



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2022 30 stp

Fakultetet for realfag og teknologi (REALTEK)

Permeabelt sandfang

Permeable gully pot

Eirik Severin Bråten

Vann- og miljøteknikk

FORORD

Denne oppgaven markerer slutten på 5 årig master i vann- og miljøteknikk ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Det er et lærerikt, hyggelig og inkluderende miljø her på NMBU som jeg ønsker å anbefale til alle.

Masteroppgaven er skrevet i samarbeid med Basal AS, og jeg ønsker å rette en stor takk til Terje Reiersen, Anne Ekstrøm og biveileder Geir Sogge Johnsen, for å ha disponert kontor plass og en arena for faglig diskusjon. Jon Arild Holte fra Loe Rørprodukter AS fortjener en takk for å legge til rette for forsøk på anlegg, på testtrigg, frostforsøk og ordne borekjerner til laboratorieforsøk. Jeg vil også takke veiledere Joachim Mossige, Vegard Nilsen og Oddvar Lindholm, for gode innspill og veiledning gjennom perioden. Prototypeverkstedet ved NMBU vil jeg også gjerne takke for å snekre sammen festanretningen til borekjernene.

Til slutt vil jeg rette en takk til samboer, venner og familie som har hjulpet til med motivasjon gjennom masteroppgaven.

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Ås, 16.mai 2022

Eirik Severin Bråten

SAMMENDRAG

Overflateavrenning fra tette flater øker risikoen for flom, og skader resipienter og vassdrag ved å tilføre partikler og miljøgifter, noe som kan løses ved å håndtere mer overvann lokalt. I dag håndteres det meste av avrenning fra veg med sandfang som videre sender vannet til ledningsnett. Er disse godt driftet, kan mye av partikkelbundet forurensing holdes igjen i kumbunnen. Et bedre alternativ med tanke på tilbakeholdelse av forurensinger og for å avlaste ledningsnett er å bruke permeable sandfang.

Permeable sandfang har en lignende oppbygning som et vanlig sandfang, men med en midtre del av permeabel betong som slipper vann til grøftebygningen. I grøften infiltrerer vann i grunnen og miljøgiftene holdes tilbake i kumbunnen og i grøften. Grøften benyttes også som et fordrøyningsmagasin som avlaster ledningsnett ved store nedbørshendelser.

I og med at det permeable sandfanget er nytt, så har denne oppgaven som mål belyse usikkerhetene tilknyttet det, som er: (i) hvorvidt den permeable betongen går tett, (ii) hvor godt den kan gjenåpnes etter tetting, (iii) om den permeable betongen er utsatt for frostskafer, (iv) hvor god den hydrauliske kapasiteten er etter installasjon og (v) om det har skjedd en endring i hydraulisk kapasitet et halvt år etter installasjon.

Laboratorieforsøk på borekjerner viste at den permeable betongen tettes av partikler med korndiameterer på 0,25-0,8 mm og beholder 52 % av sin opprinnelige kapasitet etter tetting. Kapasiteten kan gjenvinnes til 74 % av sin opprinnelige kapasitet med høytrykksspyling. Det er ikke nødvendigvis sånn at dette er direkte overførbart til fullskala i og med at dette er småskala laboratorieforsøk, så videre fullskala forsøk burde vurderes. Den permeable betongen tålte frostforsøkene som ble utført vinterstid ute, men det var ikke spesielt kaldt og ikke lett å konkludere med noe. *In situ* forsøk viste at kapasiteten til to sandfang satt ute i anlegg ble opprettholdt gjennom et halvt år, og kapasiteten sammenholdt med nedbørsdata viser at de aktuelle sandfangene kan ta hånd om 200 års regn med varighet på 5 minutter og oppimot 200 års regn med varighet på 25 minutter før overløp benyttes.

Resultatene fra forsøk gjort i denne oppgaven viser en lovende fremtid for de permeable sandfangene, men en videre oppfølging og fullskala-forsøk er nødvendig for å opparbeide seg mer kunnskap om det permeable sandfanget.

ABSTRACT

Surface runoff from impermeable surfaces increases the risk of flooding and can harm recipient water bodies by introducing particles and environmental toxins. Today, most runoff from roads is managed with gully pots, which further transports the water to piping network. If these are well operated, much of the particle-bound contaminants can be retained in the gully pot. A better alternative for retaining particulate contaminants and to relieve the pipe network, is to use soakaways like permeable gully pots.

Permeable gully pots are similar in structure to a regular gully pot, but with a middle part of permeable concrete that exfiltrates water to the surrounding ditch. In the ditch, water infiltrates into the ground and the environmental toxins are retained. The ditch also works as a detention reservoir which relieves the piping network in the event of heavy precipitation events.

The permeable gully pot is new and though experimental investigations have this thesis shed light on the uncertainties of: (i) whether the permeable concrete is susceptible to clogging and (ii) how well it can be reopened, (iii) whether the permeable concrete is susceptible to frost damage, (iv) how good the hydraulic capacity is after installation and (v) if the hydraulic capacity has changed after half a year.

Laboratory tests on drill cores showed that the porous concrete is clogged by particles with grain diameters of 0.25-0.8 mm and loses 48 % of its original capacity, but that the capacity can be recovered to 74 % of its original capacity with high-pressure flushing. The permeable concrete withstood the frost tests carried out during the winter outside at NMBU, but it was not particularly cold and not easy to conclude anything. *In situ* experiments showed that the capacity of two gully pots was maintained for half a year. Considering the capacity and precipitation data, the gully pots can handle precipitation with duration of 5 minutes and return period of over 200 years, and the ditch can handle precipitation with duration of 25 minutes and return period of about 200 years.

The results from experiments carried out in this thesis show a promising future for the permeable gully pot, but a further follow-up and full-scale investigations is necessary to get more knowledge about the permeable gully pot.

INNHALDSFORTEGNELSE

Forord.....	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Innholdsfortegnelse	iv
Figuroversikt.....	vi
Tabelloversikt	viii
1 Introduksjon.....	1
2 Bakgrunn	3
2.1 Tetteflater som en kilde til forurensing.....	3
2.2 Sandfang	4
2.3 Infiltrasjon og fordrøyning.....	7
2.4 Permeabel betong	8
2.5 Permeabelt sandfang.....	10
3 Metode.....	13
3.1 Hydraulisk modell for permeable sandfang	13
3.2 Forsøk på permeable sandfang <i>in situ</i>	16
3.3 Laboratorieforsøk på borekjerner	19
3.4 Frostforsøk.....	22
4 Resultater.....	23
4.1 Tilpasning av hydraulisk modell.....	23
4.2 Forsøk <i>in situ</i>	26
4.3 Laboratorie-forsøk.....	30
4.4 Frostforsøk.....	33
5 Diskusjon	34

5.1	Hydraulisk modell	34
5.2	Forsøk <i>in situ</i>	34
5.3	Laboratorieforsøk	35
5.4	Frost	38
5.5	Drift	41
5.6	Valg av permeable sandfang på nye anlegg	42
6	Konklusjon og videre arbeid	44
7	Kilder	46
	Vedlegg 1	i
	Vedlegg 2	xi

FIGUROVERSIKT

Figur 1: Prinsippskisse av tre-trinns strategien. Hentet fra: (Statens vegvesen, 2020).....	1
Figur 2: Permeabelt sandfang skissert i grøft. Hentet fra: (BASAL AS, u.å.-b).....	2
Figur 3: Skisse av sandfang. Figuren er hentet fra: (BASAL AS, u.å.-a).	4
Figur 4: Illustrasjon av laboratorieoppsett.....	13
Figur 5: Illustrasjon av feltoppsett.	15
Figur 6: Bilde av testoppsett i felt av Jon Aril Holte, 26.oktober 2021.	16
Figur 7: Illustrasjonen viser testoppsettet i anlegg.....	17
Figur 8: Illustrasjon av testoppsettet i lab.....	19
Figur 9: Festeanretning til borekjerne og de to typer kjerner som er testet med mål.	20
Figur 10: Bilde av permeabel kumring satt ut for frostforsøk på NMBU.....	22
Figur 11: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 1.....	23
Figur 12: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for kjerne nr. 1.	24
Figur 13: Hydrauliske forsøk gjort på testrigg i Rygge.	25
Figur 14: Resultat fra hydraulisk forsøk på sandfang nr. 1 den 26. oktober 2021 på anlegg. .	27
Figur 15: Resultat fra hydraulisk forsøk på sandfang nr. 1 den 31. mars 2022 på anlegg.....	27
Figur 16: Resultat fra hydraulisk forsøk på sandfang nr. 2 den 26. oktober 2021 på anlegg ..	28
Figur 17: Resultat fra hydraulisk forsøk på sandfang nr. 2 den 31. mars 2022 på anlegg.....	28
Figur 18: Figuren viser de tilpassede k-verdiene til kjernene.	31
Figur 19: Illustrert oppbygning med mulige problemer.....	40
Figur 20: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 1.....	ii
Figur 21: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 2.....	ii
Figur 22: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 3.....	iii
Figur 23: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 4.....	iii
Figur 24: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 5.....	iv
Figur 25: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 6.....	iv
Figur 26: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 7.....	v
Figur 27: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 8.....	v
Figur 28: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 9.....	vi
Figur 29: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for kjerne nr. 1.	vi
Figur 30: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for kjerne nr. 2.	vii

Figur 31: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for kjerne nr. 3.....	vii
Figur 32: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for kjerne nr. 4.....	viii
Figur 33: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for forsøk nr. 5.....	viii
Figur 34: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for forsøk nr. 6.....	ix
Figur 35: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for forsøk nr. 7.....	ix
Figur 36: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for forsøk nr. 8.....	x
Figur 37: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for forsøk nr. 9.....	x
Figur 38: Skisse for modell for permeabelt sandfang i felt.....	xi
Figur 39: Skisse for modell for borekjerne i lab.	xii

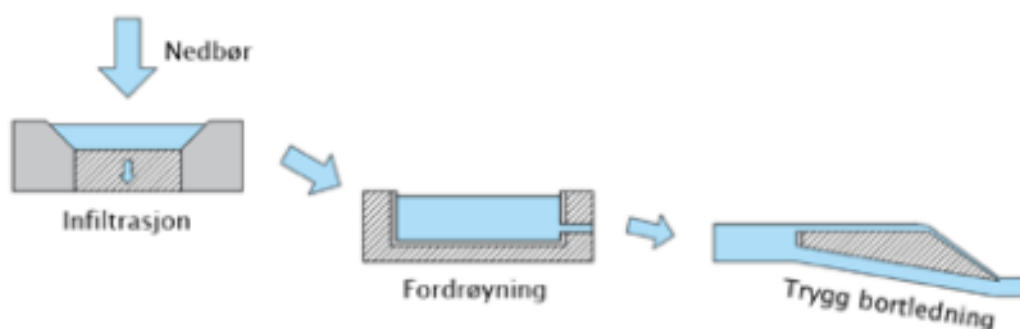
TABELLOVERSIKT

Tabell 1: Forurensningsstoffer totalt for indre Oslofjord (Lindholm & Haraldsen, 2013).	3
Tabell 2: Fraksjoner av forurensinger tilknyttet hver partikkelstørrelse (Lager et al., 1977)... 4	4
Tabell 3: Tilbakeholdelse av partikkelfraksjoner i sandfang	6
Tabell 4: Total mengde partikkelbundet forurensning tilbakeholdt i sandfang..	7
Tabell 5: Tabellen viser det gjennomsnittlige avviket (RMSE) for tilpasning av modellene... 24	24
Tabell 6: IVF-statistikk for Hønefoss. Hentet fra: (Norsk klimaservicesenter, 2021).....	30
Tabell 7: Resultater fra laboratorieforsøk.....	32
Tabell 8: Resultater fra laboratorieforsøk som viser vekt, gjentetningsgrad.	32
Tabell 9: Tabellen viser hvordan sandvolumet fordeler seg på partikkelstørrelser.	41
Tabell 10: Tabellen viser det avviket (RMSE) for tilpasning av modellene.....	i

1 INTRODUKSJON

Ettersom det etableres flere og flere tette flater, og nedbørsintervaller, -mengder og -intensiteter endrer seg, har nåværende ledningsnett ikke kapasitet nok ved store nedbørshendelser. Dette kan føre til flere flommer, videre skader på bygninger og infrastruktur, og økt transport av miljøgifter til vassdrag og resipient. I avrenning fra vegarealer er det en betydelig mengde partikulærbundet mikroplast, tungmetaller og organiske miljøgifter, som slippes ut gjennom rør via dårlig driftede sandfang (Lindholm, 2015b).

Håndtering av overvann skal i dag følge 3-trinnsstrategien skissert i Figur 1 (Lindholm et al., 2008). Trinn 1 tiltak skal fange opp, infiltrere og fordampe mindre nedbørsmengder, trinn 2 skal forsinke og fordrøye større nedbør og trinn 3 skal lede ekstremnedbør i trygge flomveier. Det finnes flere løsninger i dag, men få arealeffektive løsninger som tar for seg trinn 1 og trinn 2.

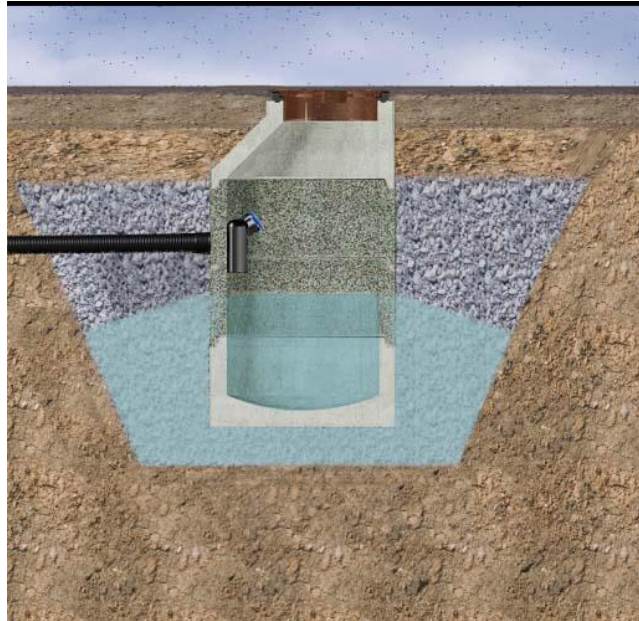


Figur 1: Prinsippskisse av tre-trinns strategien, hvor infiltrasjon er trinn 1, fordrøyning er trinn 2 og trygg bortledning er trinn 3. Hentet fra: (Statens vegvesen, 2020).

Lokal overvannsdiskonering (LOD) har stort potensiale til å begrense forurensingene og redusere vannmengdene, men det må fungere og være økonomisk hensiktsmessig. I produktutvikling er det stort potensial til å utvikle nye løsninger, men det krever at man er villig til å prøve ut og følge opp løsningene. Mer informasjon kan bidra til mer effektive og lønnsomme løsninger.

Et nytt LOD-tiltak som har kommet via produktutvikling er det permeable sandfanget, vist i Figur 2. Det er likt oppbygget som et vanlig sandfang, men med kumringer laget av permeabel betong. Tilført vann vil eksfiltrere ut gjennom kumveggen og inn i

grøfteoppbygningen. Sånn vil vannet videre kunne infiltrere i stedlige masser samtidig som det tilgjengelige porevolumet i omfyllingen fungerer som et fordrøyningsmagasin. Med stor nok kapasitet vil dette fungere som et samlet trinn 1 og trinn 2 tiltak. Deler av slam og sand holdes tilbake inne i sandfanget mens resten tilføres grøften og holdes igjen der. Siden det permeable sandfanget er nytt, er flere usikkerheter tilknyttet løsningen må belyses.



Figur 2: Permeabelt sandfang skissert i grøft. Hentet fra: (BASAL AS, u.å.-b).

Bekymringene rundt det permeable sandfanget går på funksjonen over tid. Den permeable betongen kan være utsatt for problemer i tilknytning til frost. Ekspansjonen under ising kan føre til frostsprengning og forvitring av betongen. Det stilles spørsmål om grøfteoppbygningen over tid blir utsatt for telehiv. En annen bekymring er effekten av tetting i den porøse betongen når partikler blir sittende igjen i porerommet. Ikke minst må det undersøkes hvordan den hydrauliske kapasiteten er og hvordan det kan driftes og vedlikeholdes.

Formålet med denne oppgaven er å vurdere effekten av det permeable sandfanget som trinn 1 og -2 tiltak når det kommer til flom og partikkelbundet forurensing, og gjennom eksperimentelle laboratorie- og feltforsøk vurdere (i) hvor stor grad av tetting den permeable betongen er utsatt for, (ii) hvor stor grad av gjenåpning med høytrykkspyler man kan forvente etter tetting, (iii) om den permeable betongen er utsatt for frostskaader, (iv) hvor god den hydrauliske kapasiteten er etter installasjon i grunnen og (v) om det skjer en endring i hydraulisk kapasitet et halvt år etter installasjon.

2 BAKGRUNN

2.1 TETTEFLATER SOM EN KILDE TIL FORURENSING.

Overvann fra tette flater inneholder forurensinger, men mengden endrer seg ut ifra nedbørintensitet, nedslagsfelt, oppholdstid mellom regnskyll, tid på året og gjennom årene. Avrenning fra den første delen av et regnskyll pleier å inneholde den største andelen av forurensingene, og flere artikler rapporterer om effektene av first flush (Bertrand-Krajewski et al., 1998; Masoud Kayhanian et al., 2012; Lee et al., 2004). Effekten gjelder spesielt total Kjeldahl nitrogen (TKN), Kjemisk oksygenforbruk (KOF), Løst organisk karbon (DOC), kobber (Cu), nikkel (Ni) og sink (Zn) (Masoud Kayhanian et al., 2012) og særlig i mindre nedslagsfelt. Større avløpsfelt får ofte mesteparten av forurensinger under største vannføring (Pitt et al., 2004). I kaldere strøk akkumulerer forurensingene i vegkanten over vinteren, som gir økt mengde forurensinger i smelteperioder (Moghadas et al., 2015). Ny forurensinger kommer også på dagsorden, for eksempel sees mikroplast nå på som en større utfordring enn tidligere (Horton et al., 2017).

Tabell 1 viser den totale mengden tungmetaller og organiske miljøgifter som slippes ut i Oslofjorden. Mengden kadmium (Cd), krom (Cr), kvikksølv (Hg), bly (Pb), sink (Zn), polysykliske aromatiske hydrokarboner (PAH) og polyklorerte bifenyler (PCB) fra tette flater dominerer de andre forureningskildene (Lindholm & Haraldsen, 2013). De største konsentrasjonene finner man i høyt trafikkbelastede veier og bysentre (Lindholm & Haraldsen, 2013). Overløp kan samtidig i stor grad tilknyttes fremmedvann som har opphav fra overflateavrenning.

Tabell 1: Forureningsstoffer totalt for indre Oslofjord (kg/år) kategorisert til avrenning fra tette flater, renseanlegg og overløp. Tabellen er hentet fra: (Lindholm & Haraldsen, 2013).

Parameter	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	PAH	BaP	PCB
Tette flater	19,2	706	1081	2,05	276	544	5534	20,1	1,9	2,1
Renseanlegg	7,18	152	2528	0,88	466	79,2	4033	5,8	-	0,77
Overløp	3,02	50	229	0,5	40	60,3	502	2,5	0,26	0,25
Sum	29,4	908	3838	3,43	782	684	10069	28,4	2,16	3,1

Ikke nok med at partikler fører til tilslamming og dårlige levevilkår for organismer i vassdrag, men store andeler av tungmetaller (Leikanger & Roseth, 2016), PCB og spesielt helsefarlige PAH (Jartun et al., 2008; Slezakova et al., 2013) fra vegavrenning er partikkelbundet. Tabell 2

kategoriserer partikulær forurensing tilknyttet partikkelfraksjoner i overflateavrenning fra veg. Dette viser at en partikkeltilbakeholdelse i håndtering av overvann også holder tilbake forurensinger, som vil si at sandfangene har positiv effekt på vassdrag og resipient. Tallene er hentet fra Lager et al. (1977) og det er grunn til å tro at det er variasjoner i andelen miljøgifter knyttet til partikkelfraksjonene i Norge i dag.

Tabell 2: Fraksjoner av forurensinger tilknyttet hver partikkelstørrelse i prosent av vekt, (Lager et al., 1977).

Type material	Mindre enn 0,1 mm	0,10-0,25mm	0,25-0,84mm	Større enn 0,84 mm
Partikulært materiale	15 %	28 %	25 %	32 %
BOFS	42 %	15 %	16 %	27 %
KOF	68 %	12 %	13 %	7 %
Fosfater	86 %	6 %	7 %	1 %
Nitrater	68 %	17 %	8 %	7 %
Total Kjeldahl nitrogen	38 %	20 %	20 %	22 %
Tungmetaller	29 %	23 %	15 %	33 %

2.2 SANDFANG

Sandfang er et mye brukt verktøy i overvannshåndtering. Hovedformålet til sandfang er holde tilbake partikler fra gateavrenning til overvanns- og fellessystemrør.

Partikkeltilbakeholdelsen gjøres for å unngå gjentetting og slitasje på ledningsnett og pumper.



Figur 3: Skisse av sandfang. Figuren er hentet fra: (BASAL AS, u.å.-a).

Gatesandfang består normalt av en inntaksrist eller et gatesluk, en eksentrisk kjele, kumringer og en kumbunn med innebygd utløp, vist i Figur 3. For å sikre seg en sikker drift ved implementering av sandfang burde volumet romme omtrent $0,8 \text{ m}^3$ og diameteren bør være over 1 meter (Statens vegvesen, 2018). Utløpet bør ikke dimensjoneres for mer enn 20 – 25 l/s for best mulig partikkeltilbakeholdelse (Lindholm, 2015b).

2.2.1 Partikkeltilbakeholdelse

Funksjonskrav i henhold til VA-/miljøblad nummer 79 tilsier at sandpartikler større enn 2 mm i diameter ikke skal tilføres ledningsnett (Lindholm, 2015a). Forsøk viser at sandfang kan holde tilbake 90 % av partikler større enn 0,25 mm ved dimensjonerende vannføring (Lager et al., 1977). Forsøkene viser også at tilbakeholdelsen av partikler blir liten til negativ når fyllingsgraden overgår 50 %. Det medfører at sandfang må tømmes før 50 % fylling for å opprettholde funksjonaliteten.

Normalt håndterer sandfang i Norge et areal på 0,5 – 2 ha (Mosevoll & Lindholm, 1986). Lindholm sier at over 1 ha er for stort areal og henviser til kapasiteten på 25 l/s, (Lindholm, 2015b). Kapasiteten overgås ved regn som opptrer flere ganger i året.

Tilbakeholdelsen av partikler i vanlige sandfang skjer ved sedimentering. Selve tilbakeholdelsen kan beskrives med en modifisert Stokes' lov (Formel 1) (Butler & Karunaratne, 1995; Stokes, 1851). Den forutsetter at partikler ikke vekselvirker med hverandre og en umiddelbar fullstendig omblanding av partikler i kummen.

$$\epsilon = \frac{1}{1 + \frac{72Qv}{\alpha\pi g d^2 D^2 (S_g - 1)}} \quad \text{Formel 1}$$

Denne beregner andelen tilbakeholdte partikler, ϵ (%), ved å benytte seg av volumstrømmen inn i sandfanget, Q (m^3/s), væskens kinematiske viskositet, ν (m^2/s), gravitasjonskonstanten, g (m/s^2), partikkeldiameteren, d (m^2), spesifikk tetthet, S_g , og tverrsnittarealet til kummen gitt med den indre diameteren til kummen, D (m). For å korrigere for turbulens er det benyttes en korreksjonsfaktor, α , som beskrives nærmere i neste avsnitt.

I utgangspunktet tar ikke Stokes' lov for seg de turbulente effektene som forekommer (Stokes, 1851). Derfor ble en turbulens-korreksjonsfaktor (α) innført og anbefalt til 0,6 i Formel 1 for sandfang (Butler & Karunaratne, 1995). En alternativ formulering av korreksjonsfaktoren (Formel 2) ble fremstilt på grunnlag av eksperimentelle forsøk (Bolognesi et al., 2008). Denne relaterer turbulens til partikkeldiameteren, d (mm), og benyttes i Formel 1:

$$\alpha = 0.8574 * e^{-1.7602*d} \quad \text{Formel 2}$$

I Tabell 3 er forskjellen mellom tilbakeholdelsen fra eksperimentelle forsøk fra Lager et al. (1977) sammenlignet med modifisert Stokes' lov (Formel 1) både innsatt alfa lik 0,6 og Formel 2. I beregningene er det benyttet 1000 partikkeldiameterer jevnt fordelt fra 0 mm til 2 mm og gjennomsnittet av fangeeffektiviteten er brukt for å representere hver fraksjon. Modellene ser ut til å undervurdere tilbakeholdelsen noe i forhold til forsøkene gjort av Lager.

Tabell 3: Tilbakeholdelse av partikkelfraksjoner i sandfang ved bruk av forskjellige metoder. I beregning av modellene er det brukt volumstrøm $Q = 25$ l/s og spesifikk tetthet $S_g = 2,62$.

Tilbakeholdelse i sandfang	Mindre enn 0,10 mm	0,10-0,25mm	0,25-0,84mm	0,84-2,00mm
Eksperimentelle forsøk (Lager, 1977)	0,0 %	43,0 %	90,0 %	98,0 %
Formel 1 med $\alpha = 0.6$	4,9 %	33,1 %	79,5 %	96,6 %
Formel 1 med $\alpha = 0.8574e^{-1.7602*d}$	6,1 %	33,9 %	70,3 %	78,7 %

2.2.2 Forurensinger

For å se på hvor stor betydning denne tilbakeholdelsen av partikler betyr i form av å holde tilbake forurensing, brukes sammenhengen mellom partikulære forurensningsstoffer og partikkelstørrelser som ble beskrevet i Tabell 2. Kombineres dette med Lager et al. (1977), Formel 1 innsatt α lik 0,6 eller Formel 1 innsatt Formel 2 gir det en prosentvis tilbakeholdelse av partikulære forurensningsstoffer i sandfang som vist i Tabell 4. Det er tatt utgangspunkt i største dimensjonert vannføring på 25 l/s, og lavere vannføringer vil gi en bedre tilbakeholdelse. Inspirasjon er hentet fra Lindholm som gjorde dette for tungmetaller i sin rapport (Lindholm, 2015b).

Tabell 4: Total mengde partikkelbundet forurensning tilbakeholdt i sandfang basert på Tabell 2 og Tabell 3. Volumstrømmen som er brukt er $Q=25$ l/s i både forsøk og beregninger..

Type material	Tilbakeholdelse (Lager, 1977)	Tilbakeholdelse ($\alpha = 0,6$)	Tilbakeholdelse ($\alpha = 0.8574 e^{-1.7602*d}$)
Partikulært materiale	65,9 %	60,8 %	53,2 %
BOFS	47,3 %	45,8 %	40,1 %
KOF	23,7 %	24,4 %	22,9 %
Fosfater	9,9 %	12,7 %	13,0 %
Nitrater	21,4 %	22,1 %	21,0 %
Kjeldahl nitrogen	48,2 %	45,6 %	40,5 %
Tungmetaller	55,7 %	52,8 %	46,1 %

Fra Tabell 4, ser man at tilbakeholdelsen er spesielt stor for tungmetaller og totalt partikulært materiale, som det er mye av i vegavrenning. Også rensegraden av partikulærtbundet PAH på omtrent 50% i sandfang (Åstebøl et al., 2021). Med tanke på hvor mange sandfang som er installert, er dette med på å hindre en vesentlig del av partikkelbundne miljøgifter fra å nå vassdrag og resipienter, men for at disse tallene skal gjelde må gode driftsrutiner til.

2.2.3 FDV

Med over 50% fylling i sandfanget vil tilbakeholdelsen av partikler bli liten til negativ, og derfor er tømmerutiner et billig og viktig tiltak for å bevare vassdrag og resipienter, men tømmerutiner ser ikke ut til å være gode nok mange steder i Norge. Stramme økonomiske budsjett kan være innskrenkende på driftsrutinene til sandfang. Ikke bare gjør dette at den opprinnelige funksjonen til sandfang er dårlig, men dette gjør også at partikkelbundet forurensning slippes inn i rør til resipient, vassdrag eller renseanlegg. Dette kan unngås ved å benytte seg av infiltrasjonssystemer som vil holde tilbake mesteparten av de partikulære forurensningene i grøften.

2.3 INFILTRASJON OG FORDRØYNING

Det er en begrenset nedbørmengde som må håndteres i trinn 1 tiltak for å fange opp og infiltrere 95 % av årsnedbøren, men da må det etableres egne tiltak for fordrøyning i trinn 2 (Paus, 2018).

Infiltrasjon er svært avhengig av grunnforhold og det er derfor nødvendig å undersøke permeabiliteten til grunnen nøye. På grunn av mulige variasjoner lokalt er det mest

forsvarlig å hente informasjon gjennom infiltrasjonstester. Forekomster av partikler i vannet vil føre til minkende permeabilitet over tid ettersom disse blir holdt igjen og tetter porene i infiltrasjonsmassene. Dette er spesielt viktig å være klar over i infiltrasjonssystemer som ligger nedgravd, fordi det vil være en stor kostnad å grave det opp.

Ifølge VA-miljøblad nr. 92, burde det være én meter i høydeforskjell fra grunnvannsspeilet til toppen av infiltrasjonsmassene både for rensegrad og hydraulisk kapasitet (Solheim & Friberg, 2019). Ettersom infiltrasjon har vært et lite brukt verktøy i overvannshåndtering, så har det ført til et minkende grunnvannsspeil og setningsproblemer i byer med mange tette flater.

Lukkede infiltrasjonsmagasiner krever en begrenset overflate og synes ikke, men ulempen med å ha lukkede systemer er at det ikke er noe bidrag fra fordamping. Det permeable sandfanget benytter omfyllingsmassene som et lukket steinmagasin ved at vann strømmer gjennom den permeable kumveggen og inn i omfyllingsmassene. Fordrøyning og infiltrasjon i lukkede steinmagasiner utnytter porevolumet mellom steinmassene til magasinering og infiltrasjon skjer i grunnen. På grunn av fare for gjentetting av magasinet og stedlige masser må det benyttes et forbehandlingstrinn for å fjerne større partikler i forkant av magasinet (Åstebøl & Hvitved-Jacobsen, 2014).

Erfaring med lukkede infiltrasjonsmagasiner har vist renses effekter på opptil 100 % suspendert stoff, 60-70 % totalt fosfor, 50-70 % total nitrogen, 95-99 % tungmetaller, 90-95 % organisk stoff og opptil 100% mikroorganismer, med forutsetning om at all avrenning infiltreres og gode sorpsjons- og nedbrytningsegenskaper i stedlige masser (Åstebøl & Hvitved-Jacobsen, 2014). Det er en fare for gjentetting overtid av finstoff ført inn via stedlige masser, som forhindres ved bruken av fiberduk (Lindholm et al., 2008). Videre er det beskrevet hva permeabel betong er og hvordan det er benyttet til overvannshåndtering i andre land.

2.4 PERMEABEL BETONG

Permeabel betong lages ved å fjerne finstoffet i betongblandingen. På den måten dannes det porerom mellom aggregatene som kan nyttes til vanngjennomstrømning. Porøsiteten går på bekostning av styrken hvor strekkfastheten er mer sensitiv enn trykkfastheten (Chen et al., 2013). Mengde sement som brukes i resepten må være tilstrekkelig lav til at den ikke tetter

porene i de lavere sjiktene i betongen under produksjon og tilstrekkelig høy til å beholde styrken. Denne oppgaven har ikke som formål å forklare styrken på det permeable sandfanget, men det er verdt å nevne de vurderingene som må gjøres satt opp mot permeabilitet.

Resepten brukt i de permeable sandfangene er en avveining gjort på grunnlag av styrke, permeabilitet og frostsikkerhet, og siden den permeable kumringen slipper vann gjennom veggen, er det brukt korrosjonsbestandig materiale som armering. Dette kan enten være glassfiber eller basalt. I Danmark er det gjort studier på denne typen løsning som går på design (Lund et al., 2018). Det er derimot lite informasjon på funksjon, så det må hentes fra liknende løsninger.

2.4.1 Permeable betongrør i Belgia

Porøse betongrør blir benyttet i Belgia og siden det ikke er noen EU-standard, er det en teknisk forskrift, PTV104, som blir henvist til ved installasjon (PTV 104, 2011). Undersøkelser gjort i Belgia på porøse betongrør viser at 50 % av infiltrasjonskapasiteten går tapt under normale forhold, men at permeabiliteten kan gjenvinnes til 95 % ved rengjøring (Bollen & Peeters). Rengjøring gjøres ved å bruke et rensesystem med høyt trykk som skaper undertrykk bak dysene sånn at porene tømmes. I en masteroppgave fra Belgia står det at «rengjøring av rørene kan gjenvinne infiltrasjonskapasiteten, men det har ikke vært nødvendig å ta i bruk, selv ikke 10 år etter installasjon.» (Hendrix & Wathion, 2016).

2.4.2 Permeable flater av permeabel betong

Permeabel betong brukes som erstatning for tette flater og det har vært en stor økning av vitenskapelige artikler på temaet de siste årene. Det har i senere år kommet gode løsninger som har lenger varighet. Ødegård viser til at «erfaringer viser at porøs asfalt kan fungere uten problem i opptil 15-20 år» (Ødegaard, 2014).

Forfatteren bekjent er Darcys' lov (Darcy, 1856) benyttet for å beskrive strømning gjennom permeabel betong, men det er gjerne for permeable flater uten trykkehøyde (Huang et al., 2021). Det er på grunnlag av dette at det gjøres en vurdering av om dette stemmer for det permeable sandfanget senere i oppgaven. Ibrahim et al. (2014) gjorde forsøk på 24 forskjellige typer permeabel betong og fant en gjennomsnittlig porøsitet på 37 %, hydraulisk

konduktivitet på 0.021 m/s og lite variasjon (Ibrahim et al., 2014). Samtidig gir større partikler brukt i betongblandingen større permeabilitet (Joshaghani et al., 2015).

Forsøk gjort på permeabel betong viser at større partikler fører til mer gjentetting (Huang et al., 2021). Denne gjentettingen foregår ofte i de øvre lagene (M. Kayhanian et al., 2012). Samtidig kan de mindre partiklene trenge lenger inn i porene og skape mer gjentetting over tid (Kia et al., 2017). Det er også flere som relaterer gjentetting av permeable flater til bruken av fiberduk (Boving et al., 2008; Yong et al., 2008). Boving (2008) mente at en mer permeabel fiberduk kan redusere eller eliminere dette problemet.

Fryse-tine forsøk på permeabel betong er både gjort mens betongen er nedsunket i vann og mens betongen er delvis vannmettet. Yan & Jing (2003) gjorde forsøk hvor den porøse betongen fikk drenere i -10 °C i 5 timer, for deretter å tine i vann på 10-30 °C (Yang & Jiang, 2003). Etter 25 runder ble styrken målt til å være 15-23 % mindre enn ved ny betong. Forsøk gjort ved fryse-tine sykluser med permeabel betong nedsunket i vann, viser at dette ødelegger den porøse betongen (Chen et al., 2013).

2.5 PERMEABELT SANDFANG

Et permeabelt sandfang DN1000 kan bygges med en tett kumbunn, to permeable kumringer og en eksentrisk kjegle med ristinntak. Kumbunnen og ringene har en høyde på 0,5 m hver. I tilfelle ekstremnedbør eller gjentetting av kummen kan det installeres et overløp til overvannsledning. Grøften bør fylles pukk som fundament, og omfyllingsmassene burde være av steinmasser med kornstørrelser så store at den hydrauliske kapasiteten er større eller lik den hydrauliske kapasiteten til det permeable sandfanget.

2.5.1 Mekanismer for tilbakeholdelse av partikler

Partikkeltilbakeholdelse i permeable sandfang er viktig for drift- og vedlikeholdsrutiner, levetid og miljøhensyn. Her skilles det mellom partikkeltilbakeholdelse i kumbunnen og partikkeltilbakeholdelse i stedlige masser. Partikkeltilbakeholdelse i kumbunnen er partiklene som fyller innsiden av det permeable sandfanget, og partikkeltilbakeholdelse i stedlige masser er partiklene som holdes tilbake når vannet infiltrerer i grunnen.

I det permeable sandfanget vil det være to mekanismer for tilbakeholdelse av partikler. Det ene er sedimentering av partikler på samme måte som i et vanlig sandfang. Det andre er

filteregenskapene til den permeable betongen. Hvis en stor andel partikler føres gjennom den permeable kumveggen kan dette føre til en oppfylling av finstoff i grøften, telehivproblemer og en reduksjon av hydraulisk kapasitet i stedlige masser. Når infiltrasjonskapasiteten til de stedlige massene er oppbrukt, så vil dette føre til en økt magasinering av overvann i grøften.

Partikkeltilbakeholdelse gjennom sedimentering likner på det som skjer i vanlige sandfang. Hvis det antas at det er en umiddelbar fullstendig omblanding i kummen kan modifisert Stokes' lov (Formel 1) for sandfang også være gjeldene for permeable sandfang. Permeable sandfang har et stort utstrømningsareal og hastigheten til vannstrømningen er derfor lavere. Dette kan føre til at forholdene ikke er like turbulente inne i kummen, men det fører også til at partiklene har et større areal de kan treffe. Permeable sandfang vil også være mer utsatt for oppvirvling og resuspensjon på grunn av det lave vannspeilet i kummen i starten av en nedbørsperiode.

Filteregenskaper til permeabel betong er avhengig av den effektive porestørrelsen. Den effektive porestørrelsen er igjen avhengig av kornstørrelser, mengde sement og type stein som brukes i betongblandingen. Betongblandingen kan styres, men plasseringen av partikler i forhold til hverandre kan være svært varierende per areal med permeabel betong. Det er avgjørende at mest mulig partikler holdes igjen i sandfanget for å få best effekt av infiltrasjon i grunnen og fordrøyningsmagasin i steinmassene, men her er det også fare for gjentetting som undersøkes med eksperimentelle forsøk i denne oppgaven.

2.5.2 Fallende hydraulisk kapasitet under drift

Permeable flater gir problemer med at den hydrauliske kapasiteten minker over tid som vist i kapittel 2.4.2. Fallende hydraulisk kapasitet kommer av gjentetting og at gjenåpningen av porerommet ikke vil være fullstendig.

Gitt at modifisert Stokes' lov (Formel 1) gjelder for permeabelt sandfang kan det antas en størrelsesfordeling på partikler som finner veien til det permeable arealet, se Tabell 3 på side 6. Det fører til at det nesten bare er partikler med en mindre diameter enn 0.84 mm som vil kunne strømme inn i den permeable betongen, og det er derfor benyttet kornstørrelser mindre enn dette i gjentettingsforsøk senere i oppgaven. Om partiklene ikke holdes tilbake

på innsiden av kumveggen eller går gjennom kumveggen, vil partiklene feste seg og tette den permeable betongen.

Antakelig vil gjentetting skje over tid, men hvilke partikkelfraksjoner, hvor mange partikler som må til og hvor lang tid det tar å tette er spørsmål når det kommer til drift og vedlikehold av det permeable sandfanget. Gjentettingen kan gi et positivt bidrag for å beholde en vannpute over de allerede sedimenterte partiklene, som er gunstig for å unngå resuspensjon. Men, det vil også føre til tap i hydraulisk kapasitet, noe de som drifter sandfanget må ta hånd om.

2.5.3 Drift av permeable sandfang

Som et vanlig sandfang kreves det at det permeable sandfanget tømmes for slam med jevne mellomrom. I tillegg kreves det en gjenåpning av den permeable delen, hvis det har skjedd en gjentetting. I tilfelle hvor gjentetting skjer i takt med oppfylling av partikler kan det føre til at permeable sandfang har et lenger tømmeintervall. Om det er en rask gjentetting av den permeable delen må gjenåpning av denne delen skje ofte. Gjenåpning er en viktig del av driften og det lages derfor et estimat på gjentettingstid seinere i denne oppgaven.

Slamsugebilen burde være utstyrt med høytrykkspylers. Den kan være nødvendig å bruke til å gjenåpne en tett permeabel kumvegg. Hvor god den hydrauliske kapasiteten vil være på en gjenåpnet permeabel vegg er ikke testet, men studier gjort på permeabel betong på flater tyder på at den hydrauliske kapasiteten vil være noe dårligere enn ved nyetablert permeabel betong. Dette undersøkes videre med eksperimentelle forsøk.

2.5.4 Frost

Frostskader på permeabel betong på flater knyttes ofte opp mot telehiv. Chen et al. (2013) gjorde studier på frost i permeabel betong. I forsøket ble permeabel betong nedsunket i vann før fryst/tin syklene, som viste at mindre kornstørrelsene og mindre porøsitet gir best motstand mot frostskader. Permeabel betong i sandfang skal ikke stå i vann, men spørsmålet er om frostskader også skjer mens det dreneres. Denne oppgaven vil belyse dette og andre usikkerheter gjennom forsøk beskrevet i neste kapittel.

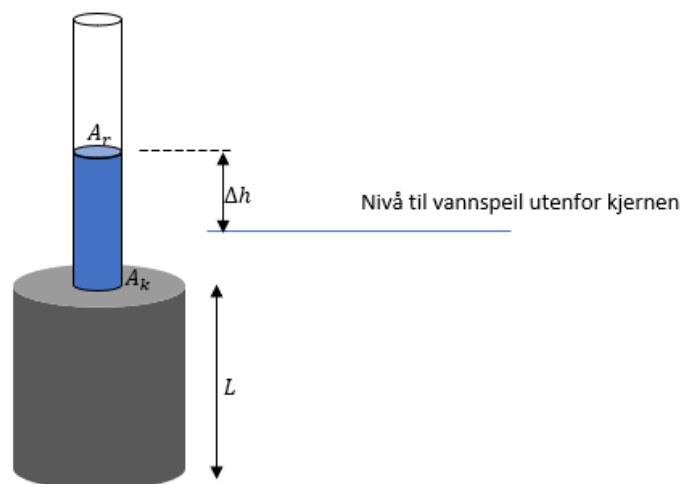
3 METODE

I denne oppgaven er det blitt gjort forsøk for å tette kunnskapshullene forbundet med permeabel betong i sandfang. Dette innebærer forsøk på hydraulisk kapasitet, gjentetting, gjenåpning og betydningen av frost.

3.1 HYDRAULISK MODELL FOR PERMEABBLE SANDFANG

Det er gjort en vurdering av strømmingen gjennom den porøse betongen. Det er tre modeller som er vurdert: (i) Darcy-strømning gjennom porøst medium (Darcy, 1856), (ii) Torricelli-strømningen gjennom porøst medium (Torricelli, 1644) og (iii) Forchheimer-strømning (Forchheimer, 1901) som ofte beskrives som en ikke-Darcy strømning og som i grunn er en mellomting av Darcy- og Torricellistrømning. Det dominerende strømningsbilde vil kunne bekrefte om sammenhengen mellom viskøse tap og volumstrøm er lineær (Darcy), kvadratisk (Torricelli) eller noe imellom (Forchheimer).

Modellene er vurdert forbindelse med forsøk på en testrigg og laboratorieforsøk. I laboratorieforsøk på borekjerne er det gjort stasjonære forsøk, mens på testrigg er det gjort ikke-stasjonære forsøk på en permeabel kumring. Høydemåleren som er brukt på forsøk på testrigg har en tidsopløsning på 0.1s med en presisjon på 1-3 % med påvirkning av temperatur (PEPPERL+FUCHS, 2021). Det er brukt tommestokk til å måle forskjellen mellom vannspeilene i laboratorieforsøk.



Figur 4: Illustrasjon av laboratorieoppsett. Indeks r er for rør og indeks k er for borekjerne. A er tverrsnittarealet, L er lengden av kjernen og Δh er høyden mellom vannspeilene.

I formlene for laboratorieforsøk er det én trykkforskjell over den permeable betongen, en nærmere forklaring og utledning av formlene er gitt i Vedlegg 2.

Torricelli-strømning for laboratorieforsøk:

$$\Delta h = L \left(\frac{Q}{kA_k} \right)^2 \quad \text{Formel 3}$$

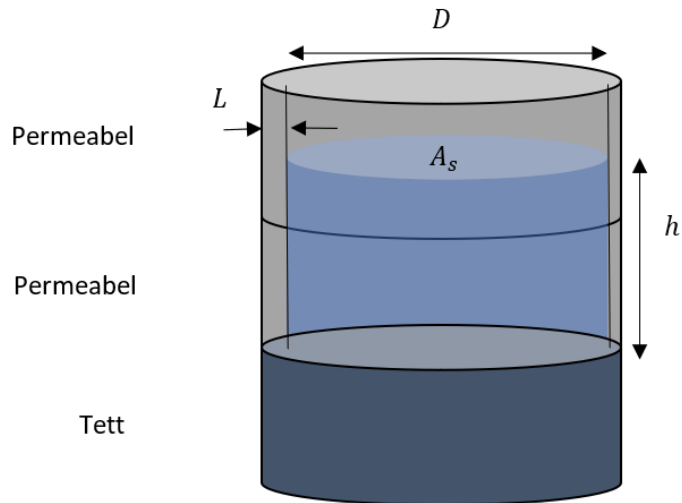
Darcy-strømning for laboratorieforsøk:

$$\Delta h = L \frac{Q}{KA_k} \quad \text{Formel 4}$$

Forchheimer-strømning for laboratorieforsøk:

$$\Delta h = L \frac{Q}{KA_k} + L \left(\frac{Q}{kA_k} \right)^2 \quad \text{Formel 5}$$

I laboratorieforsøk er borekjernen dykket, og i formlene over er høydeforskjellen på vannspeilet fra kar til rør, Δh (m), uttrykt med volumstrøm, Q (m^3/s), for alle modellene i tilknytning til laboratorieforsøk. Lengden, L (m), og tverrsnittarealet, A_k (m^2), til den porøse betongen er de samme i alle modellene. Proporsjonalitetskonstanten, k (m/s), beskriver avløpskoeffisient og porøsitet i Torricelli-strømning og Forchheimer-strømning, og den hydrauliske konduktiviteten, K (m/s), benyttes i Darcy-strømning og Forchheimer-strømning.



Figur 5: Illustrasjon av feltoppsett. Hvor A_s er tverrsnitts arealet, h er høyden til vannspeilet, D er indre diameter til kummen og L er tykkelsen på godset.

I formlene for *in situ*-forsøk varierer trykkforskjellen med høyden til vannspeilet og formlene forutsetter fri strømning ut av kumveggen, en nærmere forklaring og utledning av formlene er gitt i Vedlegg 2.

Torricelli-strømning for *in situ*-forsøk:

$$Q_{ut}(h) = \frac{2\pi D k h^{\frac{3}{2}}}{3\sqrt{L}} \quad \text{Formel 6}$$

Darcy-strømning for *in situ*-forsøk:

$$Q_{ut}(h) = \frac{\pi D K h^2}{2L} \quad \text{Formel 7}$$

Over er volumstrøm gjennom kumveggen, Q_{ut} (m^3/s), uttrykt med høyden på vannspeilet, h (m), for Torricelli- og Darcy-strømning til in-situ forsøk. Tykkelsen på godset, L (m), og den indre diameteren til kummen, D (m), er det samme i begge modellene.

Proporsjonalitetskonstanten, k (m/s), beskriver avløpskoeffisient og porøsitet i Torricelli-strømning, og den hydrauliske konduktiviteten, K (m/s), benyttes i Darcy-strømning.

3.2 FORSØK PÅ PERMEABLE SANDFANG *IN SITU*

Formålet med forsøkene er å måle samtidige verdier for volumstrømmen (Q) og høyden på vannspeilet (h), se Figur 5, som gir informasjon om den hydrauliske kapasiteten til de permeable sandfangene. Forsøkene er gjort på to permeable sandfang og begge er blitt testet to ganger med et halvt års mellomrom. Det første forsøket ble gjort på høsten den 26. oktober 2021 og det andre ble gjort på våren 31. mars 2022. Sandfang nr. 1 har direkte avrenning fra kantstein og er derfor potensielt utsatt for større konsentrasjoner av partikler og finstoff. Grøften er i kontakt med vegbygningen, altså sprengstein, som gjør at magasinering også kan foregå der. Avrenningsarealet til sandfanget er 400 m^2 med asfalt. Sandfang nr. 2 har avrenning fra infiltrasjonsgrøft og fungerer som overløp/sikring ved kraftige regnhendelser. Avrenningsarealet til dette sandfanget er 450 m^2 , hvor 70 m^2 er infiltrasjonsgrøft og resten er asfalt. Omfyllingen er av kult (22-120 mm) i begge tilfeller.

Det er forventet at forsøkene kan svare på: (i) Om eksfiltrasjonskapasiteten opprettholdes med omfyllingsmassene som er brukt, (ii) hvor god den hydrauliske kapasiteten er sammenholdt med IVF-statistikk og (iii) om det er endringer i hydraulisk kapasitet etter et halvt år i drift.

Anlegget hvor sandfangene befinner seg ligger utenfor Hønefoss på FV241 mellom Eggemoen og Ollum, hvor det er etablert et strekk med permeable sandfang.

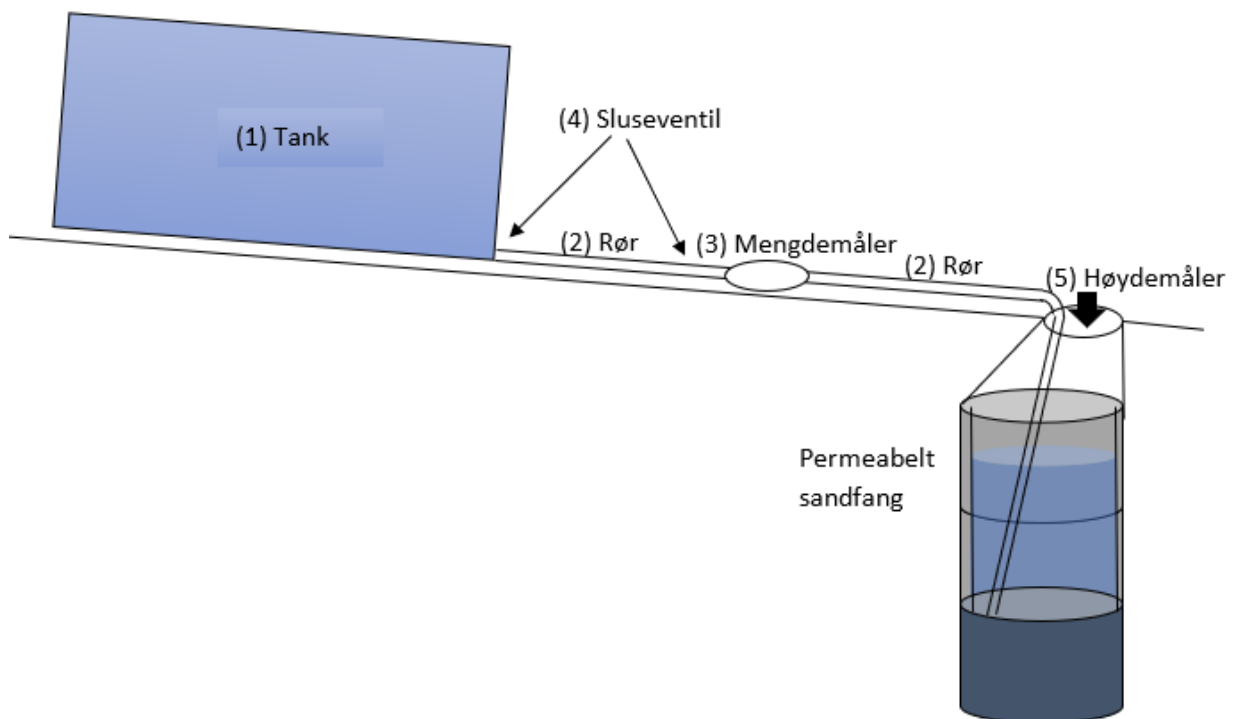
Forsøksoppsettet for sandfang nr. 1 er vist i Figur 6.



Figur 6: Bilde av testoppsett i felt av Jon Aril Holte, 26. oktober 2021.

3.2.1 Oppsett og utførelse

Vist i Figur 7 er oppsettet for forsøkene med nummerert utstyr. Det er forsøkt å få mest mulig tilstrømming av vann til sandfanget og det er derfor brukt en tank (1) som rommer 12 m³ vann til påfylling. Den er satt på det høyeste punktet rundt kummen for å få størst mulig energihøyde. Rør (2) med indre diameter på 10 cm føres 4 m gjennom mengdemåler (3) og videre 4 m ned i til bunnen av kummen for å holde vannspeilet i ro. For å ha kontroll på påslippet er det sluseventiler (4) for åpning og stenging av strømmingen. Mengden vann som slippes inn er gitt av mengdemåler med maksimum målusikkerhet på 0,5 % som viser volumstrømmen via et display og et videokamera er brukt til å filme dette under forsøket for å kunne hente data (KROHNE, 2018). Vannstanden i kummen påvirkes av mengden vann som slippes på og må måles. Til det er det høydemåler (5) av typen ultralyd som plasseres i mannhullet på kummen, og som måler høyden med en tidsoppløsning på 10s og med en presisjon på 0,2% (IJINUS, 2019). Etter forsøket hentes høydedata og synkroniseres med volumstrømmmålingene fra videokameraet.



Figur 7: Illustrasjonen viser testoppsettet i anlegg med (1) stor tank med vann, (2) rør til påslipp av vann til det permeable sandfanget, (3) mengdemåler, (4) sluseventiler til å starte og stoppe påslippet og (5) høydemåler som måler vannstandshøyden inne i sandfanget. Testene utføres ved at slusene åpnes og vannet strømmer ned i kummen, mens både vannmengden og høyde på vannspeilet i kummen måles.

Det er brukt samme fremgangsmåte i alle forsøkene, hvor det først sørges for at videokamera og høydemåler er påskrudd og at data hentes. Deretter åpnes slusene og vannet fra tanken begynner å strømme inn i sandfanget. Slusen stenges igjen enten når vannstandshøyden er på toppen av sandfangets permeable del, eller når høyden har vært stabil en stund. Deretter måles vannspeilhøyden mens vannstanden synker. Testen avsluttes, data hentes fra logger og lagres på et sikkert sted. I databehandlingen synkroniseres målte data, og volumstrømmen ut av sandfanget beregnes ved å subtrahere volumendringen gitt ved høydeendringen fra volumstrømmen inn i kummen, på denne måten:

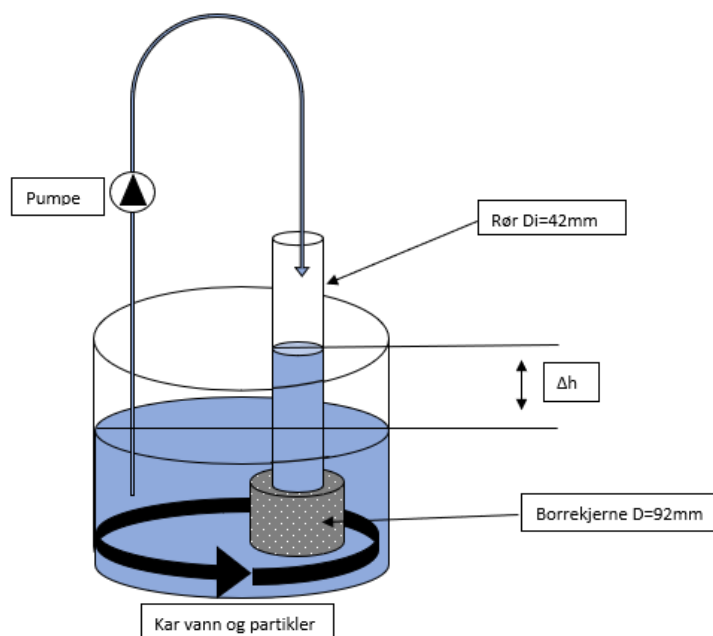
$$Q_{ut}(t) = \frac{Q_{inn}(t) + Q_{inn}(t - \Delta t)}{2} - \frac{A_s(\Delta h)}{\Delta t} \quad \text{Formel 8}$$

, der Q_{ut} er volumstrømmen ut av det permeable sandfanget, Q_{inn} er volumstrømmen som blir tilført sandfanget, A_s er tverrsnittarealet til sandfanget, Δh er endringen i vannstandshøyden fra forrige måling til inneværende måling, Δt er tiden mellom hver måling og t er tiden for inneværende måling.

3.3 LABORATORIEFORSØK PÅ BOREKJERNER

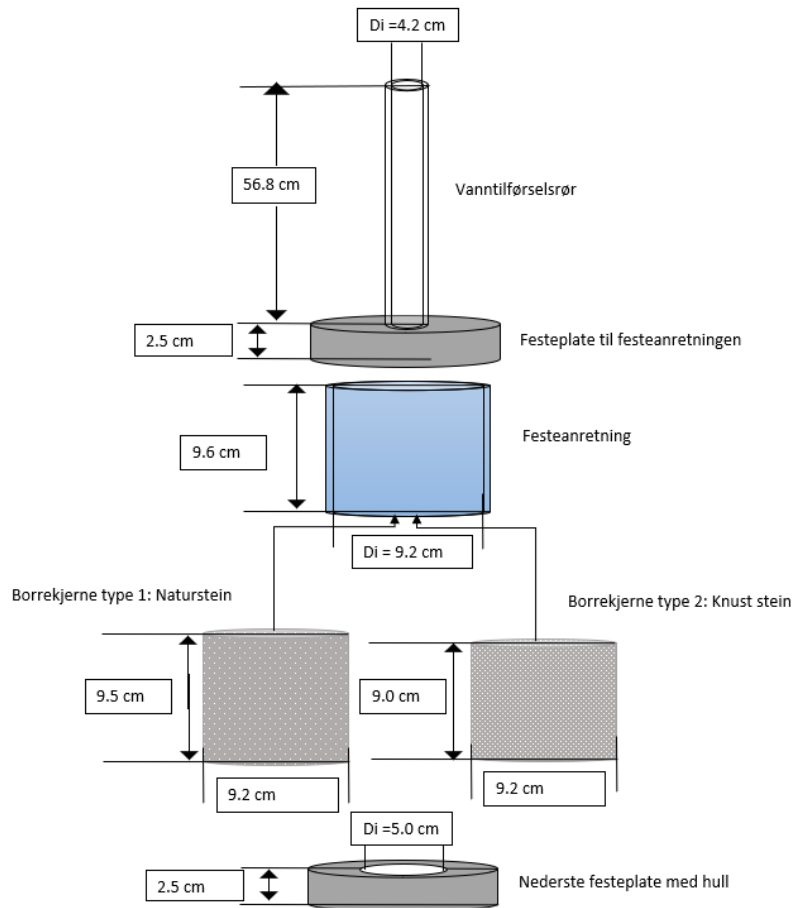
Hensikten med laboratorieforsøk er å kunne gjøre kontrollerte forsøk med tetting og gjenåpning av permeabel betong ved å se på endringer i hydraulisk kapasitet ved tilførsel av partikkelholdig vann. Den permeable betongen i disse forsøkene er hentet ut av kumveggen til permeable kumringer ved å bore et hull og hente ut kjernen som sitter igjen i boret, derav borekjerner. Og de er hentet fra to typer permeable kumring, hvor det er brukt naturstein i de tre første borekjernene og knust stein i de siste seks.

Figur 8 illustrerer testoppsettet av forsøket, hvor tilførselsrøret og borekjernen i festeanretning er plassert nedsenket i et kar med vann og partikler. Pumpen fører en gitt volumstrøm til tilførselsrøret, sånn at høydeforskjellen mellom vannspeilene holdes konstant. Gjennomføring av forsøk gjøres uten partikler med ny kjerne to ganger for å kartlegge om testoppsettet legger til rette for at samme forsøk kan gjentas uten endringer i resultatet. Målingene kartlegger den hydrauliske kapasiteten en ny kjerne har mot det en tett og gjenåpnet kjerne har. Sammenliknet med testresultater fra tett og gjenåpnet kjerne kan man se prosentvis hvor godt kjernen kan gjenåpnes etter tetting. Forsøket deles opp i 3 deler og gjøres for hver av 9 kjerner.



Figur 8: Illustrasjon av testoppsettet i lab som viser kjernen i festeanretningen plassert i et kar med vann og partikler som er satt i bevegelse. Dette gjør at konsentrasjonen av partikler skal være homogen, også pumpes dette videre til tilførselsrøret og gjennom kjernen. Høydeforskjellen Δh ved en kjent volumstrøm fra pumpen brukes videre til å vurdere kapasiteten til kjernen etter hvert som den tettes.

Figur 9 viser dimensjonene på festeanretning, plastrør og borekjerne. Det er hull tilsvarende indre diameter på plastrøret både i øvre og nedre del av festeanretning. Borekjerne plasseres i festeanretning med siden tilsvarende innsiden av kumringen vendende opp mot tilførselsrøret. Festeplatene skrues deretter på hver side, og pakninger er installert sånn at man unngår kortslutningsstrømmer.



Figur 9: Festeanretning til borekjerne og de to typer kjerne som er testet med mål. Vanntilførselsrøret er av transparent plast og høydeforskjellen mellom vannspeilene under forsøket kan observeres. Borekjerne type 1 er av naturstein og borekjerne type 2 er av knust stein, og disse plasseres inne i festeanretningen før festeplatene settes på. Festeanretningen av stål skrues sammen med festeplatene av hardplast med gummipakning som holder vannet inne i anretning.

3.3.1 Oppsett og utførelse

I del 1 av forsøket skal testoppsettet kartlegges, og den hydrauliske kapasiteten til ny kjerne skal bli funnet ved å sende vann gjennom kjernen. Kartleggingen går ut på å se om forsøksoppsettet gir samme resultat for en kjerne gjennom to like forsøk, men hvor kjernen er tatt ut av vannet og drenert mellom forsøkene.

Generelt for å finne den hydrauliske kapasiteten sendes vann gjennom kjernen, da må karet fylles med 40 liter vann og kjernen plasseres i vannet. For at luften i porene ikke skal bremse

vanngjennomstrømningen, roteres og vendes kjernen sånn at luften får fri vei ut. Dette gjøres hver gang kjernen har vært ute av vannet. Kjernen dyttes deretter inn i festeanretningen og festeplatene skrues på under vann. For at strømningsretningen skal tilsvare sandfanget må innoverkrumningen på ene siden av kjernen stå vendt oppover mot tilførselsrøret. Når kjernen er inne i festeanretningen plasseres den på et gitter 5 cm over bunnen av karet, da vil strømningen ha fri veg ut av kjernen. Høydeforskjellen mellom vannspeilene måles ved å teipe en tommestokk til vanntilførselsrør, og målingen starter fra vannspeilhøyden i karet. Pumpen tilfører så vann fra karet til vanntilførselsrør med volumstrømmer på 1 – 12 l/min med intervaller på 0,5 l/min. Vannspeilet må stabilisere seg i 2 minutter for hver volumstrøm før høyden noteres.

I del 2 av forsøket skal kjernene bli forsøkt tettet gjennom to runder på 10 minutter hver med tilførsel av partikkelholdig vann. Partikkelsuspensjonen ble forberedt ved å blande inn 0.4 kg sandpartikler med diameter på 0,25 – 0,8 mm i karet med 40 l vann. For å få en homogen konsentrasjon av partikler i karet holdes de suspendert ved hjelp en malingsblander tilkoblet en drill. Hver runde tilføres en volumstrøm på 4,1 l/min fra karet til vanntilførselsrøret gjennom pumpen, som skalert opp likner volumstrømmen i et sandfang. Etter hver runde legger det seg et sandlag på toppen av kjernen fordi strømningen står vertikalt på kjernen, og som helles av før hver nye runde ved at festeplatene skrues av og kjernen tiltes 90° under vann (det samme gjøres om vannspeilet overgår høyden til tilførselsrøret underveis i forsøket). Endringen i kapasitet på grunn av tetting finner man ved å gjøre hydrauliske forsøk etter hver runde som i del 1, uten partikler i vannet. For å finne massen av sanden som har festet seg i kjernen og ført til tetting, så hentes sanden ut fra karet mellom hver runde. Sanden tørkes i varmeskap over nattet og veies på en vekt etterpå. Deretter brukes massebalansen, altså vekten til sanden som ble tilført karet og vekten på sanden som ble hentet ut av karet, til å beregne hvor mye sand som sitter igjen i kjernen.

Del 3 går ut på å gjenåpne borekjernen med høytrykkspyler. Borekjernen spyles fra siden som har en krumning innover i kjernen, som er tilsvarende strømningsretningen i forsøkene. Dette er siden som ligger inne i sandfang og er eneste tilgjengelige spyleside. Kjernen spyles med høytrykkspyler i 2 minutter og spylespissen plasseres 5 cm fra spylesiden. Maksimalt trykk på 145 bar er brukt på alle kjernene. For å se hvor godt kjernen er gjenåpnet, etterfølges gjenåpningen av et hydraulisk forsøk som i del 1, uten partikler.

3.4 FROSTFORSØK

Det permeable sandfanget kan være utsatt for frost og det er en bekymring om den porøse betongen tåler ising. I frostforsøkene får den porøse betongen drenere mens det fryser på og dette er det scenarioet som mest sannsynlig vil skje i en reell situasjon. Grunnen til det er at infiltrasjonssystemer er anbefalt å ha en lengde på 1 meter ned til grunnvannsspeilet, som presentert i kapittel 2.3, som gjør at det permeable sandfanget ikke skal stå nedsunket i vann. Derfor er en tett kumbunn og en permeabel kumring satt ute over vinteren som vist i Figur 10. Med jevne mellomrom fylles kummen med vann, og man kan forvente sprekker eller et lavere vannspeil under påfylling hvis frost har hatt effekt på den porøse betongen.



Figur 10: Bilde av permeabel kumring satt ut for frostforsøk på NMBU. Tatt av Eirik S. Bråten 20.01.2022.

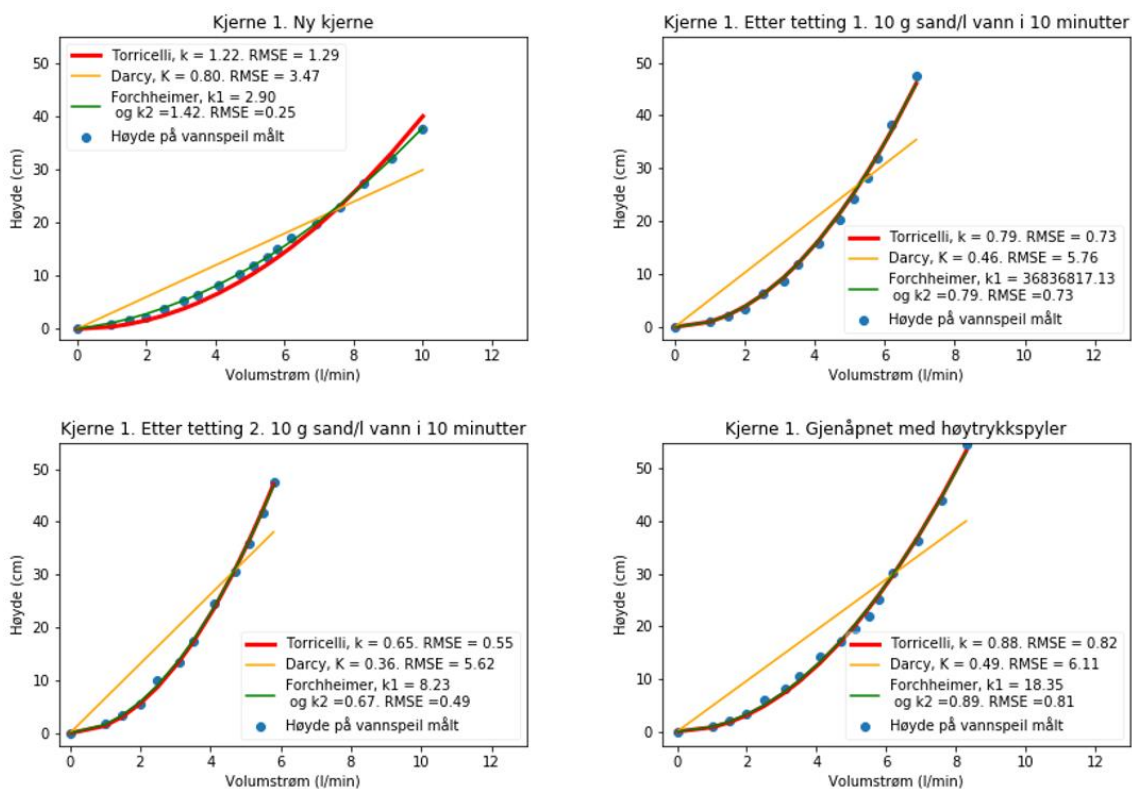
Forsøkene utføres i en periode fra 2. februar 2022 til 15. mars 2022 på NMBU. For at ising skal skje må påfylling av vann foregå på dager hvor temperaturen holder seg under 0 °C. Påfyllingen utføres ved å bruke en hageslange tilkople et vannuttak, som gir en volumstrøm på 21 l/min, og la utløpet ligge i kumringen i 5 minutter. Under påfyllingen måles høyden på vannstanden og bilder tas av kumringen for å se etter sprekke-dannelser.

4 RESULTATER

4.1 TILPASNING AV HYDRAULISK MODELL

De målte dataene er brukt til å tilpasse de matematiske modellene for å se hvilken av disse som gir best tilnærming til en reell situasjon. Først er modellene kalibrert for laboratorieforsøk på borekjerne, og deretter på en permeabel kumring på testrigg. Høydedata og volumstrømmen ut er målte verdier og k - og K -verdiene tilpasses i modellene. Modellene er kalibrert i Python, hvor det er brukt minste kvadraters metode til tilpasning.

Grafene i Figur 11 viser hvordan modellene tilpasser seg i forsøkene gjort på den første borekjernen. I figurene er det benyttet k_1 som K og k_2 som k i Forchheimer-uttrykket (Formel 5). Man kan også se hvordan tilpasningen blir ettersom kjernen tettes og gjenåpnes. Darcy-formelen gir dårligst tilpasning i alle grafene, mens Torricelli-formel og Forchheimer-formel ligger relativt likt med målingene. Alle kjernene viste samme tendenser, altså at Forchheimer gir best tilnærming. Alle tilpasningsgrafene ligger i Vedlegg 1, del 1.

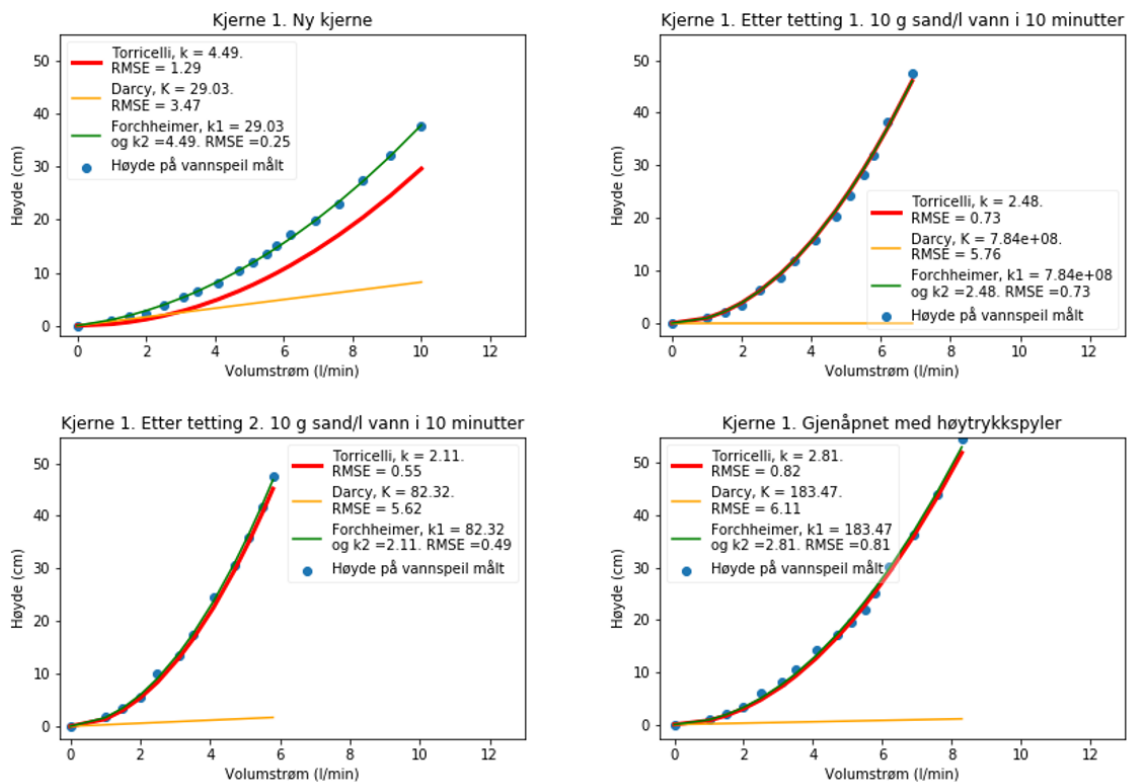


Figur 11: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 1, og viser målte høyder (blå), Torricelli uttrykt med k (rød), Darcy uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Forchheimer og Torricelli gir best tilnærming til målte verdier.

Tabell 5: Tabellen viser det gjennomsnittlige avviket (RMSE) for tilpasning av modellene til alle forsøkene som er gjort på kjernene. Tallene er hentet i tilknytning til de hydrauliske forsøkene, hvor Torricelli er forkortet til T, Darcy til D og Forchheimer til F. Avvikene er minst for Forchheimer og Torricelli og høyest for Darcy i alle tilfeller.

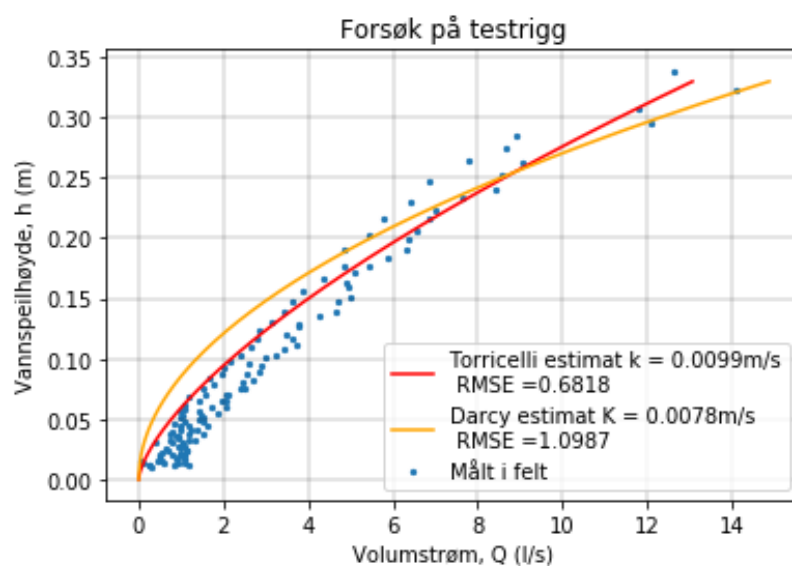
Kjerne	RMSE											
	Ny kjerne			Gjentetting 1			Gjentetting 2			Åpnet		
	T	D	F	T	D	F	T	D	F	T	D	F
Gjennomsnittlig avvik	1,39	3,25	0,29	0,84	5,29	0,70	1,03	5,25	0,80	0,69	5,33	0,55

Tabell 5, viser det gjennomsnittlige avviket for hver modell i forsøkene som ble gjennomført, hvor hele tabellen finnes i vedlegg 1, del 1. Forchheimer (Formel 5, $\Delta h = L Q / (K A_k) + L(Q/k A_k)^2$) gir et bedre estimat i alle tilfeller, som er naturlig, da det er hybridløsning som tar for seg både Darcy- (Formel 4, $\Delta h = L Q / (K A_k)$) og Torricellistrømning (Formel 3, $\Delta h = L(Q/(k A_k))^2$), og er derfor lettere å tilpasse. Videre gir Torricelli et bedre estimat enn Darcy i alle tilfeller. For å vurdere tilpasningen ser vi på leddene i Forchheimer-formelen.



Figur 12: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for forsøk på kjerne nr. 1. Her er målte høyder (blå), Torricelli-leddet uttrykt med k (rød), Darcy-leddet uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k1 som tilsvarer K og k2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Torricelli-bidraget er størst.

For å kunne utnytte de hydrauliske modellene til å se på tetting og åpning er det fordelaktig at det kun er en k-verdi å forholde seg til, og det sees derfor på hvor stort de relative bidragene er i Forchheimer-uttrykket. Det relative bidraget fra Darcy-leddet og Torricelli-leddet i Forchheimer-uttrykket er plottet for kjerne nummer 1 i Figur 12, og de resterende plottene ligger i vedlegg 1 del 2. Det samme gjentar seg for samtlige av kjernene. Bidraget fra Darcy er lavt og minker når den porøse betongen tetner. Bidraget fra Darcy kan gi gode estimater ved lave volumstrømmer, mens Torricelli er dominerende når volumstrømmen øker. Det betyr at Torricelli kan utnyttes videre i laboratorie-forsøk, og videre ser vi om den også kan beskrive kapasiteten til hele permeable sandfang.



Figur 13: Hydrauliske forsøk gjort på testrigg i Rygge. Her er tre synkeforsøk gjort på samme permeable kumring, hvor målte verdier er vist i blå og tilpassningene er vist med Torricelli i rødt og Darcy i gul. Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Torricelli gir best tilpassning til målte data.

Toricelli-strømning har god tilpassning på kjernene, men det er gjort forsøk som prøver å svare på om dette også gjelder for permeable sandfang. Dette gjør det enklere å skalere opp forsøkene gjort på kjerner til en reell situasjon. Figur 13 viser aktuelle synkeforsøk gjort på testrigg i Rygge, hvor det er mulig å gjøre kontrollerte forsøk utenfor anlegg.

Høydeendringen til vannspeilet er her målt over tid og volumstrømmen er beregnet fra disse målingene. Som vist er dataene litt spredt, som gjør det vanskelig å avgjøre strømningsbilde, men Torricelli (Formel 6) gir en relativt god sammenligning og gir mindre feil enn Darcy (Formel 7). Darcy ser også ut til å følge en linje som vil overpredikere volumstrømmen ved høyere vannspeil. Videre i oppgave benyttes Torricelli både til å beskrive strømmingen i laboratorieforsøk (Formel 3) og i feltforsøk (Formel 6).

4.2 FORSØK *IN SITU*

For å se på hvordan de permeable sandfangene fungerer i praksis etter installasjon i grunnen, er det gjort påfyllingsforsøk ute på anlegg. Forsøkene er gjort med et halvt års mellomrom for å se om det har skjedd en endring i funksjonen. Sandfangene som det ble gjort forsøk på har to forskjellige tendenser, og vurderes på to forskjellige måter. Sandfang nr. 1, som var i liten grad påvirket av magasinering i omfyllingsmassene på grunn av god drenering, gir informasjon på kortvarige regnskyll med høy intensitet. Under slike forhold vil det være den permeable kumveggen som er begrensende for hydraulisk kapasitet. Siden den permeable kumveggen var begrensende, kan et tap i hydraulisk kapasitet også mest sannsynlig forklares med at det har skjedd en tetting av den permeable betongen. Sandfang nr. 2, hvor kapasiteten begrenses av kapasiteten til stedlige masser, gir informasjon på hvordan grøften fungerer som et fordrøyningsmagasin.

For begge sandfangene var det liten til ingen oppsamling av sand i kumbunnen både i 2021 og i 2022. Dette kan enten bety lite massetransport i avrenningen eller at mesteparten hadde blitt ført gjennom den permeable betongen og ut i grøften.

4.2.1 Sandfang nummer 1

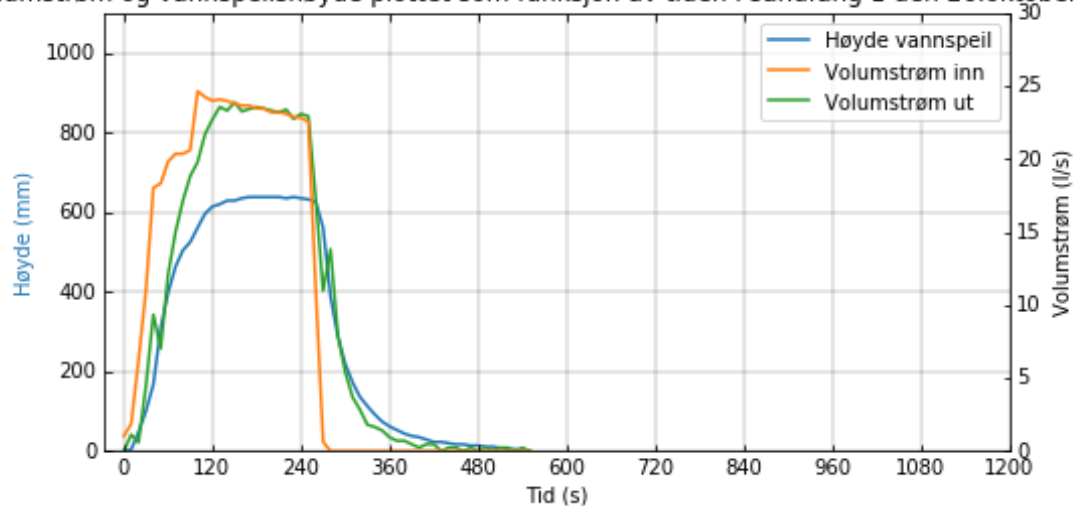
Figur 14 og Figur 15 viser hvordan høyden (blå) endret seg med volumstrømmen inn (oransje) over tiden forsøket foregikk. Volumstrømmen ut (grønn) er beregnet ved å ta volumstrømmen inn og trekke fra volumendringen inne i sandfanget (Formel 8).

Det som tolkes ut fra forsøk 1 høsten 2021 er at eksfiltrasjonskapasiteten til sandfanget opprettholdes med omfyllingsmassene som er benyttet, altså kult (22 – 120 mm). Det begrunnes med at volumstrømmen ut er omtrent 20 l/s med en vannspeilhøyde på rundt 0,6 m, som er sammenliknbart med kapasiteten på permeable kumringer testet i friluft på testrigg i Rygge.

I forsøk 2 våren 2022 tar det lenger tid å tømme sandfanget enn i forsøk 1 og høyden til vannspeilet er høyere, noe som kan tyde på at det har skjedd tetting, men det kan også forårsakes av magasinering i omliggende masser. Oppbygningen av grøften her gjør at det kan skje en magasinering i grøft omtrent 40 cm opp på den permeable høyden av sandfanget. Her vil infiltrasjonen til stedlige masser i tilknytning til grøften være dominerende. Over dette er grøften tilknyttet sprengstein og vegoppbygningen som gjør at

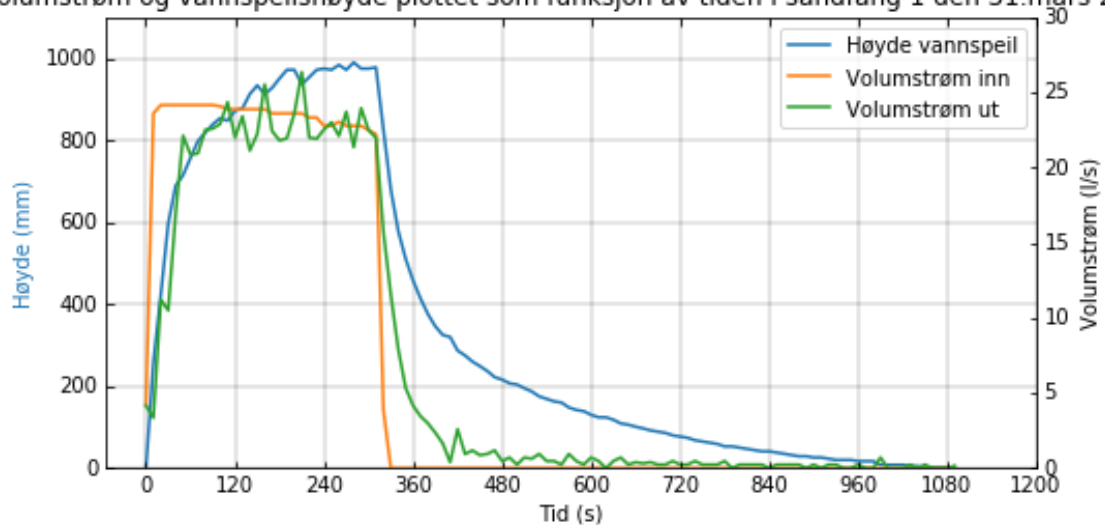
grøften tømmes fort og kapasiteten til sandfanget er dominerende. Dette stemmer over ens med tømmefasen i Figur 15, hvor volumstrømmen ut blir unaturlig lav når høyden er omtrent 40 cm.

Volumstrøm og vannspeilshøyde plottet som funksjon av tiden i sandfang 1 den 26. oktober 2021



Figur 14: Resultat fra hydraulisk forsøk på sandfang nr. 1 den 26. oktober 2021 på anlegg utenfor Hønefoss. Denne viser høyden til vannspeilet i blå, volumstrømmen inn i oransje og volumstrømmen ut i grønn.

Volumstrøm og vannspeilshøyde plottet som funksjon av tiden i sandfang 1 den 31. mars 2022

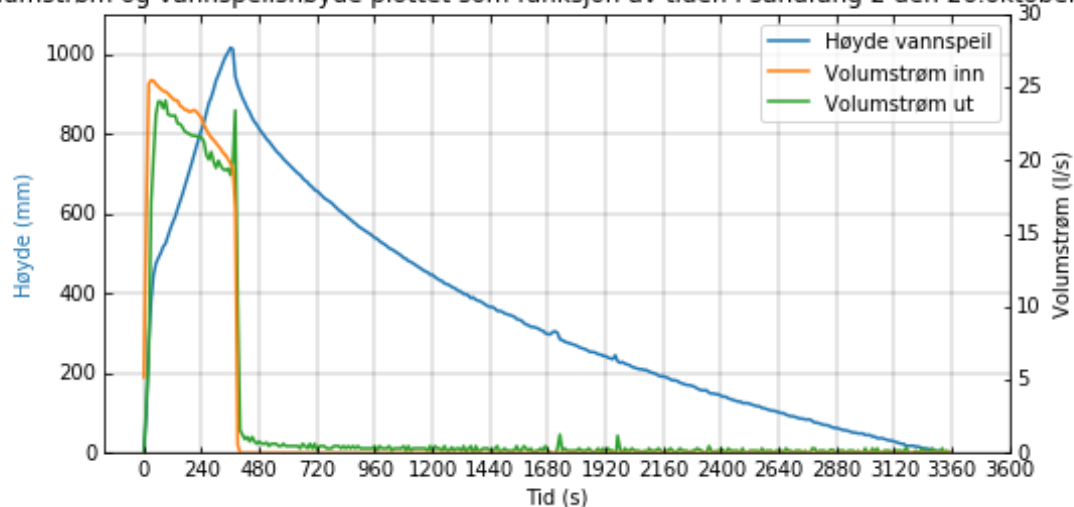


Figur 15: Resultat fra hydraulisk forsøk på sandfang nr. 1 den 31. mars 2022 på anlegg utenfor Hønefoss. Denne viser høyden til vannspeilet i blå, volumstrømmen inn i oransje og volumstrømmen ut i grønn.

4.2.2 Sandfang nummer 2

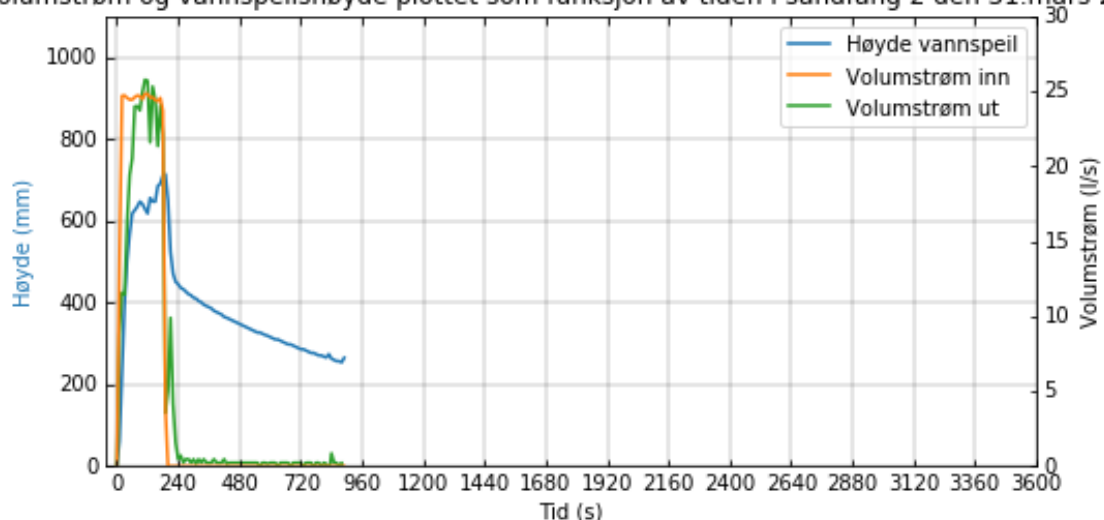
Figur 16 og Figur 17 viser hvordan høyden (blå) endret seg med volumstrømmen inn (oransje) over tiden forsøket foregikk. Volumstrømmen ut (grønn) er beregnet ved å ta volumstrømmen inn og trekke fra volumendringen inne i sandfanget. Høyden i dette sandfanget stiger fort og tømmeforløpet i begge forsøkene tyder på at magasineringen i grøften skjer fort, og at det er kapasiteten i stedlige masser som er begrensende for hvor god funksjonen er.

Volumstrøm og vannspeilshøyde plottet som funksjon av tiden i sandfang 2 den 26. oktober 2021



Figur 16: Resultat fra hydraulisk forsøk på sandfang nr. 2 den 26. oktober 2021 på anlegg utenfor Hønefoss. Denne viser høyden til vannspeilet i blå, volumstrømmen inn i oransje og volumstrømmen ut i grønn.

Volumstrøm og vannspeilshøyde plottet som funksjon av tiden i sandfang 2 den 31. mars 2022



Figur 17: Resultat fra hydraulisk forsøk på sandfang nr. 2 den 31. mars 2022 på anlegg utenfor Hønefoss. Denne viser høyden til vannspeilet i blå, volumstrømmen inn i oransje og volumstrømmen ut i grønn.

4.2.3 Kapasitet sammenholdt med IVF-statistikk

For å kunne vurdere hva kapasiteten som ble funnet i forsøkene betyr, knyttes testene opp mot IVF-statistikk. Det er her ønskelig å se på de forsøkene som sørger for at sandfanget går fullt, for å se hvilke gjentaksintervall som forårsaker en overskridelse av kapasitet. Dette skjedde i vårforsøket for sandfang nr. 1 og høstforsøket for sandfang nr. 2. Det er benyttet den rasjonale formel (Formel 9) til utregning av nedbørintensitet (I) som skal tilsvare innstrømningen i forsøkene. Det er i begge tilfeller også benyttet en klimafaktor $K_f = 1,4$, for at dette skal gjelde for fremtidens nedbør. Dette knyttes videre opp mot IVF-statistikken i Tabell 6 som er fra Hønefoss ikke så langt fra sandfangene. Den rasjonelle formel er gitt ved:

$$I = \frac{V}{t\varphi AK_f} \quad \text{Formel 9}$$

Hvor I ($l/(s * ha)$) er nedbørintensitet, V (m^3) er volumet vann inn i kummen, t (s) er påfyllingstiden, φ ($-$) er avrenningskoeffisient, A (m^2) er avrenningsarealet og K_f ($-$) er klimafaktoren.

Forsøket gjort på sandfang nr. 1 på våren førte til at kapasiteten ble oppbrukt på kort tid sånn at det fortsatt var tilgjengelig fordrøyningsvolum. Det var her høy vanntilstrømning over kort tid, og kapasiteten til den permeable betongen er antatt begrensende. Volumet vann som ble tilført sandfanget var på $V = 7,4 m^3$ og påfyllingstiden var $t = 330 s$. Avrenningsarealet til kummen er på $A = 400 m^2$ og hele arealet er tett asfalt som tilsvarer en avrenningskoeffisient $\varphi = 0.9$. Dette gir en nedbørintensitet på $I = 445 l/(s * ha)$ med varighet på 5,5 minutter, som tilsvarer ifølge Tabell 6 et gjentaksintervall på over 200 år markert med blå sirkel.

For sandfang nr. 2 ble det gjennom to påfyllinger tilført et volum med vann på $V = 12 m^3$ og kapasiteten til fordrøyningsvolumet ble oppbrukt. Tiden det tok fra første forsøk ble påbegynt til påfyllingen i andre forsøk ble avsluttet var $t = 25 \text{ min}$. Avrenningsarealet tilknyttet denne kummen er på $A = 450 m^2$ hvor omtrent $70 m^2$ er infiltrasjonsgrøft med avrenningskoeffisient $\varphi = 0.5$ og resterende er asfalt med avrenningskoeffisient $\varphi = 0.9$. Dette gir en nedbørintensitet på $I = 152 l/(s * ha)$ med varighet på 25 minutter, som tilsvarer ifølge Tabell 6 gir et gjentaksintervall på oppimot 200 år markert med rød sirkel.

Dette vil bety at overløpet svært sjelden vil bli brukt og nesten alt overvann håndteres lokalt. Det samme vil det meste av partikkelbundne miljøgifter. Forsøkene kan ikke forklare hva som skjer ved enda mer intense regn med kortere varighet og heller ikke om regn med lenger varighet. En gjentetting både i stedlige masser og i den permeable betongen kan være begrensende for den hydrauliske kapasiteten over tid.

Tabell 6: IVF-statistikk for Hønefoss (SN20300) med data fra 1969-1994. Tabellen viser nedbørintensiteten i $l/(s * ha)$ med målinger hentet fra et vippepluviometer. Tabellen er hentet: (Norsk klimaservicesenter, 2021).

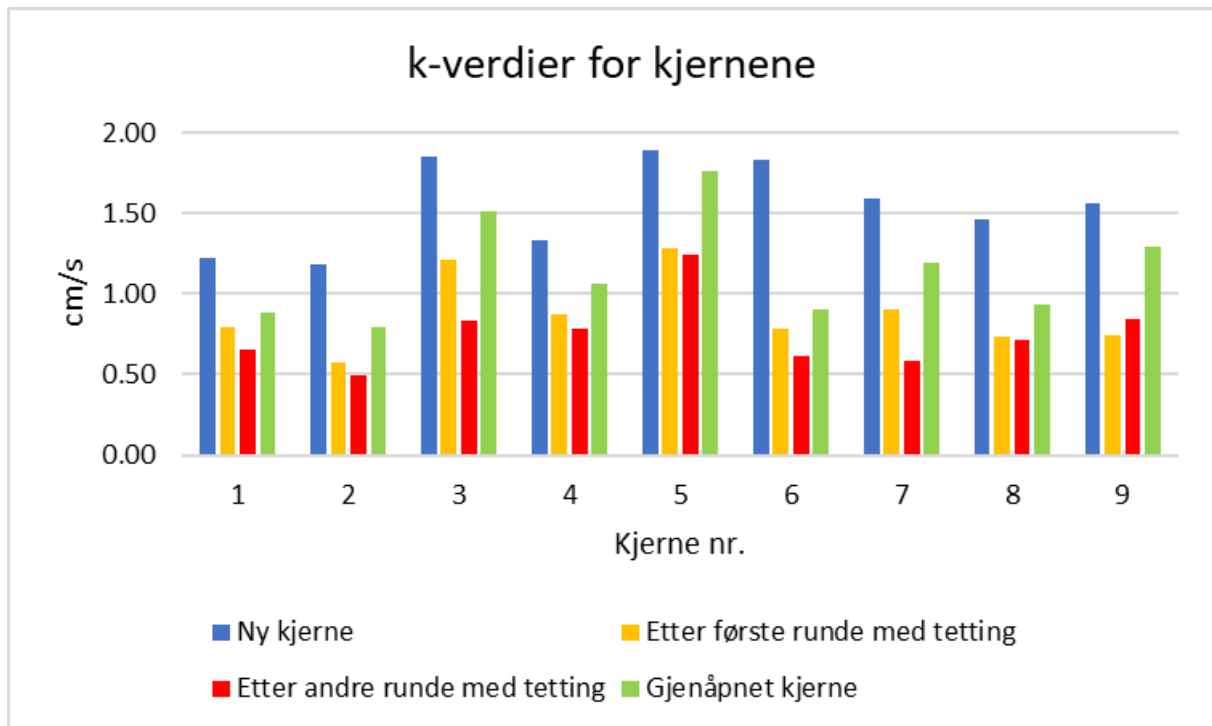
Gjentaksintervall (år)	Varigheter (minutter)								
	1	2	3	5	10	15	20	30	45
20	334,5	294,6	261,3	212,6	154,7	121,7	101,2	80,0	60,3
25	354,5	313,1	276,9	224,9	163,7	129,0	107,0	84,8	63,8
50	421,4	372,5	327,9	264,5	193,7	153,9	127,0	100,3	74,7
100	489,1	434,6	381,8	308,4	226,3	181,1	149,6	117,4	86,5
200	564,5	503,9	442,9	362,1	260,4	211,8	174,5	136,9	98,9

4.3 LABORATORIE-FORSØK

Målet med laboratorieforsøk var å se på hvor fort den permeable betongen benyttet i sandfangene blir tett og hvor godt de kunne gjenåpnes. Det benyttes de tilpassede k -verdiene i Torricelli-formelen til å sammenligne kapasiteten til kjernene, og verdiene brukes til å beregne prosentvis tetting og gjenåpning. I Figur 18 er k -verdiene vist for alle forsøkene på kjernene. Kjerne 1 til 3 er hentet fra et sandfang med naturstein i betongblandingen og det er brukt knust stein i kjerne 4 til 9.

Det er forskjeller i hvordan kapasiteten er for kjernene. De blå stolpene, som viser kapasiteten til nye kjerner, har varierende k -verdi. Variasjonen går på tvers av hva som er i betongblandingen, og skyldes mest sannsynlig en inhomogen porestruktur i sandfangene. Kapasiteten til de gjenåpnede kjernene er vist med grønn stolpe, og viser at en del av kapasiteten er gjenvunnet etter tetting. Ut ifra første og andre runde med tetting, vist med gul og rød stolpe, ser det ut til å skje en initiell tetting hvor kapasiteten minker raskt. I den andre runden med tetting ser det ikke ut til at kapasiteten minker i like stor grad, og det på tross av at det er benyttet en like stor konsentrasjon av sand i denne runden. Kjerne 9 har

høyere kapasitet etter andre runde tetting, som kan skyldes at noe av sanden har løsnet under de hydrauliske testene.



Figur 18: Figuren viser de tilpassede k-verdiene til kjernene. I blå er k-verdien til nye kjerner, første tetting av kjerne er gitt i oransje, andre tetting av kjerne er gitt i rød og k-verdien til en gjenåpnet kjerne er gitt i grønn.

Tabell 7 viser forsøksresultatene for hver enkelt kjerne, hvor forsøk 1 er de første 10 minuttene med partikkelgjennomstrømning, mens forsøk 2 er en ny runde på 10 minutter med partikkelgjennomstrømning. I kolonnene er vekten av sanden som har festet seg i kjernen per tid og samlet antall tilt (for å fjerne sand fra kjernens overflate) som har blitt gjennomført i løpet av forsøkene. I de fleste forsøkene satte det seg mer sand i kjernen i løpet av de første 10 minuttene, noe som bekrefter at det skjer en initiell tetting. Dette er svært positivt om det samme skjer med permeable sandfang, fordi dette tapet kan dimensjoneres for. Spørsmålet er om denne initielle tettingen bidrar til at mindre partikler kan føre til mer tetting over tid. Betongen av naturstein får en større ansamling av sand på toppen av kjernen, noe som tyder på mindre porestørrelse, men kan skyldes den inhomogene porestrukturen over hele det permeable sandfanget.

Tabell 7: Resultater fra laboratorieforsøk som viser mengden sand som blir holdt igjen inne i kjernenes porerom. Samt antall ganger det blir gjennomført tilt av kjernene under forsøket.

Kjerne	Forsøk 1: mengde sand som fester seg i kjernen per tid (g/min)	Forsøk 2: mengde sand som fester seg i kjernen per tid (g/min)	Antall tilt samlet
1	2,9	1,3	7
2	4,5	0,2	10
3	3,4	0,5	0
4	2,7	2,1	1
5	3,4	-0,3	0
6	3,2	0,6	0
7	2,8	2,8	0
8	2,1	1,1	0
9	2,7	1,1	0

I Tabell 8 er resultatene på hvordan den hydrauliske kapasiteten endret seg i løpet av forsøket vist. k-verdien, som er beskrivende for den hydrauliske kapasiteten, er systematisk høyere enn hva k-verdien for tilhørende permeabel betong-ring. En av forskjellene mellom forsøkene gjort på borekjerner og på permeable betongringer er at borekjernene er forsøkt vannmettet mens de permeable ringene ikke er det. Forskjellen i hydraulisk kapasitet kan derfor tyde på at luft fanget i porene er kapasitetsvekkende. Sammenligner man vekten til kjernene med tilhørende k-verdi, ser det ikke ut til å være en sammenheng i at lavere vekt fører til mer effektivt porerom og høyere hydraulisk kapasitet. Tetting av kjernene senker den hydrauliske kapasiteten i snitt til 48 % av den opprinnelige kapasiteten, og gjenåpning med høytrykkspyler gjenvinner i snitt 74 % av den opprinnelige kapasiteten.

Tabell 8: Resultater fra laboratorieforsøk som viser vekt, gjentetningsgrad, gjenåpningsgrad og den estimerte k-verdier for den permeable ringen kjernene er blitt hentet fra.

Kjerne:	Vekt (kg)	k-verdi for ny kjerne (cm/s)	Tetningsfaktor	Gjenåpningsfaktor	Q ut permaring ved h = 0,5 m (l/s)	k-verdi Sandfang (cm/s)
1	1,259	1,22	0,53	0,72	21.22	0.91
2	1,236	1,18	0,42	0,67		
3	1,205	1,85	0,45	0,82		
4	1,163	1,33	0,59	0,80	18.90	0.81
5	1,154	1,89	0,66	0,93		
6	1,181	1,83	0,33	0,49		
7	1,126	1,59	0,36	0,75		
8	1,129	1,46	0,49	0,64		
9	1,114	1,56	0,54	0,83		

4.4 FROSTFORSØK

Noe avrenning fra vegarealer i kuldeperioder er vanlig. En lang kuldeperiode hvor is bygger seg opp inne i porene over tid kan forekomme, men hvorvidt det skaper problemer blir belyst av frost-forsøkene.

I en periode fra 2. februar til 15. mars ble kumringen fylt i 20 av 41 dager med vann i 5 minutter med volumstrøm på 21 l/min. Lengste sammenhengende dager hvor påfylling tok plass var 6 dager. Gjennomsnittet av den laveste temperaturen målt på dager med påfylling er $-3,3$ °C. Gjennomsnittet av den høyeste temperaturen målt på dager med påfylling er 3 °C. Gjennomsnittstemperaturen på dager med påfylling var $-4,2$ °C. Det er til sammen 3 dager hvor temperaturen ikke har steget over 0 °C, som fører til at det ikke har vært my tid for isen å bygge seg opp i porene.

Gjennom hele perioden lå vannstandshøyden på den permeable delen stabilt på 1 cm under påfylling. Det var heller ingen synlige skader på betongen ved slutten av forsøksperioden. Resultatene viser at betongen har klart seg gjennom forsøket. Det har derimot vært få sammenhengende dager med kulde, som gir lite informasjon om en langvarig kulde periode.

5 DISKUSJON

5.1 HYDRAULISK MODELL

I forsøk på å utvikle en hydraulisk modell for den porøse betongen har Forchheimer gitt best tilnærming til måledata i laboratorietester. Ved å dele opp uttrykket viser det seg at bidraget fra Darcy-leddet er lite, så lite at det videre i denne oppgaven utnyttes et rent Torricelli-uttrykk til å beskrive strømmingen. Denne tilnærmingen har også vist at Darcy er beskrivende for lave strømningshastigheter, og er derfor sannsynligvis benyttet i artikler på permeabel betong i permeable flater. At Torricelli er det dominerende strømningsbilde kan skrive seg videre til at vannets treghet og/eller turbulens i porene er viktig ved høye Reynoldstall.

I forsøk på testtrigg er dataene så spredt at det ikke er lett å gi noe sikkert svar på hvilken modell som passer best. Det er andre faktorer som spiller inn i forholdene, som for eksempel ustabil vannspeil og mengden luft i porene. Det er uansett ikke så ulikt samsvar mellom modell og måledata, og Torricelli-uttrykket kan utnyttes videre. Med flere forsøk etterfulgt av kalibrering mot modell kan det være mulig å si noe sikrere.

5.2 FORSØK *IN SITU*

Forsøkene som er gjort ute på anlegg gir et innblikk i hvordan de permeable sandfangene fungerer i praksis. På grunn av en variasjon i tid og volumstrøm får man ikke lest av informasjon om det har skjedd en tetting av den permeable betongen fra høstforsøkene til vårforsøkene. Forsøkene skulle blitt gjort med kontrollert volumstrøm og tid, men det var dessverre ikke lett å få til med så store volumstrømmer det er snakk om her.

Vegarealet tilknyttet disse sandfanget er små og både kapasiteten til sandfanget og fordrøyningsvolumet er tilstrekkelig stort til å håndtere store mengder regn. Spørsmålet er hvor lenge denne kapasiteten varer med gjentetting, kanskje må overdimensjonering til for at kapasiteten skal holde i lengden. Tetting av det permeable laget som fører til et tap på 50 % kapasitet vil fortsatt gi god nok kapasitet til å håndtere korte intense nedbør for de testede sandfangene. For langvarige nedbør så har ikke denne tettingen noe å si, for da vil det være fordrøyningsvolumet i omfyllingsmassene som er begrensende. IVF-kurvene er

beregnet fra nedbørsmålinger fra 1969 til 1994 i Hønefoss. Dette er den nærmeste og beste tilnærmingen som ble funnet, men det skulle gjerne vært målinger fra nyere tid.

Bruk av fiberduk kan være begrensende faktor for infiltrasjonskapasiteten til grunnen. Fiberduken brukes for å holde fine partikler fra å trenge inn i omfyllingsmassene rundt kummen. Samtidig kan fiberduk med små masker være i fare for å tettes og svekke infiltrasjonskapasiteten, som fra kapittel 2.4.2 var et dokumentert problem for porøse flater. Tetting kan skje over tid hvor fine partikler vaskes ut av det permeable sandfang og tetter maskene i fiberduken. Om dette skjer kan den begrensende faktoren være fiberduken, og for å skifte en tett fiberduk må hele grøften graves opp på nytt. Forsøkene kunne dessverre ikke gi noe godt svar på dette.

Forsøkene som ble gjort på våren viste ikke noen store forskjeller fra de som ble gjort på høsten, og det var ikke nødvendig å spyle eller tømme de på dette tidspunktet. Ved videre testing av de samme sandfangene vil man kunne opparbeide seg nok informasjon til å utvikle en plan for drift. Alt dette er knyttet mot hvordan den hydrauliske kapasiteten er over tid og slamoppylling.

5.3 LABORATORIEFORSØK

I forsøkene står strømmingen vertikalt på den porøse betongen. Dette avviker fra en reell situasjon hvor strømmingen står horisontalt på kumveggen, som antas å ha en positiv effekt i gjentettingsperspektiv. Det er antatt at partikler som i forsøket legger seg som et sandteppe over den porøse betongen vil falle av og sedimentere i en reell situasjon. I forsøkene er dette unngått ved å tilte kjernen horisontalt før de hydrauliske testene. Sandteppet faller da til bunnen av karet. Et aspekt er hvorvidt det vil danne seg et sandlag som legger seg i de ytterste porene i en reell situasjon. En annen observasjon ved vertikal strømming er at synkehastigheten til partiklene kan ha vært større enn strømningshastigheten til vannet. Det er ikke sikkert strømmingen i røret har tilstrekkelig med turbulens til å motvirke at partiklene sedimenterer på kjernen. Sånn sett vil man få mer gjentetting i forsøkene enn i en reell situasjon.

Grunnlaget for å ha et tilførselsrør med mindre diameter enn kjernen i forsøkene var å unngå kortslutningsstrømmer. Kortslutningsstrømmene var forventet å skje i ytterkant av kjernen ved festeanretningen. Dette gjør samtidig at det er en usikkerhet i det effektive

strømningsarealet, men ved tetningsforsøk legger det seg sand i hele tverrsnittetsarealet på overflaten av kjernen. Det virker derfor som hele arealet benyttes, men at det derfor kan ha forekommet kortslutningsstrømmer.

Før gjenåpningen av borekjernene måtte borekjernene tas ut av vannet med festeanretningen på, og med festeanretningen på er det ikke sikkert borekjernene ble like godt drenert for luft før de siste hydrauliske forsøkene. Dette kan ha ført til at kapasiteten etter gjenåpning er bedre enn det forsøkene har vist, fordi porer fylt med luft kan føre til dårligere kapasitet.

Beregningen av sandmengden som festet seg i borekjernen ble gjort ved å måle vekten til sanden som ble tilført karet (400 g) og vekten til sanden som ble hentet ut av karet og tørket etter forsøket. Vekten av tilført sand ble trukket fra vekten av sand som ble hentet ut, som gav vekten til sanden som hadde festet seg i borekjernen. For å sikre at all sanden kunne hentes ut av karet mellom forsøkene ble det gjort forsøk på å blande 400 g sand i 40 l vann. Dette ble hentet ut, tørket i varmeskap og veid til 400 g, som betyr at hele sandmengden var mulig å hente ut igjen.

Kjerner med liten hydraulisk kapasitet må tiltes flere ganger i løpet av 10 minutter med partikkelgjennomstrømning, noe som kommer frem i Tabell 7 på side 32. Dette tyder på at de effektive porerommene var for små til at deler av den partikkelfraksjonen som ble tilført kunne komme gjennom. Hvis dette gjelder et helt permeabelt sandfang, kan det bety en stor partikkeltilbakeholdelse ved filterevnen til den permeable betongen. Om man kunne designet den permeable betongen sånn at porene holder tilbake partikler under 0.25 mm så vil det bety, gitt tallene fra Tabell 2 på side 4, en tilbakeholdelse av 43 % fast materiale og 52 % tungmetaller i det permeable sandfanget. Problemet med små porestørrelser i betongen kan være at partikler under 0,25 mm fører til tetting. Stemmer det at Formel 1 på side 5 gjelder for permeable sandfang, vil mesteparten av denne partikkelfraksjonen treffe kumveggen. Derfor kan det være en fordel at porene er store nok til at de partiklene som ikke sedimenterer har fri veg gjennom kumveggen, siden mesteparten uansett blir holdt tilbake i grøften. Så fordelene med mindre porestruktur er den økte tilbakeholdelsen av forurensningsstoffer i sandfanget, men det vil resultere i økt vedlikeholdsbehov.

48 % av kapasiteten går tapt på grunn av tetting, samtidig er det første del av forsøkene som tetter mest. Det kan altså se ut som tettingsraten stagnerer over tid. Tapet må dimensjoneres for, men det er ikke nødvendigvis sånn at det er et problem. Tetting vil skje nedenfra og opp på det permeable laget i sandfanget, og etter hvert som dette skje vil det bli dårligere hydraulisk kapasitet i den nedre delen av den permeable betongen. Dette gjør at det raskt vil danne seg en vannpute over de sedimenterte massene inne i det permeable sandfanget under regnskyll. Vannputen vil være med å forhindre resuspensjon og oppvirvling av allerede sedimenterte masser.

Høytrykkspyler førte til en gjenåpningsgrad på 74 % av opprinnelig kapasitet. Ved planlegging kan det være nødvendig å undersøke om slamsugebilene i område er utstyrt med høytrykkspylespiss. Gjenåpning burde også bli testet med mindre trykk for å se hvilke resultater det gir.

Ved videre forsøk burde hver kjerne tettes og gjenåpnes flere runder for å se om det samme gjentar seg. Ut ifra forsøkene kunne det se ut som man når et punkt hvor tettingen skjer mer langsomt. Det kan være en idé å gjøre forsøk med en større variasjon av partikkelfraksjoner og slam med biologisk materiale. For partiklene kan komplementere hverandre og mindre og mindre partikkelstørrelse kan etter hvert føre til gjentetting, og hvis slammet er klebrig kan dette også være med på å tette.

5.3.1 Grovt estimat på tetting av permeabelt sandfang *in situ*

Ved å utnytte resultatene fra laboratorieforsøk kan det lages et grovt estimat på gjentettingstiden av det permeable sandfanget. Dette er spekulasjoner og det er flere faktorer som spiller inn i en reell situasjon som slam mengde, komposisjonen til slammet og at tetting skjer nedenfra og opp langs den permeable veggen i sandfanget. Det er uansett en liten pekepinn om hva man kan forvente. Formelen som brukes er basert på antakelsen om at tiden det tar å oppnå en viss tetningsgrad (i lab eller i felt) er en funksjon av den totale mengden partikler som har truffet den permeable overflaten per arealenhet overflate. Det er ikke tatt hensyn til porøsiteten til tilført slam som fører til at tettingstiden overestimeres noe. Formelen er gitt ved:

$$\frac{p\rho\dot{m}_f t_f}{A_f} = \frac{C_l Q_l t_l}{A_l} \quad \text{Formel 10}$$

Hvor indeks f står for reell situasjon, mens indeks l står for funn i laboratorieforsøk. t_f (s) er tiden til sandfanget har mistet 50 % kapasitet, A_f (m^2) er det permeable arealet i sandfanget, C_l (kg/m^3) er konsentrasjonen av partikler brukt i laboratorieforsøk Q_l (m^3/s) er volumstrømmen brukt i laboratorieforsøk, A_l (m^2) er tverrsnittsarealet til borekjernen og t_l (s) er tiden det tok for å tette kjernen til 50 % av opprinnelig kapasitet.

Det er gjort forenklinger om at hele det permeable arealet tettes samtidig. Det antas at massetransporten, \dot{m}_f (m^3/s), er på $0,4 m^3$ jevnt fordelt årlig, som tilsvarer 50 % oppfylling av et vanlig sandfang. Det antas at det bare er partikkelstørrelsene 0,25 – 0,8 mm som fører til tetting, og fra Tabell 2 på side 4 er prosentandelen av denne partikkelfraksjon, p (%), på 25 %. Tettheten, ρ (kg/m^3), på partiklene som tilføres er satt til $2620 kg/m^3$.

Om det antas at alle partiklene treffer kumveggen og ingen av partiklene sedimenterer får man en tettingstid (t_f) på omtrent 270 dager, som medfører at sandfanget burde gjenåpnes hver gang det tømmes. Antas at 90 % av partiklene får sedimentere, som i Lager et al. (1977) fant i sine forsøk, fører det til en tettingstid (t_f) på omtrent 7 år, noe som stemmer godt overens med erfaringen på permeable betongrør i Belgia. Da kan det gå lenge mellom hver gang det trengs gjenåpning. I neste kapittel er spørsmål om levetid grunnet frost og ising diskutert.

5.4 FROST

Frost er en faktor som kan føre til at permeabel betong får frostsprengning eller at styrken svekkes. Det er grunn til å tro at dette kan skje på to måter: 1. Den porøse betongen er fullstendig mettet med vann eller nedsunket i vann før det fryses. 2. Is bygger seg opp inne i porene over tid.

For at et permeabelt sandfang skal stå nedsunket i vann over tid og fryses må enten (i) infiltrasjonskapasiteten til omkringliggende masser være svært lav sånn at fordrøyningsvolumet i grøften er fylt over tid, temperaturen må være under $0^\circ C$ langs den høyden vannspeilet står og en betydelig mengde vann må bli tilført sandfanget, eller (ii) grunnvannstanden står i det permeable laget av sandfanget og temperaturen må være under $0^\circ C$ langs den høyden vannspeilet står.

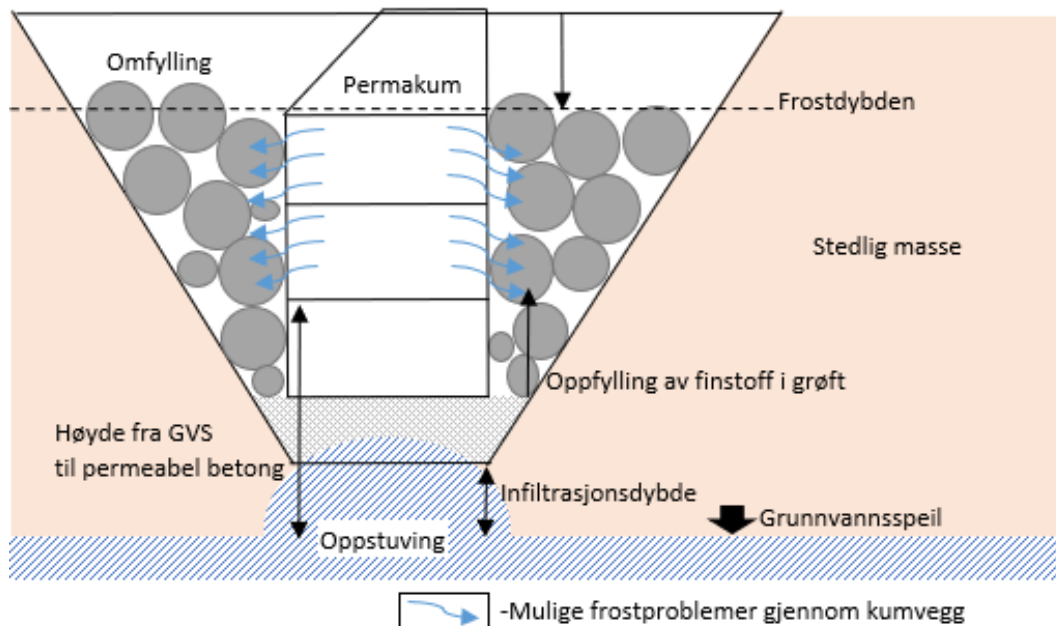
Avrenning fra snøsmelting og nedbør er gjerne tilknyttet temperaturer over 0°C, samtidig kommer det ikke betydelig mengder med overvann i kalde perioder på grunn av brøyting. Om de stedlige massene blir betongfrost kan det skape magasinering og dermed problemer med frost i den porøse betongen. Dette sees på som et lite sannsynlig scenario. I kapittel 2.3 er det beskrevet at grunnvannstand burde ligge en meter under infiltrasjonsnivå med hensyn til renseseffekt og hydraulisk ledningsevne. Tas det hensyn til dette skal ikke grunnvannstanden stå i det permeable laget.

Noe avrenning fra vegarealer i kuldeperioder er vanlig når friksjonen varmer opp kjørebanelen. En lang kuldeperiode hvor is bygger seg opp inne i porene over tid kan forekomme, men hvorvidt det skaper problemer blir belyst av frost-forsøkene. Resultatene viser at betongen har klart seg gjennom forsøket. Det har derimot vært få sammenhengende dager med kulde, som gir lite informasjon om en langvarig oppbygging av is under kuldeperioder vil svekke den porøse betongen.

Isen som blir liggende inne i porene til betongen kan bygge seg opp ved at mer vann fryser på. Vann fryser i minste motstands veg og vil ikke presse spesielt på betongen så lenge det er åpent rom i en retning. Laboratorieforsøk viste at nye kjerner har en større hydraulisk kapasitet enn den permeable betongen de kom fra. Om dette er fordi kjernen under hydrauliske forsøk var mettet med vann, så tyder det på at noe luft er fanget i porene til den permeable ringen mens vann eksfiltrerer. Denne effekten kan være med på å sørge for at permeable sandfang er frostsikre, men det kan være andre problemer med frost knyttet til telehiv i omfyllingsmassene.

5.4.1 Telehiv- og infiltrasjonsproblematikk

Figur 19 illustrerer punkter som burde tas med i vurderingen ved prosjektering av et permeabelt sandfang. Ved planlegging av sandfanget må det gjøres en avveining mellom frostdybden og tilstrekkelig infiltrasjonslengde i stedlige masser. På grunn av en oppbygning av finstoff i grøften kan det forekomme telehiv i omfyllingsmassene. Den beste løsningen er at grøftedybden er så dyp at en oppsamling av finstoff kan skje over lengst mulig tid uten risiko for telehiv. Samtidig burde høyden fra grunnvannsspeilet til permeabel betong være 1 meter på grunn av oppstuvning, eller for best mulig renseseffekt gjennom stedlige masser burde infiltrasjonsdybden være 1 meter (Solheim & Friborg, 2019).



Figur 19: Illustrert oppbygning med mulige problemer

Det stilles spørsmål ved hvorvidt det vil være frost problemer gjennom den porøse betongen. Om kulden fryser omfyllingen gjennom den permeable kumveggen, kan dette føre til at telehiv forekommer mye lenger ned i massene. Da vil man ha en mindre høyde å oppbevare finstoff på. En måte å gjøre forsøk på som kan belyse dette, kan være å installere en temperaturmåler utenfor det permeable laget under installasjon. Da kan man få en indikasjon på hvor kaldt det blir der.

5.4.2 Grovt estimat på telehivproblematikk

Det er bekymringer for om oppfylling av finstoff i grøften vil føre til telehiv, og det er derfor her gjort et estimat på hvor lang tid det tar å fylle en grøft med finstoff. Dette vil variere med størrelsen på grøften og mengde av finstoff som blir tilført, men man må vurdere konsekvensen under dimensjonering. Det er gjort noen antakelser som at $0,4 \text{ m}^3$ sand tilføres sandfanget årlig, oppfyllingen av finstoff er kompakt, og at funnene til Lager et al. (1977) på størrelsesfraksjoner (Tabell 2) og partikkeltilbakeholdelse (Tabell 3) er gjeldende. Det medfører en mengde sand som blir holdt igjen i sandfanget (V_s) og en videreført mengde sand til grøft (V_g) vist i Tabell 9. Summen av årlig oppfylling av grøft (V_g) blir da $0,126 \text{ m}^3/\text{år}$.

Tabell 9: Tabellen viser hvordan sandvolumet fordeler seg på partikkelstørrelser og hvor mye som blir holdt igjen i sandfanget (V_s). Med denne informasjonen så er det beregnet mengden av slam som føres til grøften (V_g) gjennom den permeable veggen i sandfanget.

0,4 m ³ sand	Mindre enn 0,1 mm	0,10-0,25mm	0,25-0,84mm	Større enn 0,84 mm
Tilknyttet fast materiale	15,0 %	28,0 %	25,0 %	32,0 %
Tilbakeholdelse	0,0 %	50,0 %	90,0 %	100 %
V_s	0,0 m ³	0,056 m ³	0,09 m ³	0,128 m ³
V_g	0,06 m ³	0,056 m ³	0,01 m ³	0 m ³

Videre antas volumet på en grøft 27 m³ og at sandfanget tar opp 2m³ av dette, som gir et grøftevolum på 25 m³. Det antas at omtrent 30% av dette er tilgjengelig magasineringsvolum, som gir 7,5 m³ rom til oppfylling. Med et magasineringsvolum på 7,5 m³ og en tilførsel av finstoff på 0,126 m³/år tar det 59,5 år før hele det tilgjengelige volumet er fylt med finstoff. Etter oppfyllingen av finstoff er det ikke lenger tilgjengelig magasineringsvolum, fare for telehiv om finstoffet når frostdybden og det permeable sandfanget vil fungere som et vanlig sandfang via overløp. Denne beregningen tar ikke hensyn til at færre partikler vil slippes gjennom kumringen etter hvert som den tetter seg og at ikke partiklene nødvendigvis når hele volumet. Det er heller ikke her tatt hensyn til porøsiteten til tilført sand, som vil gjøre at resultatet overestimeres noe.

5.5 DRIFT

Det er to nyttige verktøy i forhold til drift og vedlikehold som kan være nyttig for å gjenåpne og vite når det skal tømmes. Det første er et eget renseapparat for spyling og drenering av porene. I Belgia så benyttes dette på permeable betongrør, hvor nesten hele kapasiteten blir gjenvunnet etter gjenåpning. Dette kan være gunstig om det senere skal vise seg at slammet skal være vanskeligere å få ut i felt enn det var å få ut sand fra borekjernene.

Det andre verktøyet er for å varsle når sandfanget må tømmes. Siden vannstanden står lavt når det permeable sandfanget står tørt er det også lett å se når slamfyllingen går over vannspeilet. Det kunne derfor vært lurt å installere en anretning som sier ifra når slammet når en viss høyde. For eksempel en høydemåler som sier ifra når innholdet i kummen når en viss høyde. Med en høydemåler vil man også få varsel når vannstanden står høyt, men dette

kan man vurdere opp mot nedbøren i område og se om den fortsatt varsler når det har blitt tørt.

5.6 VALG AV PERMEABLE SANDFANG PÅ NYE ANLEGG

Å velge permeable sandfang områder med tilstrekkelig infiltrasjonsevne vil være gunstig, selv om det er noen usikkerheter som må undersøkes videre. Dette går greit så lenge det ikke er konflikter med nære brønner eller annet som benytter seg av rent grunnvann. Det permeable sandfanget vil, ut ifra forsøkene *in situ*, håndtere fremtidens 200 års regn med varighet på 25 minutter og 200 års regn med varighet på 5 minutter. Hvert år vil det være 0.5 % sannsynlighet for at dette forekommer, og det tyder på en nesten total retensjon av avrenning, som også betyr at nesten alle partikulære forurensinger håndteres lokalt. Det må gjøres en vurdering på gjentetting og hvor godt det kan håndtere enda mer intense kortvarige regnskyll.

Benyttes tallene fra lukkede infiltrasjonssystem til å beskrive tilbakeholdelsen av miljøgifter for det permeable sandfanget så vil tilbakeholdelsen være opptil 100 % for fast stoff, 95-99 % for tungmetaller og opptil 95% PAH (Åstebøl & Hvitved-Jacobsen, 2014). Dette er en vesentlig økning fra vanlige sandfang som kan holde tilbake omtrent 60 % fast materiale, under 50 % tungmetaller og under 50 % PAH som vist i kapittel 2.2.2 på side 6.

Ulempen med at forurensingene holdes igjen i grøften i stedet for å være med ut i vassdragene, er at grunnen regnes etter en stund som forurenset og må deponeres etter endt levetid av det permeable sandfanget. Det burde også sikres at forurensingene samles i grøften og ikke kommer på avveie, som kan føre til et større område med forurenset grunn.

Det er verdt å nevne at om det skulle danne seg en ishinne på vannspeilet inne i det permeable sandfanget, så vil det fortsatt være kapasitet til vanngjennomstrømning over islaget. Dette gjør at det permeable sandfanget er godt rustet til å kunne håndtere værromslag til regn i kuldeperioder.

Ved sandfang tilknyttet et separatsystem vil en utbytting til permeabelt sandfang minke belastningen og forurensingsgrad til tilhørende vassdrag betraktelig. Viktig er at det ikke forekommer sjokkbelastninger hvis sandfanget i utgangspunktet er dårlig driftet. Sjokkbelastningen fører til at mye av partiklene skylles ut ved store nedbørsmengder.

Ved å bytte ut sandfang tilknyttet et fellessystem vil belastningen minke på renseanlegg og mindre overvann vil føres i overløp ved renseanlegget under store nedbørsperioder. Hvis det i tillegg er dårlig selvrensing på ledningen vil det samle seg sand- og grusavleiringer som vil føre til økte avleiringer av partikler som inneholder organisk stoff, fosfor osv. som spyles løs og går i overløp under store nedbørsperioder (Mosevoll & Lindholm, 1986). Dette vil ikke være tilfelle med et permeabelt sandfang. Tungmetaller i slam på renseanlegg hindrer bruk av slam til jordforbedring, og med permeabelt sandfang kan tungmetaller fra vegarealer hindres i å nå renseanlegg. Dette kan være et bidrag til at tungmetallkonsentrasjonen går ned i slammet på renseanlegg.

Driften av permeable sandfang vil være på lik linje med vanlige sandfang, så lenge det tas hensyn til tetting under dimensjoneringen. Slammet må tømmes for å unngå at slammet går inn på ledningsnett i overløp, men resuspensjonen vil ikke være like stor ved 50% oppfylling av slam som i et vanlig sandfang. Det unngås fordi mye av strømmingen fortsatt vil gå gjennom kumveggen og strømmingen blir derfor jevnere fordelt. Så lenge det dimensjoneres for et kapasitetstap over tid er det ikke nødvendig å spyle de permeable sandfangene oftere enn de tømmes. Om det i tillegg er installert et overløp tilknyttet det permeable sandfanget, vil i grunn det permeable sandfanget fungere som et vanlig sandfang om den permeable betongen skulle gå fullstendig tett.

6 KONKLUSJON OG VIDERE ARBEID

Denne oppgaven har hatt som mål å tette kunnskapshull i forbindelse med det permeable sandfanget. Forsøkene har belyst hvorvidt gjentetting og frost er et problem for permeable sandfang og hvordan kapasiteten er i felt. I sammenheng med forsøkene er det også gjort en vurdering av det permeable sandfanget som samlet trinn 1- og trinn 2 tiltak.

Den permeable betongen i laboratorieforsøkene følger Torricellis' lov (Formel 3) som sier at det er en kvadratisk sammenheng mellom volumstrøm og viskøse tap. Modellen er benyttet i laboratorieforsøk for å beskrive tettings- og gjenåpningsgrad. I laboratorieforsøkene ble permeabel betong utsatt for gjentetting av partikkelfraksjonene 0,25 – 0,8 mm. Gjentetting førte til et kapasitetstap på omtrent 48 %, mens gjenåpning med høytrykkspyler gjenvant 74 % av den opprinnelige kapasiteten. Resultatene viste også at det skjer en initiell tetting av den permeable betongen.

Frostforsøk gir ingen særlig grunn til å kunne konkludere i noen retning annet enn at den permeable betongringen som forsøksgjennomføringen er gjort på, har tålt dette. Samtidig har informasjon fra laboratorietestene gitt grunn til å tro at det er luft fanget i porene til det permeable sandfanget, som kan gjøre betongen mer motstandsdyktig mot frostsprengning.

In situ-forsøk viste at sandfangene som ble testet har stor nok hydraulisk kapasitet til å håndtere 200-års regn med varigheter på 5 minutter og 25 minutter. Det var heller ikke noen tydelig endring i hydraulisk kapasitet for sandfangene et halvt år etter de første forsøkene ble gjennomført.

Forsøkene har vist permeable sandfanget, vil være et nyttig LOD-verktøy, som kan benyttes til infiltrasjon og magasinering. Som trinn 1 tiltak vil oppimot all årsnedbør og derfor nesten alle forurensninger håndteres lokalt. Som trinn 2 tiltak vil grøftevolumet avlaste renseanleggene og svært lite forurensning vil gå i overløp ved store nedbørshendelser.

I fortsettelse av forsøkene som er gjort i denne oppgaven så vil en videre oppfølging av de samme sandfangene kunne gi mer informasjon om tetting og oppfylling av slam over tid. Det vil da være mulig å opparbeide bedre drifts og vedlikeholdsrutiner. Det vil også være fordelaktig for drift om det utvikles en digital sensor som varsler når slamvolumet må tømmes.

Videre arbeid som å gjøre kontrollerte fullskala forsøk med sand for å se på tetting og gjenåpning i en reell situasjon vil være nyttig, fordi det ikke er sikkert laboratorieforsøkene er direkte overførbare til en reell situasjon. Fullskala forsøk bør også kunne belyse hvor god partikkeltilbakeholdelsen er inne i det permeable sandfanget.

Ved videre forsøk burde den permeable betongen tettes og gjenåpnes flere runder for å se om det samme gjentar seg. Ut ifra laboratorieforsøk kunne det se ut som man når et punkt hvor tettingen skjer mer langsomt. Det kan være en idé å gjøre forsøk med en større variasjon av partikkelfraksjoner og slam med biologisk materiale. Det kan være at partiklene komplementere hverandre og føre til at mindre partikkelstørrelse etter hvert kan føre til gjentetting, og hvis slammet er klebrig kan dette også være med på å tette.

For å få mer informasjon om frostbestandigheten til permeabel betong burde det gjøres flere frostforsøk, også forsøk hvor betongen er vannmettet mens vannet fryser.

Det burde forsøkes å benytte det permeable sandfanget sammen med andre renseløsninger som filterpose, lettklinkere eller som et fordelingsverktøy til infiltrasjonsgrøft. Dette vil holde tilbake en stor del av partikkelfraksjonene som fører til tetting samtidig som man får spredt vannet i hele grøftetverrsnittet.

7 KILDER

BASAL AS. (u.å.-a). *BASAL sandfang DN 1000*. Hentet 06.05.2022 fra <https://www.basal.no/produkter/basal-sandfang-dn-1000/>

BASAL AS. (u.å.-b). *Permakum*. Hentet 06.05.2022 fra <https://www.basal.no/produkter/permakum-2/>

Bertrand-Krajewski, J.-L., Chebbo, G. & Saget, A. (1998). Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Water Research*, 32(8), 2341-2356. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00420-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00420-X)

Bollen, C. & Peeters, R. *POREUZE BETONBUIZEN IN DE WEGENBOUW*. <https://docplayer.nl/5437978-Poreuze-betonbuizen-in-de-wegenbouw.html>

Bolognesi, A., Casadio, A., Ciccarello, A., Maglionico, M. & Artina, S. (2008). Experimental study of roadside gully pots efficiency in trapping solids washed off during rainfall events.

Boving, T. B., Stolt, M. H., Augenstern, J. & Brosnan, B. (2008). Potential for localized groundwater contamination in a porous pavement parking lot setting in Rhode Island. *Environmental Geology*, 55(3), 571-582. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1008-z>

Butler, D. & Karunaratne, S. H. P. G. (1995). The suspended solids trap efficiency of the roadside gully pot. *Water Research*, 29(2), 719-729. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00149-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00149-2)

Chen, Y., Wang, K., Wang, X. & Zhou, W. (2013). Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 42, 97-104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.006>

Darcy, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon, Dalmont. *Paris: Dalmont*.

Forchheimer, P. (1901). Wasserbewegung durch boden. *Z. Ver. Deutsch, Ing.*, 45, 1782-1788.

Hendrix, D. & Wathion, K. (2016). *Duurzaamheid van poreuze betonbuizen als infiltratievoorziening* [Hasselt Universitet]. https://tubobel.group/wp-content/uploads/2021/01/Masterproef_DriesHendrix_KevinWathion.pdf

Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E. & Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of The Total Environment*, 586, 127-141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>

Huang, J. D., Zhang, Y., Sun, Y. T., Ren, J. L., Zhao, Z. D. & Zhang, J. F. (2021). Evaluation of pore size distribution and permeability reduction behavior in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 290, Artikel 123228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123228>

Ibrahim, A., Mahmoud, E., Yamin, M. & Patibandla, V. C. (2014). Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. *Construction and Building Materials*, 50, 524-529. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.022>

IJINUS. (2019). *LNU06V3 - Battery powered level sensors & Wireless communications*. Hentet 06.05.2022 fra <https://www.processpartner.no/globalassets/catalog/ds/data-sheet-wireless-data-loggers-lnu06v3-level-sensors.pdf>

Jartun, M., Ottesen, R. T., Steinnes, E. & Volden, T. (2008). Runoff of particle bound pollutants from urban impervious surfaces studied by analysis of sediments from stormwater traps. *Science of The Total Environment*, 396(2-3), 147-163.

Joshaghani, A., Ramezani pour, A. A., Ataei, O. & Golroo, A. (2015). Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 101, 317-325. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.094>

Kayhanian, M., Anderson, D., Harvey, J. T., Jones, D. & Muhunthan, B. (2012). Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. *Journal of Environmental Management*, 95(1), 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.021>

Kayhanian, M., Fruchtman, B. D., Gulliver, J. S., Montanaro, C., Ranieri, E. & Wuertz, S. (2012). Review of highway runoff characteristics: Comparative analysis and universal implications. *Water Research*, 46(20), 6609-6624. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.07.026>

Kia, A., Wong, H. S. & Cheeseman, C. R. (2017). Clogging in permeable concrete: A review. *Journal of Environmental Management*, 193, 221-233. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.018>

KROHNE. (2018). *WATERFLUX 3000*. Hentet 06.05.2022 fra <https://www.instrumart.com/assets/Krohne-WATERFLUX3000-datasheet.pdf>

Lager, J. A., Smith, W. G. & Tchobanoglous, G. (1977). CATCHBASIN TECHNOLOGY OVERVIEW AND ASSESSMENT. *US Environmental Protection Agency*, (EPA-600/2-77-051), 143.

Lee, H., Lau, S.-L., Kayhanian, M. & Stenstrom, M. K. (2004). Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges. *Water Research*, 38(19), 4153-4163. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.07.012>

Leikanger, E. & Roseth, R. (2016). *Veivrenning og driftstiltak. Overvåking av avrenning samt oppfølging av feie- og sandfangmasser ved ulik veidrift* (2(144)2016). Norsk institutt for bioøkonomi.

Lindholm, O. (2015a). *Dimensjonering av avløpsledninger. Selvrensing*. VA-/miljøblad.

Lindholm, O. (2015b). Forurensingstilførsler fra veg og betydningen av å tømme sandfang. *Vann*, (01).

Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Sægrov, S., Jakobsen, G. & Aaby, L. (2008). *Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering* (162). Norsk Vann.

Lindholm, O. & Haraldsen, S. (2013). Miljøgifter i overvann fra tette flater, reneanlegg og overløp - Case Indre Oslofjord. *Norsk vannforening*, 48(2). https://vannforeningen.no/wp-content/uploads/2015/06/2013_875971.pdf

Lund, M., Hansen, K., Jensen, A., Mølgaard, E. & Madsen, P. (2018). Self-Compacting Pervious Concrete Mix Design for Permeable Concrete Soakaway Rings. *Advances in Civil Engineering Materials*, 7, 20170153. <https://doi.org/10.1520/ACEM20170153>

Moghadas, S., Paus, K. H., Muthanna, T. M., Herrmann, I., Marsalek, J. & Viklander, M. (2015). Accumulation of Traffic-Related Trace Metals in Urban Winter-Long Roadside Snowbanks. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226(12), 404. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2660-7>

Mosevoll, G. & Lindholm, O. (1986). *Sandfang i avløpsledninger fra gater og veier* (50/86). NTNF, Program for VAR-teknikk.

Norsk klimaservicesenter. (2021, 31.12.2021). *Nedbørintensitet (IVF-verdier)*. Hentet 02.05.2022 fra <https://klimaservicesenter.no/ivf?locale=nb&locationId=SN20300>

Paus, K. H. (2018). Forslag til dimensjonerende verdier for trinn 1 i Norsk Vann sin tre-trinns strategi for håndtering av overvann. *Vann*, 53(1).

PEPPERL+FUCHS. (2021). *Ultrasonic sensor UB1000-18GM75-U-V15*. Hentet 06.05.2022 fra https://files.pepperl-fuchs.com/webcat/navi/productInfo/pds/204536_eng.pdf?v=20181211000209

Pitt, R., Maestre, A. & Morquecho, R. (2004). The National Stormwater Quality Database (NSQD, version 1.1) *1st Annual Stormwater Management Research Symposium Proceedings*, 13-51. <http://rpitt.eng.ua.edu/research/ms4/paper/MS4%20Feb%2016%202004%20paper.pdf>

PTV 104. (2011). *CIRKELVORMIGE GEPERFOREERDE BUIZEN, CIRKELVORMIGE POREUZE BUIZEN EN HULPSTUKKEN VAN ONGEWAPEND BETON VOOR DRAINEER- EN*

INFILTRATIELEIDINGEN Probeton <https://docplayer.nl/10023580-Probeton-vzw-aarlenstraat-53-b9-1040-brussel-tel-32-0-2-237-60-20-fax-32-0-2-735-63-56-mail-probeton-be-www-probeton-be.html>

Slezakova, K., Castro, D., Delerue–Matos, C., Alvim–Ferraz, M. d. C., Morais, S. & Pereira, M. d. C. (2013). Impact of vehicular traffic emissions on particulate-bound PAHs: Levels and associated health risks. *Atmospheric Research*, 127, 141-147.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.009>

Solheim, E. & Friborg, T. (2019). *Infiltrasjon av overvann*. VA-/miljøblad.

Statens vegvesen. (2018). *Håndbok N200 - Vegbygging*. Vegdirektoratet.

Statens vegvesen. (2020). *Håndbok V240-Vannhåndtering - Flomberegning og hydraulisk dimensjonering* Vegdirektoratet.

Stokes, G. G. (1851). On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums.

Torricelli, E. (1644). *Opera Geometrica. Opere di Evangelista Torricelli*.

Yang, J. & Jiang, G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cement and Concrete Research*, 33(3), 381-386.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00966-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00966-3)

Yong, C., Deletic, A., Fletcher, T. & Grace, M. (2008). The clogging behaviour and treatment efficiency of a range of porous pavements. 11th international conference on urban drainage,

Ødegaard, H. (Red.). (2014). *Vann- og avløpsteknikk* (2. utg.). Norsk Vann.

Åstebøl, S. O., Dalen, H., Henninge, L. B. & Vollertsen, J. (2021). Forurensninger i overvann fra urbane flater – vannmiljøsmål og rensetiltak (B27/2021).

Åstebøl, S. O. & Hvitved-Jacobsen, T. (2014). *Vannbeskyttelse i vegplanlegging og vegbygging* (Nr. 295). Statens vegvesen. <https://hdl.handle.net/11250/2658960>

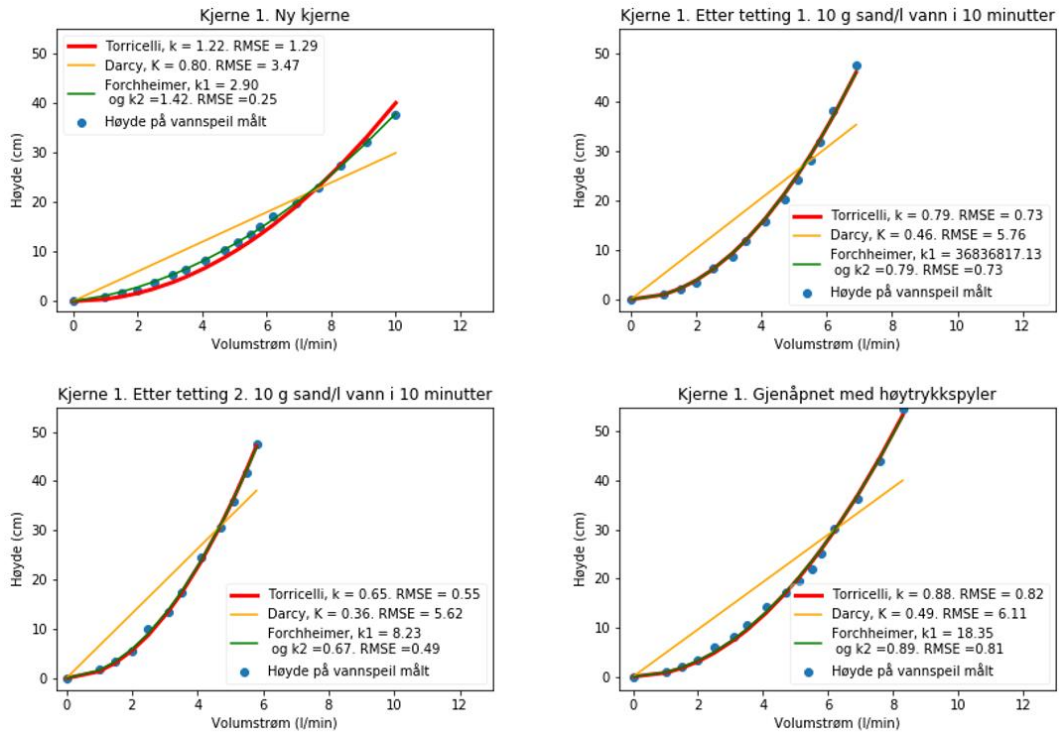
VEDLEGG 1

I dette vedlegge er alle plottene for tilpasning av modell. I del 1 ligger tilpasning av modellene for Torricelli, Darcy og Forchheimer, og en tabell over alle standardavvikene. I del 2 er alle Forchheimer plottene splittet til å vise det relative bidraget fra Torricelli og Darcy.

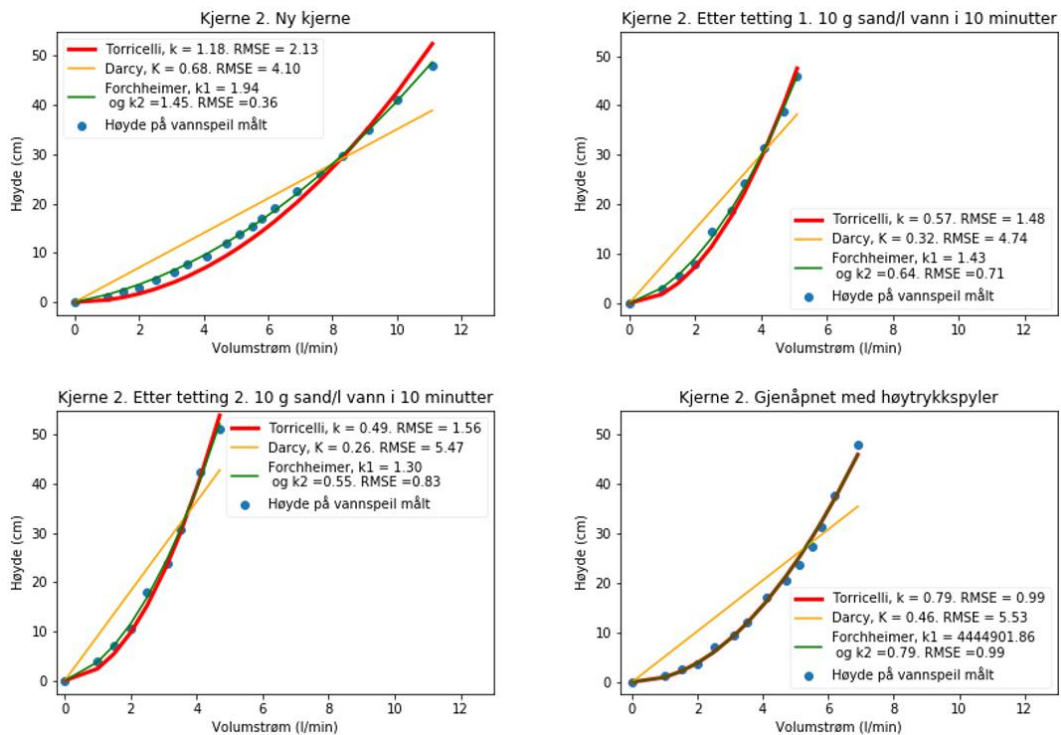
Del 1

Tabell 10: Tabellen viser det avviket (RMSE) for tilpasning av modellene til alle forsøkene som er gjort på kjernene. Tallene er hentet i tilknytning til de hydrauliske forsøkene, hvor Torricelli er forkortet til T, Darcy til D og Forchheimer til F. Avvikene er minst for Forchheimer og Torricelli og høyest for Darcy i alle tilfeller..

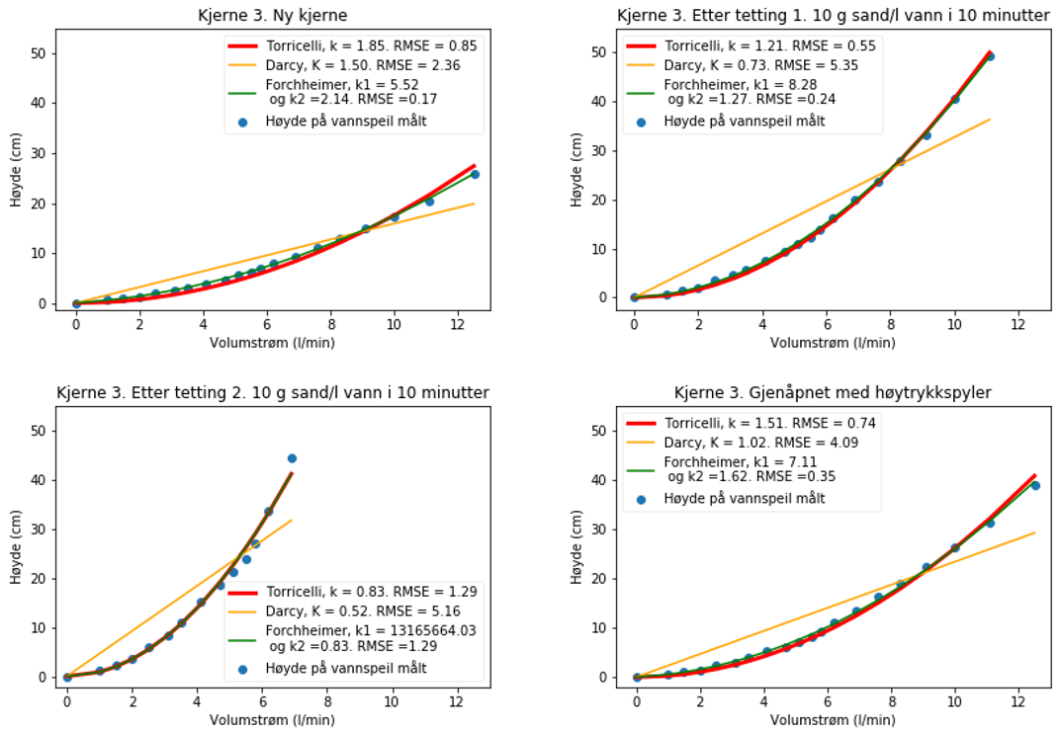
Kjerne	RMSE											
	Ny kjerne			Gjentetting 1			Gjentetting 2			Åpnet		
	T	D	F	T	D	F	T	D	F	T	D	F
1	1,29	3,47	0,25	0,73	5,76	0,73	0,55	5,62	0,49	0,82	6,11	0,81
2	2,13	4,10	0,36	1,48	4,74	0,71	1,56	5,47	0,83	0,99	5,53	0,99
3	0,85	2,36	0,17	0,55	5,35	0,24	1,29	5,16	1,29	0,74	4,09	0,35
4	1,55	4,35	0,34	0,59	5,06	0,59	0,93	5,04	0,91	0,53	5,88	0,53
5	0,91	1,99	0,14	0,44	4,66	0,32	0,56	4,96	0,41	0,46	2,86	0,16
6	1,83	3,61	0,37	1,06	5,11	1,06	0,96	5,73	0,72	0,76	6,36	0,61
7	1,14	2,98	0,27	0,53	5,72	0,53	1,52	5,08	0,83	0,49	5,42	0,39
8	1,34	3,54	0,38	0,82	5,53	0,71	1,00	4,90	0,89	0,57	6,26	0,55
9	1,46	2,85	0,32	1,38	5,72	1,37	0,86	5,34	0,85	0,84	5,49	0,52
Gjennomsnittlig avvik	1,39	3,25	0,29	0,84	5,29	0,70	1,03	5,25	0,80	0,69	5,33	0,55



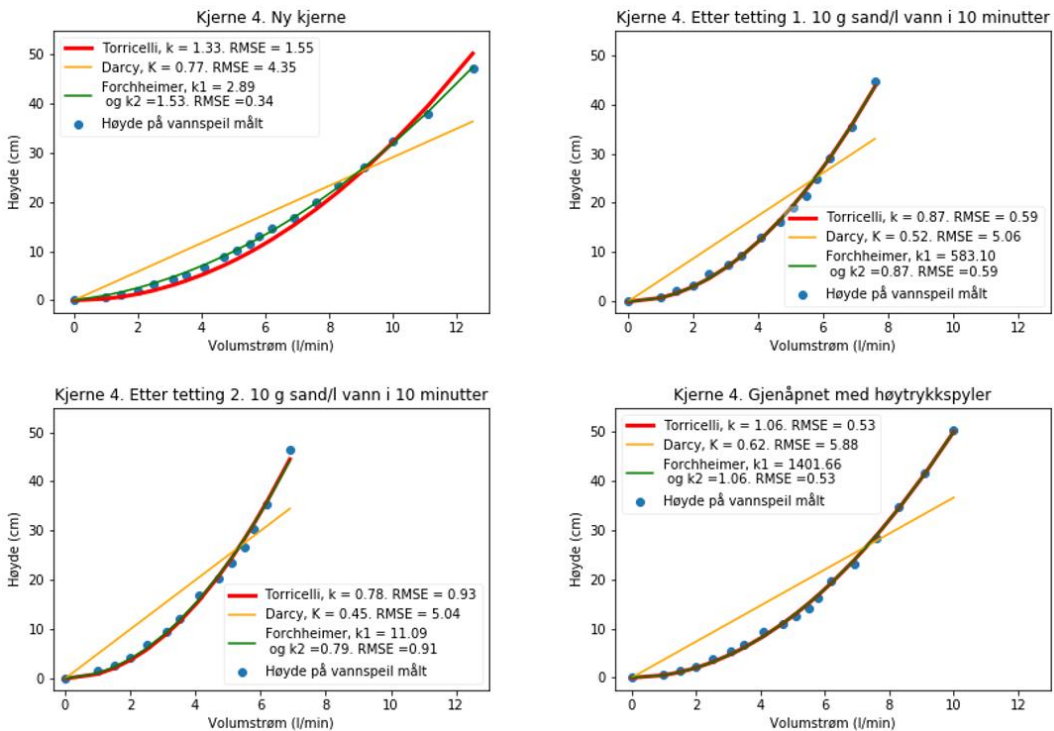
Figur 20: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 1, og viser målte høyder (blå), Torricelli uttrykt med k (rød), Darcy uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Forchheimer og Torricelli gir best tilnærming til målte verdier



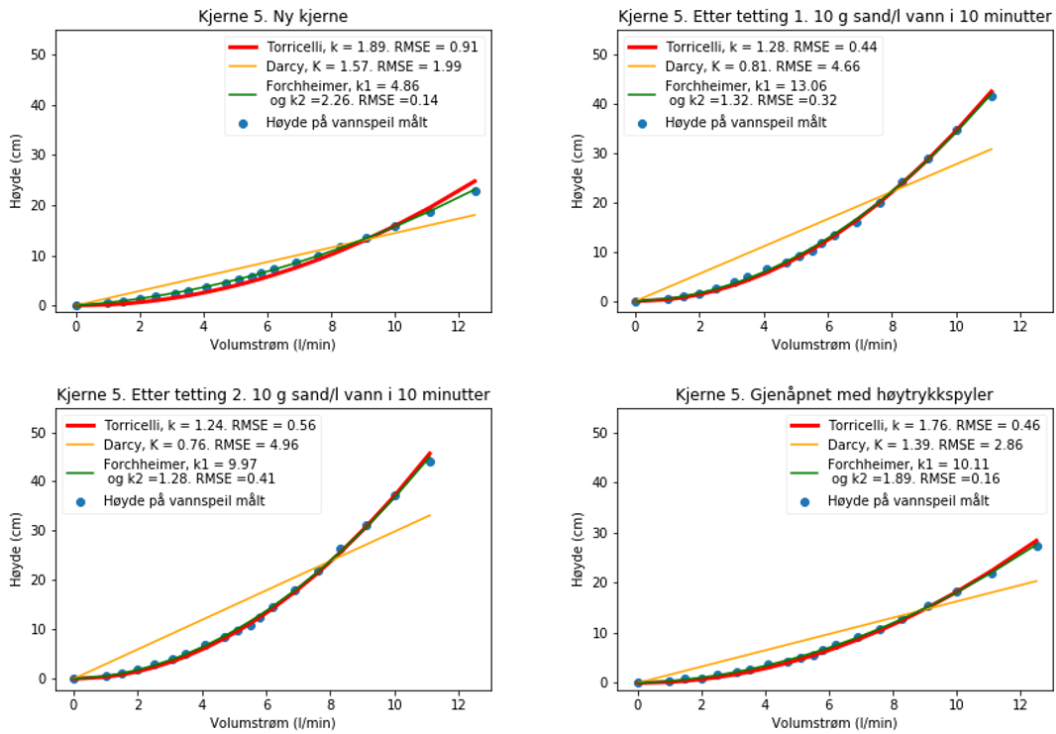
Figur 21: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 2, og viser målte høyder (blå), Torricelli uttrykt med k (rød), Darcy uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Forchheimer og Torricelli gir best tilnærming til målte verdier



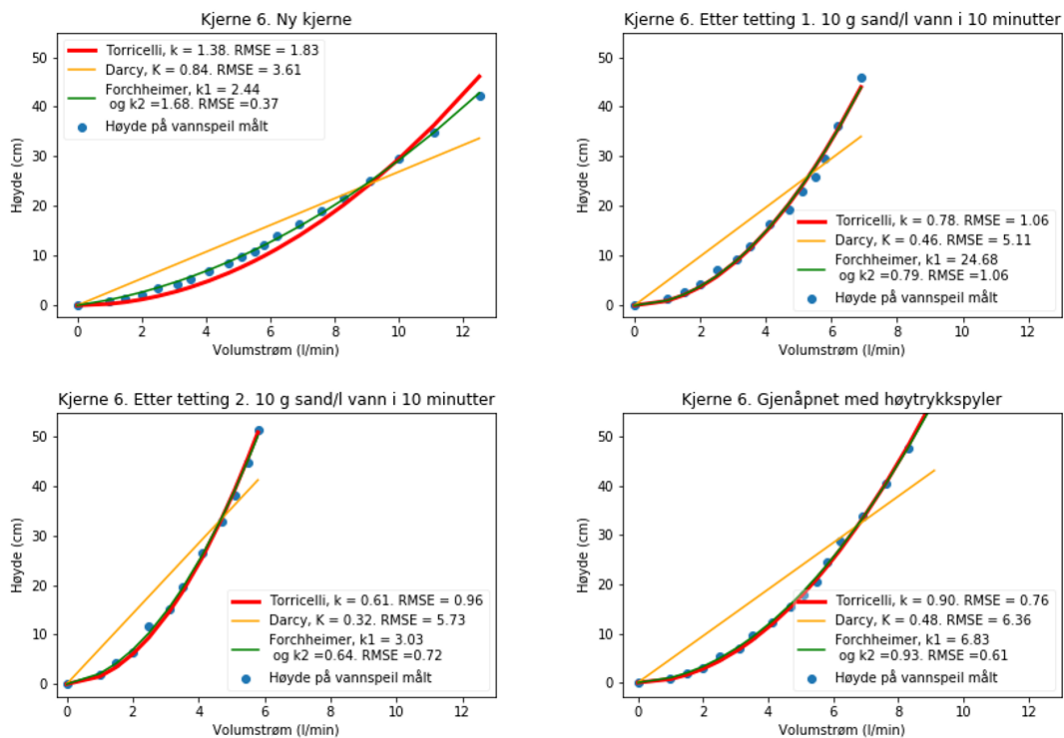
Figur 22: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 3, og viser målte høyder (blå), Torricelli uttrykt med k (rød), Darcy uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Forchheimer og Torricelli gir best tilnærming til målte verdier



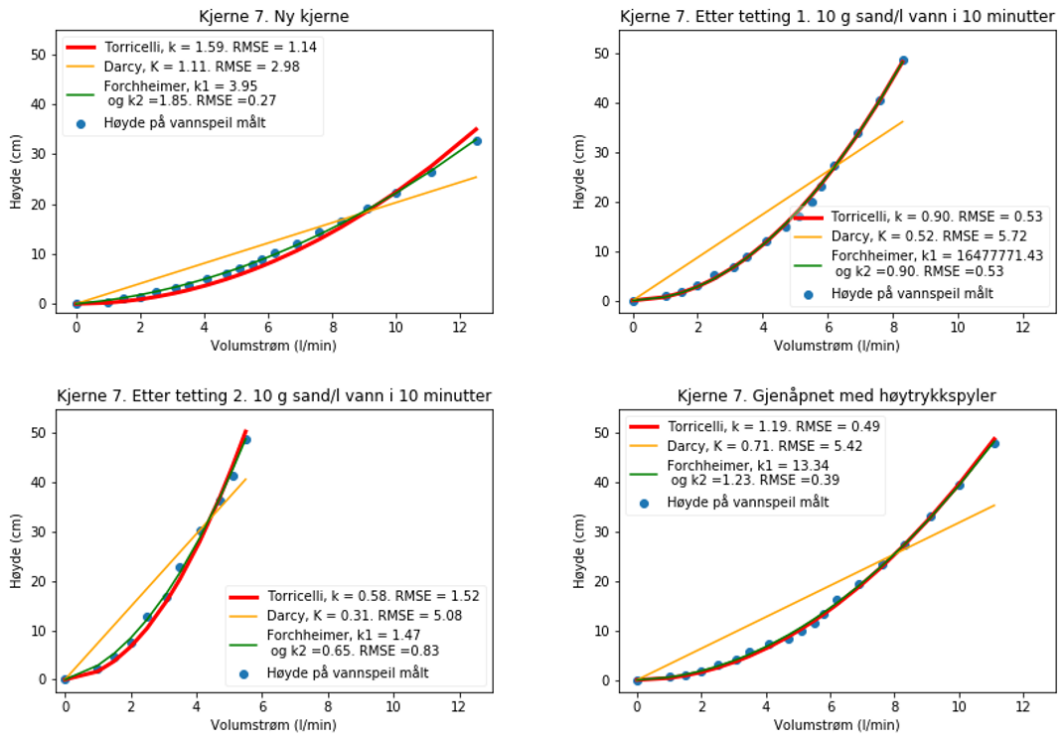
Figur 23: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 4, og viser målte høyder (blå), Torricelli uttrykt med k (rød), Darcy uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Forchheimer og Torricelli gir best tilnærming til målte verdier



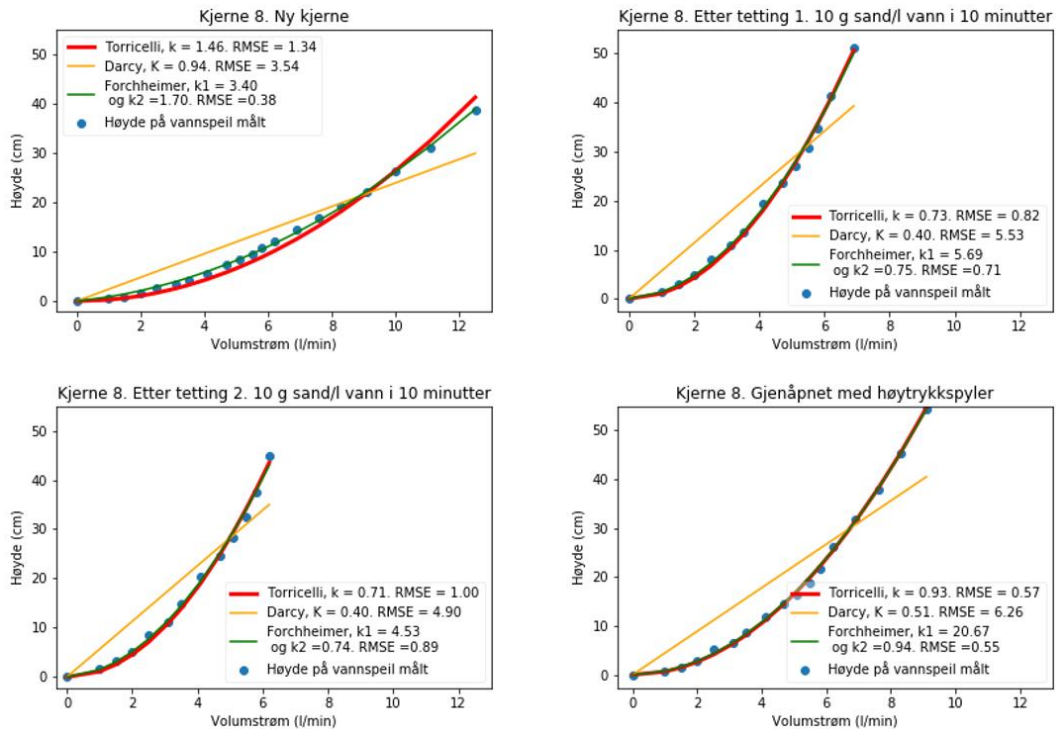
Figur 24: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 5, og viser målte høyder (blå), Torricelli uttrykt med k (rød), Darcy uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Forchheimer og Torricelli gir best tilnærming til målte verdier



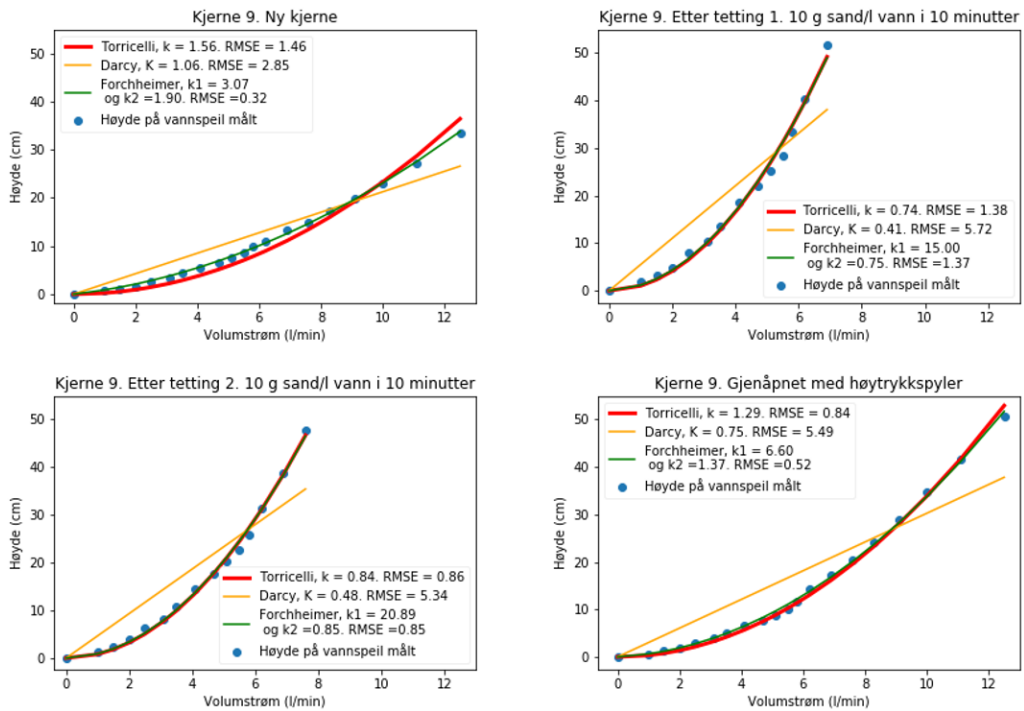
Figur 25: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 6, og viser målte høyder (blå), Torricelli uttrykt med k (rød), Darcy uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Forchheimer og Torricelli gir best tilnærming til målte verdier



Figur 26: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 7, og viser målte høyder (blå), Torricelli uttrykt med k (rød), Darcy uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Forchheimer og Torricelli gir best tilnærming til målte verdier

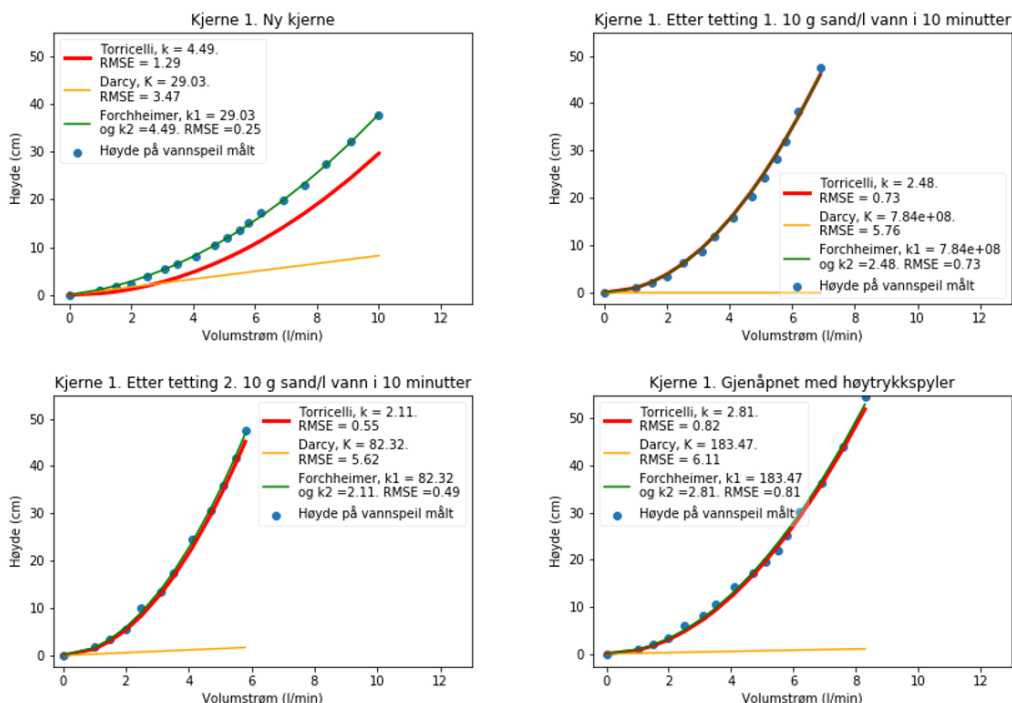


Figur 27: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 8, og viser målte høyder (blå), Torricelli uttrykt med k (rød), Darcy uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Forchheimer og Torricelli gir best tilnærming til målte verdier

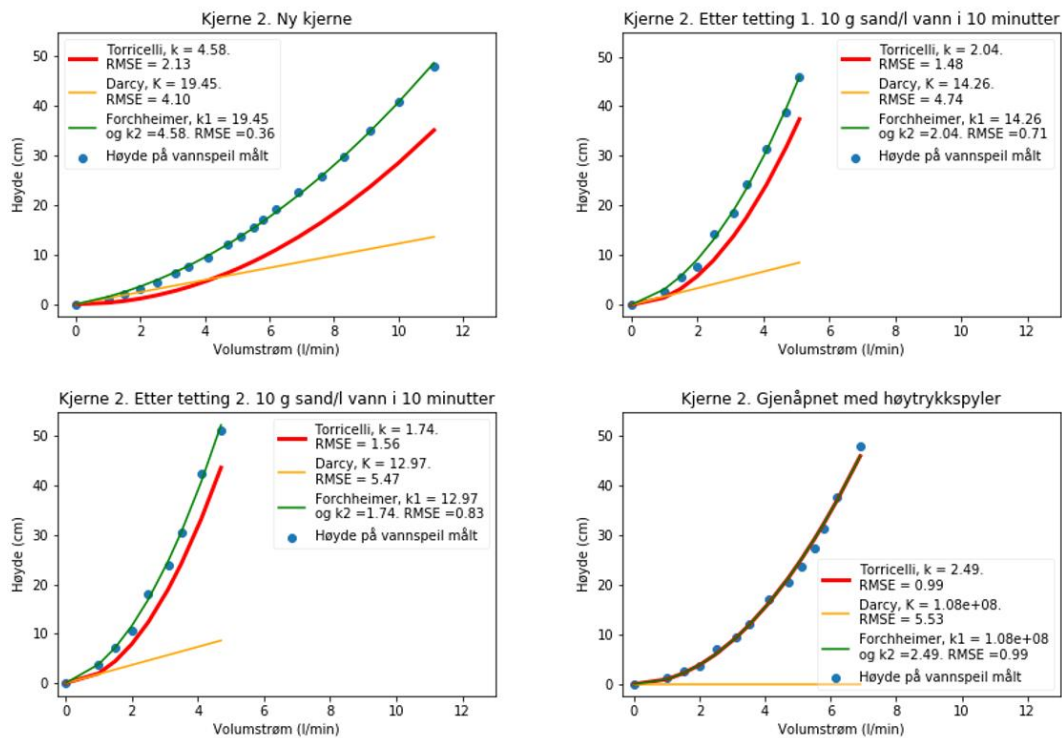


Figur 28: Plottene er av resultatene fra forsøk på kjerne nr. 9, og viser målte høyder (blå), Torricelli uttrykt med k (rød), Darcy uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Forchheimer og Torricelli gir best tilnærming til målte verdier

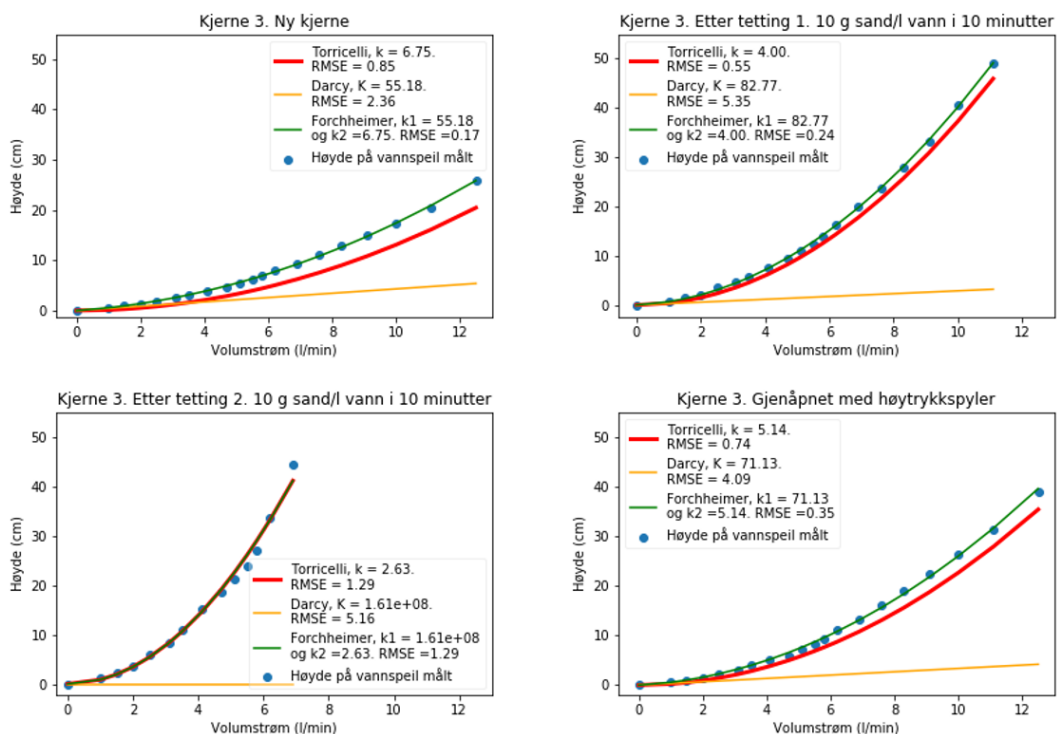
Del 2



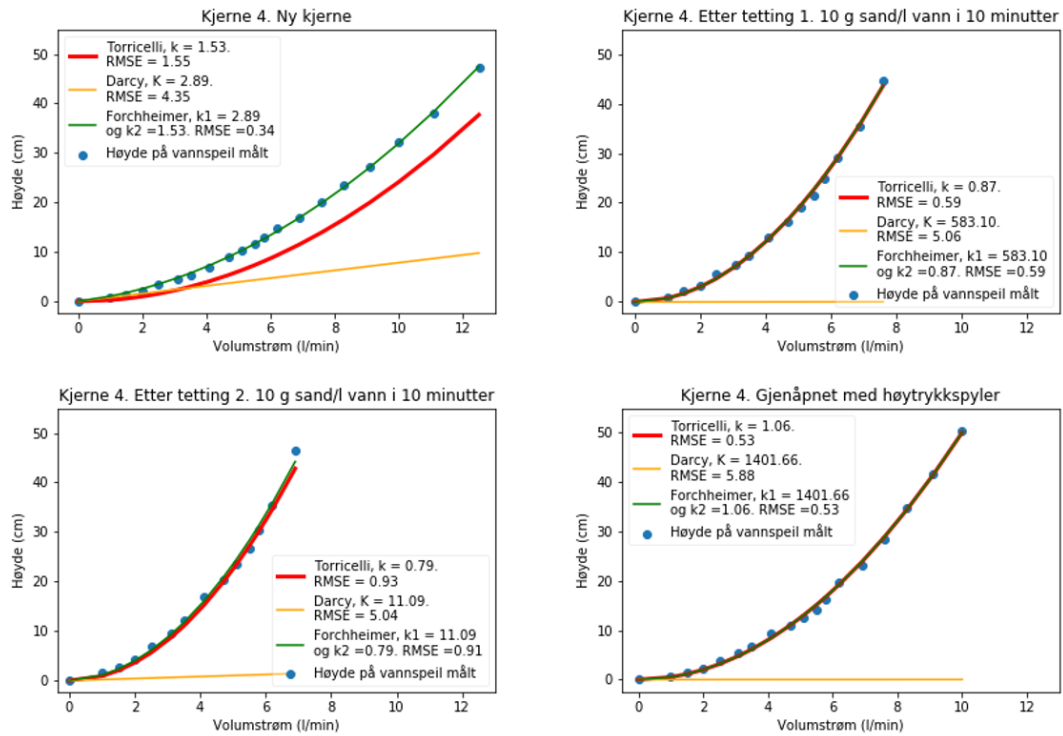
Figur 29: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for forsøk på kjerne nr. 1. Her er målte høyder (blå), Torricelli-leddet uttrykt med k (rød), Darcy-leddet uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Torricelli-bidraget er størst.



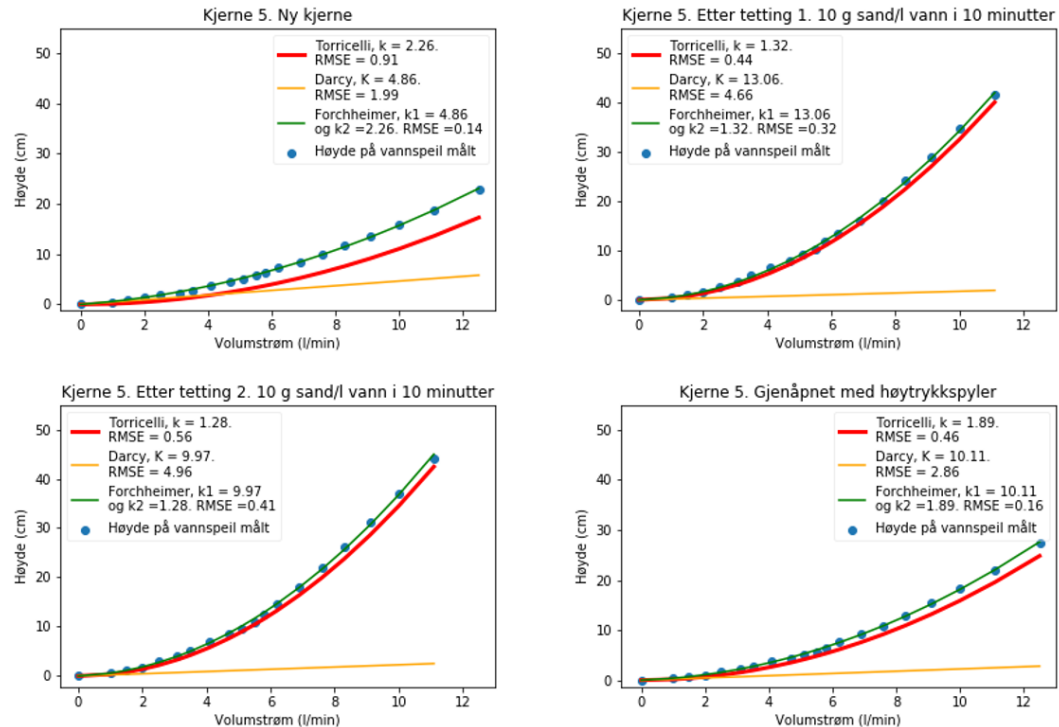
Figur 30: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for forsøk på kjerne nr. 2. Her er målte høyder (blå), Torricelli-leddet uttrykt med k (rød), Darcy-leddet uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Torricelli-bidraget er størst.



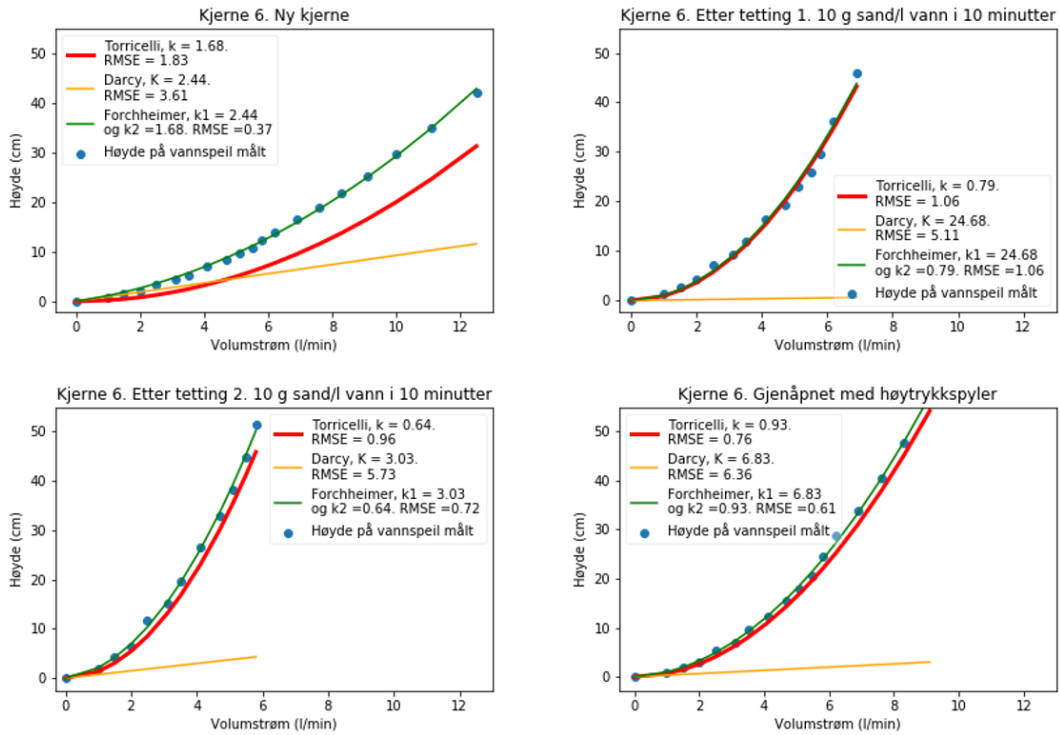
Figur 31: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for forsøk på kjerne nr. 3. Her er målte høyder (blå), Torricelli-leddet uttrykt med k (rød), Darcy-leddet uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Torricelli-bidraget er størst.



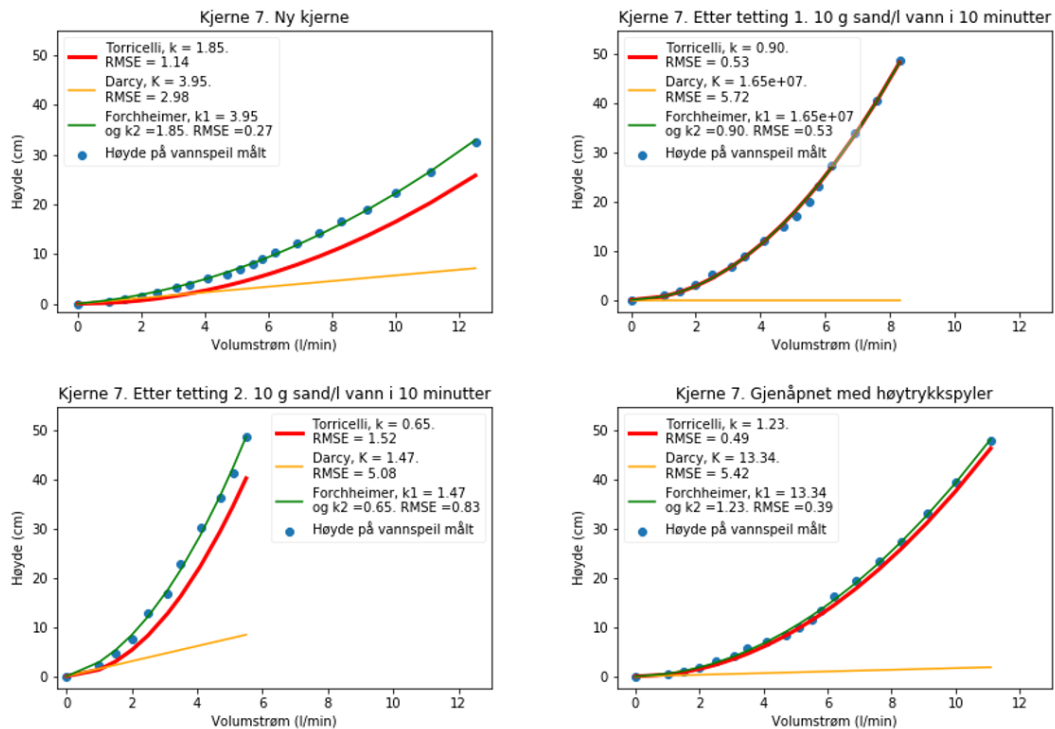
Figur 32: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for forsøk på kjerne nr. 4. Her er målte høyder (blå), Torricelli-leddet uttrykt med k (rød), Darcy-leddet uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Torricelli-bidraget er størst.



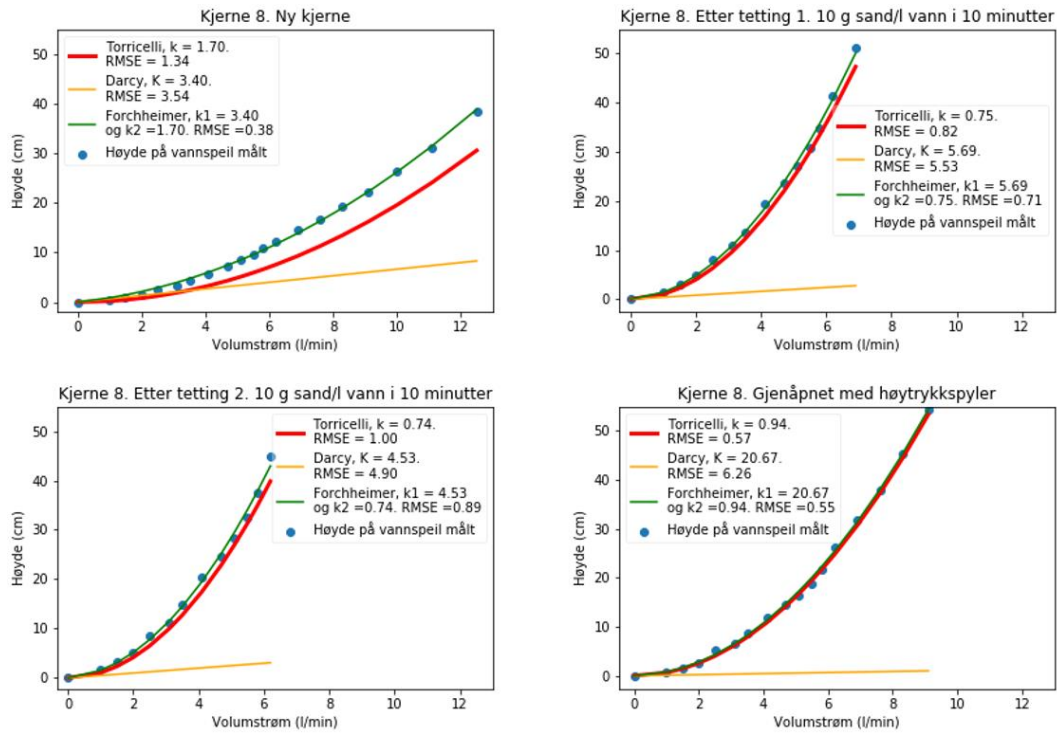
Figur 33: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for forsøk på kjerne nr. 5. Her er målte høyder (blå), Torricelli-leddet uttrykt med k (rød), Darcy-leddet uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Torricelli-bidraget er størst.



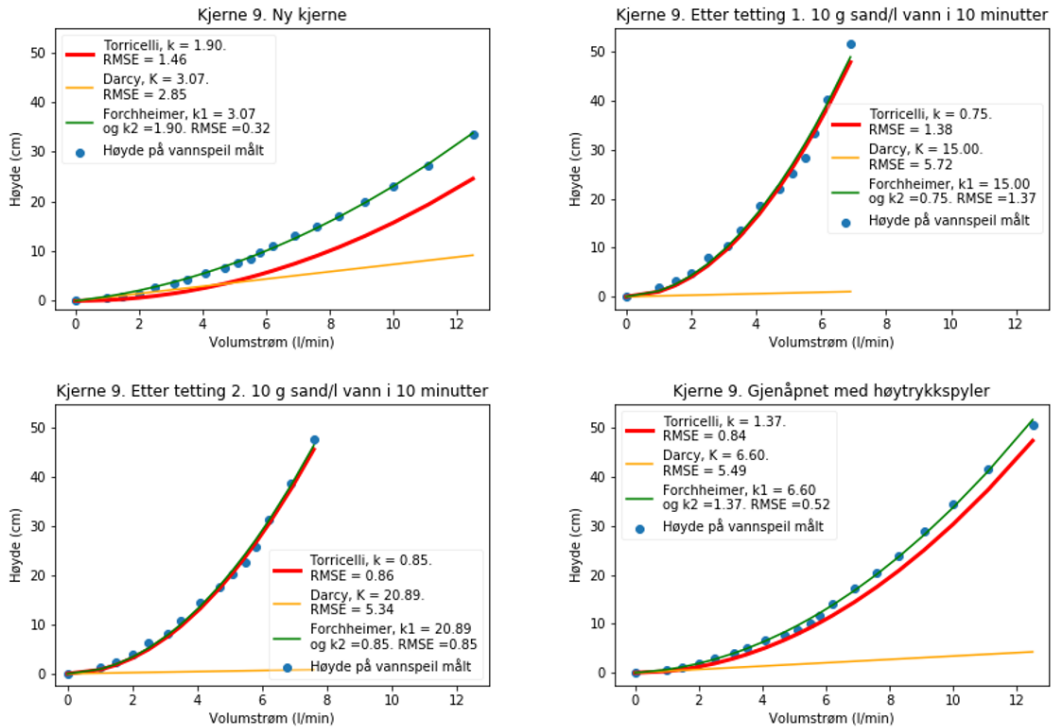
Figur 34: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for forsøk på kjerne nr. 6. Her er målte høyder (blå), Torricelli-leddet uttrykt med k (rød), Darcy-leddet uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Torricelli-bidraget er størst.



Figur 35: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for forsøk på kjerne nr. 7. Her er målte høyder (blå), Torricelli-leddet uttrykt med k (rød), Darcy-leddet uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Torricelli-bidraget er størst.



Figur 36: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for forsøk på kjerne nr. 8. Her er målte høyder (blå), Torricelli-leddet uttrykt med k (rød), Darcy-leddet uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Torricelli-bidraget er størst..

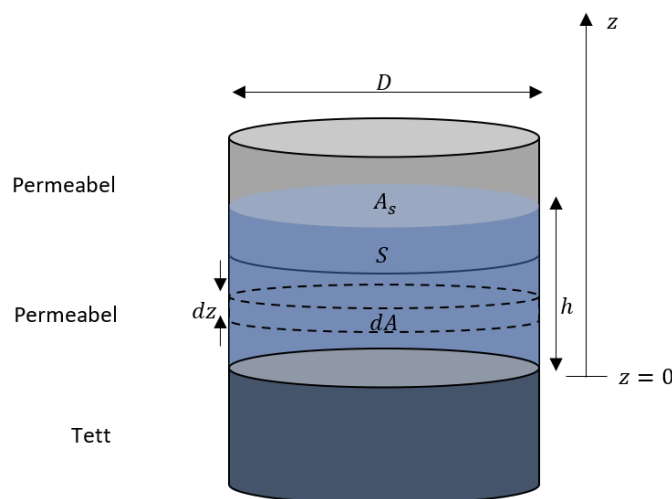


Figur 37: Bidrag fra Torricelli og Darcy i Forchheimer-uttrykket er gitt for forsøk på kjerne nr. 9. Her er målte høyder (blå), Torricelli-leddet uttrykt med k (rød), Darcy-leddet uttrykt med K (gul) og Forchheimer uttrykt med k_1 som tilsvarer K og k_2 som tilsvarer k i modellen (grønn). Avviket er gitt med minste kvadraters metode (RMSE) og viser at Torricelli-bidraget er størst..

VEDLEGG 2

I dette vedlegget ligger utledning av de matematiske modellene brukt til å forklare strømningsbilde både for de permeable kjernene og for det permeable sandfanget.

Skisse for modell for permeabelt sandfang i felt



Figur 38: Skisse for modell for permeabelt sandfang i felt, hvor D er indre diameter av kummen, A_s er overflate arealet til vannspeilet, S er vannvolumet i kummen i den permeable delen, dA er en liten del av veggarealet til kumveggen, dz er en liten del av høyden til kumveggen, h er høyden til vannspeilet og z er høyden som vannspeilshøyden kan variere over.

Feltforsøk gjennomføres ved å fylle kummen med vann, stoppe vanntilførselen og måle samhoørende tidspunkter og vannnivåer i kummen. Det er altså ikke-stasjonær strømming. Målet er her å bygge en enkel matematisk modell som kan brukes til å beskrive/forstå utløps-karakteristikken for et nytt permeabelt sandfang, dvs. at strømnings-motstanden gjennom veggen antas å være den samme over hele den permeable delen av kummen. Det antas også at massene rundt kummen ikke bidrar med strømningsmotstand.

Kontinuitetslikningen for kummen er gitt ved:

$$\frac{dS}{dt} = Q_{\text{inn}}(t) - Q_{\text{ut}}(h)$$

Her er S vannvolumet i kummen i den permeable delen, t er tiden, Q_{inn} er vannføringen inn i kummen og Q_{ut} er vannføringen ut av kummen. Vi har at $S = A_s h$, der A_s er tverrsnittsarealet til kummen og h er vanddybden i den permeable delen. Vi studerer tømmefasen der $Q_{\text{inn}} = 0$. Dette gir:

$$A_s \frac{dh}{dt} = -Q_{\text{ut}}(h)$$

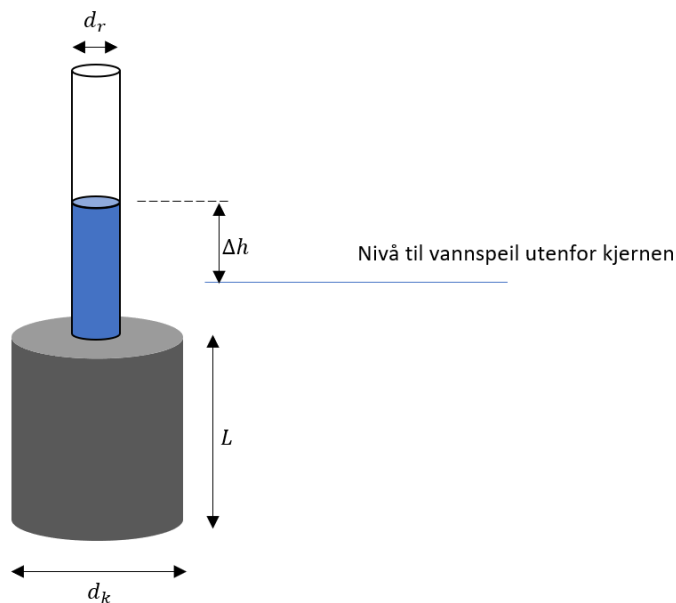
Videre blir Q_{ut} uttrykt som funksjon av h . Ettersom strømmingen ut av kummen er jevnt fordelt over hele den dykkede flaten, integreres volumstrømmen per veggareal over høyden. La dA betegne veggarealet til en liten del av kummen med høyde dz . Volumstrømmen per enhet veggareal kalles q_{ut} og varierer med z . Når kumdiameteren betegnes som D gir dette:

$$dQ_{\text{ut}}(z) = q_{\text{ut}}(z)dA = q_{\text{ut}}(z)\pi D dz$$

Denne integreres opp fra $z = 0$ til $z = h$, og gir et uttrykk for total vannføring ut av kummen

$$Q_{\text{ut}}(h) = \pi D \int_0^h q_{\text{ut}}(z) dz$$

Skisse for modell for borekjerne i lab



Figur 39: Skisse for modell for borekjerne i lab. Indeks r er for rør og indeks k er for borekjerne. d_r er diameteren til tilførselsrøret, d_k er diameteren til borekjerne, L er lengde av kjernen og Δh er høyden mellom vannspeilene.

I figuren over betegner indeks k kjerne og indeks r rør. Laboratorieforsøkene foregår ved stasjonær strømming og kontinuitetslikningen blir enkel og gir $Q = \text{konstant}$.

Reynoldstall for strømming i porøse medier

Reynoldstallet for strømming i porøse medier er gjerne definert som

$$\text{Re} = \frac{qd}{\nu}$$

der q er vannføring per arealenhet (q_{ut}) i dette tilfelle, d er en representativ kornstørrelse (f.eks. d_{30} eller d_{50}) og ν er kinematisk viskositet for vann. For $Re < 1$ regner man med at man har «vanlig» strømming for et porøst medium, dvs. strømming som følger Darcy's lov. For høyere Reynoldstall får man avvik fra Darcy's lov og må ta i bruk Forcheimer-uttrykk (middels Re) eller Torricelli-uttrykk (høye Re).

Under formuleres modeller for feltforsøk og labforsøk for ulike strømningsregimer.

Blendestrømning/Torricelli-strømning (høye Re) – feltforsøk

Hvis strømmingen gjennom porene skjer ved høyt Reynoldstall, får vi noe som tilsvarer blendestrømning der hastigheten gjennom veggen avhenger av kvadratroten av den lokale vannhyben, dvs. et Torricelliuttrykk. Ettersom det her strømmer gjennom et porøst medium (og ikke en tynn plate, som vi ofte forbinder med Torricelli), er det hensiktsmessig å uttrykke q vha. den hydrauliske gradienten, altså $(h - z)/L$. Dette kan da skrives som (forutsatt horisontal strømming gjennom kumveggen)

$$q_{\text{ut}}(z) = k \sqrt{\frac{h - z}{L}}$$

, der k er en proporsjonalitetskonstant og L er tykkelsen på kumveggen. Merk at denne formuleringen forutsetter at det ikke er noe vannspeil på utsiden av kummen.

Uttrykket for $Q_{\text{ut}}(h)$ i dette tilfellet blir:

$$Q_{\text{ut}}(h) = \frac{\pi D k}{\sqrt{L}} \int_0^h \sqrt{h - z} dz = \frac{2\pi D k h^{3/2}}{3\sqrt{L}}$$

Det vil si at vi forventer at konstanten k kan estimeres fra målinger ved å studere forholdstallet

$$k = \frac{3\sqrt{L}Q_{\text{ut}}}{2\pi D h^{3/2}}$$

Blendestrømning/Torricelli-strømning (høye Re) – labforsøk

For labforsøkene blir Torricelli-uttrykket ved:

$$q = k \sqrt{\frac{\Delta h}{L}}$$

Som gir:

$$Q = A_k k \sqrt{\frac{\Delta h}{L}} \Leftrightarrow \Delta h = L \left(\frac{Q}{k A_k} \right)^2$$

Darcy-strømning (lave Re) – feltforsøk

Hvis strømmingen gjennom porene skjer ved lavt Reynoldstall, får man noe som tilsvarer grunnvannsstrømning som følger Darcy's lov, dvs. at man får et uttrykk på formen:

$$q_{\text{ut}}(z) = K \frac{h - z}{L}$$

der K er den hydrauliske konduktiviteten til kjernen.

Uttrykket for $Q_{\text{ut}}(h)$ i dette tilfellet blir:

$$Q_{\text{ut}}(h) = \frac{\pi D K}{L} \int_0^h (h - z) dz = \frac{\pi D K h^2}{2L}$$

Det vil si at vi forventer at K kan estimeres fra målinger ved å studere forholdstallet:

$$K = \frac{2L Q_{\text{ut}}}{\pi D h^2}$$

Darcy-strømning (lave Re) – labforsøk

For labforsøkene blir Darcy-uttrykket:

$$q = K \frac{\Delta h}{L}$$

Som gir:

$$Q = A_k K \frac{\Delta h}{L} \Leftrightarrow \Delta h = L \frac{Q}{K A_k}$$

Forchheimer-strømning (middels Re) – feltforsøk

Hvis strømningsregimet ligger et sted mellom blendestrømning og Darcy-strømning, har man det som kalles Forchheimer-strømning. For feltforsøkene kan da sammenhengen mellom q og gradienten uttrykkes på formen:

$$\frac{h - z}{L} = \frac{q_{\text{ut}}}{K} + \left(\frac{q_{\text{ut}}}{k}\right)^2$$

Forchheimer-strømning (middels Re) – labforsøk

For labforsøkene kan Forchheimer-uttrykket skrives på formen:

$$\frac{\Delta h}{L} = \frac{q}{K} + \left(\frac{q}{k}\right)^2 = \frac{Q}{KA_k} + \left(\frac{Q}{kA_k}\right)^2$$



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway