

2022:00568 - Fortrolig

# Rapport

## Permeable dekker med belegningsstein

Resultater fra testfeltet på Sveberg

### Forfattere

Edvard Sivertsen

Elhadi Abdalla, Ingrid Selseth, Herman Helness,  
Knut Alfredsen (NTNU), Tone Muthanna (NTNU)



# Rapport

## Permeable dekker med belegningsstein

Resultater fra testfeltet på Sveberg

**EMNEORD:**Permeable dekker  
Overvann  
Fordrøyning  
Infiltrasjon  
Testfelt  
Modellering  
Dimensjonering**VERSJON**

1.0

**DATO**

2022-06-07

**FORFATTER(E)**Edvard Sivertsen  
Elhadi Abdalla, Ingrid Selseth, Herman Helness,  
Knut Alfredsen (NTNU), Tone Muthanna (NTNU)**OPPDRAGSGIVER(E)**

Vikaune Fabrikker

**OPPDRAGSGIVERS REF.**

Terje Gaarden

**PROSJEKTNR**

NFR 269526

**ANTALL SIDER OG VEDLEGG:**

135

**SAMMENDRAG**

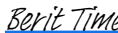
Rapporten oppsummerer resultater fra prosjektet Drensstein.

**UTARBEIDET AV**

Edvard Sivertsen

**SIGNATUR****KONTROLLERT AV**

Berit Time

**SIGNATUR**

Berit Time (Jun 7, 2022 13:39 GMT+2)

**GODKJENT AV**

Maria Barrio

**SIGNATUR**

Maria Barrio (Jun 10, 2022 08:24 GMT+2)

**RAPPORTNR**

2022:00568

**ISBN****GRADERING**

Fortrolig

**GRADERING DENNE SIDE**

Fortrolig

# Historikk

---

VERSJON	DATO	VERSJONSBEKRIVELSE
0.1	2022-04-06	Utkast sendt kvalitetssikring

---

1.0	2022-06-07	Endelig rapport
-----	------------	-----------------

---

# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Innledning.....</b>	<b>8</b>
1.1	Bakgrunn.....	8
1.2	Målsetning med prosjektet.....	8
1.3	Målsetning med rapporten.....	9
1.4	Utfordringer med prosjektgjennomføringen.....	9
1.5	Oppbygning av rapporten.....	9
<b>2</b>	<b>Testfeltet på Sveberg.....</b>	<b>10</b>
2.1	Innledning.....	10
2.2	Permeable dekker versus vanlig belegningsstein.....	10
2.3	Ulike løsninger for permeable dekker.....	11
2.4	Permeable dekker og overvannshåndtering.....	12
2.5	Overordnet beskrivelse av testfeltet.....	13
2.6	Detaljert beskrivelse av de ulike feltene.....	15
2.7	Måleprinsipp avrenning.....	20
2.8	Instrumentering.....	23
2.8.1	Avrenning.....	23
2.8.2	Temperatur.....	23
2.8.3	Fukt.....	24
2.8.4	Vannstand steinfylling.....	25
2.8.5	Værstasjon.....	25
2.8.6	Kamera.....	25
2.8.7	Datalogging.....	25
2.8.8	Dokumentasjon.....	25
2.8.9	Utfordringer med sensorene.....	25
<b>3</b>	<b>Målt og modellert fordrøyning permeable dekker type C.....</b>	<b>26</b>
3.1	Innledning fordrøyningsløsning.....	26
3.2	Materialer og metode.....	27
3.2.1	Regnhendelser og målt avrenning.....	27
3.2.2	Indikatorer for fordrøyning.....	27
3.2.3	Modeller av permeable dekker type C.....	28
3.3	Resultater.....	29
3.3.1	Målt fordrøyning.....	29
3.3.2	Kalibrering og validering av modeller.....	33

3.3.3	Varighetskurver .....	34
3.4	Konklusjon.....	36
<b>4</b>	<b>Dimensjonering av permeable dekker .....</b>	<b>37</b>
4.1	Innledning .....	37
4.2	Materialer og metode.....	38
4.2.1	Klima og nedbørsdata.....	38
4.2.2	Modell.....	38
4.3	Forutsetning.....	40
4.4	Resultater.....	40
4.4.1	Permeable dekker type A .....	40
4.4.2	Permeable dekker type B.....	44
4.4.3	Permeable dekker type C.....	47
4.5	Valg av type permeabelt dekke .....	50
4.6	Noen praktiske designvurderinger.....	52
4.6.1	Effekt av økt andel fugearreal.....	52
4.6.2	Redusert risiko med ekstra dreneringsrør.....	52
4.6.3	Redusert tykkelse på bærelag .....	53
4.7	Konklusjon.....	53
<b>5</b>	<b>Infiltrasjonskapasitet topplaget (fugene mellom steinene) .....</b>	<b>55</b>
5.1	Innledning .....	55
5.2	Infiltrasjonskapasitet Sveberg.....	56
5.2.1	Materialer og metode.....	56
5.2.2	Resultater.....	57
5.2.3	Forslag for å unngå lekkasjer .....	59
5.3	Infiltrasjonskapasitet laboratoriemålinger .....	59
5.3.1	Materialer og metode.....	59
5.3.2	Resultater.....	61
5.4	Sammenligning infiltrasjonshastigheter .....	63
5.5	Konklusjon.....	64
<b>6</b>	<b>Temperatur .....</b>	<b>65</b>
6.1	Innledning .....	65
6.2	Materialer og metode.....	65
6.3	Resultater .....	65
6.3.1	Temperaturprofiler .....	65
6.3.2	Statistisk oppsummering .....	72
6.3.3	Tine/fryse sykluser.....	75
6.4	Konklusjon.....	76

<b>7</b>	<b>Forurensning</b> .....	<b>77</b>
7.1	Innledning .....	77
7.2	Litteratursøk.....	77
7.2.1	Materialer og metode.....	77
7.2.2	Resultater.....	78
7.3	Annen relevant litteratur .....	80
7.4	Konklusjon.....	80
<b>8</b>	<b>Helhetsvurdering (= bærekraftsanalyse)</b> .....	<b>81</b>
8.1	Innledning .....	81
8.2	Materialer og metode .....	81
8.3	Resultater .....	82
8.3.1	Rammeverk.....	82
8.3.2	Eksempel utvalgte indikatorer.....	85
8.4	Konklusjon.....	86
<b>9</b>	<b>Forretningsmodell</b> .....	<b>87</b>
9.1	Forslag fra kurs i kommersialisering av innovasjoner .....	87
9.2	Forslag studentgruppe 1 NHH.....	88
9.3	Forslag studentgruppe 2 NHH.....	88
<b>10</b>	<b>Måloppnåelse og læringspunkter</b> .....	<b>89</b>
10.1	Måloppnåelse i henhold til prosjektsøknaden.....	89
10.2	De viktigste læringspunktene .....	89
10.2.1	Nyttig kunnskap.....	89
10.2.2	Praktiske verktøy og resultater for aktører .....	90
<b>11</b>	<b>Veien videre</b> .....	<b>91</b>
	<b>Referanser</b> .....	<b>93</b>
<b>A</b>	<b>Kalibreringsdata V-profil (fra produsent)</b> .....	<b>95</b>
<b>B</b>	<b>Varighetskurver permeable dekker type A</b> .....	<b>97</b>
B.1	Bergen .....	97
B.2	Kristiansand.....	98
B.3	Trondheim.....	99
B.4	Bodø.....	100
B.5	Hamar.....	101
<b>C</b>	<b>Varighetskurver permeable dekker type B</b> .....	<b>102</b>
C.1	Bergen .....	102
C.1.1	Avrenning drenering med bærelag lik 100 mm .....	102

C.1.2	Avrenning drenering med bærelag lik 200 mm.....	103
C.1.3	Avrenning drenering med bærelag lik 300 mm.....	104
C.1.4	Avrenning drenering med bærelag lik 400 mm.....	105
C.2	Kristiansand.....	106
C.2.1	Avrenning drenering med bærelag lik 100 mm.....	106
C.2.2	Avrenning drenering med bærelag lik 200 mm.....	107
C.2.3	Avrenning drenering med bærelag lik 300 mm.....	108
C.2.4	Avrenning drenering med bærelag lik 400 mm.....	109
C.3	Trondheim.....	110
C.3.1	Avrenning drenering med bærelag lik 100 mm.....	110
C.3.2	Avrenning drenering med bærelag lik 200 mm.....	111
C.3.3	Avrenning drenering med bærelag lik 300 mm.....	112
C.3.4	Avrenning drenering med bærelag lik 400 mm.....	113
C.4	Bodø.....	114
C.4.1	Avrenning drenering med bærelag lik 100 mm.....	114
C.4.2	Avrenning drenering med bærelag lik 200 mm.....	115
C.4.3	Avrenning drenering med bærelag lik 300 mm.....	116
C.4.4	Avrenning drenering med bærelag lik 400 mm.....	117
C.5	Hamar.....	118
C.5.1	Avrenning drenering med bærelag lik 100 mm.....	118
C.5.2	Avrenning drenering med bærelag lik 200 mm.....	119
C.5.3	Avrenning drenering med bærelag lik 300 mm.....	120
C.5.4	Avrenning drenering med bærelag lik 400 mm.....	121
<b>D</b>	<b>Varighetskurver permeable dekker type C.....</b>	<b>122</b>
D.1	Bergen.....	122
D.1.1	Avrenning drenering.....	122
D.1.2	Overflateavrenning.....	123
D.2	Kristiansand.....	124
D.2.1	Avrenning drenering.....	124
D.2.2	Overflateavrenning.....	125
D.3	Trondheim.....	126
D.3.1	Avrenning drenering.....	126
D.3.2	Overflateavrenning.....	127
D.4	Bodø.....	128
D.4.1	Avrenning drenering.....	128
D.4.2	Overflateavrenning.....	129
D.5	Hamar.....	130
D.5.1	Avrenning drenering.....	130
D.5.2	Overflateavrenning.....	131

<b>E</b>	<b>Temperaturprofiler sammendrag .....</b>	<b>132</b>
E.1	Bunnpunkt.....	132
E.2	Midtpunkt .....	133
E.3	Toppunkt.....	134

## 1 Innledning

### 1.1 Bakgrunn

Overvann som følge av nedbør eller smeltevann er en økende utfordring i byer og tettsteder og skyldes i stor grad urbanisering med utbygging og tetting av naturlige avrenningsflater. Tradisjonelt har overvannet vært håndtert ved å lede vannet til nærmeste sluk og for deretter å bli transportert i rør enten sammen med sanitært avløpsvann (felles system) eller i egne rørledninger (separat system). Ulempen for begge løsningene er at rørene har en begrenset kapasitet som fort kan overskrides. Overvannshåndteringen har derfor i den senere tid fokusert på løsninger som også kan begrense mengden overvann ved at alt eller noe av overvannet håndteres lokalt.

Permeable dekker er en teknisk løsning for lokal håndtering av overvann, der overvannet vil sige gjennom det permeable dekket i fuger av grus eller gress og infiltrere i grunnen under. Effektiviteten til permeable dekker vil være avhengig av utforming og stedlige betingelser og kan variere fra fullstendig infiltrasjon der alt vannet infiltreres i grunnen til at alt vannet samles opp under det permeable dekket og slippes med betydelig forsinkelse på det øvrige overvannssystemet. Permeable dekker kan derfor fungere både som et infiltrasjonstiltak og ett fordrøyningstiltak.

Vikaune Fabrikker, Nordland Betong, ASAK Avd Fetsund, Hønefoss og Kristiansand produserer alle belegningsstein i betong og markedsfører sine produkter sammen gjennom ASAK Miljøstein, som er en felles salgsorganisasjon heleid av fabrikkene. Fabrikkene bak ASAK Miljøstein har som målsetning å kunne tilby robuste og framtidrettede produkter med dokumenterte egenskaper. Blant annet markedsføres ASAK Drenssten, som er en betongstein med definerte fuger som gir en drenerende egenskap, og utviklet spesielt for bruk i permeable dekker. Det mangler foreløpig tilstrekkelig dokumentasjon på hvor effektivt dette dekket drenerer vannet og hvordan dette dekket best kan vedlikeholdes. Det er også usikkerhet rundt hvordan dekket påvirkes under norske forhold med hyppige tine/fryse sykluser og bruk av vegsalt om vinteren og annen forurensning, både menneskeskapt og fra naturen.

Med dette som bakgrunn ble forskningsprosjektet "Permeable dekker med betongstein – en løsning på urbane overvannsutfordringer (DRENSSTEIN)" etablert med støtte fra Forskningsrådet. DRENSSTEINS overordnede ide har vært å fremskaffe kunnskap og dokumentasjon på infiltrasjons- og fordrøyningseffekten av overvannet for permeable dekker med betongstein, samt utarbeide robuste dimensjoneringskriterier og drifts- og vedlikeholdsprosedyrer tilpasset lokalt klima.

### 1.2 Målsetning med prosjektet

Prosjektets hovedmål har vært å utvikle robuste og bærekraftige løsninger for permeable dekker med betongstein som har dokumenterte egenskaper i forhold til infiltrasjon og fordrøyning av overvann.

Hovedmålet ble delt opp i følgende delmål:

1. Etablere et fleksibelt forsøksfelt for permeable dekker med betongstein, med tilhørende måleinstrumenter og anretninger for å kontrollere vannbalansen.
2. Måle ytelsen til seks ulike kombinasjoner av betongstein, bærelag og dekketype under virkelige forhold for å bestemme ulike dekkers infiltrasjons- og fordrøyningkapasitet i tillegg til langtidsutvikling av dekkets infiltrasjonskapasitet.

3. Etablere kunnskap om hvordan typiske forurensinger fra veg og parkeringsplasser påvirker permeable dekkers ytelse, i hvilken grad slike forurensninger filtreres og akkumuleres i de ulike lagene under dekket.
4. Utvikle metode, velge indikatorer og utføre en helhetsvurdering av permeable dekker, inkludert en sammenligning med tradisjonelle dekker som asfalt, som inkluderer tekniske, miljømessige, økonomiske, og samfunnsmessige effekter.

### 1.3 Målsetning med rapporten

Denne rapporten er ment å gi en beskrivelse av testfeltet som er etablert og gi en oversikt over resultatene generert fram til prosjektslutt. Resultatene er basert på 18 måneders drift av testfeltet, inkludert 8 måneder der området har vært i ordinær bruk som veg og parkeringsplass.

### 1.4 Utfordringer med prosjektgjennomføringen

Prosjektet startet opp i april 2017 som et 3,5-årig prosjekt, men har blitt betydelig forsinket på grunn to forhold. For det første ble utviklingen av næringstomtarealet på Sveberg betydelig forsinket ift. opprinnelig plan, slik at testfeltet ble ferdigstilt først sent i november 2019 og tatt i ordinær bruk først i november 2020. For det andre satte covid-19 pandemien noen begrensinger ift. aktiviteter på laboratoriet og det øvrige aktivitetsnivået på testfeltet. Dette har ført til noe dreining av aktiviteter i mer retning av modellering og noe mindre testing i laboratoriet. Prosjekt ble avsluttet juni 2021, etter 4 år og 3 måneder.

### 1.5 Oppbygning av rapporten

Denne rapporten består av følgende kapitler:

- Kapittel 2: beskriver testfeltet
- Kapittel 3: presenterer avrenningsprofiler for permeable dekker type C målt på Sveberg
- Kapittel 4: presenterer nytt forslag til dimensjonering av permeable dekker type A, B og C
- Kapittel 5: presenterer infiltrasjonsegenskaper i topplaget (fugene mellom steinene)
- Kapittel 6: presenterer temperaturprofiler målt på Sveberg
- Kapittel 7: presenterer et litteratursøk om forurensing og permeable dekker
- Kapittel 8: presenterer nytt rammeverk for en helhetsvurdering av permeable dekker
- Kapittel 9: presenterer forslag for ny forretningsmodell for permeable dekker (studentarbeid)
- Kapittel 10: presenterer de viktigste læringspunktene fra prosjektet
- Kapittel 11: presenterer forslag til videre aktiviteter knyttet til testfeltet.

## 2 Testfeltet på Sveberg

### 2.1 Innledning

Et av hovedmålene med prosjektet var å etablere et testfelt på Sveberg som kunne brukes til demonstrasjon og dokumentasjon av permeable dekker.

Dette kapitlet gir en kort innføring i permeable dekker og overvannshåndtering og beskriver deretter hva som er bygget på Sveberg, hvilke instrumenter som er installert og hvilke måleprinsipper som ligger til grunn.

### 2.2 Permeable dekker versus vanlig belegningsstein

Et permeabelt dekke består av belegningsstein som i varierende grad gir åpninger i dekket slik at vann kan renne ned gjennom disse åpningene. Et tett dekke med vanlig belegningsstein vil ikke ha definert åpninger mellom steinene. Figur 1 viser tydelig forskjellen mellom et tett (venstre) og permeabelt (høyre) dekke.

Åpningene mellom steinene refereres til som fuger og fylles med fugesand. Evnen til å håndtere overvann vil være bestemt av hvor stor arealandel fugene utgjør i forhold til hele arealet og karakteristikken på fugesanden.

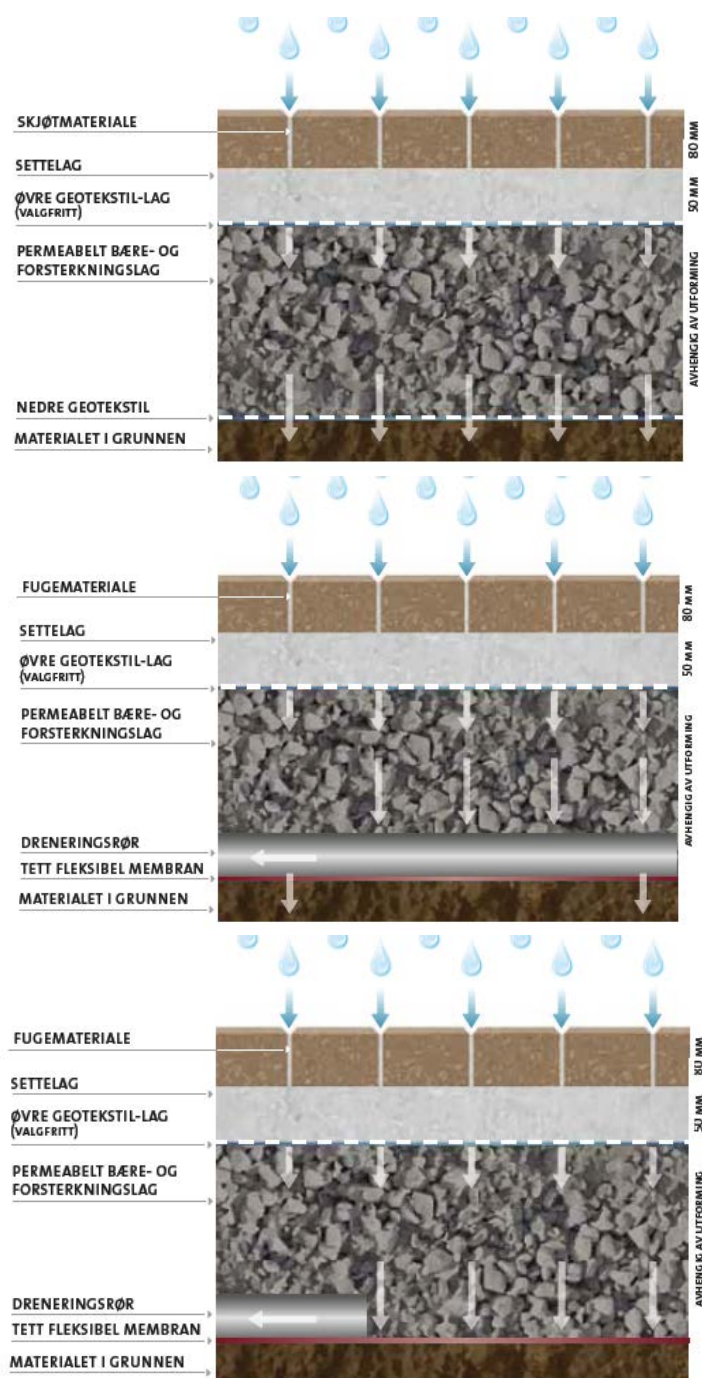
Underbygningen under belegningssteinen er ellers lik mellom tett og permeabelt dekke, men det permeable dekket krever at fyllmassene under dekket er fritt for finstoff.



Figur 1 Prinsipiell forskjell mellom vanlig belegningsstein (venstre) og stein beregnet for permeabelt dekke (høyre) (Foto: ASAK Miljøstein).

## 2.3 Ulike løsninger for permeable dekker

Det er i utgangspunktet 3 prinsipielle løsninger av permeabelt dekke med betongstein basert på hvordan vannet håndteres etter at det har passert de øverste lagene i dekket (jmf. Figur 2); *i*) total infiltrasjon (type A), *ii*) delvis infiltrasjon (type B), og, *iii*) ingen infiltrasjon (type C). Formålet med de to siste løsningene er å utnytte den fordrøyende effekten permeable dekker naturlig besitter.



Figur 2 Tre prinsipielle løsninger for permeable dekker; total infiltrasjon (type A), delvis infiltrasjon (type B) og ingen infiltrasjon (type C) [1].

## 2.4 Permeable dekker og overvannshåndtering

Tradisjonelt har overvann vært håndtert ved å lede vannet til nærmeste sluk for deretter å bli transportert i rør enten sammen med sanitært avløpsvann (felles system) eller i egne rørledninger (separat system). Ulempen for begge løsningene er at rørene har en begrenset kapasitet som ofte ikke tar høyde for økende overvannsmengder. Overvannshåndteringen har derfor i den senere tid fokusert på løsninger som kan begrense mengden overvann ved at alt eller noe av overvannet håndteres lokalt [2]. I Norge er dette arbeidet forankret i treleddsstrategien. Treleddsstrategien kategoriserer tiltak for å håndtere overvann inn i tiltak som (trinn 1) reduserer og forsinker avrenning gjennom infiltrasjon til grunnen, (trinn 2) forsinker avrenning gjennom fordrøyning og (trinn 3) sikrer trygg avledning til nærmeste resipient.

Avhengig av utforming kan permeable dekker med belegningsstein kategoriseres enten som et infiltrasjonstiltak, som et fordrøyningstiltak eller som begge deler. Effektiviteten til permeable dekker vil være avhengig av utforming og stedlige betingelser og kan variere fra fullstendig infiltrasjon der alt vannet infiltreres i grunnen til at alt vannet samles opp under det permeable dekket og slippes på det øvrige overvannssystemet med en forsinkelse. Videre vil permeable dekker typisk ha en avrenningskoeffisient på nivå som vanlig gress.

De ulike typene permeable dekker vil kunne relateres til de to første trinnene i treleddsstrategien. **System A – total infiltrasjon** brukes når grunnen under dekket har så god infiltrasjonskapasitet at grunnen vil kunne ta unna vannet som skal håndteres og som går gjennom det permeable dekket. Denne løsningen faller derfor inn under det første trinnet i treleddsstrategien.

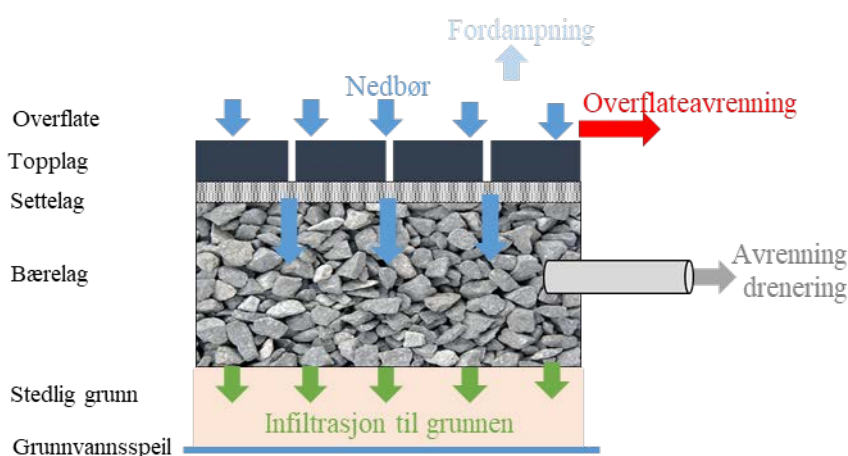
**System B – delvis infiltrasjon** benyttes når grunnen under dekket ikke har kapasitet til å infiltrere alt vannet som går gjennom det permeable dekket eller hvis grunnvannet i perioder blir stående i bærelaget til dekket. I tillegg til naturlig infiltrasjon lages det derfor en dreneringsløsning som drenerer vannet som ikke infiltreres til nærmeste ledningsnett, grøft eller annen resipient. Denne løsningen faller derfor inn under både det første og andre trinnet i treleddsstrategien.

**System C – ingen infiltrasjon** benyttes når grunnforholdene ikke tillater infiltrasjon eller når overvannet er så forurenset at man ikke ønsker å infiltrere vannet til grunnen. For denne løsningen legges det en tett membran mellom grunnen og bærelaget for å skille overvannet fra grunnvannet. I tillegg må det lages en dreneringsløsning som drenerer overvannet til nærmeste ledningsnett. Denne løsningen faller derfor inn under det andre trinnet i treleddsstrategien.

Kapasiteten til permeable dekker vil således avhenge av lagringskapasiteten i de underliggende lagene og infiltrasjonskapasiteten i grunnen. Det er tykkelsen på bærelag som utgjør vannlagringskapasiteten i systemet, mens den totale infiltrasjonskapasiteten til grunnen bestemmes i stor grad av de stedege masser. Figur 3 viser skjematisk oppbygning av et permeabelt dekke og typiske vannstrømmer. Man kan sette opp en overordnet vannbalanse over dekket der nedbøren fordeler seg på infiltrasjon til grunnen, avrenning til drenering (og videre til overvannssystemet eller resipient) og eventuelt overflateavrenning. Det vil også være noe vann som forsvinner i fordamping til lufta, men dette er som regel små mengder og neglisjeres ofte.

Overvannshåndteringsegenskapene til permeable dekker, også kalt den hydrologiske ytelsen til permeable dekker kan kvantifiseres ved å bestemme retensjons- og fordrøyningsegenskapene. Retensjonen er den permanente reduksjonen av overvann som håndteres av løsningen enten gjennom infiltrasjon til den opprinnelige grunnen under det permeable dekket (representert med de grønne pilene i Figur 3) eller gjennom fordamping av vannet som er lagret i de ulike lagene (representert med den lyseblå pila).

Fordrøyning er forsinkelse og dempning av mengden overvann målt ved et punkt der dreneringen fra det permeable dekket er koplet til et overvannsnett/avløpsnett eller resipient (representert med den grå pila i Figur 3). Fordrøyning vil typisk være beskrevet med ulike indikatorer som reduksjon av avrenningstopp og forsinkelse av avrenningstoppen. Dersom det kommer så mye vann på en gang at det permeable dekket ikke klarer å ta unna overvannet med enten infiltrasjon eller avrenning til fordrøyning, vil vannet akkumulere i de ulike lagene og til slutt gi overflateavrenning (representert med den røde pila i Figur 3). Merk at man kan også få overflateavrenning hvis fugene mellom belegningssteinene går tett på grunn av manglende vedlikehold eller andre årsaker.



Figur 3 Vannbalanse over permeable dekker.

## 2.5 Overordnet beskrivelse av testfeltet

Det var i utgangspunktet tenkt å bygge fire felter med ulike oppbygning/konfigurasjon, men dette ble i planleggingsfasen endret til seks felter. Det ble også diskutert i tidlig fase hvorvidt de ulike feltene skulle få avrenning fra et større område, men det ble konkludert med at vi ikke tilfører ekstra vann fra omkringliggende areal for å unngå usikkerhet. Usikkerheten knyttes særlig til økt forurensning som kan gi forringet ytelse uten at vi klarer å skille ut og forklare årsakene til dette.

Når det først skal etableres flere felter er det viktig at de bygges opp slik at de gir svar på de spørsmålene som man har. En systematisk tilnærming vil lette arbeide med å sammenligne og konkludere i etterkant. I det følgende er det derfor forsøkt å variere de ulike variablene slik at man kan sammenligne og trekke konklusjoner mellom minst to felter. Variablene som vil bli undersøkt er:

- **Belastning:** ulik bruk vil ha ulike krav til oppbygning av bærestrukturen og type stein. Det er derfor hensiktsmessig skille på løsninger for høy belastning som er representative for veier og løsninger for lav belastning som er representative for parkeringsplasser uten tungtransport.
- **Infiltrasjon/fordrøyning:** dette relateres til om man har total infiltrasjon eller om man har ingen infiltrasjon (vi velger å ikke se på den tredje varianten hvor vi har begge deler, dvs. delvis infiltrasjon og delvis fordrøyning da dette kompliserer vannbalansen).

- **Bærelagstykkelse:** se på to ulike bærelagstykkelser for lav belastning, f.eks. standard tykkelse i henhold til veileder og en variant som er tynnere/alternativ steinkvalitet.
- **Type belegningsstein:** se på to typer permeable belegningssteiner, samt vanlig belegningsstein.

Etter flere møter mellom de ulike partene i prosjektet ble følgende oppsett for de ulike feltene valgt:

- Felt 1: stein 1, høy belastning (veg) og total infiltrasjon, bærelag 1
- Felt 2: stein 1, høy belastning (veg) og ingen infiltrasjon, bærelag 1
- Felt 3: stein 1 lav belastning (parkering) og ingen infiltrasjon, bærelag 2
- Felt 4: stein 2, lav belastning (parkering) og ingen infiltrasjon, bærelag 2
- Felt 5: stein 2, lav belastning (parkering) og total infiltrasjon, bærelag 1
- Felt 6: vanlig stein, lav belastning (parkering) og total infiltrasjon, bærelag 1 (referansefelt)

Det har også vært et poeng at de ulike feltene skal utsettes for naturlig bruk og således inngå i den daglige bruken av tomta. For å illustrere poenget viser Figur 4 en mulig integrering av de ulike feltene som del av ankomstvegen og parkeringsplassen til Vikaune Fabrikker sin tomt.

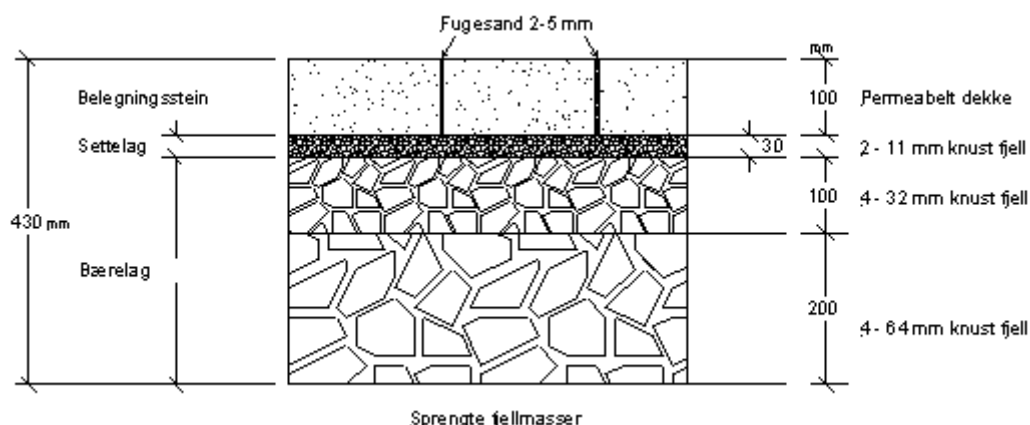


Figur 4 Integrering av feltene i øvrige funksjoner sentralt på tomta, tidlig skisse. Testfeltet sees som det svarte området midt i skissen.

## 2.6 Detaljert beskrivelse av de ulike feltene

En generell oppbygging av permeable dekker er vist i Figur 5 og består av belegningsstein med fugesand, settelag og bærelag. Bærelaget deles ofte i to, et øvre og et nedre bærelag, der det nedre bærelaget betegnes i enkelte sammenhenger som forsterkningslag. Figuren viser også anbefalt gradering av de ulike massene.

Et viktig moment med permeable dekker er at alle massene som benyttes må være uten finstoff. Dette gjelder særlig for fugesand og settelag, men også for de grovere massene i bærelaget.



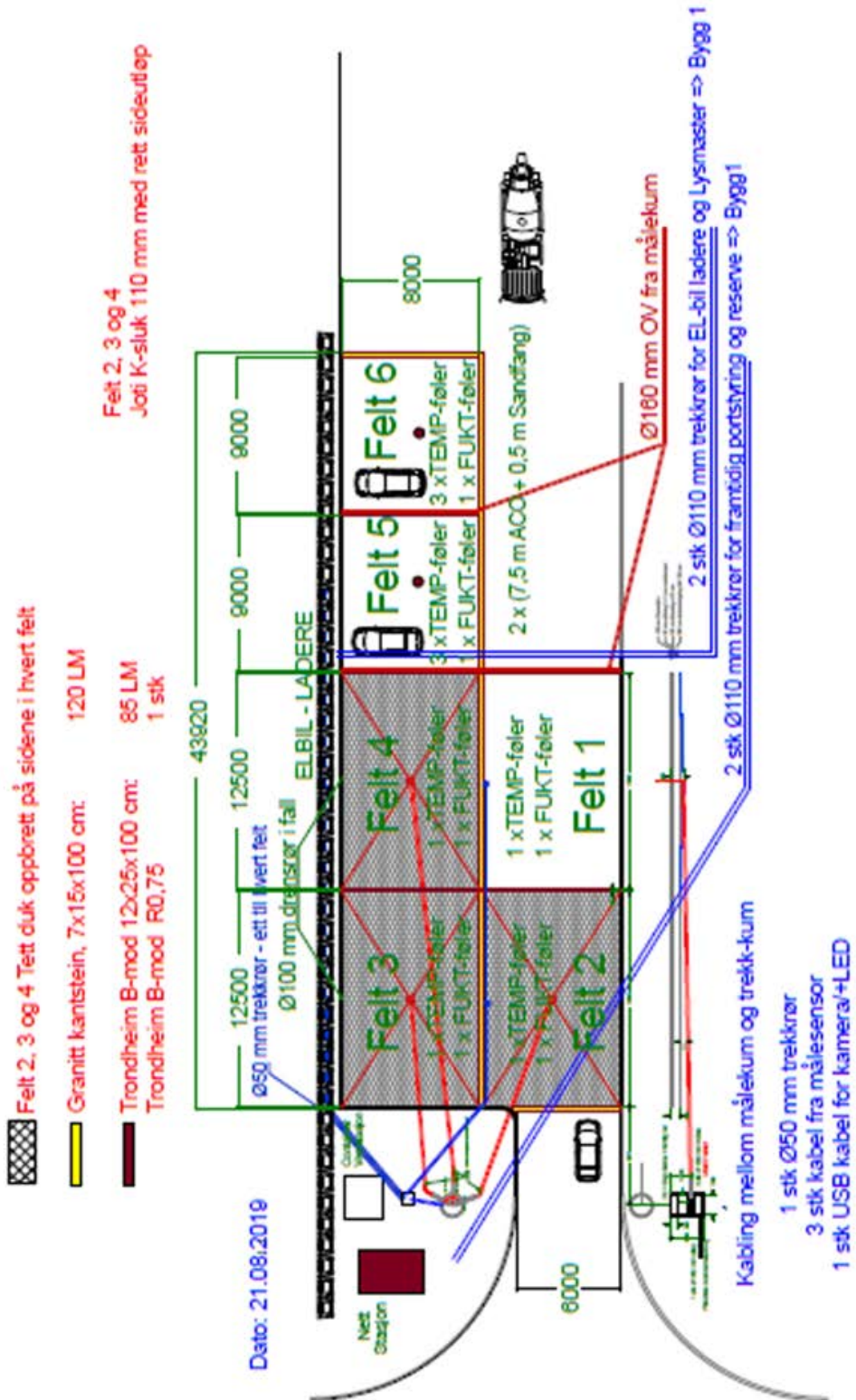
Figur 5 Typisk oppbygning av permeable dekker (Kilde: Lintho Steinmiljø).

Tabell 1 viser endelig detaljert oppbygning av hvert av feltene. Den praktiske utformingen av feltene er vist i arbeidstegningen i Figur 6, som bl.a. viser plassering av selve feltene i forhold til innkjøring, plassering av mobil feltstasjon og målekum. Videre er det vist plassering av kantstein mellom feltene, plassering av ACO-renne mellom feltene 5 og 6, mellom 4 og 5 og mellom 1 og øvrig området (nøyaktig plassering av ACO-renne vises best i Figur 7). I tillegg vises omtrentlig plassering av sluk under feltene 2, 3 og 4 med dreneringslinjer, mens nøyaktig plassering og dimensjoner er gitt i Figur 7.

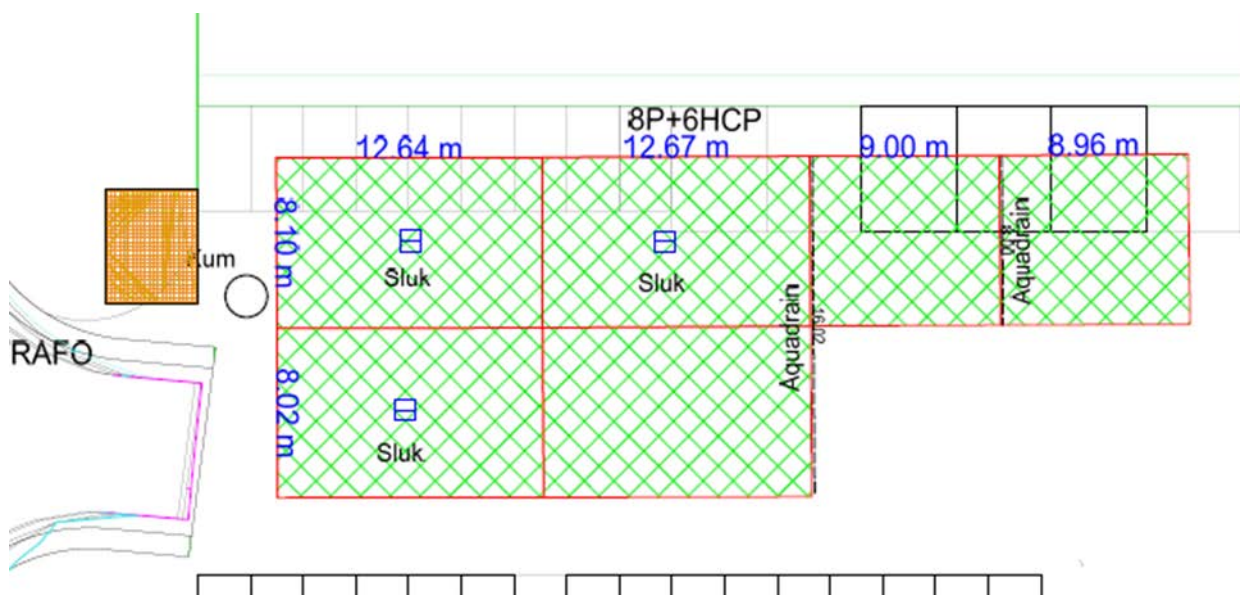
Figur 8 viser et oversiktsbilde over testfeltene med markering av de ulike feltene og den mobile feltstasjonen. Figur 9 viser flere detaljer av den mobile feltstasjonen, bl.a. værstasjon og kamera, og innføring av kabelbunt fra sensorene. Datalogging og overføring ble forsynt av en batteripakke koplet til solceller, men fra mars 2021 ble hele anlegget koplet til 230 VDC.

Tabell 1 Detaljert oppbygning av hvert felt. Svart skrift viser hva som er valgt som standard på testfeltet, mens rød skrift viser der oppbygningen avviker fra de øvrige feltene.

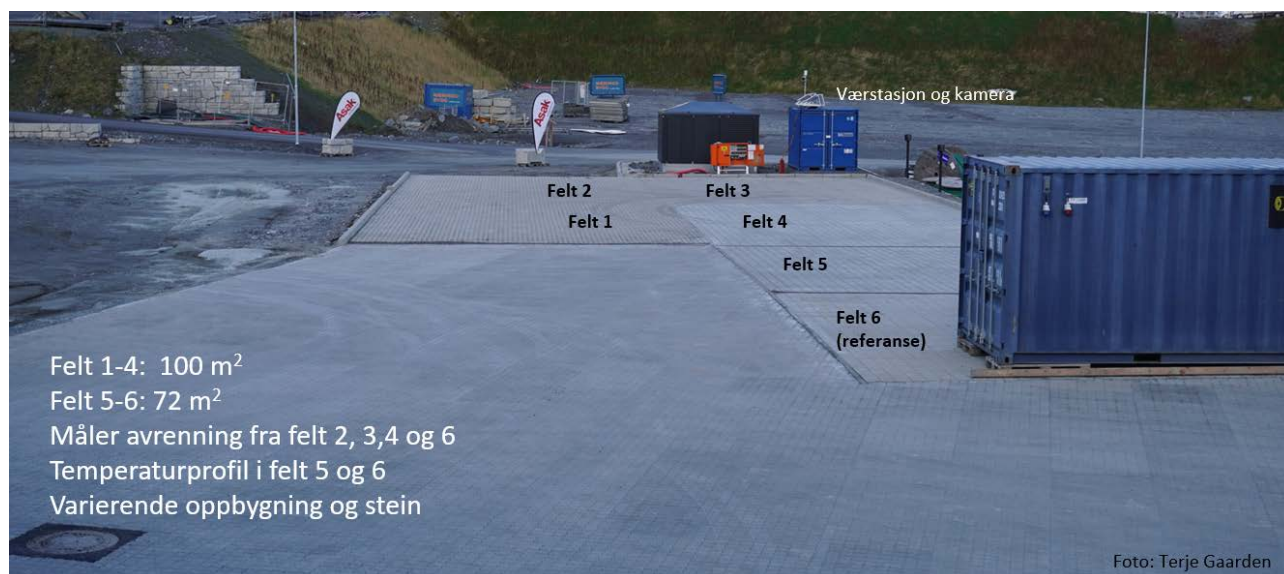
	Felt 1	Felt 2	Felt 3	Felt 4	Felt 5	Felt 6
Belegningsstein	Permac-Lock 100 mm	Permac-Lock 100 mm	Permac-Lock 100 mm	ASAK Dren 80 mm	ASAK Dren 80 mm	ASAK P-STEIN 70 mm
Fugesand	gradering 2-5 mm	gradering 2-5 mm	gradering 2-5 mm	gradering 2-5 mm	gradering 2-5 mm	gradering 0-2 mm
Settelag	tykkelse 30 mm, gradering 2-11 mm	tykkelse 30 mm, gradering 2-11 mm	tykkelse 30 mm, gradering 2-11 mm	tykkelse 30 mm, gradering 2-11 mm	tykkelse 30 mm, gradering 2-11 mm	tykkelse 30 mm, gradering 0-8 mm
Bærelag øvre	tykkelse 100 mm, gradering 4-32 mm	tykkelse 100 mm, gradering 4-32 mm	tykkelse 100 mm, gradering 4-32 mm	tykkelse 100 mm, gradering 4-32 mm	tykkelse 100 mm, gradering 4-32 mm	tykkelse 100 mm, gradering 0-32 mm
Bærelag nedre (forsterkningslag)	tykkelse 350 mm, gradering 20-120 mm	tykkelse 350 mm, gradering 20-120 mm	tykkelse 250 mm, gradering 20-120 mm	tykkelse 250 mm, gradering 20-120 mm	tykkelse 350 mm, gradering 20-120 mm	tykkelse 350 mm, gradering 20-120 mm
Drenering	Total infiltrasjon	Duk, vann samles opp og avrenning måles i kum	Duk, vann samles opp og avrenning måles i kum	Duk, vann samles opp og avrenning måles i kum	Total infiltrasjon	Overflatedrenering (2% bort fra testfeltet til ACO renne)
Tetning/kanter	Kantstein og renner ble brukt til å skille feltene fra hverandre. Må være obs på at testfeltene ikke skal få unødvendig tilrenning fra omkringliggende områder. Må også sees i sammenheng med øvrig bruk. Felt 2, 3 og 4 planlegges med vanntett duk med noe oppbrett og dreneringsrør med avrenning til målepunkt i kum.					
Instrumentering	Temp Fukt	Temp Fukt Flowmåling	Temp Fukt Flowmåling	Temp Fukt Flowmåling	Temp x 3 Fukt	Temp x 3 Fukt Grunnvannsstand (ikke montert)



Figur 6 Arbeidstegning av testfeltet (Tegning: Terje Gaarden).



Figur 7 Nøyaktig lengde og bredde på de ulike feltene, samt plassering av sluk og ACO-renner (Kilde: Br. Bjerkeli).



Figur 8 Ferdig bygget testfelt med 6 ulike felter (Foto: Terje Gaarden).



Figur 9 Mobil feltstasjon med værstasjon, kamera, dataloggere og dataoverføringsenheter (Foto: Terje Gaarden).

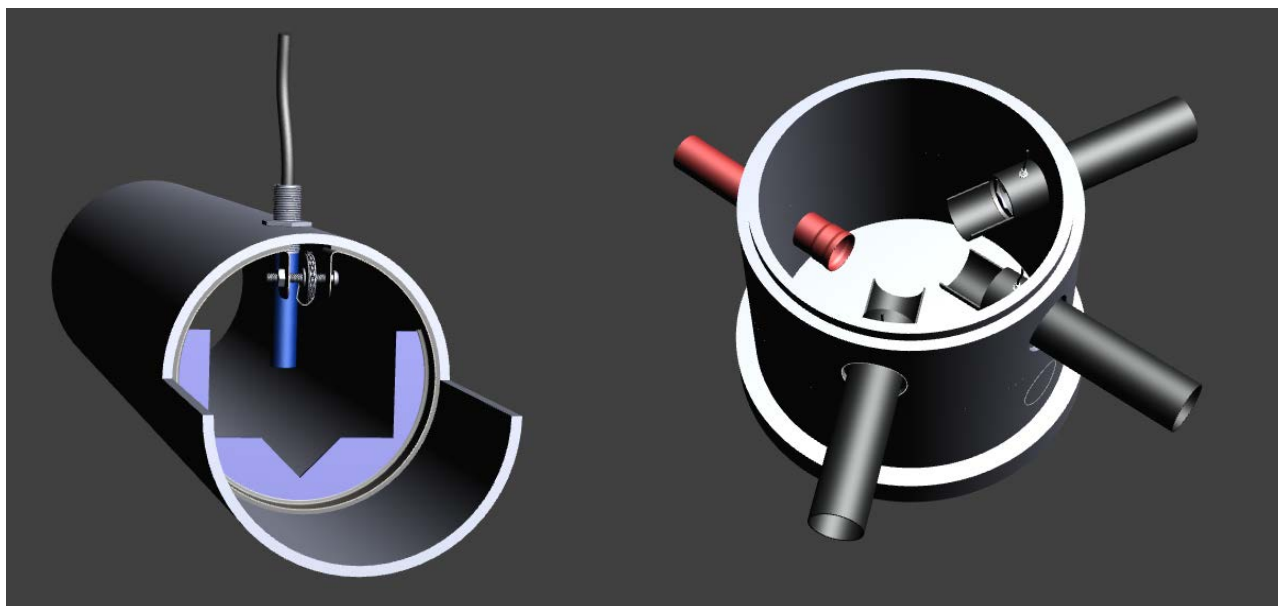
## 2.7 Måleprinsipp avrenning

Tre av feltene (felt 3, 4 og 5) har en vanntett duk i bunnen med fall inn mot midten av feltet der det er plassert en K-sluk, se Figur 6. Fra sluket ledes vannet i 110 mm rør til en målekum der mengden avrenning måles (se Figur 10). For å måle avrenningen så nøyaktig som mulig er rørdiameteren økt fra 110 mm til 200 mm den siste meteren før kummen og det er satt inn et V-profil fra THEL-MAR INC (USA) (se Figur 10 og Figur 11). Det vil da danne seg et lite vannspeil bak V-profilet og når det kommer vann fra feltet som følge av regn vil høyden på vannspeilet øke. Ved å måle høyden på vannspeilet kan avrenningen beregnes fra en kalibreringskurve mellom høyde på vannspeilet (relativt til høyden til spissen på V-profilet) og målt avrenning. Denne sammenhengen er målt av produsenten og oppgitte måledata er gjengitt i Vedlegg A.

Fra den målte kalibreringskurven fra produsenten er det laget en regresjonsmodell som beregner avrenningen fra en hvilken som helst målt høyde. Figur 12 viser både de målte dataene (punkter) og modellen (linje) som er brukt til å beregne avrenningen fra feltene på Sveberg. Formelen for omregning fra høyde til avrenning er:

$$Q = 1.8459 + 11.6328 * h + 3.0452 * h^2 - 0.3984 * h^3 - 0.0526 * h^4 + 0.1243 * h^5$$

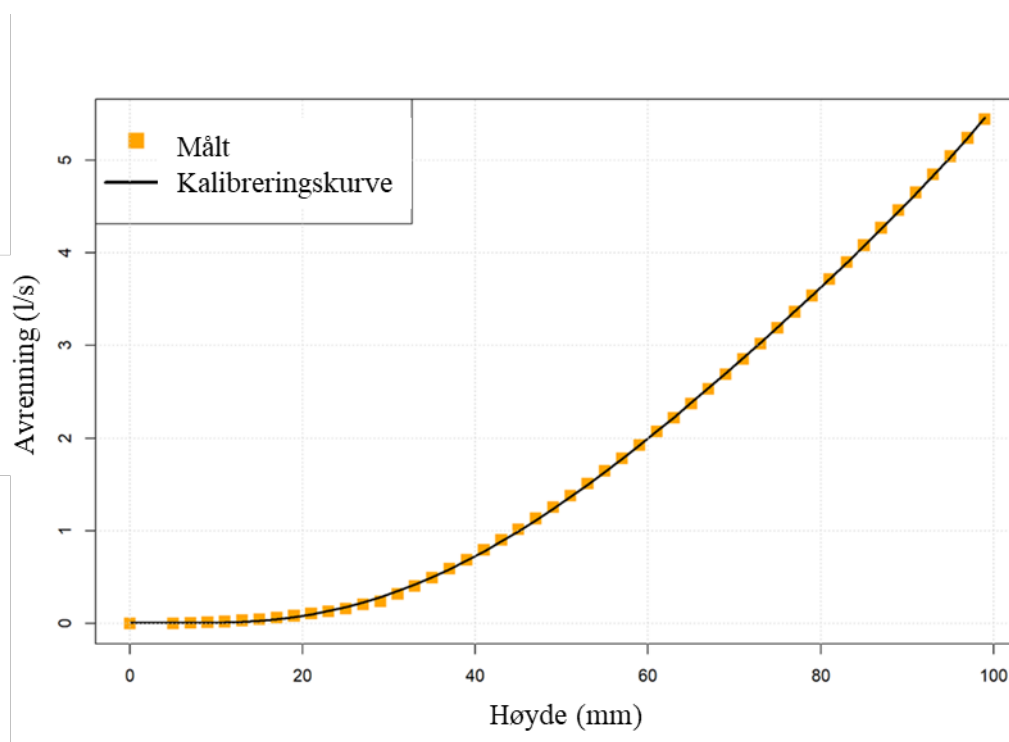
der  $Q$  er avrenning i l/s og  $h$  er målt høyde over spissen på V-profilet i mm.



Figur 10 V-profil og plassering av ultralydsensor (venstre) og plassering av de tre utløpene i målekummen (Tegninger: Terje Gaarden).



Figur 11 V-profil 200 mm for å kontrollere avrenning (Foto: Edvard Sivertsen).



Figur 12 Kalibreringskurve høyde (mm) til avrenning (l/s).

Det var i utgangspunktet ikke planlagt å måle avrenning fra referansefeltet (felt 6), men det ble mot slutten av prosjektet bestemt å prøve å måle avrenning fra dette feltet også. Feltet heller svakt mot ACO-renne som går langs hele kortsiden som er felles med felt 5 (se Figur 6). ACO-renna har utløp til overvannsledning i den ene enden og det ble derfor bestemt å lage et V-profil og bruke samme måleprinsipp som for avrenning av de feltene 2, 3 og 4. Høyden på vannspeilet er imidlertid målt ved hjelp av trykk. V-profilet ble tegnet og 3D-printet av Terje Gaarden. Figur 13 viser både tegning (venstre) og installert V-profil (høyre), der trykkmåleren ble plassert i forkant av V-profilet som sees på fotoet.

Målt trykkehøyde må korrigeres for lufttrykk før avrenning kan beregnes teoretisk fra:

$$Q = C_m * g^{1/2} * \tan(\theta/2) * (h-h_0)^{5/2}$$

$$= 2.219 * (h-h_0)^{5/2}$$

Der  $h$  er målt høyde,  $C_m$  er konstant  $g$  som varierer med type V-profil og  $h_0$  er nullnivå.



Figur 13 V-profil plassert i ACO-renne for å måle avrenning av felt 6, tegning for 3D-printing (venstre) og ferdig løsning (høyre) (Tegning og foto: Terje Gaarden).

## 2.8 Instrumentering

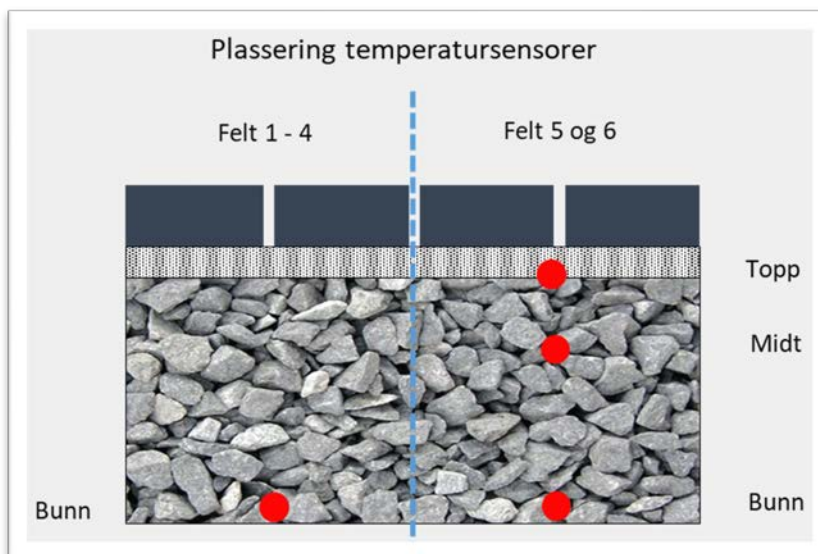
### 2.8.1 Avrenning

Avrenning fra felt 2, 3 og 4 måles ved å måle høyden på vannspeilet ved hjelp av en ultralydsensor. Det er benyttet totalt tre PIL43 30-400 mm nivåsensorer.

For å måle avrenning fra felt 5 er det benyttet en batteridrevet trykksensor med logger (type Diver fra vanEssen). Diveren er lånt av NTNU.

### 2.8.2 Temperatur

Temperaturen i de ulike lagene av det permeable dekket er målt med Campbell Scientific 107 jordtemperatursensor. Det er installert totalt ti temperatursensorer som anvist i Figur 14. Alle temperatursensorene er plassert midt i feltet.



Figur 14 Høydeplassing temperatursensorer, sentrert midt i feltet.

### 2.8.3 Fukt

For å få en indikasjon på om det samler seg vann i bunnen av bærelaget (mot naturlig grunn) er det installert fuktsensorer av typen WA600 Water Alarm Sensor fra Global Water. Disse gir kun et av/på signal som indikerer om sensoren står i vann. Det er installert seks slike fuktsensorer, en i hvert felt som anvist på Figur 15.



Figur 15 Høydeplassing fuktsensorer, sentrert midt i feltet.

### 2.8.4 Vannstand steinfylling

Det ble innledningsvis vurdert som fornuftig å måle vannstanden i den store steinfyllingen som utgjør det nye industriområdet. Det ble kjøpt inn en trykksensor med temperatur som er beregnet å monteres i en 1" stålrør i grunnen, men denne sensoren er ikke installert. Sensoren er av typen PT12 fra Seametrics.

### 2.8.5 Værstasjon

Det er montert en værstasjon av typen Vaisala Weather Transmitter WXT520. Værstasjonen måle nedbør, vindhastighet, vindretning, lufttemperatur, lufttrykk og relativ fuktighet.

### 2.8.6 Kamera

Det er også montert et kamera av typen Campbell CCFC som tar bilder en gang i timen.

### 2.8.7 Datalogging

Det er installert to datalogger fra Campbell Scientific, en CR300 og en CR1000, som hver er koplet til hvert sitt modem for dataoverføring. All instrumentering, datalogging og lagring er levert av ITAS Scanmatic. Data vises i en web-løsning, der data også lastes ned.

Nettsted:        sensordata.no  
Brukernavn:    VikauneNTNU  
Passord:        -

### 2.8.8 Dokumentasjon

Datablad og manualer er samlet i egen katalog under "leveranser". Den ene manualen for logge-oppsettet av værstasjonen finnes kun i papirformat og er lokalisert i feltstasjonen.

### 2.8.9 utfordringer med sensorene

Følgende utfordringer er registrert:

- Temperatursensorene: det ble innledningsvis observert noe støy på enkelte temperatursensorer, men støyene forsvant etter at koblingene i koblingsskapet ble strammet
- Nivåsensorene: er i perioder ustabile der det virker som det måles enten et minimum eller maksimum signal. Den ene sensoren er mer ustabil enn de to andre. Det er ikke klart å finne årsakene til dette og per nå er dette problemet uløst.
- Fuktbryterne: verdiene fra disse sensorene er binært, enten "0" for ingen fukt eller "1" for fukt. Det er flere av disse sensorene som får utslag og viser "1" uten at det kan forklares med nedbør. Det er ikke klart å finne noen god forklaring på dette og per nå er det usikkert å bruke resultatene fra disse sensorene.

### 3 Målt og modellert fordrøyning permeable dekker type C

*Dette kapitelet oppsummerer resultatene fra E.M.H. Abdalla, I. Selseth, T.M. Muthanna, H. Helness, K. Alfredsen, T. Gaarden, E. Sivertsen, Hydrological performance of lined permeable pavements in Norway, Publisert i journalen Blue-Green Systems i 2021 [3].*

#### 3.1 Innledning fordrøyningsløsning

Permeable dekker type C som inkluderer drenering i rør til et ledningsnett eller resipient egner seg for steder med lav infiltrasjonskapasitet lavt grunnvannsspeil eller områder der annen infrastruktur ikke tåler infiltrering av overvann i særlig grad. Type C kan legges med en tett duk eller lignende i bunn for å sikre at alt vannet som renner gjennom toppdekket samles opp og ledes til ønsket sted.

For type C er det den fordrøyende egenskapen av overvannet som er den dominerende effekten, da tidligere studier har vist at fordamping fra løsningen er begrenset til rundt 2-8 % av den årlige nedbøren (Brown and Borst, 2015). Fordrøyningseffekten kan måles med ulike indikatorer, for eksempel redusert avrenningstopp, forsinket avrenningstopp, forsinket avrenning av massetyngdepunktet av nedbør og avrenning (sentroidforsinkelse) og forsinket volumavrenning (T50).

Indikatorer som baserer seg på enkelthendelser av nedbør viser ofte stor variasjon i målingene, noe som delvis skyldes at avrenningsegenskapene er avhengig av tilstanden til løsningen når det begynner å regne og delvis selve egenskapene til regnhendelsen. Tilstanden til løsningen vil være avhengig av hvilken belastning løsningen har vært utsatt for i dagene før regnhendelsen inntreffer som for eksempel langvarig tørke eller regn, mens regnintensitet, varighet og formen på hyetografen (regnværsprofilen) vil også påvirke løsningens evne til å håndtere overvannet.

For å gi mer robuste svar på hvor effektivt en løsning kan håndtere overvann kan man beregne ulike indikatorverdier for mange hendelser og gi disse som kumulative tetthetsfunksjon. Dette vil kreve målinger fra mange ulike hendelser og vil være tidkrevende å samle inn. Et annet alternativ er å simulere nedbørshendelser basert på lange reelle tidsserier og beregne varighetskurver. En variant av varighetskurver viser forholdet mellom avrenningsverdier og varighet når disse avrenningsverdiene overskrides.

Hensikten med dette kapitelet er:

- Presentere regnhendelser med målt avrenning fra Sveberg
- Beregne ulike indikatorer for fordrøyning
- Kalibere og validere modeller for permeable dekker type C
- Bruke modellene til å konstruere varighetskurver og sammenligne egenskapene til permeable dekker med tette flater.

## 3.2 Materialer og metode

### 3.2.1 Regnhendelser og målt avrenning

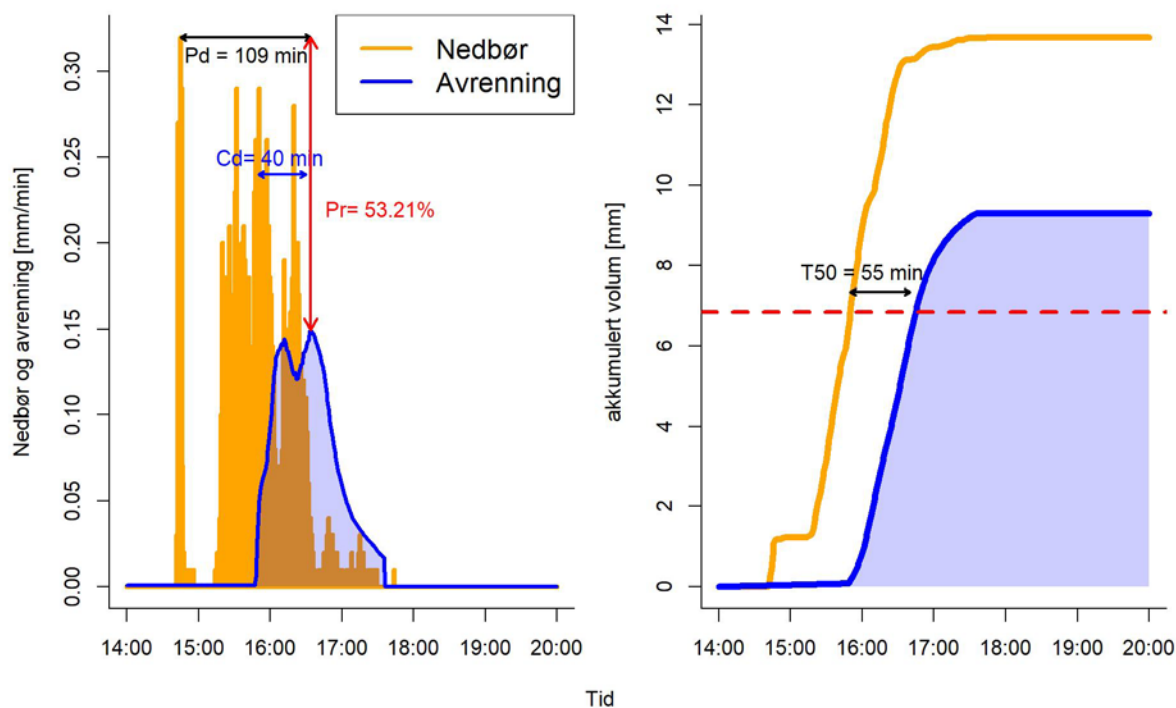
I løpet av måleperioden mellom august og desember 2020 ble det registrert 11 nedbørs- og avrenningshendelser med tilfredsstillende kvalitet på dataene. Dato og klokkeslett, maksimum intensitet og total nedbør er gitt i Tabell 3 under resultatdelen.

### 3.2.2 Indikatorer for fordrøyning

Fire ulike indikatorer for å beskrive fordrøyningsegenskapene til løsningen er beregnet. Disse er:

- Pr (peak reduction): redusert avrenningstopp
- Pd (peak delay): forsinket avrenningstopp
- Cd (centroid delay): forsinket avrenning av massetyngdepunkt (sentroid) av nedbør og avrenning, heretter kalt sentroidforsinkelse
- T50: forsinket volumavrenning målt fra 50 % av akkumulert nedbør mot akkumulert avrenning.

Beregning av de fire indikatorene er illustrert i Figur 16.



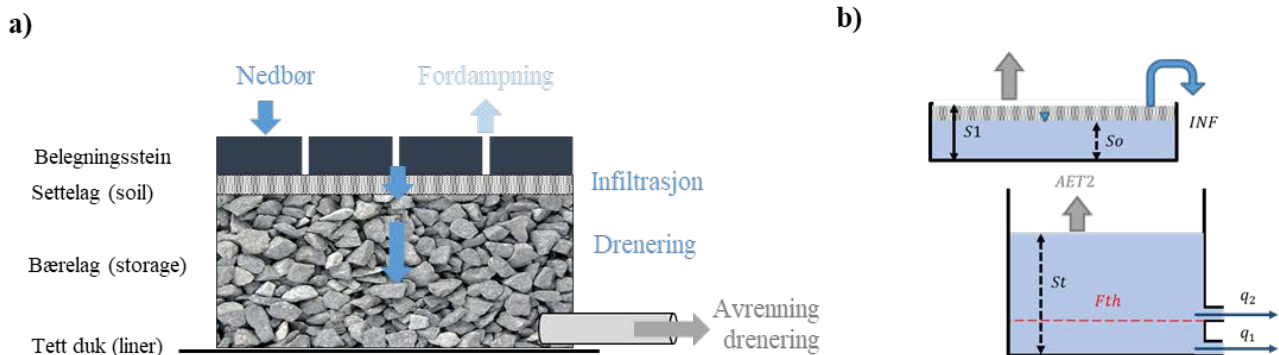
Figur 16 *Illustrasjon som viser hvordan man beregner de ulike indikatorene for fordrøyning basert på nedbørsregistrering (gult) og målt avrenning (blå).*

### 3.2.3 Modeller av permeable dekker type C

To typer modeller er benyttet i forsøket med å beskrive egenskapene til permeable dekker type C, nemlig en SWMM-PP modell og en reservoarmodell. En konseptualisering av modellene er gitt i Figur 17.

SWMM-PP-modellen er en forenklet fysisk-basert modell. Den kan også klassifiseres som en hybridmodell ettersom den kombinerer fysisk-baserte ligninger og empirisk formel for drenering. SWMM-PP modellen deler det permeable dekket i tre lag, nemlig topplag (belegningsstein), settelag og bærelag. Vannet infiltrerer fra topplaget til settelaget basert på permeabiliteten til fugene mellom belegningssteinene. Vanntransporten gjennom settelaget er modellert ved hjelp av Darcy ligning, der vann lagres permanent inntil fuktighetsinnholdet overstiger feltkapasiteten. Vannet renner deretter videre til bærelaget der den videre dreneringen bestemmes ved hjelp av en empirisk ligning som er en funksjon av vanndybden over dreneringsrøret. De viktigste parameterne i SWMM-PP modellen er beskrevet i Tabell 2 med både øvre, nedre og valgte verdier.

Reservoarmodellen beskriver det permeable dekket med to lag: settelag og bærelag. Nedbør faller i settelag og fyller tilgjengelig lagring ( $S1-S0$ ). Vann begynner å infiltrere ( $INF$ ) til bærelaget når feltkapasiteten til settelaget ( $S1$ ) overskrides. Bærelaget er representert ved en reservoarmodell med to utløp: det nedre utløpet simulerer de lave avrenningen mens et øvre utløpet modellerer de høye avrenningene. Avrenning fra det øvre utløpet starter etter at dybden ( $St$ ) overstiger en viss terskelverdi ( $Fth$ ). Vannutstrømningen gjennom utløpene styres av parameterne  $k_1$  og  $k_2$ , og verdien av  $k_1$  som er tilordnet det nedre utløpet er mye mindre enn verdien av  $k_2$ . Parameterne i reservoarmodellen er beskrevet i Tabell 2 med både øvre, nedre og valgte verdier.



Figur 17 Konseptualisering av hhv. SWMM-LL modellen (a) og reservoarmodellen (symbolene er forklart i teksten over) (b).

Tabell 2 Parametere i SWMM-PP modellen (for nærmere beskrivelse av disse vises det til artikkelen og reservoarmodellen).

Modell	Parameter	Lag	Symbol	Nedre grense	Øvre grense	Optimalisert verdi
SWMM-PP	Manning	Overflate				0.1
	Hulromsfraksjon	Topplag	voidP	0.1	0.9	0.1
	Fraksjon tett flate		Imp	0.5	1	0.9
	Permeabilitet		Perm	5	20	20
	Porøsitet	Settelag	POR	0.25	0.5	0.44
	Feltkapasitet		FC	0.07	0.25	0.1
	Wilting punkt		WP	0.01	0.06	0.05
	Konduktivitet		Kc	10	1000	1000
	Konduktivitet stigningstall		Kcs	5	60	35
	Høyde		Sh	1	100	50
	Hulromsfraksjon	Bærelag	voidS	0	1	0.01
	Strømningskoeffisient	Drenering	dCoff	0	1	1
	StrømningsekspONENT		Dexp	0	3	0
	Høyde dreneringsrør					0
	Initiell metning	-				varieres
Reservoar modell	$S1$	Settelag		0	30	3
	$k1$	Bærelag		0	1	0.04
	$k2$			0	1	0.004
	$Fth$					2.5
	Initiell metning	-				varieres

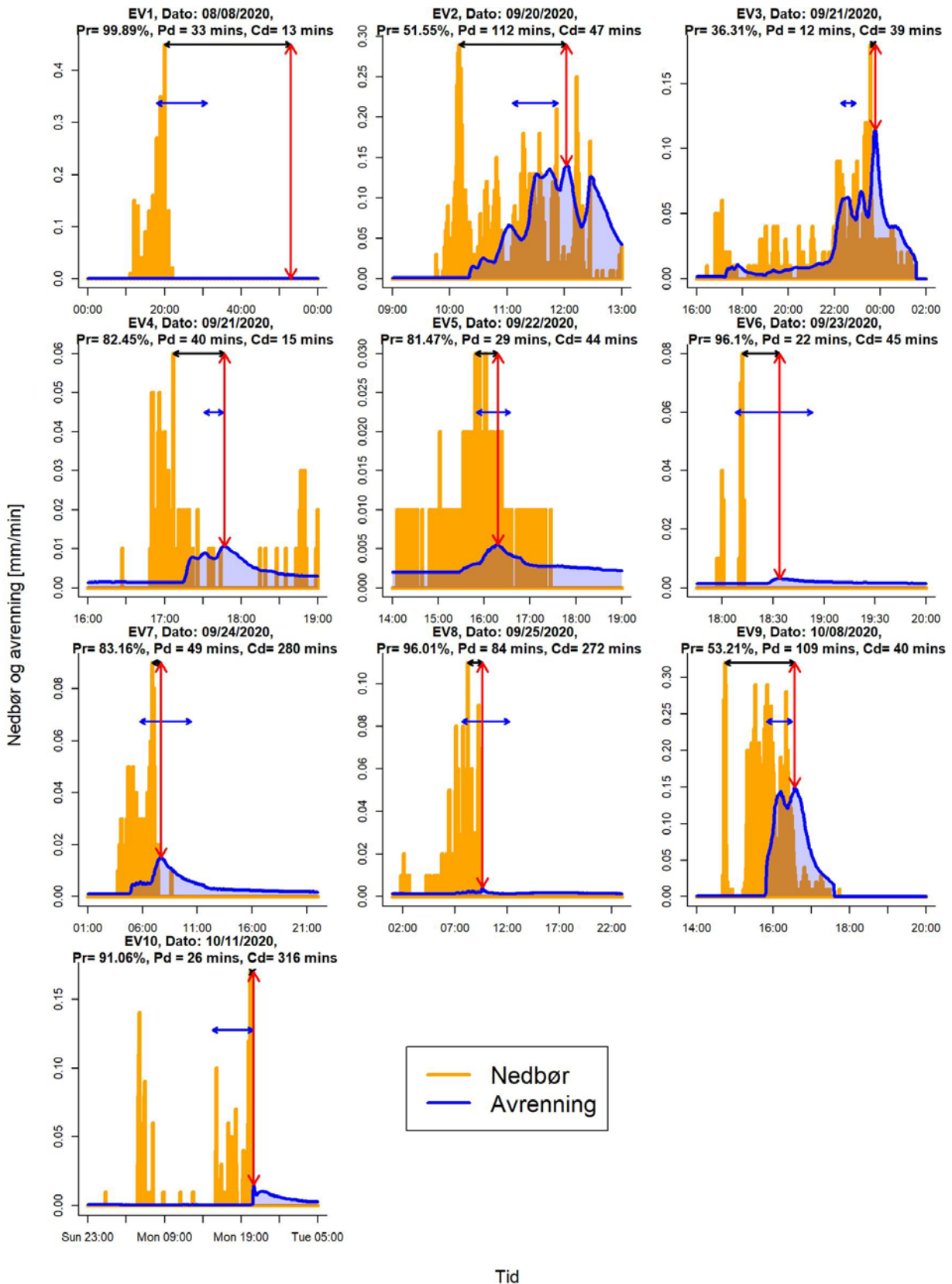
### 3.3 Resultater

#### 3.3.1 Målt fordrøyning

I løpet av måleperioden ble det identifisert 11 regnhendelser der man hadde tilstrekkelig med data for nedbør og avrenning. Figur 18 viser nedbør og målt avrenning for hendelsene 1-10, mens Figur 19 viser nedbør og avrenning for hendelsene 11. For hver av hendelsen ble reduksjonen i avrenningstopp, forsinkelse i avrenningstopp og sentroidforsinkelsen beregnet, der disse størrelsene er illustrert med piler i figurene. Videre ble T50 forsinkelsen beregnet. Tabell 3 viser en oversikt over nedbørshendelsene og de beregnede indikatorene for fordrøyning av overvann.

Resultatene viser at permeable dekker type C reduserer avrenningstoppen betydelig, der gjennomsnittsverdien for redusert avrenningstopp er 81 % og varierer mellom 45 % og 100 %. Videre er gjennomsnittlig fordrøyning av avrenningstoppen 52 minutter, av sentroidforsinkelsen 107 minutter og T50 185 minutter. Verdiene er i god overenstemmelse med litteraturverdier der det finnes sammenlignbare tall (se artikkelen for referanser).

Et viktig poeng er at disse indikatorene er avhengige av starttilstanden og volumet av nedbørshendelsen. De laveste verdiene av indikatorene ble funnet for hendelse 3, som har en høy nedbørsmengde (8.8 mm fordelt over ca. 10 timer). I tillegg kan man anta at løsningen var våt da hendelse 3 begynte på grunn av hendelse 2 som fant sted rett forut for hendelse 3. På den annen side ble det oppnådd høy reduksjon av avrenningstopp og gode fordrøyningssegenskaper for hendelse 8 som hadde en nedbørsmengde på 2.53 mm fordelt på ca. 8 timer.



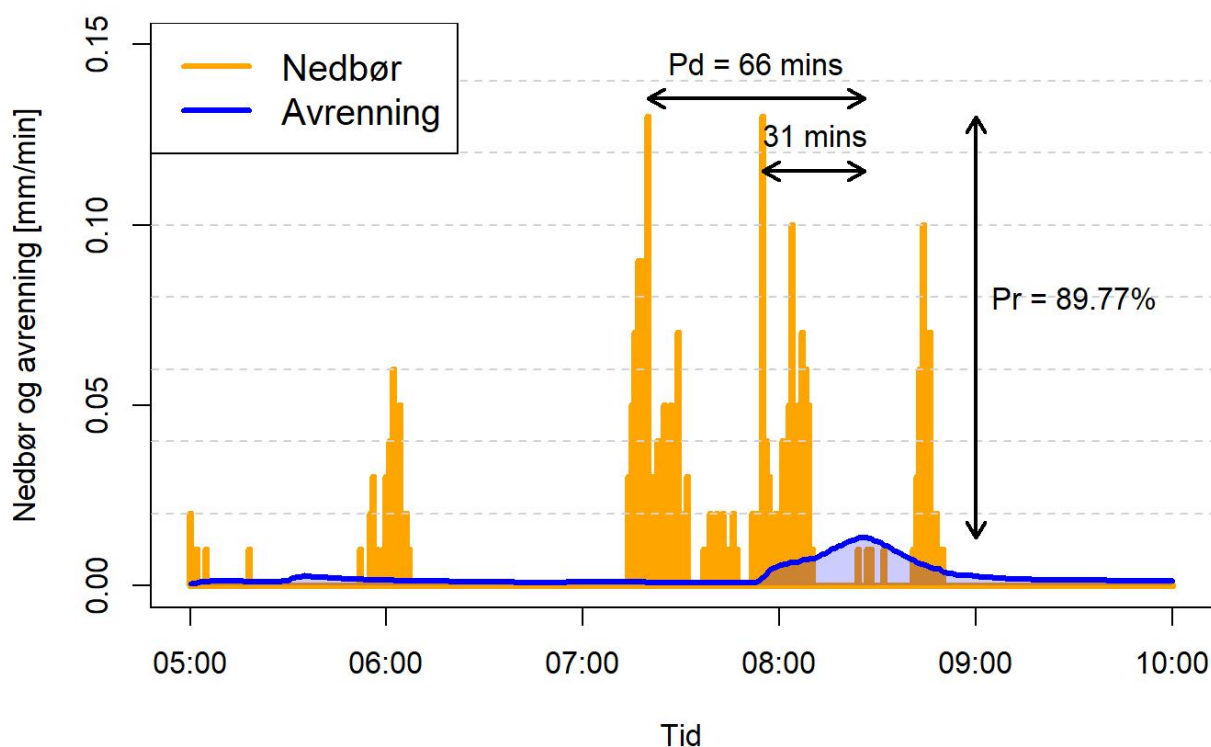
Figur 18 Nedbør og målt avrenning for hendelsene 1-10.

En utfordring med virkelige hendelser og måledata er å få bestemt de ulike indikatorene entydig, da det ofte kan være vanskelig å bedømme når en hendelse starter og slutter, når inntreffer nedbørstoppen og når inntreffer avrenningstoppen. Dette gjør at det knyttes noe usikkerhet til noen av verdiene. Når det gjelder å beregne reduksjon i avrenningstopp er dette vurdert å være relativt sikkert, mens for de øvrige fordrøyningsindikatorene har det vært noen utfordringer. For eksempel er det uklart hvordan man skal bestemme verdien av forsinkelse av avrenningstoppen til hendelse 11 da denne nedbørshendelsen har flere topper med samme størrelse, se Figur 19. Videre, for å bestemme T50, må minst 50 % av nedbøren konverteres til avrenning innen det gitte tidsrommet. For små nedbørshendelser og tørre forhold ved starten av hendelsen vil imidlertid det meste av vannet akkumuleres i løsningen, og mengden avrenning vil ikke nå 50 % av nedbørmengden (gjelder hendelsene 1,5,10 og 11).

Tabell 3 *Nedbørshendelser og beregnede indikatorer for redusert avrenningstopp og fordrøyning.*

Hendelse	Start	Slutt	Max (mm/min)	Sum (mm)	Pr (%)	Pd (min)	Cd (min)	T50 (min)
1	08.08.2020 14:00	08.08.2020 15:00	0.45	1.94	99.97	33	18	-
2	20.09.2020 09:00	20.09.2020 13:00	0.29	10.92	55.59	112	47	45.0
3	21.09.2020 16:00	22.09.2020 02:00	0.18	8.8	44.65	12	45	9.6
4	21.09.2020 16:00	21.09.2020 19:00	0.06	0.9	87.52	40	14	93.6
5	22.09.2020 14:00	22.09.2020 19:00	0.03	1.72	88.77	29	44	-
6	23.09.2020 17:45	23.09.2020 20:00	0.08	0.29	97.26	22	45	86.4
7	24.09.2020 01:00	24.09.2020 22:00	0.09	4.78	87.38	49	279	395.4
8	25.09.2020 01:00	25.09.2020 23:00	0.11	2.53	97.56	84	269	606.0
9	08.10.2020 14:00	08.10.2020 20:00	0.32	13.69	57.92	109	40	62.4
10	11.10.2020 23:00	13.10.2020 05:00	0.17	6.31	93.3	26	351	-
11	23.12.2020 05:00	23.12.2020 10:00	0.13	2.76	89.77	66	26	-
<b>Gjennomsnittlige verdier</b>					<b>81.8</b>	<b>52.9</b>	<b>107.1</b>	<b>185.5</b>

Pr: redusert avrenningstopp, Pd: fordrøyning avrenningstopp, Cd: sentroidforsinkelse, T50: fordrøyning T50



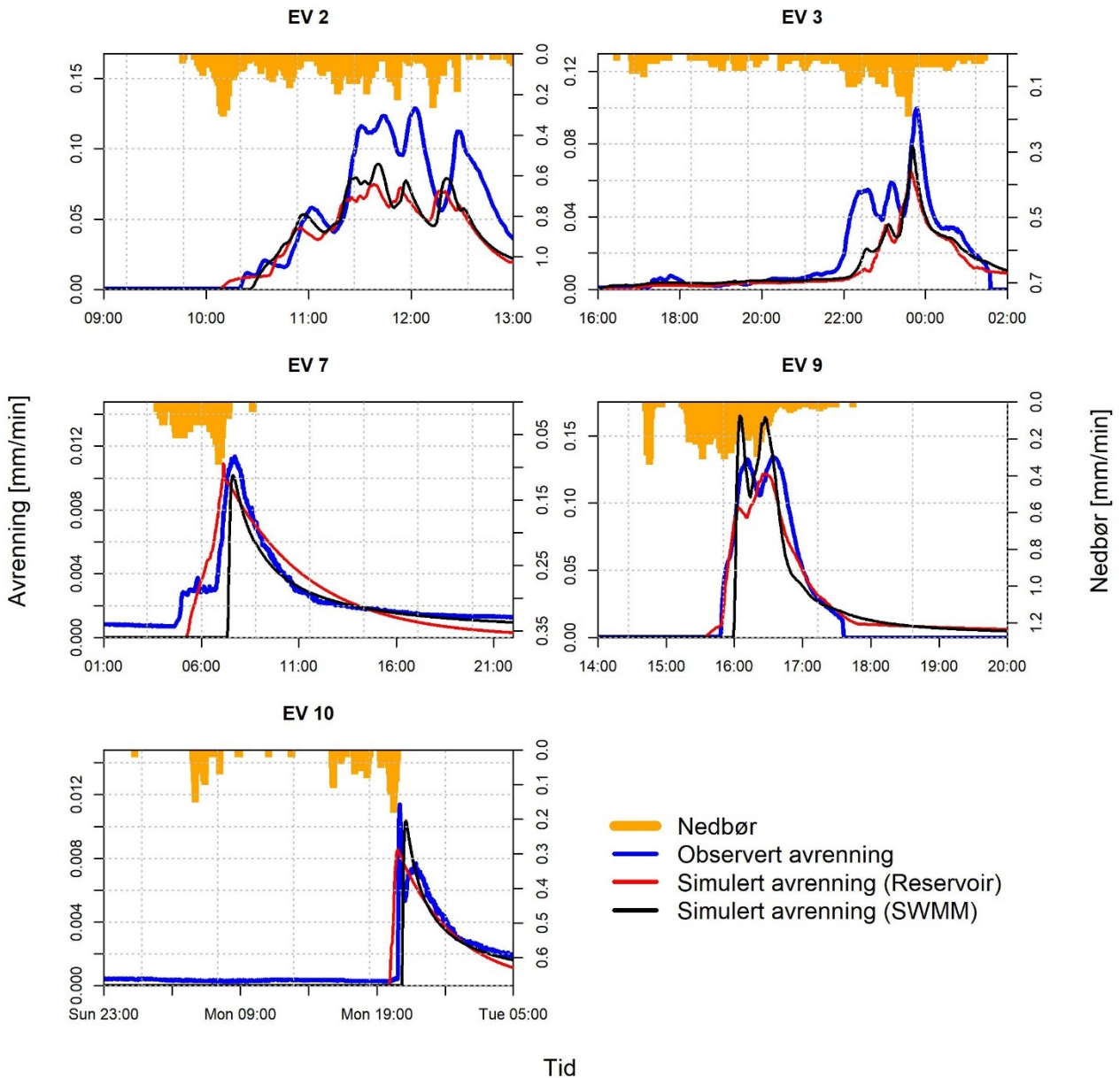
Figur 19 Eksempel på utfordringer med å bestemme forsinket avrenningstopp, her er det to nedbørstopper som kan benyttes og som gir forskjellig forsinkelse av avrenningstoppen, hhv. 66 min og 31 min. Data fra hendelse 11.

### 3.3.2 Kalibrering og validering av modeller

Fem av regnhendelsene ble benyttet til å kalibrere de to modellene. For SWMM-PP modellen var det best mulige parametersettet (høyeste NSE-verdi) forskjellig for de fem valgte hendelsene, men det ble funnet et felles parametersett som gav rimelige resultater for alle hendelsene ( $NSE > 0.5$ ). Dette parametersettet er gitt i Tabell 2.

For reservoarmodellen ble hendelse 9 valgt for å finne den optimale verdien av  $k_2$ , som ble funnet å være 0.04. Verdien av  $k_2$  ble validert på hendelse 2 og funnet å gi et resultat med rimelig nøyaktighet. Hendelse 7 ble valgt for å optimalisere verdien av  $k_1$ , som ble validert på hendelse 10 og ble funnet å være lik 0.004. Maksimal vannstand ved lagringslaget ( $St$ ) for hendelse 7 ble valgt som verdien av terskelparameteren ( $Fth$ ). Verdien av  $S_1$  ble satt som 10 % av settelaget, basert på kalibrering av SWMM-PP modellen. Øvrige parametere er gitt i Tabell 2.

Målt og predikert avrenning fra de to modellene for de 5 hendelsene er vist i Figur 20. Generelt ga reservoarmodellen litt mer nøyaktige simuleringer (gjennomsnittlig  $NSE = 0.74$ ) enn SWMM-PP modellen (gjennomsnittlig  $NSE = 0.69$ ).



Figur 20 Målt og predikert avrenning fra de to modellene for hendelsene 2, 3, 7, 9 og 10.

### 3.3.3 Varighetskurver

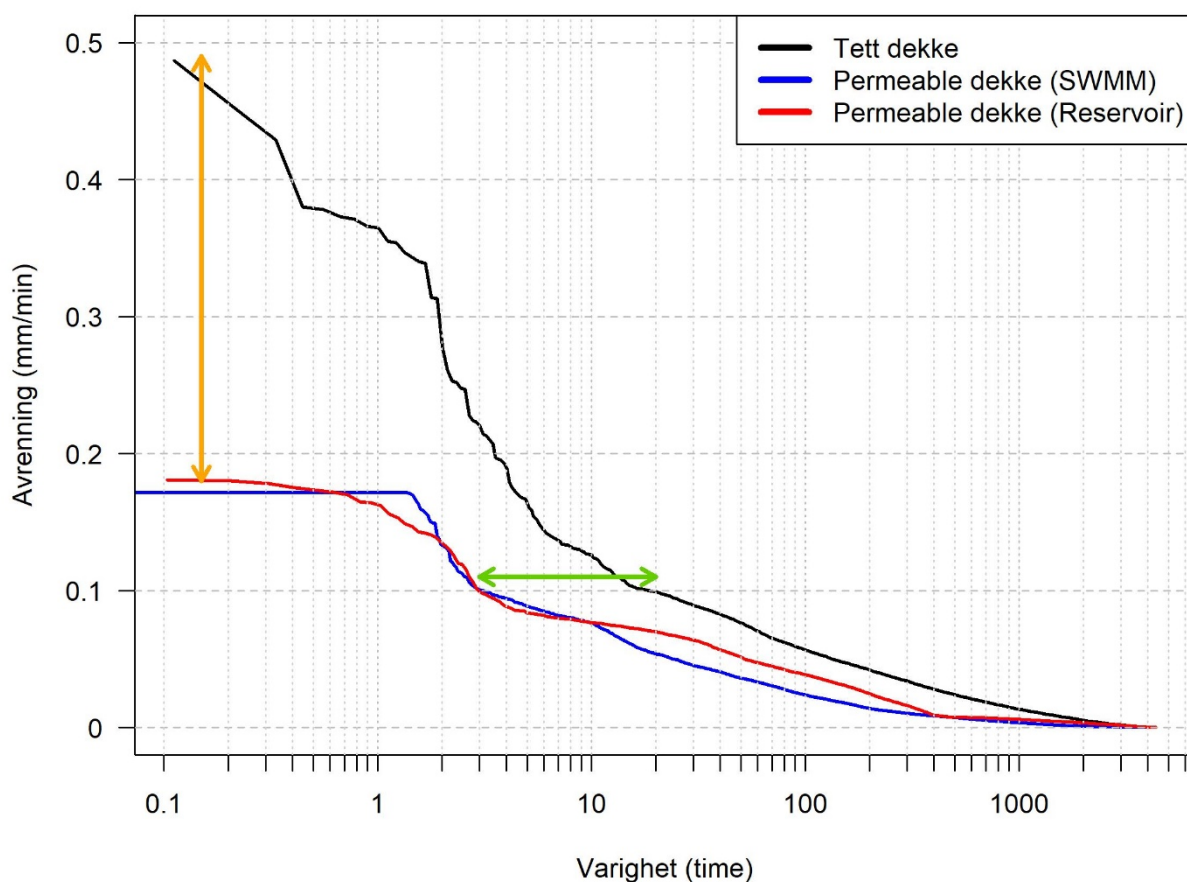
Gode modeller som beskriver egenskapene til en løsning kan brukes til å finne ut hvordan løsningen vil fungere under andre hendelser enn de man har målt. Det er også mulig å teste lengre tidsserier med værdata. Ved å bruke lengre serier med værdata vil man få nok resultater til at man kan bruke statistiske metoder for å si noe om sannsynligheten for at en avrenningssituasjon kan inntreffe (se artikkelen for nærmere beskrivelse). Resultater fra slike analyser kan presenteres som for eksempel i varighetskurver som viser

sammenhengen mellom avrenning og tiden avrenningen overstiger denne verdien i løpet av perioden som ligger til grunn for beregningen.

Nytteverdien av slike varighetskurver kan illustreres med å bruke en lengre nedbørs- og temperaturdata fra Trondheim. Det er benyttet data for perioden april-september i 2017 fra Risvollan meteorologiske stasjon, der værdataene har ett minutts oppløsning. Begge de kalibrerte modellene for permeable dekker type C er benyttet for å beregne avrenningen fra et gitt området. I tillegg er det benyttet en standard modell i SWMM for å beregne avrenning fra det samme området med en tett overflate. Varighetskurver for avrenningen fra det samme området med de tre modellene er vist i Figur 21. Følgende konklusjoner kan trekkes fra figuren:

- Begge modellene for permeable dekker type C er i god overenstemmelse med hverandre.
- Permeable dekker type C har betydelig lavere forventet maksimum avrenning enn tette overflater. Dette er illustrert med rød pil i figuren, der forventet maksimum avrenning fra tette flater er nesten 0.5 mm/min/areal, mens for permeable dekker er forventet maksimum forventet avrenning mindre enn 0.2 mm/min/areal.
- Permeable dekker vil også overskride en viss avrenning i mindre grad enn tette flater. Dette er illustrert med grønn pil i figuren der permeable dekker vil overskride 0.1 mm/min/areal i 3 timer, mens tette flater vil overskride denne verdien i 11 timer i løpet av en seks måneders periode.

Ved å benytte slike varighetskurver og sammenligne ulike løsninger vil en kunne gjøre bedre valg når ulike overvannsløsninger skal velges. Konsekvens av å velge den ene eller andre løsningen vil enkelt kunne leses fra figuren.



Figur 21 Varighetskurver basert på seks måneders værdata fra Risvollan, Trondheim og to modeller for permeable dekker type C og en standard modell for tette flater.

### 3.4 Konklusjon

Følgende konklusjoner kan trekkes:

- Basert på målingene på Sveberg er det dokumentert at permeable dekker type C vil medianverdien for reduksjon av avrenningstoppen være 89 % og forsinkelsen av avrenningstoppen være 40 minutter. Andre mål på fordrøyningen som sentroidforsinkelse og T50-forsinkelse hadde medianverdier på henholdsvis 45 minutter og 86 minutter.
- Fordrøyningsindikatorer er følsomme for nedbørmengde og den opprinnelige tilstanden ved start av hendelsen.
- To brukbare modeller for å simulere avrenning fra permeable dekker type C er kalibrert og validert.
- Varighetskurver er et mer robust og informativt alternativ for å demonstrere den hydrologiske ytelsen enn enkeltvis indikatorer.

## 4 Dimensjonering av permeable dekker

*Dette kapitelet oppsummerer resultatene fra A.E.M.H. Abdalla, T.M. Muthanna, K. Alfredsen, E. Sivertsen, Design considerations to improve the hydrological performance of permeable pavements som er sendt inn til journalen Blue-Green Systems.*

### 4.1 Innledning

Permeable dekker deles inn i tre typer (type A, type B og type C) som beskrevet i Seksjon 2.3. De tre typene vil ha litt ulike hydrologiske egenskaper og bruksområder. Generelt er type A egnet for steder med dyp grunnvannstand og høy infiltrasjonshastighet. Type C egner seg for steder med høy grunnvannstand, mens type B er egnet for steder med lav permeabilitet. Type B og type C inkluderer dreneringsrør der plassering og dimensjoner vil ha betydning for hvor godt løsningen håndterer overvannet.

Evnen til å håndtere overvann, det vil si den hydrologiske ytelsen, til permeable dekker kan kvantifiseres ved å bestemme retensjons- og fordrøyningsegenskapene. Retensjonen er den permanente reduksjonen av overvann som skal håndteres av løsningen enten gjennom infiltrasjon til den opprinnelige grunnen under det permeable dekket eller gjennom fordamping vannet som er lagret i de ulike lagene dekket er bygge opp av. Fordrøyning er forsinkelse og demping av mengden overvann målt ved punktet der dreneringen fra det permeable dekket er koplet til et avløpsnett eller resipient. Fordrøyning vil typisk være beskrevet ved ulike indikatorer som reduksjon av avrenningstopp og forsinkelse av avrenningstoppen, jmf. Kapittel 3.

Videre kan man dele metoder for hydrologisk dimensjonering inn i to kategorier; i) dimensjonering som avhenger av designnedbør (hendelsesbasert) og ii) dimensjonering som avhenger av langsiktige kontinuerlige simuleringer. Vanlig praksis internasjonalt har vært å benytte en hendelsesbasert tilnærming ved å dimensjonere de permeable dekkene med en lagringskapasitet som kan midlertidig lagre en viss mengde designnedbør med en bestemt returperiode (f.eks. 2 år) i 24 timer. Denne tilnærmingen tar imidlertid ikke hensyn til tilstanden til det permeable dekket når nedbøren starter. Derfor, selv om dekket er designet for å håndtere en hendelse med 2-års returperiode, kan det feile i å håndtere denne hendelsen hvis hendelsen inntreffer etter et langvarig regnvær som har fylt opp lagringskapasiteten. På den annen side kan bruk av hydrologiske modeller og langsiktige kontinuerlige værdata gi en mer pålitelig tilnærming som kan inkludere effekten av klimatiske forhold på dekkets ytelse. Dette er også underbygget av diskusjonen i Kapittel 3.

Dimensjonering av permeable dekker kompliseres ytterligere av at det mangler klare retningslinjer og at det er mange faktorer som vil påvirke den hydrologiske ytelsen til dekket. Internasjonalt er det bare en håndfull studier som bevisst har forsøkt å kvantifisere effekten av en eller flere faktorer på den hydrologiske ytelsen til permeable dekker, men de fleste studiene er utført under kontrollert laboratorieforhold som krever ytterligere analyse og generalisering før de kan brukes for å forutsi ytelse under naturlige nedbørsforhold.

Hensikten med dette kapitlet er:

- Kvantifisere effekten av de viktigste faktorene (både fysiske og klimatiske faktorer) på den hydrologiske kapasiteten til de tre typene permeable dekker ved bruk av langtids nedbørdata (12-30 år) med høy tidsmessig oppløsning (1 min).
- Foreslå dimensjoneringsretningslinjer for permeable dekker type A, B og C.

## 4.2 Materialer og metode

### 4.2.1 Klima og nedbørsdata

For å vurdere klimatiske faktorer er det hentet inn data fra fem norske byer: Bergen, Trondheim, Bodø, Kristiansand og Hamar. De fem byene dekker tre klimaklasser basert på klassifiseringssystemet som vist i Tabell 4. Bergen er den våteste byen av de fem, basert på mengden årsnedbør, etterfulgt av Kristiansand. Begge byene tilhører klassen *Cfb*. Hamar er den tørreste byen og tilhører klassen *Dfb*. Trondheim og Bodø tilhører begge klassen *Dfc* og er tørrere enn Bergen og Kristiansand, men våtere enn Hamar.

Det er benyttet lange tidsserier av nedbørsdata (12-30 år) med 1 min oppløsning. Nedbørsdataene er samlet inn og kvalitetssjekket Meteorologisk institutt, så det er derfor ikke gjort noen ytterligere databehandling av nedbørsdataene.

Tabell 4 Oversikt over byer brukt som eksempler, deres klimakategori og lengde på benyttet tidsserie.

By	Klimakategori (Köppen Geiger)	Nedbørsdata
Bergen	Temperate oceanic climate (Cfb)	[1990-2020]
Trondheim	Subarctic climate (Dfc)	[1990-2020]
Bodø	Subarctic climate (Dfc)	[1997-2020]
Kristiansand	Temperate oceanic climate (Cfb)	[1999-2020]
Hamar	Warm-summer humid continental climate (Dfb)	[2008-2020]

### 4.2.2 Modell

Modelleringen er gjort med å bruke overvannsmodule (LID) i Storm Water Management Model (SWMM, åpen programvare<sup>1</sup>). I SWMM-LID kan permeable dekker representeres av fem lag: overflate, topplag (belegningsstein med fuger), settelag, bærelag og drenering. Hvert lag inneholder parametere som styrer vanntransporten og må kalibreres eller velge standardverdier fra SWMM-manualen. Overvann infiltrerer gjennom topplaget til settelaget etter Green-Ampt infiltrasjonsligning og lagres i dette laget til fuktigheten når feltkapasiteten. Når feltkapasiteten i settelaget nås, vil vann begynne å sive ned til bærelaget etter Darcys lov. Vannet samler seg i bærelaget og kan enten infiltreres i den opprinnelige grunnen for type A og type B dekker eller dreneres videre gjennom avløpsrør for type B og type C dekker.

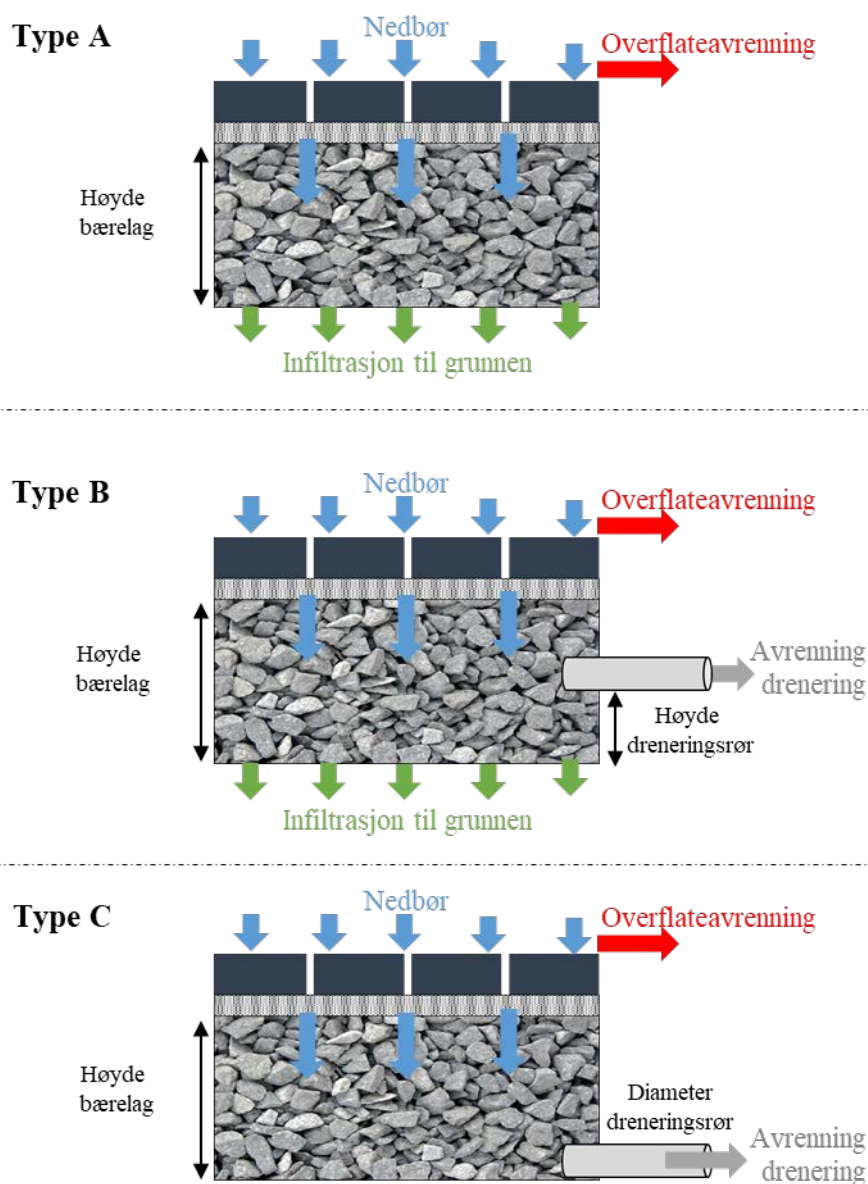
Det er verdt å merke seg at bærelaget kan sees på som et lagringsmagasin med en viss kapasitet som vil være proporsjonal med høyden på laget. Dette lageret kan også gå fullt noe som vil medføre at vi får oppstuvning av overvann i settelag og topplag og som til slutt vil føre til at overvannet renner fra det permeable dekket til omgivelsene på overflaten, såkalt overflate avrenning. Topplaget og settelaget er felles for alle typene løsning, slik at det er effekten til variabler ved bærelaget, dreneringen og infiltrasjonskapasiteten til opprinnelig grunn som er undersøkt.

Variablene til SWMM-modellen er dermed delt inn i to grupper: variabler som er holdt fast og variabler som er variert systematisk. En oversikt over begge gruppene variabler er gitt i Tabell 5. For de variablene som er holdt konstant er det valgt å benytte standardverdier i SWMM for hulromsfraksjonen til topplaget og bærelaget. Bermhøyden på topplaget er satt til null for å tillate overflateavrenning, mens helningen på

<sup>1</sup> <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

topplaget er satt til 1 %. Forholdet mellom tette flater (belegningsstein) og permeable flater (fuger) settes lik 0.9. Permeabiliteten til topplaget ble satt til 3600 mm/t, som er en typisk verdi for permeabelt dekke. For de variablene som er variert er dybden av bærelaget variert mellom 10 mm og 400 mm. Infiltrasjonskapasiteten til den opprinnelige grunnen ble variert mellom 0.1 mm/t og 20 mm/t. For permeable dekker av type B ble fire scenarier med ulike plasseringer av dreneringsrøret undersøkt, mens for type C ble diameteren til dreneringsrøret variert mellom 20 mm og 200 mm. Det er videre gjort en forenkling i forhold til snø, da det er antatt at all nedbør faller som regn gjennom hele året.

En konseptualisering av de ulike typene permeable dekker er vist i Figur 22, der de viktigste vannstrømmene også er definert.



Figur 22 Konseptualisering av permeable dekker type A, B og C.

Tabell 5 Oversikt over variabler som er holdt konstant og hvilke som er variert i modelleringen.

Variabler		Lag	Verdier	Enhet	
Variabler holdt konstant	Manning	Overflate	0.1	-	
	Bermhøyde		0	mm	
	Helning		1	%	
	Tykkelse belegningsstein	Topplag	80	mm	
	Hulromsfraksjon		0.17	-	
	Fraksjon tett flate		0.9	-	
	Permeabilitet		3600	mm/hr	
	Hulromsfraksjon	Bærelag	0.63	-	
	Strømningskoeffisient	Drenering	Beregnet	-	
StrømningsekspONENT	0.5		-		
Variabler	Type A	Høyde bærelag (D)	Bærelag	10,20,50,100,300,400	mm
		Infiltrasjonsrate stedlig grunn	Bærelag	0.1,0.5,1,3,5,10,20	mm/hr
	Type B	Høyde bærelag (D)	Bærelag	100,200,300,400	mm
		Infiltrasjonsrate stedlig grunn	Bærelag	0.1,0.5,1,3,5	mm/hr
		Høyde dreneringsrør (offset)	Drenering	0, 1/3 D, 2/3 D, D	mm
	Type C	Høyde bærelag (D)	Bærelag	10,20,50,100,300,400	mm
Diameter dreneringsrør (d)		Drenering	20,60,100,200	mm	

### 4.3 Forutsetning

Modellen som er benyttet i dette arbeidet baserer seg på overvannsmoduleen i SWMM. Denne har vist seg å fungere bra på modellering av type C dekker, jmf. Kapittel 3. Moduleen baserer seg imidlertid på en empirisk formel for drenering gjennom rør som inkluderer to koeffisienter, som er strømningskoeffisient og strømningsekspONENT i Tabell 5. Både formelen og koeffisientene er basert på erfaring og satt opp som standard i SWMM, men vi har ikke hatt anledning til å kontrollere disse med egne målinger eller sammenligne disse med annen informasjon. Resultatene forutsetter derfor at drenering gjennom rør følger den empiriske formelen.

### 4.4 Resultater

#### 4.4.1 Permeable dekker type A

For hver kombinasjon av variablene gitt i Tabell 5 for type A er SWMM-modellen kjørt for hvert datasett med nedbørsdata. Fra modelleringen genereres lange tidsserier med resultater som kan oppsummeres i ulike varighetskurver. Det er valgt å fokusere på varighetskurver for overflateavrenningen, det vil si vi kan vurdere

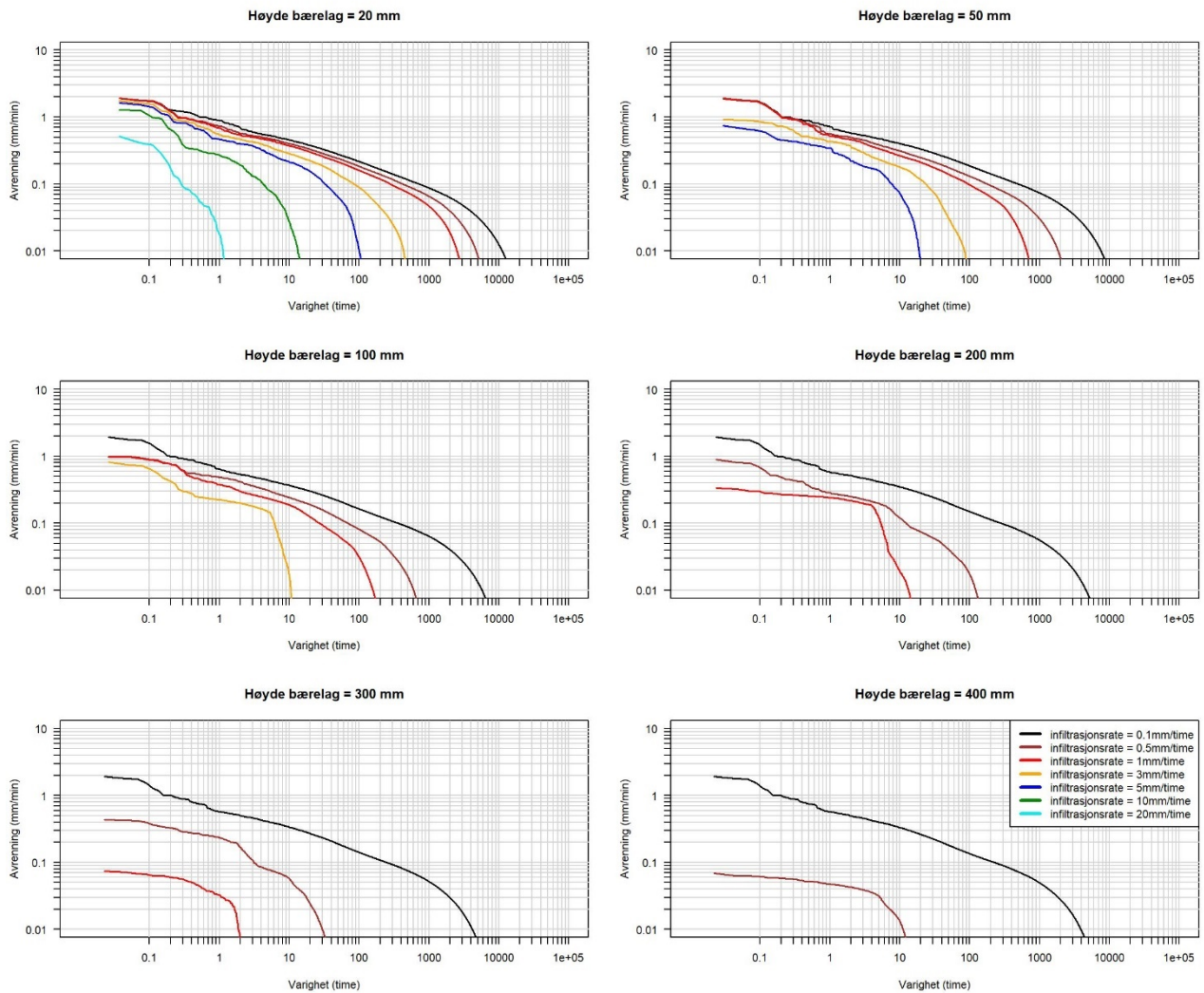
under hvilke betingelser er det vi kan forvente overflateavrenning fra dekket. Figur 23 viser varighetskurver som gjelder for Kristiansand. De ulike kurvene viser hvor mange timer man har overflateavrenning fra et slikt dekke i løpet av 21 år når det er plassert på forskjellige steder med ulik infiltrasjonskapasitet. Figuren viser tydelig effekten av infiltrasjonskapasiteten i grunnen under dekket der lav infiltrasjonskapasitet vil gi oftere overflateavrenning enn høy infiltrasjonskapasitet. Videre ser man at også en tydelig effekt av høyden på bærelaget, der høyere bærelag vil gi mer rom for lagring av overvann som til en viss grad vil kompensere for lav infiltrasjonskapasitet. Et bærelag på 300 mm vil kunne håndtere all nedbøren så lenge infiltrasjonskapasiteten under dekket er høyere enn 1 mm/t (alle kurvene for infiltrasjonskapasitet høyere enn dette mangler i det nederste plottet til høyre).

Alle varighetskurvene for de ulike byene er gitt i Vedlegg B.

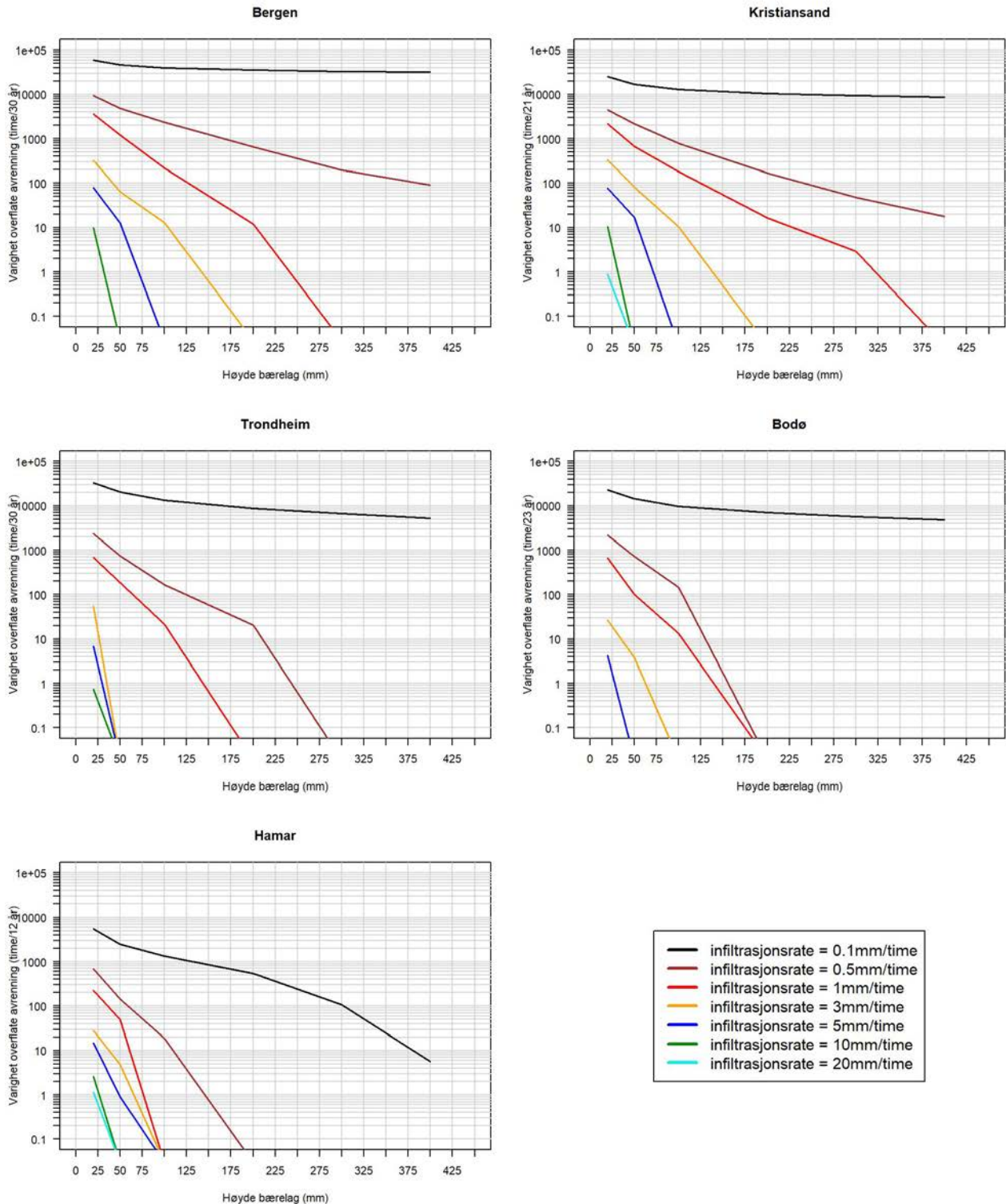
For å illustrere effekten av både infiltrasjonshastighet og høyde på bærelaget er det konstruert plott som viser når varigheten når overflateavrenningen er høyere enn 0. Altså hvor ofte kan man forvente at det renner overvann til omgivelsene fra et permeabelt dekke med type A løsning. Disse plottene er vist i Figur 24 for alle scenarier i de fem byene. Figuren viser at optimal høyde på bærelaget for å unngå overflateavrenning varierer med klima (lokasjon) og infiltrasjonskapasitet til den opprinnelige grunnen. For Kristiansand og Bergen kreves det dypere bærelag i forhold til de andre byene når infiltrasjonskapasiteten til grunnen er den samme.

En vurdering av Figur 24 vil være et godt utgangspunkt for vurdering og dimensjonering av et permeabelt dekke type A. Framgangsmåten for å dimensjonere et slikt dekke vil da være å velge plottet for den byen som ligner mest klimatisk på den aktuelle byen der et nytt dekke skal installeres. Deretter må velger man den kurven som tilsvarer omtrent målt infiltrasjonskapasitet lokalt der dekke skal installeres. Deretter velger man den høyden på bærelaget som vil gi en akseptabel forventet overflateavrenning målt som tid.

Det gjøres oppmerksom på at det her ikke er vurdert nødvendig høyde på bærelaget i forhold til stabilitet og belastning. Vurderingen er gjort kun ut fra et overvannsperspektiv.



**Figur 23** Varighetskurver som gjelder for Kristiansand og som viser varigheten av overflateavrenning som funksjon av lokal infiltrasjonskapasitet og høyde bærelag over en tidsperiode på 21 år.



Figur 24 Varighet av overflateavrenning fra permeable dekker type A som funksjon av klima (sted), lokal infiltrasjonskapasitet og høyde på bærelaget.

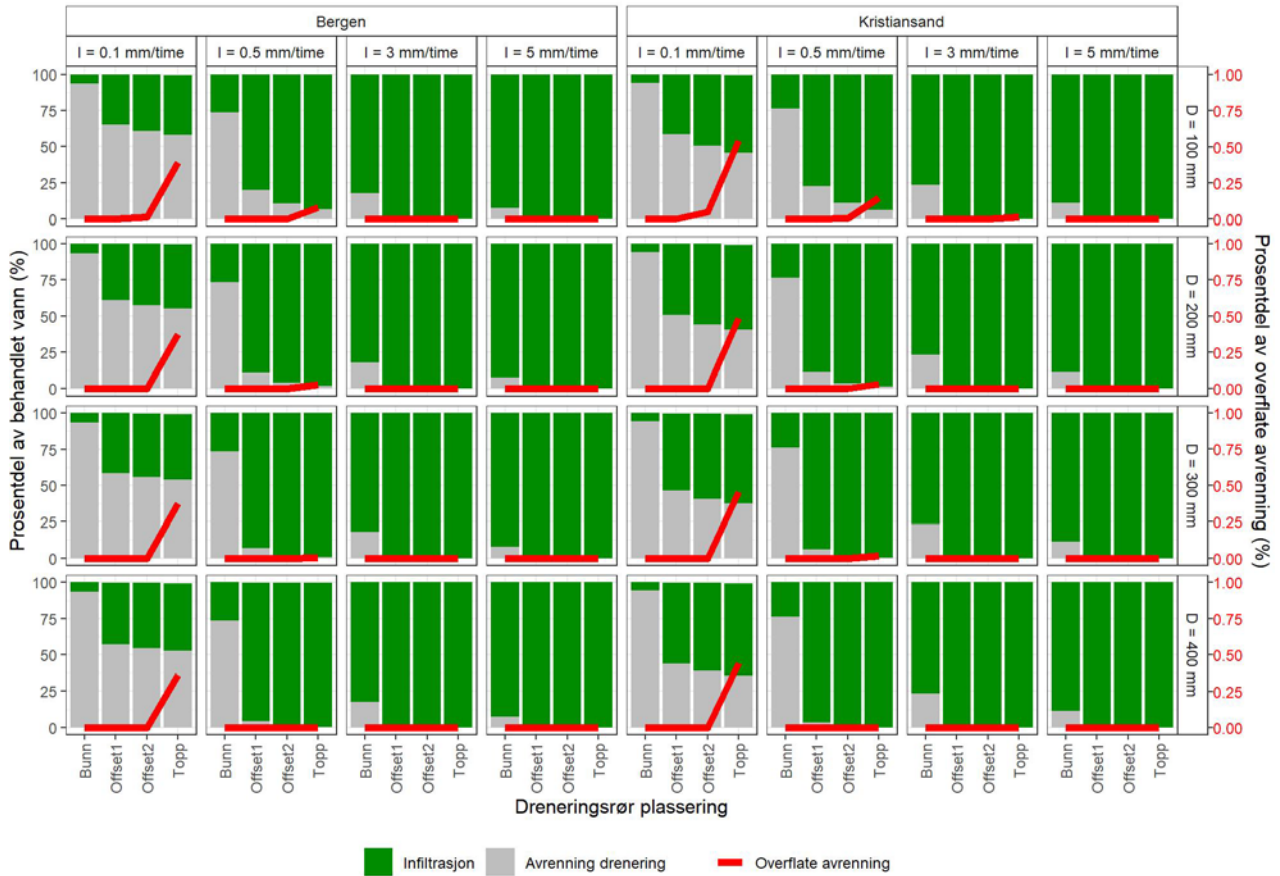
#### 4.4.2 Permeable dekker type B

For hver kombinasjon av variablene gitt i Tabell 5 for type B er SWMM-modellen kjørt for hvert datasett med nedbørsdata. For type B er det de tre vannbalansestørrelsene, infiltrert vann, vann fordrøyd via dreneringsrør og overflateavrenning, som er lagt til grunn for vurderingen av overvannshåndteringskapasiteten. Disse er plottet for de ulike variablene i Figur 25 - Figur 27. Figurene viser *i*) prosentvis fordeling mellom hvor mye av overvannet som infiltreres versus fordrøyes og slippes til avløpsnett via et dreneringsrør og *ii*) andel overflateavrenning versus total mengde overvann. Merk at effekten av både klima, infiltrasjonskapasitet, høyden på bærelaget og plassering av dreneringsrøret er vist i figuren. Merk at det her er valgt å holde diameteren på dreneringsrøret konstant og lik 60 mm.

Fra figurene kan man observere at for grunn med lav infiltrasjonskapasitet ( $\leq 0.5$  mm/t) føres mesteparten av vannet til dreneringsrøret, dersom røret plasseres nært bunnen av forsterkningslaget. Dersom røret er plassert høyere opp i bærelaget, øker mengden infiltrert vann betydelig, selv for grunn med lav infiltrasjonskapasitet. Plasseres dreneringsrøret på toppen av bærelaget vil det føre til overflateavrenning for lokaliteter med lav infiltrasjonskapasitet, spesielt i Kristiansand og Bergen. På den annen side, når infiltrasjonskapasiteten til grunnen er høyere eller lik 3 mm/t, infiltreres mye av overvannet. de vannet.

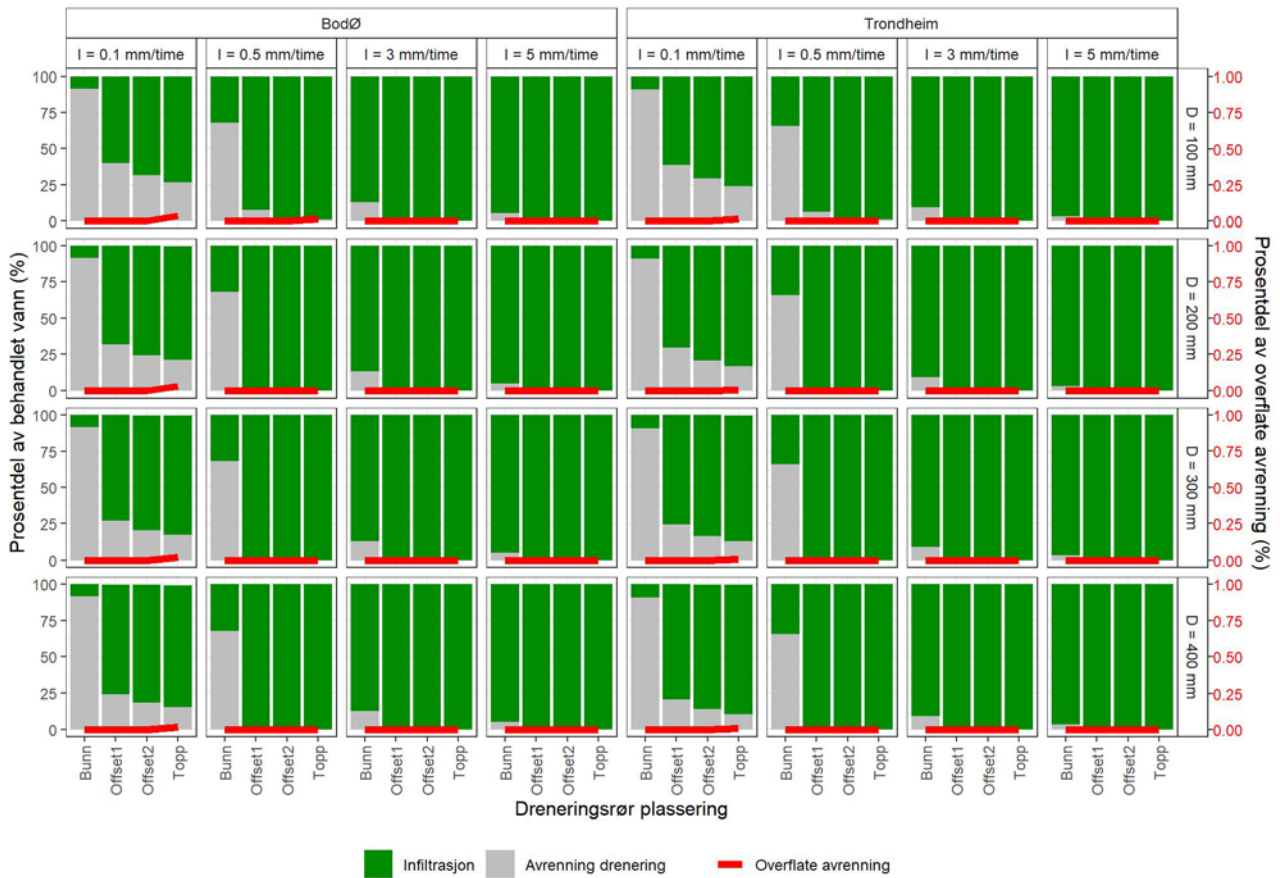
Ut fra disse resultatene kan man velge en utforming og dimensjon på det permeable dekke type B som svarer til lokale mål for overvannshåndteringen. Fordeling av overvann mellom infiltrasjon og avrenning til dreneringsrør kan settes ut fra lokale forhold og hva som er målsetningen med overvannshåndtering. For eksempel vil man for steder med høyt grunnvannsnivå og lav infiltrasjonskapasitet kunne plassere dreneringsrøret nært bunnen av bærelaget for å lede vannet til avløpssystemet. Hvis målet er å redusere mengden avrenning til avløpssystemet for å møte påslippskrav eller man ønsker å øke grunnvannsstanden, vil en heving av dreneringsrøret være en effektiv løsning.

For permeable dekker type B vil Figur 25 - Figur 27 være gode utgangspunkt for dimensjonering og valg av utforming basert på lokale forhold, krav og målsetninger. I tillegg er alle varighetskurvene for avrenningen til drenering gitt i Vedlegg C.



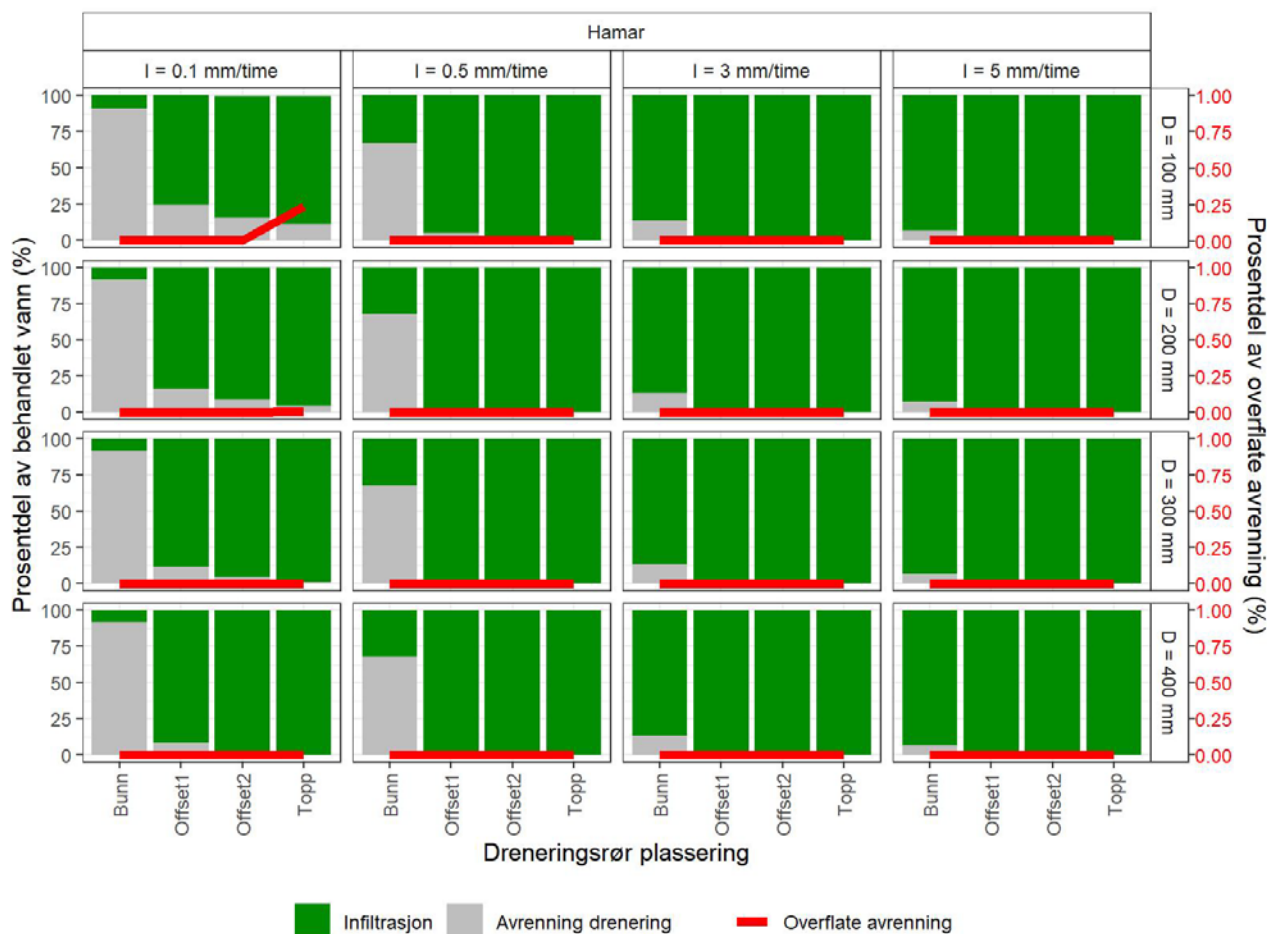
Figur 25

Prosentvis fordeling mellom hvor mye vann som infiltreres og hvor mye som avrenner til avløpssystemet og prosentvis andel som renner av på overflaten for permeable dekker type B som funksjon av klima, infiltrasjonskapasitet, høyde på bærelaget og plassering av dreneringsrør. Gjelder for henholdsvis Bergen og Kristiansand.



Figur 26

Prosentvis fordeling mellom hvor mye vann som infiltreres og hvor mye som avrenner til avløpssystemet og prosentvis andel som renner av på overflaten for permeable dekker type B som funksjon av klima, infiltrasjonskapasitet, høyde på bærelaget og plassering av dreneringsrør. Gjelder for henholdsvis Bodø og Trondheim.



Figur 27 Prosentvis fordeling mellom hvor mye vann som infiltreres og hvor mye som avrenner til avløpssystemet og prosentvis andel som renner av på overflaten for permeable dekker type B som funksjon av klima, infiltrasjonskapasitet, høyde på bærelaget og plassering av dreneringsrør. Gjelder for Hamar.

#### 4.4.3 Permeable dekker type C

For hver kombinasjon av variablene gitt i Tabell 5 for type C er SWMM-modellen kjørt for hvert datasett med nedbørsdata. Også her er det beregnet varighetskurver for overflateavrenningen som igjen er aggregert i forhold til å vise kun kurver der overflateavrenningen er høyere enn 0. Figur 28 viser for hvilke betingelser man har overflateavrenning som funksjon av klima, høyde på bærelaget og diameter på dreneringsrør. Man kan se at i Trondheim og Bodø vil et permeabelt dekke med et bærelag på høyere enn 200 mm mest sannsynlig ikke gi overflateavrenning med de rørdimensjonene vi har undersøkt, mens i Bergen og Kristiansand kreves det et permeabelt dekke med bærelag høyere enn 300 mm dersom det benyttes rør på 20 mm. Tilsvarende høyde på bærelaget i Hamar er 100 mm dersom 20 mm rør brukes til drenering.

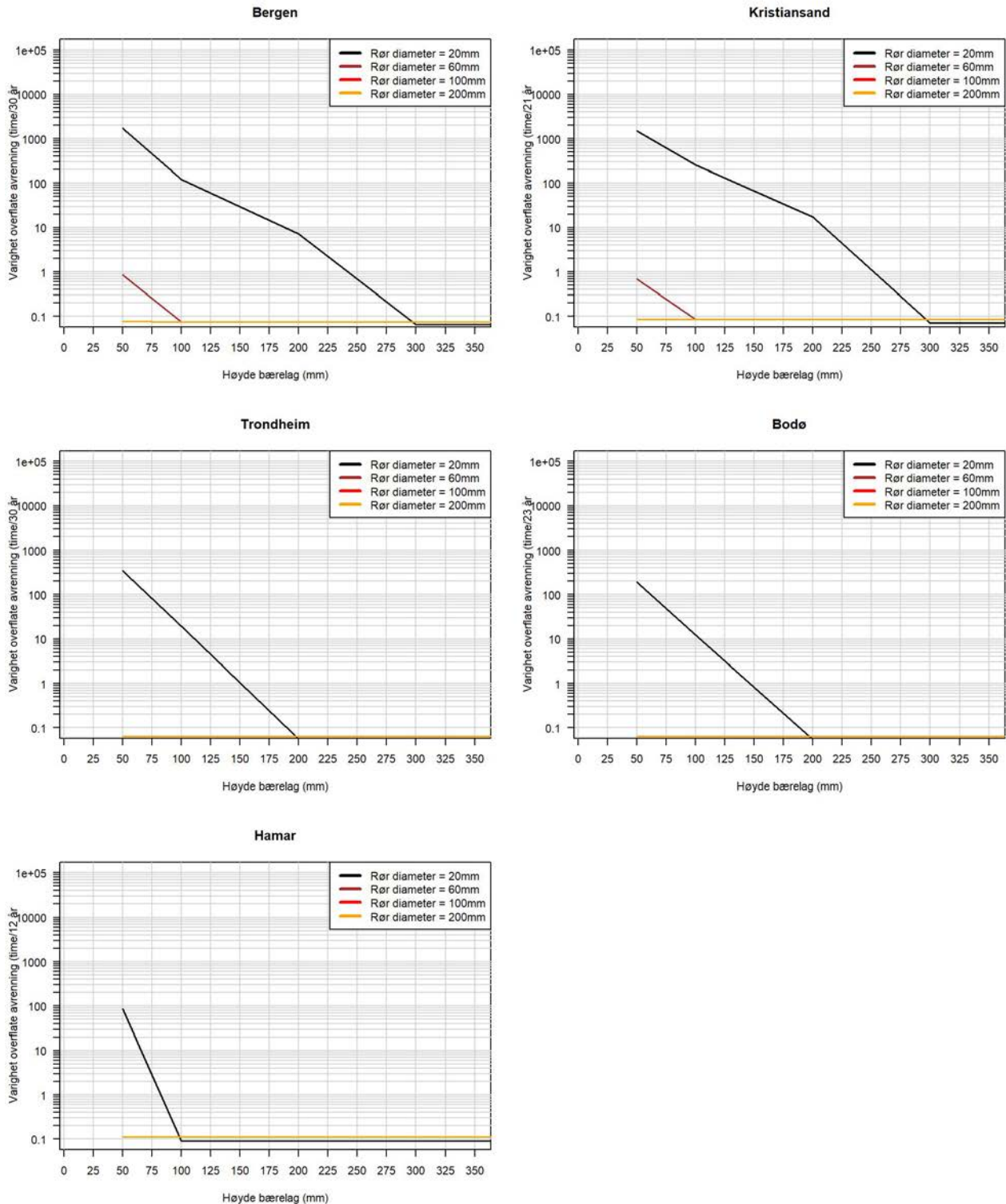
Alle varighetskurvene som ligger til grunn for Figur 28 er gitt Vedlegg D.

Diameteren på dreneringsrøret har direkte innvirkning på fordrøyningsegenskapene til det permeable dekket. Mindre rør gir bedre fordrøyning enn rør med større diameter. Samtidig må hensynet til fordrøyning

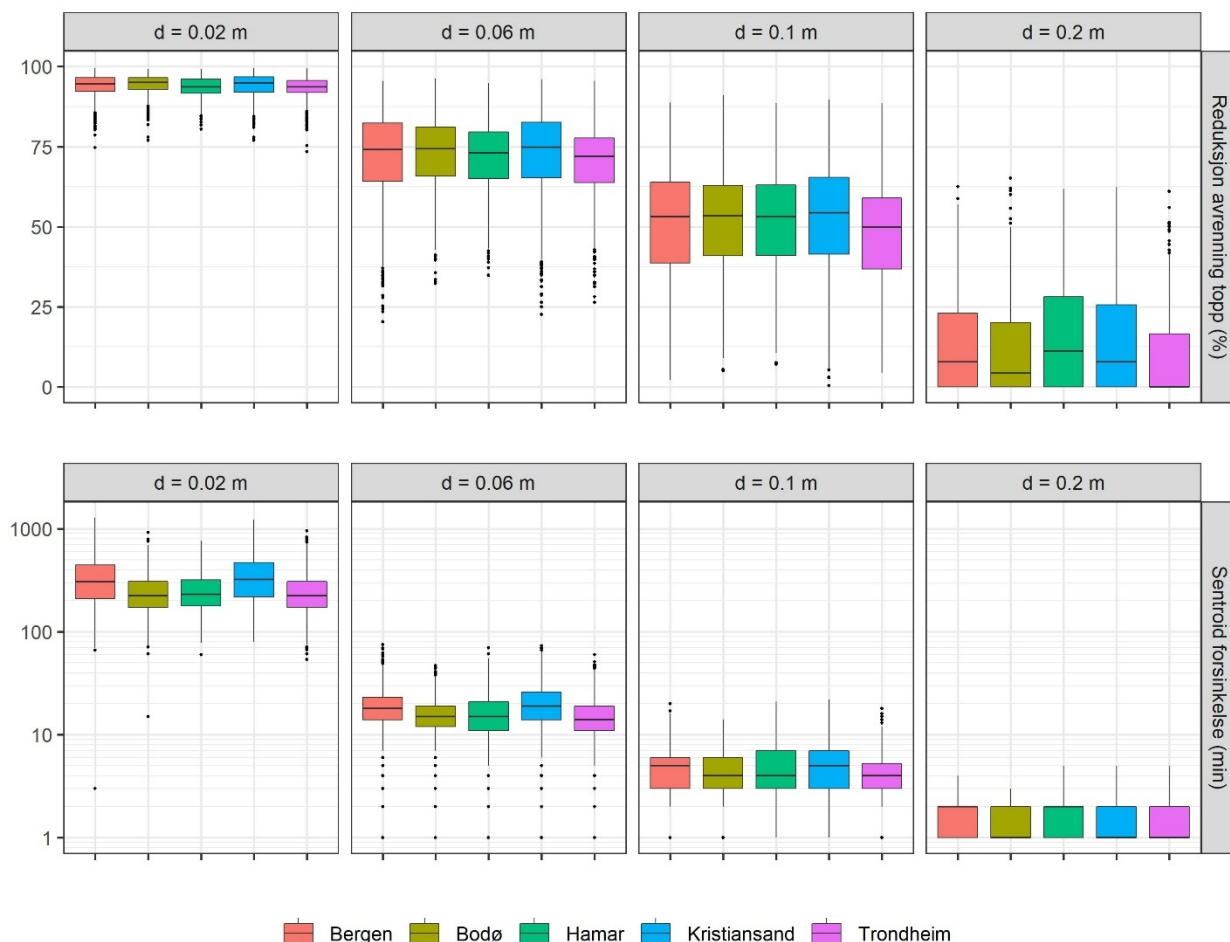
avveies med hvor mye overflateavrenning man kan tåle. I Kapittel 3 ble det presentert flere indikatorer for å beskrive fordrøyningsegenskapene til en løsning, blant annet reduksjon i avrenningstopp og sentroidforsinkelse. De to størrelsene er beregnet for de ulike hendelsene i simuleringene der verdiene vil utgjøre fordelingsfunksjoner med gitte egenskaper som gjennomsnitt og median. Figur 29 viser boks plott som funksjon av klima og diameter dreneringsrør der høyden på bærelaget lik 300 mm. Man ser at både reduksjon i avrenningstoppen og sentroidforsinkelsen avhenger av diameteren til dreneringsrøret. Mens reduksjon av avrenningstoppen er betydelig (median > 50%) allerede ved 100 mm rørdiameter for alle klima, bør en redusere rørdiameteren ned mot 60 mm for å få en fordrøyningseffekt over 10 minutter og ned mot 20 mm for å få en fordrøyningseffekt over 100 min.

Mens dybden på bærelaget påvirker hvor mye overflateavrenning man kan forvente fra et permeabelt dekke type C, har høyden på bærelaget liten innvirkning på fordrøyningsegenskapene til dekket. Dette skyldes at den vertikale vanntransporten i bærelaget er rask og at fordrøyningen hovedsakelig skyldes kapasiteten til dreneringsrøret. Dette virket også logisk siden bærelaget består av grov pukk som har høy porøsitet. Valg av utforming må derfor vurdere både i hvilken grad man ønsker å unngå overflateavrenning og hvor mye fordrøyning av overvannet man ønsker å oppnå.

Figur 28 og Figur 29 vil kunne veilede i dimensjonering og utforming av permeable dekker type C, der hensyn til overflateavrenning og fordrøyning må vurderes basert på lokale krav og mål.



Figur 28 Varighetskurver for overflateavrenning for permeable dekker type C som funksjon av klima (sted), høyde på bærelaget og diameter til dreneringsrør.

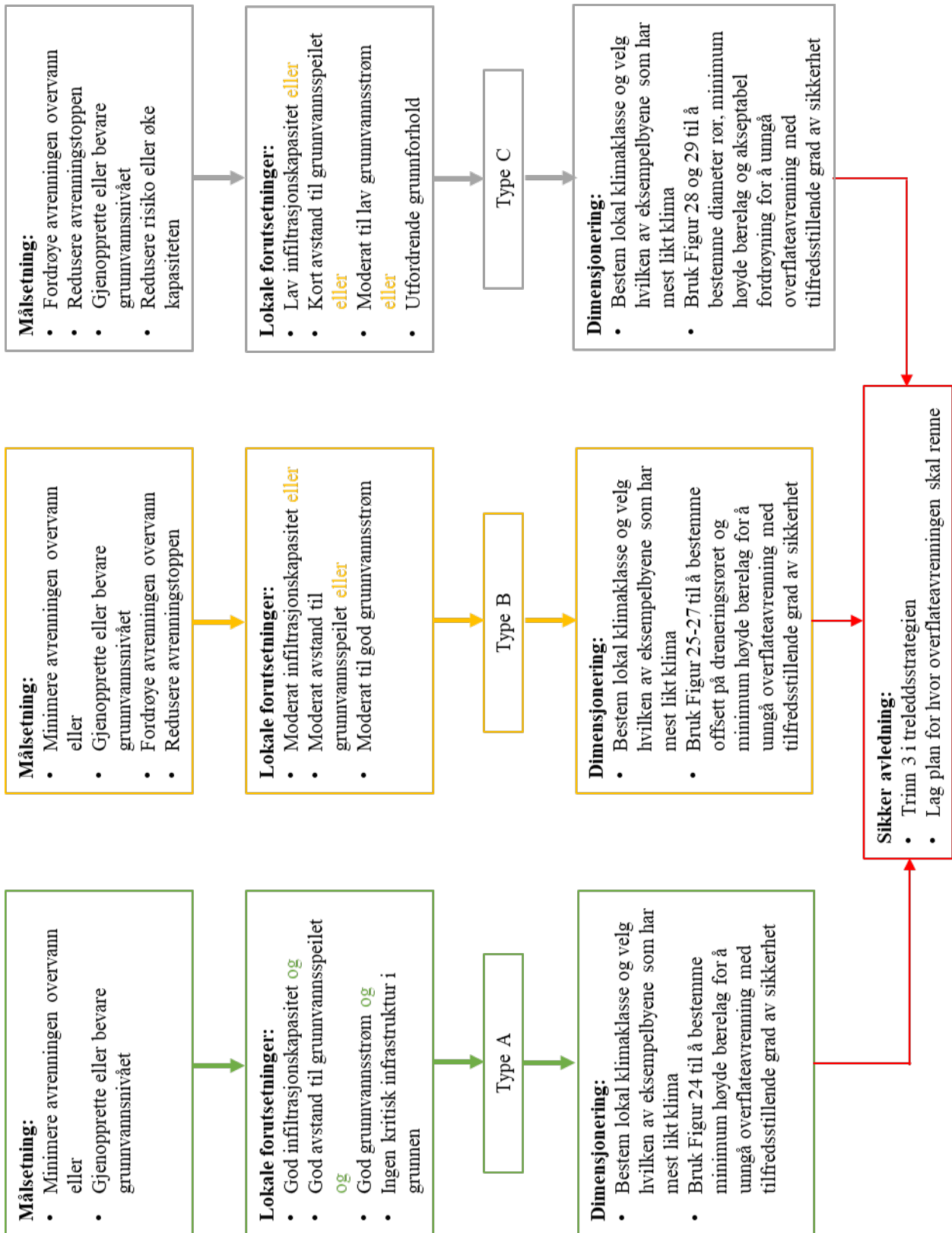


Figur 29 Akkumulert fordelingsfunksjoner for henholdsvis reduksjon i avrenningstopp og sentroidforsinkelse som funksjon av klima (sted) og diameter dreneringsrør. Høyden på bærelaget er lik 300 mm.

#### 4.5 Valg av type permeabelt dekke

Hvilken type permeabelt dekke man bør velge vil være avhengig av både hva som er målsetningen med overvannshåndteringen i et gitt tilfelle og hvilke forutsetninger stedlige masser og grunnvann har for å transportere overvann. For å gi en enkel veiledning i valg av type dekke er det laget en enkel sjekklister som er vist i Figur 30.

I delkapittel 2.4 ble det gitt en kort innføring i åpen og lokal håndtering av overvann og prinsippene bak treleddsstrategien. Permeable dekker vil avhengig av type være kategorisert som enten trinn 1 (infiltrasjon, type A), trinn 2 (fordrøyning, type C) eller både trinn 1 og 2 (type B). Uavhengig av type er det viktig å minne om trinn 3 i treleddsstrategien som sier at når det kommer mer vann enn trinn 1 eller trinn 2 kan håndtere må det ekstra overvannet ha en sikker avledning til nærmeste resipient eller lignende. Det betyr at det anbefales sterkt at det alltid planlegges for overflateavrenning og at dette har en sikker avledning. Dette er også illustrert i Figur 30 med det siste røde sjekkpunktet.

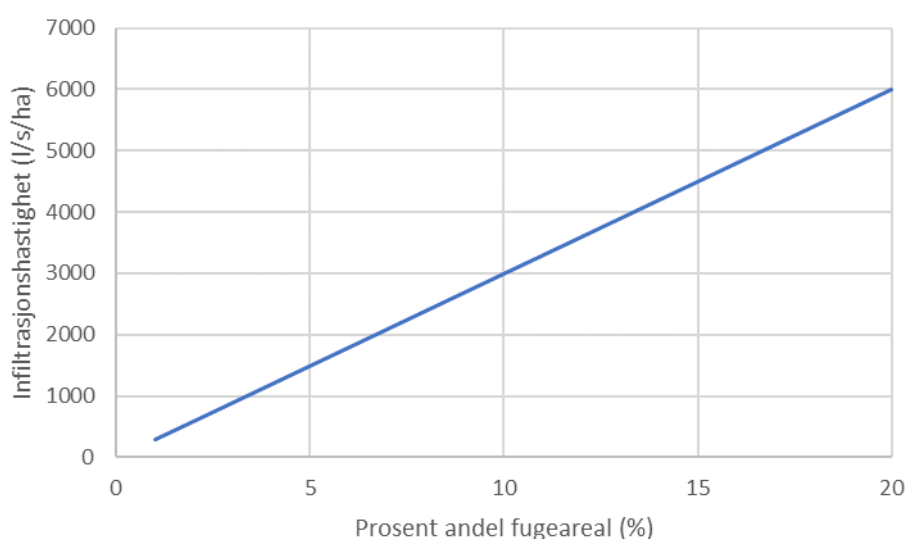


Figur 30 Sjekkliste for valg av type permeabelt dekke.

## 4.6 Noen praktiske designvurderinger

### 4.6.1 Effekt av økt andel fugeareal

Så langt er det benyttet konstant fugeareal på 10 % som ligger tett på det som er oppgitt for ASAK Permac Lock. Det har i løpet av prosjektet vært diskutert hva som vil være effekten av å redusere eller øke prosentandelen fugeareal på kapasiteten til å håndtere overvann. Dette er illustrert i Figur 31, der infiltrasjonshastigheten er plottet mot prosent andel fugeareal. Her er det antatt en lineær sammenheng mellom infiltrasjonshastigheten i fugene med økende andel, noe som er realistisk siden fugene er jevnt fordelt over hele arealet. Videre er det lagt til grunn mettet hydraulisk konduktivitet til fugesand 2-5 mm som er målt i laboratoriet til 300 l/s/ha/% [4] for rene masser. Den lineære sammenhengen viser at kapasiteten til å håndtere overvann dobles ved å gå fra 10 % fugeareal til 20 % fugeareal. Det må imidlertid bemerkes at kapasiteten er stor allerede ved 10% åpning og mer enn tilstrekkelig for å håndtere de overvannsmengdene som denne typen dekker er ment å håndtere. En videre økning i fugeareal bør derfor også veies opp mot hvor lett det er å vedlikeholde fugene, da det er nærliggende å anta at en økning i fugeareal vil gjøre tapet av fugesand høyere og større avfall/sedimenter kan settes seg fast. Videre antas det at det går en praktisk grense hvor store fuger det er hensiktsmessig ha før det går utover funksjonen til å gå, sykle osv. I forhold til overvannshåndtering, vil det således være viktigere å sørge for at kapasiteten opprettholdes over tid, snarere enn å øke kapasiteten når dekket er nytt ved å øke arealet

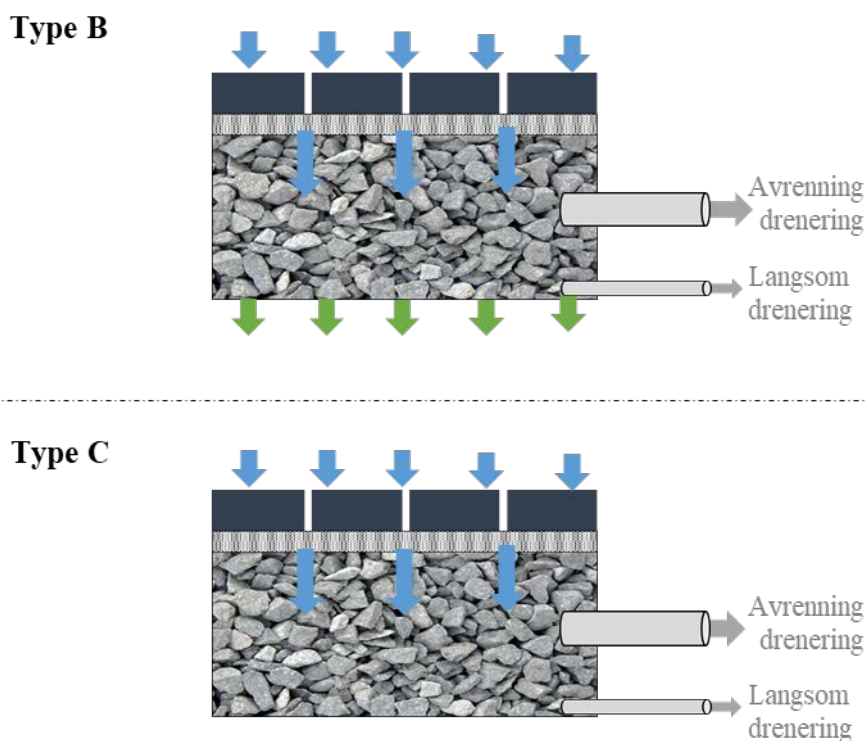


Figur 31 *Infiltrasjonshastighet som funksjon av andel fugeareal basert på mettet hydraulisk konduktivitet til 2-5 mm fugesand som er målt i laboratoriet.*

### 4.6.2 Redusert risiko med ekstra dreneringsrør

For type B og C dekker vil plasseringen til dreneringsrøret ha effekt på hvor mye vann som vil infiltrere og hvor god fordrøyning dekket gir. Ved å plassere dreneringsrøret opp fra bunnen vil man kunne få en betydelig bedre overvannshåndtering. Men det er også et poeng å sørge for sikker drift over tid ved å unngå frost og telehiv og ved å sørge for at bærelaget tømmes helt for vann etter hendelser. Det kan derfor være

hensiktsmessig i mange tilfeller å installere et sekundært dreneringsrør med liten diameter som kan sørge for fullstendig tømning av bærelaget, slik det er illustrert i Figur 32.



Figur 32 Skisser som viser hvordan man kan inkludere to dreneringsrør for type B og type C dekker, der hensikten med det nederste dreneringsrøret er å sikre at alt vannet som lagres i bærelag drenerer.

#### 4.6.3 Redusert tykkelse på bærelag

Felt 3 og 4 på Sveberg er konstruert med redusert bærelag og således beregnet på mindre belastning. Så langt er det ikke registrert negative effekter på disse feltene sammenlignet med de øvrige feltene. I simuleringene er det også benyttet langt lavere høyder på bærelaget enn det som er dimensjonerende praksis i forhold til stabilitet og bæreevne. Tanken med å redusere tykkelsen på bærelaget drastisk er å vise overvannseffekten selv med en redusert bærelag, noe som kan være aktuelt å benytte i parker, gågater, fortau, andre uteplasser med lav vektbelastning der grunn underbygning er en forutsetning på grunn av annen infrastruktur i grunnen eller andre forhold som gjør utgraving og etablering av "vanlig" bærelag vanskelig.

#### 4.7 Konklusjon

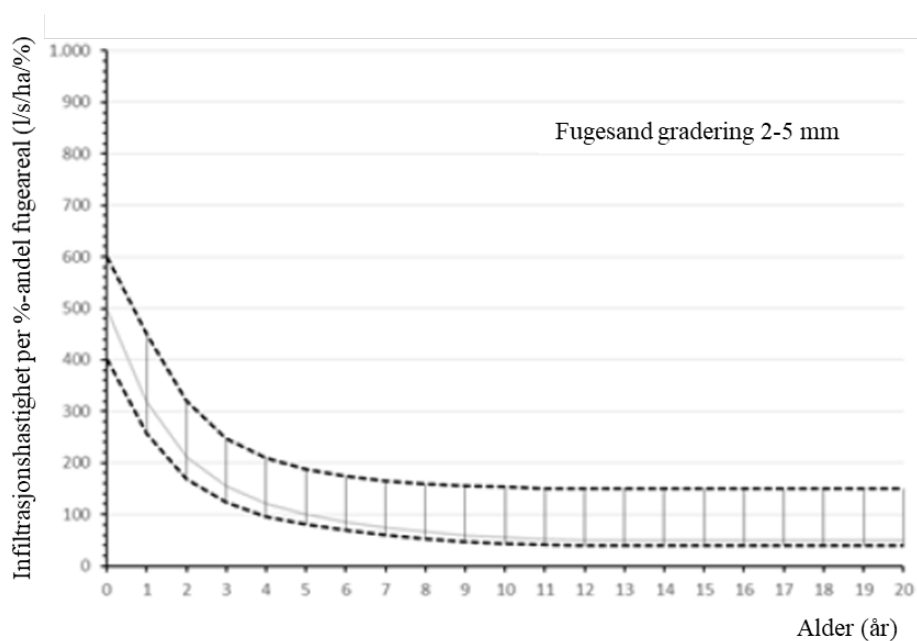
Dimensjonering av permeable dekker må finne den mest hensiktsmessige typen dekke og den mest optimale utformingen av dekket basert på lokale forhold, krav og mål. Simulering av langtidsserier med nedbørdata for fem byer har demonstrert effekten av sentrale variabler som infiltrasjonskapasitet, høyde på bærelaget, plassering av dreneringsrøret og diameter på dreneringsrøret på retensjons- og fordrøyningssegenskapene til dekket.

Den hydrologiske ytelsen til permeable dekker varierte mellom de fem byene på grunn av de forskjellige nedbørkarakteristikkene. Byer som har høy nedbørintensitet og/eller mengde og kort gjennomsnittlig tid mellom hendelser krever dekker med høyere bærelag enn byer som har lavere nedbørintensitet og/eller mengde og lengre gjennomsnittlig tid mellom nedbørshendelsene. I denne studien har ytelsen til permeable dekker i Kristiansand og Bergen vist likheter og interessant nok har begge byene den samme klimaklassen (*Cfb*) i henhold til klassifiseringssystemet Köppen Geiger. Likheter i den hydrologiske ytelsen kan også ses av permeable dekker i Trondheim og Bodø, som begge har samme klimaklasse (*Dfc*). Hamar som tilhører en tredje klimaklasse (*Dfb*) lignet ikke på noen av de andre byene. Dette antyder at byer med lignende nedbørsegenskaper kan dele de samme designretningslinjene for permeable dekker.

## 5 Infiltrasjonskapasitet topplaget (fugene mellom steinene)

### 5.1 Innledning

Infiltrasjonskapasiteten til topplaget, det vil si fugemassen mellom steinene, er essensielt for permeable dekker med belegningsstein. Det er vanlig å benytte en fugesand med gradering 2-5 mm i Norge og infiltrasjonskapasiteten er i utgangspunktet meget høy. Imidlertid vil sand og skitt kunne havne i fugene og tette disse til etter hvert som tiden går. Hvor raskt fugene tettes til er avhengig av bruk og forhold i umiddelbar nærhet til dekket. Borgwardt [5] har fulgt en rekke ulike permeable dekker i felt i en årrekke og har målt infiltrasjonshastigheten som funksjon av antall år i drift, se Figur 33. Feltene er hovedsakelig plassert i Tyskland. Figuren viser at infiltrasjonshastigheten avtar en del de første årene, før den stabiliserer seg på et gitt nivå som normalt vil være høy nok til å ivareta overvannshåndteringen. I noen tilfeller bør imidlertid fugemassen erstattes eller vaskes for å gjenvinne infiltrasjonskapasiteten, men dette må avgjøres i vært enkelt tilfelle og i forhold til hvordan infiltrasjonshastigheten avtar med bruk og tid.



Figur 33 Infiltrasjonskapasitet per % fugeareal som funksjon av driftsår, gjelder for fugemateriale 2-5 mm. Figuren er hentet fra Borgwardt [5] og det er lagt norsk oversettelse på aksene.

Et av målene med prosjektet har vært å starte på en norsk versjon av Figur 33 ved å starte opp systematiske tester for infiltrasjonskapasiteten til de ulike feltene på Sveberg. For å sørge for kontinuitet etter prosjektets slutt har det også vært et poeng å sørge for at Vikaune Fabrikker kan følge opp disse målingene selv med eget utstyr. Det er derfor utviklet en enkel metodikk for å måle infiltrasjonskapasitet, skaffet til veie eget utstyr for måling og gjort innledende tester.

Hensikten med dette kapitlet er:

- Presentere metodikk for å måle infiltrasjonskapasitet i toppdekket
- Presentere de første måleresultatene av infiltrasjonskapasiteten i toppdekket

- Presentere laboratoriemålinger av infiltrasjonskapasitet.

## 5.2 Infiltrasjonskapasitet Sveberg

### 5.2.1 Materialer og metode

Utstyret består av en rørsylinder med diameter på 50 cm med målebånd. For å sikre tett overgang mellom sylindren og belegningssteinen legges en kittpølse med samme diameter som sylindren ved å benytte en mal som vist i Figur 34 (venstre). Sylindren plasseres i en metallfot, og det legges ekstra vekt på metallfoten for å sikre stabilitet og press nedover som vist i Figur 34 (høyre). Ca. en 1 meter fra målebåndet plasseres et kamera på fot som filmer målebåndet og menisken til væskeoverflaten.

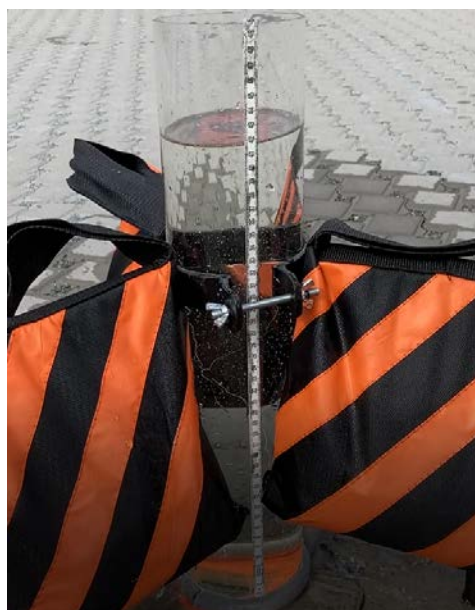
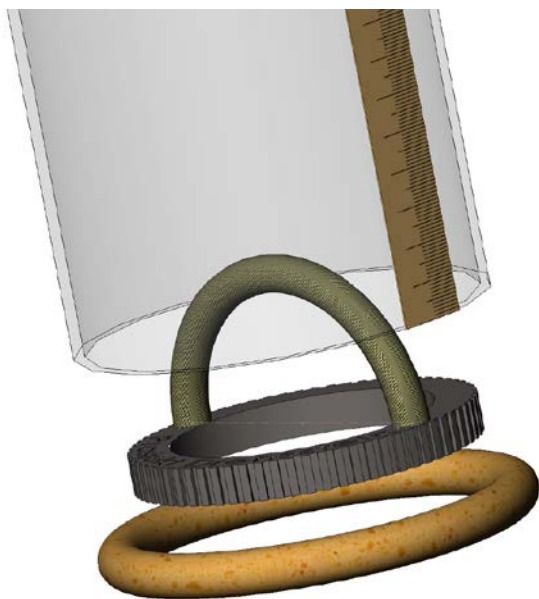
For å måle infiltrasjonshastigheten starter man kameraet og fyller sylindren full med vann. Deretter filmer man vannet som infiltrerer i grunnen. I etterkant kan man lese av nøyaktig tid og høyde på væskesøylen fra filmen for videre beregning av infiltrasjonshastigheten.

For hvert målepunkt må det også beregnes nøyaktig hvor stort areal fugemassene har innenfor målesylindren. Dette er viktig for å kunne beregne nøyaktig prosentandel fugeareal, som kan avvike fra gjennomsnittlig fugeareal for de ulike steintypene siden man måler på et meget begrenset areal.

Det anbefales å gjøre 2-3 målinger per målepunkt pr gang.

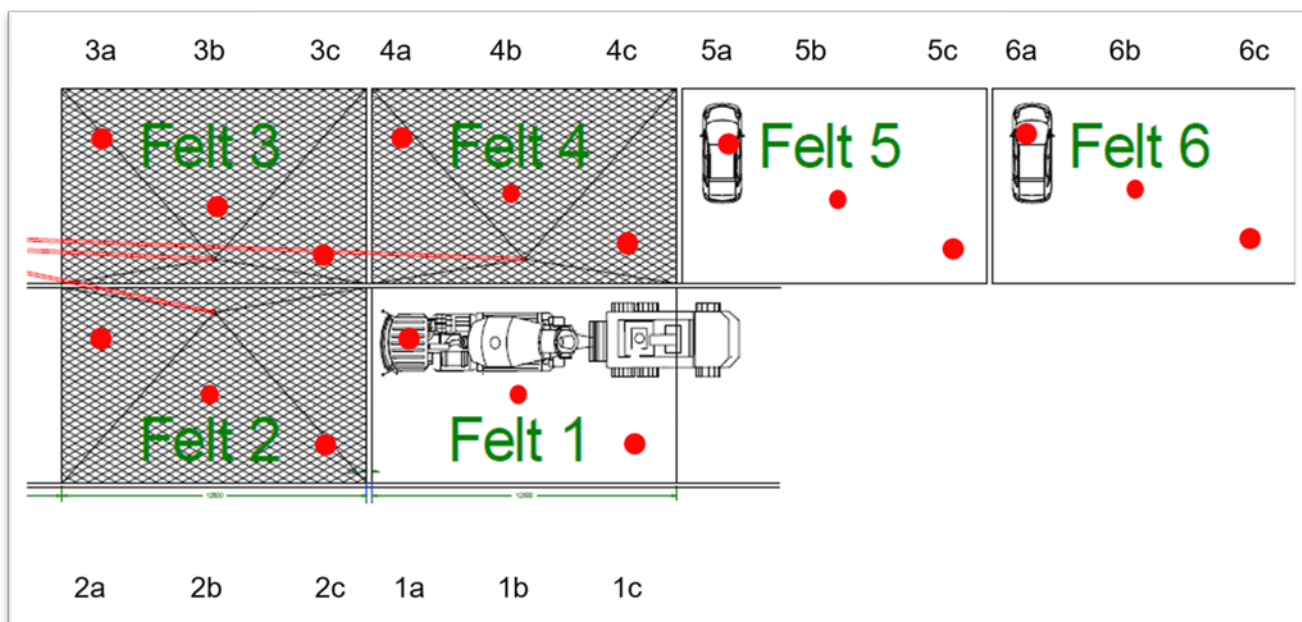
#### Forenklet prosedyre:

1. Lag kittpølse og plasser kitt, mal og målesylinder på målepunkt
2. Monter metallfot og vekter
3. Monter kamera og sjekk at man filmer hele målesylindren og målebåndet
4. Start kameraet og fyll målesylindren med vann og film mens vannet infiltrerer
5. Gjenta målingen 1-2 ganger på sammen målepunkt



Figur 34 Skisse montering av målesylinder (venstre) og ferdig oppsett (høyre).

Det er laget et system for å nummerere målepunkter på de ulike feltene med unike nummer. Figur 35 viser forslag til nummerering og ca. plassering i de ulike feltene.



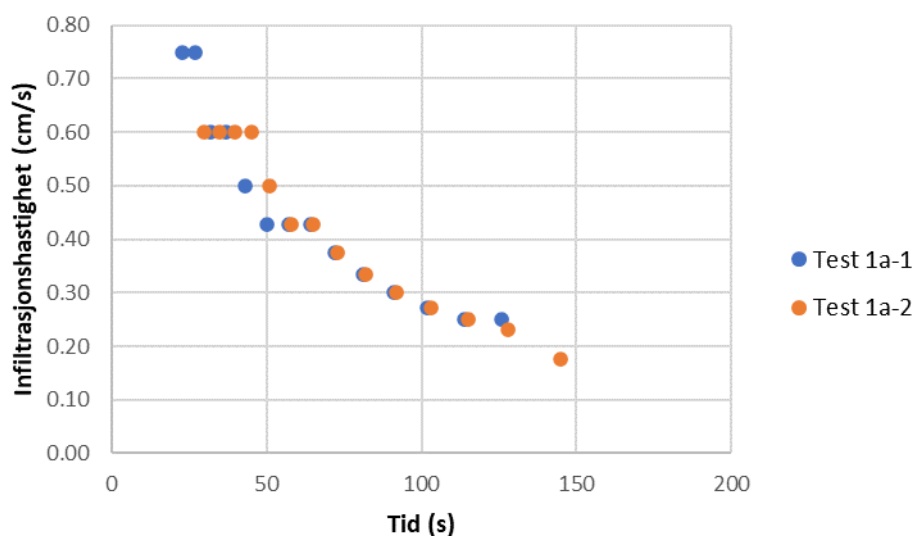
Figur 35 Målepunkter for infiltrasjonshastighet på Sveberg.

## 5.2.2 Resultater

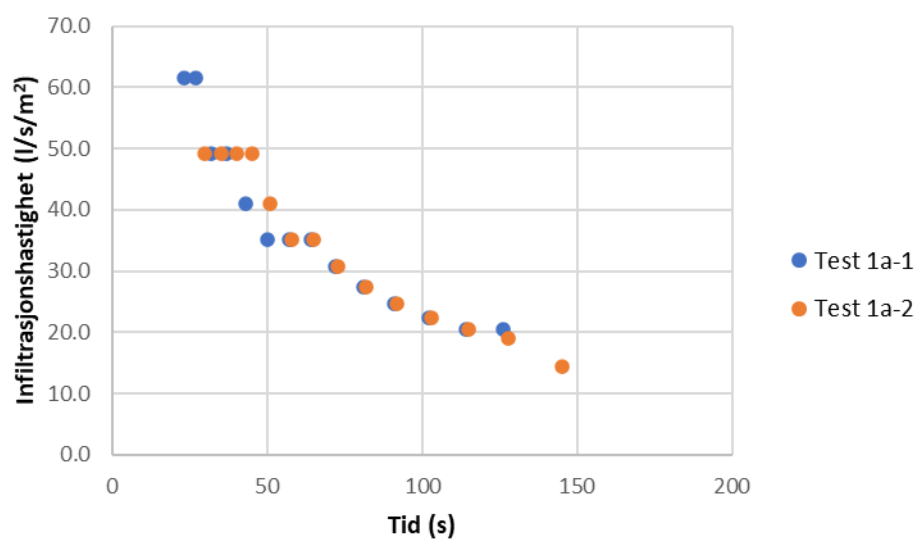
Det har vært betydelige utfordringer knyttet til infiltrasjonshastigheten i topplaget. Dette skyldes lekkasjer mellom belegningssteinen og sylindren og lekkasjer mellom belegningssteinene. Den første lekkasjen klarte man å tette ved å bruke et formbart kitt som ble klemt mot belegningssteinen og sylindren med en egen mal. Den andre lekkasjen er foreløpig ikke under kontroll noe som reflekteres i resultatene. Se Delkapittel 5.2.3 for nærmere diskusjon og forslag til løsning.

I siste runde med tester er det gjennomført tester i fire målepunkter før testingen ble avsluttet på grunn av mistanke om fortsatt lekkasjer. Figur 36 viser hvordan hastigheten på væskemenisken avtar som funksjon av tiden. Punktene er lest av fra filmen som ble tatt opp under de to testene og er således rådata. Basert på disse dataene kan man beregne infiltrasjonshastigheten gjennom fugene som vil være en del større siden fugearealet er kun ca. 12 % av arealet innenfor sylindren. Denne infiltrasjonshastigheten er vist i Figur 37. Etter hvert som trykkhøyden avtar og det kommer mer fuktighet i massene under sylindren avtar hastigheten. Det er høy kapasitet i fugemassene og lagene under slik at det vil være vanskelig å oppnå mettede forhold med så små volum som benyttes i testen. Hastigheten mot slutten av målingen vil imidlertid gi en indikasjon på infiltrasjonshastigheten som kan benyttes til å sammenligne ulike felt og følge utviklingen til over tid.

Tabell 6 viser målte arealer og forholdet mellom areal sylinder og areal fuge, mens Tabell 7 viser infiltrasjonshastigheten i ulike enheter. Det kan bemerkes at verdiene er høye og influert av lekkasjer mellom steinene. For videre diskusjon av infiltrasjonshastigheter og sammenligning med andre målinger vises det til delkapittel 5.4.



Figur 36 Eksempel på målt infiltrasjonshastighet som funksjon av tid relatert til væskehøyde i sylinder.



Figur 37 Eksempel på infiltrasjonshastighet som funksjon av tid relatert til tilgjengelig fugeareal.

Tabell 6 Oversikt over arealer for fire målepunkter.

Testpunkt	Areal sylinder (mm <sup>2</sup> )	Areal fuge (mm <sup>2</sup> )	Andel fugeareal (%)
1a	8495	1035 (estimert)	12.2
2a	8495	1035	12.2
3b	8495	1031	12.1
3c	8495	1250	14.7

Tabell 7 Målte infiltrasjonshastigheter gitt med forskjellige benevnelser.

Test #	Infiltrasjonsrate fuge (l/s/ha)	Infiltrasjonsrate permeabelt dekke (l/s/ha)	Infiltrasjonsrate pr andel fugeareal (l/s/ha/%-poeng)
1a-1	200000	24368	2000
1a-2	120000	14621	1200
2a-1	150000	18276	1500
2a-2	100000	12184	1000
3b-1	500000	60684	5000
3b-2	500000	60684	5000
3c-1	340000	50030	3400
3c-2	340000	50030	3400

### 5.2.3 Forslag for å unngå lekkasjer

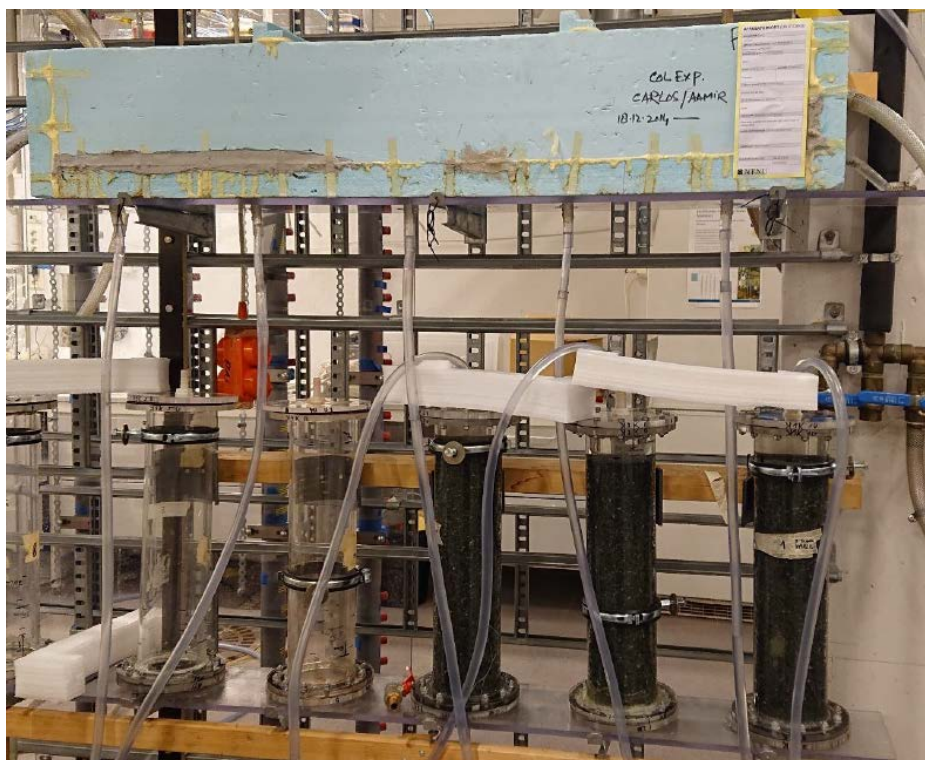
Det foreslås å lime sprekkene mellom steinene rundt målepunktene for å sikre at vannet renner ned i fugene og ikke sideveis langs steinene i dekkene som bruker ASAK Permac Lock og vanlig belegningsstein. For dekkene som bruker ASAK Dren bør det i tillegg settes inn noen kiler som kan limes til steinene.

## 5.3 Infiltrasjonskapasitet laboratoriemålinger

*Dette delkapittelet baserer seg på resultater fra masteroppgaven til Heidi Jensen, Winter operations of permeable interlocking concrete pavement, NTNU, 2020. Se masteroppgaven for full oversikt over alle resultatene [4].*

### 5.3.1 Materialer og metode

Arbeidet benyttet to typer laboratorieoppsett. For å måle hydraulisk konduktivitet ble det benyttet et eksisterende standard kolonneoppsett ved NTNU. Oppsettet er vist i Figur 38, der det ble benyttet 3 paralleller kolonner.



Figur 38 Laboratorieoppsett kolonneforsøk. (Foto: Heidi Jensen)

For å måle infiltrasjon og avrenning fra et permeabelt dekke under kontrollerte klimatiske forhold ble det bygget et eget laboratorieoppsett med permeabelt dekke. Det permeable dekke ble plassert oppå en isolert kasse for å simulere ulike underbygninger. Det ble også installert et avrenningssystem i bunnen. Hele oppsettet ble passert på en euro-pall. Oppsettet er mobilt og kan ved behov plasseres i et klimalaboratorium, se Figur 39. Totalt aktivt areal av permeabelt dekke type ASAK Permac Lock er 0.96 m<sup>2</sup>, se Figur 40.



Figur 39 Laboratorieoppsett permeable dekker. (Foto: Heidi Jensen)



Figur 40 ASAK Permac Lock tilpasset laboratoriekassen. (Foto: Terje Gaarden)

For å simulere en blanding av strøsand og knust strøsand ble det benyttet knust stein fra et pukverk med omtrentlig partikkelstørrelsesfordeling 0-2 mm.

Til fugesand ble det benyttet sand med partikkelstørrelsesfordeling 2-5 mm.

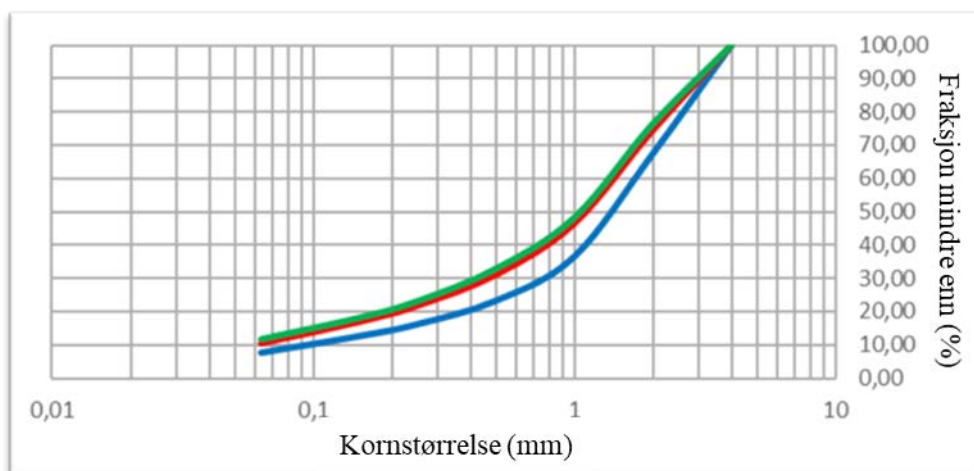
Kornstørrelsesfordelingen til knust stein ble bestemt ved å benytte siler med åpning 4 mm, 2 mm, 1 mm, 500 µm, 250 µm og 63 µm. Tre prøver ble tørket og analysert.

Hydraulisk konduktivitet ble målt i tre parallelle kolonner for hver blanding av fugesand og knust strøsand. Følgende blandingsforhold ble testet: 100 % fugesand, 75 % fugesand, 50 % fugesand, 25 % fugesand og 100 % knust strøsand. Testene ble utført med konstant trykkehøyde for både innløp og utløp, innløp i bunn av kolonnene med oppover-rettet strømning. Mengde gjennomstrømmet vann ble målt med vekt og det ble benyttet enten 60 sekunder eller 300 sekunder måleperiode. Hydraulisk konduktivitet ble deretter bestemt med Darcy's lov.

Laboratoriekasse ble satt til innfrysning i klimalab'en og etter at det var oppnådd stabile temperaturer på alle dyp (temperatur ble målt på 3 dybder) ble det påført vann. Avrenning ble bestemt ved å samle avrenningen i en bøtte med trykksensor.

### 5.3.2 Resultater

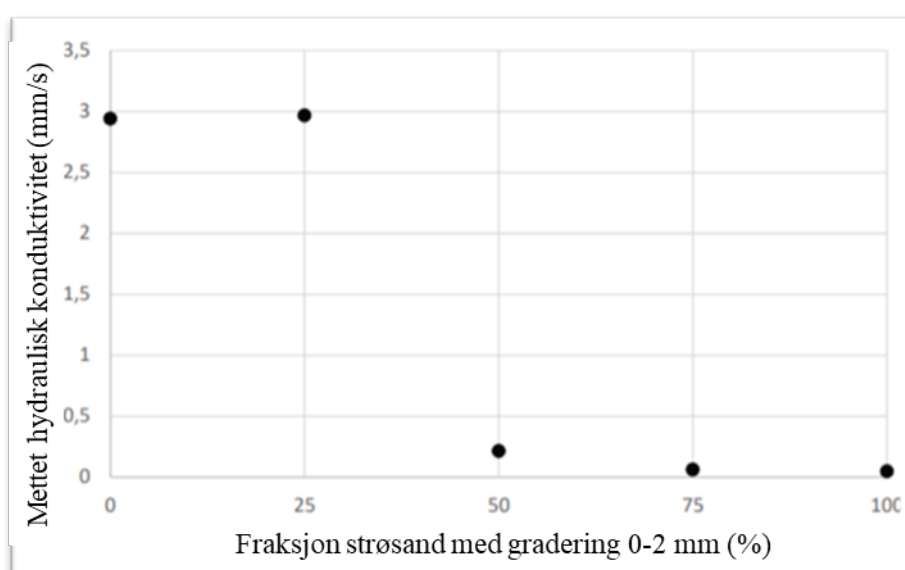
Målt kornstørrelsesfordeling til knust stein er vist i Figur 41. Det er god overenstemmelse med de tre parallellene. Figuren viser at omtrent 10 % av massene var mindre enn 0.063 mm, mens mellom 55-65 % var større enn 1 mm.



Figur 41 Kornstørrelsesfordeling knust stein [4].

Ulike fraksjoner med knust stein ble blandet inn i fugesanden for å simulere vinterdrift med påføring av strøsand med tilhørende knusing/slitasje. Figur 42 viser målt hydraulisk konduktivitet med ulike innblanding av knust stein. Det er liten forskjell i hydraulisk konduktivitet mellom ren fugesand og fugesand med 25 % knust stein, men når innblandingsforholdet blir 50 % synker den hydrauliske konduktiviteten raskt. For 75 % og ren knust stein er konduktiviteten tilnærmet null.

Forsøkene med innblanding av knust stein hadde med hensikt en grov inndeling for å få testet ut hele spekteret med blandingsforhold. Det vil imidlertid være interessant å gjenta forsøkene med en finere oppløsning med hensyn på blandingsforhold, men konsentrere seg om området mellom 20 til 40 % knust stein for å bestemme kurveforløpet i dette området mer nøyaktig. Det vil også være interessant å gjenta forsøket med reell strøsand fra ulike geografiske områder (type strøsand og trafikkmengde).



Figur 42 Hydraulisk konduktivitet av fugesand som funksjon av innblanding strøsand [4].

Forsøkene med laboratoriekassen ble i hovedsak preget av metodeutvikling og det er få praktiske resultater. Det kan bemerkes at temperaturdynamikken i dekket var langsom og det tok lang tid å oppnå stabil og lik temperatur som omgivelsene.

#### 5.4 Sammenligning infiltrasjonshastigheter

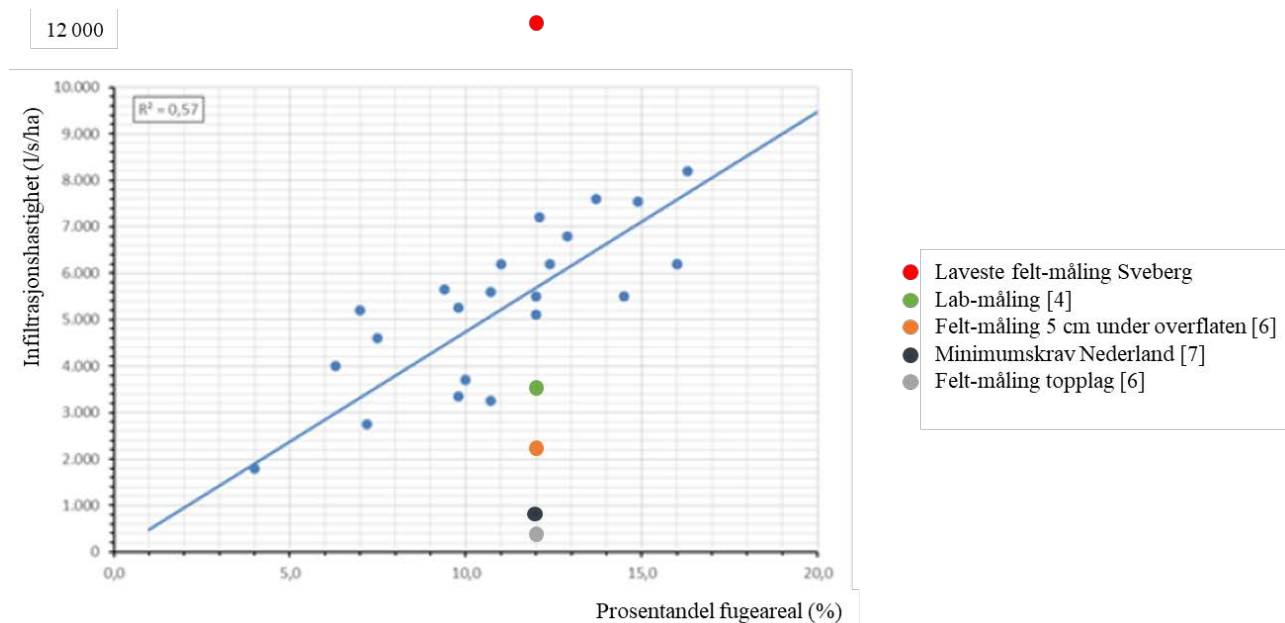
Målte infiltrasjonshastigheter kan sammenlignes med rapporterte verdier i litteraturen, der det er særlig relevant å sammenligne med resultater fra Borgwardt [5]. I tillegg er det rapportert noen infiltrasjonsverdier fra testfeltet fra Sandnes i masteroppgaven til Jens Trandem [6] og fra ulike permeable dekker fra Nederland [7]. En sammenstilling av noen av de rapporterte verdiene er vist i Figur 43. Man kan se at for en gitt prosentandel fugeareal er det stort sprik i verdiene fra Borgwardt, der den rapporterte korrelasjonskoeffisienten  $R^2$  er 0.57.

Den målte hydrauliske kapasiteten til fugesanden målt på i laboratoriet og regnet om til et permeabelt dekke med 12 % fugeareal er i nedre del av området rapportert av Borgwardt. Det er verdt å merke seg at mens laboratoriemålingen måler mettet hydraulisk konduktivitet, er det mer usikkert hvorvidt feltmålingene er gjort under virkelige mettede forhold. Hvis det ikke gjøres målinger på mettet masse, vil man overestimere den hydrauliske kapasiteten.

Videre er laveste felt-måling fra Sveberg en god del høyere enn alle andre tilsvarende målinger, noe som understøtter antagelsen om betydelig lekkasje mellom steinene. Før feltmålinger fra Sveberg kan benyttes bør man få lekkasjene under kontroll, se delkapittel 5.2.3

Testfeltet på Sandnes er bygget slik at det permeable dekke får avrenning fra et stort område rundt det permeable dekket, noe som vil gi økt tilrenning av sedimenter og lignende som kan tette fugene. Den målte infiltrasjonskapasitet i topplaget viser også en betydelig lavere verdi enn man kunne forvente. Men man ser også at bare 5 cm under overflaten er infiltrasjonshastigheten betydelig høyere. Dette støtter tidligere antagelser om at sedimentene setter seg i de øverste lagene med fugesand og som ligger til grunn for dagens vedlikeholdspraksis og anbefalinger.

Fra den nederlandske studien vises kun minimumskravet til infiltrasjonshastighet i Nederland før man må gjøre tiltak for å forbedre infiltrasjonen i topplaget.



**Figur 43** Infiltrasjonskapasitet som funksjon av % fugeareal, gjelder for fugemateriale 2-5 mm. Figuren er hentet fra Borgwardt [5] og tillagt norsk oversettelse på aksene og målinger fra egne undersøkelser og andre kilder.

## 5.5 Konklusjon

Mettet hydraulisk konduktivitet til settesand med gradering 2-5 mm er målt i laboratoriet og er lik 3 mm/s. Dette tilsvarer en infiltrasjonkapasitet til et permeabelt dekke med 12 % andel fugeareal lik 3630 l/s/ha.

Infiltrasjonsmålingene av topplaget på Sveberg har avdekket utfordringer med lekkasjer mellom steinene. Det anbefales å lime og plugge fugene mellom steinene for å tette lekkasjene før nye målinger utføres.

## 6 Temperatur

### 6.1 Innledning

Det er i litteraturen diskutert to fenomener knyttet til temperatur og permeable dekker [8]. For det første vil vann som lagres i de ulike lagene av det permeable dekket ha en kjøleende effekt om sommeren når varme brukes til å fordampe det lagrede vannet. Dette vil kunne bidra til å redusere varmeøy-fenomenet i urbane områder. Foreløpig er dette lite relevant for Norge.

Det andre fenomenet er knyttet til vinterforhold med temperaturer under frysepunktet. Selv om temperaturene under det permeable dekket har vist seg å reagere raskere på omgivelsestemperaturen enn tette dekker, noe som tilskrives tilførsel av kaldt smeltevann, beholdes infiltrasjonsegenskapene i fugene. Dette hindrer isdannelse på overflatene og medfører redusert behov for vinterdrift i form av mindre strøing.

På Sveberg måles temperaturen i bunnen av bærelaget i alle feltene. For feltene 5 og 6 (referanse) måles temperaturen også midt i bærelaget og i settelaget. Referansefeltet består imidlertid av vanlig belegningsstein som både har samme materialegenskaper (bl.a. farge) som det permeable dekket og som har betydelig infiltrasjonsegenskaper når det nå er nytt, slik at det i den første fasen etter at testfeltet er etablert antas å være mindre forskjeller i temperaturprofilen mellom de to feltene.

Hensikten med dette kapitlet er:

- å oppsummerer temperaturdata fra Sveberg med fokus på vintermånedene og temperaturprofilene fra felt 5 og 6.

### 6.2 Materialer og metode

Resultatene i dette kapitlet baserer seg på temperaturdata logget ved testfeltet på Sveberg. For detaljer rundt sensorer, plassering og logging, se kapittel 2 og særlig Figur 14.

### 6.3 Resultater

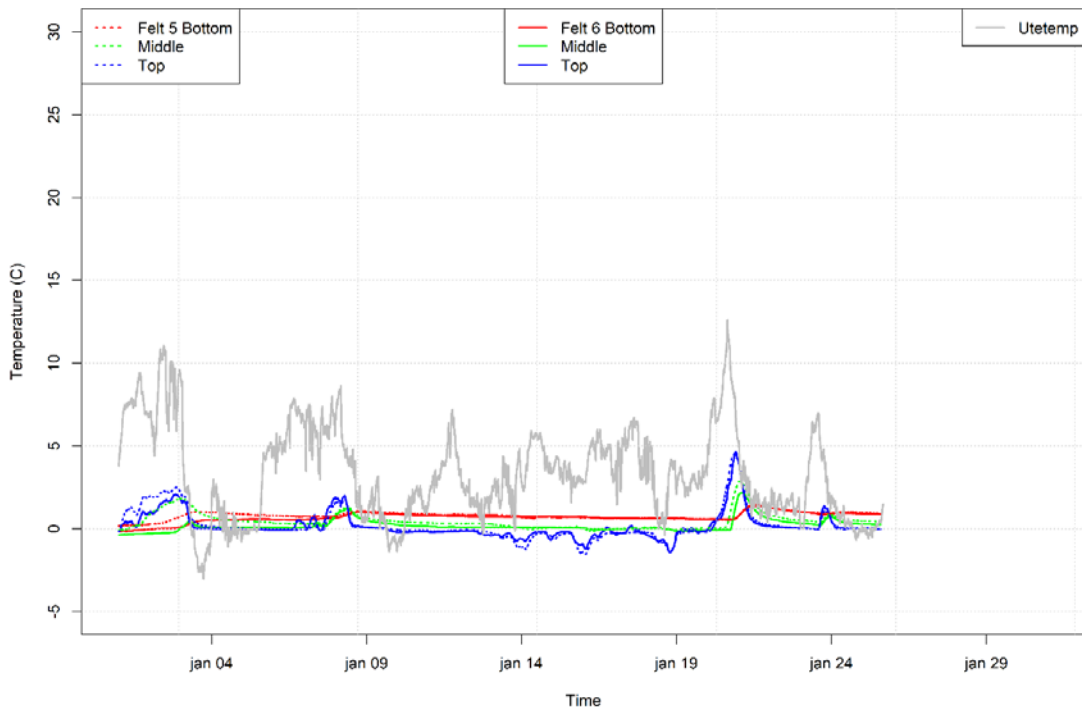
#### 6.3.1 Temperaturprofiler

Figur 44 til Figur 53 viser temperaturprofiler per vintermåned fra januar 2020 til april 2021. Hver figur viser topp-, midt- og bunntemperatur for både felt 5 og felt 6, i tillegg til utetemperaturen. Det er verdt å merke seg at fra januar til november 2020 var testfeltet ferdigstilt, men ikke tatt i bruk. Dette betyr blant annet at det ikke ble gjennomført systematisk snømåking. Videre mangler det noe data fra januar og februar, noe som skyldes manglende ladeeffekt med solpanelet vinterstid. Anlegget er nå koplet på 230 V, så dette problemet er nå løst.

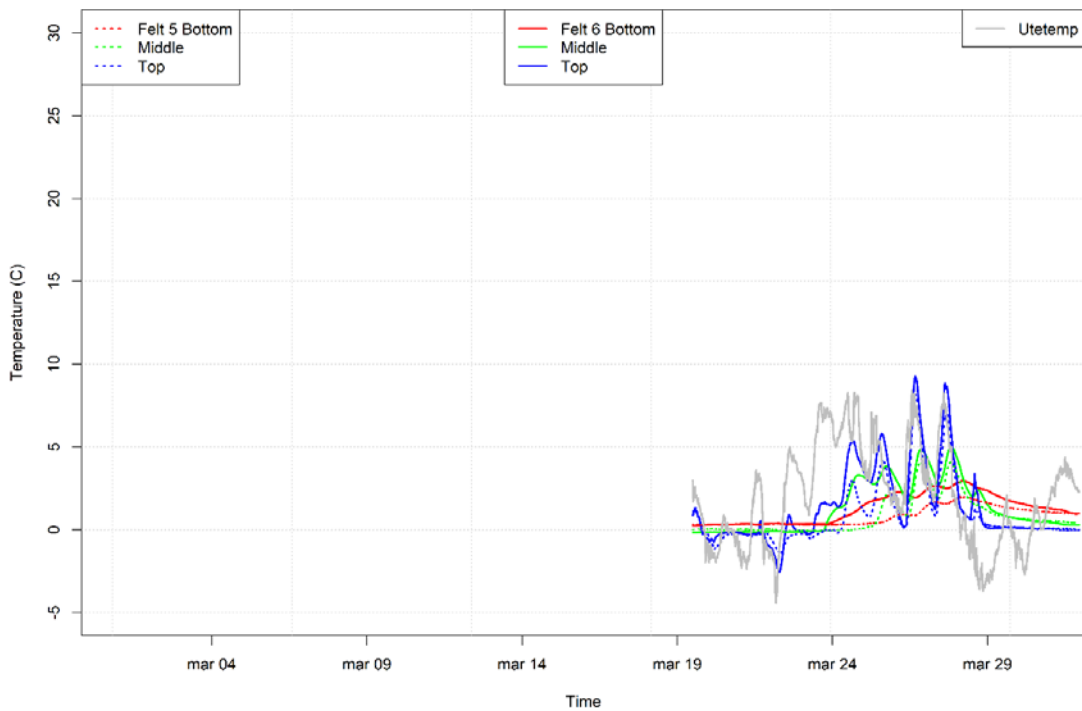
Følgende kan observeres fra temperaturprofilene:

- Topptemperaturen følger som hovedregel utetemperaturen og svinger raskt, se Figur 47, Figur 49 og Figur 50.
- Mellom- og bunntemperaturen har en langsommere respons, se f. eks. utvikling i Figur 47. Dette støttes også av forsøk gjort i klima-laboratoriet av masterstudenten [4].

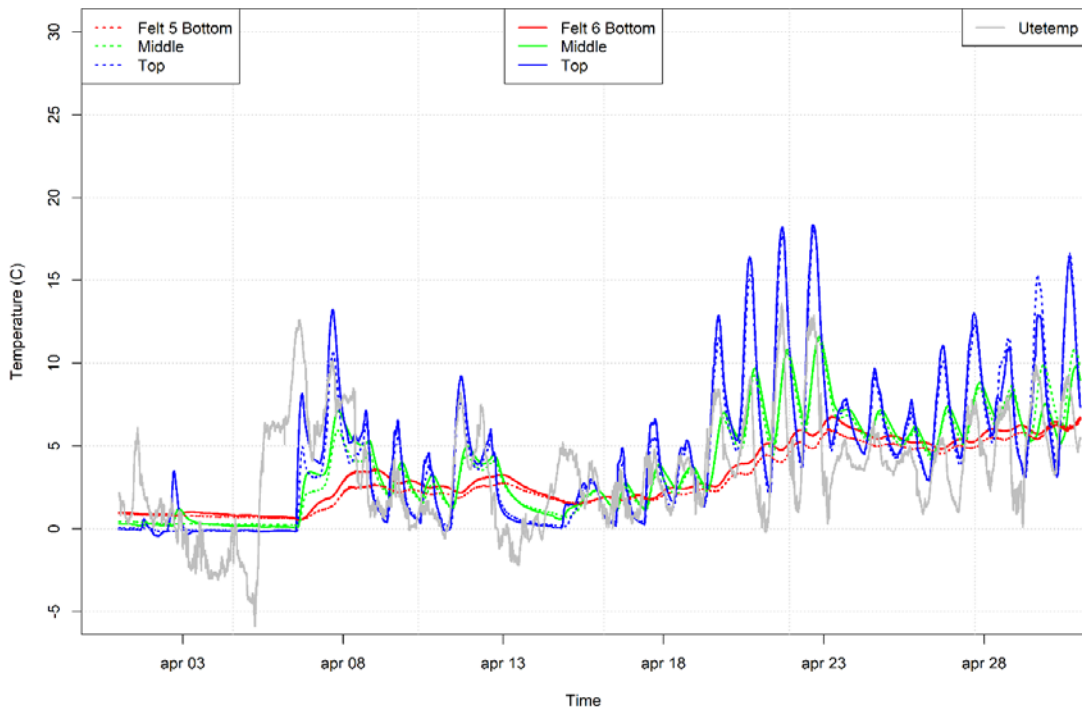
- Det er ingen synlig forskjell i responsen mellom felt 5 og felt 6 (referanse), men mot slutten av oktober 2020 (Figur 47) utvikler det seg et gap mellom temperaturene fra de to feltene som gjelder på alle tre dybdene. Fra februar 2021 (Figur 51) samler de seg igjen, men fenomenet observeres også senere for bunntemperaturen f.eks. mot slutten av mars 2021 (Figur 52). Det er uklart hva dette skyldes, men en forklaring kan være ulike mengder snø på de ulike feltene.
- Snø har en tydelig isolerende effekt. Figur 54 viser temperaturutviklingen i april 2021 sammen med bilder av testfeltet ved gitte datoer. I starten av måneden ser vi at utetemperaturen synker markert, mens temperaturen i dekket er stabilt på alle nivåer og tilsynelatende upåvirket av utetemperaturen. Fra bildene ser vi at området er dekket med snø. Etter at temperaturen stiger raskt ser vi at snøen smelter og dekkene blir snøfrie, samtidig ser vi at temperaturen i dekket begynner å endre seg i takt med utetemperaturen.



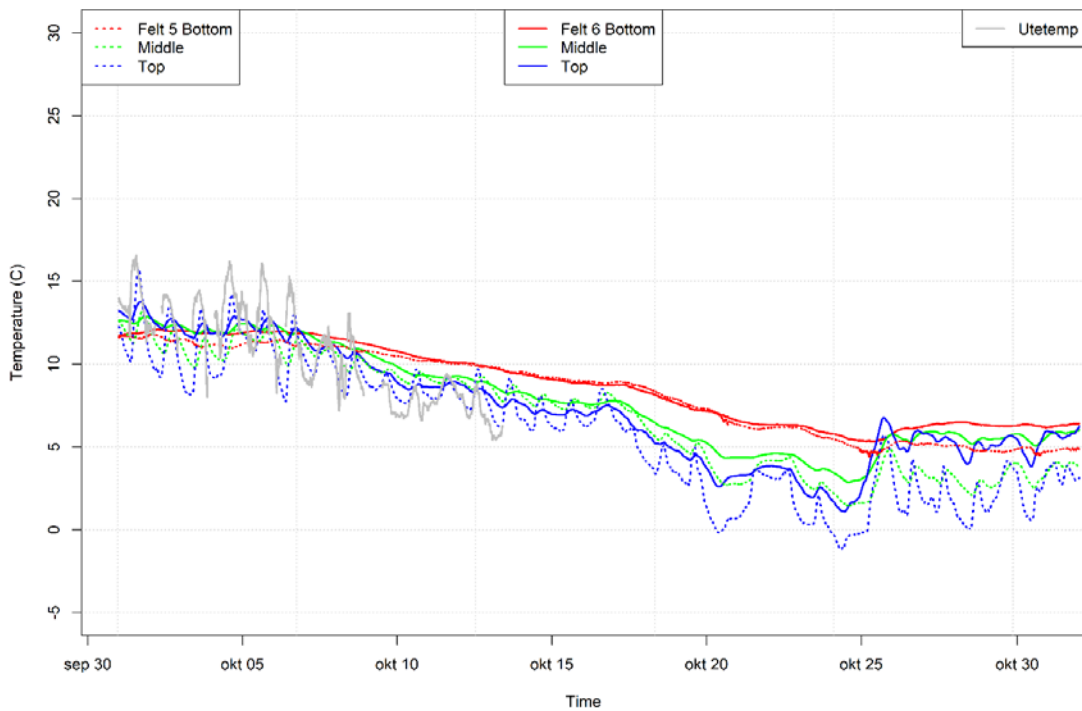
Figur 44 Temperaturprofil for januar 2020 for felt 5 (permeabelt dekke) og felt 6 (referansefelt).



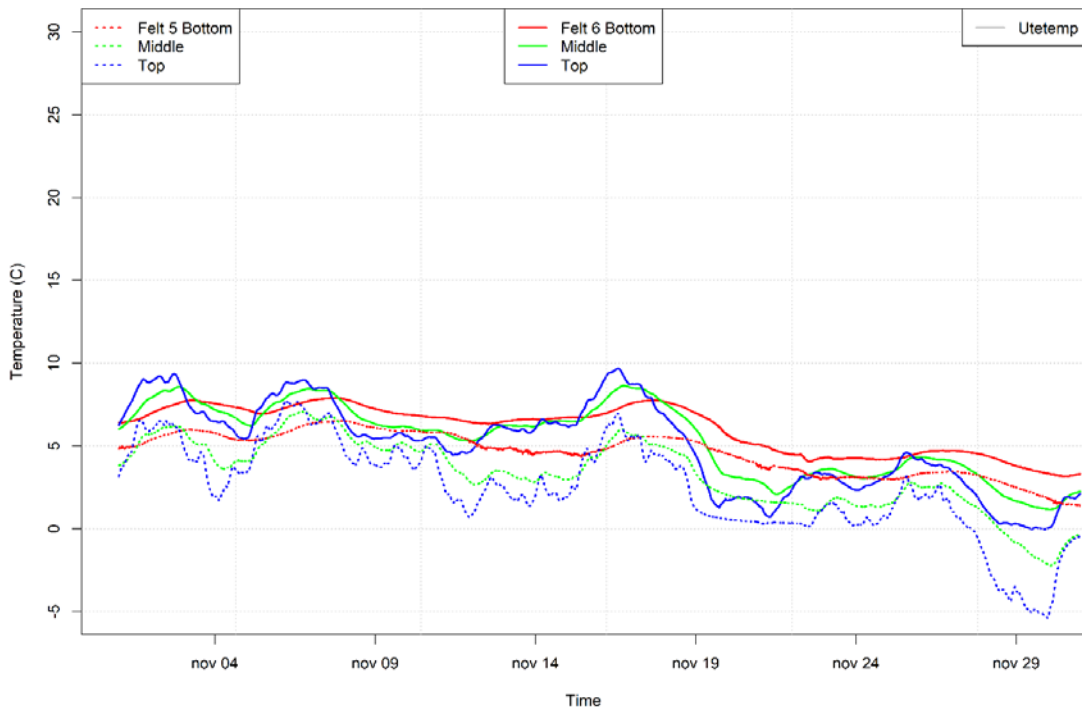
Figur 45 Temperaturprofil for mars 2020 for felt 5 (permeabelt dekke) og felt 6 (referansefelt).



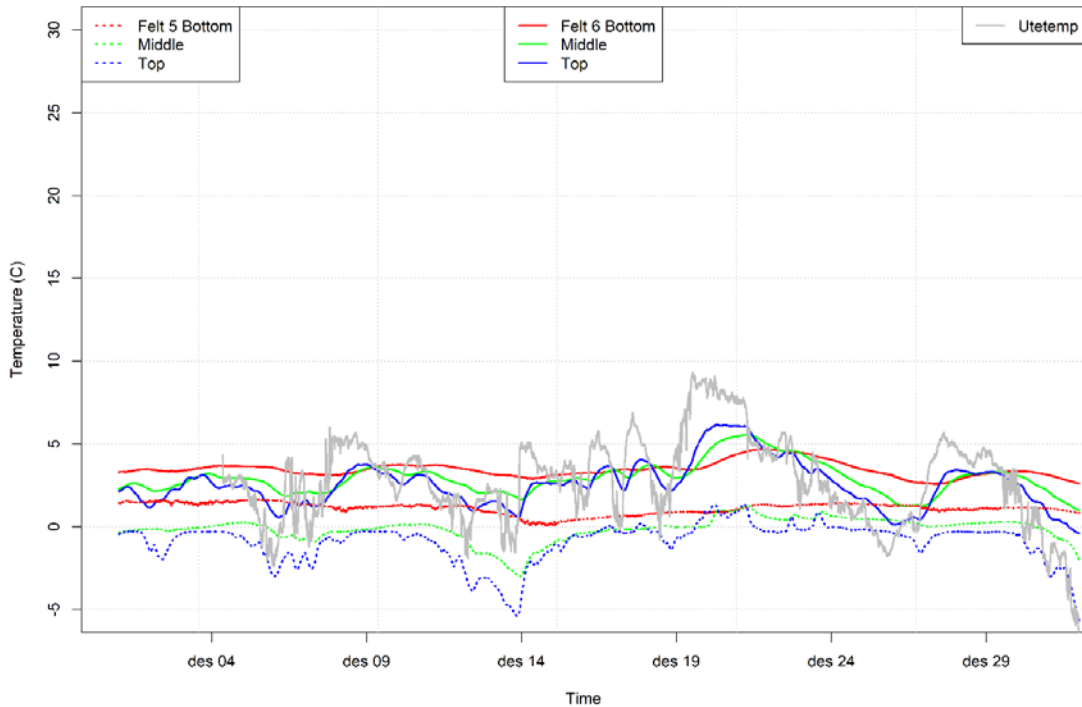
Figur 46 Temperaturprofil for april 2020 for felt 5 (permeabelt dekke) og felt 6 (referansefelt).



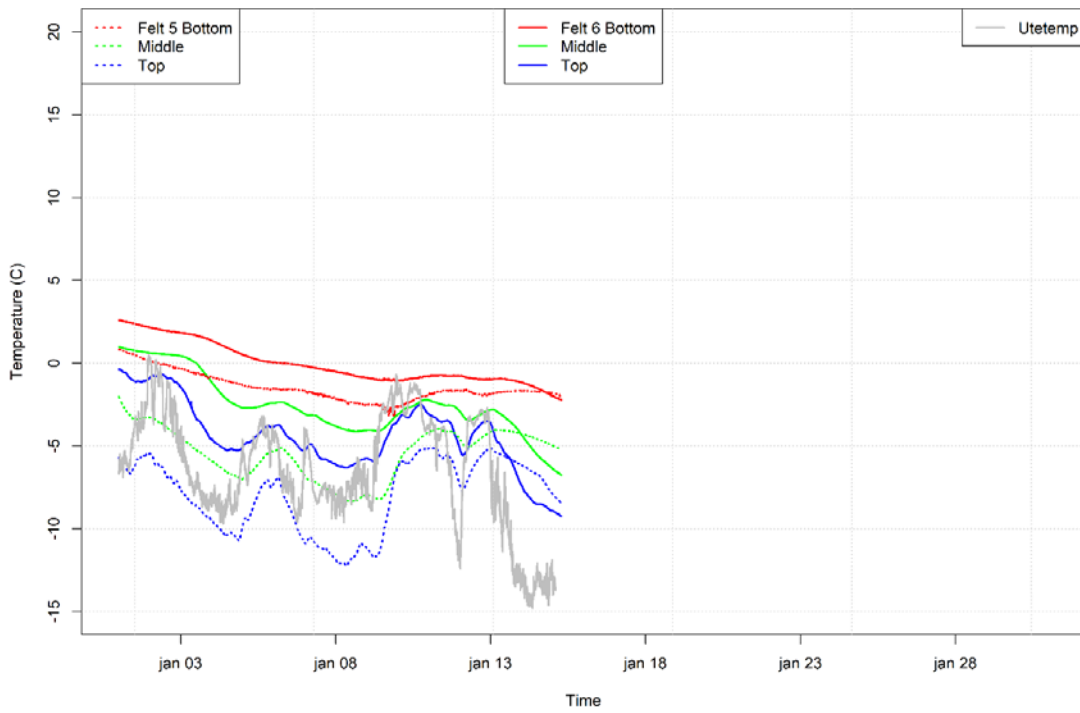
Figur 47 Temperaturprofil for oktober 2020 for felt 5 (permeabelt dekke) og felt 6 referansefelt).



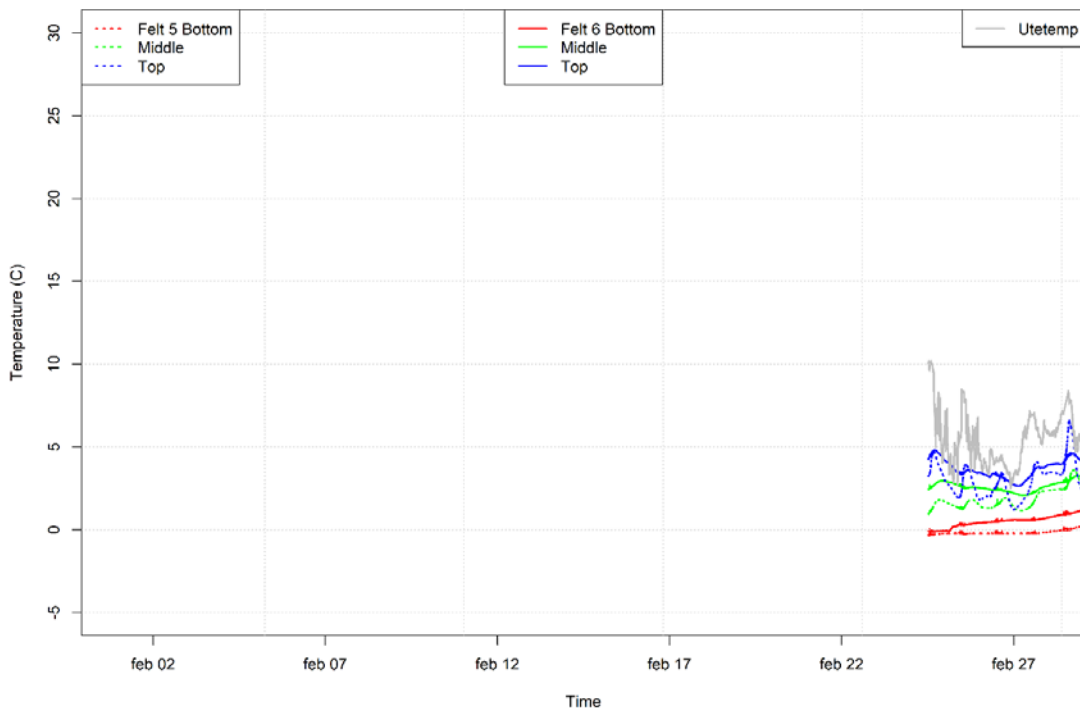
Figur 48 Temperaturprofil for november 2020 for felt 5 (permeabelt dekke) og felt 6 (referansefelt).



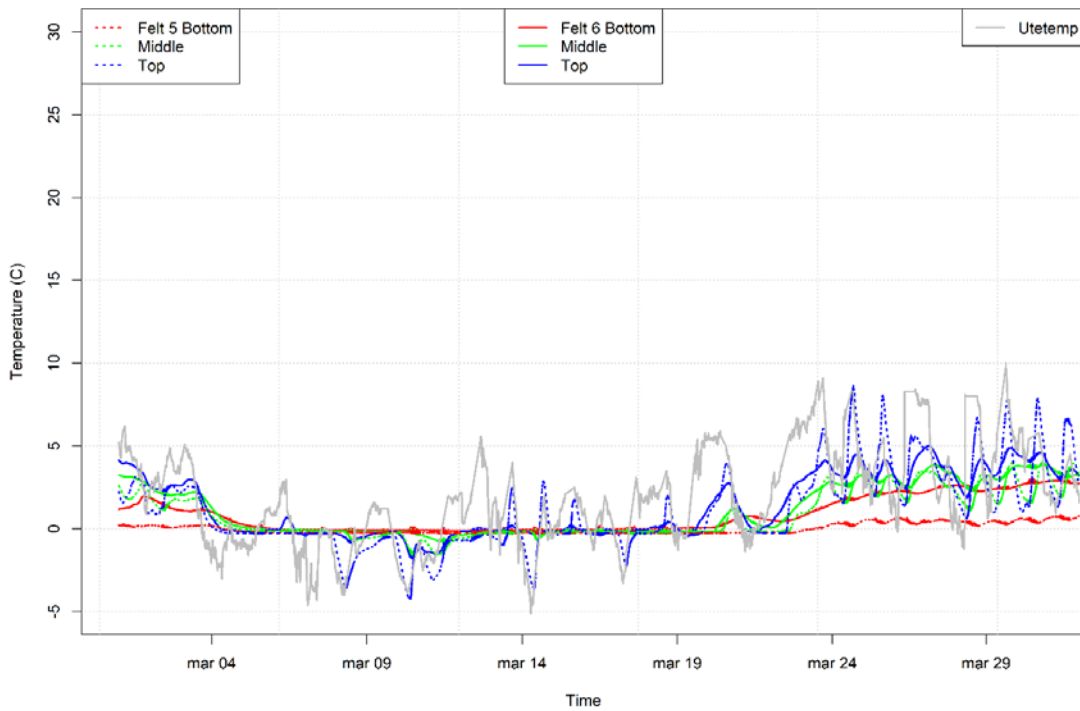
Figur 49 Temperaturprofil for desember 2020 for felt 5 (permeabelt dekke) og felt 6 (referansefelt).



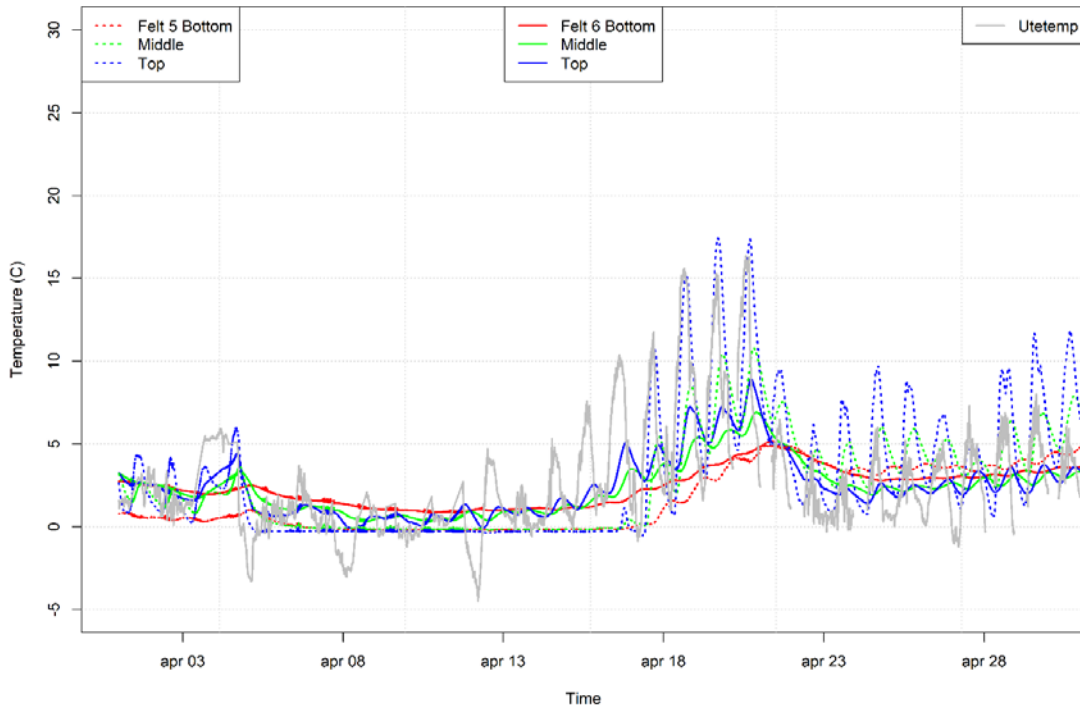
Figur 50 Temperaturprofil for januar 2021 for felt 5 (permeabelt dekke) og felt 6 (referansefelt).



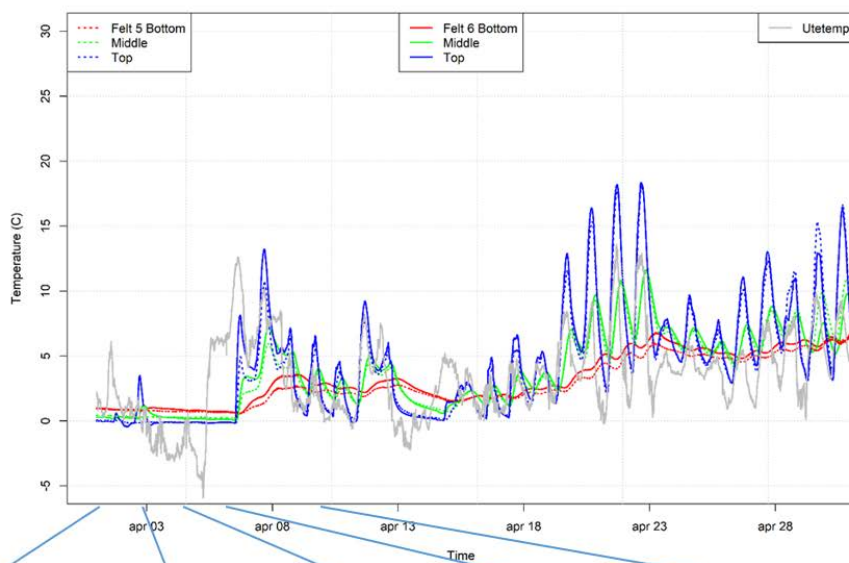
Figur 51 Temperaturprofil for februar 2021 for felt 5 (permeabelt dekke) og felt 6 (referansefelt).



Figur 52 Temperaturprofil for mars 2021 for felt 5 (permeabelt dekke) og felt 6 (referansefelt).



Figur 53 Temperaturprofil for april 2021 for felt 5 (permeabelt dekke) og felt 6 (referansefelt).

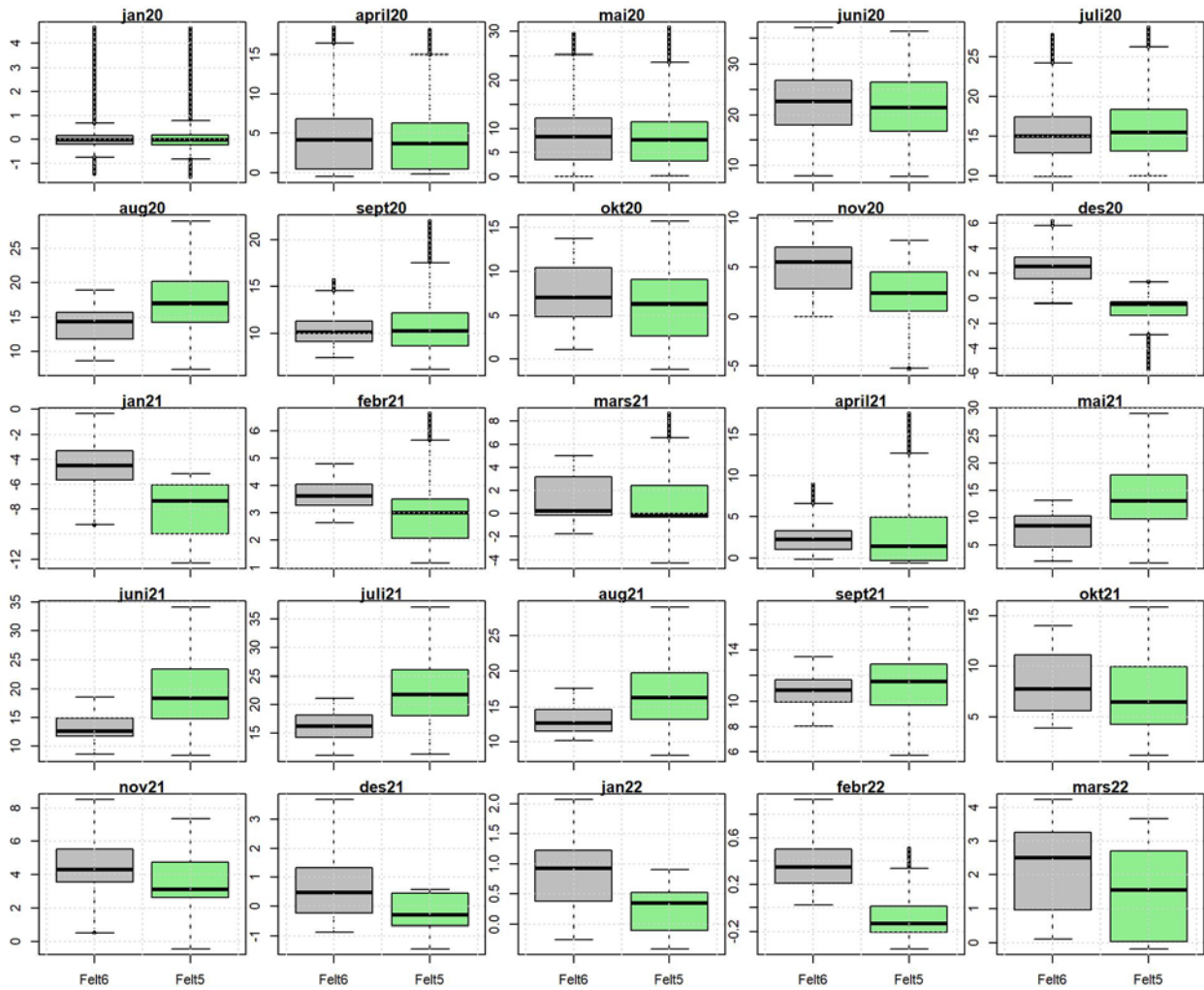


Figur 54 Temperaturprofil for april 2020 for felt 5 (permeabelt dekke) og felt 6 (vanlig belegningsstein/referansefelt) med bilder som viser overgang fra snø til snøfritt område.

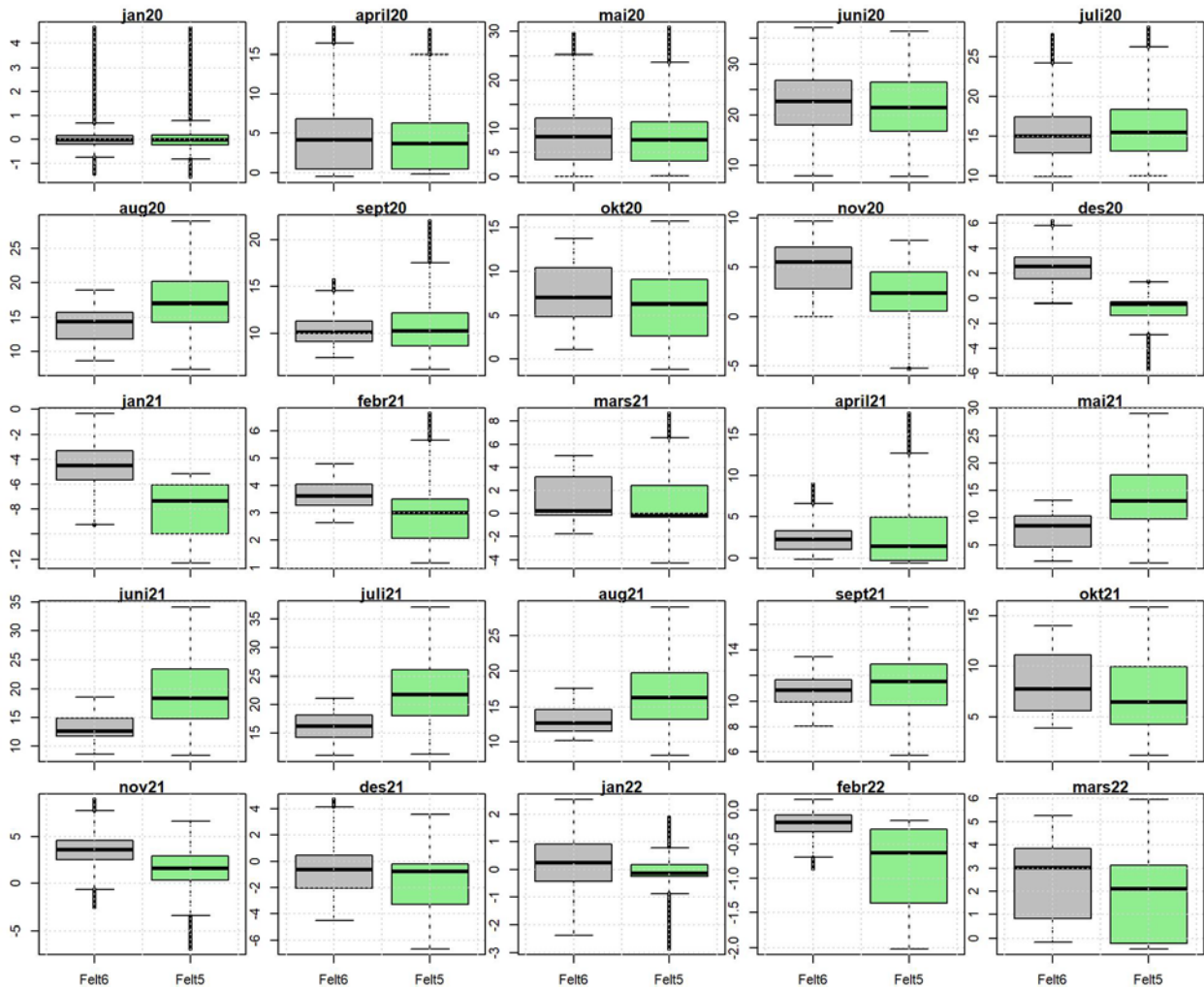
### 6.3.2 Statistisk oppsummering

Det kan beregnes sammendrag for temperaturdataene for hver måned og hvert felt. En hensiktsmessig måte å vise dette på er bokplott som viser medianverdien som tykk strek, mens øvre og nedre kvartil er vist som øvre og nedre ende av en boks. Videre vil viskere og punkter gi en indikasjon på spredning utover disse persentilene. Figur 55 til Figur 57 viser sammendrag for henholdsvis målinger foretatt i bunnen av dekket, i midten av dekket og i toppen av dekket (se Figur 14 for nøyaktig plassering av sensoren). Merk at skalaen langs y-aksen er justert for hvert plott for å kunne sammenligne resultatene for mellom feltene for hver måned, men alle plottene er også vist med samme skala på aksene i Vedlegg E.

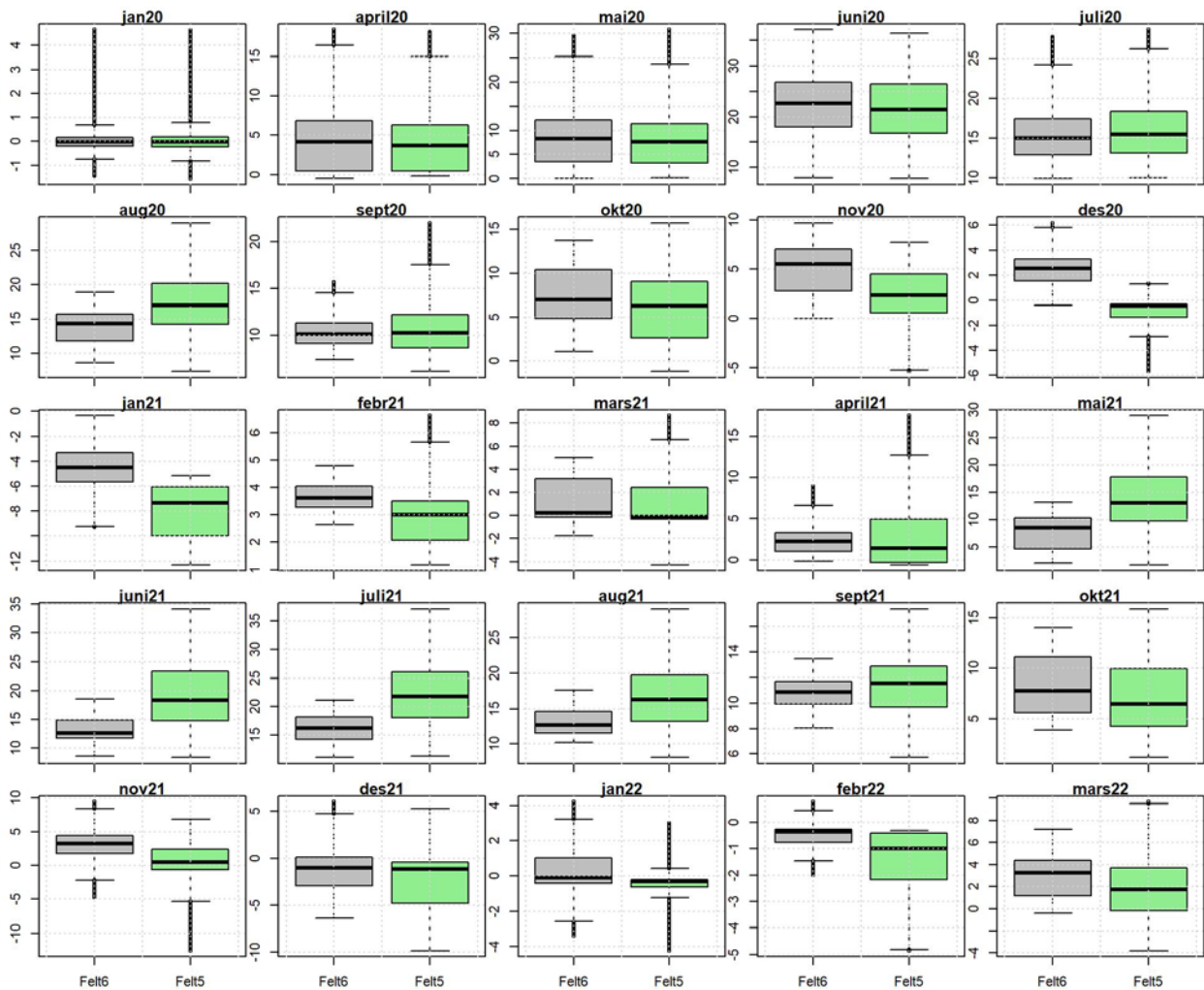
Det er ikke vist systematisk forskjell i temperatur mellom vanlig belegningsstein og permeabelt dekke.



Figur 55 Månedlig oppsummering av temperaturdata for sensoren plassert i bunnen på felt 5 (permeabelt dekke) og felt 6 (vanlig belegningsstein/referansefelt).



Figur 56 Månedlig oppsummering av temperaturdata for sensoren plassert i midten på felt 5 (permeabelt dekke) og felt 6 (vanlig belegningsstein/referansefelt).



Figur 57 Månedlig oppsummering av temperaturdata for sensoren plassert i toppen på felt 5 (permeabelt dekke) og felt 6 (vanlig belegningsstein/referansefelt).

### 6.3.3 Tine/fryse sykluser

Temperaturen under dekkene følger i hovedsak lufttemperaturen over dekkene, der temperaturen rett under steinene følger lufttemperaturen tett mens temperaturen legger ned i dekket har en mye langsommere respons. Det kan ta dager og i noen tilfeller uker før temperaturen målt lengst ned har nådd samme nivå som lufttemperaturen, se for eksempel Figur 47 som viser langsom nedkjøling i oktober 2020. Tilsvarende kan man i Figur 52 se en relativt stabil temperatur nederst selv omlufttemperaturen og temperaturen under steinene stiger gradvis og svinger gjennom døgnet. Videre er det kun få observasjoner der temperaturen nederst i dekket er under frysepunktet. Dette skulle indikere at eventuell frost i fugemassene skulle tine raskt med utetemperaturen og drenere smeltevann til underbygningen. Dette indikerer videre at behovet for strøing/salting vil være mindre, siden alt smeltevann vil drenere bort så fort det har smeltet slik at en unngår at smeltevannet fryser igjen (noe som typisk skjer ved nattefrost). Resultatet er i samsvar med funnene i en amerikansk studie [8].

## 6.4 Konklusjon

Temperaturdata fra Sveberg har vist at temperaturen rett under belegningssteinen følger som hovedregel utetemperaturen og svinger raskt, mens temperaturene målt midt i og i bunnen av underbygningen har en langsommere respons. Dette støttes også av forsøk gjort i klima-laboratoriet. Det er ingen systematisk forskjell i temperaturen mellom vanlig belegningsstein og permeabelt dekke.

## 7 Forurensning

### 7.1 Innledning

I løpet av de siste fem-seks årene har det i Norge vært en økende interesse for håndtering av overvann. Fokuset har stort sett vært på håndtering av overvannsmengde, men også håndtering av forurensninger i overvannet har fått oppmerksomhet [9]. Dette skyldes at i urbane områder vil overvannet ofte være forurenset. Vegtransport, industri og andre menneskelige aktiviteter vil være kilder til forurensninger som i varierende grad vaskes ut med overvannet. Typiske forurensninger inkluderer en lang rekke løste og partikkelbundne komponenter som vegsalter, tungmetaller, næringsalter, organiske miljøgifter og mikroplast [10–12].

Forurensning har ikke vært prioritert i prosjektet, men det er utført noen innledende oppgaver knyttet til dette tema. For det første er det utført et litteratursøk for å få en oversikt over litteratur som sier noe om rensekapasiteten til permeable dekker. For det andre er det utført måling med passive prøvetakere sommeren 2021. Resultatene fra disse aktivitetene er oppsummert i de tre påfølgende delkapitlene.

### 7.2 Litteratursøk

*Dette delkapittelet gir en presentasjon av litteratur som omhandler rensekapasiteten til permeable dekker. Litteraturen ble identifisert i en større litteraturstudie utført i regi av Klima 2050: E. Sivertsen, G. Raspati, M. Barrio, S. Bruaset, K. Azrague, Forurenset overvann. En litteraturstudie. Klima 2050 Rapport 28. Trondheim 2021. ISBN 978-82-536-1724-4 [13].*

#### 7.2.1 Materialer og metode

Litteraturoversikten presentert i denne studien er basert på en etablert forskningsmetodikk som sikrer en omfattende søkeprosess og systematisk gjennomgang av relevant litteratur [14]. For å konkretisere målsetningen med studien har vi benyttet rammeverket CIMO [15]. Tabell 8 viser en konkretisering av hva litteratursøket skal inneholde innenfor hver av kategoriene *Context (hvor)*, *Intervention (hva)*, *Mechanisms (hvordan)* og *Outcome (resultat)*.

Tabell 8 Konkretisering av litteratursøket med CIMO rammeverket.

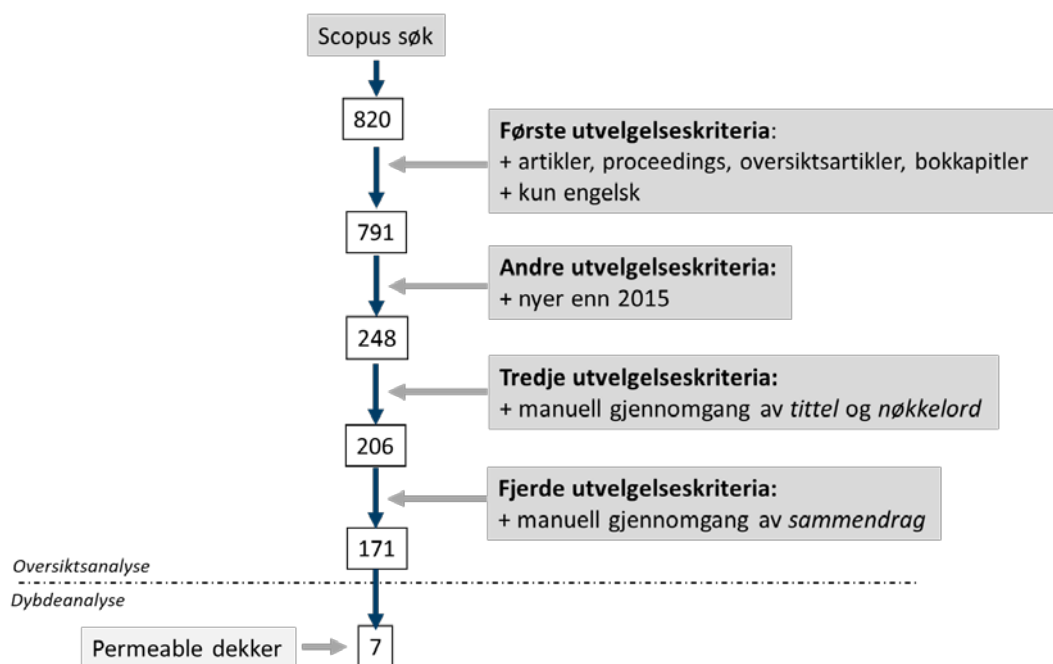
Context	Treatment of polluted stormwater from urban area
Intervention	Unit process, unit operation, technical solution, concept of treatment, nature-based solutions
Mechanisms	Physical, chemical, biological treatment methods
Outcome	Guideline, treatment efficiency, regulation, decision support, design tool

Søkeordene som ble benyttet innenfor hver av kategoriene er vist i Tabell 9, der søkeordene mellom hver kategori ble bundet sammen med *AND*, mens søkeord innenfor hver kategori ble bundet sammen med *OR* (ikke vist). Søkeordene ble identifisert ved å studere tittel, sammendrag og nøkkelord for et lite utvalg artikler og rapporter [10–12,16,17].

Databasen Scopus ble benyttet i studien og søket ble gjennomført 18. mars 2021. Figur 58 viser en oversikt over antall treff og utvelgelseskriterier. Det første søket gav 820 treff som ble redusert til 171 etter fire utvelgelsesrunder og til slutt syv artikler som omhandler permeable dekker.

Tabell 9 Søkeord og Booleanske operasjoner (OR mellom ord i samme kolonne).

Context (hvor)	Intervention (hva)	Mechanisms (hvordan)	Outcome (resultat)
urban runoff stormwater road runoff	AND SUDS Nature-based solutions decentralised system local treatment source control filtration removal adsorption degradation biodegradation	AND water treatment characterisation water analysis statistical analysis data collection	AND guideline treatment efficiency regulation decision support design seasonal temporal framework operation maintenance Nordic climate cold climate



Figur 58 Resultater litteratursøk og prosessen med å velge relevante artikler.

## 7.2.2 Resultater

Totalt ble det identifisert syv artikler som omhandler permeable dekker og deres renseeffekt. Her følger en kort presentasjon av hver artikkel.

Erickson *et al.* [18] sammenstiller anbefalinger for vedlikehold av filtreringsløsninger, infiltrasjonsløsninger, rensedammer og permeable dekker. Ingen tall på renseeffekter, men artikkelen beskriver ulike strategier for å opprettholde rensefunksjon av nevnte løsninger.

Braswell *et al.* [19] har studert et system som består av et permeabelt dekke med belegningsstein og en biofilterenhet i serie for å rense overvann. Testområdet er et 0.08 hektar stort området lokalisert i Fayetteville, Nord Carolina og renseenhetene ble fulgt opp i 22 måneder. Det permeable dekke redusert gjennomsnittlig konsentrasjonen av suspendert stoff med 91%, totalt fosfor med 41%, totalt nitrogen med 27%, men bidro til en betydelig økning i nitrat/nitritt konsentrasjoner. Sekundær behandling med Filterra® reduserte TSS- og TP-konsentrasjonene ytterligere. Artikkelen diskuterer også forskjeller i renseeffekten mellom ulike hendelser og den totale renseeffekten over hele perioden. Her er det interessant å merke seg bruken av kurver som viser gjennomsnittskonsentrasjon og sannsynlighet for å overskride en bestemt konsentrasjon. Ved å legge inn krav fra f.eks. en utslippstillatelse for et gitt område vil man få en verdi for hvor ofte man bryter dette bestemte utslippskravet. I forhold til permeable dekker konkluderer Braswell *et al.* med at denne løsningen fjerner suspendert stoff og partikkelbundne forurensinger i stor grad, men at løste forbindelser fjernes i mindre grad.

Yu *et al.* [20] har i laboratorieskala studert ulike permeable dekker med porøs betong og keramisk topplag. Artikkelen rapporterer høy fjerning av suspendert stoff i området 83-95 % og mer moderate renseeffekter av nitrogen, fosfor og kjemisk oksygenforbruk (COD).

Yang *et al.* [21] har studert filtreringsegenskapene til permeable dekker i laboratorieskala og presenterer en god del data på renseeegenskaper og igjen tetting av fuger. Laboratorieoppsettet minner om laboratoriekassen som ble utviklet i Drensstein [17] og artikkelen gir en god beskrivelse av forsøksmetodikken som benyttes og som det vil være fornuftig og vurdere dersom vi ønsker å gå videre med oppsettet til SINTEF/NTNU.

Huang *et al.* [22] har studert renseeffekten til porøs asfalt, porøs betong og permeabelt dekke med belegningsstein. Laboratorietestene er sammenlignet med data fra storskalaanlegg, og det er renseeffekten av suspendert stoff, totalt fosfor og totalt nitrogen som er undersøkt. Det er også forsøkt å skille mellom de ulike lagene som slike dekker består av. Den beste renseeffekten oppnås med porøs betong, men også porøs asfalt og permeabelt dekke med belegningsstein hadde renseeffekt. Generelt ble det funnet god overensstemmelse mellom laboratorieskala og storskala tester med unntak for totalt nitrogen der det ble observert gjennomgående høyere renseeffekt i storskala. Observerte renseeffekter var i størrelsesorden 87–95% for suspendert stoff, 75–89% for totalt fosfor og 2-40 % for totalt nitrogen (storskala). Det er også utviklet en enkel modell for å beregne renseeffekten til disse løsningene.

Winston *et al.* [23] har studert permeable dekker og renseeffekten utenom vintersesongen, der testfeltet er lokalisert i den snørike delen av Ohio. To testfelt er benyttet der de får avrenning fra omkringliggende areal som har henholdsvis 2.2 og 7.2 ganger arealet til det permeable dekket. Et poeng her er at feltene også var plassert på leirjord. Resultatene var i samsvar med tidligere studier med betydelig renseeffekt av partikkelbundne næringsstoffer. Videre ble det observert at belastningen av suspendert stoff i avløpet fra feltene i enkelte tilfeller var større enn i tilrenningen, en effekt Winston *et al.* tillegger utlekking av partikler fra leirlaget som følge av vegsalting i vintersesongen. Ut over høsten avtar avrenningen av partikler slik at effekten av salting om vinteren holder seg 3-6 måneder etter påføring. Det ble også identifisert en annen relevant artikkel fra samme forskningsmiljø [16]. I denne studien er permeable dekker benyttet som forbehandling til en cisterne for gjenbruk av overvann. Totalt for systemet rapporteres det om en reduksjon i suspendert stoff høyere enn 96% og en reduksjon i partikkelbundne næringsstoffer på rundt 40%. Begge artikler inkluderer omfattende tallmateriale og statistikk. For detaljer henvises det til disse.

Vogel *et al.* [24] er en review-artikkel som blant annet oppsummerer ganske kort noe forskning på permeable dekker og deres kapasitet til å rense overvann. Artikkelen gir ingen spesifikke renseeffekter, men henviser til annen litteratur. Basert på den korte beskrivelsen virker det som det hovedsakelig refereres til permeabel asfalt eller betong og i mindre grad til permeabel belegningsstein.

### 7.3 Annen relevant litteratur

En rapport som oppsummerer en amerikansk studie på blant annet permeable dekker med belegningsstein som håndterer overvann fra en parkeringsplass [8], gir en god oversikt over relevante studier fra før 2015. I tillegg presenterer de egne målinger på renseeffekt, der de har analysert mellom 34-43 hendelser. Hvis en sammenligner med konsentrasjonen på det som renner inn og det som renner ut i dreneringsrøret under dekket, så redusere dekket totalt suspendert stoff med 69 %, suspendert sedimenter med 63 % og totalt fosfor med 14 %, mens det var målt kun små forskjeller for klorid og en økning for løst fosfor. *E.coli* og *Enterococci* ble redusert med henholdsvis 48 % og 31 %. Det ble også påvist noe renseeffekt selv for overflateavrenningen, men disse målingene omfatter langt færre hendelser. For ytterligere detaljer om renseeffekt henvises det til rapporten.

### 7.4 Konklusjon

En litteraturstudie avdekket få vitenskapelige artikler som omhandler permeable dekker og renseeffekt. En målekampanje med å bruke passive prøvetakere i de tre avløpene fra feltene 1-3 viste ingen detekterbare verdier av de analyserte metallene.

## 8 Helhetsvurdering (= bærekraftsanalyse)

*Dette kapitelet beskriver kort utviklingen av et rammeverk for helhetsvurdering av dekker og vil danne utgangspunktet for en vitenskapelig artikkel ila. 2022.*

### 8.1 Innledning

I mange, spesielt nordlige, regioner i Europa, er det utfordringer knyttet til håndtering av overvann i urbane områder. Disse utfordringene er knyttet til håndtering av avrenningsvolumene og beskyttelse av vannkvaliteten mot punktutslipp og/eller diffuse utslipp. Anslåtte effekter av klimaendringer og økende urbanisering forventes å forverre situasjonen.

Naturbaserte løsninger (NBS) kan spille en nøkkelrolle i å redusere virkningene av og/eller tilpasse samfunnet til disse utfordringene. Med NBS kan den samme løsningen i prinsippet brukes til å nå flere forvaltningsmål. Deres bruk må derfor evalueres på en helhetlig måte, med tanke på både primærfunksjon (fordeler) og ringvirkninger (tilleggsfordeler).

Tidligere publiserte *Den europeiske kunnskaps- og læringsmekanismen for biodiversitet og økosystemtjenester* (EKLIPSE) et sammendrag av forskningsfronten på virkninger ved bruk av NBS for å støtte planlegging og evaluering av NBS som håndterer utfordringer knyttet til klimaendringer, inkludert vannmangel og vannkvalitet i tillegg til flomsikring. Rammeverket bygger på kartlegging og vurdering av økosystemer og deres tjenester, og gjenspeiler potensialet i NBS for samproduksjon av ESS på tvers av klima, økosystemer og sosioøkonomiske og sosiokulturelle systemer. Den erkjenner at virkningene av NBS på miljøet varierer på tvers av geografiske og tidsmessige skalaer. Det ble senere utviklet et rammeverk for strategisk vurdering og implementering av tilleggsfordeler ved NBS i byområder i GREEN SURGE [25,26].

Å evaluere NBS på en helhetlig måte krever et sett med vurderingskriterier og tilsvarende indikatorer som er utviklet med deltakelse fra flere fagområder og involvering av interessenter. En bred deltakelse er også gunstig for konsensus med hensyn til de valgte kriteriene og indikatorene. Dette kan oppnås ved å kombinere resultater fra flere studier. Nylig ble en samling av indikatorer for å evaluere effekten av NBS publisert som en håndbok for utøvere. Arbeidet var basert på kunnskapen fra mer enn 20 H2020-prosjekter om NBS og presenterer indikatorer for påvirkninger i de brede kategoriene "mennesker", "planet" og "velstand", samt veiledning om overvåking av NBS og hvordan man utfører konsekvensevaluering. Selv om de brede kategoriene tilsvarer de typiske dimensjonene i bærekraftsvurderinger, sosialt, miljø og økonomi, er håndboken fokusert på NBS og gir derfor ikke en systematisk metode for å sammenligne NBS med alternative løsninger som kreves i en bærekraftsvurdering av løsninger [27].

Målet med denne aktiviteten har vært å utvikle et rammeverk for helhetlig vurdering av NBS som samtidig kan brukes til og sammenligne disse med tradisjonelle løsninger.

### 8.2 Materialer og metode

Rammeverket bygger på en struktur utviklet i EU-prosjektet *TRUST* og tidligere anvendt og utviklet videre, for eksempel ved å vurdere strategiske alternativer for bærekraftig vannforvaltning i Sør-Afrika [28,29].

Vurderingen er delt i henhold til 5 dimensjoner: sosial, miljø, økonomi, forvaltning og teknisk ytelse. For hver av disse dimensjonene ble mål definert, og for hvert mål ble ett eller flere kriterier for å måle fremdriften mot målet valgt. For å muliggjøre anvendelse på en rekke NBS og omkringliggende forhold, ble flere indikatorer med detaljert beskrivelse av beregningene utviklet for kriteriene.

Den overordnede strukturen som starter med mål etterfulgt av vurderingskriterier og boring videre ned til indikatorer, gjør det mulig å knytte mål på høyt nivå med detaljerte egenskaper ved NBS. For at vurderingen skal være relevant og allment akseptert, bør interessenter være involvert i utviklingen av rammeverket både for å utvikle egnede mål og spesielt den lokale tilpasningen gjennom valg av kriterier og indikatorer og vektning av kriteriene.

En rekke workshops ble organisert for å samle interessenter fra kommuner, forskningsinstitutter og løsningsleverandører fra eksempelstudiene i prosjektene EviBAN, DRENSTEIN og Klima 2050, for å gjennomgå foreslåtte mål og vurderingskriterier med tanke på erfaringer og anbefalinger om gjeldende overvannspolitikk og aktiviteter. På grunn av Covid-19 var disse workshopene virtuelle, og en online formidlingsøvelse ved hjelp av MS Forms ble distribuert til deltakerne for å definere kriterier for å måle NBS's bidrag til fremgang mot de identifiserte målene.

I utviklingen av rammeverket for helhetsvurderingen ble følgende trinn utført:

1. Mål som overvannshåndteringstiltak bør oppnå, for å bidra til bærekraft ble diskutert med interessenter som rangerte dem etter relevans for å vurdere overvannshåndteringstiltak.
2. Målene ble sortert etter gjennomsnittlig poengsum fra interessentene og ble klassifisert etter de fem dimensjonene: Sosial (S), Miljø (M), Økonomisk (Ø), Forvaltning (F) og Teknisk (T). Denne generelle strukturen er den samme som brukes i TRUST-rammeverket, og benyttet også i andre studier [28–30].
3. For å måle fremdriften mot å nå målene ble det formulert oppfylleseskriterier for hvert mål, og indikatorer for måling av fremdrift ble foreslått.
4. Kriteriene og indikatorene ble diskutert med representanter fra leverandørene av overvannstiltakene og andre lokale interessenter for å sikre relevans for å bestemme detaljerte beregninger og datakilder, for å muliggjøre kvantifisering av indikatorverdier.
5. Indikatorverdiene ble kvantifisert ved hjelp av lokale data fra for eksempel produktdatablad for permeable dekker. Der det ikke ble funnet lokale data, ble bruk av alternative indikatorer eller nasjonal statistikk vurdert og de mest hensiktsmessige dataene valgt.

Data ble forbehandlet i henhold til analysen som ble utført. For enkel sammenligning av indikatorverdier ble normalisering basert på minimum- og maksimumverdier brukt. Videre beskrivelse av datakilder og metode som brukes til å evaluere de permeable dekken er gitt i resultatdelen.

## 8.3 Resultater

### 8.3.1 Rammeverk

Rammeverket er presentert i Tabell 10 nedenfor. Rammeverkets perspektiv er at en sluttbruker eller beslutningstaker ønsker å vurdere en NBS og sammenligne med andre løsninger. Den nødvendige informasjonen er derfor alltid relatert til en bestemt overvannsløsning. Forholdet til målene varierer imidlertid mellom hvilke typer påvirkning løsningen har. For direkte virkninger bør indikatorene gi et estimat av løsningsens direkte bidrag til å nå målet(e). For tilleggsfordeler ved løsningen vil bidraget til målet være

indirekte, og indikatorene bør gi et estimat av bidraget til målet fra tilleggsfordelene ved løsningen. For eksempel kan en direkte effekt av en løsning være reduksjon av klimagassutslipp, som kan beregnes som CO<sub>2</sub>-fotavtrykk per enhetsvolum av vann som forvaltes, se kriterium M31 og indikator M311 i Tabell 10. En tilleggsfordel med en naturbasert løsning kan være bedre muligheter for fysisk aktivitet ved løsningen, som kan vurderes av andelen av befolkningen som lever innenfor en valgt radius av løsningen som er fysisk aktiv en rekke ganger i uken, se kriterium S11 med indikator S111 i Tabell 10.

Som beskrevet under materialer og metoder, var interessenter involvert i å velge og gi vektning av kriteriene og indikatorene. Gruppering av kriterier med tilsvarende indikatorer og valg av mål ble gjort for å reflektere vanlig praksis i de ulike fagområdene og, der det er relevant, å organisere etter avstand fra løsningen ved hjelp av ulike romlige skalaer. For eksempel ble målene og grupperingen av kriterier i den sosiale dimensjonen informert av en samfunnsviter, målene og tilsvarende kriterier for den tekniske ytelsesdimensjonen er gruppert i henhold til en typisk styringsstrategi for avrenningsledelse, mens målene og kriteriene i miljødimensjonen er gruppert i henhold til romlig skala av virkningene.

Tabell 10 Rammeverk for helhetsvurdering (utdrag).

Id	Målsetning	Id	Kriterie	Id	viser	Verdi/enhet
S1	Å maksimere god helse og velvære	S11	Grad av fysiske aktiviteter i offentlig tilgjengelig areal av løsningen	S111	Andel av befolkning som bor innenfor en radius av x km fra løsningen som er fysisk aktive y ganger pr. uke	%
M1	Å ha liten negativ påvirkning på det lokale miljøet	M11	Potensial for rensing av forurenset overvann	M111	Forbedret vannkvalitet i det lokale miljøet	Skala 1-5
				M112	Renseeffekt for valgte parametere	%
		M12	Potensial for håndtering av mengden overvann	M121	Bidrar til åpen og lokal overvannshåndtering etter tretrinnstrategien	0-3
M2	Å ha liten påvirkning på miljøet i et videre geografisk området	M21	Sikre grunnvannsressurser	M211	Infiltrasjonskapasitet i original grunn	mm/t
		M25	Innvirkning på biologisk mangfold	M251	Definerte grønne og blå strukturer i bymiljøet	Skala 1-5
				M252	Funksjonelle grønne og blå strukturer i bygmiljøet	Skala 1-5

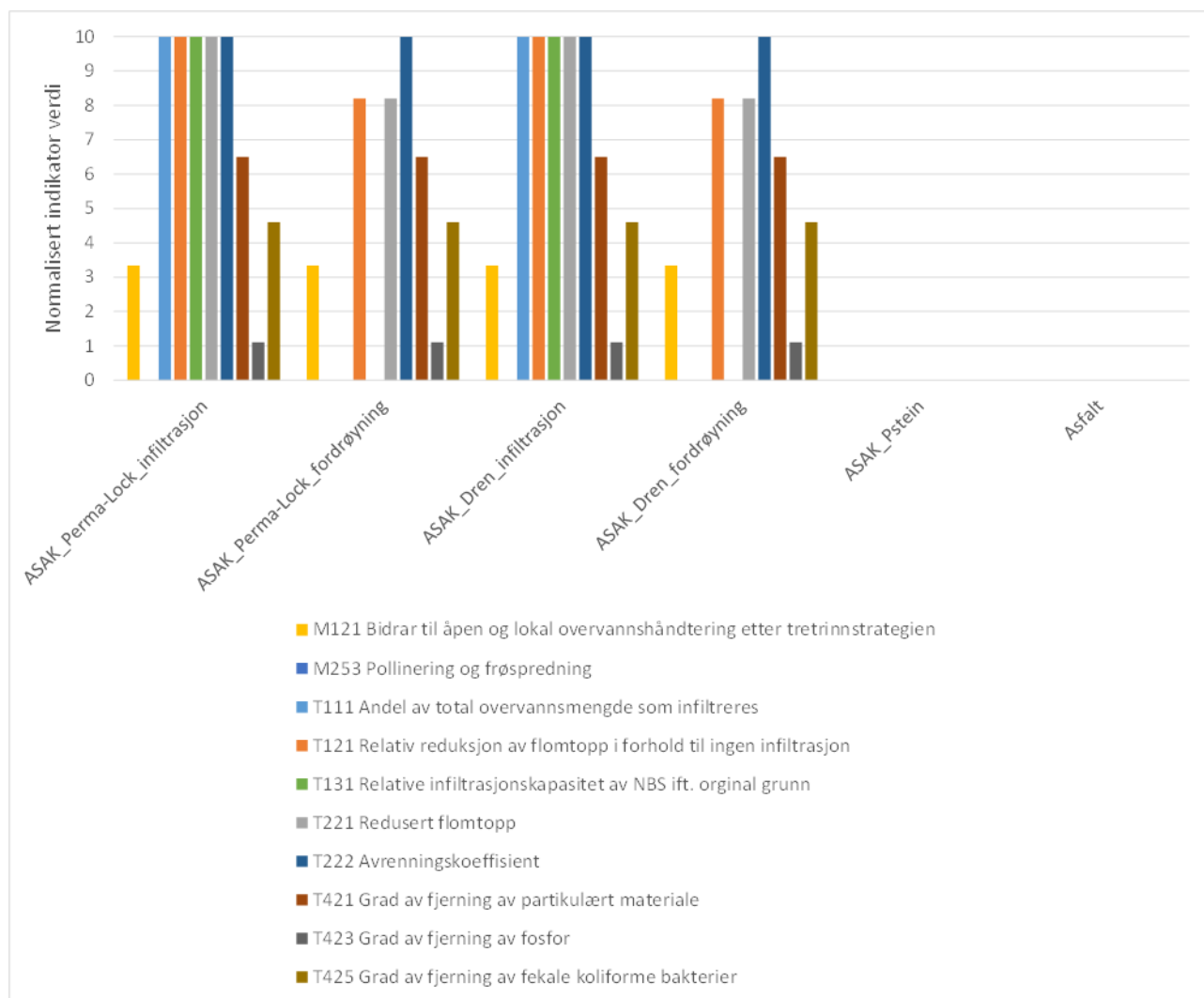
				M253	Pollinering og frøspredning	Skala 1-5
Ø1	Å være økonomisk fordelaktig for en kjøper av løsningen	Ø11	Totalkostnad	Ø111	Totalkostnad inklusive prosjektering og drift første 5 år	kr / m2 dekke
F1	Å sørge for å møte lovgivnings- og reguleringskrav	F11	Bidra til overholdelse av designkriteria og retningslinjer	F111	Oppfyllelse av krav i anbudsdocumentene (f.eks. miljø, klimatilpasning, materialkvalitet, funksjonalitet e.l.)	Skala 1-5
T1	Å infiltrere overvannet	T11	Redusere avrenningsmengden overvann	T111	Andel av totale overvans som infiltrert	%
				T112	Absolutt mengde overvann som infiltreres	m3
		T12	Redusere avrenningstoppen	T121	Relativ reduksjon av flomtopp i forhold til ingen infiltrasjon	%
				T122	Absolutt reduksjon av flomtopp i forhold til ingen infiltrasjon	m3/t
		T13	Infiltrasjon	T131	Relative infiltrasjonskapasitet av NBS ift. original grunn	%
				T132	Absolutt infiltrasjonskapasitet av NBS	m3/m2/t
T2	Å fordrøye overvannet	T21	Forsinke avrenningsmengden overvann	T211	Forsinket flomtopp	min.
				T212	Forsinket 50% av volumet (T50)	min.
				T213	Centroid-forsinkelse	min.
		T22	Forsinke avrenningstoppen	T221	Redusert flomtopp	%
				T222	Avrenningskoeffisient	-

				T223	Tid til flomtopp	min.
T3	Å lede bort overvannet på en sikker måte	T31	Redusere skadepotensialet fra overvann	T311	Avrenning i forhold til nedbør	%
				T312	Mengde overvann til ledningsnett	m <sup>3</sup> /t
		T32	Flomveier	T321	Nærhet til åpen flomvei	
				T322	Mengde overvann til flomvei	m <sup>3</sup> /t
T4	Å sikre vannkvaliteten på overvannet	T41	Vannkvalitet på avrenningen	T411	Økt vannkvalitet på avrenning	
		T42	Fjerning av utvalgte komponenter	T421	Grad av fjerning av partikulært materiale	%
				T422	Grad av fjerning av nitrogen	%
				T423	Grad av fjerning av fosfor	%
				T424	Grad av fjerning av metaller	%
				T425	Grad av fjerning av fekale koliforme bakterier	%

Rammeverket er utviklet for å dekke en rekke applikasjoner og løsninger som brukes til å håndtere avrenning. Rammeverket vil bli testet på ulike eksempelstudier for å vurdere ulik bruk av permeable dekker. Det bli gjort en sammenligning mellom NBS, inkludert permeable dekker og en tradisjonell løsning med overvann i rør.

### 8.3.2 Eksempel utvalgte indikatorer

Resultat fra vurderingen kan presenteres på ulike måter. For en enkel sammenligning kan normaliserte indikatorverdier brukes som vist i Figur 59, der data for ulike ASAK-produkter med ulike egenskaper er vist for et utvalg av indikatorer. Resultatene indikerer at løsningene med ASAK\_Perma-Lock\_Infiltrasjon og ASAK\_Dren\_Infiltrasjon har den mest ønskede ytelsen med hensyn til indikatorene som inngår i denne sammenligningen. Selv om ytelsen er lav for noen parametere, har begge produktene maksimal poengsum for indikatorene knyttet til håndtering av volumet av avrenning (T111 Andel av total overvannsmengde som infiltreres; T121 Relativ reduksjon av flomtopp i forhold til ingen infiltrasjon; T131 Relative infiltrasjonskapasitet av NBS ift. orginal grunn; T221 Redusert flomtopp; T222 Avrenningskoeffisient.



Figur 59 Eksempel på sammenligning basert på normaliserte indikatorverdier for alternative løsninger med forskjellige egenskaper for behandling av avrenning. Ulike typer permeable dekker er sammenlignet med en tradisjonell asfaltløsning. Dataene er normalisert til en skala fra 0 – 10, og en skår på 10 indikerer den beste ytelsen.

## 8.4 Konklusjon

Det er utviklet et rammeverk for å vurdere overvannsløsninger inkludert permeable dekker med hensyn på en rekke indikatorer. Rammeverket er tenkt brukt på konkrete prosjekter der man ønsker å vurdere å finne de mest bærekraftige løsningene og der verdier på indikatorene kan relateres til lokale forhold, krav og ønsker.

## 9 Forretningsmodell

*DRENSSTEIN-prosjektet ble invitert til å delta på et kurs i kommersialisering av innovasjoner i regi av Forskningsrådet. I tillegg ble prosjektet invitert til å være case for studenter som jobbet med kommersialisering i et fag ved NHH, der to studentgrupper valgte å jobbe med permeable dekker av betongstein. Både kurset og studentoppgaver var aktiviteter som ligger utenfor prosjektet, men omtales kort her for å henvise til de mer detaljerte presentasjonene og studentrapportene. Fra prosjektet var det Terje Gaarden og Edvard Sivertsen som deltok på kurset og som fulgte opp studentene.*

### 9.1 Forslag fra kurs i kommersialisering av innovasjoner

Kurset inneholdt fem samlinger med både forelesninger og gruppeoppgaver knyttet til de ulike innovasjonsprosjektene. Vi bruke altså DRENSSTEIN-prosjektet som vårt case i gruppeoppgavene og svarte på oppgavene med utgangspunkt i innovasjonen "permeable dekker med belegningsstein". Oppgavene ble presentert for de andre deltakerne enten i plenum eller i grupper (med deltakere fra 1-3 andre prosjekt/innovasjoner). Fra kurset kan vi trekke fram følgende punkter som interessante å jobbe videre med i utviklingen av permeable dekker som produkt:

- Fokuserer på kunnskapsbasert informasjon og tydelig budskap.
- Permeable dekker gir flere tilleggsverdier for kunden og bør markedsføres som et "premium"-produkt med høyere pris enn vanlig dekke.
- ASAK bør kommunisere med så mange som mulige av aktørene i de ulike fasene av et byggeprosjekt, se Figur 60, for så tidlig som mulig lansere permeable dekker som en mulig løsning på bl.a. overvannshåndtering.

Det siste punktet samfaller med de ulike sjekkpunktene foreslått for å sørge for at klimatilpasning, herunder overvannshåndtering, tas med i vurderingen så tidlig som mulig i et utbyggingsprosjekt [31].



Figur 60 Forretningsmodell diskutert i kommersialiseringskurset gjennomført våren 2019.

## 9.2 Forslag studentgruppe 1 NHH

Studentgruppe 1 benyttet DOBLINs rammeverk til å analysere forretningsmodell og potensialet til Drensstein, se Figur 61. De fokuserte særlig på profittmodellen, produkt ytelse, kommunikasjonskanaler og merkevareposisjonering og diskuterer hver av disse faktorene i noe detalj. I tillegg gjengir rapporten flere intervjuer studentene gjorde med ulike aktører i bransjen.



Figur 61 DOBLINs rammeverk (Kilde: nn<sup>2</sup>).

Studentene kommer med følgende råd:

- Det anbefales å innføre et nytt steindesign for permeable dekker for privatkundesegmentet, gjerne i forskjellige farger og gjerne med en funksjon som hindrer begroing.
- Det anbefales å vurdere en abonnementsmodell for byggefirmaer der de betaler månedlige eller årlige avgifter samtidig som de får gratis vedlikehold og reparasjon.
- Det anbefales å etablere et nytt merkevarenavn ala Drenstein og sentrere kommunikasjonen rundt dette merket med alle tilleggsfunksjonene.

## 9.3 Forslag studentgruppe 2 NHH

Studentgruppe 2 benyttet også DOBLINs rammeverk for å analysere forretningsmodell og markedsmuligheter, men lagde også en detaljert SWOT (strength-weakness-opportunity-treats)-analyse, en PESTEL (political-environmental-social-technological-economical-legal)-analyse, i tillegg til en konkurrentanalyse.

Studentene kommer med følgende råd:

- Det anbefales å fortsette utviklingen av kompetanse for å skape troverdighet og omdømme i bransjen og bli en partner som "vet hva de snakker om" innenfor overvannshåndtering.
- Det anbefales også å se løsninger der det leveres en total pakke med produksjon, planlegging, bygging og drift/vedlikehold.

<sup>2</sup> [https://www.doblin.com/dist/images/uploads/Doblin\\_TenTypesBrochure\\_Web.pdf](https://www.doblin.com/dist/images/uploads/Doblin_TenTypesBrochure_Web.pdf)

## 10 Måloppnåelse og læringspunkter

### 10.1 Måloppnåelse i henhold til prosjektsøknaden

Prosjektets hovedmål og delmål er gitt i delkapittel 1.2 og måloppnåelsen ansees som tilfredsstillende. Det kan bemerkes at det ble etablert seks felt inkludert et referansefelt med vanlig belegningsstein og ikke fire felter som opprinnelig foreslått. På grunn av forsinkelsen ved etablering av næringstomta ble testfeltet driftet i kun 18 måneder og ikke 20 måneder, i tillegg var det kun de siste 8 månedene at dekkene var i vanlig bruk. Dette har gjort det vanskelig å dokumentere langtidstendens av toppdekkets infiltrasjonskapasitet og akkumulering av forurensninger (sedimenter) i toppdekket og settelaget, men 20 måneder ville uansett vært for kort tid til å se langtidstrender. Videre har laboratorieforsøk etablert ny kunnskap om betydning av innblanding av sedimenter i fugesanden og det er etablert oppsett og prosedyrer for å teste permeable dekker i laboratoriet og i klima-laboratorium. Prosjektet har etablert bedre grunnlag for å diskutere dimensjoneringskriterier for alle typene dekker (type A, B og C) enn det som var forutsatt og det er foreslått dimensjoneringskriterier og prosjekteringsveiledning med henvisning til praktiske forhold som må hensyntas. Det er også etablert en metode for å vurdere hvor bærekraftig en overvannsløsning er basert på en helhetsvurdering. Metoden kan brukes til å sammenligne permeable dekker med tradisjonelle dekker som asfalt, men også andre overvannsløsninger kan vurderes. Metoden er utviklet i samarbeid med Water JPI-prosjektet *EviBAN*<sup>3</sup> som også er ledet av SINTEF. Her gjenstår det å gjøre en vurdering i et konkret tilfelle, noe som er planlagt i løpet av 2022.

### 10.2 De viktigste læringspunktene

De viktigste læringspunktene er delt inn i nyttig kunnskap og praktiske verktøy og resultater for aktører.

#### 10.2.1 Nyttig kunnskap

- Testfeltet fungerer godt både som testfelt, men også demonstrasjons- og besøksfelt. Det er til tider noe støy på sensorsignalene, særlig nivåsensorene og fuktbryterne, men det er målt nok hendelser til å dokumentere fordrøyningseffekten til permeable dekker type C.
- Basert på målingene på Sveberg er det dokumentert at permeable dekker type C har medianverdien for reduksjon av avrenningstoppen på 89 % og forsinkelsen av avrenningstoppen er 40 minutter. Andre indikatorer på fordrøyningen, som sentroidforsinkelse og T50-forsinkelse, hadde medianverdier på henholdsvis 45 minutter og 86 minutter.
- Fordrøyningsindikatorerne er følsomme for nedbørmengde og den opprinnelige tilstanden ved start av hendelsen. Det vil si at verdiene av indikatorerne vil kunne variere.
- To brukbare modeller for å simulere avrenning fra permeable dekker type C er kalibrert og validert med å bruke målinger fra Sveberg.
- Modellene er benyttet til å simulere langtidsserier med værdata og til å konstruere varighetskurver som viser sammenhengen mellom varighet og avrenning.

<sup>3</sup> <https://www.sintef.no/projectweb/eviban/>

- Varighetskurver er et mer robust og informativt alternativ for å demonstrere den hydrologiske ytelsen enn frittstående indikatorer basert på enkelthendelser.
- Simulering av langtidsserier med nedbørsdata for fem byer har demonstrert effekten av den nye framgangsmåten og vist effekten av sentrale variabler som infiltrasjonskapasitet, høyde på bærelaget, plassering av dreneringsrøret og diameter på dreneringsrøret.
- Mettet hydraulisk konduktivitet til settesand med gradering 2-5 mm er målt i laboratoriet og er lik 3 mm/s. Dette skulle tilsvare en infiltrasjonskapasitet til et permeabelt dekke med 12 % andel fugeareal lik 3630 l/s/ha. Dette samsvarer med litteraturverdier.
- Det er ikke oppnådd pålitelige målinger av infiltrasjonshastigheten i topplaget på de ulike feltene på Sveberg. Mest sannsynlig skyldes dette lekkasjer mellom steinene og som fører til horisontal avrenning til sidene. For å blokkere denne lekkasjen anbefales det å lime og plugge fugene mellom steinene før nye målinger utføres.
- Temperaturdata fra Sveberg har vist at temperaturen rett under belegningssteinen følger som hovedregel utetemperatur og svinger raskt, mens temperaturene målt midt i og i bunnen av underbygningen har en langsommere respons. Det er ikke målt systematisk forskjell i temperaturen mellom vanlig belegningsstein og permeabelt dekke.

### 10.2.2 Praktiske verktøy og resultater for aktører

- Testfeltet kan brukes som demonstrasjons- og besøksfelt, samt uttesting av nye produkter og/eller videre oppfølging av langtidsytelse.
- Det er foreslått en ny framgangsmåte for å vurdere og dimensjonere permeable dekker basert på vurdering av varighetskurver.
- Det er laget en prosjekteringsveileder med forenklet sjekkliste for å velge type permeabelt dekke som peker på viktige momenter som bør vurderes i en tidligfase av prosjekteringen.
- Det er utviklet en metode for å måle infiltrasjonshastigheter i topplaget.
- Det er utviklet et rammeverk for å vurdere og sammenligne ulike overvannsløsninger, inkludert permeable dekker. Rammeverket er tenkt brukt på kokrete utbyggingsprosjekt der man ønsker å vurdere å finne de mest bærekraftige løsningene basert på lokale forhold, krav og ønsker. Hensikten med rammeverket er å gjøre en så nøytral vurdering av ulike dekker som mulig og velge den løsningen som svarer til flest målsetninger og/eller krav.

## 11 Veien videre

Det er Vikaune Fabrikker som eier testfeltet og som må bestemme videre aktivitet ved testfeltet. Det er imidlertid en fordel at testfeltet brukes videre til demonstrasjons- og forskningsaktiviteter, slik at forskningsinfrastrukturen når den først er etablert gjenbrukes. Dette bør også Forskningsrådet se positivt på.

Videre engasjering av SINTEF eller NTNU krever enten direkte finansiering eller nye forskningsprosjekt gjennom Forskningsrådet, Regionale forskningsfond eller Innovasjon Norge. Det vil imidlertid være mulig å etablere masteroppgaver ved NTNU knyttet til testfeltet, der kostnadene vil være mer beskjedne og knyttet til direkte utgifter til drift og videreutvikling og timer til veiledning.

Basert på aktivitetene i prosjektet er det identifisert en del aktiviteter som det vil være interessant å jobbe videre med. Disse er sortert i to kategorier og listet under:

### Sterkt anbefalt:

- Det anbefales å gjennomgå data og bilder fra januar 2021 og fremover til dags dato. Det vil være aktuelt å se nærmere på nedbørsdata og avrenningsprofiler og sammenligne nye målinger med predikerte verdier fra modellene som er utviklet og presentert i denne rapporten. Det vil også være aktuelt å studere bilder sammen med temperaturprofiler for å studere oppførsel til feltene mot fryse/tine-sykluser.
- Det anbefales å måle infiltrasjonskapasitet til toppdekket regelmessig, helst en gang i året. Målingene bør foretas på omtrent samme sted på hvert felt hver gang. Det antas at målenøyaktigheten vil bli bedre etter som det avsettes støv mellom steinene. Disse resultatene vil danne grunnlag for en oppdatert norsk versjon av nedgang i ytelse som funksjon av driftsår (jmf. Figur 33).
- Det anbefales også å måle spordannelse ved jevne mellomrom, anslagsvis hvert tredje eller femte år for å dokumentere stabilitet og eventuelle setninger i dekkene som følge av belastning.
- Det anbefales å verifisere modellene benyttet i SWMM for utløp knyttet til dreneringsrør.
- Det anbefales å etablere aktivitet knyttet til å forstå interaksjonen mellom permeable dekker og grunnvann bedre.
- Det anbefales å oppdatere dimensjoneringsberegningene med et fremtidig klima.

### Anbefalt:

- Testfeltet kan benyttes til å gjøre stresstester av permeable dekker, ved å montere et sprinkelanlegg over anlegget. Dette var noe som ble vurdert, men ikke utført i prosjektet. Permeable dekker er ikke ment å skulle håndtere alt vann under de virkelig kraftige regnhendelsene, men det vil være interessant å få mer informasjon om hvordan de faktisk reagerer. Dette gjelder spesielt om vi faktisk klarer å fylle opp underbygningen av dekket og framprovosere overflateavrenning for type A og hva som er faktisk fordrøyning av type C.
- Testfeltet kan benyttes til å studere forurensning og eventuell akkumulering i fugemassene. Dette krever oppfølging over tid.

- Testfeltet kan benyttes til å teste nye typer stein i større skala ved å erstatte belegningssteinen i ett eller flere av feltene med ny type stein. F.eks. kan man studere effekten av ulike %-vis forhold mellom fugeareal og steinareal. Dette er imidlertid kanskje lettere å teste ut i laboratorie-enheten som er laget.

## Referanser

- [1] K. Myhr, Dimensjonering og bruk av permeable dekker med belegningsstein – En kort veiledning i bruk av permeable dekker, Byggutengrenser, Norsk Belegningsstein, n.d.
- [2] O. Lindholm, S. Endresen, S. Thorolfson, S. Sægrov, G. Jakobsen, L. Aaby, Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering, 2008.
- [3] E.M.H. Abdalla, I. Selseth, T.M. Muthanna, H. Helness, K. Alfredsen, T. Gaarden, E. Sivertsen, Hydrological performance of lined permeable pavements in Norway, *Blue-Green Syst.* (2021). <https://doi.org/10.2166/bgs.2021.009>.
- [4] H. Jensen, Winter operations of permeable interlocking concrete pavement, Master thesis, NTNU, 2020.
- [5] S. Borgwardt, In-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement - new results, ICCBP. (2015) 1–15.
- [6] J.H. Trandem, Testing of Infiltration System for Stormwater - Permeable Pavement, Master thesis, NTNU, n.d.
- [7] F. Boogaard, T. Lucke, Long-Term Infiltration Performance Evaluation of Dutch Permeable Pavements Using the Full-Scale Infiltration Method, *Water*. 11 (2019). <https://doi.org/10.3390/w11020320>.
- [8] W.R. Selbig, N. Buer, Hydraulic, water-quality, and temperature performance of three types of permeable pavement under high sediment loading conditions, Reston, VA, 2018. <https://doi.org/10.3133/sir20185037>.
- [9] E. Sivertsen, S. Bruaset, H.M.L. Kvitsand, K. Azrague, K. Azrague, E. Sivertsen, Overvann fra veg. Praksis, status og problemstillinger for vegeier Temasamling | Water treatment requirements for stormwater and road run-off, SINTEF Community, 2020. <https://hdl.handle.net/11250/2675719>.
- [10] C. Monrabal-Martinez, J. Aberle, T.M. Muthanna, M. Orts-Zamorano, Hydrological benefits of filtering swales for metal removal, *Water Res.* 145 (2018) 509–517. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.08.051>.
- [11] C. Monrabal-Martinez, T. Meyn, T.M. Muthanna, Characterization and temporal variation of urban runoff in a cold climate - design implications for SuDS, *Urban Water J.* 16 (2019) 451–459. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1536758>.
- [12] A. Müller, H. Österlund, J. Marsalek, M. Viklander, The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources, *Sci. Total Environ.* 709 (2020) 136125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136125>.
- [13] E. Sivertsen, G.S. Raspati, M. Barrio, S. Bruaset, K. Azrague, E. Sivertsen, E. Sandberg, K. Fjellheim, J. Solli, E.-B. Strømø, S. Lilledal, S.-A. Andreassen, B. Time, Forurenset overvann. En litteraturstudie Indikatorer for måling av klimatilpassing av arealer, bygninger og infrastruktur i kommuner. Anvising og rammeverk, SINTEF akademisk forlag, 2021. <https://hdl.handle.net/11250/2832992>.
- [14] A. Booth, A. Sutton, D. Papaioannou, *Systematic Approaches to a Successful Literature Review*, SAGE Publications, 2016. <https://books.google.no/books?id=JD1DCgAAQBAJ>.
- [15] M. Petticrew, H. Roberts, *Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide*, Wiley, 2008. [https://books.google.no/books?id=ZwZ1\\_xU3E80C](https://books.google.no/books?id=ZwZ1_xU3E80C).
- [16] D.J. Fairbairn, S.M. Elliott, R.L. Kiesling, H.L. Schoenfuss, M.L. Ferrey, B.M. Westerhoff, Contaminants of emerging concern in urban stormwater: Spatiotemporal patterns and removal by iron-enhanced sand filters (IESFs), *Water Res.* 145 (2018) 332–345. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.08.020>.
- [17] Statens Vegvesen, Sustainable design and maintenance of stormwater treatment facilities, Statens vegvesens rapporter nr. 166, Statens vegvesens rapporter nr. 166, 2018.
- [18] A.J. Erickson, V.J. Taguchi, J.S. Gulliver, The challenge of maintaining stormwater control measures: A synthesis of recent research and practitioner experience, *Sustain. Switz.* 10 (2018). <https://doi.org/10.3390/su10103666>.

- [19] A.S. Braswell, A.R. Anderson, W.F. Hunt III, Hydrologic and water quality evaluation of a permeable pavement and biofiltration device in series, *Water Switz.* 10 (2018). <https://doi.org/10.3390/w10010033>.
- [20] Z. Yu, H. Gan, M. Xiao, B. Huang, D.Z. Zhu, Z. Zhang, H. Wang, Y. Lin, Y. Hou, S. Peng, W. Zhang, Performance of permeable pavement systems on stormwater permeability and pollutant removal, *Environ. Sci. Pollut. Res.* (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12525-5>.
- [21] Q. Yang, S. Beecham, J. Liu, D. Pezzaniti, The influence of rainfall intensity and duration on sediment pathways and subsequent clogging in permeable pavements, *J. Environ. Manage.* 246 (2019) 730–736. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.151>.
- [22] J. Huang, C. Valeo, J. He, A. Chu, The Influence of Design Parameters on Stormwater Pollutant Removal in Permeable Pavements, *Water. Air. Soil Pollut.* 227 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3020-y>.
- [23] R.J. Winston, K.M. Davidson-Bennett, K.M. Buccier, W.F. Hunt, Seasonal Variability in Stormwater Quality Treatment of Permeable Pavements Situated over Heavy Clay and in a Cold Climate, *Water. Air. Soil Pollut.* 227 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2839-6>.
- [24] J.R. Vogel, T.L. Moore, Urban stormwater characterization, control, and treatment, *Water Environ. Res.* 88 (2016) 1918–1950. <https://doi.org/10.2175/106143016X14696400495938>.
- [25] European Commission, Directorate-General for Environment, Mapping and assessment of ecosystems and their services : an analytical framework for ecosystem assessments under action 5 of the EU biodiversity strategy to 2020 : discussion paper – final, April 2013, Publications Office, 2014. <https://doi.org/10.2779/22870>.
- [26] C.M. Raymond, N. Frantzeskaki, N. Kabisch, P. Berry, M. Breil, M.R. Nita, D. Geneletti, C. Calfapietra, A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas, *Environ. Sci. Policy.* 77 (2017) 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.07.008>.
- [27] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Evaluating the impact of nature-based solutions : a handbook for practitioners, Publications Office, 2021. <https://doi.org/10.2777/244577>.
- [28] H. Alegre, E. Cabrerea, A. Hein, H. Brattebø, Framework for Sustainability Assessment of UWCS and development of a self-assessment tool, EU-TRUST, 2012. [www.trust-i.net](http://www.trust-i.net).
- [29] H. Helness, S. Damman, W.P. de Clercq, N.M. Elema, A Framework for Integrated Sustainability Assessment of Water Cycle Services, *Eur. J. Sustain. Dev.* 6 (2017) 1. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2017.v6n4p1>.
- [30] C.J. van Leeuwen, City Blueprints: Baseline Assessments of Sustainable Water Management in 11 Cities of the Future, *Water Resour. Manag.* 27 (2013) 5191–5206. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0462-5>.
- [31] E. Sivertsen, K. Elvebakk, T. Kvande, B. Time, Klimatilpasset bygning. Anvisning for anskaffelse i plan- og byggeprosessen, SINTEF Byggforsk, 2019. <http://hdl.handle.net/11250/2621310>.

## A Kalibreringsdata V-profil (fra produsent)

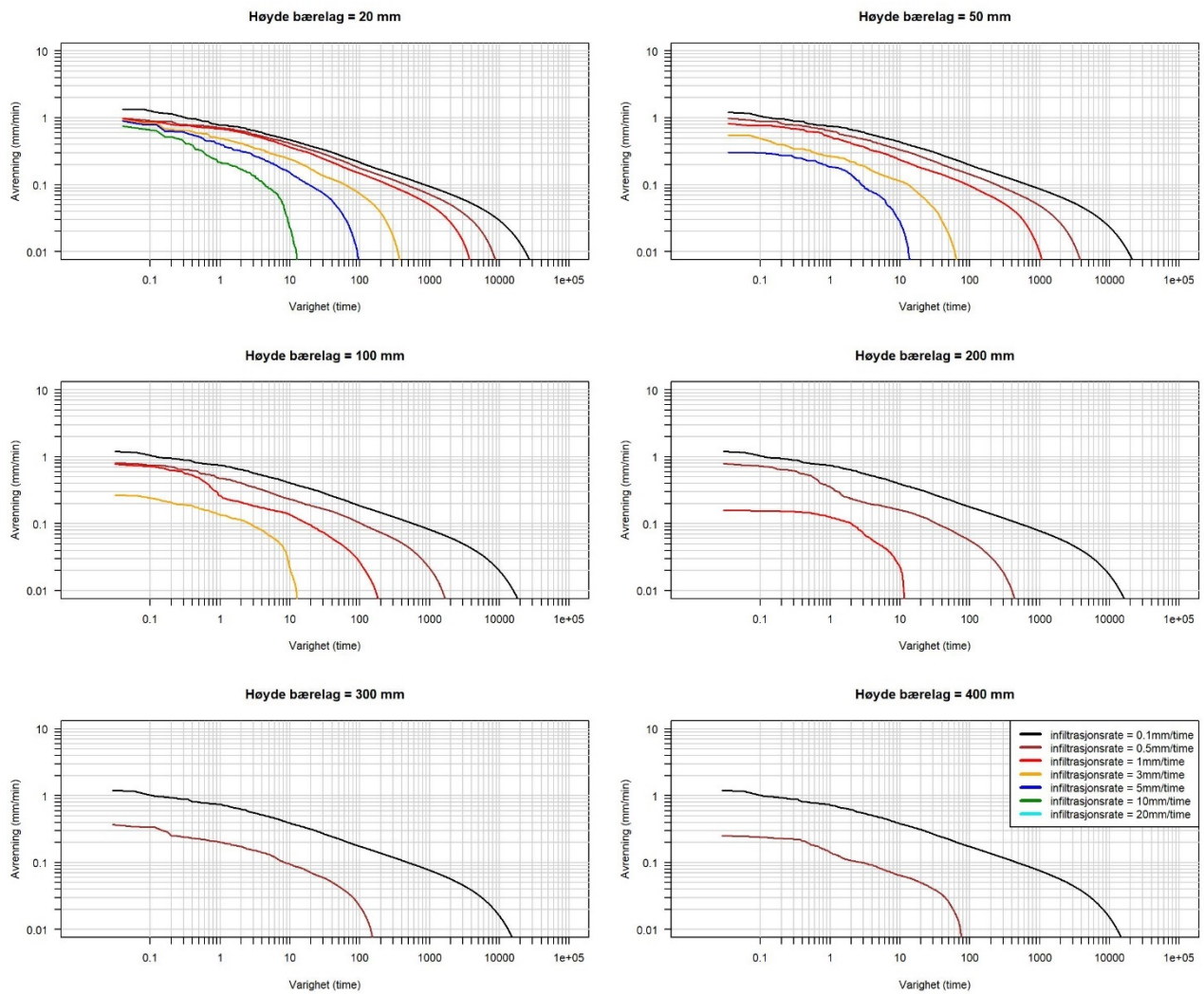
Høyde over spissen i V-profilet (mm)	Avrenning (l/s)
0	0
5	0.0025
7	0.005
9	0.0114
11	0.0203
13	0.0322
15	0.0466
17	0.0639
19	0.0839
21	0.1069
23	0.1328
25	0.1616
27	0.2055
29	0.2398
31	0.3198
33	0.4049
35	0.4946
37	0.5897
39	0.6891
41	0.7934
43	0.902
45	1.015
47	1.1329
49	1.2547
51	1.3808
53	1.5109
55	1.645
57	1.7834
59	1.9254
61	2.0712
63	2.2206
65	2.3735
67	2.5303
69	2.6902
71	2.8536
73	3.0201
75	3.1897
77	3.3627
79	3.5384
81	3.7171
83	3.8985
85	4.0825

87	4.2695
89	4.4588
91	4.6506
93	4.8447
95	5.041
97	5.2399
99	5.4405

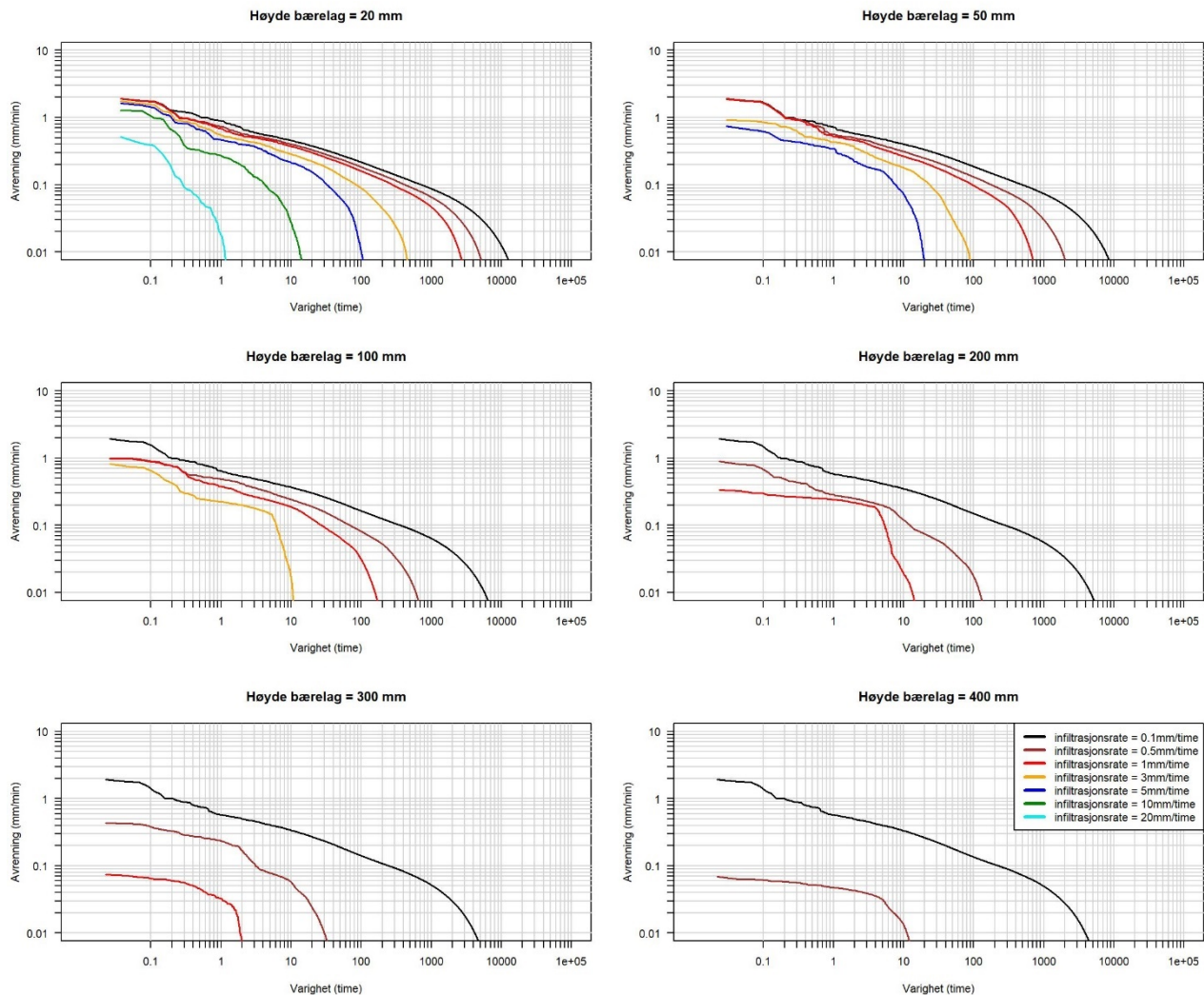
---

## B Varighetskurver permeable dekker type A

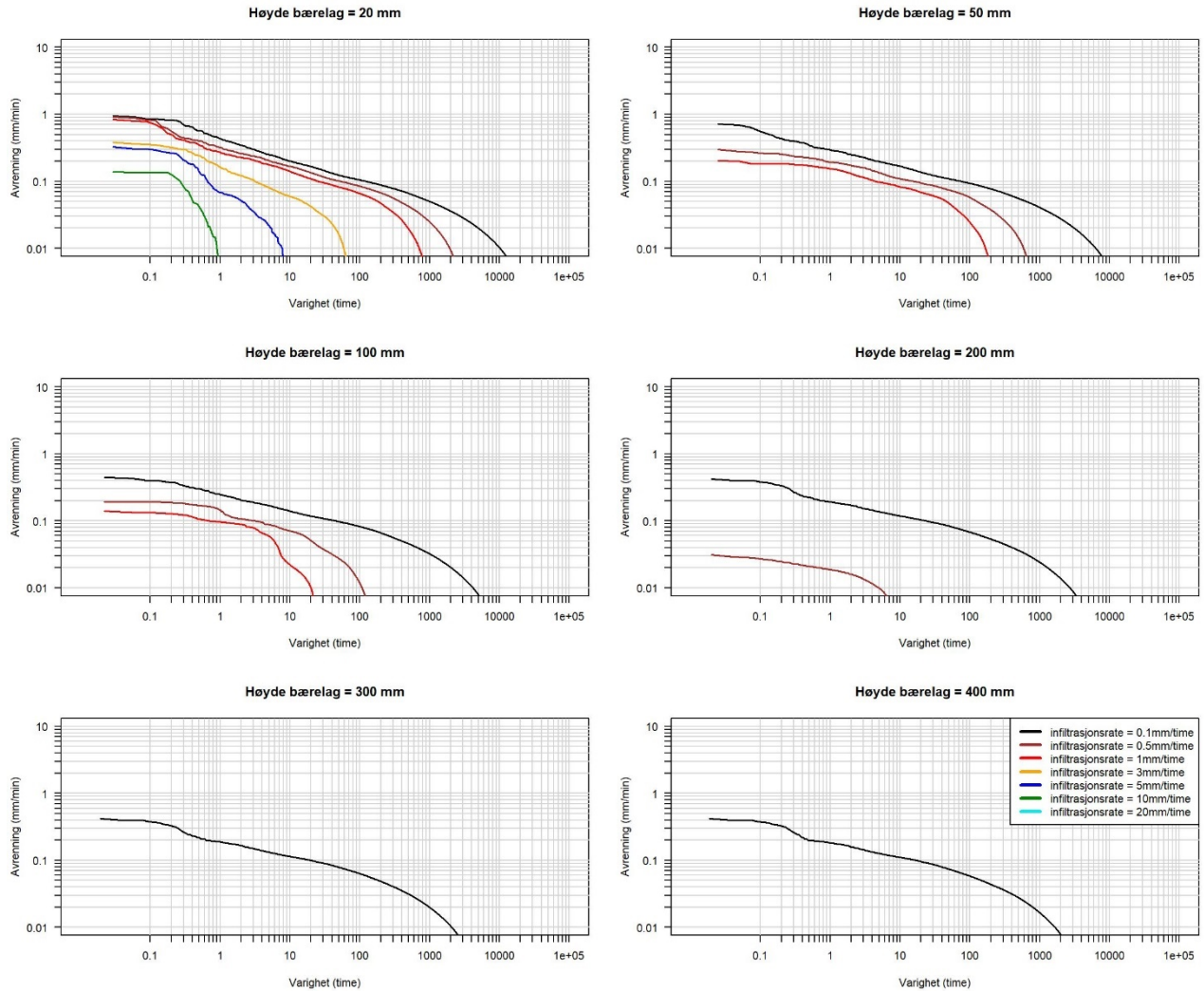
### B.1 Bergen



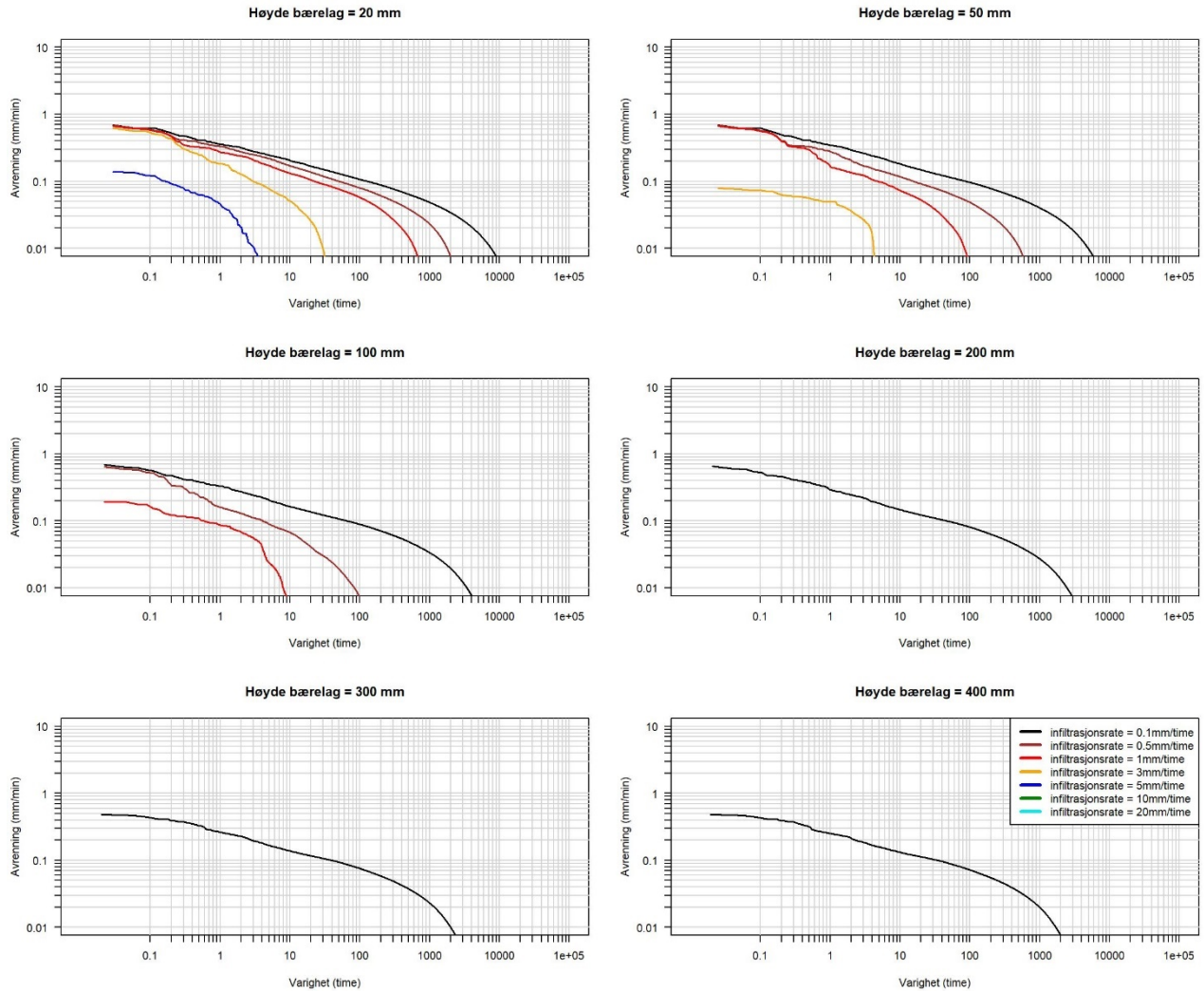
## B.2 Kristiansand



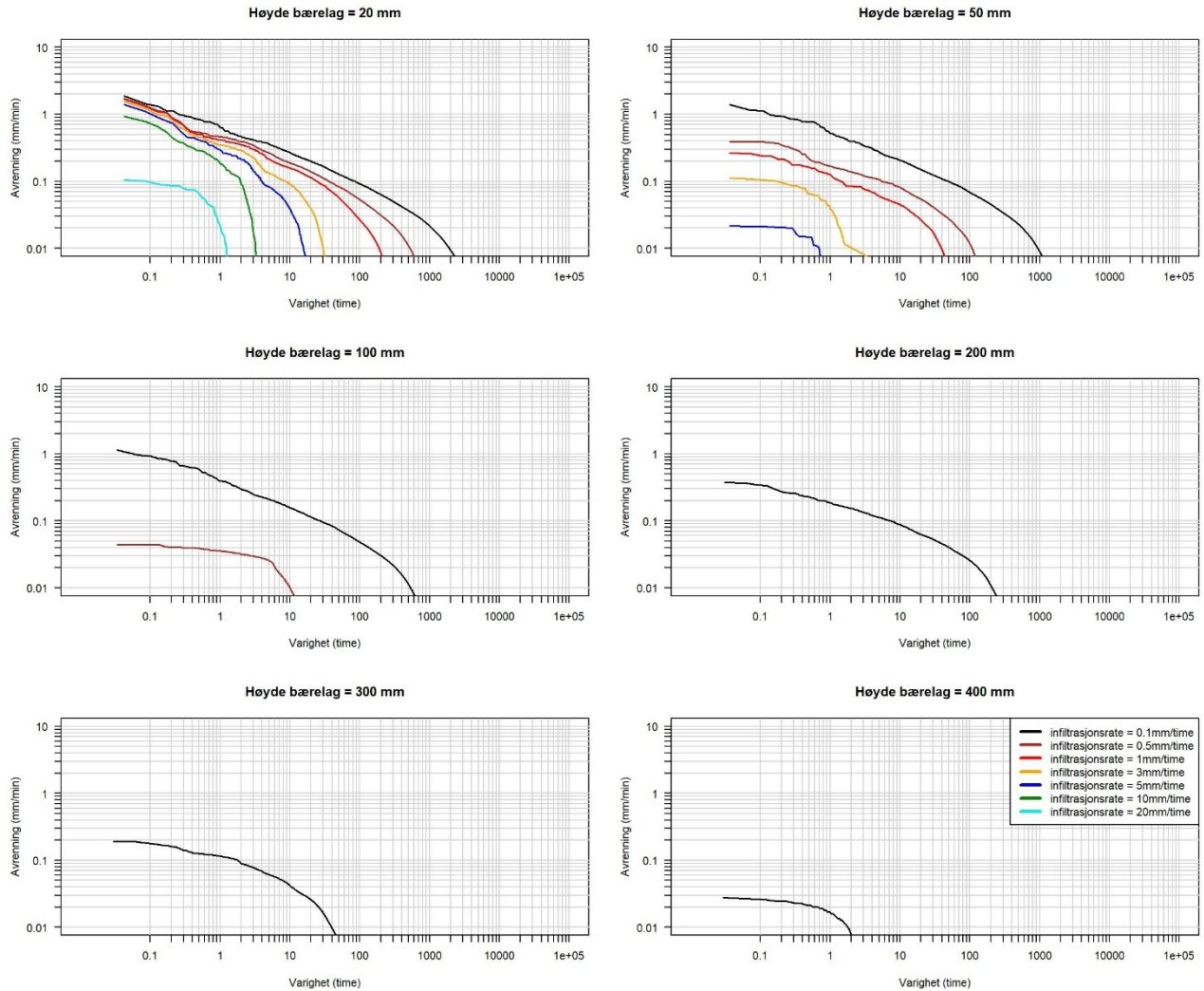
## B.3 Trondheim



## B.4 Bodø



## B.5 Hamar

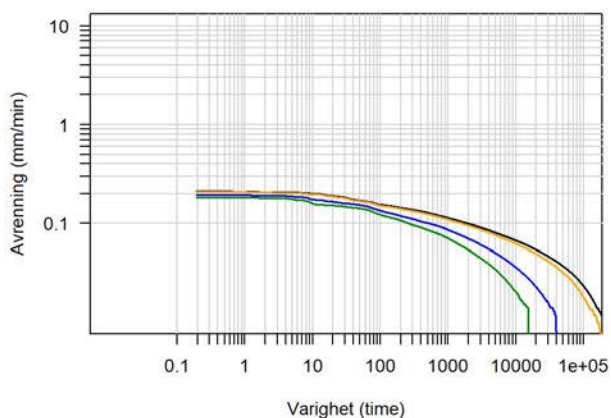


## C Varighetskurver permeable dekker type B

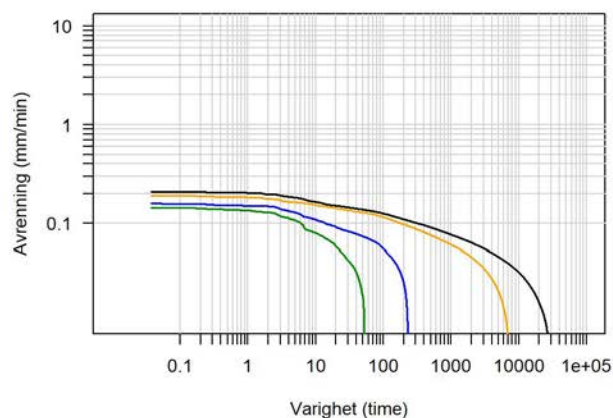
### C.1 Bergen

#### C.1.1 Avrenning drenering med bærelag lik 100 mm

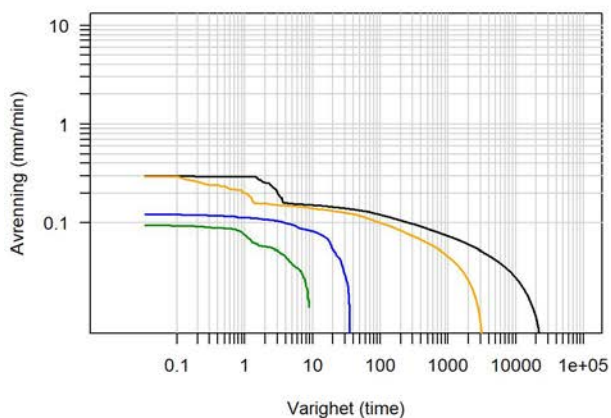
Dreneringsrør plassering: Bunn



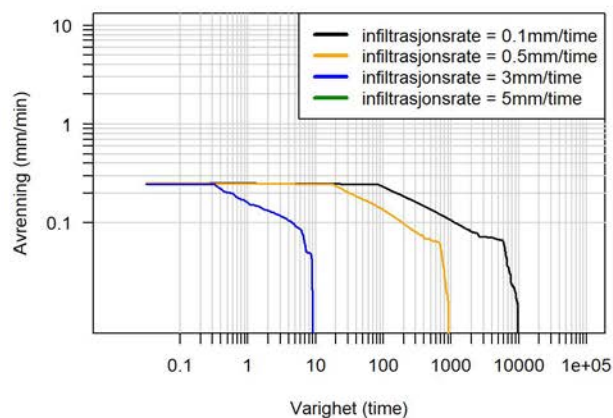
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2

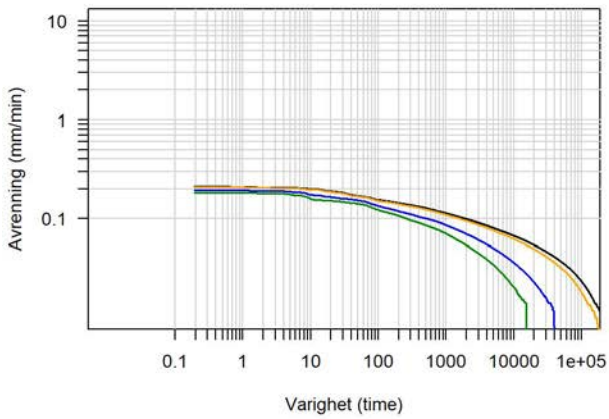


Dreneringsrør plassering: Topp

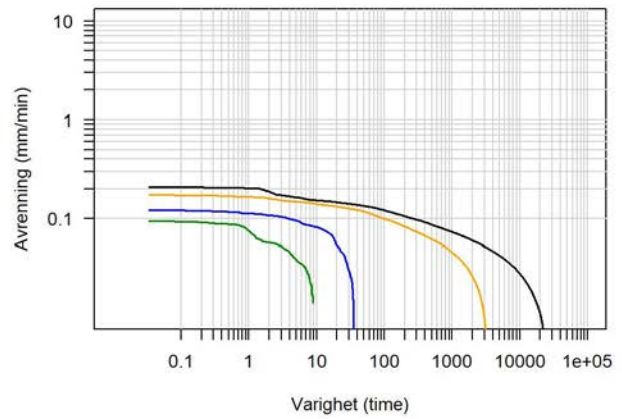


## C.1.2 Avrenning drenering med bærelag lik 200 mm

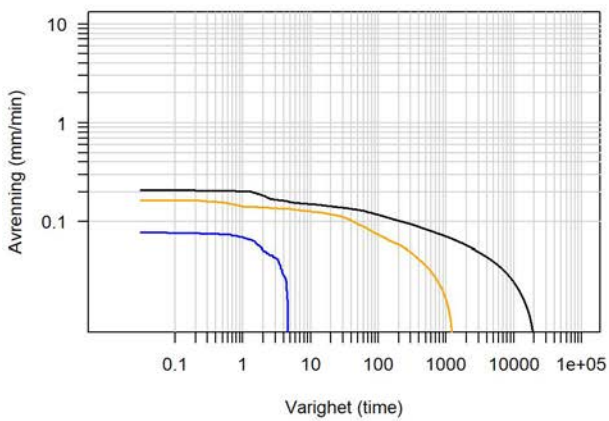
Dreneringsrør plassering: Bunn



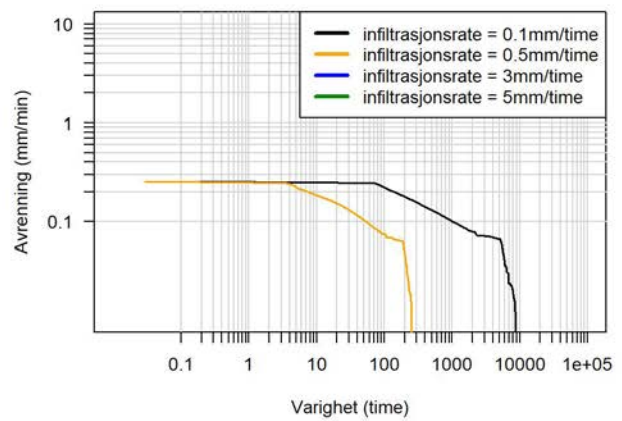
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2

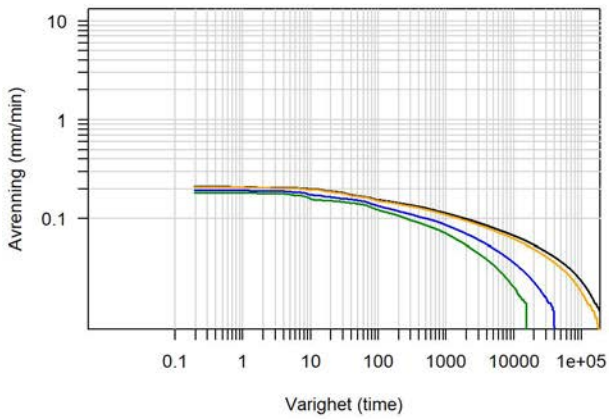


Dreneringsrør plassering: Topp

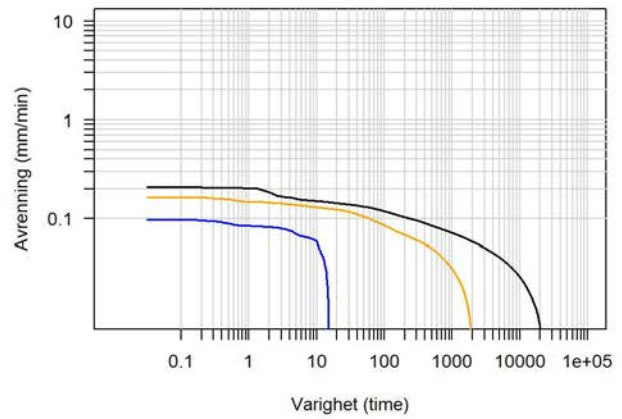


### C.1.3 Avrenning drenering med bærelag lik 300 mm

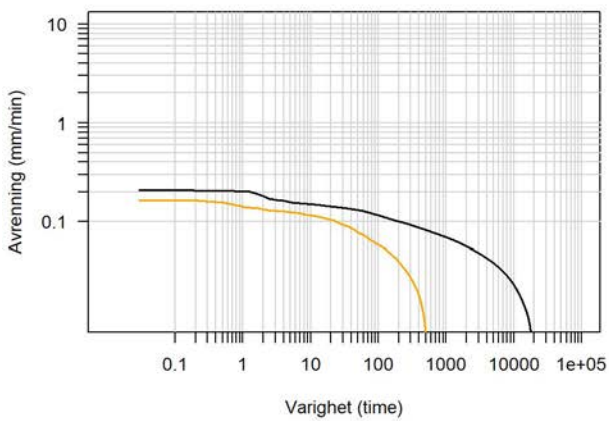
Dreneringsrør plassering: Bunn



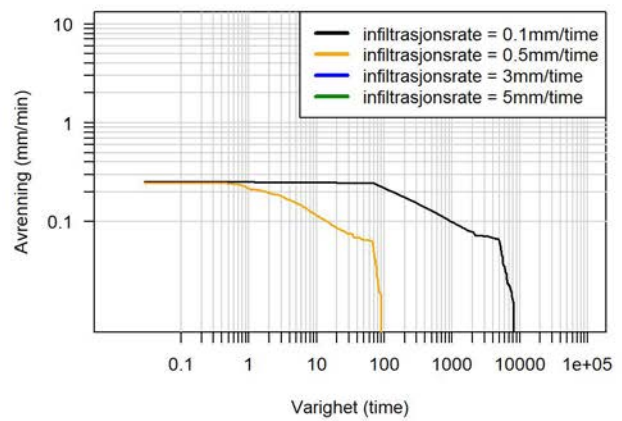
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2

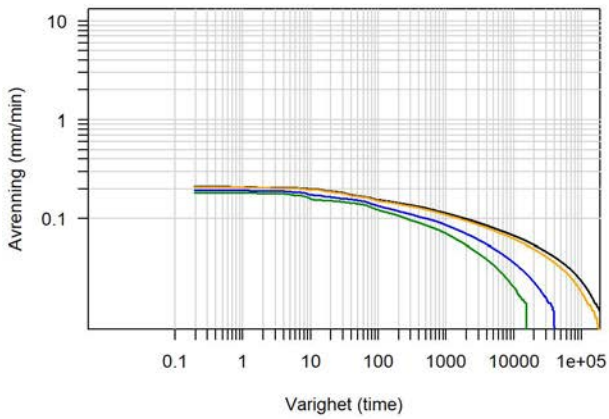


Dreneringsrør plassering: Topp

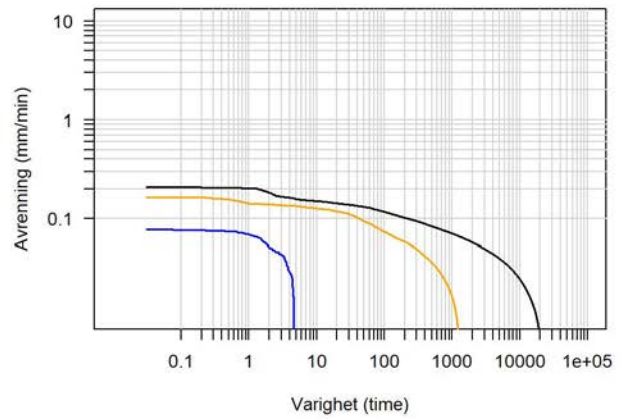


### C.1.4 Avrenning drenering med bærelag lik 400 mm

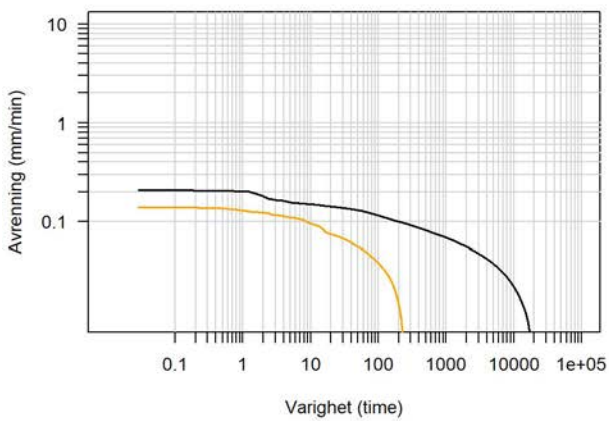
Dreneringsrør plassering: Bunn



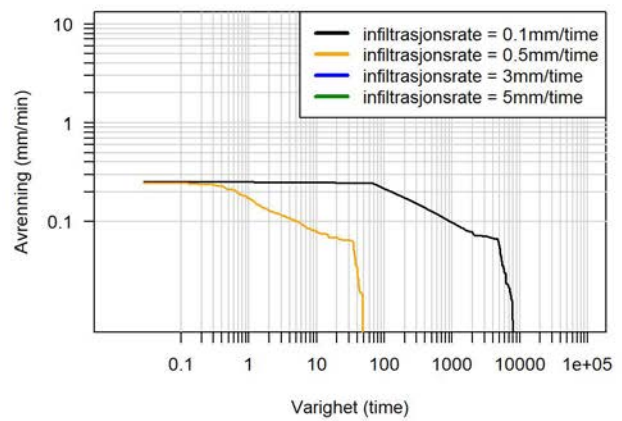
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2



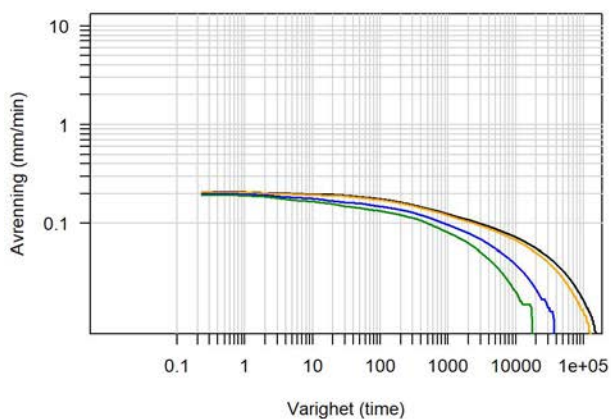
Dreneringsrør plassering: Topp



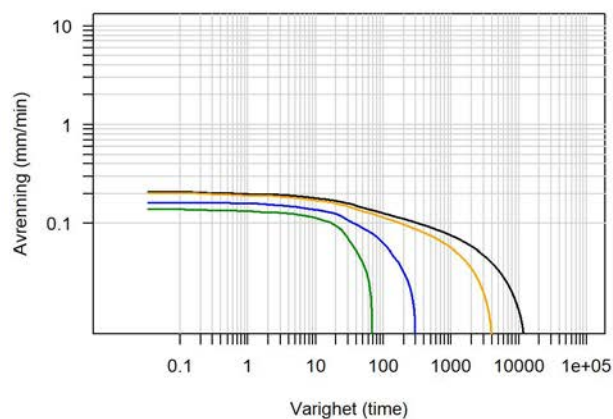
## C.2 Kristiansand

### C.2.1 Avrenning drenering med bærelag lik 100 mm

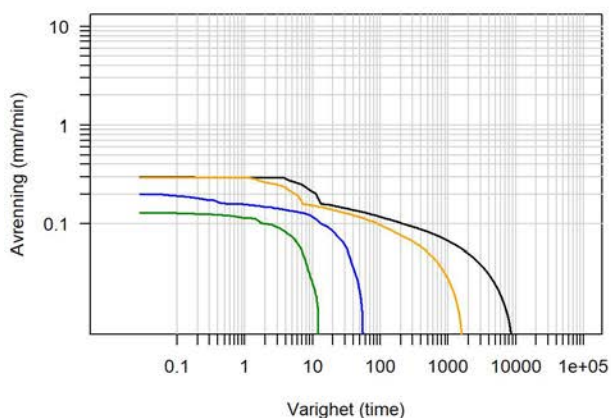
Dreneringsrør plassering: Bunn



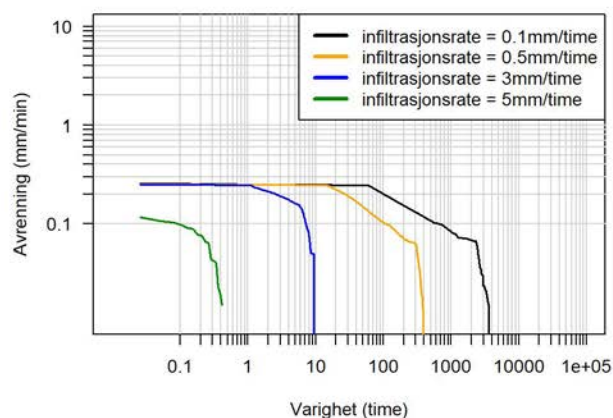
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2

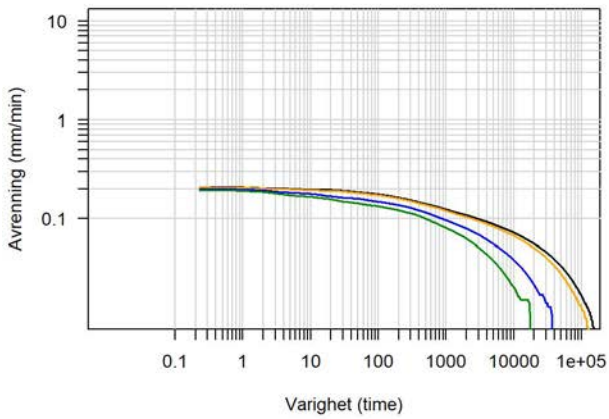


Dreneringsrør plassering: Topp

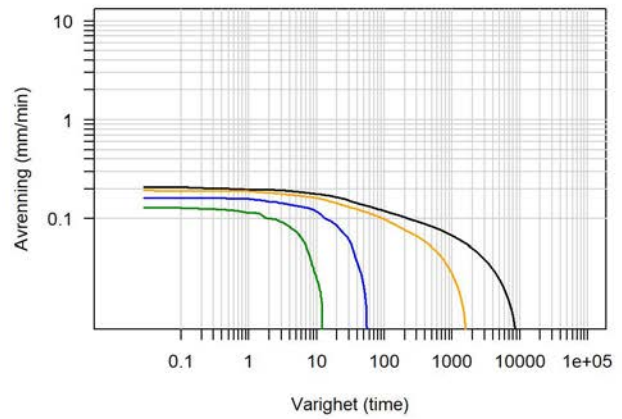


## C.2.2 Avrenning drenering med bærelag lik 200 mm

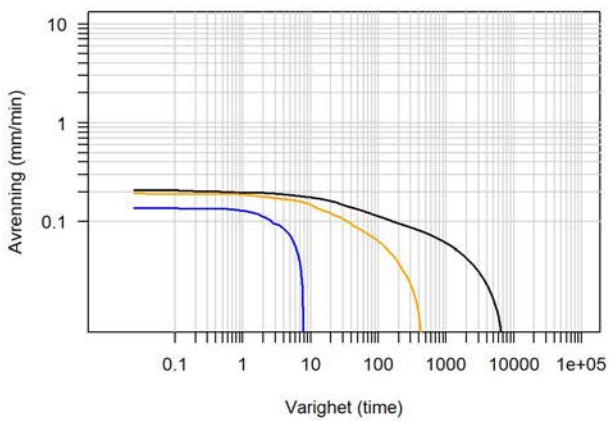
Dreneringsrør plassering: Bunn



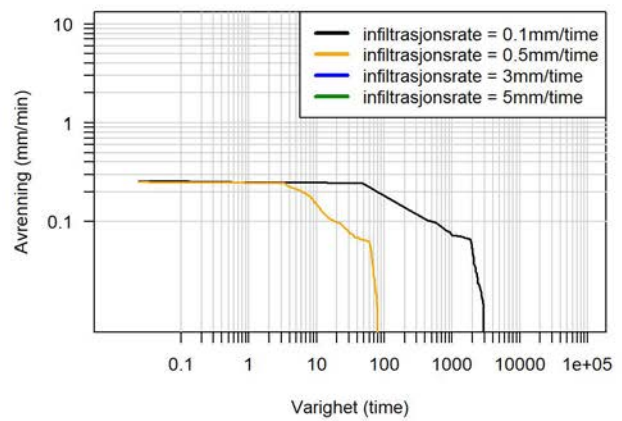
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2

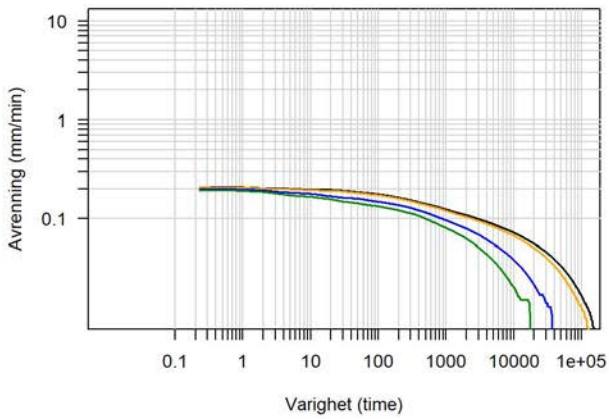


Dreneringsrør plassering: Topp

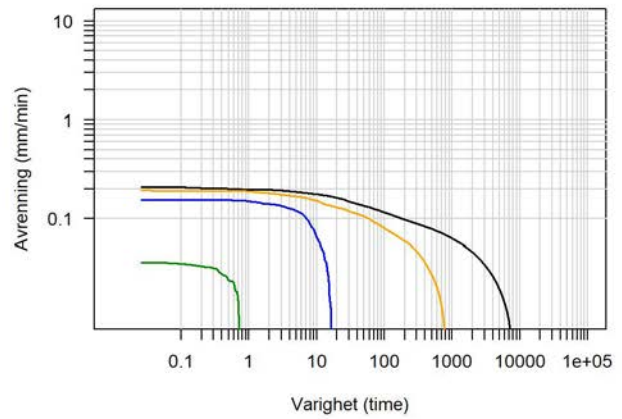


### C.2.3 Avrenning drenering med bærelag lik 300 mm

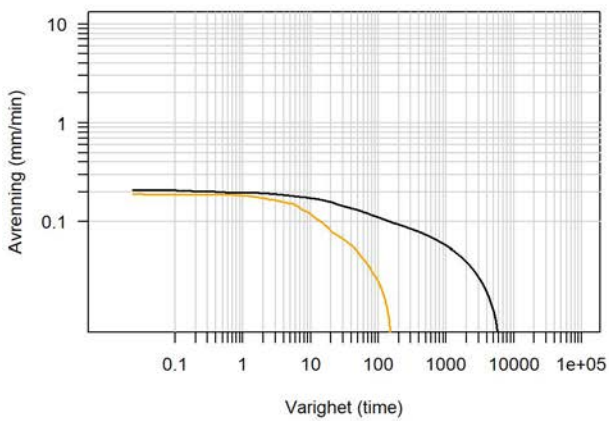
Dreneringsrør plassering: Bunn



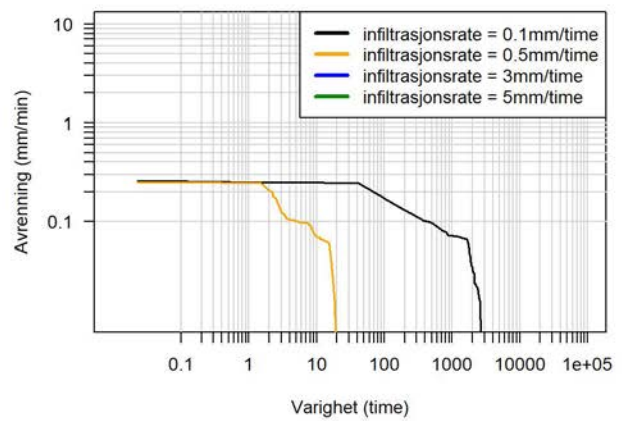
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2

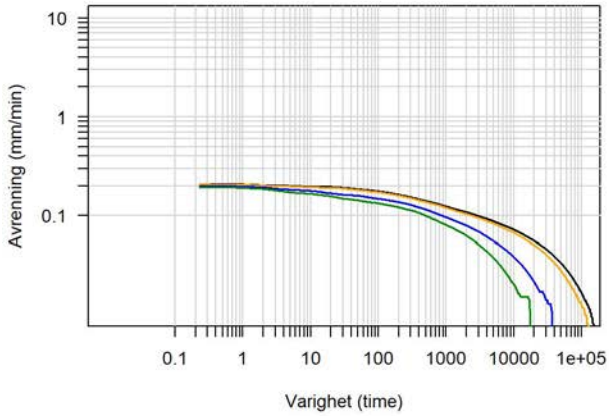


Dreneringsrør plassering: Topp

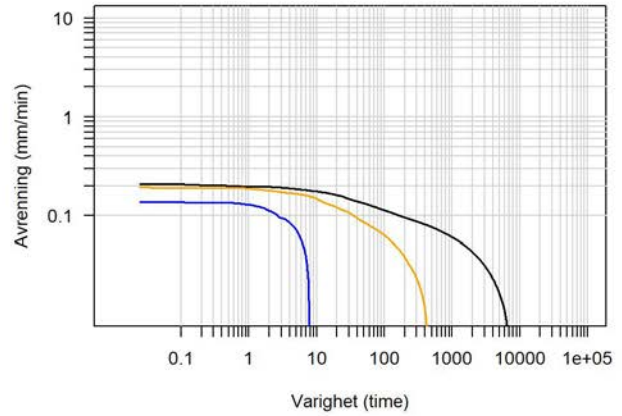


## C.2.4 Avrenning drenering med bærelag lik 400 mm

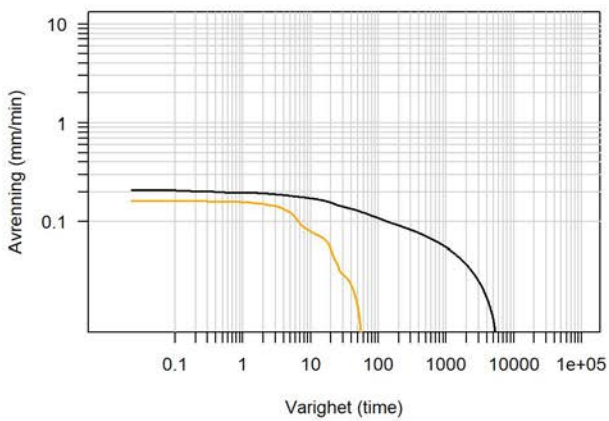
Dreneringsrør plassering: Bunn



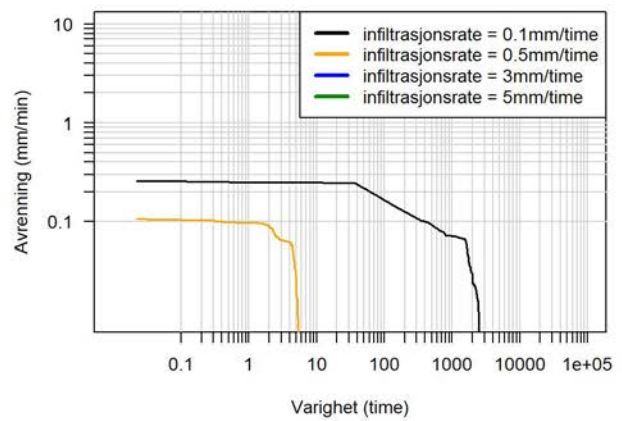
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2



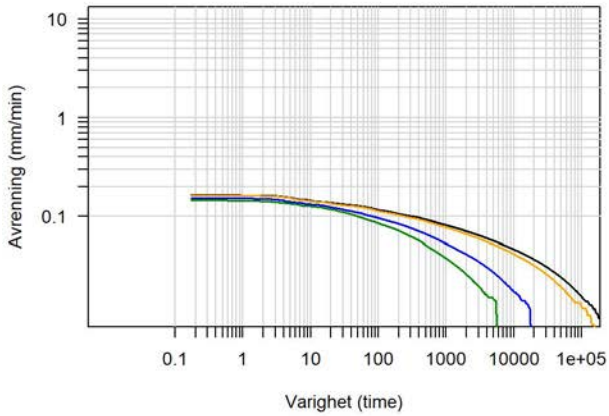
Dreneringsrør plassering: Topp



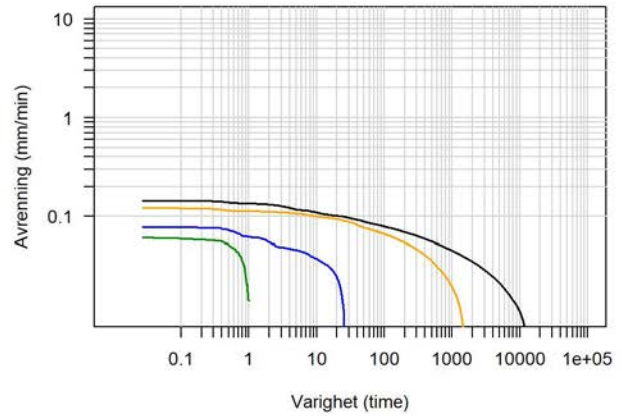
### C.3 Trondheim

#### C.3.1 Avrenning drenering med bærelag lik 100 mm

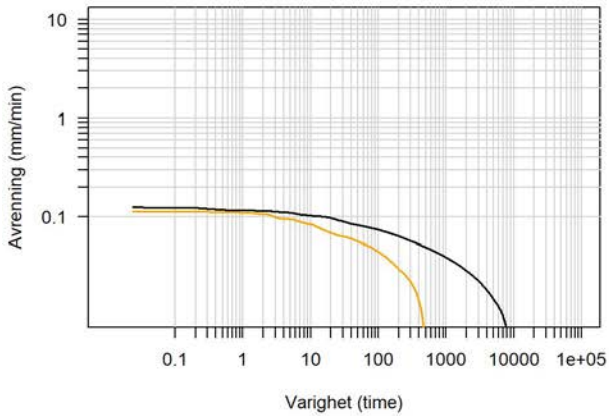
Dreneringsrør plassering: Bunn



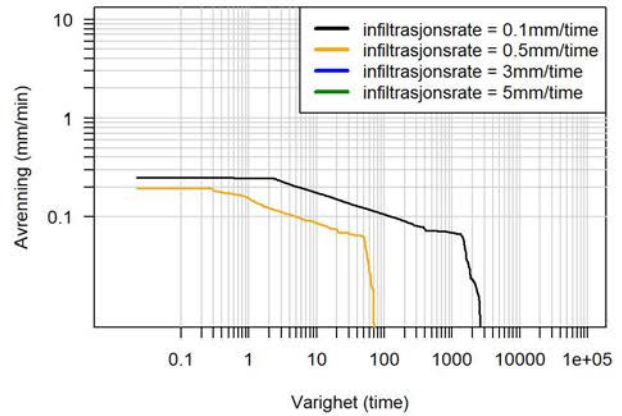
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2

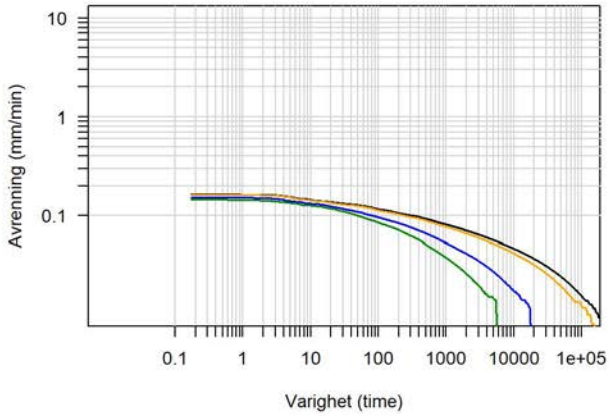


Dreneringsrør plassering: Topp

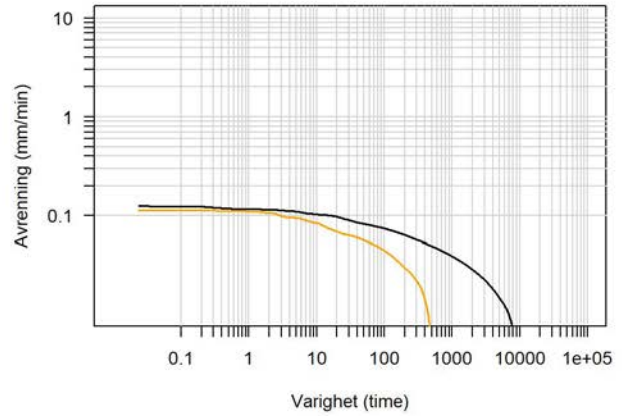


### C.3.2 Avrenning drenering med bærelag lik 200 mm

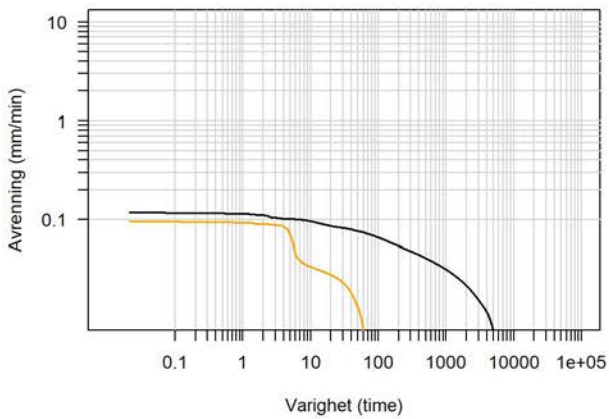
Dreneringsrør plassering: Bunn



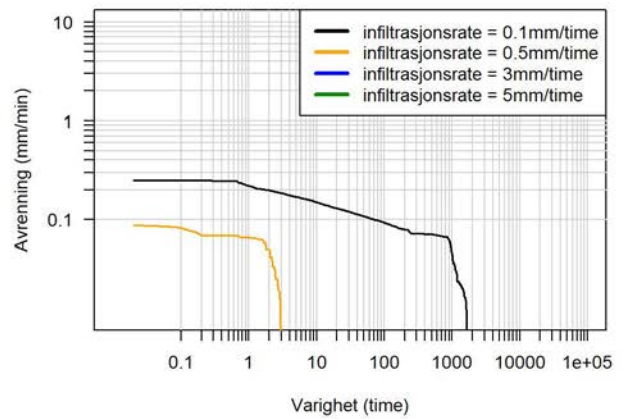
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2

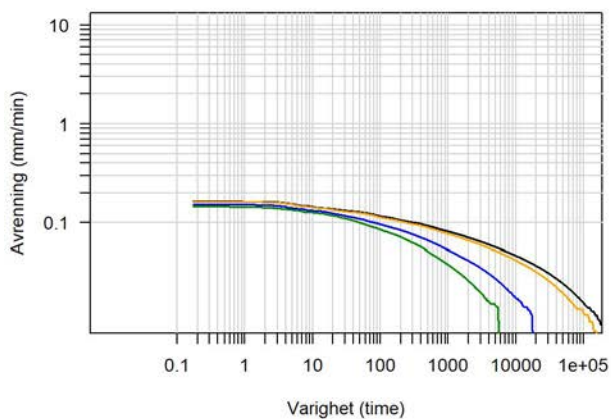


Dreneringsrør plassering: Topp

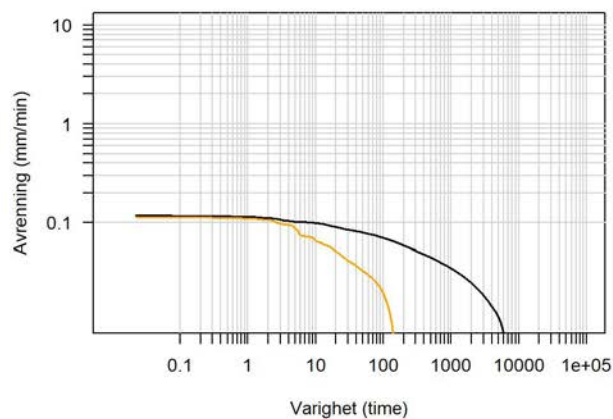


### C.3.3 Avrenning drenering med bærelag lik 300 mm

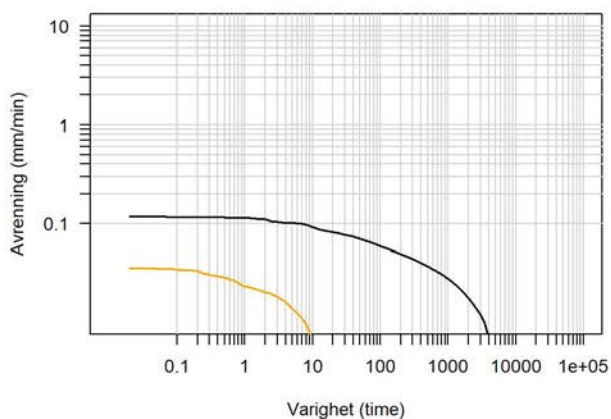
Dreneringsrør plassering: Bunn



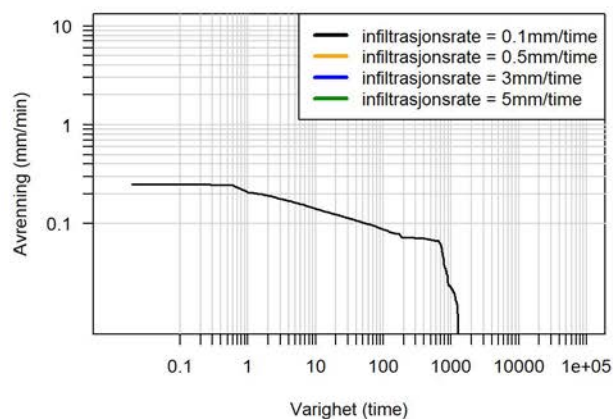
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2

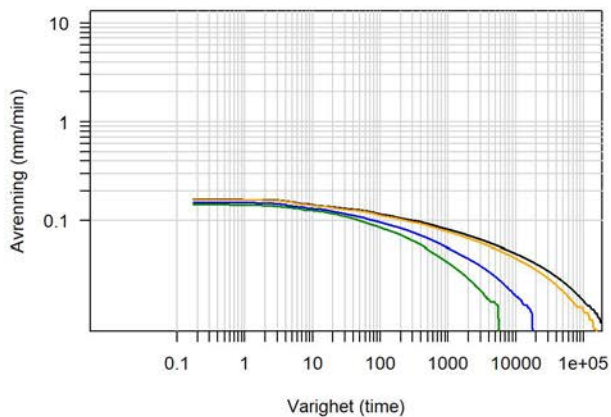


Dreneringsrør plassering: Topp

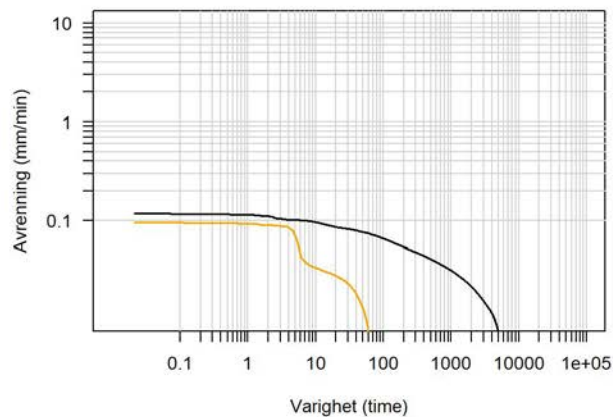


### C.3.4 Avrenning drenering med bærelag lik 400 mm

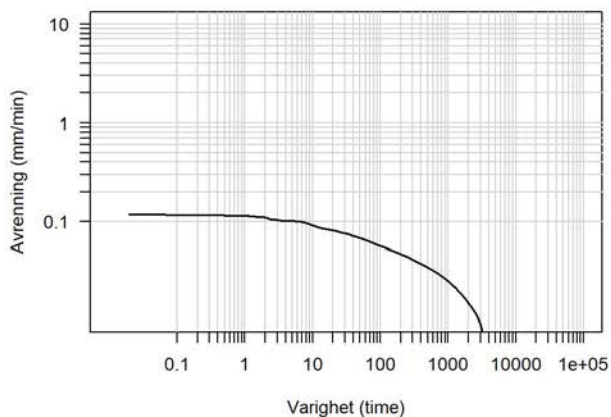
Dreneringsrør plassering: Bunn



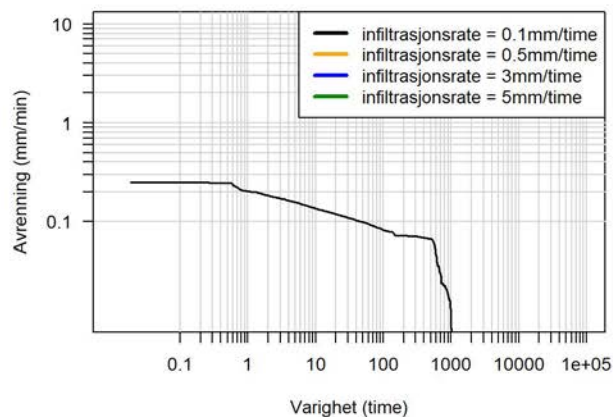
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2



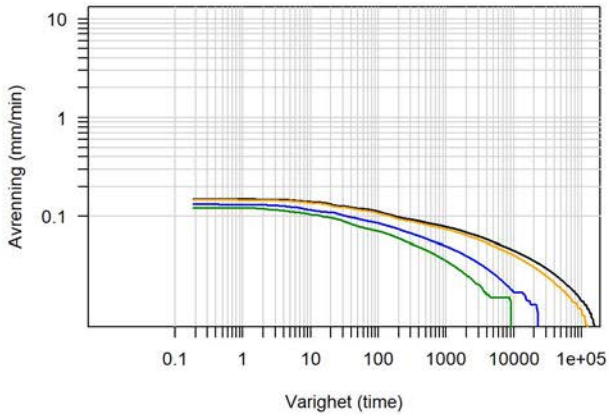
Dreneringsrør plassering: Topp



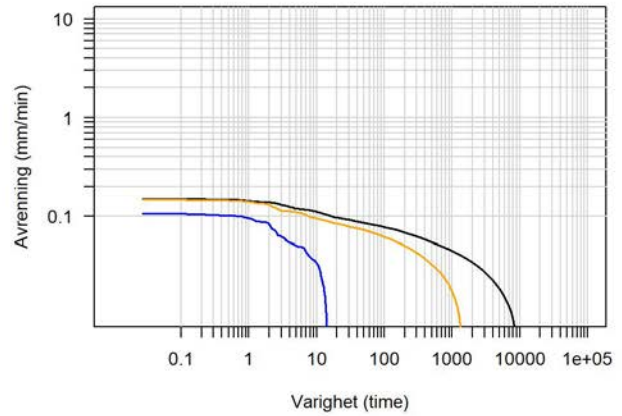
## C.4 Bodø

### C.4.1 Avrenning drenering med bærelag lik 100 mm

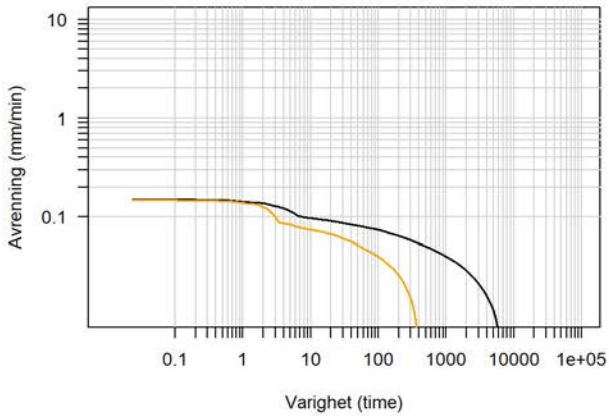
Dreneringsrør plassering: Bunn



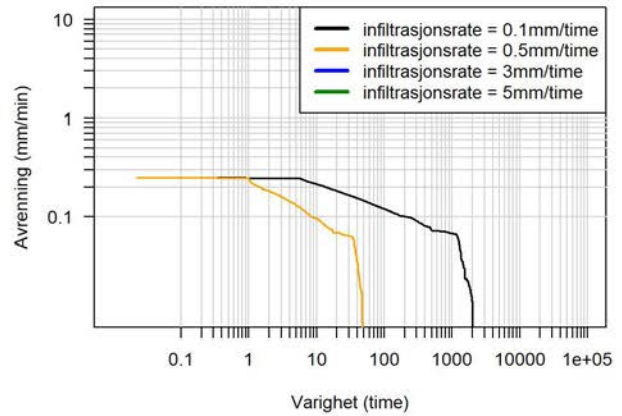
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2

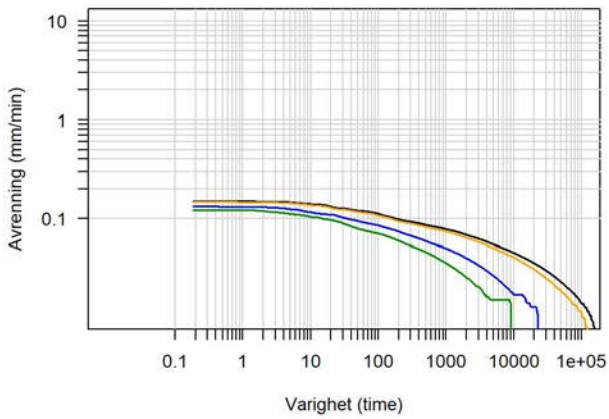


Dreneringsrør plassering: Topp

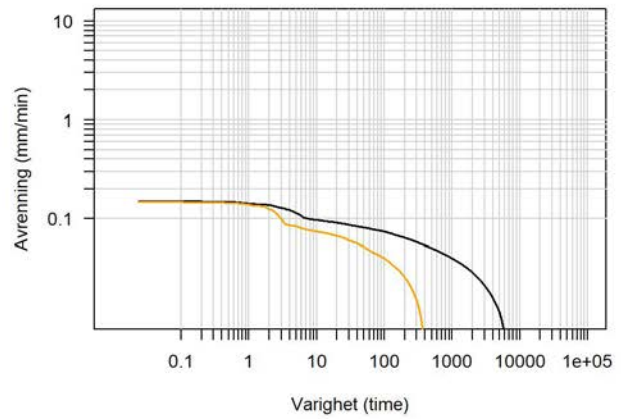


## C.4.2 Avrenning drenering med bærelag lik 200 mm

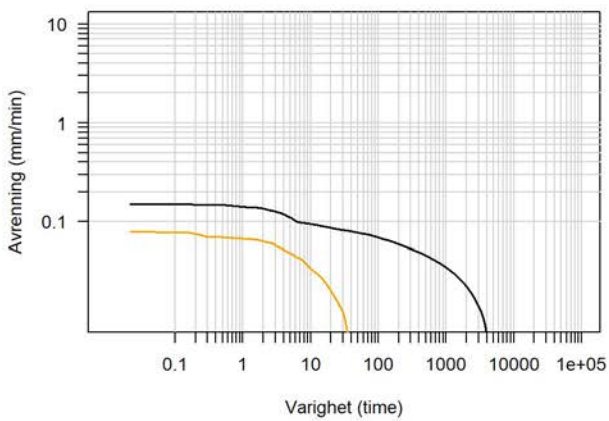
Dreneringsrør plassering: Bunn



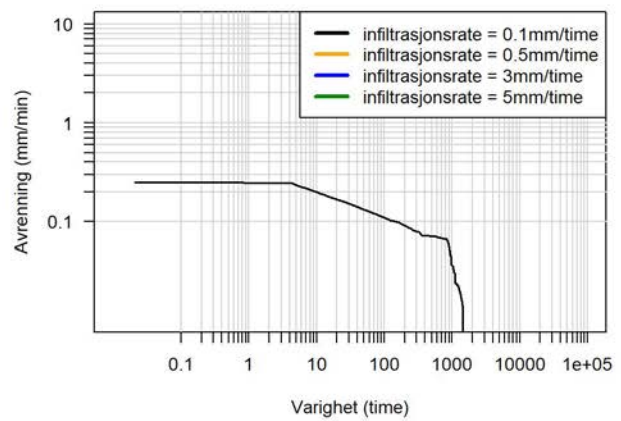
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2

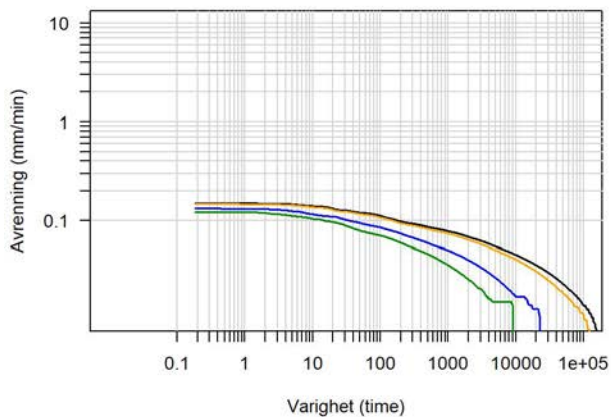


Dreneringsrør plassering: Topp

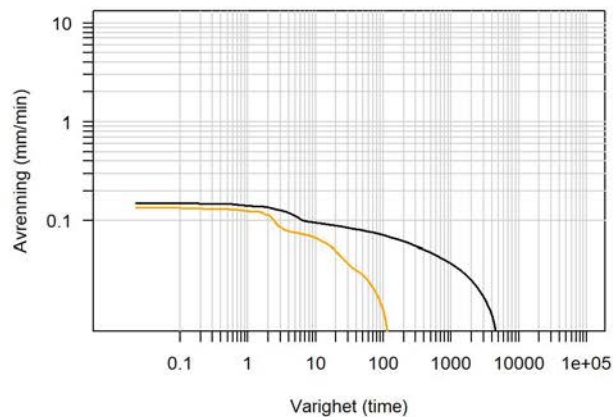


### C.4.3 Avrenning drenering med bærelag lik 300 mm

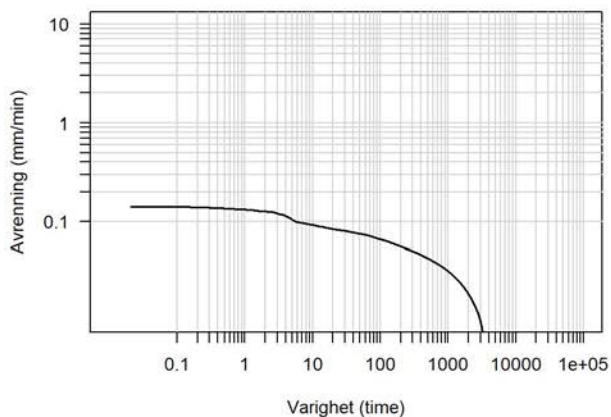
Dreneringsrør plassering: Bunn



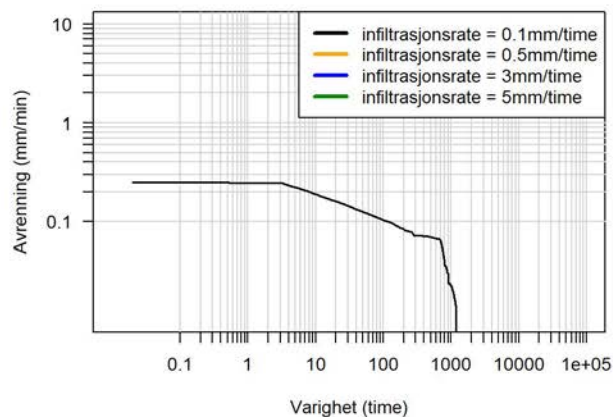
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2

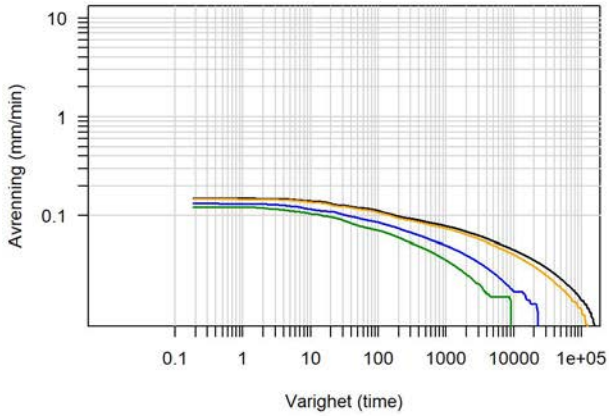


Dreneringsrør plassering: Topp

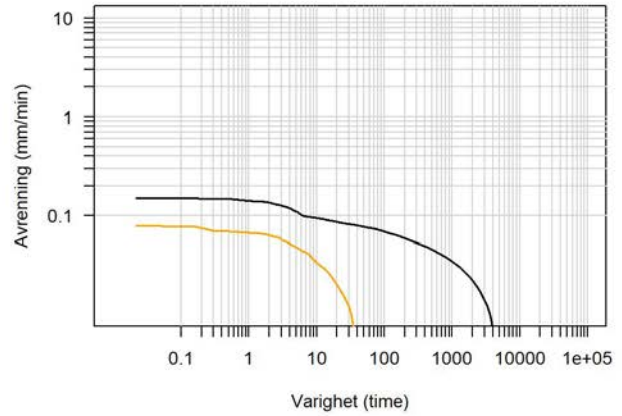


### C.4.4 Avrenning drenering med bærelag lik 400 mm

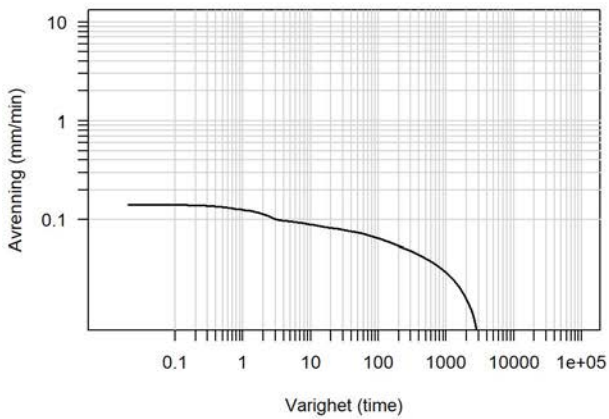
Dreneringsrør plassering: Bunn



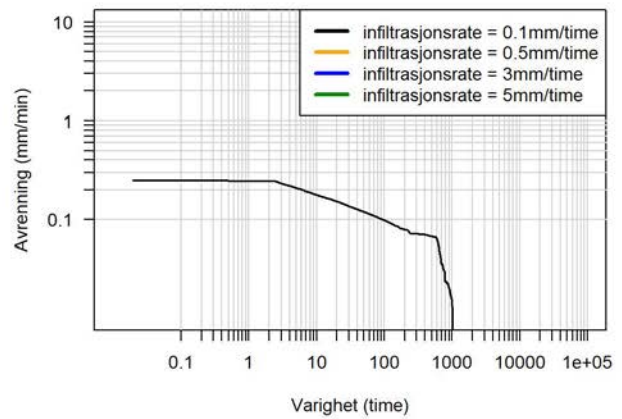
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2



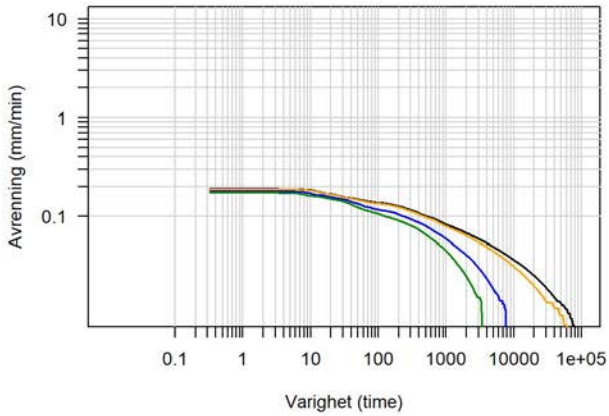
Dreneringsrør plassering: Topp



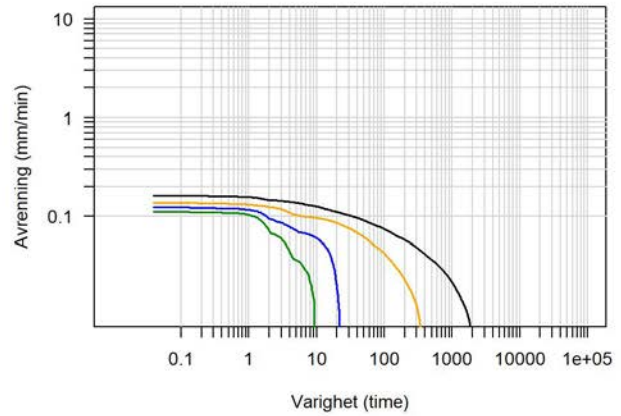
## C.5 Hamar

### C.5.1 Avrenning drenering med bærelag lik 100 mm

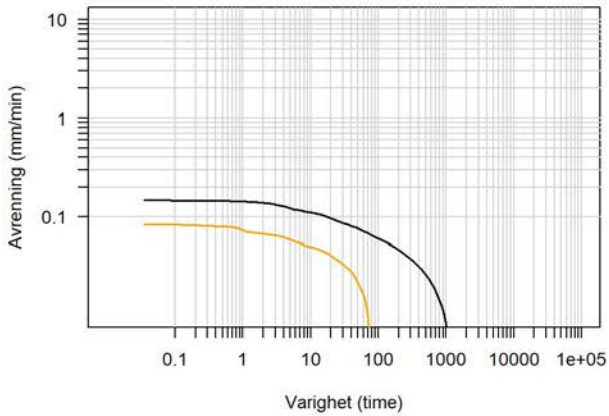
Dreneringsrør plassering: Bunn



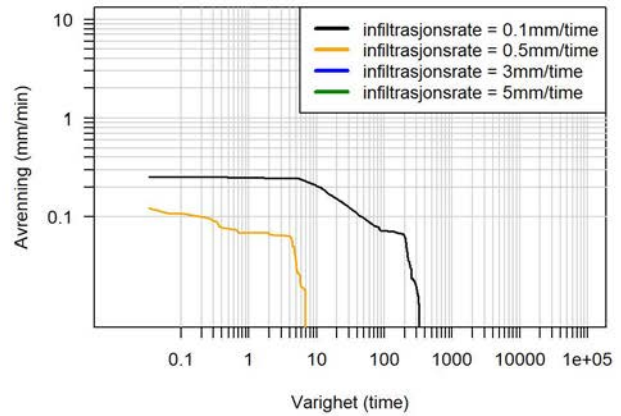
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2

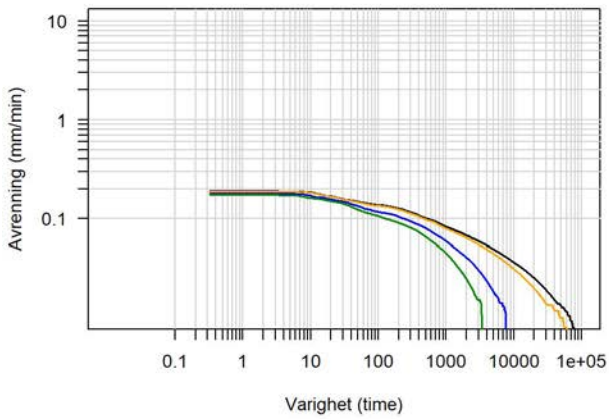


Dreneringsrør plassering: Topp

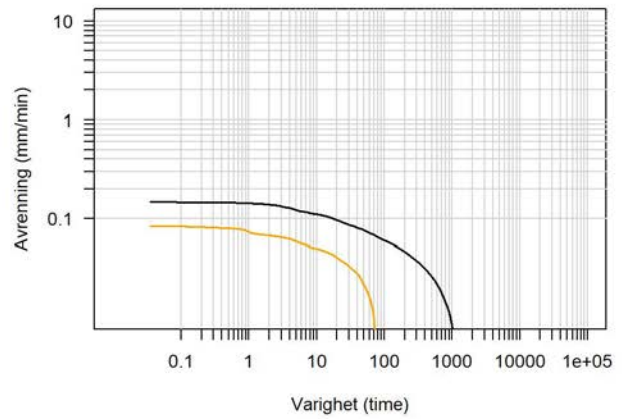


## C.5.2 Avrenning drenering med bærelag lik 200 mm

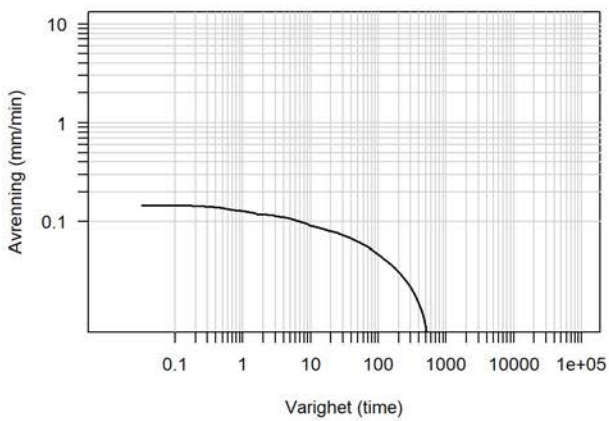
Dreneringsrør plassering: Bunn



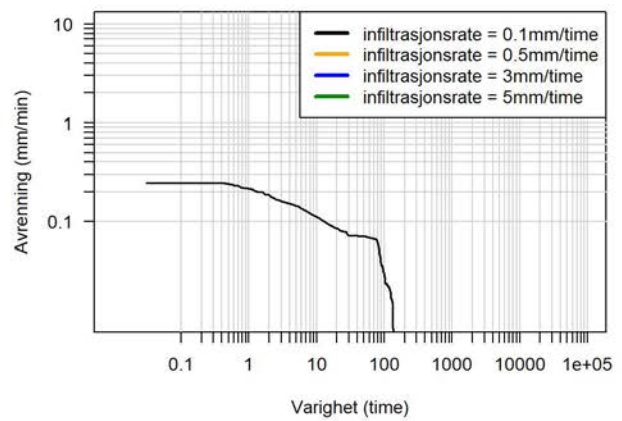
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2

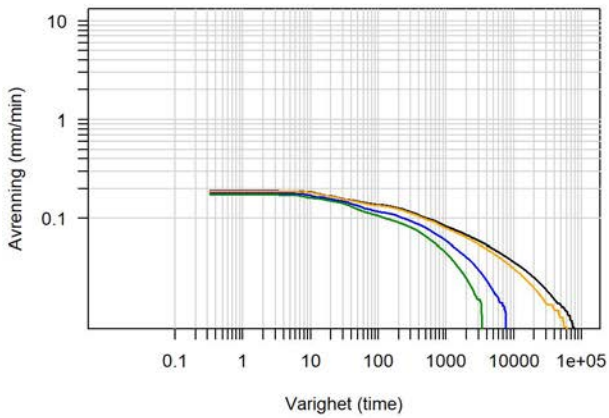


Dreneringsrør plassering: Topp

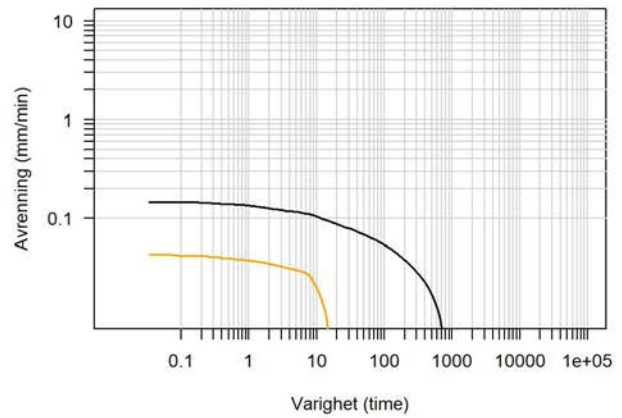


### C.5.3 Avrenning drenering med bærelag lik 300 mm

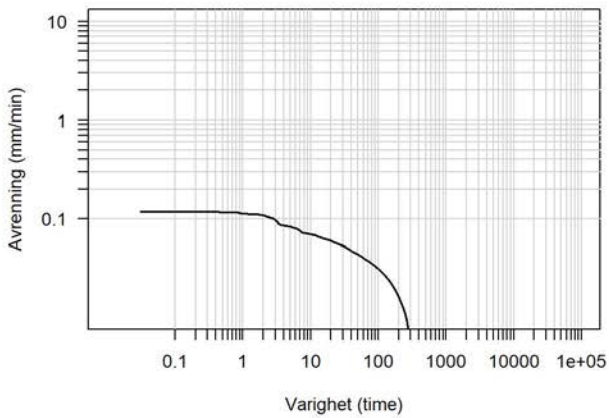
Dreneringsrør plassering: Bunn



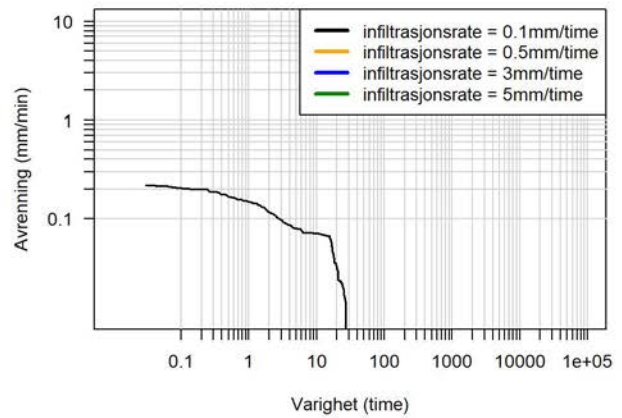
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2

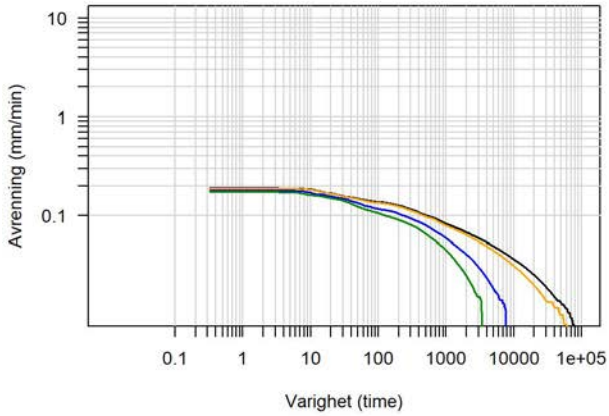


Dreneringsrør plassering: Topp

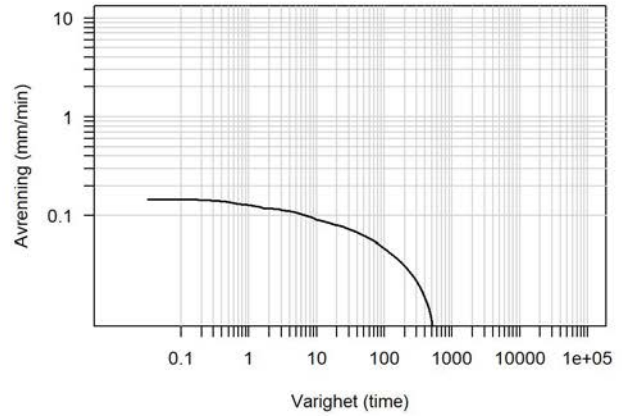


### C.5.4 Avrenning drenering med bærelag lik 400 mm

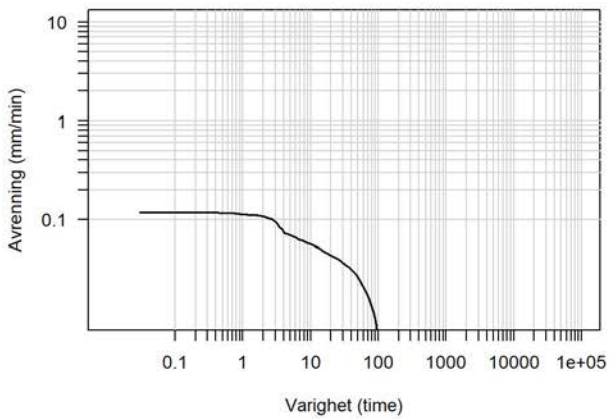
Dreneringsrør plassering: Bunn



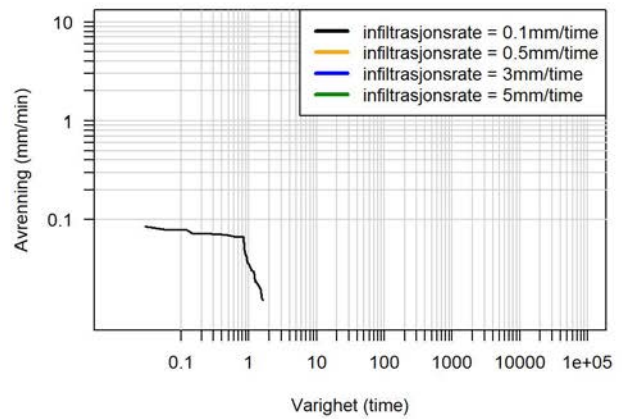
Dreneringsrør plassering: Offset1



Dreneringsrør plassering: Offset2



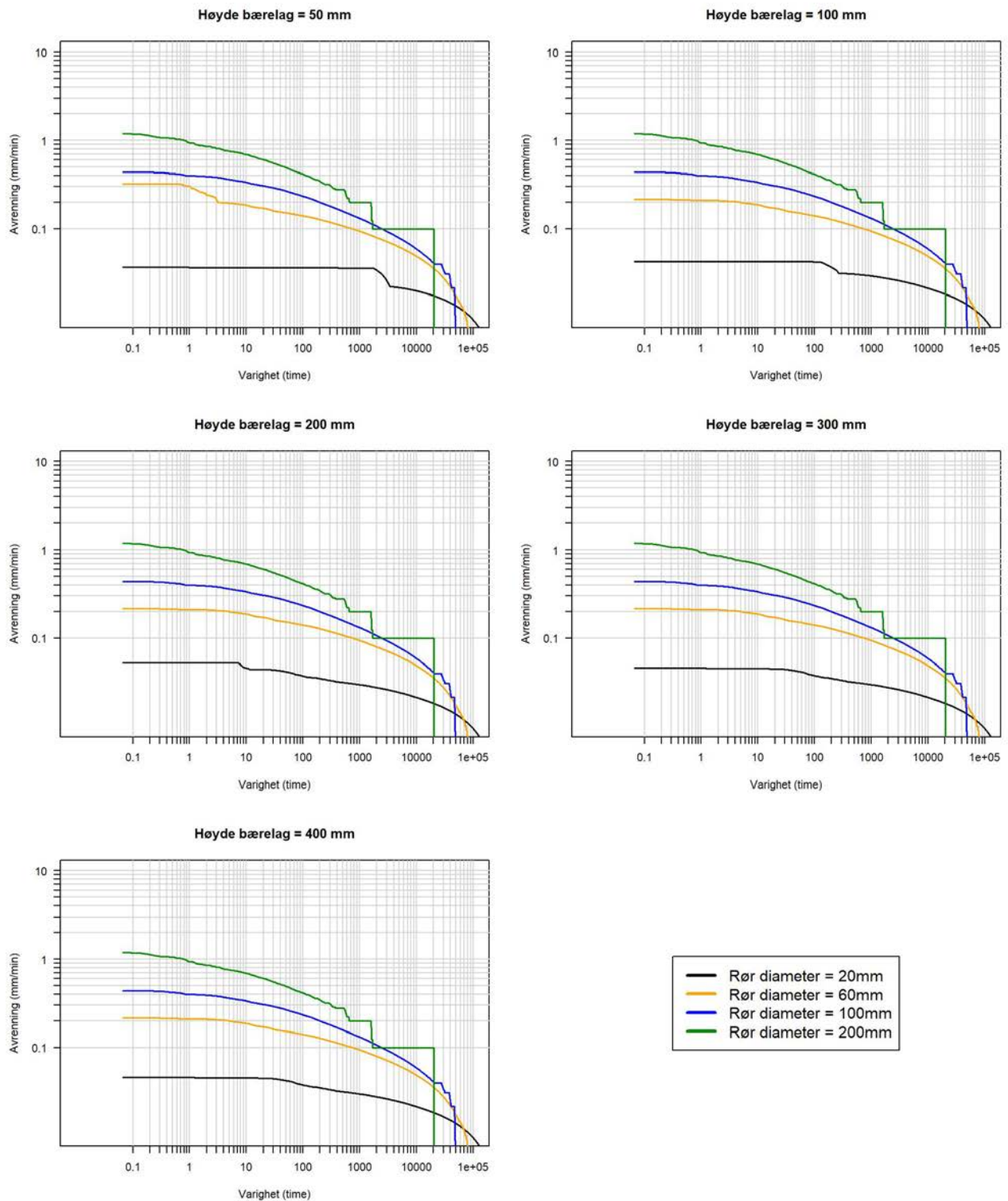
Dreneringsrør plassering: Topp



## D Varighetskurver permeable dekker type C

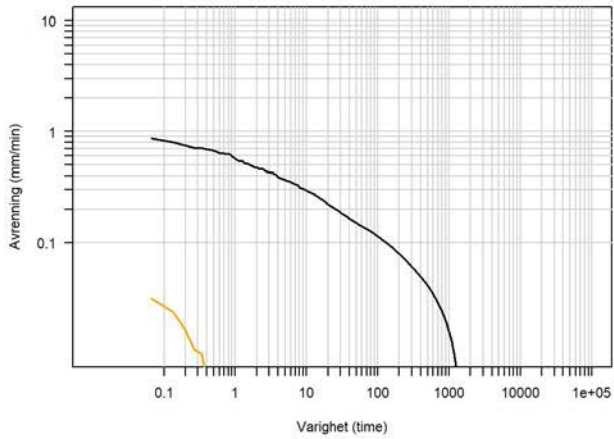
### D.1 Bergen

#### D.1.1 Avrenning drenering

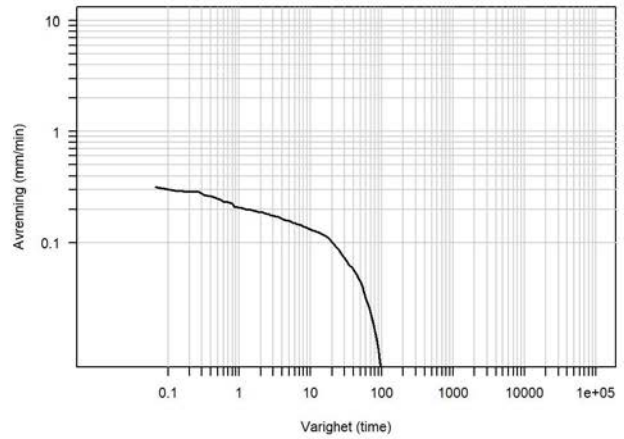


## D.1.2 Overflateavrenning

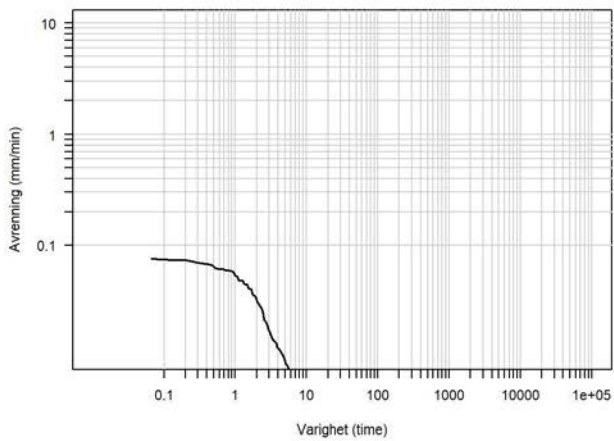
Høyde bærelag = 50 mm



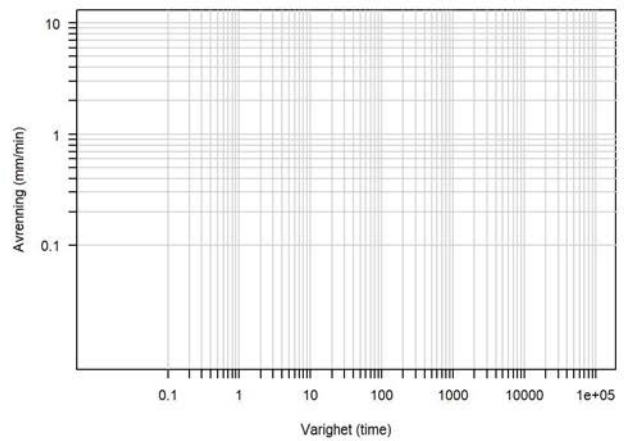
Høyde bærelag = 100 mm



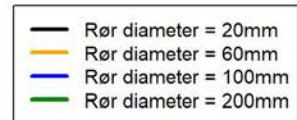
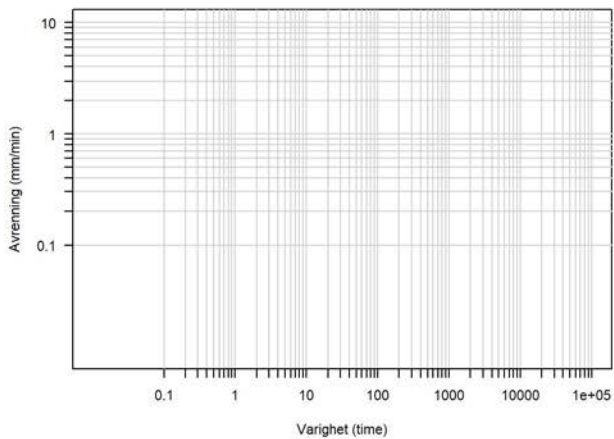
Høyde bærelag = 200 mm



Høyde bærelag = 300 mm

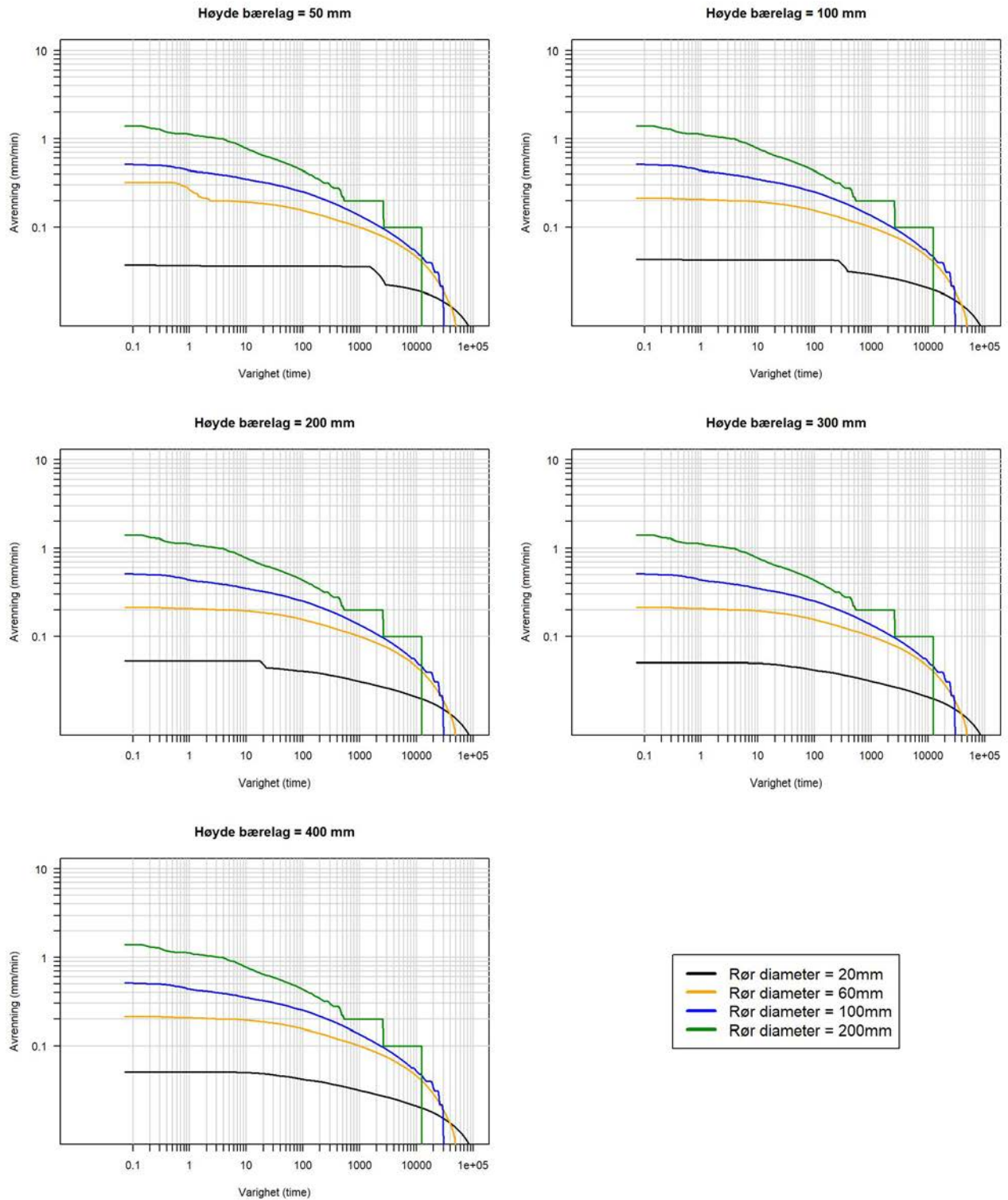


Høyde bærelag = 400 mm

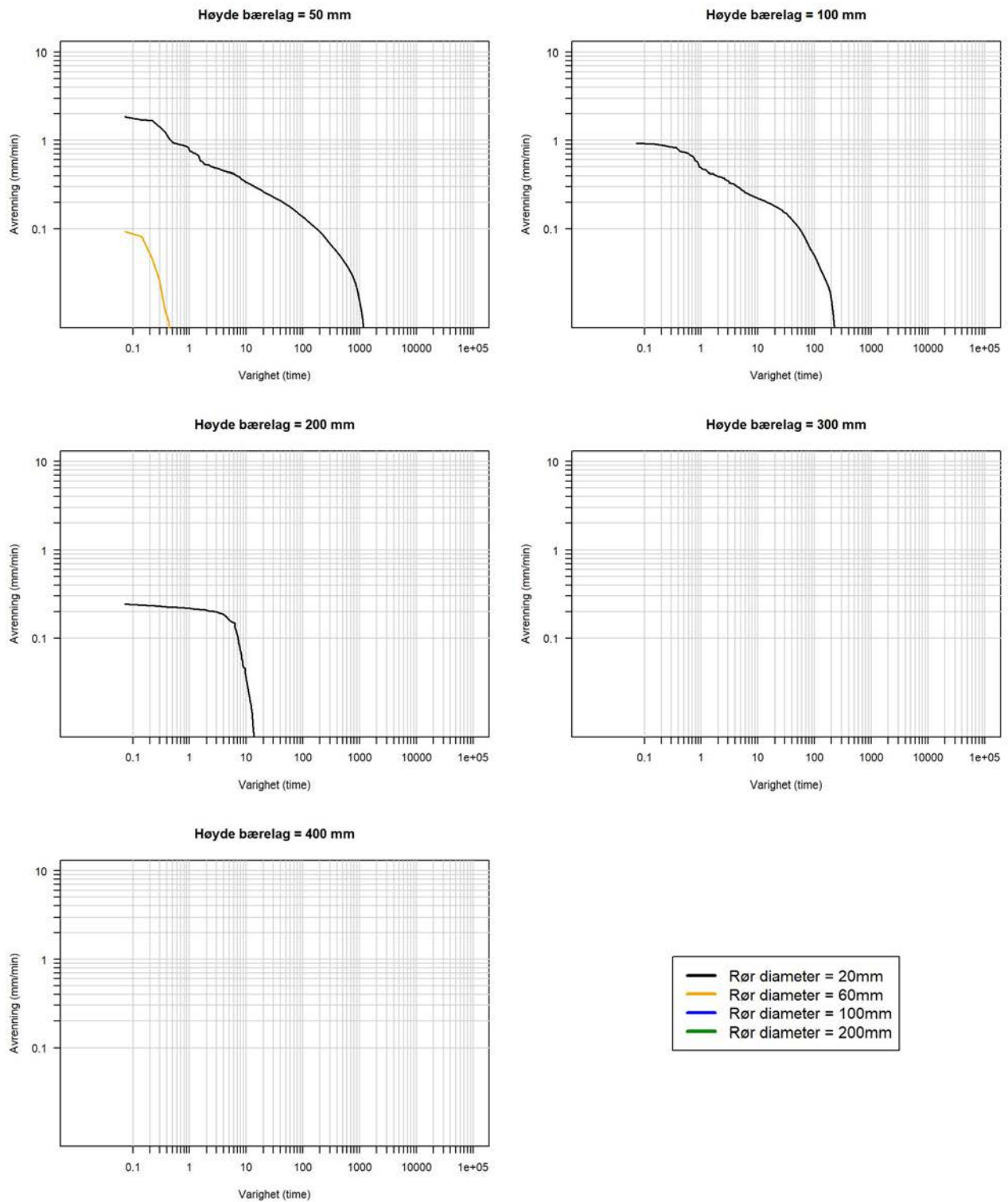


## D.2 Kristiansand

### D.2.1 Avrenning drenering

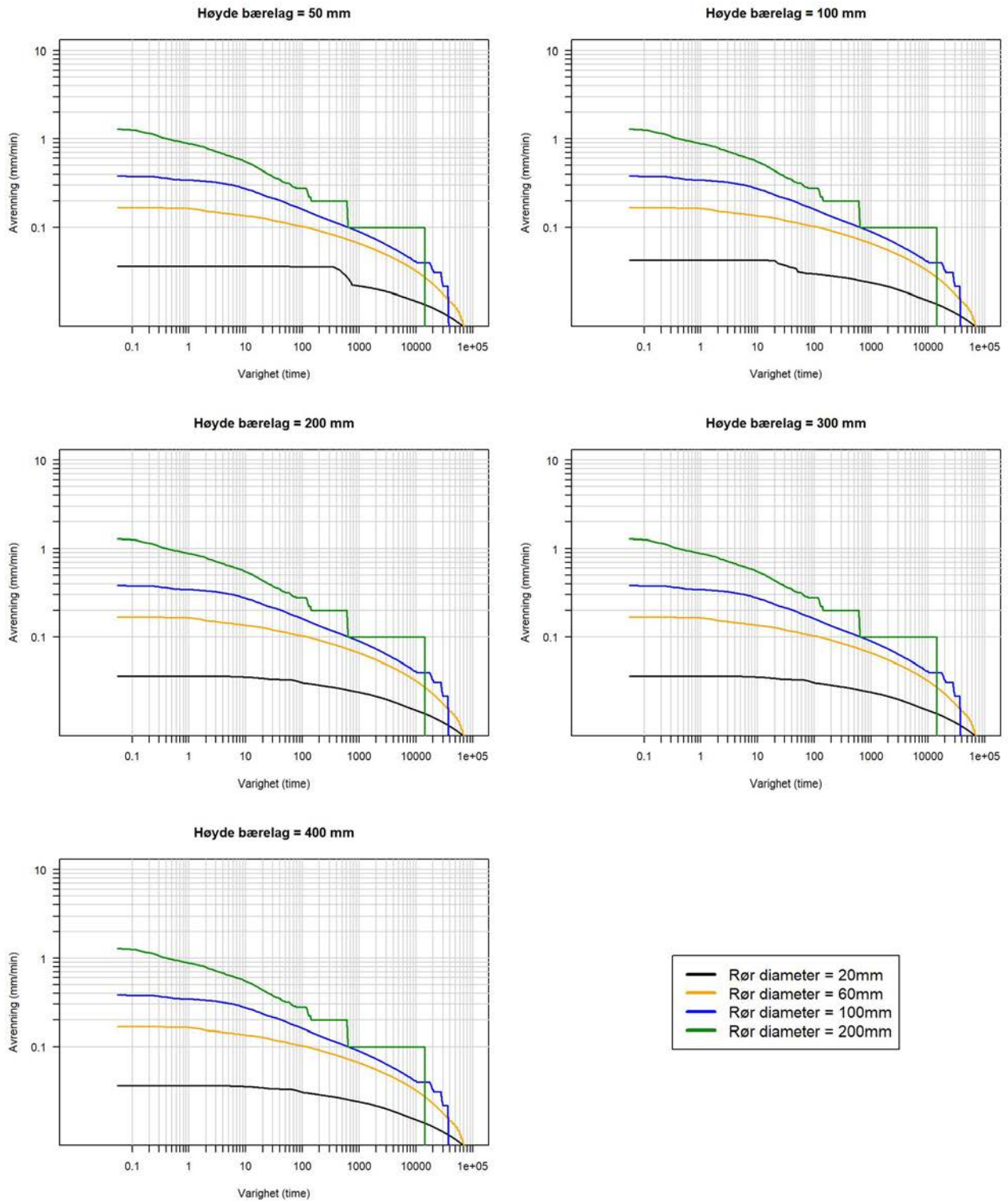


## D.2.2 Overflateavrenning



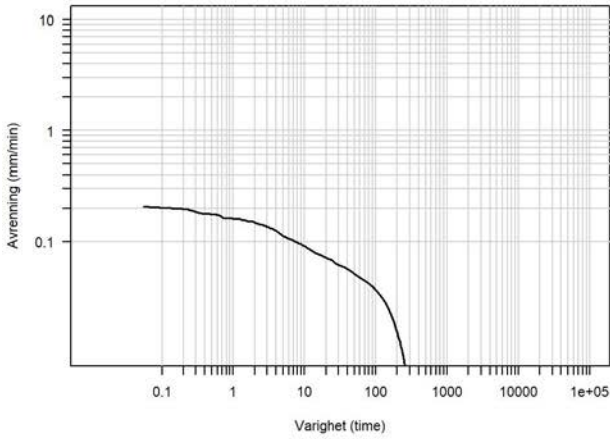
## D.3 Trondheim

### D.3.1 Avrenning drenering

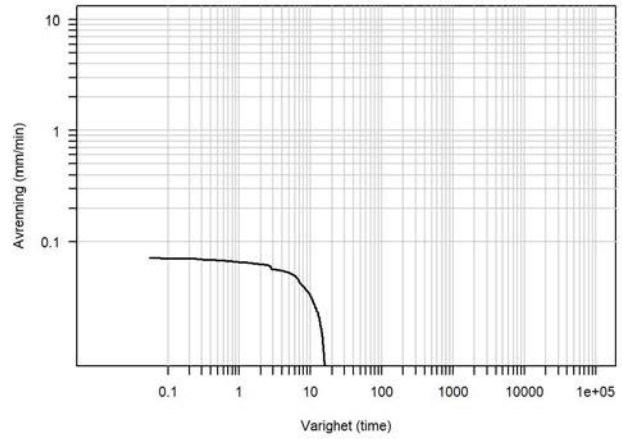


### D.3.2 Overflateavrenning

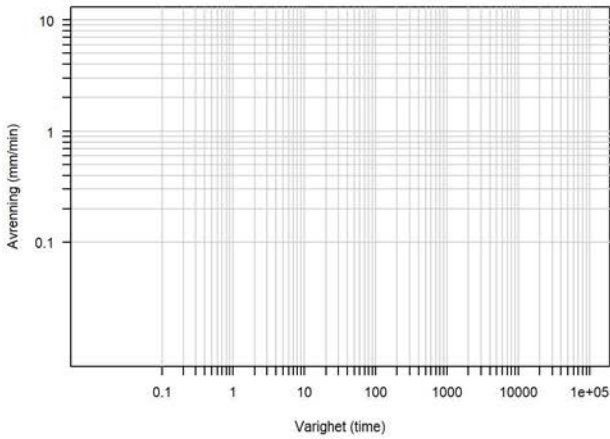
Høyde bærelag = 50 mm



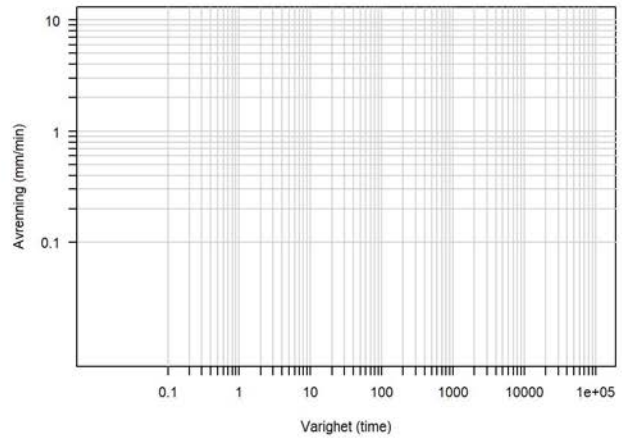
Høyde bærelag = 100 mm



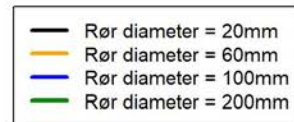
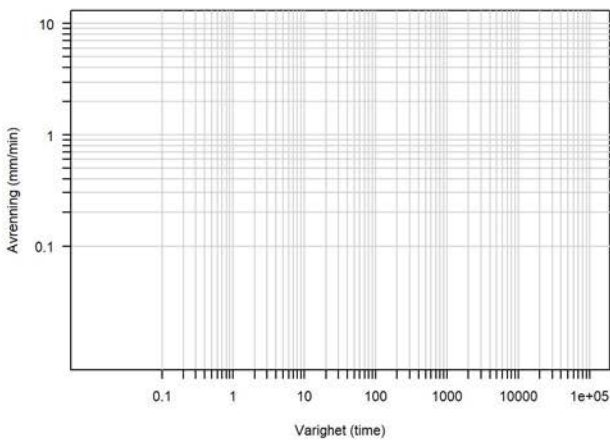
Høyde bærelag = 200 mm



Høyde bærelag = 300 mm

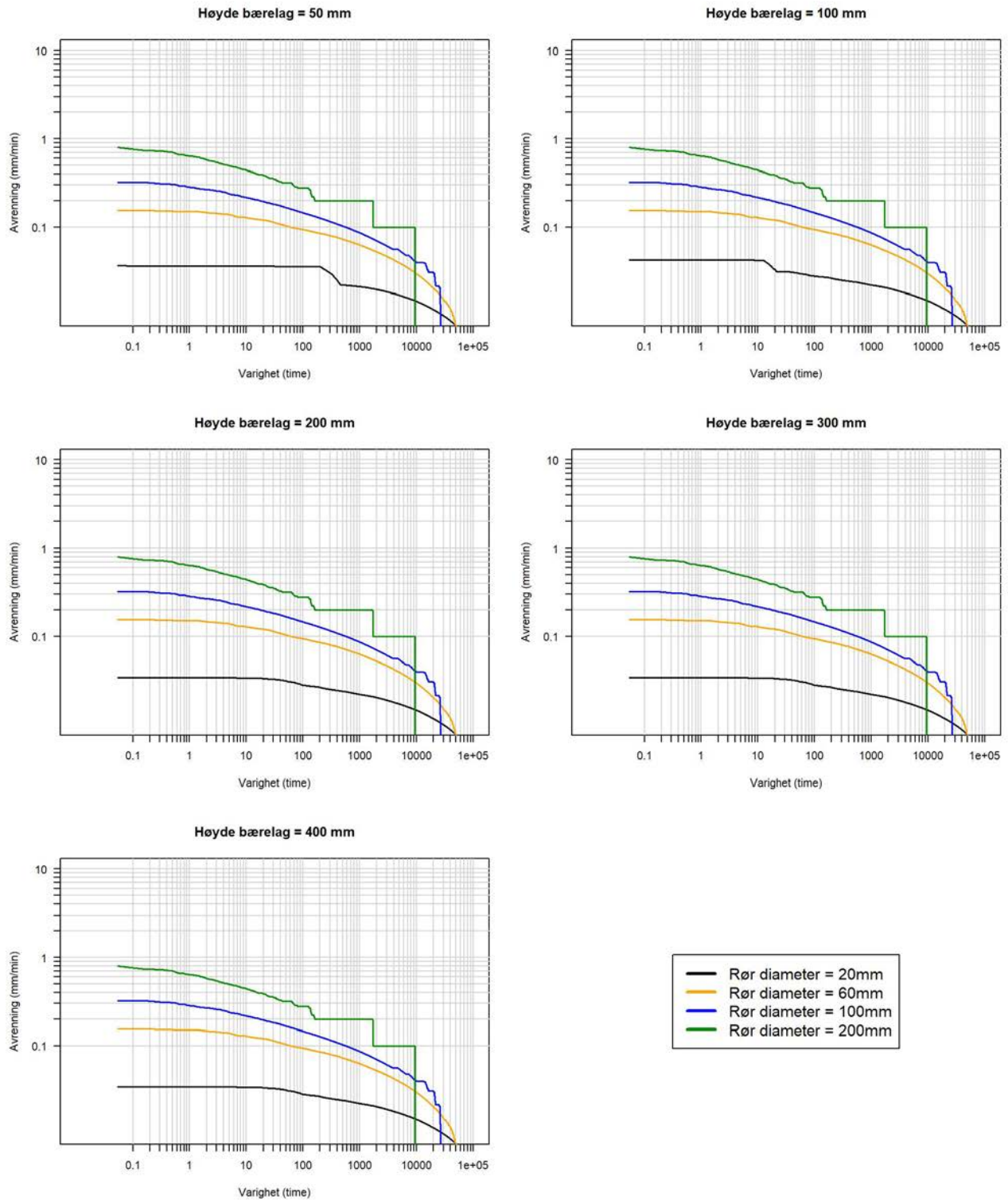


Høyde bærelag = 400 mm



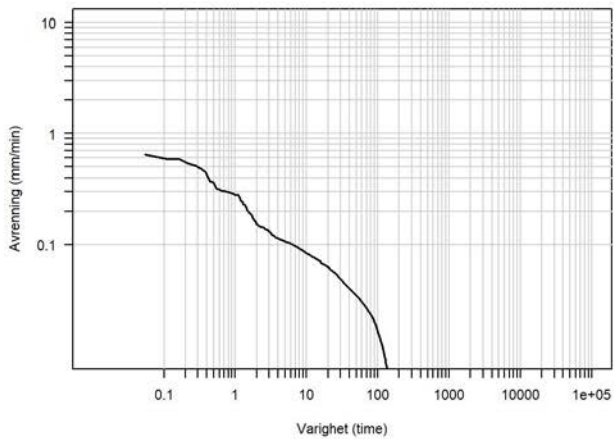
## D.4 Bodø

### D.4.1 Avrenning drenering

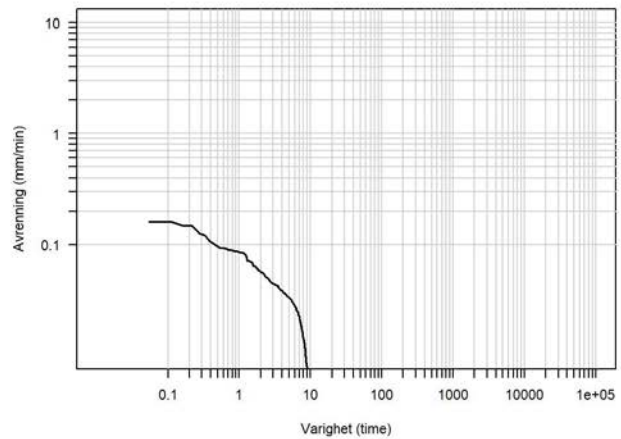


## D.4.2 Overflateavrenning

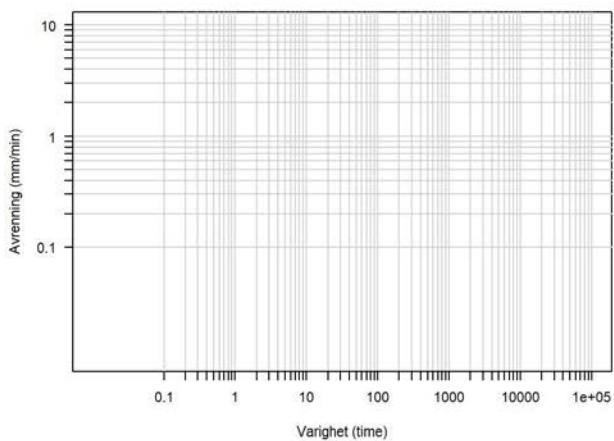
Høyde bærelag = 50 mm



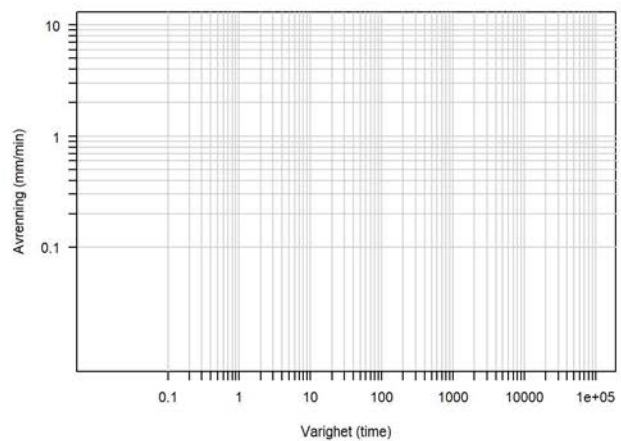
Høyde bærelag = 100 mm



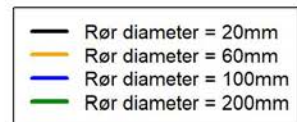
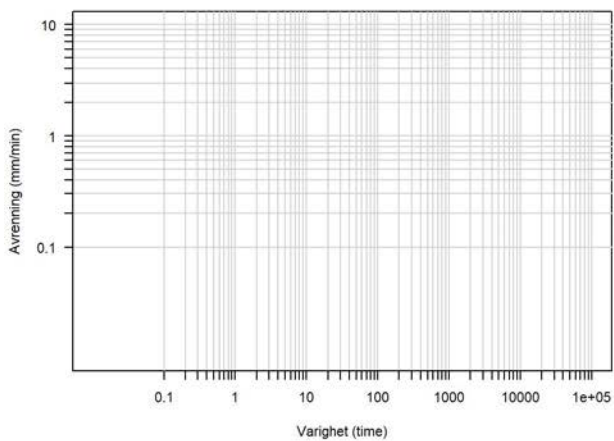
Høyde bærelag = 200 mm



Høyde bærelag = 300 mm



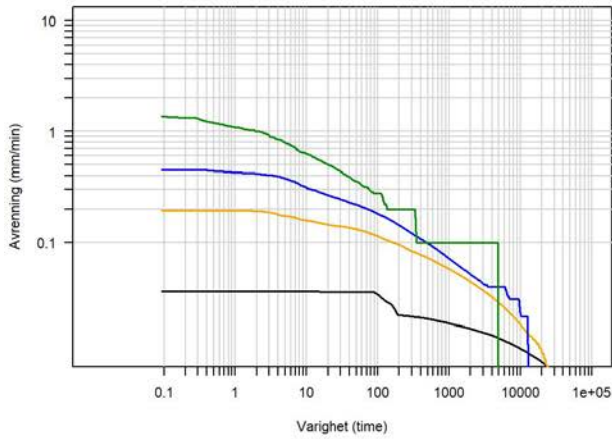
Høyde bærelag = 400 mm



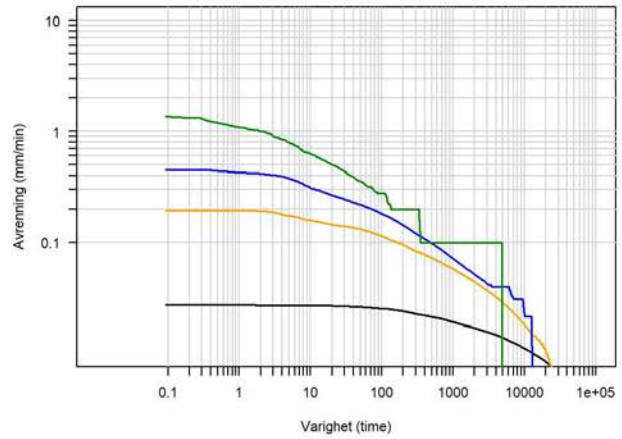
## D.5 Hamar

### D.5.1 Avrenning drenering

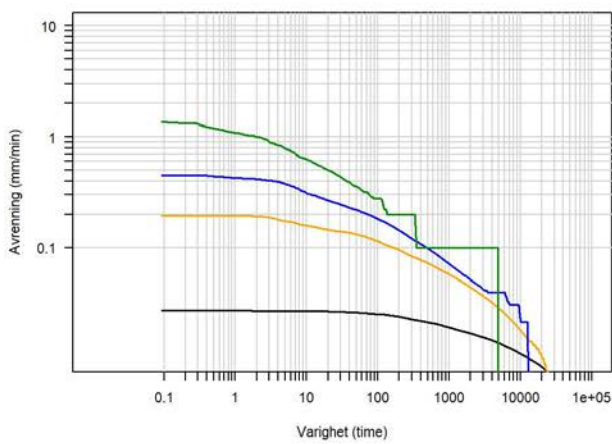
Høyde bærelag = 50 mm



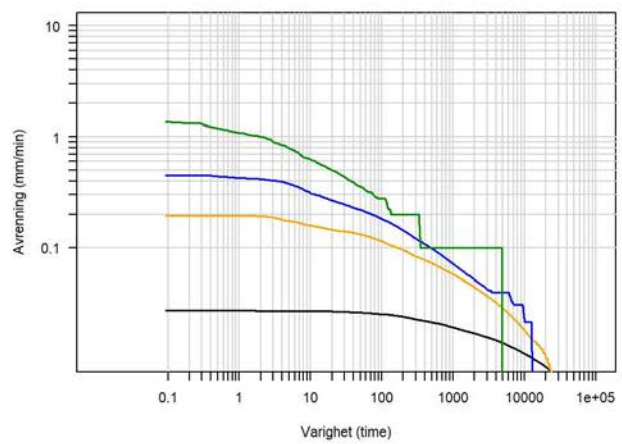
Høyde bærelag = 100 mm



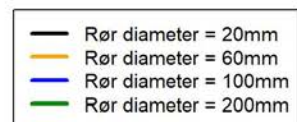
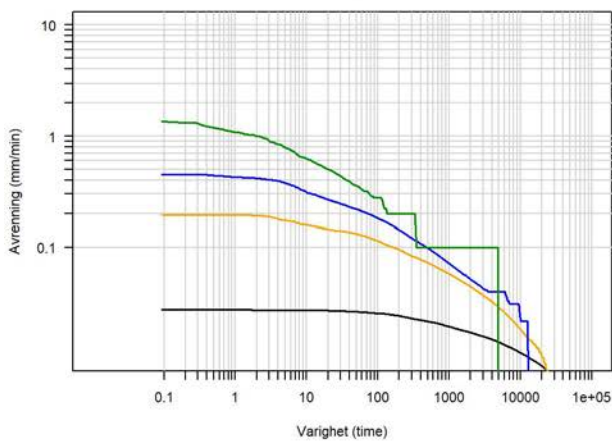
Høyde bærelag = 200 mm



Høyde bærelag = 300 mm

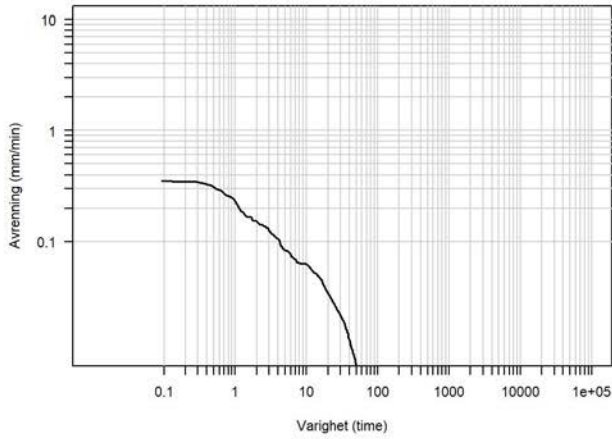


Høyde bærelag = 400 mm

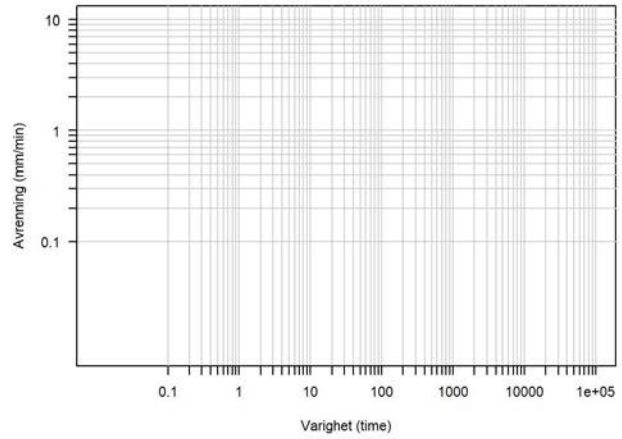


## D.5.2 Overflateavrenning

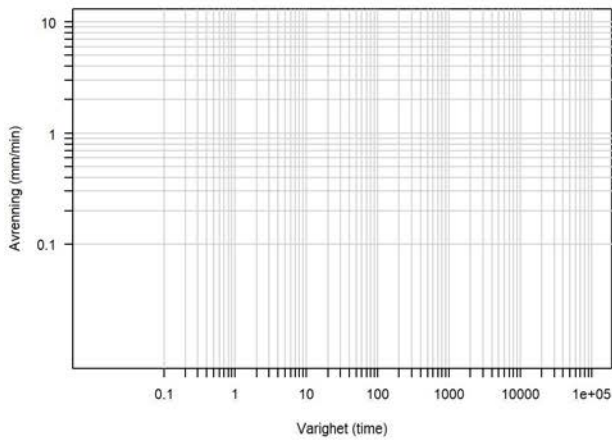
Høyde bærelag = 50 mm



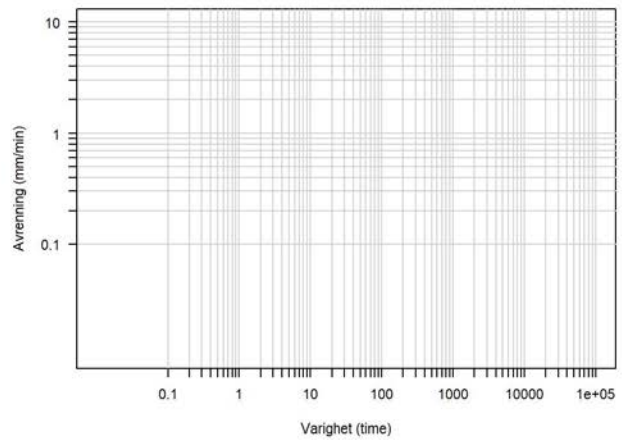
Høyde bærelag = 100 mm



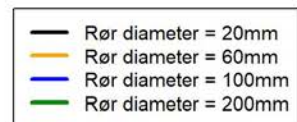
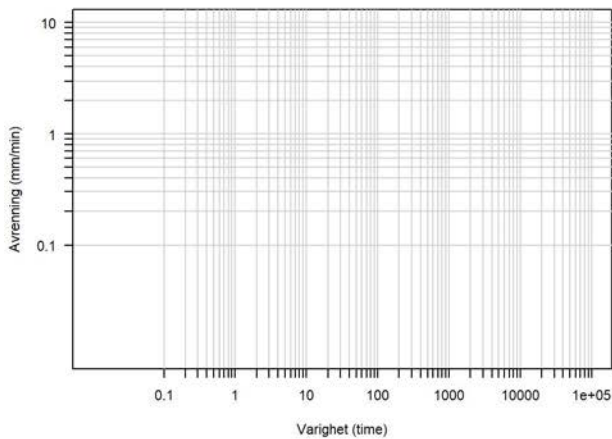
Høyde bærelag = 200 mm



Høyde bærelag = 300 mm

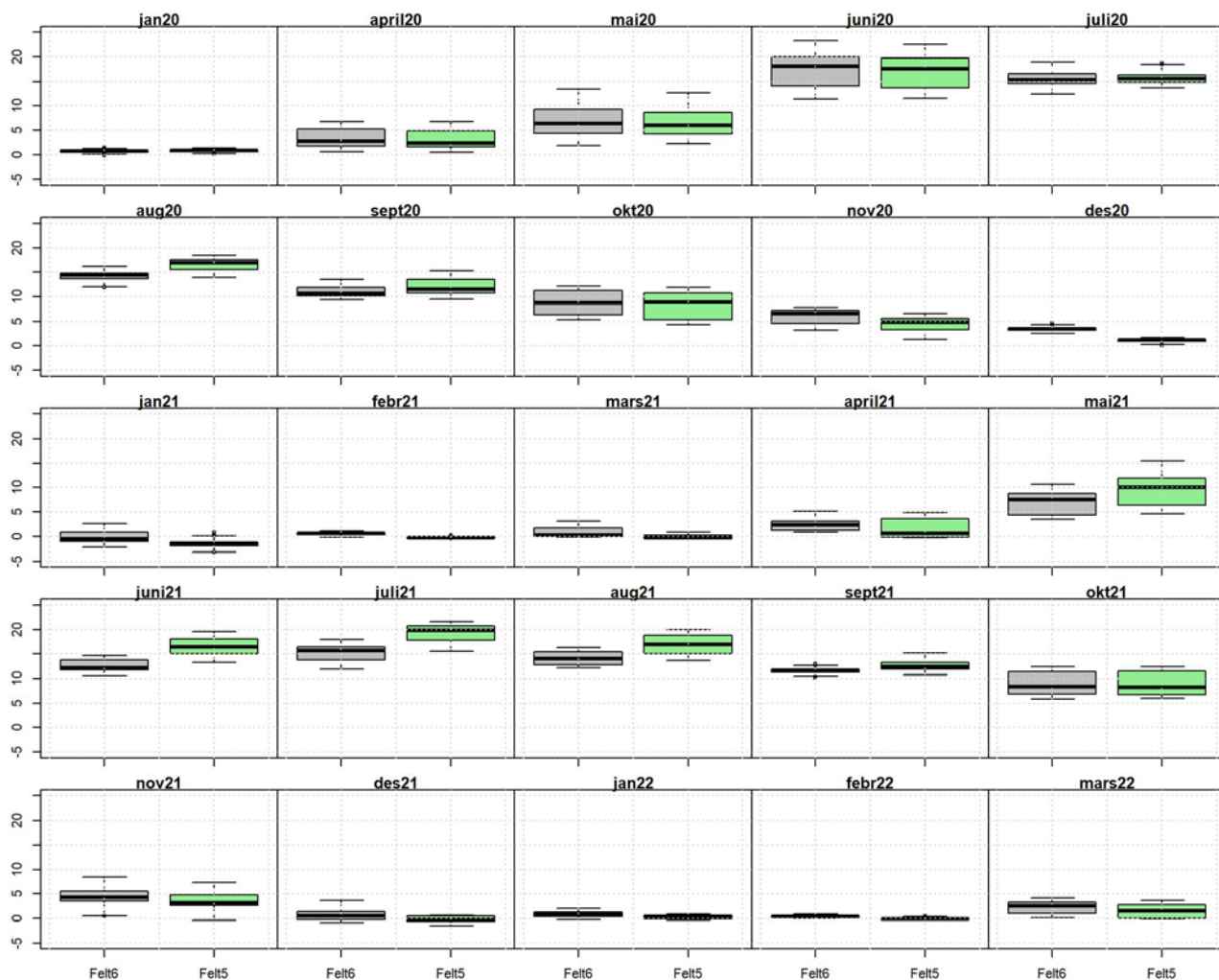


Høyde bærelag = 400 mm

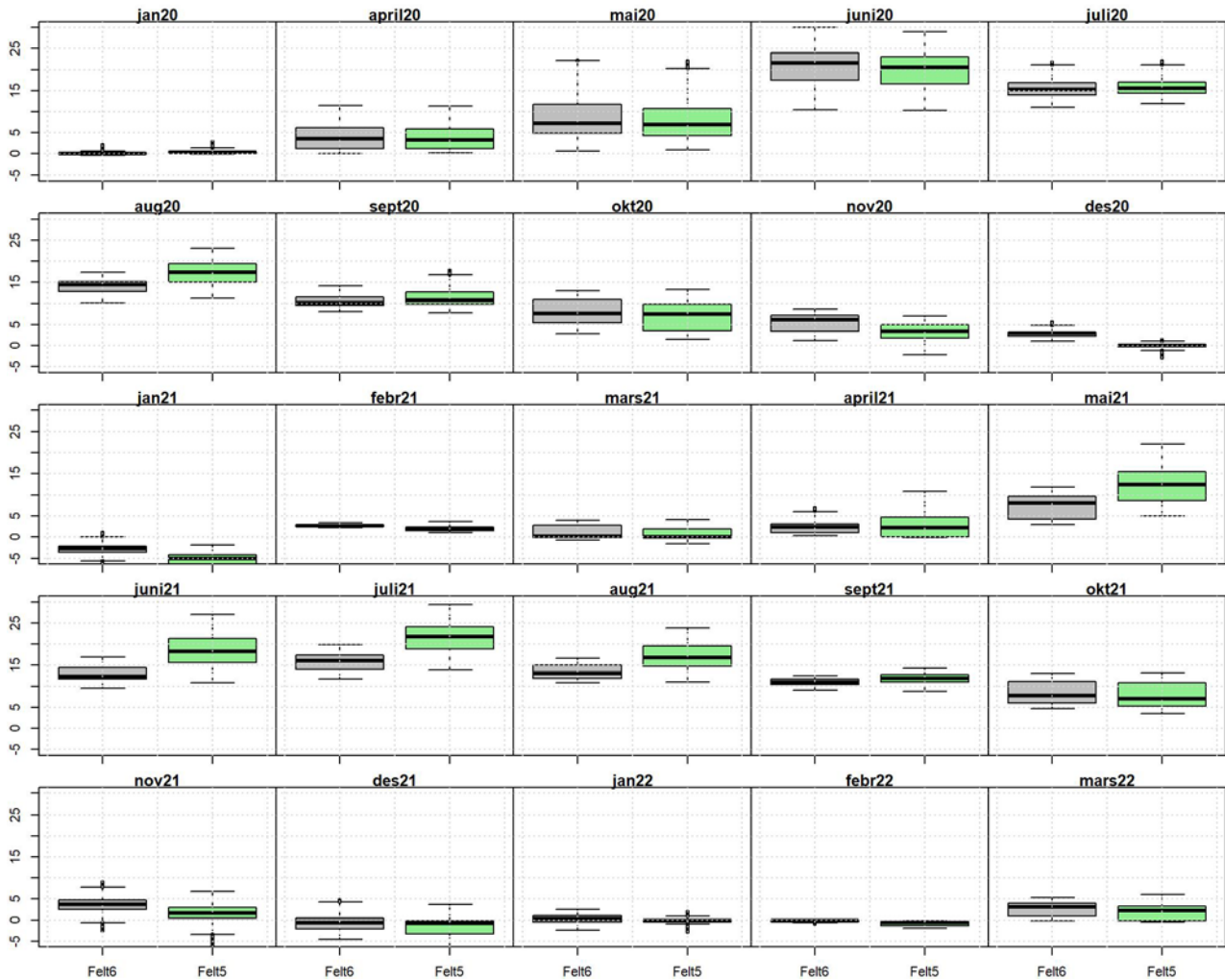


## E Temperaturprofiler sammendrag

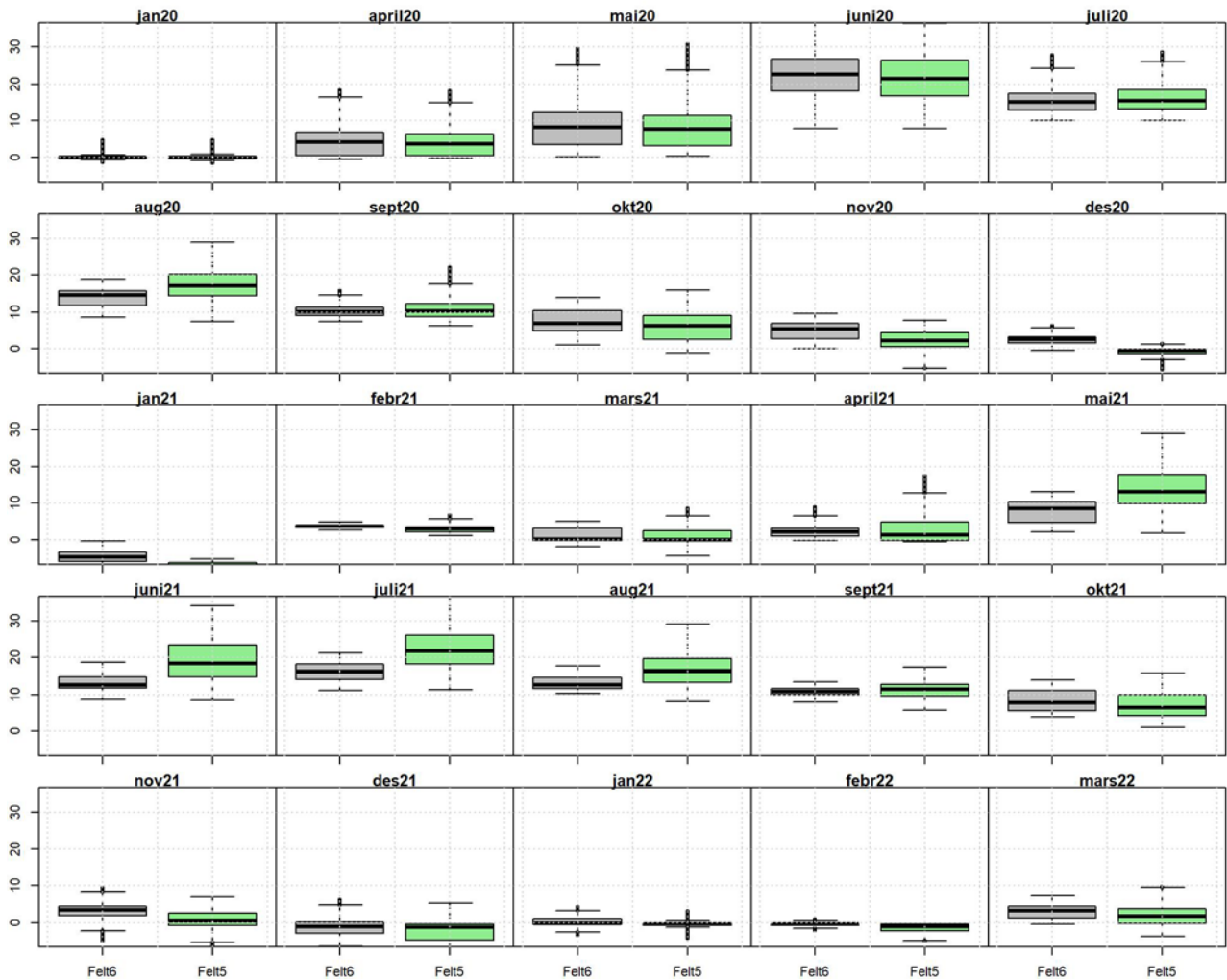
### E.1 Bunnpunkt



## E.2 Midtpunkt



### E.3 Toppunkt







Teknologi for et bedre samfunn

[www.sintef.no](http://www.sintef.no)