

# Måling av infiltrasjon fra overflaten for bruk av åpen LOD i praksis

Av E.B. Solheim, H.K. French og B.C. Braskerud

Elisabeth B. Solheim var masterstudent ved NMBU og er nå ansatt i Sweco.

Helen K. French er førsteamanuensis ved NMBU.

Bent C. Braskerud er sjefsingeniør i Oslo kommune, Vann- og avløpsetaten.

## Summary

**Site specific infiltration measurements, for Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)**

Sustainable urban drainage systems (SUDS) handles surface runoff through three steps: 1) infiltration, 2) retention and 3) securing safe flood paths. To assess the potential for infiltration (step 1), two field methods for measuring infiltration in the surface were studied: Modified Phillip-Dunne Infiltrometer (MPD) and Doubling Infiltrometer. The infiltration capacity was measured on urban soils with varying clay contents at 6 different locations in Oslo. Field measurements were compared to lab measurements. Urban soils showed great variation in soil physical parameters and infiltration capacity, even inside a plot. The infiltration capacity varied from 1-595 cm/h. The easiest method was MPD, which also showed sufficient accuracy. The advantage with MPD is that multiple infiltration measurements can be performed at the same time, which provides a better coverage of the infiltration capabilities of a property. Compared to the lab methods, field methods were easier, more accurate and cheaper. Even most claysoils handled a 200-year rainfall without surface runoff. This highlights the importance of permeable vegetated surfaces in the city.

## Sammendrag

Lokal overvannsdiskonering (LOD) håndterer overvann gjennom tre trinn: 1) infiltrasjon, 2) fordrøyning og 3) trygge flomveier. Oslo kommune ønsker at overvann infiltreres der det er mulig, men leirholdig grunn anses ofte som uegnet av utbyggere. For å vurdere infiltrasjonspotensialet (trinn 1), er to feltmetoder for å måle infiltrasjon i overflaten studert: Modified Phillip-Dunne infiltrometer (MPD) og Dobbelt-ring-infiltrometer. Infiltrasjonsevnen er målt på urban jord med varierende leirinnhold på 6 forskjellige steder i Oslo. Feltemålingene er sammenlignet med labanalyser. Byjord viser stor variasjon i jordfysiske egenskaper og infiltrasjonsevne, selv innad på en tomt. Infiltrasjonsevnen varierte fra 1-89,5cm/time på de undersøkte lokalitetene. MPD er enklest i bruk og har tilstrekkelig nøyaktighet. Fordelen er at flere infiltrasjonsmålinger kan gjøres samtidig, for god kartlegging av infiltrasjonsevnen på en eiendom. Sammenlignet med lab-metodene var feltmetodene både enklere, nøyaktigere og billigere. De fleste jordartene håndterer et 200-års regnvær uten avrenning på overflaten. Dette viser nytten av å ha infiltrerbare flater i by.

## Innledning

Ved utbygging erstattes naturlige og grønne overflater med tette flater som tak og asfalt. Dette fører til endringer i den naturlige vannbalansen, da vann hindres fra å *infiltrere* (trenge ned) i grunnen. Overflateavrenningen øker både i intensitet og volum, og avrenningsmønsteret endres (Nie et al., 2011). I tillegg reduseres fordampningen og grunnvannsstanden senkes. Grunnvannssenkning kan forårsake setningsskader på bygårder som er bygd på tømmerflåter eller som ikke er tilstrekkelig fundamentert. Innsynking av løsmasser omkring bygninger kan føre til skader på rør og tilkoblinger mellom grunn og bygning.

Det eksisterende avløpsnett er ikke dimensjonert for å håndtere dagens styrtregnhendelser, og i mindre grad framtidens forventede overvannsmengder. Kapasiteten vil derfor overskrides oftere, som igjen fører til oversvømmelser og skade på bygninger og infrastruktur. For å bedre denne situasjonen har det i nyere tid blitt mer fokus på åpen, lokal overvannsdiskonering (LOD), fordi slike systemer kan ha større kapasitet og være mer robust enn nedgravde løsnings, i tillegg til at de grønne og blå elementene i byene forsterkes (se f.eks. Braskerud m.fl., 2017). For å sikre en god overvannshåndtering har Norsk Vann foreslått *3-trinnsstrategien*. Den minste nedbøren infiltreres (trinn 1), den største forsinkes og fordroyes (trinn 2), mens den ekstreme nedbøren ledes bort i trygge flomveier i trinn 3 (Lindholm et al., 2008).

Gjennom bruk av infiltrasjon i grunnen, reduseres overflateavrenningen og belastningen på eksisterende ledningsnett. Infiltrasjon kan være et rimelig og enkelt tiltak. I Oslo kommune skal utbyggere vurdere tomtens egnethet for infiltrasjon som en del av planarbeidet/byggesøknadsprosessen. Ofte stopper videre undersøkelser opp etter å ha studert NGUs løsmassekart som viser at grunnen er leirholdig. Utbyggere er ofte raske til å anta at lokal infiltrasjon er uten praktisk betydning. Becker (2016) har imidlertid vist at infiltrasjon i *plen på leirjord* er fullt mulig. Oslo kommune ønsker derfor at infiltrasjonsevnen er kartlagt gjennom felt-

målinger ved søknad om byggetillatelse.

Bruk av infiltrasjon som tiltak for LOD er avhengig av stor nok infiltrasjonskapasitet i jorden. Urban jord er ofte sterkt modifisert, grunnen kan bestå av gamle bygningsmasser eller være sammenpakket av tunge maskiner. Dette gjør at infiltrasjonen varierer fra område til område, i tillegg vil også topografi, helling og overflatens beskaffenhet påvirke infiltrasjonen. Det vil derfor være vanskelig å vurdere infiltrasjonsevnen uten å gjøre feltundersøkelser.

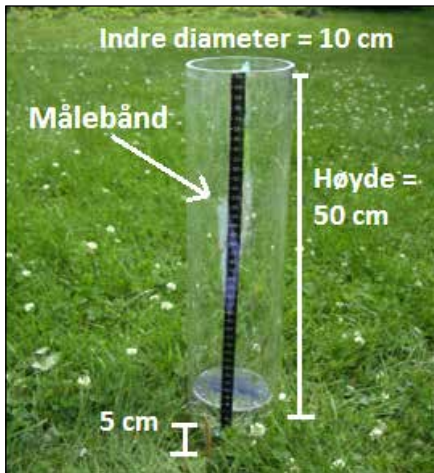
Formålet med dette arbeidet er å finne metoder for å måle infiltrasjon, som er nøyaktige nok for vurdering av åpne LOD tiltak der infiltrasjon er en vesentlig komponent. Det skyldes at kartgrunnet fra NGU er for grovt, og antropogent påvirkede masser kan ha svært ulike egenskaper, noe som gjør det nødvendig med mer detaljerte undersøkelser på den aktuelle tomten. I denne artikkelen sammenlignes ulike metoder for lokale infiltrasjonsmålinger i seks lokaliteter i Oslo i forhold til å kunne håndtere nedbørmengder (< 20 mm) som første trinn i *3-trinnsstrategien*. I tillegg til kvantifisering av infiltrasjonsevnen, gjøres det også en sammenlikning av praktiske hensyn i forhold til å utføre disse metodene på byggegrunn. Artikkelen bygger på undersøkelser utført av Solheim (2017).

## Metode

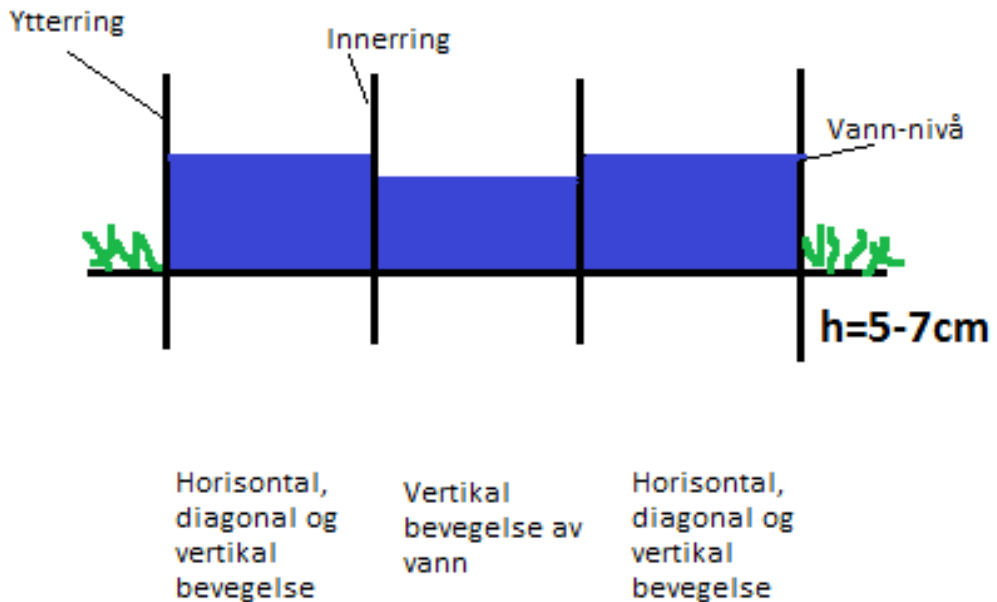
### Måling av infiltrasjon

Infiltrasjon er betegnelsen for prosessen der vann siver ned i grunnen. Becker (2016) viste at det er store forskjeller i jordens infiltrasjonskapasitet om jorden er mettet eller umettet. Målinger av vanninnhold i jorda viste at jorden som vi undersøkte var umettet før testene ble satt i gang, og at forholdene for infiltrasjon derfor var gode. Målingene ble som oftest gjort på veietablert gressplen i juli måned 2016, med en gjennomsnittlig lufttemperatur på 17 °C.

Når jorda er mettet oppnås konstant infiltrasjonshastighet som tilsvarer mettet hydraulisk konduktivitet ( $K_{sat}$ ). Det øverste jordlaget er nesten alltid umettet dvs. porer inneholder både vann og luft. I den første fasen av en nedbørhendelse skjer det en oppfuktning av profilet.



Figur 1: MPD – infiltrometer og Dobbelring-infiltrometer (hvh.til venstre og høyre).



Figur 2: Tverrsnitt av dobbelring – infiltrometeret, som viser vertikal strømning i indre ring, og oppmetningssone med også horisontal strømning i ytre ring.

Infiltrasjonshastigheten er da større enn  $K_{sat}$ . Med alle feltmetoder for infiltrasjonsmålinger vil det være to trinn; en oppfukningsdel der infiltrasjonsraten avtar etterfulgt av en konstant infiltrasjonsrate ( $K_{sat}$ ). Infiltrasjonshastigheten ble målt i felt ved bruk av metodene MPD-infiltrometer (Modified Philip-Dunne- infiltrometer (Nesting, 2007)) og Dobbelring-infiltrometer

(DR) (se f.eks. Børresen & Haugen, 2003; Skarbøvik og Blankenberg, 2013), figur 1.

Dobbelring- metoden benyttes som referanse-test, da det er den mest etablerte metoden. Utfordringen med å måle mettet hydraulisk konduktivitet i umettet toppjord er kapillærvanntransport i horisontal retning, men med DR antas det at vertikal strømning oppnås i den

indre ringen som følge av en oppmetningszone i den ytre ringen (figur 2) I forhold til DR er MPD enklere, mindre plasskrevende og tar kortere tid å gjennomføre. I tillegg gjør dette at flere målinger kan gjennomføres samtidig. Fordi MPD er en nyere metode er det nødvendig med bedre dokumentasjon om praktisk bruk og vurderinger om målingene gir tilstrekkelig pålitelige resultater sammenliknet med DR.

### Dobbelring - infiltrometer

Dobbelring-infiltrometer (DR) består av et sett med to metallringer; en indre ring og en ytre ring (figur 2). Det ble benyttet ringer med diametere på hhv. 0,33 m og 0,54 m. Ytre og indre ring fylles samtidig med vann, etter at ringene er banket 5-10 cm ned i bakken. Infiltrasjonsraten måles i indre ring ved å måle tilhørende verdier for vannhøyde og tid, etter hvert som vannet infiltrerer ned i bakken (likning 1). Dette er en forenkling av Darcys lov, med antagelse om hydraulisk gradient lik 1, dvs man antar at dybden av den mettede jordsøylen er lik den hydrauliske trykkforskjellen. Målinger foretas inntil infiltrasjonshastigheten har stabilisert seg, noe som antas å være oppnådd når de tre siste målingene er tilnærmet like (Skarbøvik & Blankenberg, 2013). Ytre ring er mettet med vann under hele forsøket for å unngå en horisontal eller diagonal bevegelse av vann i indre ring (Børresen & Haugen, 2003).

### Modified Phillip- Dunne (MPD) infiltrometer

Modified Phillip- Dunne infiltrometer (MPD) er en enkel metode for å måle infiltrasjonsevnen på jordoverflaten (Ahmed et al., 2011; Nestingen, 2007). Infiltrometeret (figur 1) består av en gjennomsiktig sylinder av pleksiglass med en indre diameter på 10 cm og en høyde på 50 cm. På siden av sylindere er det festet et målebånd for å kunne lese av vannhøyden over tid. Infiltrasjonsraten kan dermed beregnes fra endring i vannhøyde over tid (Ahmed et al., 2011). Sylindere bankes forsiktig ca. 5 cm ned i bakken, og fylles deretter med vann. Avlesningsintervallet vurderes i forhold til den lokale infiltrasjonshastigheten, men det anbefales å ha 5-10 avles-

ninger (Ahmed et al., 2014). Fordi det kun er en ring, og derfor også horisontal strømning, kan MPD- infiltrometeret overestimere infiltrasjonsevnen. Dette kompenseres for ved en likning basert på Green – Ampt (Ahmed et al., 2014) som tar hensyn til vanninnholdet i jorda før og etter MPD forsøk, og korrigerer for horisontal strømning. For tilpasning til likningen ble Matlab benyttet (skript utviklet av Kim Paus, 2016).

Konstant infiltrasjonsrate ( $K_{sat}$ ) kan finnes på to måter;

1.  $K_{sat}$  kun funnet ved observert infiltrasjonshastighet;  $MPD_{met1}$ .
2.  $K_{sat}$  beregnet med Green Ampt;  $MPD_{met2}$ , dvs. målt infiltrasjonshastighet med korrigerer for horisontal strømning.

$K_{sat}$  funnet ved *metode 1*, er en enkel metode for å vurdere infiltrasjonsevnen. Her studeres observert infiltrasjonshastighet, inntil den er konstant (stabilitet omkring +/- 20 % ved de siste tre målinger), ved å dividere vannhøyde på tid (likning 1);

$$\text{Synkehastighet} = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

der  $\Delta h$  [cm] angir forskjell i vannivå mellom to målinger, og  $\Delta t$  [time] er tilhørende tidsintervall mellom målingene.

$K_{sat}$  funnet ved *metode 2* -beregning av  $K_{sat}$ , baserer seg på Green-Ampts likning der det korrigeres for horisontal vannstrømning ved å måle vanninnholdet i jorda før og etter forsøket. Matlab-skriptet baserer seg på Green Ampts likning, der det tas hensyn til at jordens hydrauliske konduktivitet og vannets diffusjon i jorda varierer med fuktinnholdet (Dingman, 2008).

For bruk av metode 2 med Matlab, må derfor vanninnholdet i jorden måles før og etter forsøk. Det enkleste er å gjøre dette med en sensor som kan måle dette i felt. En annen metode er å ta to jordprøver (en før og en etter MPD) i stålsylindre (pF-ringer) som analyseres for vanninnhold i laboratorium. Den første prøven tas på utsiden av MPD-røret (ca. 8 cm avstand) før gjennomføring av forsøket, mens den andre prøven tas i borehullet etter gjennomføringen av MPD-

forsøket. Data for endring i vannhøyden med tilhørende tid, samt jordens vanninnhold før og etter gjennomføringen av MPD-forsøket danner input til beregning av  $K_{sat}$  i Matlab-skriptet.

Mettet hydraulisk konduktivitet ( $K_{sat}$ ) vil, etter definisjonen, være oppnådd når synkehastigheten er konstant.

### Feltmålinger i praksis

På hvert felt ble det gjennomført målinger i to forsøksruter. I hver forsøksrute på 60 cm x 60 cm ble det gjennomført to målinger med MPD-infiltrometeret, og en måling med DR. Som vist i figur 3, er MPD målingene gjort nær den innerste DR ringen slik at jorda er så lik som mulig. Forsøkene med MPD ble utført før DR forsøket. Resultatene fra infiltrasjonstestene ble benyttet for å sammenligne de to infiltrasjonsmetodene. Målingene ble hovedsakelig gjennomført i parker i Oslo, med unntak av en byggegrunn (Deich) og en hage (Langmyr) (Tabell 1).

### Laboratoriemetoder

Analysene på laboratoriet baserer seg på uttak av jordprøver fra de ulike forsøksfeltene. Det ble tatt ut både forstyrrede jordprøver samlet inn i plastpose, og «uforstyrrede» jordprøver med pF-ring med volum 100 cm<sup>3</sup>.

Kornfordelingsanalyse av forstyrrede jordprøver ble utført med Pipettemetoden (Børresen & Haugen, 2003), der prosentvise fraksjoner av

Tabell 1: Liste over forkortelser for forsøksfeltene. For mer detaljert beskrivelse av de ulike lokalitetene med koordinater henvises det til Solheim (2017).

Forkortelse	Forsøksfelt
Deich	Deichmansgate
Jupiter	Jupiterjordet
Kuba	Kubaparken
Langmyr	Langmyrgrenda
Sofie	Sofienbergparken
Vold	Voldsløkka

leire, silt og sand ble bestemt. Det ble besluttet å kalle jordarter med leirinnhold >18 % for *finkornige jordarter*, og jordarter med leirinnhold < 18 % for *grovkornige jordarter*. Videre ble Hazens metode benyttet for teoretisk beregning av  $K_{sat}$ .

Feltforsøkene ble gjennomført i juli 2017. Det henvises for øvrig til masteroppgaven til Solheim (2017) for nærmere beskrivelser og detaljer for utførelse av ulike metoder for å måle infiltrasjon.

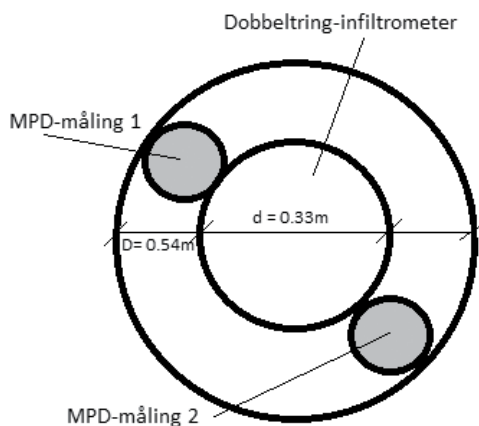
## Resultater og diskusjon

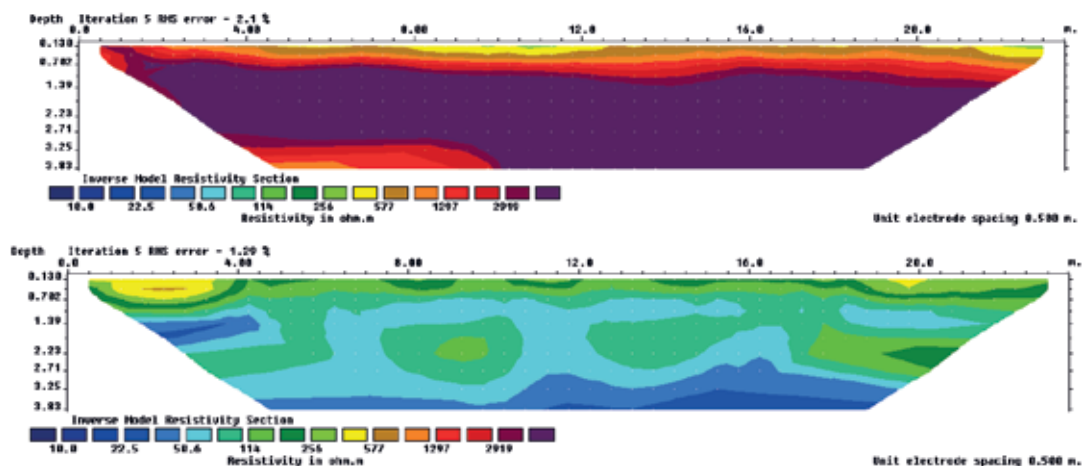
### Stor variasjon innen samme jordart

I forkant av infiltrasjonstestene ble det utført elektriske resistivitetsmålinger (ERT), som reflekterer den romlige variabiliteten av faktorer som



Figur 3: Oppsett av infiltrasjonsforsøk på en forsøksrute på 60 cm\*60 cm. Plassering av MPD-rør i forhold til Dobbelring-infiltrrometer.





Figur 4: Disse vertikale profilene viser romlig fordeling av elektrisk resistivitet og reflekterer de jordfysiske egenskapene. Tørre og grovkornige sedimenter vises som høy resistivitet (rød-oransje farger). Våt leire har lav resistivitet (blålige farger). Øverst profil er fra en hage i Langmyrgrenda og nederste profil er fra leirholdig jord i Sofienbergparken

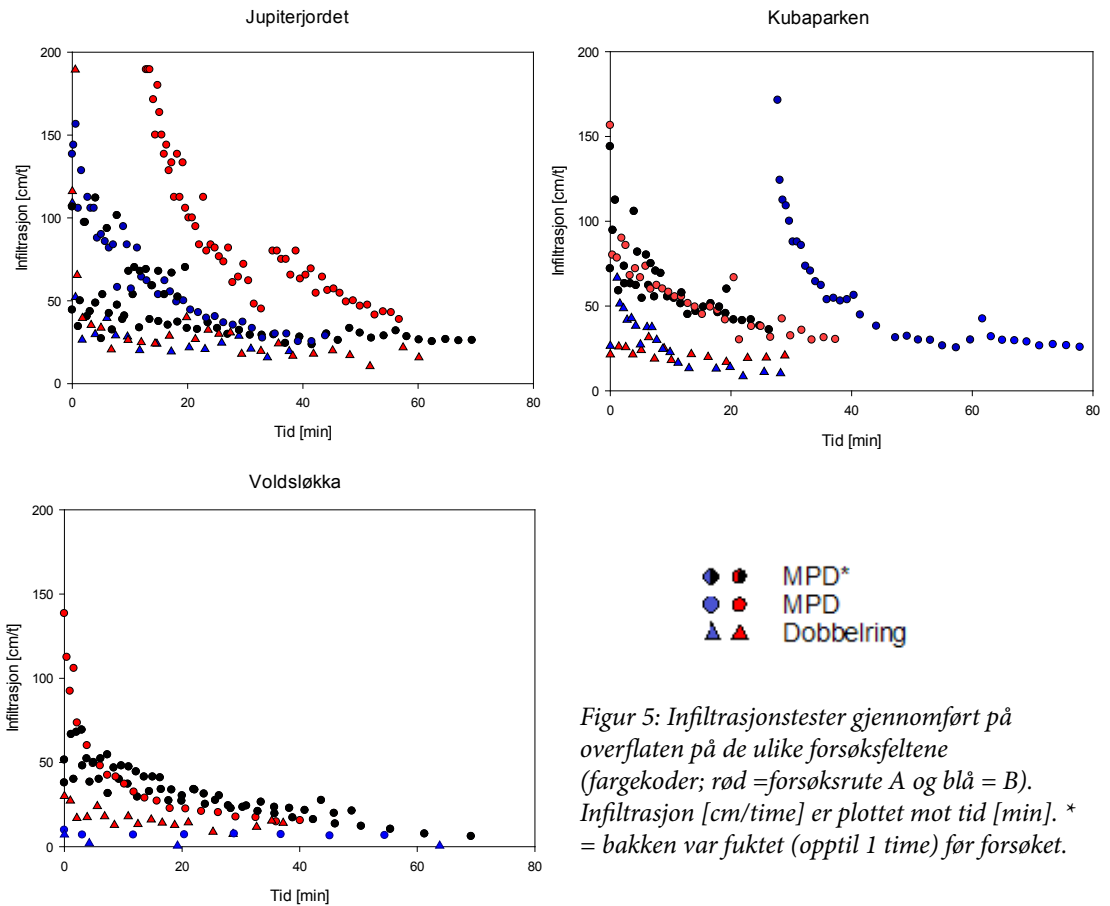
påvirker den elektriske ledningsevnen til jord: kornfordeling, vann – og saltinnhold (se f.eks. Sharma, 1997). Eksempler på to slike profiler er vist i figur 4. Det øverste profilet er tatt i Langmyrgrenda, på morene over fjell. Det nederste profilet er fra Sofienbergparken, på siltig sandjord. Vi kan anta at begge ERT-målinger er tatt under godt drenerte forhold. Langmyrgrenda viser en relativt homogen lagdeling, der resistiviteten øker med dypet, noe som indikerer grovere masser. Sofienbergprofilet viser større horisontal variasjon og lavere resistivitet i dypet, det er naturlig å anta at leirinnholdet øker med dypet og at massene er mer lik den mektige marine avsetningen som omgivelsene er kartlagt som. Gjennomsnittlig infiltrasjonsrate målt med DR på disse to lokalitetene var på hhv 76 cm/t og 5,4 cm/t dette reflekterer kontrasten i målt resistivitet. De to forsøksrutene ble plassert slik at det var mest mulig homogen jord innad i en forsøksrute, men heterogenitet mellom forsøksrutene.

En generell trend vist i figur 5 er at infiltrasjonsraten viser stor variasjon ved start. Ifølge Pitt et al. (2002) blir infiltrasjonskapasiteten i stor grad påvirket av jordens vanninnhold. Feltmålingene utført i denne undersøkelsen viste også variasjon i initialt vanninnhold fra område

til område. Dette skyldes mest sannsynlig forskjeller i jordart, fordi alle infiltrasjonsmålingene ble utført i en periode med lite eller moderat nedbør. Med tiden smalner denne punktskyen inn, etter hvert som jorda blir vannmettet, og mettet hydraulisk ledningsevne ( $K_{sat}$ ) nærmer seg. I starten vil variabiliteten skyldes både ulik initial vannmengde og jordas heterogenitet (f.eks. Pitt et al., 2002). Når infiltrasjonsraten stabiliseres reflekteres kun variabiliteten i  $K_{sat}$ .

Infiltrasjonsevnen varierer også mellom forsøksrutene (røde og blå punkter), til tross for at jorden ble karakterisert som samme jordart flere steder. Tabell 2 viser den store variasjonen i mettet hydraulisk konduktivitet på hver jordart. For eksempel varierer  $K_{sat}$  i feltene med lettleire mellom 1,5 og 53,3 cm/time (tabell 2).

Urban jord består av en blanding av tilkjørte masser som er omarbeidet med mineralsk jord. Dette gir naturlig nok forskjeller i infiltrasjonsevne. Toppjord eller «matjord», i urbane områder er ofte en blanding av sand og kompostert hageavfall, ofte tilkjørt i forbindelse med opparbeiding av parkområder. I tillegg er jorden trolig komprimert ved tråkk og kjøring flere steder. Biologisk aktivitet med utvikling av



Figur 5: Infiltrasjonstester gjennomført på overflaten på de ulike forsøksfeltene (fargekoder; rød = forsøksrute A og blå = B). Infiltrasjon [cm/time] er plottet mot tid [min]. \* = bakken var fuktet (opptil 1 time) før forsøket.

Tabell 2: Målte  $K_{sat}$  verdier for ulike jordarter (i Oslo). Resultatene fra byggegrunn i Deich er fjernet, da det mangler pålitelige- og fullstendige data fra MPD- og DR-forsøk. Jordart er bestemt ut fra kornfordeling.

Jordart	Min og maks $K_{sat}$ [cm/time]	Litteraturverdier# [cm/time]	
		(Fetter, 2001)	(Domenico & Schwartz, 1998)
Siltig mellomleire	0,5 – 20,2	$3,6 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-1}$	$3,6 \cdot 10^{-4} - 7,2$
Lettleire	1,5 – 53,3	$3,6 \cdot 10^{-6} - 3,6 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-5} - 16,9 \cdot 10^{-4}$
Sandig lettleire	24,7 – 89,5		
Sand	10,6 – 54,2	$3,6 - 3,6 \cdot 10^2$	$32,4 \cdot 10^{-2} - 21,6 \cdot 10^2$

# siltig mellomleire har litteratur-verdier for silt, og lettleire for leire.

sprekker og ganger fra meitemark og døde planterøtter skal heller ikke undervurderes (Grønlund, 1992). Konsekvensen av dette kan tydeligst ses på  $K_{sat}$  - verdiene for hvert felt som er klassifisert som samme jordart (Tabell 2). Prosessene over gjør at infiltrasjonsevnen er høyere

nær overflaten enn lengre ned (dokumentert i Solheim, 2017). Infiltrasjonsevnen er ofte større enn  $K_{sat}$  ved oppstart av en nedbørhendelse, fordi jorda dreneres kontinuerlig; avstand til forrige regn er viktig. Stor variasjon i infiltrasjonsevne, gjør bruk av løsmassekart lite egnet for å vurdere

Tabell 3: Mettet hydraulisk konduktivitet ( $K_{sat}$ ) [cm/t] fra målte verdier for de ulike forsøksfeltene.  $K_{sat}$  – verdier for MPD-forsøkene er beregnet med Matlab (versjon 2). Skraverte ruter indikerer  $K_{sat}$  - verdier som ikke er stabile ved forsøkets slutt (+/- 20 %). Tiden der infiltrasjonsraten er stabil er angitt i parentes. \* betyr at bakken var fuktet (opptil 1 time) før forsøket. NA= kunne ikke utføres pga. steinholdig grunn.

$K_{sat}$ [cm/t]					
Felt	Jordart	Leir:silt:sand [%]#	MPD*	MPD	Dobbelring
Deich_A	Grus	3:19:78	NA	NA	6,2
Deich_B	Grus	5:19:76	19,2 (40 min)	36,5 (38 min)	12,5 (60 min)
Jupiter_A	Lettleire	22:46:32	7,2 (35 min)	16,7 (60 min)	16,6 (60 min)
Jupiter_B	Lettleire	17:38:45	6,3 (70 min)	15,5 (50 min)	21,3 (40 min)
Kuba_A	Sand	1:5:94	13,3 (30 min)	11,7 (40 min)	20,4 (35 min)
Kuba_B	Sand	1:11:88	13,8 (25 min)	7,5 (118 min)	10,6 (30 min)
Langmyr_A	Sandig lettleire	11:23:66	9,3 (40 min)	5,1 (85 min)	89,5 (28 min)
Langmyr_B	Sandig lettleire	12:24:63	7,9 (60 min)	33,1 (20 min)	62,5 (35 min)
Sofie_A	Lettleire	17:38:45	2,2 (140 min)	9,2 (60 min)	8,9 (35 min)
Sofie_B	Lettleire	19:45:36	2,7 (110 min)	26,2 (75 min)	1,5 (75 min)
Vold_A	Siltig mellomleire	27:61:12	6,6 (50 min)	17,3 (40 min)	12,4 (40 min)
Vold_B	Siltig mellomleire	28:61:11	15,5 (70 min)	1,1 (60 min)	0,5 (60 min)

# for fraksjoner under 2 mm

infiltrasjonsevnen i overflaten og finne en representativ  $K_{sat}$  – verdi.

### Feltmålinger er viktig

Resultatene (vist i figur 4, tabell 2 og 3) viser hvordan infiltrasjonsevnen kan variere både innad i et felt, men også mellom ulike forsøksruter med samme jordart. Det er store forskjeller i mettet hydraulisk konduktivitet ( $K_{sat}$ ). Det tar også ulik tid før infiltrasjonsevnen stabiliseres, slik man kan se i tabell 3. Flere steder er infiltrasjonsevnen stabil etter en time, men dette varierer, og forsøket må fortsette inntil stabilitet er oppnådd, for å unngå at infiltrasjonsevnen overestimeres. Resultatene fra Vold, viser store forskjeller i  $K_{sat}$  på samme felt. Resultatene viser også store forskjeller mellom punkter innen samme jordart (tabell 2). Dette kan skyldes at det ene

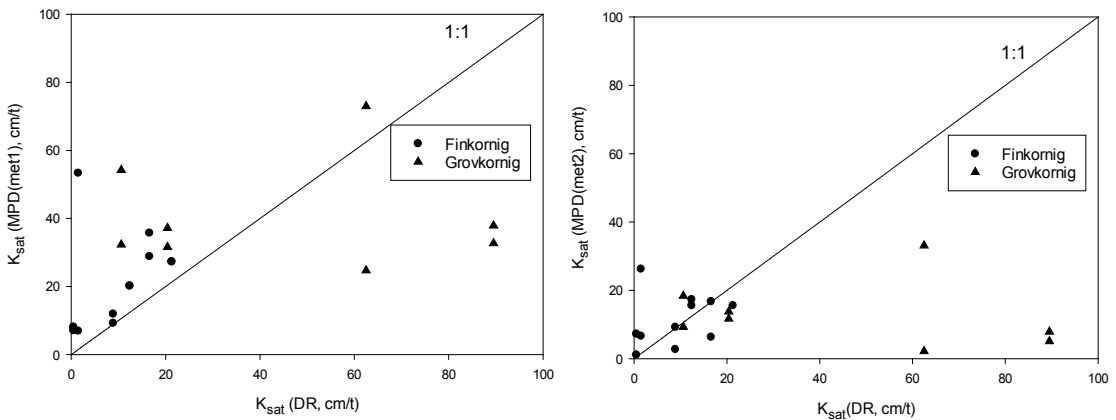
MPD-røret har truffet på en meitemark-gang, eller en gammel rotkanal som letter vannets vei nedover i jordprofilen. Det er derfor behov for flere målinger innad på en tomt for å vurdere infiltrasjonsevnen.

### Korreksjonsfaktor ved bruk av MPD-metoden

Som beskrevet tidligere antar vi at DR gir den mest riktige målingen av  $K_{sat}$ , men fordi DR er mer ressurskrevende enn MPD, ville det være en fordel om man kunne benytte MPD isteden, eventuelt med en korreksjonsfaktor.

Statistisk analyse (t-test og Mann-Whitney U-test) og korrelasjonsplott, er benyttet for å sammenligne metodene avhengig av om data-settet er normalfordelt eller ikke. Regresjonslinjer for forholdstall mellom metodene er beregnet,





Figur 6: Korrelasjonsdiagram for MPD (met1) og Dobbelring til venstre, og MPD (met2) og DR til høyre. Ved perfekt overensstemmelse ville punktene følge 1:1 linja. Firkant-symboler viser korrelasjon fra jord med leirinnhold < 18 %. Trekant-symboler viser korrelasjon fra jord med leirinnhold >18 %.

Tabell 2: Korreksjonsfaktorer ved bruk av MPD - metoden

Finkornige jordarter (leirprosent > 18 %)			
Metode	Korreksjonsformel (basert på forholdstall (median) mellom metodene)	Std. avvik for forholdstall	Gyldighetsområde til formelen
MPD (met1)	$K_{sat}(DR) = (0,6) * K_{sat}(MPD_{met1})$ (2)	±0,3	7 – 53 cm/time
MPD (met2)	$K_{sat}(DR) = (1,0) * K_{sat}(MPD_{met2})$ (3)	±1,3	1 – 26 cm/time
Grovkornige jordarter (leirprosent < 18 %)			
MPD (met1)	$K_{sat}(DR) = (0,8) * K_{sat}(MPD_{met1})$ (4)	±1,2	25 – 73 cm/time
MPD (met2)	$K_{sat}(DR) = (5,2) * K_{sat}(MPD_{met2})$ (5)	±6,1	5 – 33 cm/time

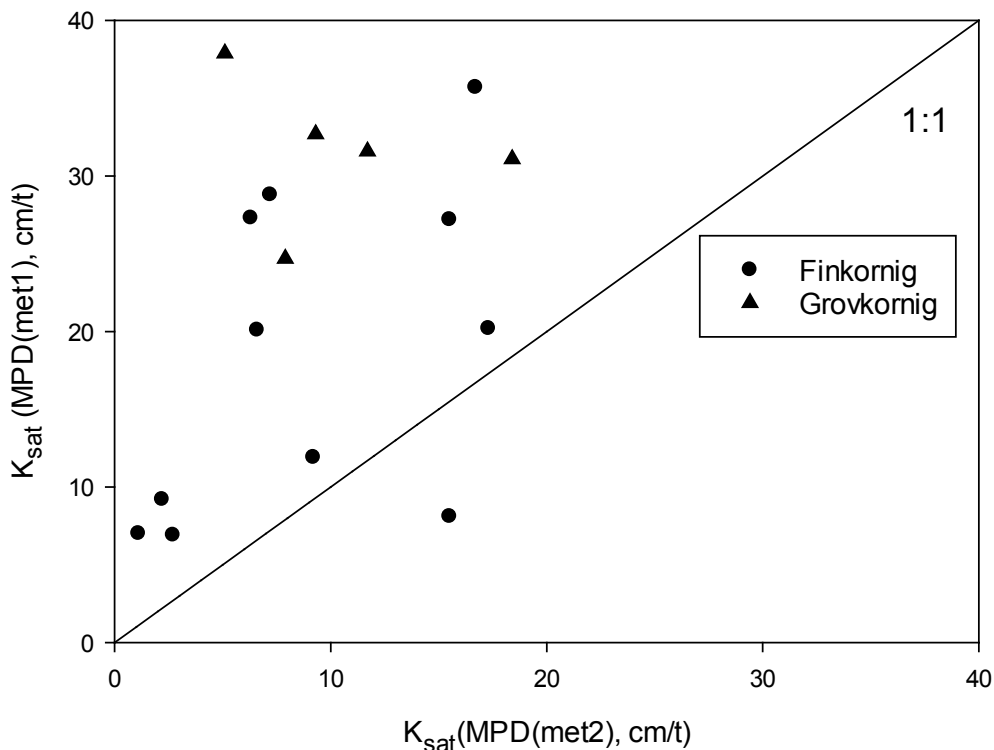
men da R<sup>2</sup>- verdien er lav (< 0,4), var det mer hensiktsmessig å studere direkte forholdstall mellom metodene. Siden den romlige variabiliteten på hvert enkelt felt er stor, er det vurdert at korreksjonsfaktorer bør benyttes, for å unngå at infiltrasjonsevnen overestimeres. Det må allikevel tas hensyn til usikkerhet i forholdstallene, og benytte skjønn ved beregning av infiltrasjonsevne for planlegging av LOD-tiltak. Der data settet ikke var normalfordelt ble forholdstallet for medianverdiene mellom metodene benyttet for å lage korreksjonsformler.

Korrelasjonsdiagrammet i Figur 6 viser at MPD (met2) underestimerer K<sub>sat</sub>-verdier for grovkornige jordarter (leirprosent < 18 %), men for finkornige jordarter (leirprosent > 18 %) ligger punktene nærmere og omkring 1:1 linjen. Statistisk testing viser at metodene er signifikant

forskjellige for grovkornige jordarter (α = 0,05), men ikke er forskjellige for finkornige jordarter. Basert på disse undersøkelsene foreslås følgende korreksjonsfaktorer ved bruk av met1 og met2, sammenlignet med dobbelring (tabell 4).

Ved sammenlikning av MPD beregninger av K<sub>sat</sub> basert på infiltrasjonsraten med korreksjon med Green Ampt (metode 2) mot observert infiltrasjonsrate MPD (metode 1) (ukorrigert), ser vi at alle punktene ligger over 1:1 linjen (figur 6); dvs. MPD (metode 1) overestimerer K<sub>sat</sub>. I forhold til metode 2, i enkelte tilfeller er K<sub>sat</sub> tre ganger høyere enn den beregnet med korreksjonsmetoden, likevel er denne differansen i samme størrelsesorden som variabiliteten man kan forvente innen samme felt.

Det absolutte avviket mellom K<sub>sat</sub> målt med MPD<sub>met2</sub> er større for både «grove» og «fin-



Figur 7: Korrelasjonsdiagram for MPD (met1) og MPD (met2). Met1 betyr at beregningene er basert på infiltrasjonsrate (konstant synkehastighet, Darcys lov med gradient lik 1) og met2 betyr at matlab-skript for korreksjon av jordfuktighet (Paus, 2016) er benyttet.

kornige» jordarter sammenliknet med målinger utført med  $MPD_{met1}$  (data ikke vist). For begge jordarter overestimeres  $K_{sat}$  sammenliknet med DR (figur 6).

Basert på gjennomsnittsverdien av  $K_{sat}$   $MPD_{met1}$ , overestimeres  $K_{sat}$  for fine jordarter mens den underestimerer noe for grove jordarter. Standard avviket er størst for  $MPD_{met2}$  målingene. Dette er overraskende ettersom  $MPD_{met2}$  metoden skal kompensere for horisontal strømning som er reel. Det betyr ikke at metoden er feil, men disse forsøkene avslører at praktiske forhold i felt inkludert vanninnholdsmålinger før og etter forsøket potensielt kan gi en større feilmargin. Basert på dette konkluderes det at beregninger basert på infiltrasjonsraten direkte,  $MPD(met1)$  gir det et godt og robust nok estimat av  $K_{sat}$ - verdi (sammenliknet med DR).

Korreksjonsformelene som foreslås over, må benyttes med skjønn og forsiktighet, og vil kun være veiledende ved vurdering av infiltrasjonsevne. Korreksjonsformlene belyser hvordan  $MPD$ -infiltrometeret ofte overestimerer infiltrasjonsevnen, og at dette er noe som må tas hensyn til. Utfra erfaringer i dette studiet, er det viktigere med god dekning av variasjon av  $K_{sat}$ , framfor absolutt nøyaktighet. Det er da viktig at forsøkene får stå lenge nok slik at konstant infiltrasjonshastighet måles. Ved å gjennomføre flere målinger på en tomt, vil  $MPD_{met1}$  trolig gi et tilstrekkelig nøyaktig estimat for å vurdere infiltrasjonsevnen på stedet. Selv om korreksjonsfaktorene kan variere, anbefaler vi likevel at disse benyttes ved bruk av  $MPD$ -metoden.

## Laboratoriemetodene kan ikke erstatte lokale målinger

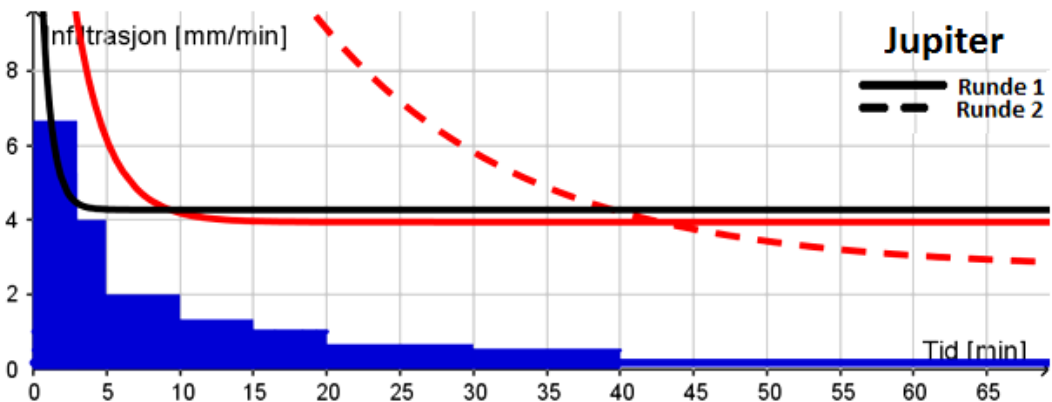
Resultatene av de to laboratoriemetodene som ble benyttet i dette studiet, kornfordelingsanalyser og prøvetaking med pF – ringer, er ikke vist her, men kan leses i Solheim (2017). Det ble konkludert med at måling av infiltrasjon i felt anbefales fordi porestrukturer ikke ødelegges, slik det gjør ved uttak av forstyrrede jordprøver til kornfordelingsanalyser. Prøvene avslørte at byjord er dårlig sortert og som regel ikke tilfredsstillende sorteringskravet til Hazens metode, som er den mest brukte metoden for beregning av  $K_{sat}$  basert på kornfordeling. Prøvene er også for små til at de kan fange opp overraskelser som fyllmasser og sprekker og stor jordvariasjon. Andre lab-metoder for å måle infiltrasjon, f.eks. prøvetaking i pF-ringer, med påfølgende analyser, krever levering til laboratorier som har nødvendig utstyr, og er tidkrevende. Slike undersøkelser vil i de fleste tilfeller ikke være nødvendig for en enkel vurdering av infiltrasjonsevnen på tomten. Dersom man skal utføre mer avanserte modellering av infiltrasjon og vannstrømning i umettet toppjord, vil imidlertid slike undersøkelser være nødvendige.

## Dimensjonerende regn for trinn 1 (infiltrasjon) for ulike jordarter

En fordel med å foreta infiltrasjonsmålinger lokalt er at man i tillegg til  $K_{sat}$  får kvantifisert

infiltrasjonsraten før oppmetning. Dette er viktig for den første fasen av en nedbørhendelse og trinn 1 i 3-trinnsstrategien (Lindholm et al., 2008). Infiltrasjonskurvene kan studeres i sammenheng med data for IVF-kurver fra nærmeste værstasjon, som for Oslo er Blindern. Figur 7 viser sammenhengen mellom infiltrasjonskurver (regresjonslinjer for DR) og ulike intensiteter og varighet på forskjellige kasseregner (20 mm) på Jupiterjordet. For å illustrere hvordan figuren kan leses ser vi at en 20 mm nedbørhendelse på 3 min varighet gir et infiltrasjonsbehov på 6,6 mm/min. Den svarte heltrukne linjen (figur 7) viser at forsøksrute B ikke har nok kapasitet til å ta unna hele nedbørhendelsen, i motsetning til forsøksrute A. Man vil altså kunne få overflateavrenning når den målte infiltrasjonsraten krysser det blå feltet.

Hvor lenge de ulike studerte lokalitetene kan «ta unna» en 200- års hendelse, er vist i tabell 5. På Blindern er en hendelse på 20 mm og varighet 9 min et 200-års regn (Førland et al., 2015). Det er viktig å presisere at forutsetningene og antagelsene ved denne analysen er at dataene baserer seg på feltmålinger gjennomført om sommeren på relativt tørr jord (lav jordfuktighet), slik at forholdene for infiltrasjon er gunstig. I tillegg er det antatt at nedbøren treffer på flate arealer, og at  $K_{sat}$  – verdien som måles antas å være like høy nedover i jordprofilen.



Figur 7: Infiltrasjonskapasitet i forsøksrute A (rød) og B (svart). Hver blå søyle representerer 20 mm nedbør fordelt over det antall minutter som nedbørhendelsen varer vist på x-aksen; her vist fra 3-70 min varighet. I situasjoner der linjene ikke bryter det blå feltet (nedbør), blir det ikke overflateavrenning. Der infiltrasjonskurven stabiliseres (parallele linjer), inntreffer  $K_{sat}$ .

Tabell 3: Ulike jordarters kapasitet til å håndtere et 200-års regnvær.

Jordart	Lokalitet	Kapasitet
Grus	Deich	9 min varighet eller lengre
Sandig morene	Langmyr	Alle regn
Sand	Kuba	5 min varighet eller lengre
Lettleire	Jupiter og Sofie	5 min varighet eller lengre
Siltig mellomleire	Vold	5 min varighet eller lengre

## Konklusjoner

Byjord, som er kartlagt som leirholdig (leirinnhold > 10%), viser stor variasjon i infiltrasjonsevne. Variasjonen er også stor på samme jordart innad på et felt. Basert på denne undersøkelsen gir infiltrasjonsmålinger utført med MPD metoden, uten korrigering for vanninnhold før og etter måling ( $K_{\text{sat}} \text{MPD}_{\text{met1}}$ ), et godt nok estimat for den mettet hydraulisk ledningsevne sammenliknet med DR metoden.

Fordelen med MPD-metoden er at mange tester kan gjøres samtidig, slik at den store jordvariasjonen på en eiendom dekkes. I tillegg kreves det lite vann for gjennomføring av forsøk. Korreksjonsfaktorer kan benyttes for å unngå at infiltrasjonsevnen overestimeres (tabell 4).

Samtlige målinger av infiltrasjon på leirholdig jord i by ga høyere  $K_{\text{sat}}$ -verdi enn litteraturverdier for leirjord og kan i de fleste tilfeller ta unna et 200-års regnvær på Blindern. Løsmasser i by kan inneholde mye gamle fyllmasser og sprekker med meget god infiltrasjon, noe som ikke fremkommer i vanlig kartlagt informasjon fra løsmassekart. Dette er en viktig årsak til at laboratoriemetoder basert på uttak av jordprøver er lite egnet.

Vanninnholdet i jorda vil variere gjennom året, og det er viktig å ta i betraktning ved vurdering av LOD-tiltak. De største nedbørhendelsene på Østlandet skjer gjerne om sommeren etter varmt vær. Da vil bakken som oftest være godt drenert pga. gravitasjon og evapotranspirasjon.

God kunnskap om infiltrasjonsevne på lokal byggegrunn er en forutsetning for valg og planlegging av LOD-tiltak. Kunnskap om infiltrasjonsevnen ulike steder på tomten vil lette

plasseringen av tiltak. Tretrinnsstrategien har i sin nåværende form ingen krav til håndtert vannmengde, men 20 mm vil i de fleste tilfellene undersøkt i denne studien kunne håndteres greit. Selv om dette arbeidet ble utført i et begrenset område og tid på året, viser undersøkelsen at det er praktisk gjennomførbart å utføre feltmålinger av infiltrasjonsevne på byggetomt, som kan gi kvantitative beregninger for LOD tiltak. Unntak er tomter med mye grov stein eller fjellgrunn.

## Takk til

Takk til Merete Stange Sørsum som deltok i feltarbeidet som trainee i Oslo VAV da infiltrasjonsmålingene ble gjennomført. Takk til NMBU og Oslo VAV for økonomisk støtte til lab- og feltarbeid.

## Referanser

Ahmed, F., Gulliver, J. & Nieber, J. (2011). *A new technique to measure infiltration rate for assessing infiltration of BMPs*. 12th International Conference on Urban Drainage, 2011, Porto Alegre - RS- Brasil.

Ahmed, F., Nestingen, R., Nieber, J., Gulliver, J. & Hozalski, R. (2014). *A Modified Philip-Dunne Infiltrometer for Measuring the Field-Saturated Hydraulic Conductivity of Surface Soil*. Vadose Zone Journal, Vol. 13. No. 10.

Becker, M. A. (2016). *Assessment of Downspout Disconnection by Modeling Infiltration Potential in Urban Areas*. Masteroppgave NTNU, <http://hdl.handle.net/11250/2402865>. Kortversjon er presentert i Becker

m.fl. (2016). *Trinn1: Reduser overvannet i avløpsnett ved å frakoble taknedløp*. Vann nr 4/2016; 359-369.

- Braskerud, B.C., Andersson, E., Anker-Nilssen, M.A., Asp, S.T., Bernhus, C., Devik, A.K., Fergus, T.Å., Geleta, B.M., Haneberg, B., Høifødt, A., Kvitsjøen, J., Nyrnes, M., Rasmussen, Å., Røttorp, A., Stenerud, S., Trubacheva, O., Veierød, V., Young, K., Zühlke, U., & Aasgaard, A.E. (2017). *Studietur til København og Malmö. Aktuelle tiltak for håndtering av overvann i Oslo*. Rapport nr. 1/2017, Oslo kommune, Vann- og avløpsetaten.
- Børresen, T. & L. E. Haugen (2003). *Jordfysikk, Øvelseskurs: JORD 221: felt og laboratorieøvelser*. Institutt for plante- og miljøvitenskap, Norges Landbrukshøgskole.
- Dingman, S. L. (2008). *Physical hydrology*. Long Grove, Ill, Waveland Press.
- Domenico, P. A. and Schwartz, F.W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology (Second editions)*. Copyright ©1998 by John Wiley & Sons, New York, USA, Inc. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc. Side. 51.
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*, Fourth Edition, Prentice-Hall, New Jersey, p. 598.
- Førland, E., Mamen, J., Dyrddal, A.V., Grinde, L., Myrabø, S. (2015). Dimensjonerende korttidsnedbør. Naturfareprosjektet Dp 5 Flom og vann på avveie. NVE, rapport nr. 134 -2015.
- Grønlund, A. (1992). Integrert miljøovervåkning av landbruksområder i Norden. Felles metodeutvikling og rapportering (del 2). Nordiske Seminar – og Arbejdsrapporter, 1992:534. Nordisk Ministerråd, København. s. 19.
- Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Sægrov, S., Jakobsen, G. & Aaby, L. (2008). *Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering*. Norsk Vann Rapport 162, Hamar.
- Nesting, R. S. (2007). *The Comparison of Infiltration Devices and Modification of the Philip-Dunne Permeameter for the Assessment of Rain Gardens*. Ph.D. thesis, University of Minnesota.
- Nie, L., Lindholm, O., Åstebøl, S., Sægrov, S. & Thorolfsson, S. (2011). *Integrated Urban Stormwater Management in Norway–Best Management Practices (BMPs) in cold climate*. Proc. 12th Int. Conf. Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil.
- Paus, K.H. (2016). *Toxic Metal Removal and Hydraulic Capacity in Bioretention Cells in Cold Climate Regions*. PhD, Norwegian University of Science and Technology.
- Skarbøvik, E. og Blankenberg, A. (2013). Vurdering av kanterosjon og vegetasjonssoner i Haldenvassdraget oppstrøms Bjørkelangen. Bioforsk RAPPORT, 8(161): 20-24. ISBN: 97882-17-01175-0
- Sharma, P.V. (1997). *Environmental and Engineering Geophysics 1<sup>st</sup> Edition*, ISBN – 13:978 -0521576321, Cambridge University Press, 468p. Tilgjengelig fra: <https://www.amazon.com/Environmental-Engineering-Geophysics-Prem-Sharma/dp/0521576326> (lest: 20.06.17)
- Solheim, E.B. (2017). *Infiltrasjon for lokal overvannsdisponering (LOD). Vurdering av metoder for å måle infiltrasjon på lokal tomt*. Masteroppgave NMBU. To bind: Oppgave og vedlegg. <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/24>