vedlegg E. Bilder av det simulerte grøftesystemet. ....	64

# Figurer

FIGUR 1: SONEINDELING I ET GRØFTETVERRSNITT (STIFTELSEN VA/MILJØ-BLAD, 2016).....	8
FIGUR 2: KONSTRUERT OG TILPASSET TVERRSNITT AV BEGGE GRØFTENE BENYTTET I DET TIDLIGERE NORSKE FORSØKSNLEGGET (MYHRSTAD & JAHREN, 1983). .....	20
FIGUR 3: BILDE AV NEDBØR-AVLØPSSIMULATOR (LILLETVEDT & RASEN, 2020). .....	24
FIGUR 4: FLYTSKJEMA FOR DRIKKEVANN TIDLIG I PLANLEGGINGSFASEN.....	25
FIGUR 5: FLYTSKJEMA FOR AVLØPSVANN TIDLIG I PLANLEGGINGSFASEN.....	25
FIGUR 6: TVERRSNITT AV GRØFTEKASSE MED DIMENSJONER, PLASSERING AV RØR OG SONEINDELING.....	29
FIGUR 7: PLANLEGGINGSSKISSE AV SIMULERT GRØFTESYSTEM MED DIMENSJONER. ....	30
FIGUR 8: SKISSE AV PLASSERING TIL TAPPINGSPUNKT OG STIGERØR.....	31
FIGUR 9: FLYTSKJEMA FOR FERDIGSTILT GRØFTESYSTEM. ....	40
FIGUR 10: FERDIGSTILT GRØFTEKASSE UTEN GRØFTEMASSE SETT FRA INNLØPSTVERRSIDE. ....	41
FIGUR 11: BILDE AV TETTHETSTEST SETT FRA LENGDESIDE. VISER TYDELIG DEFORMASJON I RAMMEVERKET.....	42
FIGUR 12: BILDE AV LEKKASJE FRA MONTERINGSPUNKT TIL STIGERØRET. ....	43
FIGUR 13: VOLUMSTRØM SOM FUNKSJON AV TRYKKHØYDE VED BEREGNINGER OG TESTER FOR LEKKASJEHULLETTIL AVLØPSLEDNINGEN UTEN GRØFTEMASSE. AVLØPSKOEFFISIENT BENYTTET FOR BEREGNET HULLSTRØMNING ER 0,62. ....	44
FIGUR 14: TRYKKHØYDE SOM FUNKSJON AV TID VED BEREGNINGER OG TESTER FOR LEKKASJEHULLETTIL AVLØPSLEDNINGEN UTEN GRØFTEMASSE. ....	44
FIGUR 15: VOLUMSTRØM MÅLT UT AV LEKKASJEHULLETTIL DRIKKEVANNLEDNINGEN VED STIGENDE HASTIGHETER PÅ PUMPA.....	45
FIGUR 16: BILDE AV UTLØPSTVERRSIDE ETTER TESTER FORVOLUMSTRØM VED ULIKE PUMPEHASTIGHETER PÅ DRIKKEVANNLEDNING. ENDESTYKKE ER TRYKKET UT.....	46
FIGUR 17: TRYKKHØYDE SOM FUNKSJON AV TID FOR MÅLTE VERDIER AV LEKKASJEHULLETTIL AVLØPSLEDNINGEN MED- OG UTEN GRØFTEMASSE. ....	47
FIGUR 18: VOLUMSTRØM SOM FUNKSJON AV TRYKKHØYDE FOR MÅLTE VERDIER AV LEKKASJEHULLETTIL AVLØPSLEDNINGEN MED- OG UTEN GRØFTEMASSE. ....	47
FIGUR 19: VANNSTANDEN MÅLT I STIGERØRET OG DET TRANSPARENT VINDUET MOT NEDBØRSTID. ....	49
FIGUR 20: FERDIGSTILT GRØFTEKASSE SETT FRA LENGDESIDE.....	64
FIGUR 21: FERDIGSTILT GRØFTEKASSE SETT FRA UTLØPSTVERRSIDE MED TAPPINGSPUNKT OG STIGERØR. ....	64
FIGUR 22: FERDIGSTILT GRØFTEKASSE MED GRØFTEMASSE SETT FRA INNLØPSTVERRSIDE. ....	64
FIGUR 23: FERDIGSTILT GRØFTEKASSE SETT OVENFRA UTEN GRØFTEMASSE. ....	64
FIGUR 24: BILDE AV TETTHETSTEST SETT FRA UTLØPSTVERRSIDE. ....	65
FIGUR 25: BILDE AV TETTHETSTEST SETT FRA INNLØPSTVERRSIDE. ....	65
FIGUR 26: BILDE AV UTLØP OG STIGERØR VED TAPPING AV GRUNNVANN.....	65
FIGUR 27: BILDE AV TETTHETSTEST SETT FRA LENGDESIDE. VISER TYDELIG DEFORMASJON I RAMMEVERKET.....	65
FIGUR 28: BILDE AV TESTING FOR VOLUMSTRØM UT AV LEKKASJEHULL PÅ AVLØPSLEDNING VED ULIKE TRYKKHØYDER. ....	66
FIGUR 29: BILDE AV UTSTRØMNING FRA LEKKASJEHULL PÅ AVLØPSLEDNING UNDER TESTING AV VOLUMSTRØM MED HULLPLASSERING OPP. ....	66
FIGUR 30: BILDE AV UTLØPSTVERRSIDE ETTER TESTER FOR PUMPEHASTIGHETER PÅ DRIKKEVANNLEDNING. ENDESTYKKE ER TRYKKET UT.....	66
FIGUR 31: BILDE AV TESTING FOR VOLUMSTRØM UT AV LEKKASJEHULL PÅ DRIKKEVANNLEDNING VED STIGENDE HASTIGHET PÅ PUMPA. ....	66
FIGUR 32: BILDE AV TESTER FOR VOLUMSTRØM UT AV LEKKASJEHULLETTIL AVLØPSLEDNING MED FYLTE GRØFTEMASSE.....	67
FIGUR 33: BILDE AV LEKKASJE FRA MONTERINGSPUNKT TIL STIGERØRET. ....	67
FIGUR 34: BILDE AV GRUNNVANNSTAND MÅLT I PLEKSIKLASSET UNDER TESTING MED IMPLEMENTERING AV NEDBØR-AVLØPSSIMULATOR. BILDET ER TATT UNDER MÅLT GRUNNVANNSTAND PÅ 64,5 CM I STIGERØRET, OG 65,5 CM I PLEKSIKLASSET. ....	67

FIGUR 35: BILDE AV GRUNNVANNSTAND MÅLT MED STIGERØR UNDER TESTING MED IMPLEMENTERING AV NEDBØR- AVLØPSSIMULATOR. BILDET ER TATT UNDER MÅLT GRUNNVANNSTAND PÅ 64,5 CM. ....	67
FIGUR 36: BILDE AV PUMPA SOM BENYTTES TIL DET SIMULERTE GRØFTESYSTEMET. ....	68
FIGUR 37: BILDE AV METTET GRØFTESYSTEM ETTER TEST FOR MÅLING AV TID FOR Å FÅ ET METTET SYSTEM VED EN NEDBØRINTENSITET PÅ 400 L/S*HA. ....	68
FIGUR 38: OVERSIKTSBILDE AV TESTING VED IMPLEMENTERING AV NEDBØR-AVLØPSSIMULATOR. ....	69

# Tabeller

TABELL 1: MINSTE NEDRE FUNDAMENTTYKKELSE VED ULIKE DIAMETERE OG ULIKE GRUNNFORHOLD (STIFTELSEN VA/MILJØ-BLAD, 2016). .....	9
TABELL 2: KORNSTØRRELSE FOR FUNDAMENTMASSER (STIFTELSEN VA/MILJØ-BLAD, 2016).....	10
TABELL 3: KORNSTØRRELSE FOR MASSER TIL SIDEFYLLING/BESKYTTELSESLAG (STIFTELSEN VA/MILJØ-BLAD, 2016).....	10
TABELL 4: MÅL AV DIMENSJONER PÅ EKSISTERENDE NEDBØR-AVLØPSSIMULATOR. ....	26
TABELL 5: DIMENSJONER FOR GROV BEREKNING AV VEKT PÅ GRØFTESYSTEMET. ....	27
TABELL 6: VERDIER FOR BEREKNET VANNFØRING VED ULIKE TRYKK OG DIAMETERE FØR TESTER, SAMT HASTIGHET VED UTSTRØMNING FOR GITT TRYKK PÅ LEKKASJEHULLET TIL AVLØPSRØRET.....	34
TABELL 7: VERDIER FOR BEREKNET VANNFØRING VED ULIKE TRYKK OG DIAMETERE ETTER TESTER, SAMT HASTIGHET VED UTSTRØMNING FOR GITT TRYKK PÅ LEKKASJEHULLET TIL AVLØPSRØRET.....	37



# 1. Introduksjon

## 1.1 Motivasjon

Rent og helsemessig trygt drikkevann er en av de viktigste faktorene for å opprettholde god helse og livskvalitet. Tilgang til trygt drikkevann er avgjørende for å unngå sykdommer og epidemier som kan oppstå som følge av forurenset vann. Forurensning av drikkevann kan komme fra en rekke kilder, inkludert menneskelige aktiviteter som industrielt avløp, landbruk, avfallshåndtering og kommunalt avløp, samt naturlige hendelser slik som intensiv nedbør og flom. Disse forurensningskildene kan føre til at grøftevann blir sterkt påvirket av mikroorganismer.

I Norge legges vann- og avløpsledninger som oftest i et felles grøftesystem, og ledningsnettets spiller en avgjørende rolle i å sikre befolkningen tilgang til rent og helsemessig trygt drikkevann. Ledningsnettets består av et nettverk av rør og rørsystemer som fører vann fra kilden til forbrukeren, og dette må gjøres på en sikker og effektiv måte for å opprettholde vannkvaliteten. Eldre rør og ledninger, dårlig leggeteknikk og ekstreme værhendelser kan forårsake forurensning og lekkasjer, som igjen kan føre til tap av vannkvalitet.

Det kan være vanskelig å avdekke årsaken til sykdomsutbrudd som skyldes mindre hendelser av innlekkasje på ledningsnettets. Dette skyldes i stor grad at slike hendelser kan være vanskelig å oppdage, symptomene på sykdom kan ta lang tid å utvikle seg, de kan være uspesifikke og forveksles med andre sykdommer. Dette kan gjøre det utfordrende for helsemyndigheter å identifisere og spore bakgrunnssykdom som skyldes innlekkasje på ledningsnettets, og det er ofte først når mange mennesker blir syke samtidig at det blir oppdaget at vannforsyningen er forurenset. Også i slike tilfeller kan det være vanskelig å fastslå nøyaktig hvilken hendelse eller forurensning som er årsaken, slik som i Askøy kommune i 2019 (Folkehelseinstituttet, 2019).

Hvis grunnvannet i grøftesystemer står over vannledningen, kan det grunnet flere ulike forhold oppstå innsuging av forurenset grøftevann i ledningen. Forutsetningene er at det må være en inngang inn til drikkevannsledningen, en ekstern forurensning tilstede og lave/negative trykkhendelser i drikkevannsledningen for at innsug kan forekomme (Besner et al., 2011). Det norske ledningsnettets har høyere lekkasjeprosent enn det nasjonale målet om 25%, og det er behov for mer forskning på risikoen for forurensning av mikroorganismer i

grøftesystemer. Dette gjelder spesielt for transport mellom spillvannsledningen som ligger nederst i norske grøfter, og drikkevannsledningen som er plassert øverst. Mangel på kunnskap om overlevelsessevnen og transportevnen til mikroorganismer i sonen mellom avløpsledningen og drikkevannsledningen kan gi store konsekvenser.

Det er et behov for videre forskning rundt dette tema, og denne oppgaven er gjennomført med dette i fokus. Det er blitt gjennomført én tidligere kjent norsk forsøksstudie, utført av Myhrstad og Jahren (1983), som tar for seg mikrobiologiske forhold i ledningsgrøfter og her inkluderer transport av mikroorganismer i grøftemasser. Denne studien har bidratt mye til kunnskapen vi nå vet om tema. I tillegg gjennomføres en litteraturstudie vedrørende transport av mikroorganismer i grøft av en medstudent samtidig som denne oppgaven utføres (Naphaug, 2023).

## 1.2 Problemstilling

Målet med denne oppgaven er å utforme, produsere og teste et simulert grøftesystem som skal brukes til videre forskning og undervisning. Det er ønskelig at grøftesystemet skal kunne simulere vertikal transport, uten horisontal grunnvannsstrømning, av mikroorganismer i de forskjellige sonene i en representativ norsk grøft ved ulike grunnvannsstand og nedbørintensitet.

Grøftesystemet skal kunne benyttes til undervisning for å demonstrere og visualisere hvordan en representativ norsk grøft kan være konstruert. Dette gjelder for både ledninger og grøftemasser. Det er derfor besluttet at grøftesystemet skal ha en gjennomsiktig vegg der det er mulig å vise hvordan et grøftetverrsnitt kan se ut.

Det simulerte grøftesystemet skal, ved senere arbeid, forhåpentligvis kunne bidra til å gi datagrunnlag for risikoanalyser for innsug av mikroorganismer i drikkevannsledningen. Det skal i tillegg være mulig å justere trykket på ledningsnett, for både vann og avløp, samt lekkasjestørrelse på ledningene. Mulighet for trykkendring på vannledningen er ment for eventuell senere forskning på innlekkasjer, samt hvordan lekkasjer påvirker transporten av mikroorganismer, ved ulike trykk. Trykk på avløpsledning er ment for å plassere en forurensning utenfor avløpsledningen og simulere lekkasjer ved ulike belastninger på nettet.



## 2. Bakgrunn

### 2.1 VA-ledningsnett

Transport av vann, spillvann og overvann foregår i all hovedsak i ledninger under bakken. Det er vanlig i Norge å legge drikkevannsledningen i den samme grøfta som avløpsledningene, mens det i en rekke andre land ikke er tillatt grunnet bl.a. av fare for forurensning av drikkevannet. VA-ledninger (vann- og avløpsledninger) følger vanligvis gatene i byer, og i noen av disse landene er det eksempelvis krav om at drikkevannsledningene og avløpsledningene skal ligge på hver sin side av gata (Ødegaard et al., 2014). I mange år har den vanligste praksis i Norge gått ut på å legge ledningene i ulike høyder der vannledningene er plassert høyere oppe i grøfteprofilen enn avløpsledninger, men i noen kommuner er VA-ledninger tidligere blitt lagt på samme nivå av økonomiske og anleggstekniske årsaker (Myhrstad & Jahren, 1983).

Det er et overordnet krav til vannledningsnettene å levere vann med god kvalitet og kapasitet uten avbrudd (Drikkevannsforskriften, 2017). Transport av drikkevann fra vannkilden eller vannbehandlingsanlegg frem til abonnentene er et overføringssystem som består av overføringsledninger, pumpestasjoner, utjevningsmagasin og fordelingsledninger. Transporten av vannet kan baseres på selvføll eller pumping, men er som oftest basert på en kombinasjon (Ødegaard et al., 2014). Det er med dette en del faktorer som kan påvirke og forstyrre det overordnede kravet. Nødvendig vedlikeholdsarbeid, korrosjon, brudd på ledninger, eller partikkeltransport som fører til brunfarging og/eller turbid vann hos abonnentene er noen forhold som kan gjøre det nødvendig å stenge ned deler av nettet.

For avløpsnettene er det overordnede kravet relativt tilsvarende. Det innebærer at spillvann fra husholdninger skal transporteres til renseanlegg uten ulemper for befolkningen og miljøet (Forurensningsforskriften, 2022). For at smittestoff fra avløpsledningen skal kunne overføres til drikkevannsledningen må altså kravene for både avløpsledning og drikkevannsledning svikte. Overvannsnettene skal transportere overvann til nærmeste resipient, og i byggeteknisk forskrift, § 15-8, står det at bortledning av overvann og drens vann skal skje slik at det ikke oppstår oversvømmelse eller andre ulemper ved dimensjonerende regnintensitet (Byggeteknisk forskrift (TEK17), 2017). Slike ulemper kan forekomme ved eksempelvis brudd på ledningsnettene eller ved overbelastning i fellessystem som kan føre til forurensede utslipp til

sårbare resipienter. Det viser seg stadig at ulike forhold kan redusere vannføringskapasiteten for ledningene og videre medfører at de overordnede kravene ikke tilfredsstilles.

## 2.2 Rørteknologiens utvikling

Krav til utførelse av ledningsgrøfter ble først stilt på 1900-tallet da det ble økende belastninger fra biler og trikker. På den samme tiden startet metodene for beregninger av ytre last på ledninger der det ble tatt hensyn til dybde på ledning og friksjon i gjenfyllingsmassene i grøft (Ødegaard et al., 2014).

Vann- og avløpsledninger utført slik vi kjenner til i dag er bygget etter 1850. I begynnelsen ble vannledninger bygget av grått støpejern støpt horisontalt i sandformer. Støpejernsrørteknologien gjennomgikk så en sterk utvikling utover 1900-tallet som medførte at rørene fikk en jevnere og mindre veggykkelse (Oddevald & Hansen, 2004). Rundt 1960-årene kom seige støpejernsrør på markedet som kunne støpes med enda mindre veggykkelse. Det viste seg etter hvert at korrosjon var et vesentlig problem som førte til brudd på rørene av grått støpejern og gjennomtæring på de nyutviklede seige støpejernsrørene. Omtrent på 1970-tallet ble det derfor lagt ulike belegg på de seige støpejernsrørene. Rørene ble beskyttet av et innvendig belegg av sementmørtel og etter hvert et utvendig sinkbelegg, kombinert sink/aluminiumsbelegg eller ulike plastbelegg (Ødegaard et al., 2014).

I byer og i store tettsteder der det er behov for store dimensjoner er de dominerende rørmaterialene som er blitt brukt støpejern, betong, PE (polyetylen) og glassfiberarmert polyester for vannledninger (Oddevald & Hansen, 2004). Det har i senere tid vært generelt få feil på disse ledningene (Ødegaard et al., 2014). Bruk av plast som rørmateriale i vannledninger kom i overgangen mellom 1950/60-tallet. Det ble vanlig materiale i distriktene og for fritidsbebyggelse da det dreide seg vesentlig om mindre dimensjoner (Oddevald & Hansen, 2004). Asbestsementrør ble også lagt i en periode i Norge fra 1950/60-årene. Rør av asbest ble forbudt i samme periode som forbudet mot asbest i bygninger i 1985 grunnet sykdomsrisiko ved produksjon og separasjon av disse rørene. I tillegg har dårlig leggeteknikk og nedbrytning av disse rørene ført til mange skader (Ødegaard et al., 2014).

Dominerende rørmateriale for små og mellomstore diametere har fra rundt 1970-årene vært termoplast (PVC, PE og PP). Særlig PE er mye brukt for vannledninger og trykkledninger for avløp. PE er det materialet som under normale betingelser er mest motstandsdyktig mot slitasje, men PE deformeres over tid og har stor temperaturutvidelseskoeffisient på 0,18 mm/m·°C som på et 12 meter langt rør tilsvarer 4 cm for 20°C (PIPELIFE, 2021). Dette er viktig å ta hensyn til ved legging, ettersom temperaturen i bakken og i lufta kan være vesentlig forskjellig og kan føre til en stor påkjenning på skjøter ved ugunstig utførelse. Termoplastrør lagt i starten av denne perioden har vært utsatt for bruddskader, noe som kan komme av langsgående riper ved håndteringen ved sveising eller skjøting med elektromuffer, men utbedringer har gjort rørmaterialet mer motstandsdyktige mot brudd og sprekkvekst. Dette har medført få skader på rørene av termoplast lagt etter 1980-årene (Ødegaard et al., 2014).

Avløpsledninger har i tidligere år blitt bygget av importerte teglrør, men betongrør overtok rundt overgangen til 1900-tallet. Tegl-materialet var motstandsdyktig mot kjemikalier, men materialet var sprøtt og anleggene fikk mange påfølgende skader (Ødegaard et al., 2014). Betongrør ble vanlig materiale for avløpsledninger i Norge etter 1890. Det ble etablert standarder og normer for styrke og produksjon allerede i 1909 for at rørene skulle ha tilstrekkelig god kvalitet. Det ble økende belastninger på dypere og bredere ledningsanlegg, og økende trafikkmengde i Norge etter andre verdenskrig, som førte til behovet for sterkere betongrør. Det kom da nye normer i 1970 der kravet for rørstyrken ble tredoblet. Rør som er produsert og lagt før denne endringen er ofte utsatt for feil og brudd grunnet manglende standarder og kunnskap om bygging (Sægrov, 1992).

Rør av termoplast for avløpsledninger er i likhet med vannledninger blitt brukt fra 1960-tallet. For avløp er det i hovedsak blitt benyttet PVC (polyvinylklorid). PVC som benyttes til rør blir kalt PVC-U, som vil si Polyvinylkloridrør uten tilsatt mykner. PVC er et svært stabilt, sterkt materiale med lav vekt, og er lite utsatt for kjemisk nedbrytning (PIPELIFE, 2021). PVC krever korrekt komprimering, og det medfører at leggingen er et sårbart område. Ved lav temperatur kan PVC også være utsatt for slagskader. Rør av PP (polypropylen) tåler lave og høye temperaturer bedre (PIPELIFE, 2021). De første 10 årene etter at PVC-materialet ble tatt i bruk var det manglende kunnskap som ofte førte til deformerte rør ved selvføllsledninger og brudd på pumpeledninger (Ødegaard et al., 2014).

For større dimensjoner på avløpsledninger har GRP-rør (glassfiberarmert plast) blitt brukt i nyere tid. Dette materialet brukes mye blant annet grunnet den økonomiske konkurransedyktigheten for store dimensjoner. GRP er egnet for alle praktiske temperaturer fra -60 til +100°C, har en relativt lav vekt i forhold til styrken, og er generelt svært motstandsdyktig mot korrosjon. Disse rørene er derimot sårbare for feil som tilbakefylling med stor stein, og utvendige støt kan forårsake innvendige sprekker som kan være vanskelige å oppdage. Den tillatte tøyningen er lav sammenliknet med andre termoplastrør (Ødegaard et al., 2014).

Økt styrke på rørmaterialer, økt kunnskap og bedre anleggsutførelse har ført til at feil, deformering og brudd er mer sjeldne i dag. Dette gjelder de nyere ledningsanleggene. Store deler av ledningsnettene i Norge har blitt bygget med teknologier for utførelse og med materialkvaliteter som ikke er akseptable etter nye standarder og normer (Ødegaard et al., 2014). Tall fra SSB viser at den beregnede gjennomsnittsalderen for det kommunale vannledningsnettene i Norge med kjent alder var 34 år i 2022 med en økende tendens (SSB, 2023a), og estimert gjennomsnittsalder for kommunalt spillvannsnett med kjent alder var 35 år i 2022 også her med økende tendens (SSB, 2023b). Fornyelse av eksisterende ledninger er høyst nødvendig ettersom store deler av de eldste ledningene er utsatt for nedbrytning, først og fremst grunnet korrosjon (Ødegaard et al., 2014).

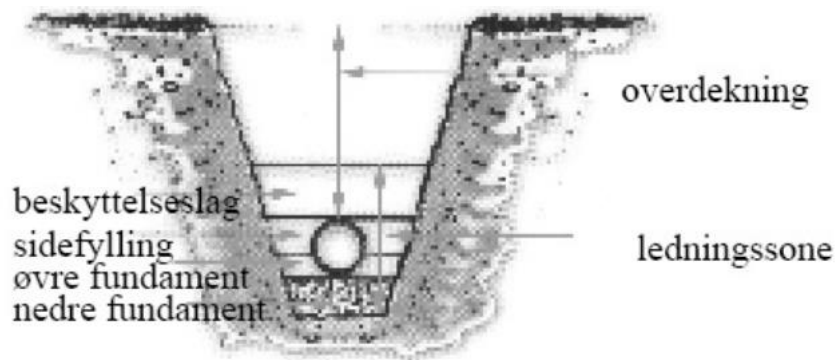
## 2.3 Lekkasjer på VA-ledningsnett

Det er ingen eksakte tall som sier hvor mye vann som lekker fra VA-ledningsnett i Norge. Målinger av eksakte mengder vann som forbrukes hos abonnentene blir ikke gjort i tilstrekkelig grad, noe som medfører at det ikke kan regnes ut presise lekkasjeprosenter, men ifølge noen estimater er lekkasjer et betydelig problem. En rapport fra Folkehelseinstituttet utført i 2021 viser at lekkasjeprosenten for vannledningsnett er stabil og over det nasjonale målet om 25%. Sammenstillinger av data over flere år viser i den samme rapporten at om lag 30% av vannet som produseres i Norge aldri når forbrukerne grunnet lekkasjer på nettet (Steinberg et al., 2021). Samtidig varierer dette i de ulike kommuner. Ifølge Norsk Vann går det tapt 40% eller mer av det rensede drikkevannet ved en rekke vannforsyninger grunnet lekkasje i ledningsnett (Norsk Vann, 2021). Utette vannledninger kan også medføre inntrengning av forurenset vann, inkludert avløpsvann, ved trykkløse hendelser ettersom vann- og avløpsledninger i all hovedsak ligger i samme grøft (Norsk Vann, 2021). Dette vil kunne forurense drikkevannet.

Avløpsnett i motsetning til drikkevannnett er oftest basert på selvfyll, men avløpsledninger har også lekkasjer. Avhengig av grunnforholdene vil det noen steder på nettet lekke avløp ut i grunnen, mens andre steder vil ledningene være omgitt av grunnvann som vil lekke inn i ledningen, og eventuelt lekkasjer på drikkevannsledning som kan renne inn på avløpsledningen. Dette vil i noen omstendigheter medføre store mengder fremmedvann inn på avløpsnett som belaster kapasiteten og igjen vil føre til større rensekostnader ved rensesanlegg. Den økte belastningen vil i tillegg kunne øke risikoen for skader på avløpsnett, og føre til flere lekkasjepunkter (Lindholm, 2017).

## 2.4 Grunnforhold i grøftesystemer

Grunnforholdene i grøftesystemer i Norge varierer avhengig av geologiske forhold og topografi. Klima kan også påvirke grunnforholdene da eksempelvis områder med høye nedbørsmengder eller områder med høy grunnvannstand kan være utfordrende ettersom grunnen kan være våt og ustabil. Det må i mange situasjoner være mulig å grave relativt dypt for å få tilstrekkelig med fall. Dette kan gjøre det utfordrende i områder med fjell og harde bergarter, mens områder med mykere jordsmonn som sand og leire gir bedre forutsetninger for grøfting. Ifølge VA/Miljø-blad nr. 5 er jordarten, jordartens fasthet, dybde til fjell og grunnvannstand det som kan påvirke utførelsen og må bestemmes ved grøfteutførelse (Stiftelsen VA/Miljø-blad, 2016). I Norge kan disse faktorene variere avhengig av hvor i landet grøftesystemet skal bygges eller befinner seg, og det er da satt standarder og retningslinjer for ledningsgrøfters oppbygning.



Figur 1: Soneinndeling i et grøftetverrsnitt (Stiftelsen VA/Miljø-blad, 2016).

## 2.4.1 Grøftesystemets oppbygning

En ledningsgrøft deles ofte inn i ulike soner avhengig av funksjon, se Figur 1. I nedre del av grøfta er det et fundament som har til hensikt å overføre belastningen som påføres ned til grunnen. Fundamentet skal komprimeres, men det skal ikke være for hardt ei heller gi for mye etter. Et hardt fundament kan medføre konsentrert last i bunnen av røret, såkalt knivlast (PIPELIFE, 2021). For å unngå dette skal sonen under røret løsgjøres i 1/3 dybde av det nedre fundamentet etter komprimering (Stiftelsen VA/Miljø-blad, 2016). Nedre fundament vil si fundamentet under røret, og dette skal ha en tykkelse på minimum 150 mm, se Tabell 1. Dersom det er veldig hard grunn slik som fjell, hard morene eller lignende skal nedre fundamenttykkelse økes ved høyere diametere på rørene for å minske risiko for knivlast (Stiftelsen VA/Miljø-blad, 2016).

Tabell 1: Minste nedre fundamenttykkelse ved ulike diametere og ulike grunnforhold (Stiftelsen VA/Miljø-blad, 2016).

Nominell rørdiameter	Normale grunnforhold [mm]	Harde grunnforhold f.eks. fjell eller betong [mm]
$DN < 400$	150	150
$400 \leq DN < 1200$	200	300
$1200 \leq DN < 2000$	350	400

Det øvre fundamentet vil si den delen av fundamentmassene som støtter på nedre del av røret. Dette betegnes også som kvartsirkelstøtte, og er overgangen mellom fundament og sidefyllingsmasser. Denne massen er viktig at ligger tett inntil og innunder røret for å sikre at det er tilstrekkelig side- og understøtte og at det blir unngått ujevne belastninger på røret (PIPELIFE, 2021).

Massene benyttet i fundamentet, både nedre og øvre fundament, er de massene som i hovedsak er de mest finkornede i grøfta. Maskinsand er ofte blitt benyttet. Noen steder ligger det til rette for å benytte stedlige masser også i fundamentet eksempelvis der det er morenesand (Stiftelsen VA/Miljø-blad, 2016). Kornstørrelsene som er anbefalt for fundamentmasser avhenger av diameter på rør og gradering av massene, se Tabell 2. Det anbefales ikke å bruke grøftebunn direkte som fundament (Stiftelsen VA/Miljø-blad, 2016).

Tabell 2: Kornstørrelse for fundamentmasser (Stiftelsen VA/Miljø-blad, 2016).

Rørtype	Rørdiameter (DN)	Største kornstørrelse	
		Velgradert	Ensgradert
Termoplast	≤ 300	16	16
	> 300	22	22
Herdeplast	≤ 600	16	16
	> 600	22	33

Over fundamentet og rundt rørsystemet legges sidefyllingsmasser. Sidefylling skal sikre tilstrekkelig sidestøtte og legges ut langs røret. Dette gjøres i hovedsak med gravemaskin med lavest mulig høyde før det jevnes ut med håndredskap og eventuelt komprimeres. Tipping av masser direkte på røret skal ikke forekomme (Vegvesen, 2014). Kornstørrelse på massene som blir benyttet i sidefylling varierer med rørdiameter og gradering, se Tabell 3. Ligger det ledninger i flere plan, som er normalt i Norge, skal hele ledningssonen bestå av friksjonsmasser (Stiftelsen VA/Miljø-blad, 2016). Friksjonsmasser er sand, grus, sprengstein og sorterte knuste masser uten finstoff (Vegvesen, 2022).

Beskyttelseslaget er laget med masser over sidefylling og over røret. Dette skal beskytte røret mot punktlast/knivlast fra masser som brukes til overdekning eller igjenfylling. Tykkelsen på beskyttelseslaget skal være på minimum 0,3 meter (Stiftelsen VA/Miljø-blad, 2016).

Kornstørrelse som blir benyttet til beskyttelseslaget er gjerne samme som sidefyllingsmassene, se Tabell 3. Ved kombinert grøft med flere ledninger skal det ifølge Statens Vegvesens håndbok N200 være friksjonsmasser med minimum tykkelse på 150 mm fra topp rør opp til neste bunn rør (Vegvesen, 2014).

Tabell 3: Kornstørrelse for masser til sidefylling/beskyttelseslag (Stiftelsen VA/Miljø-blad, 2016).

Nominell rørdiameter DN	Største nominelle kornstørrelse [mm] velgraderte masser	Største nominelle kornstørrelse [mm] ensgraderte masser
DN < 300	22	16
300 ≤ DN < 600	32	22
600 ≤ DN	40	32



Overdekning er det øverste laget i grøftesystemet, og består av igjenfyllingsmasser. Denne sonen har et lag med avstand fra toppen på det øverste røret til topp terreng, se Figur 1. Det vil si at beskyttelseslaget inngår i betegnelsen for overdekning. Igjenfylling over ledninger og over beskyttelseslaget skal fortrinnsvis gjøres ved bruk av friksjonsmasser der grøft ligger under veier og plasser. Massene her skal ikke inneholde stein som er større enn  $1/3$  av avstanden fra toppen av røret, eller  $2/3$  av lagtykkelsen. Den maksimale størrelsen er satt til 200 mm og tykkelsen på overdekningen skal være minst 1,0 meter (Vegvesen, 2014). Utenfor slike områder er det også vanlig at det blir benyttet andre typer stedlige masser (Stiftelsen VA/Miljø-blad, 2016). Korn/stein-størrelse for igjenfyllingsmasser i grøfter som ikke ligger under veier og plasser er hensiktsmessig å avhenge av tykkelsen på beskyttelseslaget, og massene skal ikke inneholde stein med større diameter enn 500 mm. Ved igjenfylling som skal komprimeres er maksimalt tverrmål satt til  $2/3$  av lagtykkelsen, og overdekningen skal minimum være 1,0 meter tykk for at det skal kunne kjøres med anleggsmaskiner (Stiftelsen VA/Miljø-blad, 2016).

## 2.5 Mikrobiologiske forhold i grøftesystemer

Det er ingen fast standard for hvordan tilstanden og de mikrobiologiske forholdene er i grøftesystemer i Norge. Forholdene kan variere avhengig av en rekke faktorer, for eksempel tilstanden på VA-ledningsnett, miljøforholdene rundt grøftesystemet, renseprosesser og massetyper som er blitt brukt ved bygging av grøft. Vanligvis vil det befinne seg mange typer mikroorganismer i grøftesystemer deriblant bakterier, virus, sopp og protozoer. Dette kan blandes inn i drikkevannsnettet ved eventuelle lekkasjer. Ifølge FHI (Folkehelseinstituttet) kommer de fleste sykdomsfremkallende mikroorganismene i drikkevann, patogene mikroorganismer, fra avføring fra mennesker eller dyr og det er ikke mulig å analysere for alle typer (FHI, 2023).

### 2.5.1 Indikatororganismer

Ettersom det ikke er mulig å analysere for alle typer mikroorganismer som kan befinne seg i drikkevannet benyttes det indikatororganismer til å gi informasjon om mulige forekomster av patogene organismer. I henhold til den norske drikkevannsforskriften skal det utføres rutineanalyser som inkluderer indikatorene; kimtall (22 °C), koliforme bakterier, inklusive *E. coli* (*Escherichia coli*), intestinale enterokokker og *Clostridium perfringens* (inkl. sporer) (Drikkevannsforskriften, 2017). Det er ingen krav om analyse av virus eller parasitter i verken råvann eller renvann i den norske drikkevannsforskriften (Ødegaard et al., 2014).

Bakteriofager har blitt foreslått som indikator for virus, og er virus som har bakterier som vertsorganisme. Parasitter har også fått mer fokus etter utbruddet av *Giardia*-epidemien i Bergen i 2004 (Ødegaard et al., 2014).

Kimtall er antall bakterier som utvikles under standard betingelser fra et bestemt vannvolum etter fortykning i næringsmedium. Det benyttes til å verifisere tilstrekkelig vannbehandling og den generelle bakteriologiske aktiviteten i drikkevannsnettet (FHI, 2023).

Koliforme bakterier er en bakteriegruppe som kan vokse og isoleres fra tarm hos mennesker og dyr (FHI, 2023). De benyttes som en indikator på fersk fekal vannforurensing, men også som indikator for effektiviteten av desinfeksjonsprosesser under rensing (Ødegaard et al.,

2014). Koliforme bakterier har evnen til å vokse i miljøet som gjør at WHO ikke anbefaler å benytte disse bakteriene som indikator for fekal forurensning, men er mer egnet som indikator for svikt i vannbehandling, forekomst av biofilm i ledningsnett eller innlekking av uønsket materiale fra planter og dyr (FHI, 2023).

*E. coli* er en termotolerant koliform bakterie som i store mengder forekommer i avføringen til mennesker og dyr (FHI, 2023). Termotolerant vil si at bakterien tåler høy temperatur, og *E. coli* kan vokse ved en temperatur opp til 44 – 45 °C (FHI, 2023). Funn av *E. coli* er en indikasjon på fersk fekal vannforurensning, men er ikke en pålitelig indikator på nærvær av virus, *Cryptosporidium* og *Giardia* (oo)cyster i drikkevann etter desinfeksjon, ettersom disse ofte er mer resistente for desinfeksjonsmidler og vanligvis overlever lenger i vann enn *E. coli* (Ødegaard et al., 2014). *E. coli* har ikke evnen til å vokse i drikkevann, men kan forurense vannet ved for eksempel lekkasje av kloakk inn i drikkevannssystemet (FHI, 2023).

Intestinale enterokokker forekommer ofte i høye konsentrasjoner fra husdyr, men i lavere antall enn *E. coli* i avføring hos mennesker (FHI, 2023). Bakterien vokser ikke i vann, men overlever ofte lenger enn *E. coli*, noe som kan medføre at intestinale enterokokker muligens er en bedre indikator på tilstedeværelse av virus i vann (FHI, 2023).

*Clostridium perfringens* forekommer i lave konsentrasjoner i menneskelig avføring. Dette er en tarmbakterie som dør raskt i kontakt med oksygen (FHI, 2023). Bakterien har en evne til å danne sporer som et overlevelsesstadium som gjør at den kan overleve lenger i vann enn de fleste andre bakterier, og i den norske drikkevannsforskriften inngår disse sporene som indikator for virus og protozoer (Ødegaard et al., 2014). Funn av *Clostridium perfringens* kan indikere tegn på gammel fekal forurensning, tilstedeværelse av parasitter, svikt i filtrering på vannverket og naturlig forekomst ved nedbrytning av organisk materiale (FHI, 2023).

## 2.5.2 Overlevelsessevne i grunnen

Mikroorganismers overlevelsessevne i grunnen spiller en viktig rolle for hvorvidt de kan påvirke drikkevannet ved eventuelle innlekkasjer, og den er avhengig av flere forhold. En meget viktig faktor er temperaturen. I tidligere norsk forskning på mikrobiologiske forhold i ledningsgrøfter ble det poengtert at overlevelsessevnen øker betraktelig ved lave temperaturer fremfor 10-15 °C for både bakterier og virus. Derfor vil de ofte kunne overleve lenger i grunnvannssonen enn i sonen over (Myhrstad & Jahren, 1983). De fleste patogene mikroorganismer er i tillegg avhengig av vertsorganismen sin for å være i stand til å formere seg (UiO, 2023). Det medfører at evnen til videre formering kan begrenses i grunnen ettersom vertsorganismen for patogene mikroorganismer gjerne er mennesker og dyr.

En litteraturstudie utført i Canada tar for seg faktorer som kan påvirke overlevelsessevnen og videre formeringsevnen samt transport av fekale bakterier i grunnen. Studien viser til fuktighet, jordtype, temperatur og pH, tilgjengelige næringsstoffer og konkurranse som de faktorene som mest sannsynlig vil kunne påvirke overlevelsessevnen (Jamieson et al., 2002). Det blir henvist til en rekke vitenskapelige artikler. Tate og Robert (1978) utførte et forsøk ved Universitetet i Florida som viste at overlevelsessevnen til *E. coli* var størst i organisk jord under oversvømte forhold, og Hagedorn et al. (1978) fant ut i deres studie at *E. coli* -populasjonen i jord var høyest etter en økning i grunnvannsstand etter store nedbørhendelser. Dette styrker dermed teorien om at overlevelsessevnen øker hvis fuktigheten i grunnen øker, men dette kan også ha vært en transporteffekt.

Evnen jordtypen har til å holde på fuktigheten har stor betydning for overlevelsessevnen til mikroorganismer i grunnen (Jamieson et al., 2002). Dette har en sammenheng med partikkelstørrelse og innhold av organisk materiale. Tate og Robert (1978) observerte i sitt forsøk at overlevelsen til *E. coli* over en periode på åtte dager i organisk jord var tre ganger større enn jord med høyt innhold av sand etter tilsetning av gjødsel. Det ble konkludert i den canadiske litteraturstudien at det skyldtes evnen organisk jord har til å holde på fuktigheten (Jamieson et al., 2002).

Det er flere vitenskapelige artikler som understreker sammenhengen mellom temperatur og overlevelsessevnen til mikroorganismer. Kibbey et al. (1978) utførte et forsøk der de benyttet fekale streptokokker som indikator for å se på forurensning i grunnen. Det ble her rapportert at gunstige forhold for overlevelse var kjølige forhold, men noterte seg at frysing og tining av

jorda reduserte populasjonen av bakterier. Filip et al. (1988) viste gjennom deres forsøk, vedrørende patogene bakterier i grunnvann, at *E. coli* kan overleve over 100 dager i jord med høy fuktighet ved 10 °C. Det er estimert at dødsraten for fekale bakterier omtrent doubles ved en økning i temperatur på 10 °C ved temperaturer mellom 5 og 30 °C (Habteselassie et al., 2008). Dette bekrefter dermed påpekningen i den norske forskningen på mikrobiologiske forhold i ledningsgrøfter, nemlig at lavere temperaturer øker overlevelsessevnen til patogene mikroorganismer betraktelig.

pH kan påvirke overlevelsessevnen til mikroorganismer. Sjogren (1994) utførte en studie, for Universitetet i Vermont, der han så på overlevelsessevnen til indikatororganismen *E. coli* i jorda ved ulike pH. Han fant ut i sitt forsøk at *E. coli* overlevde lengre ved en nøytral eller alkalisk pH enn ved sur pH i jord med samme tekstur og samme innhold av organisk materiale (Sjogren, 1994).

Tilgjengelige næringsstoffer kan være en viktig faktor for overlevelsessevnen til mikroorganismer i grunnen. Organisk materiale øker evnen jorda har til å holde på næringsstoffer, gir en karbonkilde til bakterielle arter, og øker evnen jorda har til å holde på fuktighet (Jamieson et al., 2002). Som nevnt tidligere utførte Tate og Robert (1978) et forsøk som viste at overlevelsessevnen til *E. coli* var størst i jord med organisk materiale under oversvømte forhold. Dette gir dermed grunnlag for at evnen jorda får til å holde på næringsstoffer ved tilført organisk materiale kan medføre økt overlevelsessevne for mikroorganismer.

Konkurranse blant mikroorganismer kan begrense overlevelsessevnen til patogene mikroorganismer i grunnen. Enteriske bakterier, også kalt tarmbakterier, som har blitt overført til grunnen, må konkurrere med eksisterende bakterier i jorda om de tilgjengelige næringsstoffer og vannmengder (Jamieson et al., 2002). I sterile jordtyper rapporterte Tate og Robert (1978) økt overlevelsessevne av patogene organismer i deres forsøk. Det har blitt vist i senere tid at eksisterende organismer i jorda ofte utkonkurrerer patogene organismer i søken etter næring eller at de skiller ut antibiotiske stoffer der det er jord med høyt biologisk mangfold (Pommeresche et al., 2011b). Dette kan bidra til begrenset overlevelsessevne til patogene mikroorganismer i grunnen.

### 2.5.3 Transport av mikroorganismer

Mange ulike mikroorganismer har evnen til å bevege seg. Noen bakterier har eksempelvis flageller eller cilier som gjør dem i stand til å bevege seg (Pommeresche et al., 2011a). Dette er likevel ikke store avstander over tid, men heller noen få millimetre per dag. Hvis strømmende vann transporterer organismene ved adveksjon, vil transporten gå mye raskere. Mikroorganismer har ingen evne til å bevege seg imot selv en relativt beskjeden vannstrøm, så under slike forhold vil dette styre retningen mikroorganismen er på vei hen. Den vanligste transportmetoden for patogene- og indikatororganismer i grunnen er adveksjon ved infiltrasjon og avrenning (Jamieson et al., 2002). Likevel er det enkelte organismer som har evnen til å vokse på faste flater, og med dette kunne spre seg imot en konstant vannstrøm (Myhrstad & Jahren, 1983). Det er usikkert hvor stor hastighet vannstrømmingen må ha for å hindre denne spredningen, ettersom det ikke er mulig å analysere for alle mikroorganismer.

Andre transportmekanismer for mikroorganismer i grunnen kan være diffusjon og dispersjon. Diffusjon går ut på at molekylene i vannet kolliderer med partikler. Det gir en helt tilfeldig bevegelse for partiklene, som i gjennomsnitt fører til at partikler beveger seg fra områder med høy konsentrasjon til områder med lav konsentrasjon. Dispersjon vil si spredning grunnet variasjon i strømningshastighet i porene (Norsk Vann, 2023).

Det er flere ulike prosesser som begrenser transport av mikroorganismer. Fysisk filtrering gjennom jordpartiklene er trolig hovedprosessen som begrenser mobiliteten til bakterier (Jamieson et al., 2002). Bakterien blir da holdt tilbake fordi den kolliderer med overflaten til et korn. Den blir sittende fast ved hjelp av elektrokjemisk kraft mellom bakterien og kornet. Bakterier er ifølge UiO (2020) oftest i størrelsesorden  $0,2 - 2 \mu\text{m}$ , og virus med størrelse  $0,02 - 0,3 \mu\text{m}$ . Det medfører at bakterier filtreres bedre enn mindre mikroorganismer slik som virus. Adsorpsjon regnes som hovedprosessen for begrensnings av mobilitet av mindre mikroorganismer hvor mikroorganismene i en løsning bindes til overflaten og danner biofilm (Jamieson et al., 2002).

Bakterier på jordoverflaten blir ofte holdt tilbake av filtrering og adsorpsjon, men det kan være vanskelig å skille mellom filtrering- og adsorpsjonsprosessen når det kommer til mikroorganismer (Reddy et al., 1981). Finere kornmateriale, slik som leire og silt, er mer effektivt for tilbakeholdelse av bakterieceller ettersom det er mindre porestørrelser.

Suspendert stoff, inkludert bakterier, som blir avsatt her kan fungere som et filter, eller en sil,

som vil avsette flere bakterier, og andre mikroorganismer, ved at mikroorganismene er større enn poreåpningen (Jamieson et al., 2002). Bakterieceller har i tillegg en tendens til å samle seg og danne flokker som er mer mottakelig for filtrering. De individuelle bakteriepartiklene kan i tillegg samles for og bygge broer i porer som vil motvirke adveksjonen, altså bevegelsen med strømmingen (Jamieson et al., 2002). Tidligere studier har konkludert med at disse broene kan etableres i grunnen når diameteren til de suspenderte partiklene som beveger seg gjennom et medium er større enn 0,07 – 0,2 ganger diameteren til partiklene i mediet avhengig av hvordan mediet er pakket (Jamieson et al., 2002).

Det kan dannes makroporer i grunnen som vil begrense tilbakeholdelsen av mikroorganismer. Formen på disse makroporene kan variere fra plane spalter til sylindrerformet (White, 1985). Prosesser som kan bidra til formeringen av makroporer i naturlig grunnforhold kan være faunaen i grunnen slik som mark, insekter og andre jordlevende dyr. Disse kan variere i diameter mellom anslagsvis 1 – 50 mm og er ofte tubeformede porer. Makroporer kan også formes av fryseperioder og tining gjennom sesongene, røtter fra planter og naturlige sprekker og porer fra erosjon fra grunnvannsstrømninger (Jamieson et al., 2002).

## 2.6 Kontaminering av ledningsvann

Kontaminering av en drikkevannsledning kan skje på ulike måter. Det kan skyldes grunner som feilkoblinger på nettet, innsugning via tekniske installasjoner hos noen abonnenter, inntrengning via brannventiler og kontaminering ved høydebasseng slik som det antas har skjedd i Askøy kommune i 2019 (Folkehelseinstituttet, 2019). Det er i tillegg til dette en risiko for kontaminering i selve grøftesystemet til ledningsnettet.

Det er blitt gjort flere studier og eksperimentelle undersøkelser som har tatt for seg kontaminering av drikkevannsledninger ved lekkasjer. Undersøkelsene baserer seg i hovedsak på inntrengning og kontaminering ved negative-, null- og lave trykk på drikkevannsledningen. Undertrykk på nettet kan oppstå som resultat av store uttak av vann, eksempelvis ved brannslukking eller når kapasiteten til drikkevannsnettet generelt er for lav til å tåle store vannuttak. Undertrykk og situasjoner med nulltrykk kan også forekomme ved pumpesvikt, brudd på ledning, når en automatisk bruddventil stenger uten grunn eller ved trykkstøt (Sjøvold et al., 2008). Dette kan utgjøre en fare for innsug av fremmedvann ved lekkasjer på drikkevannsnettet.

Besner et al. (2010) gjennomførte en studie som tok for seg mulige kilder til mikrobiell kontaminering til drikkevannsledninger og overvåket frekvensen og størrelsen av negative trykk. I denne studien ble majoriteten av bakterielle indikatorer fra fekal kontaminering inn til drikkevannet registrert fra oversvømte lufterventiler, og i mindre grad fra grunnen og vann fra ledningsgrøftene. Konsentrasjonen av fekal kontaminering fra disse ulike kildene var mer sammenlignbart med konsentrasjoner registrert i vann i elver enn det er i avløpsvann (Besner et al., 2010). Sammenstillingen til rørsystemet gjorde at systemet var sårbart mot inntrengning av bakterielle indikatorer ved negative trykk når trykk ut ifra renseanlegget var under 172 kPa (25 psi). Overvåkningen i denne studien foregikk over en periode på 17 måneder, og dette skjedde ni ganger i løpet av denne perioden. Det ble konkludert med at resultatene tyder på sårbarhet for kontaminering ved negative trykk (Besner et al., 2010).

Eksperimentelle undersøkelser er blitt gjort for undersøkelse av risikoen for kontaminering av grøftevann inn til drikkevannsledninger. Fontanazza et al. (2015) konstruerte et distribusjonsnett i form av et ringsystem. Det ble testet for trykkstøt med negativt trykk, og for simulering av vedlikehold på drikkevannsnettet der rør er uten tilførsel og delvis tømt. Det



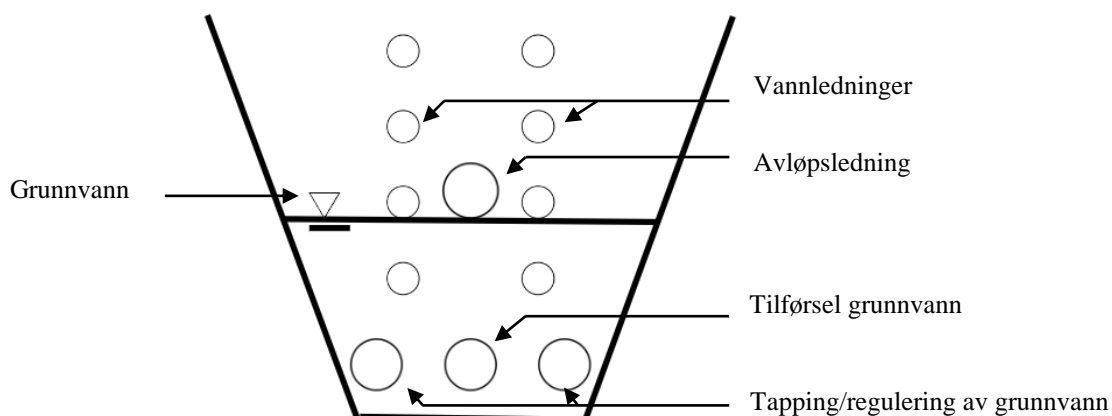
ble utført to eksperimenter for de to ulike hendelsene. Effektene av jordtype og forhold rundt distribusjonssystemet ble ikke tatt hensyn til i disse testene. Resultatene viste at delvis tømte rør uten tilførsel kan føre til store mengder kontaminering. Dette skjedde gjennom infiltrasjon. Trykksetting av rørene etter simulert vedlikehold medførte at noe av kontamineringen ble sluppet ut, men en stor del ble gjenværende i nettet og ført videre til uttapping (Fontanazza et al., 2015). Eksperimentene for trykkstøt med negativt trykk resulterte også i kontaminering av grøftevann. Dette skjedde ved innsug. Resultatene viste at det var mindre mengder som trengte seg inn i ledningen enn ved simulert vedlikehold. Likevel konkluderes det med at risikoen for kontaminering ved trykkstøt er til stede, og de konkluderte med at graden av innsug baseres i hovedsak på varigheten og omfanget på trykkstøtet med negativt trykk. (Fontanazza et al., 2015).

Fox et al. (2016) utførte et lignende eksperiment, ved Universitetet i Sheffield, som var spesifikt designet for å undersøke trykkstøthendelser. Det ble konstruert en grøftkasse med en drikkevannsledning og porøst materiale rundt. Det ble holdt et konstant vannspeil under testing. Eksternt forurensende stoff, her benyttet et fluorescerende fargestoff, ble tilført grøfta gjennom en injeksjonsnål. Også her medførte resultatene av testene at det er en risiko for kontaminering av drikkevann i grøftesystemer ved trykkstøt, og det konkluderes med at det selv ved ekstremt korte varigheter med negative trykk ved trykkstøt kan forekomme innsug og kontaminering av fremmedvann i grøft (Fox et al., 2016).

## 2.7 Tidligere norsk studie

En forsøksstudie har blitt gjennomført i Norge som omhandler mikrobiologiske forhold i ledningsgrøfter (Myhrstad & Jahren, 1983). Prosjektet ble utført av det tidligere firmaet Sivilingeniør Elliot Strømme AS. Formålet med prosjektet var å avklare hvordan ulike tekniske løsninger og driftsforhold kan påvirke mikrobiologisk kvalitet av vann i drikkevannsnettet. Arbeidet ble basert på et forsøksanlegg der betydningen av plassering av vann- og avløpsledning, vannledningens tetthet, grøftemassetype, trykkforhold i ledningene og grunnvannets nivå i grøfta var variert (Myhrstad & Jahren, 1983).

Forsøksanlegget Myhrstad og Jahren (1983) bygget besto av to 8 m lange ledningsgrøfter, der det ble benyttet naturlig sand som omfyllingsmasse i den ene, og finpukk 4-8 mm i den andre grøfta. Det ble lagt 8 vannledninger i hver grøft på 4 ulike nivåer, se Figur 2. Materialet benyttet på vannledningene var 32 mm PEH (høydensitetspolyetylen), og lekkasjeåpningene er laget på 0,3 og 0,4 mm diameter. Ved prøvetrykk på 130 mVs (meter vannsøyle) med ett enkelt hull ga dette lekkasjer på omtrent 5 l/t for 0,3 mm diameter og 9 l/t for 0,4 mm diameter. Ledningene med lekkasjeåpning på 0,3 mm ble omtalt som «tette» og det ble laget 3 hull med omtrent 3 meters mellomrom på hver av disse ledningene. Ledningene med lekkasjeåpning på 0,4 mm ble omtalt som «utette» og det ble her laget 5 hull med omtrent 1,5 meters mellomrom (Myhrstad & Jahren, 1983).



Figur 2: Konstruert og tilpasset tverrsnitt av begge grøftene benyttet i det tidligere norske forsøksanlegget (Myhrstad & Jahren, 1983).

Kloakk ble tilført via et icodrenrør og ble lagt på det nest nederste nivået mellom de to vannledningene. Dette var ment for å få kloakktilførsel både under, ved siden av og over vannledningene (Myhrstad & Jahren, 1983). Det ble tilført rentvann i bunnen av grøfta, som vist i Figur 2, og det ble oppnådd hydraulisk balanse og stabil grunnvannsstand ved at grunnvann ble tappet av fra dremsledninger i bunnen av grøfta via et regulerbart overløp. Dette var ment for å kunne undersøke betydningen av grunnvannsstand i forhold til vannledningenes- og kloakkledningens plassering (Myhrstad & Jahren, 1983).

Alt av utrustning på grøftesystemet ble plassert i eller over en spesiallaget PEL-kum (lavdensitetspolyetylen). Det ble montert stenge-, tappe-, og spylekraner på alle vann- og kloakkledningene. Det ble pumpet ferdig behandlet kloakkvann til de to grøftene med en dobbel slangepumpe. For vann i vannledningene ble det benyttet en flottørtank som ga mulighet for å benytte et vanntrykk på 2 mVs, og en vannstrålepumpe ble benyttet for å frembringe nødvendig undertrykk for undertrykkforsøk. Grøftene ble i tillegg dekket med PVC-folie for å hindre infiltrasjon av nedbør, og vintermatter ble lagt på vinterhalvåret for å motvirke nedtrengning av tele (Myhrstad & Jahren, 1983).

Forsøkene Myhrstad og Jahren (1983) utførte pågikk over en periode på 10 måneder, og det ble gjennomført intensiv prøvetaking for bakteriologiske undersøkelser i lengre perioder. Det ble satt ned 110 mm Icopal dremsrør i grøftemassene for å minimere forstyrrelser i grøftene ved prøvetaking av grøftemassene. Icodremsrør var plassert inne i disse med aktuell grøftemasse. Disse rørene ble tatt opp ved prøvetaking og kappet i 5 cm seksjoner med utgangspunkt i grunnvannsspeilet. Det ble så tatt en bakteriologisk prøve av det som befant seg rett under grunnvannsspeilet og prøver fra de to første seksjonene rett over grunnvannsspeilet for hvert rør (Myhrstad & Jahren, 1983).

Det ble i tillegg til prøvetaking av grøftemassene tatt vannprøver fra vannledningene. Det ble gjort undersøkelser ved stabilt driftstrykk, undertrykk, nulltrykk og ved trykkstøt. Nulltrykk ble oppnådd ved at stengekranen på innløpssiden ble holdt nesten stengt samtidig som at tappekranen var helt åpen. Trykkstøt ble gitt ved hurtig stengning av en kikk-kran mens det var fri strømning gjennom ledningen som skulle undersøkes. Trykket som var satt på ledningene før trykkstøtene ble laget var på 2 mVs (Myhrstad & Jahren, 1983).

Myhrstad og Jahren (1983) kom frem til følgende konklusjoner etter undersøkelser av mikrobiologiske forhold i ledningsgrøfter:

- Vannledninger i umettet sone over kloakkledning forurenses ikke.
- Vannledninger i umettet sone på samme nivå som kloakkledning kan forurenses.
- Mikroorganismer kan trenge gjennom meget små lekkasjeåpninger på vannledninger.
- Lekkasjevann fra utette vannledninger fortrenger det forurensede grunnvannet.
- Utett kloakkledning i mettet sone vil i liten grad tilføre grunnen mikrobiologisk forurensning.
- Vannledninger med et stabilt driftstrykk (overtrykk) forurenses ikke.
- Nulltrykk, undertrykk eller trykkstøt kan medføre forurensning av vannledninger i mettet sone. Særlig undertrykk kan medføre inntrengning av store mengder forurenset vann inn i ledningene.
- Type grøftemasse er av betydning for spredning av mikrobiologisk forurensning. Grovere masser ble noe mer forurenset av koliforme bakterier enn i sand ved bakteriologiske undersøkelser av grøftemassene.

### 3. Metode

Målet med prosjektet er å utforme og produsere et simulert grøftesystem som skal brukes til videre forskning og undervisning. Det er ønskelig at grøftesystemet skal simulere transport av mikroorganismer i de forskjellige sonene i en representativ norsk grøft ved ulike grunnvannsstand og nedbørintensitet. Det skal i tillegg være mulig å justere trykket på ledningsnett, for både vann og avløp, samt lekkasjestørrelse på ledningene. Mulighet for trykkendring på vannledningen er ment for forskning på effekten av lekkasje på transporten av mikroorganismer i grøfta, og med muligheter for senere forskning på eventuelle innlekkasjer ved ulike trykk. På drikkevannsledningen skal det tilkobles en pumpe. Det maksimale trykket pumpa kan levere er på 2 bar, tilsvarende 20 mVs. Trykk på avløpsledning er ikke vanlig praksis i norske ledningsnett da avløpsnett, som beskrevet tidligere, oftest er basert på selvføll. Likevel er det i dette prosjektet valgt å påføre trykk på avløpsnett med muligheter for justering av trykkehøyde. Det er ønsket å ha en kontrollert tilsetning av forurensning fra avløpsledningen, noe som enkelt kan oppnås ved å trykkslette ledningen. Dette kan i tillegg benyttes for å simulere lekkasjer ved ulike belastninger på nettet. Det ble også vurdert om grøftesystemet skulle kunne justeres med ulike helningsgrad.

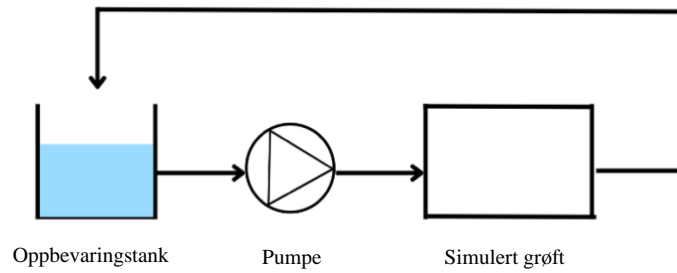
Det skal benyttes en nedbør-avløpssimulator som er utviklet av tidligere masterstudenter i vann- og miljøteknikk ved NMBU. Nedbørfeltet til simulatoren, som vist i Figur 3, har en størrelse på 2 m<sup>2</sup>. Det er koblet en pumpe som tilfører ønsket nedbørintensitet til et fordelingssystem som distribuerer nedbøren uniformt over feltet (Lilletvedt & Rasen, 2020). Denne simulatoren skal benyttes til å sette ønsket grunnvannsstand samt justering av nedbørintensitet og simulere naturlig heving av grunnvannsstand på grøfta under forskning. Dette vil være en forskjell fra systemet til den tidligere forskningen på mikrobiologiske forhold i ledningsgrøfter utført av Myhrstad og Jahren (1983), da de pumpet rentvann direkte inn i bunnen av grøfta, og holdt grunnvannsstanden stabil ved å tappe grunnvann fra drensledning i bunnen av grøfta via et regulerbart overløp.



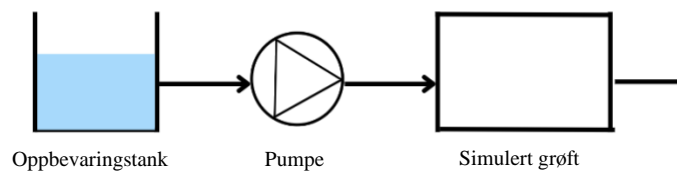
Figur 3: Bilde av nedbør-avløpssimulator (Lillevedt & Rasen, 2020).

### 3.1 Utvikling av grøftesystemet

Den første delen av prosjektet besto blant annet av å finne, måle og regne ut hensiktsmessige dimensjoner for selve grøfta samt dimensjoner på ledningene som blir benyttet. Det ble nødvendig å bestemme hvilke soner som er nødvendig for å få et representativt system, dimensjonene på disse, og følgelig de ulike massene som blir benyttet i sonene. Ettersom det fra starten av planleggingsfasen ble bestemt at en eksisterende nedbør-avløpssimulator skal bli benyttet for justering av nedbørintensitet var det nødvendig å begrense størrelsen på grøftesystemet slik at denne kan plasseres under eller på simulatoren. Vekta på grøfta ble også nødt til å begrenses ettersom det må være mulig å flytte den når den ikke er i bruk av hensyn til allerede begrenset plass på laboratoriet. Et flytskjema ble konstruert tidlig i planlegging for drikkevann og for avløpsvann, se Figur 4 og Figur 5. Det ble tidlig bestemt at det skulle være et grøftesystem med kun spillvannsledning og drikkevannsledning ettersom høyden må begrenses ved forsøk tilknyttet nedbørsimulator, se Tabell 4 for dimensjoner på nedbør-avløpssimulator.



Figur 4: Flytskjema for drikkevann tidlig i planleggingsfasen.



Figur 5: Flytskjema for avløpsvann tidlig i planleggingsfasen.

### 3.1.1 Valg av grøftemasser

Det simulerte grøftesystemet skal være et representativt grøftesystem for norske forhold. Det er med dette fulgt veilederen fra VA/Miljø-blad nr. 5 ved valg av masser i fundament, sidefylling, beskyttelseslag og eventuelt overdekning. Anbefalinger for kornstørrelser på fundamentmasser, sidefylling og beskyttelseslag er vist tidligere i kapittel 2.4.1 i Tabell 2 og Tabell 3. Disse anbefalingene varierer med rørdiameter, og det ble fra tidlig i planleggingsfasen bestemt at rørdiameter vil være under 300 mm ettersom det er dimensjonsbegrensninger for grøftesystemet basert på dimensjoner på nedbør-avløpssimulator og laboratoriet. Dette medfører at anbefalt største kornstørrelse for fundamentmasser er 16 mm som vist i Tabell 2. Anbefalt største kornstørrelse for sidefylling og beskyttelseslag er 22 mm for velgraderte masser og 16 mm for ensgraderte masser som vist i Tabell 3. Ettersom grøfta skal være representativ for norske grøftesystemer bestemmes det at det skal benyttes velgradert maskinsand 0-8 mm som fundamentmasse, og ettersom det ligger ledninger i flere plan velges det friksjonsmasser til hele ledningssonen bestående av velgradert grus/natursingel med kornstørrelse på 4-16 mm. Beskyttelseslaget er som tidligere beskrevet gjerne de samme massene som sidefyllingsmassene, og vil derfor bestå av samme kornstørrelse som friksjonsmassene.

### 3.1.2 Dimensjonering av grøftesystemet

I startfasen ble det tatt utgangspunkt i dimensjonene til den allerede eksisterende nedbørsimulatoren. Simulatoren har en bunnramme og en toppramme, se Figur 3. Bunnrammen har tverrgående stag som begrenser høyden på grøfta. Avstand mellom de vertikale stagen, på både toppramme og bunnramme, ble nødt til å måles ettersom grøfta skal plasseres på innsiden. De relevante målene av nedbør-avløpssimulatoren er vist i Tabell 4. Det ble vurdert mulighetene for å plassere grøft under eller på bunnramme, og hva som vil være mest hensiktsmessig med hensyn til mobiliteten på grøftesystemet. Ettersom det er usikkert hvor mye belastning rammen til nedbør-avløpssimulatoren tåler ble det nødvendig å beregne vekt på grøftesystemet før en avgjørelse ble tatt.

Tabell 4: Mål av dimensjoner på eksisterende nedbør-avløpssimulator.

Relevante mål på nedbør-avløpssimulatoren	Dimensjoner (cm)
Lengde nedbørfelt	200
Bredde nedbørfelt	100
Bredde innside bunnramme	95
Bredde innside toppramme	105
Høyde gulv til topp bunnramme	90
Høyde topp bunnramme til topp toppramme	90
Lengde mellom bord på bunnramme	128

For beregning av vekt på grøftesystemet ble det i første omgang gjort et grovt overslag for å se hvilken størrelsesorden vekta ligger i. Det ble tatt utgangspunkt i dimensjonene til rammesystemet til den eksisterende nedbør-avløpssimulatoren. Vekt påført av vann og ramme er neglisjert. Det er tatt utgangspunkt i lik dimensjon på vann- og avløpsrør, og benyttet samme masse gjennom alle soner. Massen benyttet ved estimering er natursingel med bulk tetthet på  $1,50 \text{ t/m}^3$ . Høyden er bestemt basert på VA/Miljø-blad nr. 5 ved minste tillatte tykkelse på soner. Overdekning er ikke medregnet. Dimensjoner for beregning vises i Tabell 5 nedenfor.



Tabell 5: Dimensjoner for grov beregning av vekt på grøftesystemet.

Lengde	2000 mm
Bredde	1000 mm
Høyde	650 mm
Diameter rør (vann og avløp)	100 mm

Det ble beregnet et volum på nærmere 1,27 m<sup>3</sup> av grusmasser som tilsvarer en vekt på omlag 1,9 tonn. Etter rådføring med veileder, og verkstedet som har vært med på utvikling av nedbør-avløpssimulatoren, ble det konkludert med at det ikke er forsvarlig å påføre en så høy belastning på rammen til simulatoren. Det ble dermed bestemt at grøfta skal plasseres under rammeverket til simulatoren, og av hensyn til mobilitet ble det også valgt å nedskalere dimensjonene på grøftesystemet.

Følgelig ble det bestemt at justering av ulik helningsgrad ikke vil være like relevant ved en nedskalering i lengderetning, og det skal derfor ikke tilrettelegges for dette ved utvikling av grøftekassa. Det ble bestemt at overdekning ikke blir tatt med i utviklingen og dimensjoneringen ettersom vekt og høyde må begrenses.

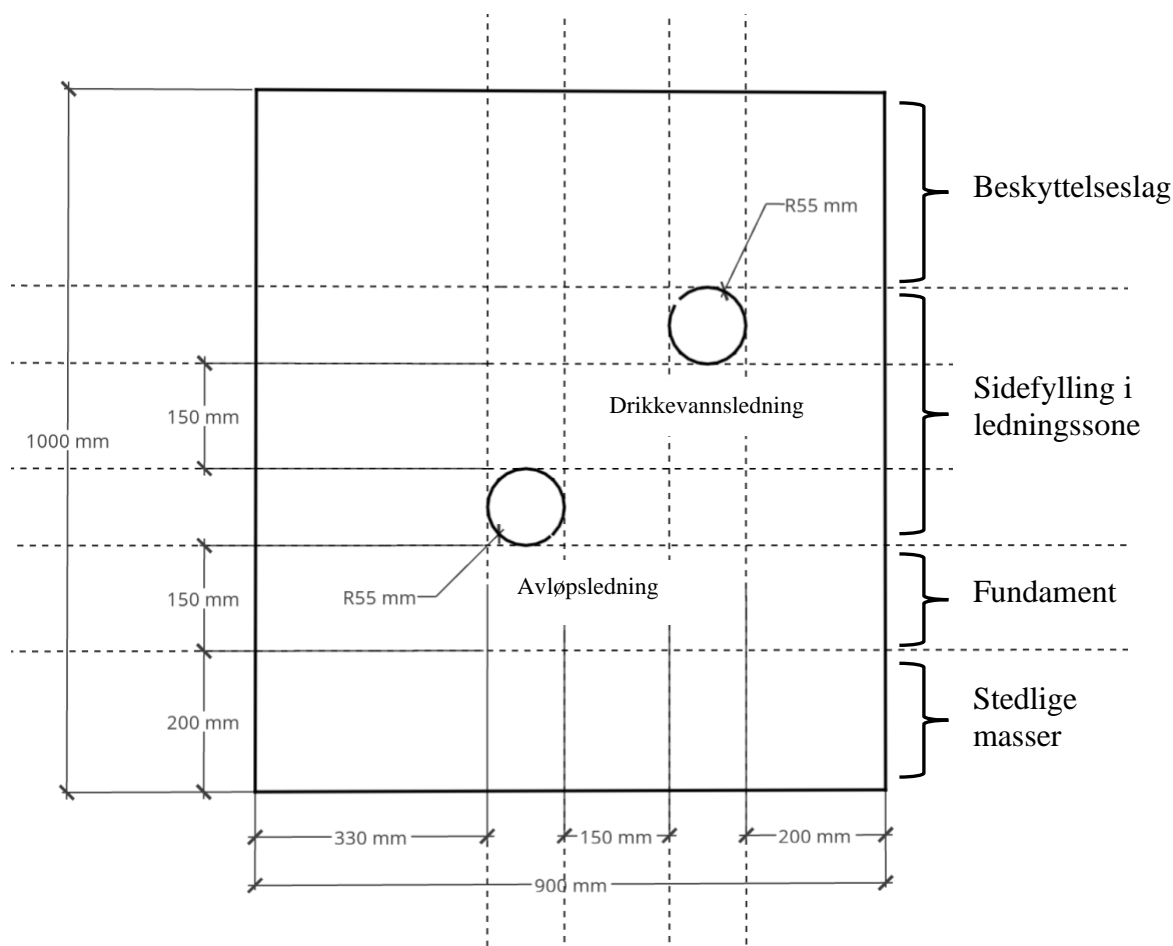
Flere beregninger ble utført for å bestemme dimensjoner på grøftekassa. Den eksisterende nedbør-avløpssimulatoren har bord festet på bunnramme, vist i Figur 3. Avstand mellom bordene står i Tabell 4, og er på 128 cm. Ettersom det skal installeres ledninger i to ulike høyder på grøftekassa er det nødvendig med plass på hver side i lengderetning. Det ble dermed besluttet en lengde på 50 cm på grøftekassa slik at det vil være mulig å installere et ledningsnett, med eventuelt ringsystem, selv med bordene installert på nedbør-avløpssimulatoren.

Bestemmelsen om plassering av grøft under rammeverket til nedbør-avløpssimulatoren ga en disponering på 90 cm for dimensjonering av høyde på grøftekassa, se Tabell 4. Ved å benytte minstekravene beskrevet i VA/Miljø-blad nr. 5 er nødvendig tykkelse på fundament 150 mm, se Tabell 1. Ettersom det er kombinert grøft med flere ledninger skal det, slik beskrevet tidligere, være friksjonsmasser med minimum tykkelse på 150 mm fra topp rør opp til neste bunn rør, og over dette et beskyttelseslag på minimum 300 mm. Dette medfører en disponibel høyde på 300 mm til både vann- og avløpsledninger og rom for økt volum ved påført nedbør og grunnvann. Det ble besluttet at nedbør-avløpssimulatoren skal heves ved å plassere beina til rammen på platåer for å kunne øke høyden på grøftekassa. Høyden ble bestemt til 1 meter.

Det ble nødvendig å bestemme dimensjoner på vann- og avløpsledningene for videre dimensjonering av grøftekassa. Ettersom høyden ble bestemt, og utgjør en begrensende faktor, var det mindre dimensjoner på mellom 100 til 150 mm som var aktuelle diametere. Det ble besluttet rørdimensjoner på 110 mm PE SDR 9 for vannledning med veggtykkelse på 12,22 mm, og 110 mm PVC SDR 21 med veggtykkelse på 5,3 mm for spillvannsledning. Disse dimensjonene gjør det mulig å holde minstekravene for tykkelse på de mest relevante sonene i grøfta. Rørmaterialene ble valgt av hensyn til fleksibilitet ved boring av lekkasjehull og håndtering ved montering og eventuelt senere utskiftning av rør med andre typer lekkasjehull.

Plassering av vann- og avløpsledninger ble forsøkt bestemt etter retningslinjene fra VA/Miljøblad nr. 5, men noen justeringer ble gjort. Det er ønskelig at grøftesystemet skal, så langt det lar seg gjøre, være en representativ grøft med så lite påvirkning fra veggene i grøftekassa som mulig ved studie av transport av mikroorganismer. Det ble besluttet å øke tykkelsen på fundamentet der nedre del av fundamentmassene skal representere stedlige masser og redusere, helst forhindre, påvirkning av kassebunnen. Det bestemmes en tykkelse på 200 mm av stedlige masser, og et fundament over dette på 150 mm tykkelse. Dette vil videre medføre at kravet om et beskyttelseslag på minimum 300 mm ikke blir overholdt. Formålet med et tykkere fundament ble sett på som mer hensiktsmessig enn et beskyttelseslag i henhold til minimumskravet. Dette ble sett i sammenheng med hovedformålet med grøftesystemet hvor transport av mikroorganismer mellom avløpsledning og drikkevannsledning står i fokus.

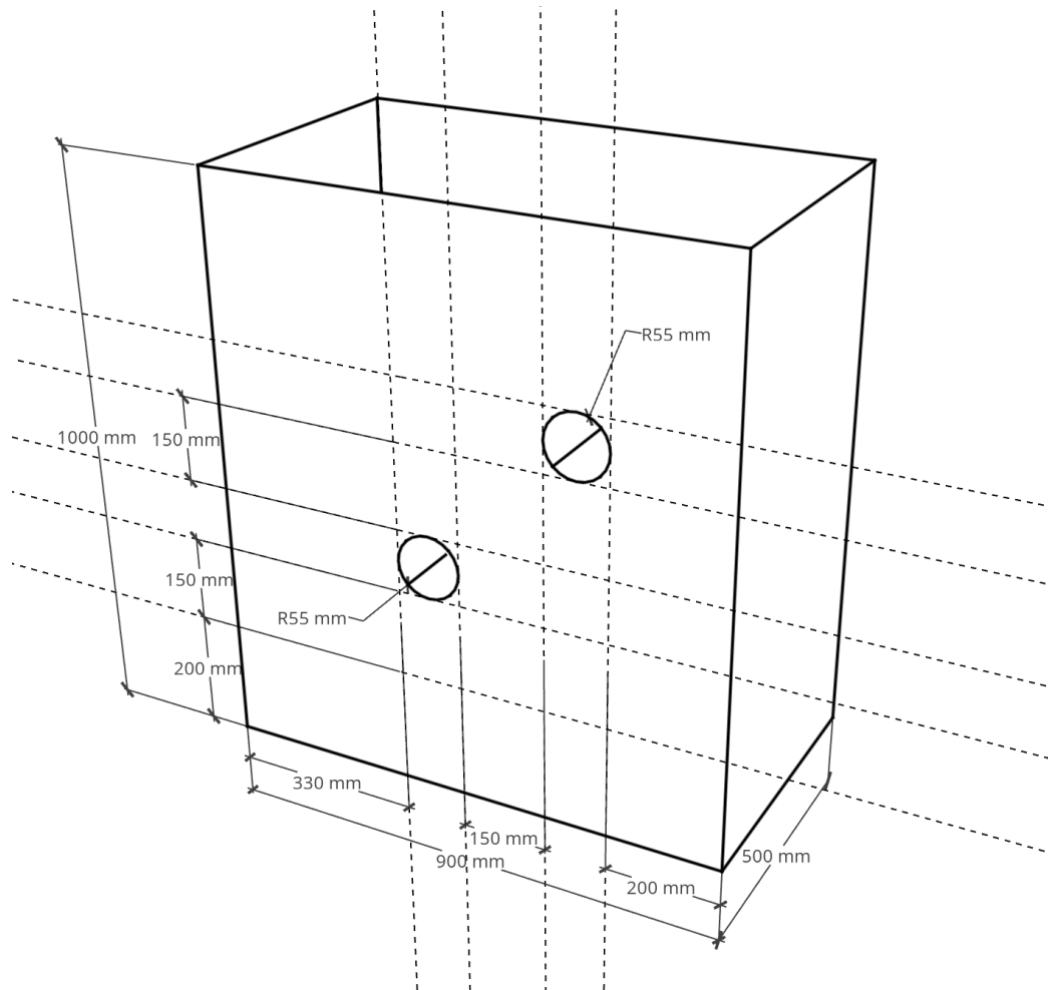
Siden det i hovedsak skal være et system der en kan se på hvordan lekkasjene fra spillvannsledningen fordeler seg, kan det være hensiktsmessig å plassere spillvannsledningen et stykke fra sideveggene til grøftekassa for å redusere påvirkningen mest mulig. Det bestemmes en bredde på 90 cm på grøftekassa. Bredden på bunnramma til nedbør-avløpssimulatoren vises i Tabell 4, og det er valgt en klaring på 5 cm som kan eventuelt gi spillerom på materialbruk og tykkelse ved konstruksjon. Tverrsnittet med plassering av rør i høyde og bredde blir vist i Figur 6. Dimensjoner er her vist for samtlige soner i grøfta med unntak av beskyttelseslaget. Dette er bevisst utelatt for at beskyttelseslaget kan justeres avhengig av økt volum påført av grunnvann og nedbør ved videre forskning.



Figur 6: Tverrsnitt av grøftekasse med dimensjoner, plassering av rør og soneinndeling.

Nye beregninger av grøftekassas vekt ble beregnet etter bestemte dimensjoner. Beregningene ble gjort for de ulike sonene med ulik masse ettersom sand- og grusmassene har ulik bulk tetthet. Stedlige masser og fundament utgjør én del, og ledningssonen med friksjonsmasser i sidefylling og beskyttelseslag utgjør én del. For stedlige masser og fundament er det benyttet sand med en bulk tetthet på  $1,4 \frac{t}{m^3}$ , og for sidefylling/ beskyttelseslag er det benyttet natursingel med bulk tetthet på  $1,50 \frac{t}{m^3}$ . Beskyttelseslaget er satt til 200 mm ved beregning av vekt. Grøftekassas egenvekt er neglisjert, og vekt påført av vann og rør er ikke medregnet. Beregnet totalvolum av grøftemassene ble på  $0,405 m^3$  og totalvekt påført av grøftemassene ble beregnet til 0,591 tonn.

### 3.1.3 Arbeidstegning av grøftesystemet

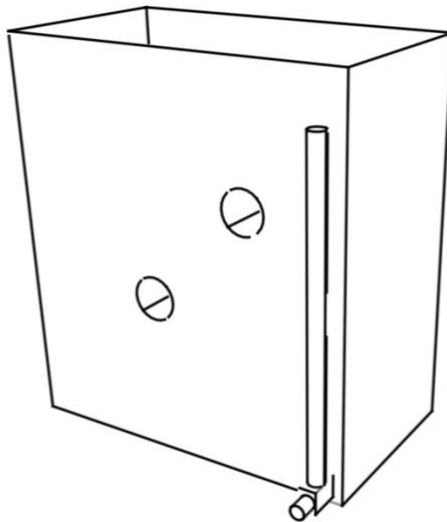


Figur 7: Planleggingskisse av simulert grøftesystem med dimensjoner.

Det ble konstruert en arbeidstegning for utviklingen av det simulerte grøftesystemet. Det er viktig å presisere at arbeidstegningen vist i Figur 7 ble utviklet tidlig i prosessen, og har hatt som formål å gi verkstedet de nødvendige dimensjonene samt et overordnet blick om hvordan selve grøftekassa skal se ut. Løsninger på festemetoder for rør samt plassering av stigerør og uttappingspunkt for grunnvann er ikke tatt med i skissen.

### 3.1.4 Plassering av tappingspunkt og stigerør

For justering av grunnvannsstand er det nødvendig med en tappingsmulighet i bunnen av grøftekassa. Dette er i tillegg nødvendig for å tømme systemet for vann etter endt forsøk. For å minimere muligheter for lekkasjepunkter på selve grøftekassa ble det besluttet å kombinere tappingspunkt med et stigerør. Stigerøret er ment for å kontrollere grunnvannsnivået i grøfta. Ettersom det er bestemt at den ene tverrsiden skal være gjennomsiktig ble det besluttet å plassere stigerøret på tverrsiden som ikke er gjennomsiktig. Dette vil kunne gi muligheten for sammenligning av grunnvannsstand i begge ender av grøfta, og samtidig være et hjelpemiddel for enklere avlesning av grunnvannsstand uten påvirkning ved kapillærkrefter. Figur 8 viser en skisse av den valgte plasseringen til kombinert tappingspunkt og stigerør. Plasseringen er lagt ved det ene hjørnet av praktiske hensyn til avlesning og for minst mulig påvirkning til kloakktilførselsområdet.



Figur 8: Skisse av plassering til tappingspunkt og stigerør.

### 3.1.5 Lekkasje på ledninger

Lekkasjehull på både avløpsledning og drikkevannsledning ble laget basert på beregninger av ulike volumstrømmer, hastigheter og trykk ved forskjellige diametere på hullene. Det ble valgt å beregne og teste lekkasjehull på avløpsledning før lekkasjehull på drikkevannsledningen ble bestemt. Det er ønskelig at hastigheten ut av hullet på avløpsledningen ikke skal være for høy. Dette er for å minimere dannelse av makroporer som kan påvirke vannveier og videre testresultater ved transport av mikroorganismer. Det vil i tillegg ikke være realistisk med høye hastigheter ut av et lekkasjehull på avløpsledninger ettersom de oftest baseres på selvføll. Det er dermed ønskelig å plassere forurensningen rett utenfor ledningen. Samtidig er det ønskelig at volumstrømmen ved fylt avløpsrør uten påført trykk, en vannsøyle på indre diameter rør, skal være veldig lav slik at det er kontroll på hvor mye avløpsvann som tilsettes systemet. En volumstrøm ble i første omgang forsøkt anskaffet på rundt  $1 \text{ ml/s}$  ved beregninger for bestemmelse av lekkasjehull på avløpsledning. Dette ble valgt som et utgangspunkt. Beregninger utført for bestemmelse av lekkasjehull på avløpsledning, basert på ønsket volumstrøm, ble gjort ved bruk av formel 1. Formel 1 og formel 2 nedenfor forutsetter at det er fri stråle ut av lekkasjehullet. Med grøftemasser vil ikke disse formlene gjelde.

Formel for beregning av utstrømning gjennom et lekkasjehull i ledning:

1

$$Q = C_d A \sqrt{2gh} = C_d A \sqrt{2g \left( \frac{P_c}{\rho g} - z \right)}$$

hvor:

- Q Volumstrøm [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $C_d$  Avløpskoeffisient
- A Arealet til hullet [ $\text{m}^2$ ]
- $P_c$  Trykk i sentrum av rør [Pa]
- z Høyden til hullet over sentrum av rør [m]
- $\rho$  Massetettheten til vann [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- g Gravitasjonsakselerasjon [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

Formel for beregning av hastighet ut av lekkasjehull ved gitt trykk:

2

$$v = C_v \sqrt{2gh}$$

hvor:

- v Hastighet [m/s]
- $C_v$  Hastighetskoeffisient
- g Gravitasjonsakselerasjon [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]
- h Trykkhøyde [m]

Det ble utført beregninger for volumstrøm og hastigheter ut av lekkasjehull ved ulike diametere og ulike trykkehøyder. En avløpskoeffisient er antatt lik 0,86, se vedlegg C. Tabell 6 viser de beregnede verdiene for vannføring ved ulike trykk og diametere, ved bruk av formel 1, og hastighet på utstrømningen for gitt trykk. Hastigheten er beregnet ved bruk av formel 2, og hastighetskoeffisienten er her antatt lik avløpskoeffisienten på 0,86.

Tabell 6: Verdier for beregnet vannføring ved ulike trykk og diametere før tester, samt hastighet ved utstrømning for gitt trykk på lekkasjehullet til avløpsrøret.

		Vannføring (mL/s) ved ulike trykk og diametere										Hastighet (m/s) for gitt trykk
D (mm) -->		0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	5.00	
A (m2) -->		7.85E-09	3.14E-08	7.07E-08	1.26E-07	1.96E-07	4.42E-07	7.85E-07	3.14E-06	7.07E-06	1.96E-05	
h (mVs)	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	1.2	2.7	7.5	0.4
	0.10	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.5	0.9	3.8	8.5	23.7	1.2
	0.5	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.2	2.1	8.5	19.0	52.9	2.7
	1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	1.7	3.0	12.0	26.9	74.8	3.8
	3	0.1	0.2	0.5	0.8	1.3	2.9	5.2	20.7	46.6	129.6	6.6
	5	0.1	0.3	0.6	1.1	1.7	3.8	6.7	26.8	60.2	167.2	8.5
	10	0.1	0.4	0.9	1.5	2.4	5.3	9.5	37.8	85.1	236.5	12.0
	15	0.1	0.5	1.0	1.9	2.9	6.5	11.6	46.3	104.3	289.7	14.8
	20	0.1	0.5	1.2	2.1	3.3	7.5	13.4	53.5	120.4	334.5	17.0

Ut ifra Tabell 6 ble det tatt en beslutning på et lekkasjehull på 0,5 mm på avløpsrøret. Hastighetene ved beregning ble relativt høye uansett trykk, og det ble derfor prioritert å bestemme lekkasjehullet basert på ønsket volumstrøm. Det ble valgt et lekkasjehull som gir en teoretisk vannføring på rundt 1 ml/s ved lavere trykk enn det maksimale trykket på 20 mVs. Dette for å ha en buffer ved uttesting, og for å minimere skader ved for høyt trykk på endestykker og koblinger på ledningen. Samtidig gir dette en mulighet for enklere trykksetting uten tilkobling til pumpe. Det teoretiske trykket for en vannføring på 1 ml/s blir på omtrent 2 mVs, se Tabell 6. Ett lekkasjehull med diameter på 0,5 mm ble boret i sentrum av lengderetningen til avløpsledningen.



Det ble i tillegg til beregninger for hullstrømning gjort beregninger for rørstrømning ved å betrakte strømmingen gjennom lekkasjehullet som rørstrømning gjennom et rør med diameter på 0,5 mm og lengde 5,3 mm. Uttrykket benyttet for beregning av volumstrøm som funksjon av trykkehøyde i en rørstrømning er utledet i vedlegg A, og er uttrykt som funksjon av trykkehøyde for laminær rørstrømning. Selve lekkasjehullet ble dermed ansett som en egen rørstrømning, og uttrykket kan benyttes ettersom beregnet Reynolds' tall gjennom lekkasjehullet ved relevante trykkehøyder holdt seg såpass lavt som under 1600. Formel benyttet for utregning av Reynolds' tall er vist i vedlegg D. Det gir en teoretisk laminær strømning gjennom hullet hvor rørets ruhet ikke betyr noe for strømmingen.

Det ble besluttet å bore et tilsvarende lekkasjehull i drikkevannsledningen basert på beregningene og resultatene ved uttesting av lekkasjehullet på avløpsledningen. Ettersom veggtykkelsen er større på drikkevannsledningen enn på avløpsledningen ble det mer utfordrende å finne et langt nok bor med diameter på 0,5 mm. Dette medførte at lavest mulig diameter tilgjengelig ble 0,7 mm. Ett lekkasjehull med diameter på 0,7 mm ble boret i sentrum av lengderetningen til drikkevannsledningen.

## 3.2 Testing av grøftesystemet

Løsningene for utforming og produksjon av grøftesystemet ble testet ut for de teoretiske beregningene og beslutningene som ble utført. Det ble gjennomført ulike tester både med og uten grøftemasser. En tetthetstest ble gjennomført i begynnelsen for å finne eventuelle lekkasjer på selve grøftekassa, samt eventuelle lekkasjer i ulike monteringspunkter.

Tappingspunkt og stigerør ble samtidig testet ut, se vedlegg E for bilder. Det ble i tillegg gjort tester for lekkasjehullene som er påført avløps- og drikkevannsledning. Det ble påført trykk, og vannføring ut av lekkasjepunkt ble testet. Avslutningsvis ble det utført tester etter påfylling av grøftemasser for å kunne sammenligne målinger av vannføring ut av lekkasjepunktene, samt en test med implementering av nedbør-avløpssimulator for å teste funksjonaliteten til hele systemet.

### 3.2.1 Test uten grøftemasser

Vannføring og trykk ved lekkasjehullet på avløpsledningen ble målt. Dette ble gjort ved fylt avløpsledning og uten tilkobling til pumpe. Lekkasjehullet var først plassert opp, og deretter ned. Tester ble utført for begge plasseringene av lekkasjehullet. Det ble tilkoblet en transparent slange på røret som ble hevet, se bilde i vedlegg E. Vann ble tilført slangen og det var mulig å måle trykkehøyde og vannføring. Vannføringen ut av lekkasjehullet på avløpsledningen ved testene ble beregnet ved å benytte kontinuitetsligningen. Tiden vannspeilet i den transparente slangen brukte på å bevege seg mellom ulike trykkehøyder, med kjent diameter på slangen, ble målt. Formel 3 ble benyttet for utregning av volumstrøm. Trykkehøyden var kjent når vannspeilet i den transparente slangen passerte ulike satte referansepunkt.

Formel for volumstrøm ut av lekkasjehullet ved målinger:

3

$$Q = Av = \frac{\pi D^2}{4} \frac{dh}{dt}$$

hvor:

- Q Volumstrøm [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- A Arealet til transparent slange [ $\text{m}^2$ ]
- v Hastigheten mellom referansepunktene [ $\text{m}/\text{s}$ ]
- D Diameter til transparent slange [ $\text{m}$ ]
- dh Endring i trykkehøyde mellom referansepunktene [ $\text{m}$ ]
- dt Tiden vannet bruker mellom referansepunktene [ $\text{s}$ ]

Det ble mulig å beregne mer nøyaktig avløpskoeffisient etter målingene. Formel 1 ble benyttet for hullstrømning, og avløpskoeffisient ble beregnet lik 0,62. Ved hjelp av teori rundt hullstrømning ble hastighetskoeffisienten videre antatt lik 0,98, se vedlegg C. Tabell 7 viser de nye beregningene ved hullstrømning for vannføring ved ulike trykk og diametere etter testene for lekkasjehullet på 0,5 mm. Hastigheter er også justert ved bruk av formel 2.

Tabell 7: Verdier for beregnet vannføring ved ulike trykk og diametere etter tester, samt hastighet ved utstrømning for gitt trykk på lekkasjehullet til avløpsrøret.

		Vannføring (mL/s) ved ulike trykk og diametere										Hastighet (m/s) for gitt trykk
D (mm) -->		0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	5.00	
A (m <sup>2</sup> ) -->		7.85E-09	3.14E-08	7.07E-08	1.26E-07	1.96E-07	4.42E-07	7.85E-07	3.14E-06	7.07E-06	1.96E-05	
h (mVs)	0.01	0.00	0.01	0.02	0.03	0.05	0.12	0.22	0.86	1.94	5.39	0.4
	0.10	0.01	0.03	0.06	0.11	0.17	0.38	0.68	2.73	6.14	17.05	1.4
	0.5	0.02	0.06	0.14	0.24	0.38	0.86	1.53	6.10	13.73	38.13	3.1
	1	0.02	0.09	0.19	0.35	0.54	1.21	2.16	8.63	19.41	53.92	4.3
	3	0.04	0.15	0.34	0.60	0.93	2.10	3.74	14.94	33.62	93.40	7.5
	5	0.05	0.19	0.43	0.77	1.21	2.71	4.82	19.29	43.41	120.57	9.7
	10	0.07	0.27	0.61	1.09	1.71	3.84	6.82	27.28	61.39	170.52	13.7
	15	0.08	0.33	0.75	1.34	2.09	4.70	8.35	33.41	75.18	208.84	16.8
20	0.10	0.39	0.87	1.54	2.41	5.43	9.65	38.58	86.81	241.15	19.4	

Det ble deretter gjort en sammenligning av beregninger av trykk som funksjon av tid for både rørstrømning og hullstrømning med målingene tatt over tid. Dette ble gjennomført for testen der lekkasjehullet på avløpsledningen var plassert opp og for testen der lekkasjehullet var plassert ned. Uttrykk for beregning av trykkehøyde som funksjon av tid for rørstrømning er utledet i vedlegg B.

For drikkevannsledningen ble det målt vannføring ut av lekkasjehullet ved tilkobling til pumpe. Dette ble gjort for å teste om koblingspunktene til ledningen tåler et høyere trykk. Vann ut av lekkasjehullet ble samlet opp i et målebeger imens tiden ble registrert. Pumpa som skal benyttes til grøftesystemet, og her tilkobles drikkevannsledningen, viser kun hastigheter i RPM (revolutions per minute), og det ble derfor ulike hastigheter på pumpa som ble testet med hensyn på vannføringen ut av lekkasjehullet. Trykket ble derfor ikke målt, men det maksimale trykket pumpa kan levere er på 2 bar, tilsvarende 20 mVs.

### 3.2.2 Test med grøftemasser

Grøftemassene ble fylt i grøftekassa med fundamentmasser i bunnen og sidefylling og beskyttelseslag over, som tidligere beskrevet i kapittel 2.4.1. Lekkasjehullene ble bestemt plassert ned for både avløpsledningen og drikkevannsledningen. Massene under røret, altså kvartsirkelstøtten, slik beskrevet tidligere, ble plassert tett inntil og innunder røret for hånd. Det ble kun utført komprimering av fundamentmasser, og dette ble utført med håndredskap.

Det ble utført samme type test for vannføring ut av lekkasjehullet på avløpsrøret, ved ulike trykkehøyder, som ble gjort uten masser. Dette for å se hvor mye påvirkning massene påfører vannføringen ut av lekkasjehullet. Også her ble volumstrøm beregnet ved å benytte kontinuitetsligningen og formel 3. Tiden vannspeilet i den transparente slangen brukte på å bevege seg mellom ulike trykkehøyder, med kjent diameter på slangen, ble målt. Trykkehøyden var kjent når vannspeilet i den transparente slangen passerte ulike satte referansepunkt. En sammenligning mellom målinger med- og uten grøftemasser ble utført for volumstrøm som funksjon av trykkehøyde, samt trykkehøyde som funksjon av tid.

En endelig test ved implementering av den eksisterende nedbør-avløpssimulatoren ble utført. Det var her ønskelig å se visuelt hvordan funksjonaliteten til hele systemet er, samt få en viss oversikt over hvor lang tid som kreves for en gitt nedbørintensitet å fylle grøftesystemet slik at det blir en mettet situasjon.

Nedbørintensiteten på nedbør-avløpssimulatoren ble satt til  $400 \text{ l/s*ha}$  som oppnås med en hastighet på 125 RPM på pumpa (Lilletvedt & Rasen, 2020). Dette tilsvarer en nedbørhendelse med et gjentakintervall på 50 år og med en varighet på omkring 5 minutter ifølge IVF-verdier for målestasjonen på Blindern i Oslo (Norsk klimaservicesenter, 2022). Det ble tatt mål av høyden til vannstanden i både stigerøret og det transparente vinduet fra det begynte å stige i observasjonsområdene.

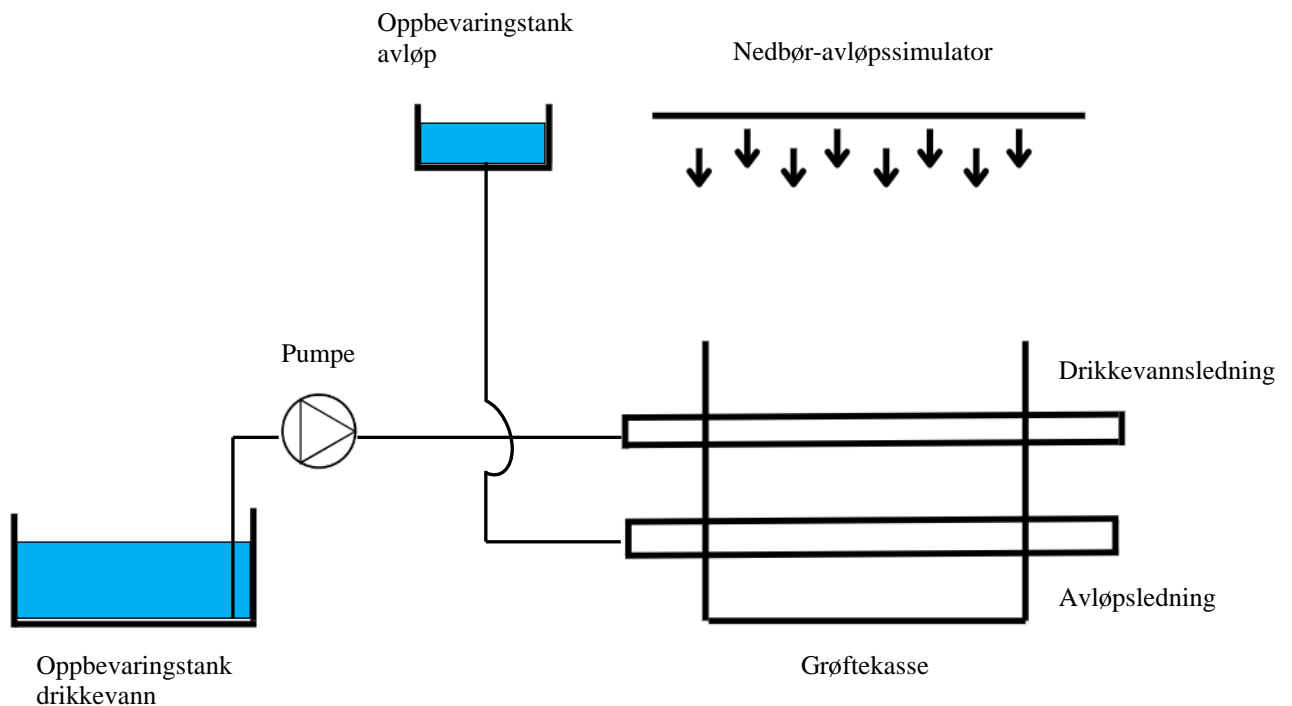
Tiden det tar å få en mettet situasjon avhenger av porøsiteten til massene. Det ble i forkant av testen gjort et grovt overslag for å estimere tiden. Porøsiteten til grøftemassene ble antatt 50%. Nedbørsfeltet er arealet av grøftekassa som er  $0,45 \text{ m}^2$ . Grøftekassa er fylt opp med masser til en høyde på 90cm, og volum av grøftekassa ble beregnet. Dette medførte en grov estimering på 3 timer for å få en mettet situasjon ved en nedbørintensitet på  $400 \text{ l/s*ha}$ .

## 4. Resultater

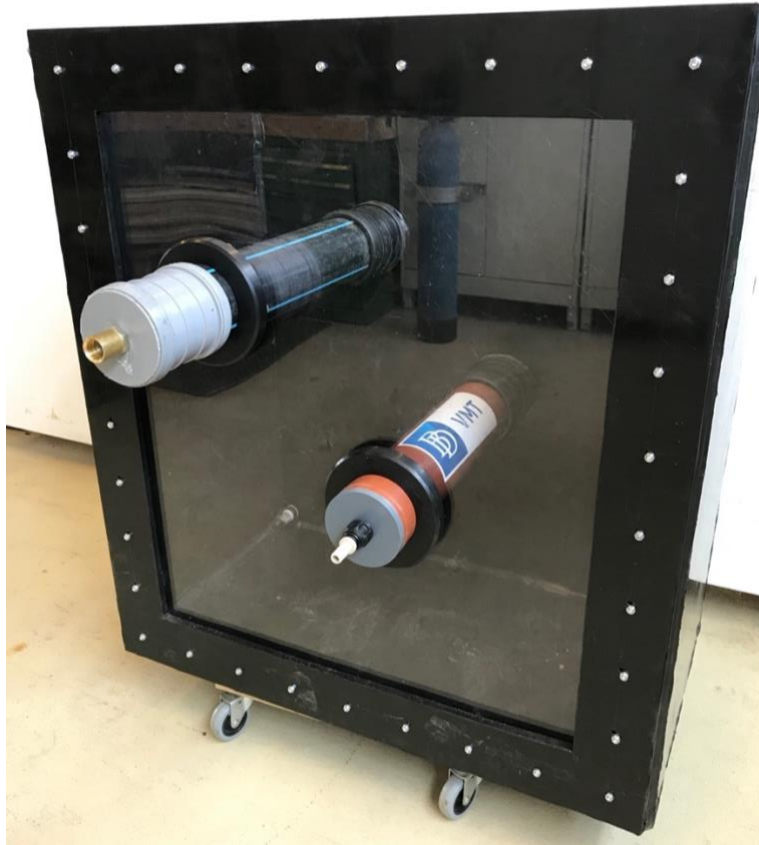
Resultatene av dette prosjektet består av den ferdigstilte utformingen av et simulert grøftesystem og testresultater fra testing beskrevet i metodedelen som tar for seg grøftesystemets funksjonalitet. Det blir her presentert resultater fra forsøkene utført både med og uten grøftemasser.

### 4.1 Ferdigstilt grøftesystem

Den endelige utformingen av det simulerte grøftesystemet blir her presentert. Figur 9 viser flytskjema til det ferdigstilte grøftesystemet. Flytskjemaet illustrerer at en pumpe vil tilføre vann til drikkevannsledningen. Avløpsledningen blir tilført vann gjennom en transparent slange der en kan holde oversikt over volum tilført grøftesystemet. Selve grøftekassa er plassert under nedbør-avløpssimulatoren som kan justere grunnvannstand og nedbørhendelser.



Figur 9: Flytskjema for ferdigstilt grøftesystem.



*Figur 10: Ferdigstilt grøftekasse uten grøftemasse sett fra innløpstverrside.*

Figur 10 viser et bilde av grøftesystemet uten tilført grøftemasse. Her blir det fremstilt hvordan innløpstverrsiden på grøftekassa ser ut. Rammeverket på kassa er laget av 15 mm tykk PE, og framsiden har et påmontert pleksiglass på 10 mm tykkelse. Ledningene har påmontert tilkoblingsmulighet til slange/pumpe. Ytterligere bilder blir fremstilt i vedlegg E. Rørene er festet ved å sveise på et rørstykke på den ene tverrsiden for både drikkevannsledningens- og avløpsledningens plassering, og videre satt på en løpemuffe med et endestykke. Her kan man åpne endestykket for å få tilgang inn i røret hvis det eksempelvis er blitt tett i lekkasjehullet grunnet partikler i vannet og dette må åpnes opp. På tverrsiden med pleksiglass er rørene skrudd fast med en flens med pakning hvor det er mulig å skru denne løs og skifte ut rørene. Dette må gjøres etter at grøftemasser er tømt ut av kassa.

Observasjonsområdet til stigerøret og pleksiglasset begynner ved en liten høyde over grøftebunnen. Dette ble nødvendig for å sikre sterk sveising ved konstruksjon av rammeverket. Det er først mulig å observere vann i stigerøret når vannstanden er på 9 cm, og i pleksiglasset er det først mulig å observere ved en vannstand på 10 cm.

## 4.2 Testresultater

Resultatene av testene utført i metodedelen blir her presentert. Tester utført uten grøftemasser gikk hovedsakelig ut på å måle volumstrøm ut av lekkasjehullene ved ulike trykkehøyder. Samme type test ble utført etter fylling av masser for avløpsrøret, samt en test med implementering av nedbør-avløpssimulator. En tetthetstest ble i tillegg gjennomført før grøftemassene ble tilført, se vedlegg E for ytterligere bilder. Figur 11 viser en deformasjon i rammeverket grunnet en høy trykkraft i sideveggene. Det var likevel ingen tegn til lekkasje i rammeverket. En liten lekkasje ble funnet ved koblingspunktet til stigerøret, se Figur 12. Det ble i tillegg funnet en lekkasje i monteringen til flensen i pleksiglasset. Dette ble tettet ved å bytte ut pakningene.



Figur 11: Bilde av tetthetstest sett fra lengdeside. Viser tydelig deformasjon i rammeverket.

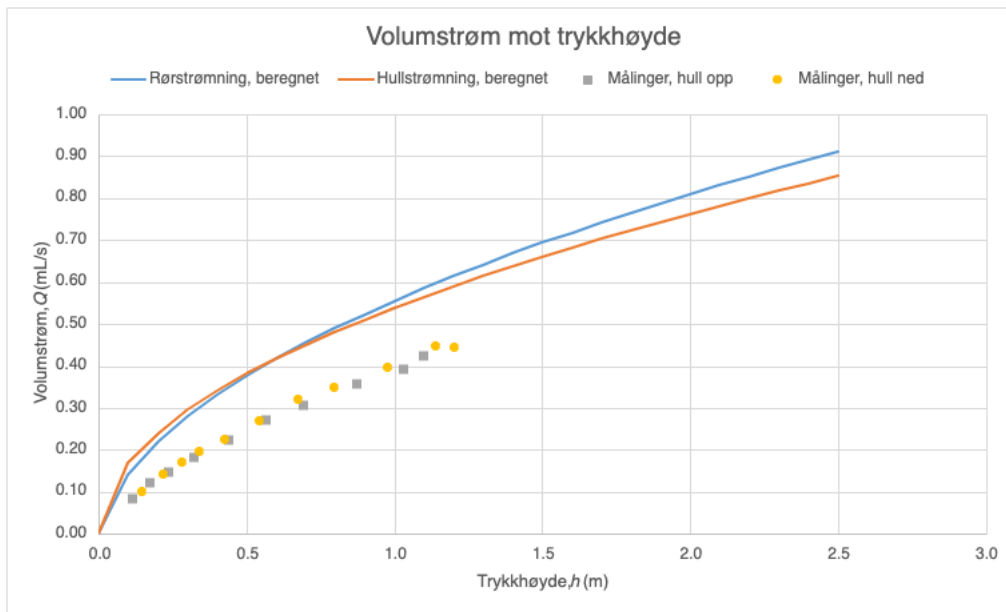




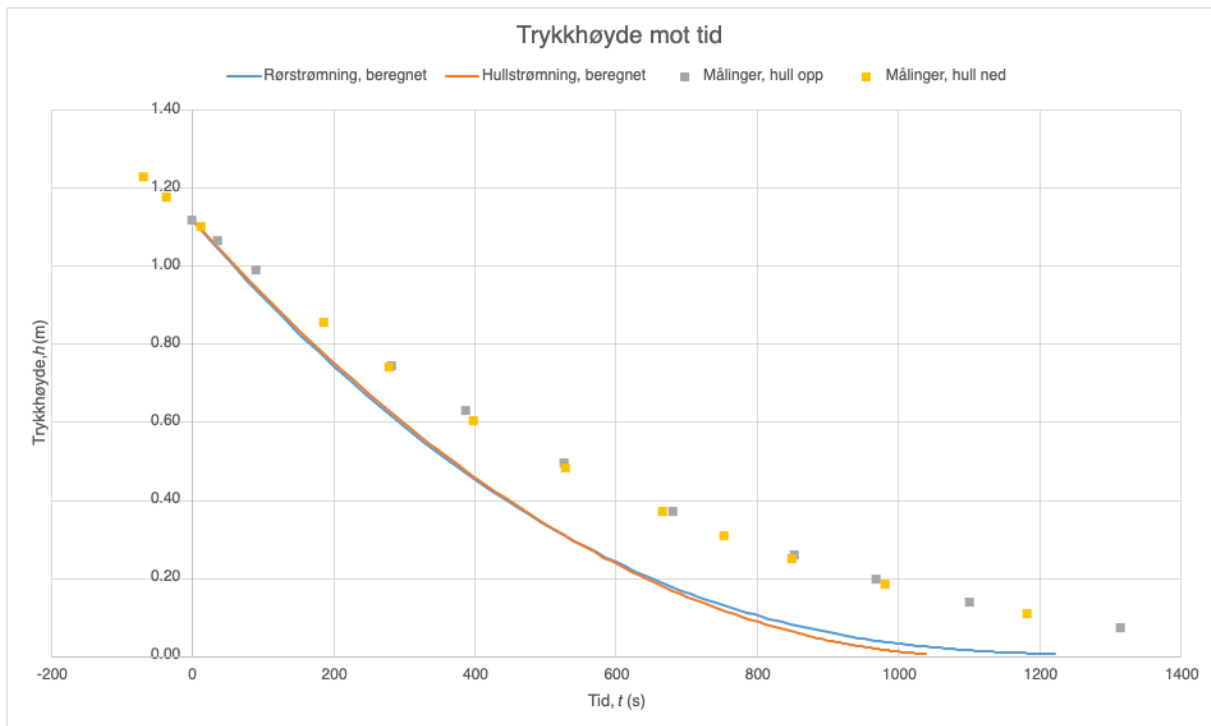
*Figur 12: Bilde av lekkasje fra monteringspunkt til stigerøret.*

Sammenligninger av beregninger og målinger, uten grøftemasser, for volumstrøm som funksjon av trykkhøyde vises i Figur 13. Beregningene for rørstrømning ut av lekkasjehullet og beregninger for hullstrømning følger en relativt lik tendens. Målingene ved testene viser en lavere vannføring ved et gitt trykk enn de teoretiske beregningene. Mulig grunn til dette kan være partikler som har festet seg i lekkasjeåpningen. Tester ble utført for lekkasjehull plassert opp og for lekkasjehull plassert ned. Målingsdataen tilsier en lik vannføring ut uavhengig av plasseringen til lekkasjehullet.

Sammenligninger av trykk som funksjon av tid for både rørstrømning og hullstrømning med målingene, uten grøftemasser, tatt over tid blir vist i Figur 14. Kurvene som representerer beregningene ved rørstrømning og hullstrømning har også her en relativt lik tendens. Målingene ved testene viser en tregere reduksjon av trykkhøyde per tid enn de teoretiske beregningene. Hvis det er festet partikler i lekkasjeåpningen vil dette kunne være en grunn til denne differansen. Også her ble det utført tester for lekkasjehull plassert opp og for lekkasjehull plassert ned. Målingsdataen tilsier en lik reduksjon av trykkhøyde per tid uavhengig av plasseringen til lekkasjehullet.

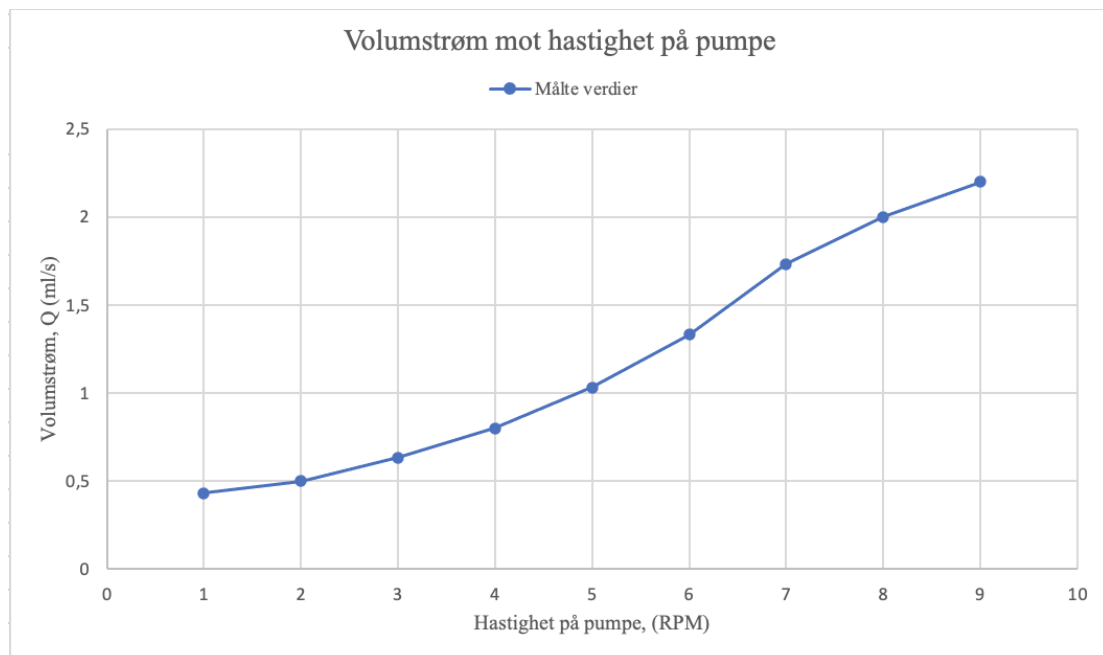


Figur 13: Volumstrøm som funksjon av trykkhøyde ved beregninger og tester for lekkasjehullet til avløpsledningen uten grøftemasser. Avløpskoeffisient benyttet for beregnet hullstrømning er 0,62.



Figur 14: Trykkhøyde som funksjon av tid ved beregninger og tester for lekkasjehullet til avløpsledningen uten grøftemasser.

Figur 15 viser de målte verdiene for vannføring ut av lekkasjehullet på drikkevannsledningen ved ulike hastigheter på pumpa uten tilførte grøftemasser. Ved justering opp fra 9 RPM til 10 RPM ble det et såpass høyt trykk på endestykket til drikkevannsledningen at det ble trykket ut av festepunktene, se Figur 16 for bilde. Dette forårsaket at det ikke ble gjort tester for vannføringen på drikkevannsledningen med grøftemasser tilført ettersom endestykket på ledningen må utbedres.



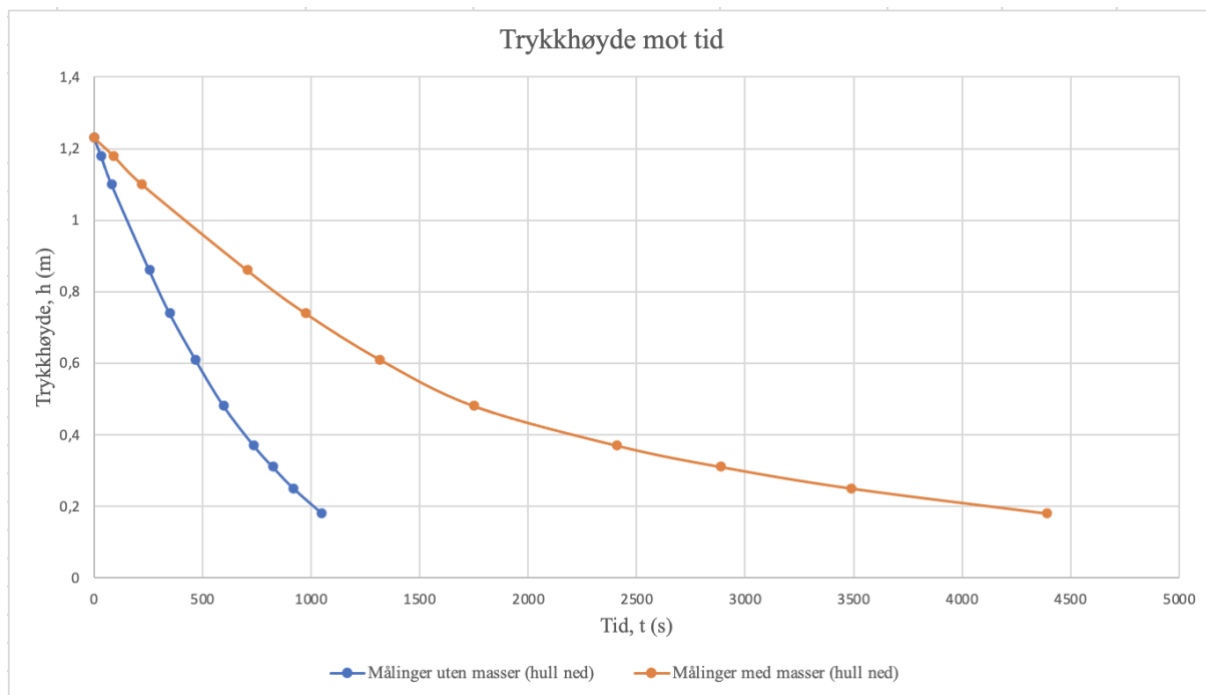
Figur 15: Volumstrøm målt ut av lekkasjehullet på drikkevannsledningen ved stigende hastigheter på pumpa.



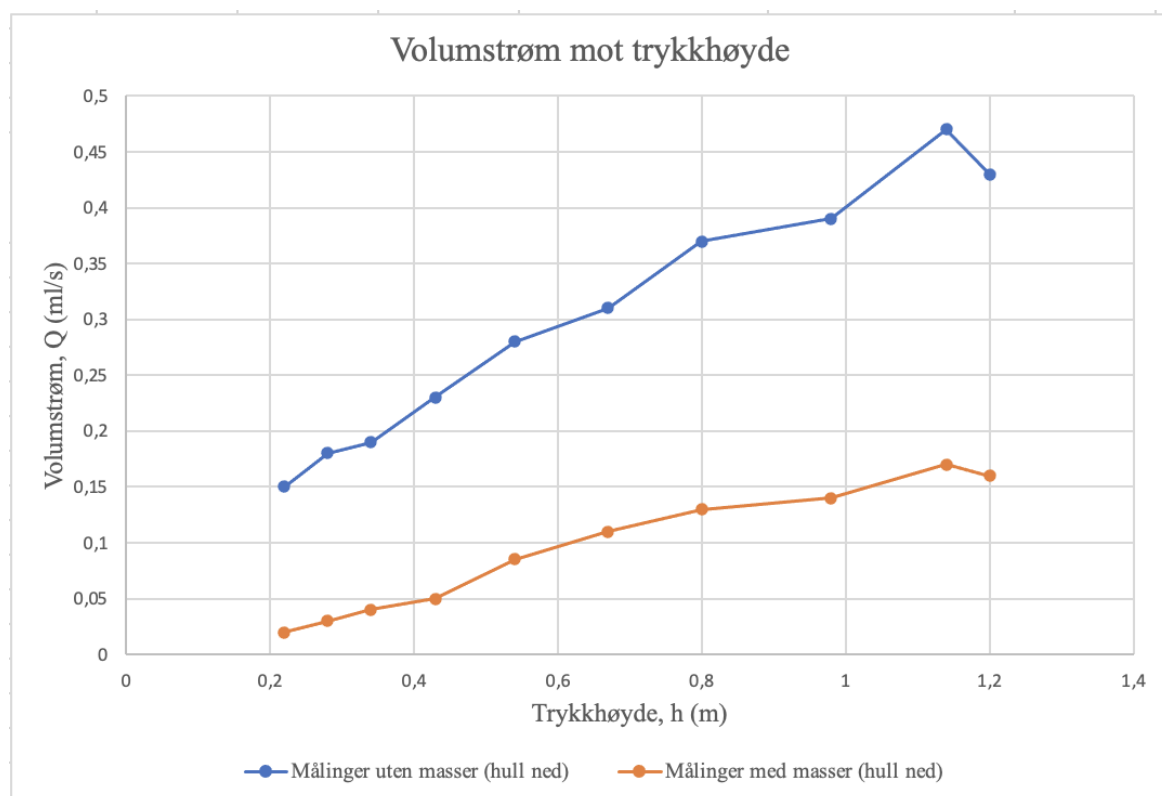
*Figur 16: Bilde av utløpstverrside etter tester for volumstrøm ved ulike pumpehastigheter på drikkevannsledning. Endestykket er trykket ut.*

Resultatene fra testene for lekkasjehullet til avløpsledningen etter fylling av grøftemasser ble sammenlignet med resultatene fra målinger uten masser. Figur 17 viser trykkhøyden over tid for målingene. Resultatene ved testene tyder på at endringen av trykkhøyde over tid er betydelig høyere uten grøftemasser enn med masser.

Figur 18 viser volumstrømmen som funksjon av trykkhøyde for de målte verdiene med- og uten grøftemasser for lekkasjehullet til avløpsrøret. En kan se, ut ifra resultatene, at vannføringen ut av lekkasjehullet ved gitt trykkhøyde er betydelig lavere ved tilført grøftemasse enn uten masser.



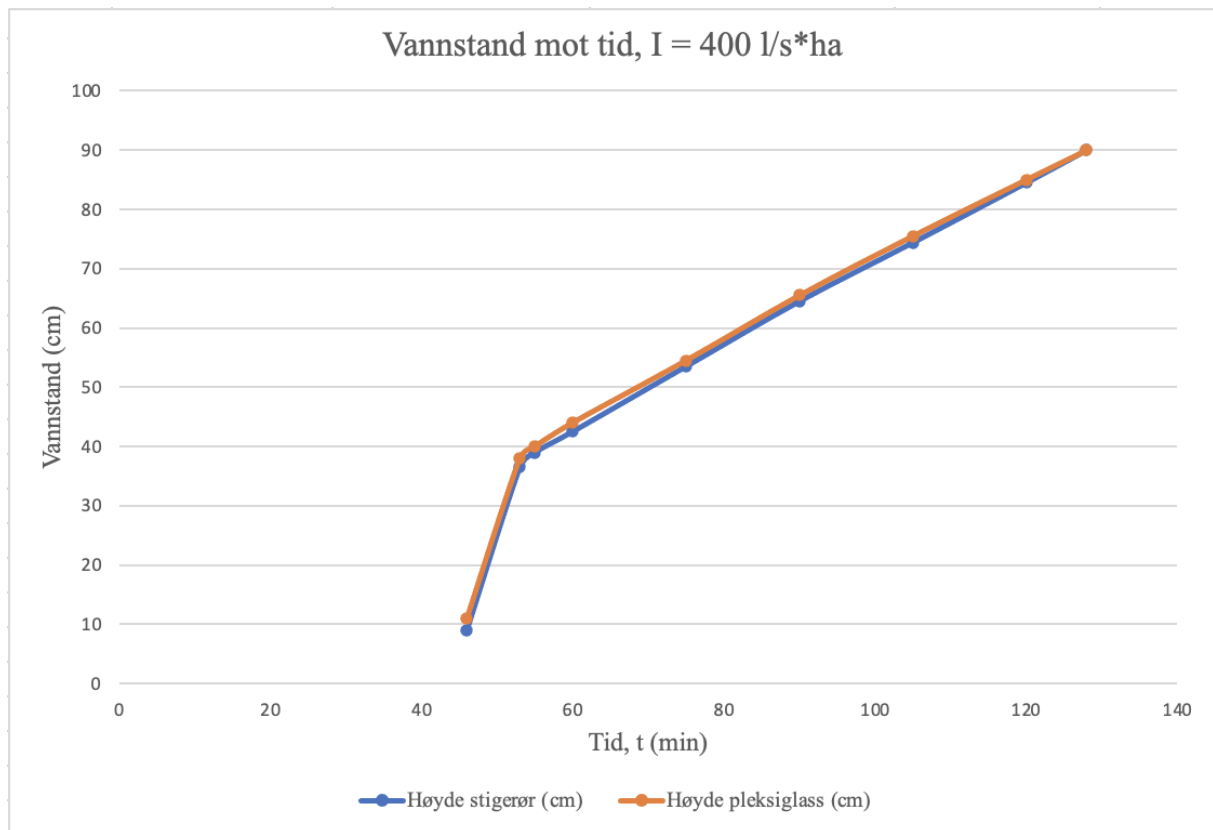
Figur 17: Trykkehøyde som funksjon av tid for målte verdier av lekkasjehullet til avløpsledningen med- og uten grøftemasser.



Figur 18: Volumstrøm som funksjon av trykkehøyde for målte verdier av lekkasjehullet til avløpsledningen med- og uten grøftemasser.

Testen utført med implementering av nedbør-avløpssimulatoren gikk ut på å se visuelt hvordan funksjonaliteten til det simulerte grøftesystemet er når det utsettes for nedbør, og samtidig få et mål på hvor lang tid det tar før det oppnås en mettet situasjon i grøftesystemet ved en gitt nedbørintensitet. Nedbørintensiteten ble satt til 400 l/s\*ha. Det ble tatt mål av høyden til vannstanden i både stigerøret og det transparente vinduet fra det begynte å stige. Det er først mulig å observere vann i stigerøret når vannstanden er på 9 cm, og i pleksiglasset er det først mulig å observere ved en vannstand på 10 cm. Første observasjon av vann i stigerøret og pleksiglasset var etter en nedbørstid på 46 minutter. Etter en nedbørstid på 60 minutter ble det tatt mål av vannstand hvert 15. minutt.

Målingene som ble utført blir vist i Figur 19 for vannstanden i både stigerøret og pleksiglasset mot nedbørstid. Den totale tiden for metning av systemet ble 2 timer og 8 minutter ved en nedbørintensitet på 400 l/s\*ha. Beregnet porøsitet på grøftemassene samlet, for fundament og sidefylling/beskyttelseslag, blir med dette på 35%. Resultatene av disse målingene viser også en høyere vannstand i pleksiglasset enn i stigerøret underveis i forsøket, se også bilder i vedlegg E. Dette skyldes de kapillære kreftene som gjør at vannet blir trukket opp i porene. Nødvendigheten av et stigerør for målinger av vannstand i grøftesystemet blir her poengtert. Fra første observasjon av vannstand etter 46 minutter nedbørstid blir det fremvist i Figur 19 en rask stigning av vannstand over relativt kort tid før det går over til en jevn stigning etter 53 minutter nedbørstid.



Figur 19: Vannstanden målt i stigerøret og det transparente vinduet mot nedbørstid.

## 5. Diskusjon

Formålet med denne oppgaven har vært å utforme, produsere og teste et simulert grøftesystem som skal brukes til undervisning, og med mulighet for videre forskning. Det er ønskelig at grøftesystemet skal kunne simulere vertikal transport, uten horisontal grunnvannsstrømning, av mikroorganismer i de forskjellige sonene i en representativ norsk grøft ved ulike grunnvannsstand og nedbørintensitet. Det simulerte grøftesystemet skal kunne benyttes med en eksisterende nedbør-avløpssimulator.

### 5.1 Grøftesystemets utforming

Grøftesystemet er utformet i henhold til veiledninger for grøfteutførelse av fleksible rør, heriblant avstander mellom rør, tykkelse på ulike soner og avstander til grøftevegger, så langt dimensjonsbegrensninger har tillatt dette. Dimensjonsbegrensningene har i hovedsak omhandlet nedbør-avløpssimulatoren dimensjoner, samt laboratoriets kapasitet og hvor håndterlig systemet bør være i form av vekt og størrelse for praktisk bruk sammen med nedbør-avløpssimulatoren. Disse dimensjonsbegrensningene kan medføre en risiko for påvirkning fra grøfteveggene ved undersøkelse av mikroorganismers transport, men avstanden til veggene er likevel innenfor veiledningers krav til minsteavstander. En mulig påvirkning dette kan ha er ved forskning på utstrømning fra en lekkasje på drikkevannsledningen hvor tilsatt forurensning av mikroorganismer kan bli transportert ved adveksjon, slik beskrevet i kapittel 2.5.3. Grøfteveggene vil under slike hendelser virke som en barriere og påvirke transporten av mikroorganismene.

Det er benyttet typiske rørmaterialer for norske ledningsnett for både drikkevannsledning og avløpsledning. Valg av rørmateriale ble gjort med tanke på hvor representativt systemet skal være i henhold til et typisk norsk grøfteanlegg, samt praktisk håndtering ved montering, boring av lekkasjehull og utskiftning av rør med ulike typer lekkasjehull ved senere forskning. Dimensjonene på ledningene ble valgt for å overholde minstekrav på tykkelse i de mest relevante sonene i grøfta. De mest relevante sonene for dette grøftesystemet er fundament og



sidefylling ettersom det skal være mulighet for analyser av mikroorganismers transport mellom avløpsledning til drikkevannsledning.

Grøftemassene benyttet for systemet er maskinsand 0-4 mm som fundamentmasse, og velgradert grus/natursingel med kornstørrelse på 4-16 mm som friksjonsmasser. Det er mulig å bytte ut disse massene ved senere forskning, men det er viktig å merke seg hvor tappingspunktet er plassert ettersom det er montert en sil ved utløpet for å forhindre masser fra å strømme ut ved tapping av grunnvann. Denne kan komme til skade ved harde slag.

Tappingspunktet for grunnvann er plassert i det ene hjørnet av kassa. Dette er et kombinert tappingspunkt og stigerør for minimering av mulige lekkasjepunkter. Selve tappingspunktet er tett, men det ble oppdaget en liten lekkasje ved overgangen fra tappingspunkt til stigerør, se Figur 33 i vedlegg E. Det kan være gunstig å gjøre dette så tett som mulig for å minimere risiko for feilkilder ved senere benyttelse av grøftesystemet for forskning på transport av mikroorganismer. En liten grunnvannsstrømning i horisontal retning kan gi feilkilder for mikroorganismers forflytning.

## 5.2 Grøftesystemets funksjonalitet

Det ble utført forsøk for vannføring ut av lekkasjehullet på avløpsledningen med og uten grøftemasser for ulike trykkehøyder. Lekkasjehullet på avløpsledningen har en diameter på 0,5 mm. Volumstrømmen er fremstilt i Figur 18. Figur 17 viser endringen av trykkehøyde over tid, og disse resultatene for volumstrøm og trykkehøyde vil kunne benyttes for å tilsette ønsket kontaminering ved senere forskning på mikroorganismers transport. Det anbefales å benytte en transparent slange for tilsetning av kontaminant for å kunne holde oversikt over hvor mye som tilsettes. Gjentetning av lekkasjehullet kan forekomme i form av partikler som fester seg, og ettersom det er benyttet fleksibelt rørmateriale så vil det kunne være en risiko for at materialet setter seg og krymper lekkasjehullet. Å stoke lekkasjehullet før forsøk kan være en gunstig forebygging av gjentetning.

Et forsøk for å måle volumstrøm ut av lekkasjehullet på drikkevannsledningen i forhold til hastigheten benyttet på pumpa ble utført uten tilsatt grøftemasse. Resultatene er vist i Figur 15. Kurven stopper etter en hastighet på 9 RPM siden endestykket på løpemuffa til ledningen ikke tålte trykket som ble skapt i røret. Pumpa har en maksimal hastighet på 200 RPM, så testene som ble utført foregikk på en veldig lav hastighet på pumpa. Likevel ettersom det ikke er tilgang på luft, og den eneste veien for vannet å gå er gjennom et lekkasjehull på 0,7 mm, dannes det et høyt trykk i ledningen og videre på endestykket. En beregning for hvor stor trykkraft som presses på endestykket kan gjøres ved å multiplisere trykket med arealet av endestykket. Indre diameter på drikkevannsledningen er 85,56 mm. Hvis ledningen, og endestykket, skal kunne tåle det maksimale trykket pumpa kan levere, altså 2 bar, må endestykket monteres slik at det tåler en kraft tilsvarende vekten av 117 kg.

Det ble utført et forsøk som inkluderte en nedbør-avløpssimulator. Systemet ble mettet etter 2 timer og 8 minutter ved en nedbørintensitet på 400 l/s\*ha noe som gir en samlet porøsitet på grøftemassene, fundament og sidefylling/beskyttelseslag, på 35%. Figur 19 viser vannstanden i stigerøret og i vinduet over tid. Disse resultatene kan benyttes som grunnlag for regulering av naturlig heving av grunnvann ved senere forsøk. Vannstanden ser ut til å stige relativt lineært med tiden etter at fundamentet er mettet. Tiden vannet bruker på infiltrering gjennom fundamentmassen kan ha hatt en innvirkning på den raske økningen i vannstand fra 46 minutter nedbørstid til 53 minutters nedbørstid. Det var ikke så stor forskjell mellom vannstand målt i stigerør og i vinduet, men litt. Det viser at det ikke er veldig stor

kapillærstigning, men likevel nok til at nøyaktig mål av vannstand ved senere forskning bør leses av i stigerøret.

Det er fint mulig å benytte andre nedbørintensiteter, og følge med på grunnvannsstand i stigerøret. Nedbørintensiteten benyttet i testen er veldig høy og tilsvarer en nedbørhendelse med gjentaksintervall på 50 år med en varighet på omkring 5 minutter, eller nedbørhendelse med gjentaksintervall på 200 år med varighet på omtrent 10 minutter. Med andre ord vil ikke en slik nedbørintensitet være realistisk å oppleve med en varighet på 2 timer og 8 minutter. Det vil si at faktisk tid for å få en mettet situasjon i dette grøftesystemet alltid vil være lenger, enn målt tid i denne testen, i en realistisk nedbørhendelse.

Ved tapping av grunnvann for nedjustering kan det være hensiktsmessig å samle opp mengden vann underveis i tappingsprosessen og måle volum tappet. Dette grunnet den kombinerte monteringen for stigerør og tappingspunkt som gjør at stigerøret blir tømt når grunnvann blir tappet. Pleksiglasset vil gi et visuelt forhold til mengden grunnvann, men grunnvannsstanden vil ikke vises eksakt gjennom dette vinduet. Dette vil hovedsakelig skyldes at det vil bli en helning i grunnvannsspeilet i strømningsretningen i tillegg til kapillærkrefter som trykker vannet opp i porene.

### 5.3 Sammenligning med det tidligere norske studiet

Forsøksanlegget i dette prosjektet er inspirert av forsøksanlegget benyttet i det tidligere norske studiet som omhandler mikrobiologiske forhold i ledningsgrøfter (Myhrstad & Jahren, 1983). Likevel er det en del forskjellige løsninger. Det ble bygget to grøfter i det tidligere anlegget, en sandgrøft og en grøft med finpukk. I grøftesystemet i dette prosjektet ble det derimot tilført masser avhengig av sonene i grøfta. Det er også benyttet en nedbør-avløpssimulator for justering av grunnvann i dette forsøksanlegget, mens det i det tidligere anlegget ble tilført rentvann/grunnvann nederst i grøfta. Dette kan gi ulike resultater ved undersøkelse av transport av mikroorganismer ettersom adveksjon ved infiltrasjon er en av de vanligste transportmetodene for patogene- og indikatororganismer i grunnen (Jamieson et al., 2002). Naturlig heving av grunnvannsstand ble altså simulert ved tilførsel i bunnen av grøfta i det tidligere forsøksanlegget, mens det i dette anlegget blir simulert ved nedbør.

I dette forsøksanlegget er det installert én drikkevannsledning og én avløpsledning, med muligheter for utskiftninger av ledningene, og videre lekkasjetyper. I det tidligere norske forsøksanlegget ble det lagt 8 vannledninger i hver grøft på 4 ulike nivåer, med 2 ulike lekkasjestørrelser (Myhrstad & Jahren, 1983). Dette gir muligheter for resultater av mikrobiologiske undersøkelser rundt drikkevannsledninger i flere nivåer i forhold til et satt grunnvannsspeil og plassering av avløpsledning. Det er imidlertid enklere å tilpasse forsøksanlegget beskrevet i dette prosjektet til ulike forsøk i forhold til fleksibiliteten med utskiftbare løsninger.

## 5.4 Videre arbeid

Det er muligheter for utbedring og optimalisering av det simulerte grøftesystemet. Som nevnt ble det oppdaget en liten lekkasje i overgangen til stigerøret, og dette anbefales å utbedre for å unngå horisontale strømminger i systemet. Drikkevannsledningen må utbedres i forbindelse med trykkpåsetting. En løsning for et kraftig endestykke som kan tåle en relativt høy trykkraft bør påmonteres. En mulig løsning kan være å koble et videre rørsystem for å undersøke kontaminering av ledningsvannet i grøfta ved ulike trykk, slik det er blitt gjort i det tidligere norske studiet. Det kan være gunstig å studere hvordan tapping av grunnvann påvirker strømminger i grøftesystemet. Tapping bør skje med lav hastighet ved utløpet for minimal forflytning av masser og videre påvirkning av mikroorganismenes forflytning.

For prøvetaking av grøftemasser under forsøk som omhandler transport av mikroorganismer i vertikal retning bør det tenkes ut en gunstig løsning for å ta ut prøver av massene. En mulig løsning kan være et langt jordprøvebor for å få med en prøve av hele grøftemassen samlet. Nedsetting av permeable rør med de samme massene som resten av grøfta i forkant av forsøkene kan også være en mulighet, slik det ble gjort i det tidligere norske studiet (Myhrstad & Jahren, 1983). Dette kan være en god løsning for å få tatt prøver av massene på ulike områder i grøftesystemet ved samme forsøk med minimale forstyrrelser ved uttak av prøvene. Det kan også være mulig å utføre noen initielle forsøk med bruk av en saltløsning som forurensning og plassering av konduktivitetssensorer i grøften. Dette vil ikke være representativt for partikler, men kan benyttes som et «verste fallsscenario» ettersom partikler vil transporteres saktere/ filtreres bedre enn saltløsninger.

Utformingen og konstruksjonen av det simulerte grøftesystemet gir mulighet for videre forskning av transport av mikroorganismer i grøftesystemer. Masser kan varieres for undersøkelse av gunstige grøftemasser og mikroorganismers evne til transport. Rørmaterialer og type lekkasjehull kan skiftes ut for å undersøke graden av kontaminering ved forskjellige hendelsesforløp. I tillegg kan det utføres forsøk for ulike typer mikroorganismer, deres ulike evner til vertikal transport, og videre utføre risikoanalyser for kontaminering av drikkevannsledning ved lekkasjer fra avløpsledning. Forsøk med lekkasjer på drikkevannsledningen kan også utføres for å studere hvordan dannelser av makroporer ved høy hastighet på utstrømning kan påvirke strømminger og transportveier for mikroorganismer.

## 6. Konklusjon

I denne oppgaven har den nødvendige teorien, metoden og resultatene for utforming og produksjon av en simulert grøft blitt presentert. Grøftesystemet har blitt utformet og testet ut med et formål om at den skal kunne benyttes til undervisning og videre forskning, hvor hovedfokuset er rettet mot studering av transport av mikroorganismer i grøftemasser mellom avløpsledning og drikkevannsledning i vertikal retning ved lekkasjer.

Det simulerte grøftesystemet er utformet som en representativ norsk grøft i form av ledninger og grøftemasser. Grøftekassa er produsert med et transparent pleksiglass på den ene tverrsiden for muligheten til visualisering av et representativt grøftetverrsnitt ved undervisning.

Utformingen gjør at den er brukervennlig og med muligheter for enkel justering av trykk, grunnvannsstand, nedbør og utskiftninger av ledningstyper og lekkasjestørrelser. Det er i tillegg muligheter for utskiftning av massetyper for undersøkelse av mikroorganismers evner til transport under ulike forhold.

For å kunne demonstrere strømninger og tilstand ved lekkasjer på både avløpsledning og drikkevannsledning i et grøftesystem er det blitt gjennomført analyser av vannføring ut av lekkasjehull ved ulike trykkehøyder. Det er i tillegg blitt gjennomført analyser for funksjonaliteten til grøftesystemet ved justering av grunnvannsstand ved en gitt nedbørintensitet ved bruk av en nedbør-avløpssimulator.

Resultatene gir grunnlag for, og viser til muligheter for videre forskning, og videre datagrunnlag for risikoanalyser, for innsug av mikroorganismer i drikkevannsnettet ved lekkasjer på avløpsnettet.

# Referanser

- Besner, M.-C., Broséus, R., Lavoie, J., Giovanni, G. D., Payment, P. & Prévost, M. (2010). Pressure monitoring and characterization of external sources of contamination at the site of the Payment drinking water epidemiological studies. *Environmental science & technology*, 44 (1): 269-277.
- Besner, M.-C., Prévost, M. & Regli, S. (2011). Assessing the public health risk of microbial intrusion events in distribution systems: conceptual model, available data, and challenges. *Water research*, 45 (3): 961-979.
- Byggteknisk forskrift (TEK17). (2017). *Kapittel 15. Installasjoner og anlegg*. Lovdata.
- Drikkevannsforskriften. (2017). *Forskrift om vannforsyning og drikkevann (drikkevannsforskriften)*. Lovdata.
- FHI. (2023). *Hva forteller mikrobiologiske drikkevannsanalyser?* Folkehelseinstituttet. Nettside. Tilgjengelig fra: <https://www.fhi.no/ml/drikkevann/nasjonal-vannvakt/Hva-forteller-mikrobiologiske-drikkevannsanalyser/>.
- Filip, Z., Kaddu-Mulindwa, D. & Milde, G. (1988). Survival of Some Pathogenic and Facultative Pathogenic Bacteria in Groundwater. *Water science and technology*, 20 (3): 227-231. doi: 10.2166/wst.1988.0105.
- Folkehelseinstituttet. (2019). *Utbrudd av Campylobacter, Askøy, juni 2019*. Rapport.
- Fontanazza, C. M., Notaro, V., Puleo, V., Nicolosi, P. & Freni, G. (2015). Contaminant intrusion through leaks in water distribution system: experimental analysis. *Procedia engineering*, 119: 426-433.
- Forurensningsforskriften. (2022). *Forskrift om begrensnig av forurensning (forurensningsforskriften) Del 4. Avløp*. Lovdata.
- Fox, S., Shepherd, W., Collins, R. & Boxall, J. (2016). Experimental quantification of contaminant ingress into a buried leaking pipe during transient events. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142 (1): 04015036.
- Habteselassie, M., Bischoff, M., Blume, E., Applegate, B., Reuhs, B., Brouder, S. & Turco, R. (2008). Environmental controls on the fate of Escherichia coli in soil. *Water, air, and soil pollution*, 190: 143-155.
- Hagedorn, C., Hansen, D. & Simonson, G. (1978). *Survival and movement of fecal indicator bacteria in soil under conditions of saturated flow*, 0047-2425. Rapport: Wiley Library.
- Jamieson, R., Gordon, R., Sharples, K., Stratton, G. & Madani, A. (2002). Movement and persistence of fecal bacteria in agricultural soils and subsurface drainage water: A review. *Canadian biosystems engineering*, 44 (1): 1-9.
- Kibbey, H., Hagedorn, C. & McCoy, E. (1978). Use of fecal streptococci as indicators of pollution in soil. *Applied and environmental microbiology*, 35 (4): 711-717.
- Lilletvedt, M. & Rasen, M. H. (2020). *Utvikling og produksjon av en nedbør-avløpssimulator til bruk i undervisning*. Masteroppgave: Norwegian University of Life Sciences, Ås.
- Lindholm, O. (2017). *Fremmedvann i avløpsledninger*. Blad nr. 123: Stiftelsen VA/Miljø-blad.
- Myhrstad, J. A. & Jahren, P. E. (1983). *Mikrobiologiske forhold i ledningsgrøfter*, 8290328249-23875674. Nationalbiblioteket: PTV22.
- Naphaug, E. (2023). *Risikofaktorer for inntrengning av patogener i norske drikkevannsledninger – et litteraturstudium*. Masteroppgave: Norwegian University of Life Sciences, Ås.

- Nilsen, V. (2022). *Måleteknikk* (Forelesning, TPS210 Fluidmekanikk).
- Norsk klimaservicesenter. (2022). *Nedbørintensitet (IVF-verdier)*. Nettside. Tilgjengelig fra: <https://klimaservicesenter.no/ivf?locale=nb&locationId=SN18701> (lest 04.06.2023).
- Norsk Vann. (2021). *Lekkasjer*. Nettside. Tilgjengelig fra: <https://norskvann.no/ledningsnett-og-teknologi/lekkasjer/>.
- Norsk Vann. (2023). *VA ordbok*. Nettside. Tilgjengelig fra: [https://kurs.norskvann.no/mod/glossary/view.php?id=676&mode=letter&hook=D&s\\_ortkey&sortorder&fullsearch=0&page=1](https://kurs.norskvann.no/mod/glossary/view.php?id=676&mode=letter&hook=D&s_ortkey&sortorder&fullsearch=0&page=1).
- Oddevald, J.-E. & Hansen, A. (2004). *Vannledningsrør i Norge. Historisk utvikling, 135-2004*: Norsk Vann Rapport.
- PIPELIFE. (2021). *Pipelife Rørhåndbok*: PIPELIFE Norge AS. Tilgjengelig fra: <https://www.pipelife.no/content/dam/pipelife/norway/marketing/general/brochures/various/R%C3%B8rh%C3%A5ndboka.pdf>.
- Pommeresche, R., Haugerud, Ø. & Swensen, B. (2011a). Protozoer-de minste" dyra" i jorda. Tilgjengelig fra: [https://orgprints.org/id/eprint/30210/1/TEMA\\_6\\_19\\_Protozoer%20endelig.pdf](https://orgprints.org/id/eprint/30210/1/TEMA_6_19_Protozoer%20endelig.pdf).
- Pommeresche, R., Ruissen, T. & Joner, E. (2011b). Jordlevende sopp. Tilgjengelig fra: [https://orgprints.org/id/eprint/30208/1/TEMA\\_6\\_18\\_Sopp%20endelig.pdf](https://orgprints.org/id/eprint/30208/1/TEMA_6_18_Sopp%20endelig.pdf).
- Reddy, K., Khaleel, R. & Overcash, M. (1981). Behavior and transport of microbial pathogens and indicator organisms in soils treated with organic wastes. *Journal of environmental quality*, 10 (3): 255-266.
- Sjogren, R. E. (1994). Prolonged survival of an environmental Escherichia coli in laboratory soil microcosms. *Water, Air, and Soil Pollution*, 75: 389-403.
- Sjøvold, F., Hansen, A. & Rønning, C. (2008). *Helsemessig sikkert vannledningsnett*. Norsk Vann. Rapport.
- SSB. (2023a). Kommunal vannforsyning. I: *Statistisk sentralbyrå*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/statbank/table/13143/tableViewLayout1/>.
- SSB. (2023b). Kommunalt avløp. I: *Statistisk sentralbyrå*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/statbank/table/13144/tableViewLayout1/>.
- Steinberg, M., Nordheim, C. F. & Lyngstad, T. M. (2021). *Oppdrag fra Mattilsynet. Rapportering av data for vannforsyningssystemer i Norge for 2020*, 8284062704. Rapport.
- Stiftelsen VA/Miljø-blad. (2016). *Grøfteutførelse fleksible rør*. blad nr. 5: Stiftelsen VA/Miljø-blad.
- Sægrov, S. (1992). *Tilstand og tilstandsendring for betongavløpsledninger*: Institutt for vassbygging, Seksjon for VAR-teknikk, Norgestekniske høgskole, dr. avhandling ved institutt for vann- og miljøteknikk.
- Tate, I. & Robert, L. (1978). Cultural and environmental factors affecting the longevity of Escherichia coli in histosols. *Applied and Environmental Microbiology*, 35 (5): 925-929.
- UiO. (2020). Bakterier. I: Institutt for biovitenskap (red.). Nettside: Universitetet i Oslo. Tilgjengelig fra: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/b/bakteri.html>.
- UiO. (2023). Sykdom. I: Institutt for biovitenskap (red.). Nettside: Universitetet i Oslo. Tilgjengelig fra: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/s/sykdom.html>.
- Vegvesen, S. (2014). Håndbok N200 Vegbygging. *Statens Vegvesen*.



- Vegvesen, S. (2022). Håndbok V220 Geoteknikk i vegbygging. *Statens Vegvesen*.
- White, R. (1985). The influence of macropores on the transport of dissolved and suspended matter through soil. *Advances in Soil Science: Volume 3*: 95-120.
- Ødegaard, H., Lindholm, O., Thorolfsson, S. T., Østerhus, S. W., Sægrov, S., Mosevoll, G. & Heistad, A. (2014). *Vann- og avløpsteknikk*. 2. utgave utg.: Norsk Vann.

# Vedlegg

Vedlegg A. Uttrykk for beregning av volumstrøm som funksjon av trykkhøyde.

## Uttrykk for volumstrøm som funksjon av trykkhøyde for laminær rørstrømning

Energilikningen fra overflaten i slangen (punkt 1) til utløpet av hullet (punkt 2):

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f + h_s$$

Atmosfærisk trykk i begge ender, neglisjerer hastighet i slangen, neglisjerer singulærtap,  $\alpha_2 = 2$  i laminær strømning, kaller  $V_2 = V$ , kaller  $z_1 - z_2 = h$ , bruker friksjonstap for laminær strømning:

$$h = 2 \frac{V^2}{2g} + \frac{32\nu LV}{gd^2}$$

Standardform for andregradslikninger:

$$V^2 + \frac{32\nu L}{d^2}V - gh = 0$$

$$b = \frac{32\nu L}{d^2}$$

Løser:

$$V = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4gh}}{2} = \frac{-\frac{32\nu L}{d^2} + \sqrt{\left(\frac{32\nu L}{d^2}\right)^2 + 4gh}}{2}$$

Volumstrøm:

$$Q_{\text{rør}} = AV$$

Vedlegg B. Uttrykk for beregning av trykkehøyde som funksjon av tid.

### Uttrykk for trykkehøyde som funksjon av tid for laminær rørstrømning

Kontinuitetslikningen gir:

$$A_{\text{slange}} \frac{dh}{dt} = -Q_{\text{rør}} = -AV$$
$$\frac{\pi D^2}{4} \frac{dh}{dt} = -\frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4gh}}{2}$$
$$\frac{dh}{dt} = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot \frac{b - \sqrt{b^2 + 4gh}}{2}$$
$$\frac{dh}{b - \sqrt{b^2 + 4gh}} = \frac{1}{2} \left(\frac{d}{D}\right)^2 dt$$

Substitusjon:

$$u = \sqrt{b^2 + 4gh} \Rightarrow \frac{du}{dh} = \frac{2g}{u} \Rightarrow dh = \frac{u}{2g} du$$

$$\frac{u}{u-b} du = -g \left(\frac{d}{D}\right)^2 dt$$

$$\int \left(1 + \frac{b}{u-b}\right) du = -g \left(\frac{d}{D}\right)^2 \int dt$$

$$u + b \ln(u-b) + C = -g \left(\frac{d}{D}\right)^2 t$$

Brukt startbetingelse:

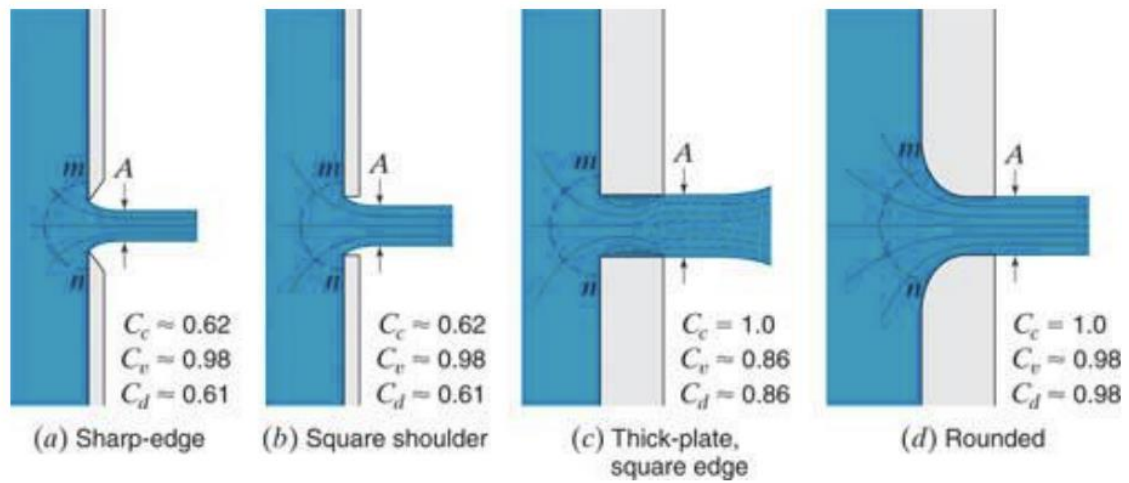
$$u + b \ln(u-b) - u_0 - b \ln(u_0-b) = -g \left(\frac{d}{D}\right)^2 t$$

$$u - u_0 + b \ln\left(\frac{u-b}{u_0-b}\right) = -g \left(\frac{d}{D}\right)^2 t$$

Denne kan brukes til å plote kurven for rørstrømning.

## Vedlegg C: Koeffisienter for karakterisering av funksjonen til blender.

Hentet fra: (Nilsen, 2022)



hvor:

$C_c$  Kontraksjonskoeffisient

$C_v$  Hastighetskoeffisient

$C_d$  Avløpskoeffisient

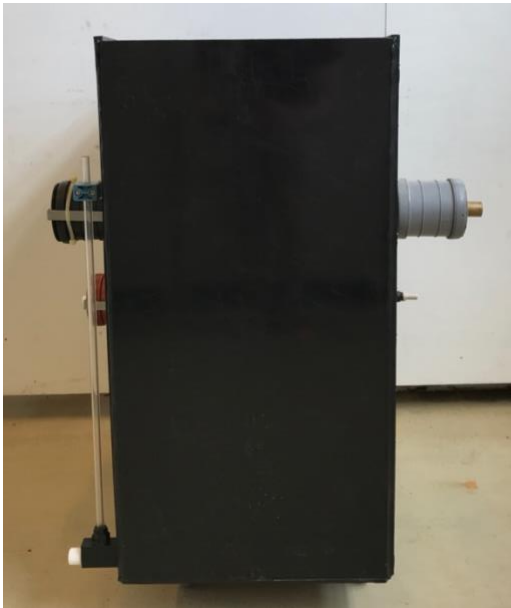
Vedlegg D: Formel benyttet for beregning av Reynolds' tall.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

hvor:

$Re$	Reynolds' tall
$\rho$	Massetettheten til vann [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$V$	Gjennomsnittshastighet [ $\text{m}/\text{s}$ ]
$D$	Diameter rør [ $\text{mm}$ ]
$\mu$	Viskositet til vann [ $\text{Pa s}$ ]

Vedlegg E. Bilder av det simulerte grøftesystemet.



Figur 20: Ferdigstilt grøftekasse sett fra lengdeside.



Figur 21: Ferdigstilt grøftekasse sett fra utløpstversside med tappingspunkt og stigerør.



Figur 23: Ferdigstilt grøftekasse sett ovenfra uten grøftemasser.



Figur 22: Ferdigstilt grøftekasse med grøftemasser sett fra innløpstversside.



Figur 25: Bilde av tetthetstest sett fra innløpstverrside.



Figur 24: Bilde av tetthetstest sett fra utløpstverrside.



Figur 27: Bilde av tetthetstest sett fra lengdeside. Viser tydelig deformasjon i rammeverket.



Figur 26: Bilde av utløp og stigerør ved tapping av grunnvann.





Figur 28: Bilde av testing for volumstrøm ut av lekkasjehull på avløpsledning ved ulike trykkehøyder.



Figur 29: Bilde av utstrømning fra lekkasjehull på avløpsledning under testing av volumstrøm med hullplassering opp.



Figur 31: Bilde av testing for volumstrøm ut av lekkasjehull på drikkevannsledning ved stigende hastighet på pumpe.



Figur 30: Bilde av utløpstverrside etter tester for pumpehastigheter på drikkevannsledning. Endestykket er trykket ut.

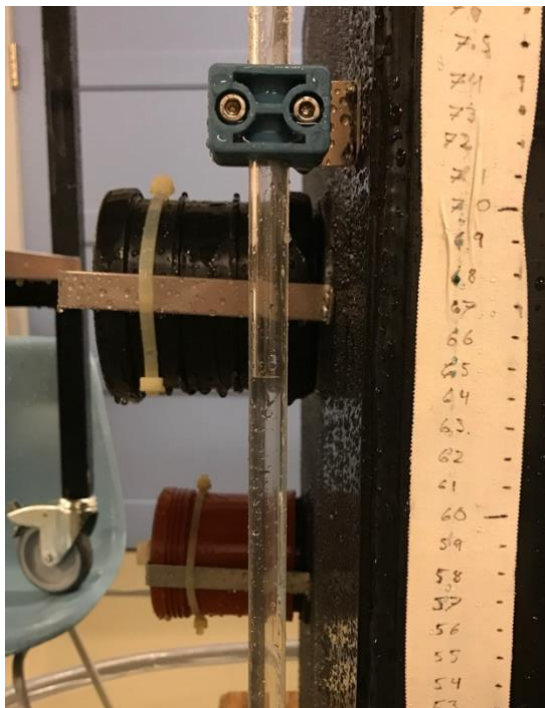




Figur 33: Bilde av lekkasje fra monteringspunkt til stigerøret.



Figur 32: Bilde av tester for volumstrøm ut av lekkasjehullet på avløpsledning med fylte grøftemasser.



Figur 35: Bilde av grunnvannstand målt med stigerør under testing med implementering av nedbør-avløpssimulator. Bildet er tatt under målt grunnvannstand på 64,5 cm.



Figur 34: Bilde av grunnvannstand målt i pleksiglasset under testing med implementering av nedbør-avløpssimulator. Bildet er tatt under målt grunnvannstand på 64,5 cm i stigerøret, og 65,5 cm i pleksiglasset.



*Figur 37: Bilde av mettet grøftesystem etter test for måling av tid for å få et mettet system ved en nedbørintensitet på 400 l/s\*ha.*



*Figur 36: Bilde av pumpa som benyttes til det simulerte grøftesystemet.*





*Figur 38: Oversiktsbilde av testing ved implementering av nedbør-avløpssimulator.*



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

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway