

Oppsamling av farlig væske fra vegbanen

En forsøksstudie om vegbanens evne til å føre farlig væske mot sluk, og slukets evne til å samle opp væsken

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 1120



Foto: Mahdi Bahrami/NTNU

Tittel

Oppsamling av farlig væske fra vegbanen

Undertittel

En forsøksstudie om vegbanens evne til å føre farlig væske mot sluk, og slukets evne til å samle opp væsken

Forfatter

Sten Roar Moum, Norconsult
Cecilie Kvangarsnes, Norconsult

Avdeling

Utbyggingsområde vest

Seksjon

Tunneloppgradering vest

Rapportnummer

1120

Godkjent av

Stig Magnus Berg-Thomassen, Ole Pedro
Myklebostad, Kenneth Lyngsgård

Emneord

tunnel, avløpssystem, farlig væske,
overvannssystem

Sammendrag

I forbindelse med oppgradering av et stort antall tunneler på europa- og riksvegnettet har det vært ønskelig å avklare flere tema tilknyttet risikoen for spredning av farlig væske i vegbane og avløpssystem. Statens vegvesen initierte derfor i 2022 en utredning for å få økt kunnskap om relevante risikoforhold og mulige sikkerhetstiltak.

Denne rapporten omhandler vegbanens evne til å føre farlig væske mot sluk, og slukets evne til å samle opp væsken.

Title

Capture of Hazardous Liquids from Road Surfaces

Subtitle

An Experimental Investigation of Road Surface Drainage Performance and Gully Collection Efficiency

Author

Sten Roar Moum, Norconsult
Cecilie Kvangarsnes, Norconsult

Department

Construction Area Western Norway

Section

Tunnel Upgrades Western Norway

Report number

1120

Approved by

Stig Magnus Berg-Thomassen, Ole Pedro
Myklebostad, Kenneth Lyngsgård

Key words

tunnel, drainage system, hazardous liquids,
stormwater system

Summary

In connection with the upgrading of many tunnels on the European and national road network, there has been a need to clarify several issues related to the risk of hazardous liquids spreading across the roadway and within the drainage system. In 2022, the Norwegian Public Roads Administration initiated a study to increase knowledge about relevant risk factors and potential safety measures.

This report addresses the roadway's ability to convey hazardous liquids toward drains, and the drains' ability to collect these liquids.



Oppdragsgiver: Statens vegvesen

Oppdragsgivers kontaktperson: Stig Magnus Berg-Thomassen, Statens vegvesen

Rådgiver: Sten Roar Moum, Norconsult

Oppdragsleder: Dag Ivar Fjeldberg, Norconsult

Fagansvarlig: Sten Roar Moum, Norconsult

Andre nøkkelpersoner: Ole Pedro Myklebostad, Statens vegvesen
Jens William Bjerkelund, Norconsult
Cecilie Kvangarsnes, Norconsult
Thea Ingeborg Skrede, Norconsult
Anne Veia, Norconsult
Mahdi Bahrami, NTNU
Geir Tesaker NTNUBa
Are Wendelborg Brandt, NTNU

Revisjon	Dato	Beskrivelse	Utarbeidet	Fagkontrollert	Godkjent
J01	2026-03-06	For bruk.	Sten Roar Moum Cecilie Kvangarsnes	Cecilie Kvangarsnes Sten Roar Moum	Dag Ivar Fjeldberg

Dette dokumentet er utarbeidet av Norconsult som del av det oppdraget som dokumentet omhandler. Opphavsretten tilhører Norconsult. Dokumentet må bare benyttes til det formål som oppdragsavtalen beskriver, og må ikke kopieres eller gjøres tilgjengelig på annen måte eller i større utstrekning enn formålet tilsier.

Sammendrag

Et stort antall vegtunneler, både på europa-, riks- og fylkesvegnettet, skal oppgraderes for å imøtekomme *Forskrift om minimum sikkerhetskrav til visse vegtunneler* (tunnelsikkerhetsforskriften) og *Forskrift om minimum sikkerhetskrav til visse tunneler på fylkesvegnettet og kommunalt vegnett i Oslo* (tunnelsikkerhetsforskrift for fylkesveg m.m.)¹

Tunnelsikkerhetsforskriften §8 omhandler sikkerhetstiltak. Vedlegg I presenterer krav til avløpssystemet med hensikt å redusere risikoen ved utslipp av giftige og brennbare væsker. I pkt. 2.6, står det: «*Dersom det er tillatt med transport av farlig gods, skal det finnes avløp for brannfarlige og giftige væsker, gjennom godt utformede sluk eller andre tiltak innenfor tunnelens tverrprofil. I tillegg skal avløpssystemet være konstruert og skal vedlikeholdes for å hindre at brann og brannfarlige og giftige væsker sprer seg inne i løp og mellom løp.*»

Statens vegvesen ønsket økt kunnskap om temaet og initierte derfor et prosjekt tilknyttet risikoen for spredning av brannfarlig og giftig væske. I denne delen av prosjektet er målsetningen å få økt kunnskap om vegbanens evne til å føre farlig væske mot sluk, og slukets evne til å samle opp væsken².

Følgende tema skal svares ut:

- Tema nr. 1: Teste i hvilke grad elementer (vegoppmerking og slitasje) og utforming av vegbanen vil kunne påvirke opptak av væske i sluk.
- Tema nr. 2: Teste om ulike sluktyper har begrensninger for hvordan væske tas opp.

Problemstillingen i prosjektet begrenser seg til tunnelsikkerhetsforskriftens formål med tanke på væskesøl, og har ikke til hensikt å svare ut tema tilknyttet for eksempel drift- og vedlikeholdsoppgaver.

Hos NTNU i Trondheim ble det etablert en storskala test-rigg, med målsetning å observere væskestrøm og oppsamlingskapasitet for ulike rist-typer. Det ble gjennomført tester med og uten vegoppmerking, lengdefall på 1, 3 og 5 % og tverrfall 3 %. Væskemengden (vann) som ble benyttet var 2,83 og 3,54 l/s, nedskalert fra 16 og 20 l/s.

Det ble videre gjennomført simuleringer i beregningsprogrammet HEC-RAS, utført av Norconsult. Målsetningen med simuleringene var å få økt kunnskap om hvordan hjulspor kan ha innvirkning på avrenning av væske. Det ble gjort simuleringer med tverrfall på 3 %, og lengdefall på 1, 3, 5 og 10 %. Hydraulisk kapasitet i hjulspor ble simulert med henholdsvis 1 og 2 cm dybde, og bunnbredde 20 cm. Resultater fra simuleringene ble sammenlignet med kontrollberegninger, som gav sammenfallende resultater.

Forsøkene viste at avrenning på veg og oppsamling i sluk påvirkes av en kombinasjon mellom lengde- og tverrfall, vegmerking, hjulspor, asfaltens ruhet og slukets kapasitet og utforming.

- Lengde- og tverrfall har stor innvirkning på overflateavrenningen. Ved stort lengdefall fordeler væsken seg først et stykke i lengderetningen, før det samles og ledes langs banketten. På samme måte vil et markant tverrfall føre til at vannet raskt samles inn mot banketten.
- Vegmerking har liten innvirkning på væskestrømmer når det benyttes stiplet oppmerking.

¹ Relevante krav fra både forskrift og Vegnormal er samlet og presentert i vedlegg 1 og 2. For eksisterende tunneler relaterer problemstillingene i stor grad til pkt. 2.6 i tunnelsikkerhetsforskriften. For nye tunneler er relevante føringer presentert i Vegnormal N500, pkt. 9.2.3 og pkt. 9.2.4.

² Det er også gjennomført et forskningsprosjekt tilknyttet brannspredning i seriekoblet avløpssystem.

- Hjulspor har derimot betydelig innvirkning på væskestrømmen. Hjulsporenes innvirkning på væskestrømmen kan reduseres betydelig dersom maks tillatt dybde reduseres fra 2 cm til 1 cm, spesielt ved lengdefall over 3 %.
- Slukets utforming og plassering har betydning for hvor raskt væske samles opp. Ved lengdefall på 5 % har kjeftesluk noe bedre oppsamlingskapasitet, mens rennestensluk har klart best oppsamlingskapasitet ved lengdefall ≤ 3 %, ved de testede væskemengdene. Generelt er det en utfordring av bredden på væskestrømmen langs bankett er større enn ristens bredde.

Med bakgrunn i observasjonene fra testene og simuleringene er det konkludert med følgende:

1. I vegtunnel anbefales det ikke å avvike fra krav i N100, som angir minimum 2,0 % resulterende fall³.
2. Langs kjørebane kant anbefales at heltrukken oppmerking splittes oppstrøms sluk, slik at væsken kan samles inn mot bankett før sluk.
3. Vurdere om gjeldende krav til spordybde skal benyttes ved lengdefall > 3 %.
4. I havari-/stopplommer bør det vurderes bruk av runde (DN650) ristlokk for økt oppsamlingskapasitet.

Alle anbefalinger avviker fra krav i gjeldende håndbøker, men er vurdert å ivareta funksjonskravet slik det er beskrevet i Tunnelsikkerhetsforskriften vedlegg I kap. 2.6. Siden ingen krav er kvantifisert, er det en vurdering av resultatene fra testene mtp. hva som påvirker oppsamlingsmuligheten i tunnelen, som ligger til grunn for anbefalingene. Uten å følge anbefalingene vil det kunne være en fare for at oppsamling ikke skjer.

³ Resulterende fall beskriver den samlede helningen på en vegflate når både langsgående fall og tverrfall virker samtidig. Det angir den faktiske fallretningen og -størrelsen som påvirker blant annet avrenning, friksjon og kjøreforhold.

Innhold

1	Bakgrunn og hensikt	1
1.1	Oppgradering av tunneler – krav til avløpssystemer og sikkerhet	1
1.2	Føringer i Vegnormal N500:2024	1
1.3	Utfordringer med eldre tunneler	1
1.4	Hensikt med denne vurderingen	1
2	Organisering av prosjektet	2
3	Problemstilling	3
4	Laboratorietest (sammendrag)	4
4.1	Beskrivelse av testtrigg	4
4.2	Beskrivelse sluktyper	5
4.3	Resultater fra labtest (sammendrag)	6
4.4	Labtest sammenligning sluktyper og fall	7
4.5	Observasjoner	12
5	Hydraulisk simulering av hjulspor	14
5.1	Sammendrag fra simulering	14
5.2	Hydraulisk simulering	14
5.3	Resultater fra simulering	16
5.4	Sensitivitetsanalyse	22
5.5	Kontrollberegning med Mannings formel	22
6	Sammenstilling labtest og simulering	24
6.1	Ulike sluktypers oppsamlingskapasitet	24
6.2	Asfalt	25
7	Anbefalinger	27
8	Referanser	28
Appendiks A	Relevante krav i tunnelsikkerhetsforskriften	I
Appendiks B	Føringer fra N500:2024 – Sluk	II
Appendiks C	NTNU-rapport	III

1 Bakgrunn og hensikt

1.1 Oppgradering av tunneler – krav til avløpssystemer og sikkerhet

Et stort antall tunneler på Europa-, riks- og fylkesvegnettet skal oppgraderes for å tilfredsstille kravene i:

- Forskrift om minimum sikkerhetskrav til visse vegtunneler (tunnelsikkerhetsforskriften) [1]
- Forskrift om minimum sikkerhetskrav til visse tunneler på fylkesvegnettet og kommunalt vegnett i Oslo (tunnelsikkerhetsforskrift for fylkesveg m.m.) [2]

Begge forskriftene stiller funksjonskrav til avløpssystemer i tunneler der transport av farlig gods er tillatt. Formålet er å redusere risiko for spredning av brannfarlige og giftige væsker ved ulykker.

Tunnelsikkerhetsforskriften vedlegg I pkt. 2.6.1, sier at: «Dersom det er tillatt med transport av farlig gods, skal det finnes avløp for brannfarlige og giftige væsker, gjennom godt utformede sluk eller andre tiltak innenfor tunnelens tverrprofil. I tillegg skal avløpssystemet være konstruert og skal vedlikeholdes for å hindre at brann og brannfarlige og giftige væsker sprer seg inne i løp og mellom løp.»

1.2 Føringer i Vegnormal N500:2024

I tunneler prosjektert etter Vegnormal N500:2024 Vegtunneler [3] skal brannfarlige og giftige væsker ledes i lukket avløpssystem til oljeutskiller. Sandfang skal være utstyrt med brannsikker dykker, som har til hensikt å hindre spredning av antent væske i rørsystemet. I veiledningsteksten anbefales det bruk av dykker i ikke brennbart materiale, eksempelvis støpejern. Det er ikke krav om at eksisterende tunneler skal oppgraderes i tråd med vegnormal N500⁴, men vegdirektoratet foreslår å benytte føringer i vegnormalen for imøtekommelse av tunnelsikkerhetsforskriftens krav.

1.3 Utfordringer med eldre tunneler

Eldre tunneler bygget etter tidligere utgaver av Vegnormal N500 (Håndbok 021), har ofte avløpssystemer som ikke oppfyller dagens minimumskrav i TSF/TSFF. Erfaring fra ulike prosjekter viser stor variasjon i valg av rist-type og avstand mellom sandfang, noe som påvirker systemets evne til å håndtere væskestrømmer effektivt og sikkert. Dette har skapt usikkerhet om løsningene tilfredsstiller kravene i tunnelsikkerhetsforskriften.

1.4 Hensikt med denne vurderingen

Norconsult gjør i dette dokumentet faglige vurderinger basert på resultater fra lab-forsøk utført ved NTNU og simulering av væskeavrenning utført av Norconsult. Hensikten har vært å analysere hvordan væskeavrenning på vegoverflaten og oppsamlingskapasiteten til ulike rist-typer påvirker effektivitet og sikkerhet i avløpssystemer.

Basert på disse undersøkelsene vurderes løsninger som kan anbefales for bruk i både oppgraderingsprosjekter og nye vegprosjekter. Vurderingene tar utgangspunkt i funksjonelle krav, praktiske erfaringer og gjeldende regelverk, med mål om å sikre robuste og fremtidsrettede løsninger for oppsamling og håndtering av væske i vegtunneler.

⁴ <https://www.vegvesen.no/fag/teknologi/tunneler/regelverk-og-veiledning/tolkning-av-regelverk/bruken-av-vegnormaler-ved-tunneloppgradering/>

2 Organisering av prosjektet

Prosjektet har vært organisert med en styringsgruppe bestående av representanter fra Statens vegvesen og Vegdirektoratet.

Styringsgruppen besto av:

- Stig Magnus Berg-Thomassen, prosjektsjef, utbyggingsdivisjonen Statens vegvesen
- Kenneth Lyngsgård, senioringeniør, praktisk tunnelforvalter drift vest 1, drift- og vedlikehold, Statens vegvesen
- Ole Pedro Myklebostad, sjefingeniør, drift- og vedlikeholds divisjonen, teknologiavdelingen, Statens Vegvesen
- Bjørn Arild Fossåen, sjefingeniør, fagspesialist tunnel, konstruksjonsteknikk, Vegdirektoratet

NTNU Trondheim ble engasjert av Norconsult for gjennomføring av litteraturstudie og praktiske skala-forsøk. Praktisk skala-forsøk med tilhørende lab rapport er utført av PhD-kandidat Mahdi Bahrani. NTNU sin leveranse er en selvstendig rapport, og er ikke kvalitetskontrollert av Norconsult.

Norconsult har fungert som prosjektkoordinator gjennom de ulike prosjektfasene. I tillegg har Norconsult bidratt i forprosjekt-fasen og utarbeidelse av vurderingsnotat (dette dokumentet). Norconsult har også utført hydraulisk simulering av væskestrøm med og uten hjulspor.

Det er avholdt jevnlig koordineringsmøter med styringsgruppen både i forprosjektfasen og i test-gjennomføringen.

3 Problemstilling

Følgende problemstillinger er definert:

1) *Hvordan påvirkes væskestrømmen av lengde- og tverrfall, vegmerking og hjulspor.*

Teste i hvilke grad elementer og utforming av vegbanen vil kunne påvirke opptak av væske i sluk

- Lab test utført ved NTNU
- Simulering utført av Norconsult

2) *Hvordan påvirkes kapasiteten for ulike typer sluk av endringer i væskestrømmen som følge av lengde- og tverrfall og vegmerking*

Teste om ulike sluktyper har begrensninger for hvordan væske tas opp.

- Lab test utført ved NTNU⁵

Dimensjonerende krav for lab test og simulering er hentet fra.

- Tverr- og lengdefall etter N500, kapittel 4 Geometrisk utforming [3]
- Veimerking etter N302, kapittel 6.2 Forsterket veimerking [4]
- Hjulspor i veibane etter R610, Tabell 6.1-1 og tabell 6.1-2 [5]

⁵ Lab-test er utført med skalert vegbane og væskemengder. Benyttede sluk er ikke skalert.

4 Laboratorietest (sammendrag)

Laboratorietest utført ved NTNU er beskrevet i egen rapport [Appendiks C]. I dette kapittelet følger et sammendrag av oppsett og funn fra gjennomført testing. Bildet nedenfor viser testriggen hvor testene er gjennomført.

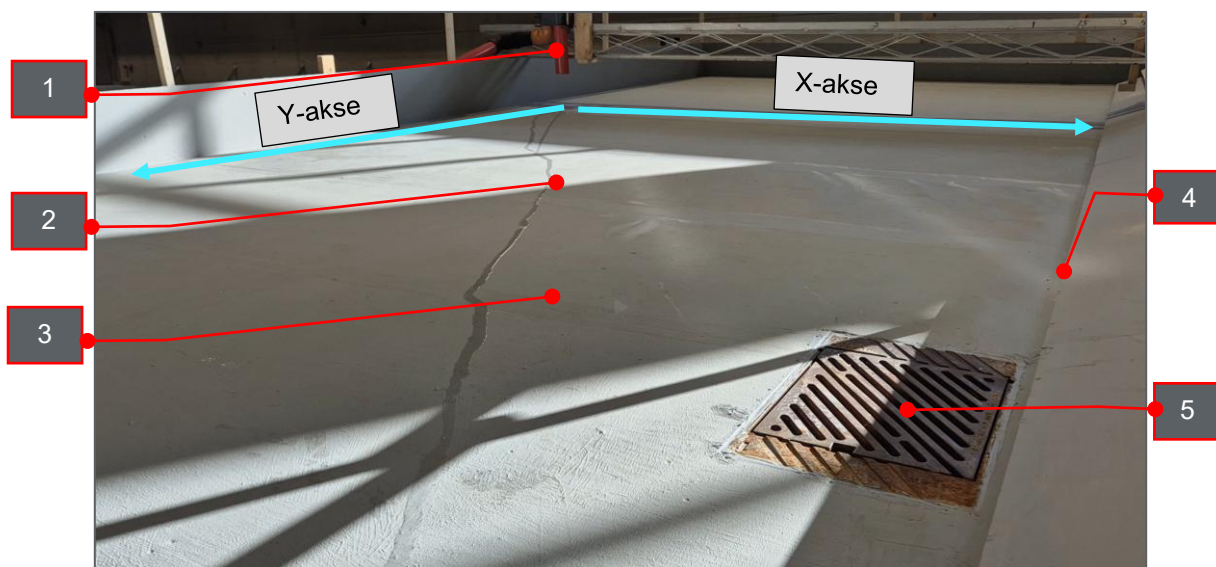


Figur 1 Bildet viser test-riggen på laboratoriet hos NTNU. Riggen er 4,8 meter bred og 12 meter lang.

4.1 Beskrivelse av testrigg

Testriggen er bygget opp med et dekke av treplater som er påført en ru membran. Dekket er montert på en stålramme med justerbare støtter. Testriggen er skalert 1:2 etter mål fra tunnelprofil T11.5. Dette gir et dekke som er 4,8 meter bredt og 12 meter langt.

Utslippspunktet for væske er justerbart og montert på en fagverksbjelke. Utslippspunktet er justerbart langs både X- og Y-aksen på riggen. Testriggen er vist i Figur 2.



Figur 2 Testrigg med beskrivelse. Foto NTNU (2025).

Forklaring til Figur 2:

1. Utslippspunkt, vist som X og Y i Tabell 1
 - a. X = avstand i tverrfallsretningen
 - b. Y = avstand i lengderetningen
2. Vegdekke. Rigger er låst med 3 % tverrfall, men kan endre lengdefall etter behov (her 1,3 og 5 % lengdefall).
3. Vegoverflaten er simulert asfalt, utført med membran påført med kost med grov struktur.
4. Bankettkant. Utforming tilpasset kjeftesluk.
5. Ristlokk. På bilde vises rennestensluk.

Den fysiske modellen er en nedskalert gjengivelse av en hydraulisk strømningsituasjon. For at modellen skal representere virkelige forhold på en korrekt måte, må den oppfylle kravene til geometrisk likhet (formlikhet), kinematisk likhet (bevegelseslikhet) og dynamisk likhet (kraftlikhet). Ved frie overflatestrømmer, som for eksempel væskelekkasjer på en vegbane, oppnås slik likhet ved bruk av Froudes-skalering⁶. Skaleringen er nærmere beskrevet i NTNU sitt eget notat fra laboratorieforsøkene [Appendiks C].

For å beregne utbredelsen av lekkasjen, må både lekkasjemengde og lengde- og tverrfall spesifiseres. Erfaringer fra hendelsen i Skatestraumtunnelen viser at lekkasjeraten var mellom 16 og 20 liter per sekund. Ved å anvende prinsippene for Froudes-skalering, beregnes minimums- og maksimumsverdiene for lekkasjeraten i den skalerte modellen til henholdsvis 2,83 l/s og 3,54 l/s.

4.2 Beskrivelse sluktyper

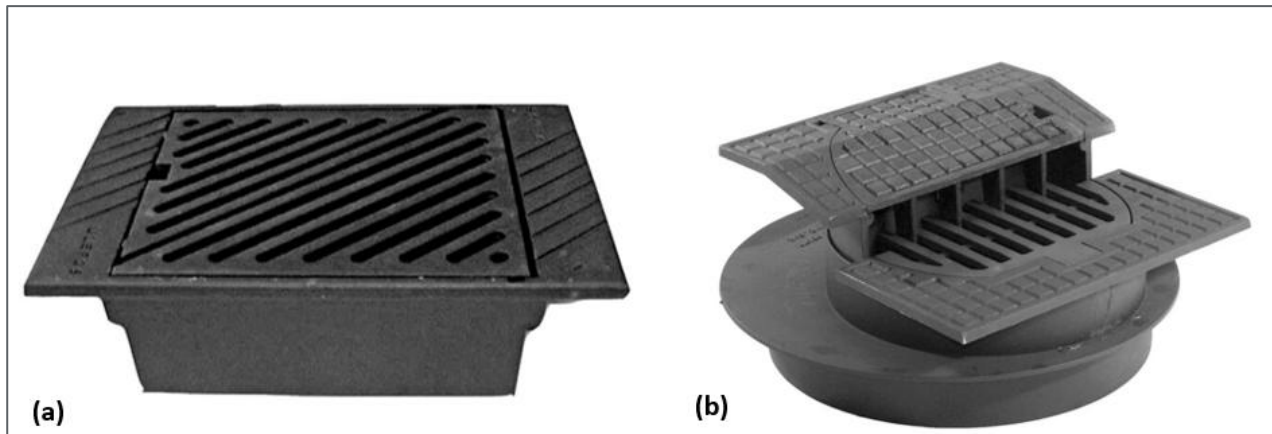
Følgende sluktyper er benyttet i lab:

- Kjeftesluk, testet med Ulefos UFK-650 TR
 - Fra produktdata kjeftesluk; gjennomstrømningsareal 1080/460 cm²
- Ristlokk, testet med Ulefos Oslo rennestensluk
 - Fra produktdata rennestensluk; gjennomstrømningsareal 902 cm²

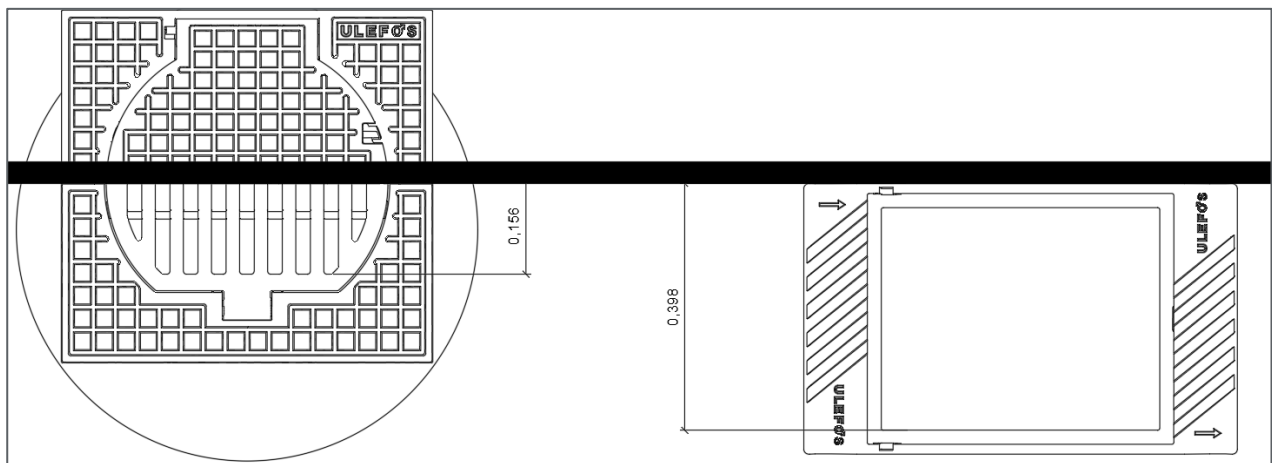
Benyttede sluktyper er vist i Figur 3. Montering av sluk i forhold til bankett er vist i Figur 4.

Lab-test er utført med skalert vegbane og væskemengder. Benyttede sluk er ikke skalert.

⁶ Når Froudes tall for modell er likt som Froudes tall for fullskala, blir forholdet mellom treghets- og tyngdekrafts kreftene bevart. Dette sikrer at væskens bevegelse – som utbredelse og strømming i åpne systemer som lekkasjer på en veibane – oppfører seg fysisk korrekt i modellen til tross for forskjeller i størrelse og hastighet



Figur 3 a) Ulefos Oslo Rennestensluk og b) Ulefoss UFK-650TR kjeftesluk.



Figur 4 Bredde gjennomstrømningsareal i forhold til bankett-kant (angitt mål iht. produktinfo fra produsent).

4.3 Resultater fra labtest (sammendrag)

Tabell 1 viser resultater fra labtestene som er utført ved NTNU. Her er det oppgitt type sluk, utslippspunkt, utslippsmengde og tverr- og lengdefall, samt en målt oppsamlingskapasitet i %. Oppgitt oppsamlingskapasitet er beregnet basert på mengde tilført vann per test og oppsamlet væske via sluk til oppsamlingskar.

Målt oppsamlingskapasitet er ikke representativt for slukets teoretiske innløpskapasitet. Fordi slukene ikke er skalert, er ikke oppsamlingskapasiteten direkte overførbar til større vannmengder.

Tabell 1 Samletabell med labresultater fra NTNU.

Test nummer	Type sluk	Utslippspunkt		Utslipp (l/s)	Tverrfall (%)	Lengdefall (%)	Oppsamlingskapasitet
		X (m)	Y (m)				
1	Rennestensluk	0,5	0,5	2,83	3	5	69 %
2	Rennestensluk	0,5	4	2,83	3	5	22 %
3	Rennestensluk	0,5	0,5	3,54	3	5	66 %
4	Rennestensluk	0,5	4	3,54	3	5	24 %
5	Rennestensluk	0,5	0,5	2,83	3	3	86 %
6	Rennestensluk	0,5	4	2,83	3	3	57 %
7	Rennestensluk	0,5	0,5	3,54	3	3	86 %
8	Rennestensluk	0,5	4	3,54	3	3	55 %
9	Rennestensluk	0,5	0,5	2,83	3	1	91 %
10	Rennestensluk	0,5	5	2,83	3	1	89 %
11	Rennestensluk	0,5	0,5	3,54	3	1	98 %
12	Rennestensluk	0,5	5	3,54	3	1	86 %
13	Kjeftesluk	0,5	0,5	2,83	3	5	71 %
14	Kjeftesluk	0,5	0,5	3,54	3	5	66 %
15	Kjeftesluk	0,5	0,5	2,83	3	3	73 %
16	Kjeftesluk	0,5	0,5	3,54	3	3	69 %
17	Kjeftesluk	0,5	0,5	2,83	3	1	74 %
18	Kjeftesluk	0,5	0,5	3,54	3	1	70 %
19	Kjeftesluk med vegmerking	0,5	0,5	0,3	3	1	94 %
20	Kjeftesluk med vegmerking	0,5	0,5	2,83	3	1	74 %
21	Kjeftesluk med vegmerking	0,5	0,5	3,54	3	1	68 %
22	Kjeftesluk med vegmerking	0,5	0,5	0,3	3	5	89 %
23	Kjeftesluk med vegmerking	0,5	0,5	2,83	3	5	66 %
24	Kjeftesluk med vegmerking	0,5	0,5	3,54	3	5	62 %

4.4 Labtest sammenligning sluktyper og fall

I de følgende delkapitlene er tester med sammenlignbare forhold til væskemengde, tverr- og lengdefall vist.

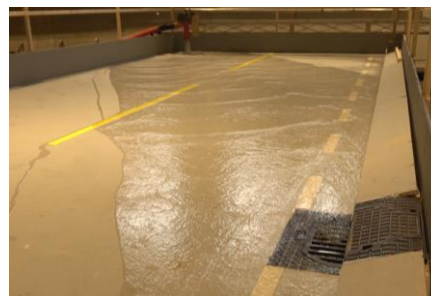
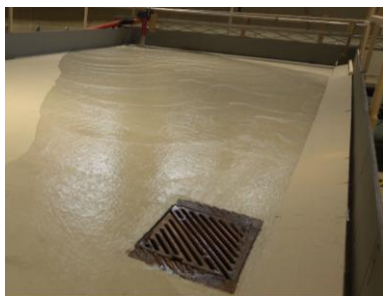
4.4.1 Vannmengde 2,83 l/s, med 5 % lengdefall

I Tabell 2 og Figur 5 er resultater fra testing med vannmengde 2,83 l/s og 5 % lengdefall vist. Testene er gjort med rennestensluk, kjeftesluk og kjeftesluk med vegmerking.

Resultatene viser lav oppsamlingsprosent på grunn av stor bredde på vannføring og dermed liten treff-flate på sluk for begge sluktyper. Det er tilnærmet samme innløpskapasitet for begge sluktyper. Vegmerking gir lite påvirkning.

Tabell 2 Væskemengde 2,83 l/s, 3 % tverrfall og 5 % lengdefall

Test nummer	Type sluk	Utslippspunkt		Utslipp (l/s)	Tverrfall (%)	Lengdefall (%)	Oppsamlingskapasitet
		X	Y				
1	Rennestensluk	0,5	0,5	2,83	3	5	69 %
13	Kjeftesluk	0,5	0,5	2,83	3	5	71 %
23	Kjeftesluk med vegmerking	0,5	0,5	2,83	3	5	66 %



Figur 5 Test 1 (rennestensluk), test 13 (kjeftesluk) og test 23 (kjeftesluk med vegmerking). Foto NTNU (2025)

4.4.2 Vannmengde 2,83 l/s, med 3 % lengdefall

I Tabell 3 og Figur 6 er resultater fra testing med vannmengde 2,83 l/s og 3 % lengdefall vist. Testene er gjort med rennestensluk og kjeftesluk.

Resultatene viser høyere innløpskapasitet enn tilsvarende resultater med 5 % lengdefall. Dette skyldes at væskestrømmen raskere samles inn mot bankett fordi vannhastigheten i lengderetning er lavere pga. lavere fall.

Resultatene viser høyest innløpskapasitet for rennestensluk, da større del av væskestrømmen renner over ristflaten, og tilsvarende lavere innløpskapasitet for kjeftesluk da mindre del av væskestrømmen renner over ristflaten.

Det gjøres oppmerksom på at test nr. 15 gir en våt overflate som er bredere enn den våte overflaten som er vist på bilde fra test nr. 5, fordi testen er utført før overflaten er tørket ut. Forløpet påvirkes av adhesjon. Det vil si at en våt overflate har god kontakt med underlaget, som gjør at ny tilført væske sprer seg raskere. Resultatene er dermed ikke direkte sammenlignbare.

Tabell 3 Væskemengde 2,83 l/s, 3 % tverrfall og 3 % lengdefall

Test nummer	Type sluk	Utslippspunkt		Utslipp (l/s)	Tverrfall (%)	Lengdefall (%)	Oppsamlingskapasitet
		X	Y				
5	Rennestensluk	0,5	0,5	2,83	3	3	86 %
15	Kjeftesluk	0,5	0,5	2,83	3	3	73 %



Figur 6 Test 5 (rennestensluk) og test 15 (kjeftesluk). Foto NTNU (2025).

4.4.3 Vannmengde 2,83 l/s, med 1 % lengdefall

I Tabell 4 og Figur 7 er resultater fra testing med vannmengde 2,83 l/s og 1 % lengdefall vist. Testene er gjort med rennestensluk, kjeftesluk og kjeftesluk med vegmerking.

Resultatene viser at væskestrømmen samles betydelig raskere langs bankett, da vannhastigheten i lengderetning er redusert pga. lavere lengdefall. Treff-flaten for slukene er dermed større, noe som gir økt innløpskapasitet.

Resultatene viser høyere innløpskapasitet for rennestensluk da større del av væskestrømmen renner over ristflaten og tilsvarende lavere innløpskapasitet for kjeftesluk da mindre del av væskestrømmen renner over ristflaten. Vegmerking gir neglisjerbar påvirkning på innløpskapasiteten.

Tabell 4 Væskemengde 2,83 l/s, 1 % tverrfall og 1 % lengdefall

Test nummer	Type sluk	Utslippspunkt		Utslipp (l/s)	Tverrfall (%)	Lengdefall (%)	Oppsamlingskapasitet
		X	Y				
9	Rennestensluk	0,5	0,5	2,83	3	1	91 %
17	Kjeftesluk	0,5	0,5	2,83	3	1	74 %
20	Kjeftesluk med vegmerking	0,5	0,5	2,83	3	1	74 %



Figur 7 Test 9 (rennestensluk), test 17 (kjeftesluk) og test 20 (kjeftesluk m. veimerking). Foto NTNU (2025)

4.4.4 Vannmengde 3,54 l/s, med 5 % lengdefall

I Tabell 5 og Figur 8 er resultater fra testing med vannmengde 3,54 l/s og 5 % lengdefall vist. Testene er gjort med rennestensluk, kjeftesluk og kjeftesluk med vegmerking.

Som for resultatene med 2,83 l/s og 5 % lengdefall, viser resultatene lav oppsamlingsprosent på grunn av stor bredde på vannføring og dermed liten treff-flate på sluk for begge sluktyper. Det er tilnærmet samme innløpskapasitet for begge sluktyper. Vegmerking gir noe lavere innløpskapasitet.

Tabell 5 Væskemengde 3,54 l/s, 3 % tverrfall og 5 % lengdefall

Test nummer	Type sluk	Utslippspunkt		Utslipp (l/s)	Tverrfall (%)	Lengdefall (%)	Oppsamlingskapasitet
		X	Y				
3	Rennestensluk	0,5	0,5	3,54	3	5	66 %
14	Kjeftesluk	0,5	0,5	3,54	3	5	66 %
24	Kjeftesluk med vegmerking	0,5	0,5	3,54	3	5	62 %



Figur 8 Test 3 (rennestensluk), test 14 (kjeftesluk) og test 24 (kjeftesluk med vegmerking). Foto NTNU (2025)

4.4.5 Vannmengde 3,54 l/s, med 3 % lengdefall

I Tabell 6 og Figur 9 er resultater fra testing med vannmengde 3,54 l/s og 3 % lengdefall vist. Testene er gjort med rennestensluk og kjeftesluk.

Resultatene viser høyere innløpskapasitet enn tilsvarende resultater med 5 % lengdefall. Dette skyldes at væskestrømmen raskere samles inn mot bankett fordi vannhastigheten i lengderetning er lavere pga. lavere fall.

Resultatene viser betydelig høyere innløpskapasitet for rennestensluk, da større del av væskestrømmen renner over ristflaten, og tilsvarende lavere innløpskapasitet for kjeftesluk da mindre del av væskestrømmen renner over ristflaten.

Tabell 6; Væskemengde 3,54 l/s, 3 % tverrfall og 3 % lengdefall

Test nummer	Type sluk	Utslippspunkt		Utslipp (l/s)	Tverrfall (%)	Lengdefall (%)	Oppsamlingskapasitet
		X	Y				
7	Rennestensluk	0,5	0,5	3,54	3	3	86 %
16	Kjeftesluk	0,5	0,5	3,54	3	3	69 %



Figur 9 Test 7 (rennestensluk) og test 16 (kjeftesluk). Foto NTNU (2025)

4.4.6 Vannmengde 3,54 l/s, med 1 % lengdefall

I Tabell 7 og Figur 10 er resultater fra testing med vannmengde 3,54 l/s og 1 % lengdefall vist. Testene er gjort med rennestensluk og kjeftesluk.

Resultatene viser at væskestrømmen samles raskt langs bankett. Treff-flaten for slukene er dermed større, noe som gir økt innløpskapasitet.

Resultatene viser betydelig høyere innløpskapasitet for rennestensluk da større del av væskestrømmen renner over ristflaten, og tilsvarende lavere innløpskapasitet for kjeftesluk da mindre del av væskestrømmen renner over ristflaten. For rennestensluk samles tilnærmet hele væskemengden opp i sluket.

Tabell 7; Væskemengde 3,54 l/s, 3 % tverrfall og 1 % lengdefall

Test nummer	Type sluk	Utslippspunkt		Utslipp (l/s)	Tverrfall (%)	Lengdefall (%)	Oppsamlingskapasitet
		X	Y				
11	Rennestensluk	0,5	0,5	3,54	3	1	98 %
18	Kjeftesluk	0,5	0,5	3,54	3	1	70 %



Figur 10 Test 11 (rennestensluk) og test 18 (kjeftesluk). Foto NTNU (2025)

4.4.7 Vannmengde 0,3 l/s, med 1 og 5 % lengdefall;

Test nummer 19 og 22 er utført for kontroll av Mannings formel (hydraulisk radius). Testet væskemengde er så liten at den ikke går ut over ristbredden for kjeftesluk. Oppsamlingskapasitet for begge tester viser at ca. 90 % av væskemengden blir samlet opp av sluket.

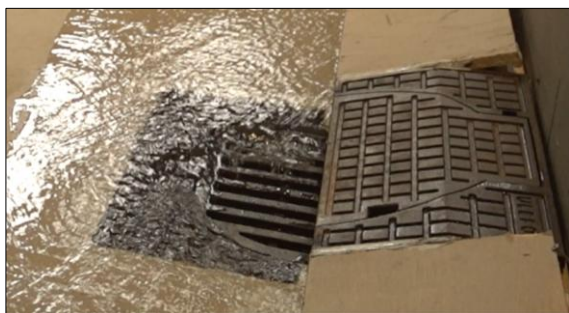
Tabell 8; Væskemengde 0,3 l/s, 3 % tverrfall, 1 % og 5 % lengdefall

Test nummer	Type sluk	Utslippspunkt		Utslipp (l/s)	Tverrfall (%)	Lengdefall (%)	Oppsamlingskapasitet
		X	Y				
19	Kjeftesluk med vegmerking	0,5	0,5	0,3	3	1	94 %
22	Kjeftesluk med vegmerking	0,5	0,5	0,3	3	5	89 %

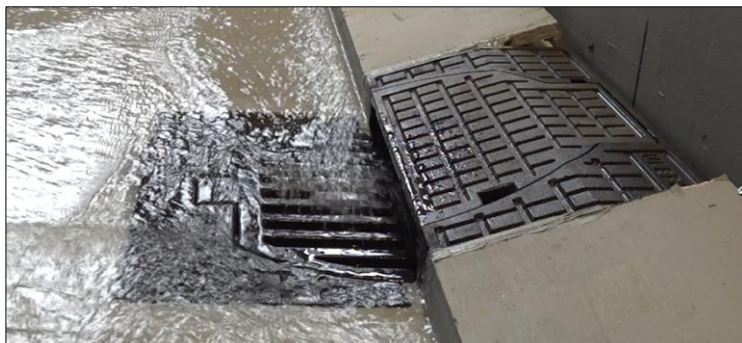
4.5 Observasjoner

Ved lengdefall på 5 % har kjeftesluk og rennestensluk tilnærmet samme oppsamlingskapasitet, ved de undersøkte væskemengdene, mens rennestensluk har klart best oppsamlingskapasitet ved lengdefall ≤ 3 %.

Alle tester viser at begge sluktypers mulige innløpskapasitet ikke utnyttes 100 %. Figur 11 og Figur 12 viser at vannstrømmen som treffer slukets innløpsareal håndteres i øvre del av risten, slik at ikke hele innløpsarealet er utnyttet.

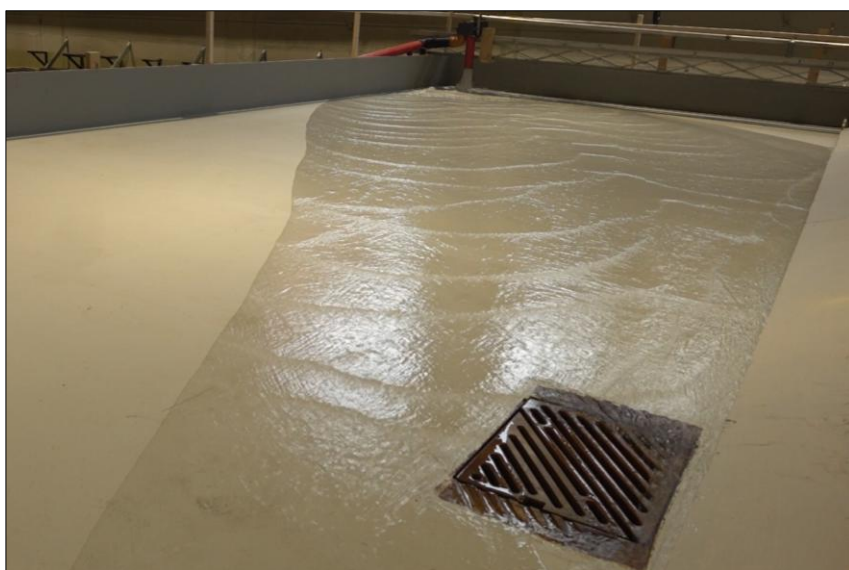


Figur 11 Test 17, utnyttelse innløpskapasitet ved 2,83 l/s og 3 % lengdefall. Foto NTNU (2025)



Figur 12 Test 14, utnyttelse innløpskapasitet ved 3,54 l/s og 5 % lengdefall. Foto NTNU (2025)

Utslippsstedet for væske vil kunne variere i forhold til avstand til sluk og bankett. Dette vil derfor påvirke oppsamlingskapasiteten. Lab test (og simulering) viser at væskestrømmen trenger en viss lengde før den samles inn mot bankett. Nødvendig lengde øker med økende lengdefall. Figur 13 viser at væskestrømmen ikke har rukket å samle seg langs bankett på tilgjengelig avstand mellom utslippspunkt og sluk.



Figur 13 Test 3 utbredelse væskestrøm ved 3,54 l/s og 3 % lengdefall. Utslippssted ift. plassering av sluk.

5 Hydraulisk simulering av hjulspor

I utført laboratorietest er det ikke sett på hvilken effekt hjulspor har på avrenning av væske i vegbanen. Simuleringer er utført for å kartlegge hvordan hjulspor påvirker væskestrømmen, og vurdere i hvor stor grad hjulspor forsinker/reduserer opptak av væske i etablerte sluk.

5.1 Sammendrag fra simulering

Det er utført hydraulisk simulering i HEC-RAS av avrenning på henholdsvis 16 l/s og 20 l/s i 4 minutter, ved ulike lengdefall. HEC-RAS er et beregningsprogram som beregner vannhastighet, -dybde og -utbredelse i et definert rutenett, fra innløp i modellen til utløp. Simuleringene er gjort med og uten hjulspor. Resultatene er kontrollert mot beregninger for kanalstrømning med Mannings formel. I Mannings formel beregnes vannhastighet og -dybde ut fra kanalens utforming og helning, ved en definert vannføring, og er brukt til å beregne teoretisk vannføringskapasitet i et hjulspor.

Resultatene viser at ved hjulspor med 2 cm dybde, vil ca. halvparten av avrenningen følge hjulsporene ved et lengdefall på 1 %. Resterende avrenning renner langs banketten på siden av vegbanen. Ved 5 % lengdefall vil tilnærmet hele avrenningsmengden følge hjulsporene.

Hjulspor med 1 cm dybde reduserer vannmengden som følger hjulspor betydelig. Resultatene fra hydraulisk simulering er vanskelig å tallfeste, da HEC-RAS benytter m^3/s , tilsvarende 1000 l/s. Beregning med Mannings formel viser at kapasiteten per hjulspor er mellom 0,7 – 1,5 l/s ved 1 cm dybde, avhengig av lengdefall.

5.2 Hydraulisk simulering

5.2.1 Beskrivelse av beregningsmodell

Vannstand og vannhastigheter er beregnet ved bruk av en todimensjonal vannlinjemodell i HEC-RAS⁷ v.6.5. HEC-RAS er i hovedsak utarbeidet for hydraulisk analyse av vannføring i vassdrag. En hydraulisk simulering beregner vanndybde ved en gitt vannføring, basert på terreng/topografi. Fordelene med hydraulisk simulering er at det er tidsbesparende i forhold til modellforsøk, og at simuleringer kan gjøres i full skala.

Følgende beregningsforutsetninger er lagt til grunn:

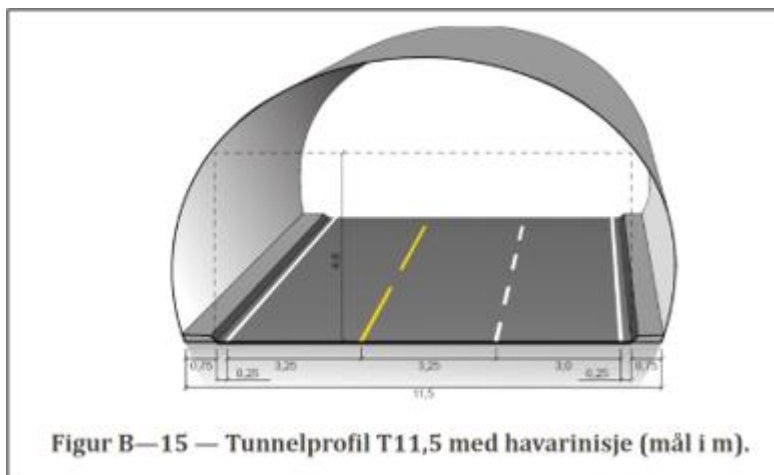
- Terrenggrunnlaget er en flate med 3% tverrfall og henholdsvis 1%, 3%, 5% og 10% lengdefall.
- Det er benyttet et beregningsnett med oppløsning på 0,2 x 0,2 meter, og 0,1 x 0,1 meter for situasjon med 5% og 10% lengdefall.
- Det er benyttet Mannings tall på 0,014 ($M=70$).
- Ligningssettet «SWE-ELM⁸» er benyttet, med couranttall under 1.
- Simuleringer er gjort med rent vann på en rett strekning. Dette er en forenkling, men vurderes likevel å gi et godt bilde på utbredelsen av væskesøl i vegbanen.
- Analyseområdet har en total bredde på 11,5 meter, og lengde på ca. 48 meter. Lengden er vurdert som tilstrekkelig for å vise hjulsporenes påvirkning på væskestrømmen.
- Alle simuleringer er gjort uten sluk.
- Det er benyttet vannføring på 16 l/s og 20 l/s i 4 minutter. Dette tilsvarer totalt 3840 – 4800 liter, tilsvarende ulykken i Skatestraumtunnelen i 2015.

⁷ Hydrologic Engineering Center – River Analysis System. Gratis programvare levert av US Army Corps of Engineers

⁸ Shallow Water Equations, Eulerian-Lagrangian Method – gruntvannsligninger

5.2.2 Analyseområdet

Vegbanen er lagt inn i henhold til mål fra tunnelprofil T11,5, som vist i Figur 14. Vegbanen har 10 meter bredde fordelt på 3 kjørefelt, og bankett på begge sider med bredde 0,75 meter. Total bredde er 11,5 meter.



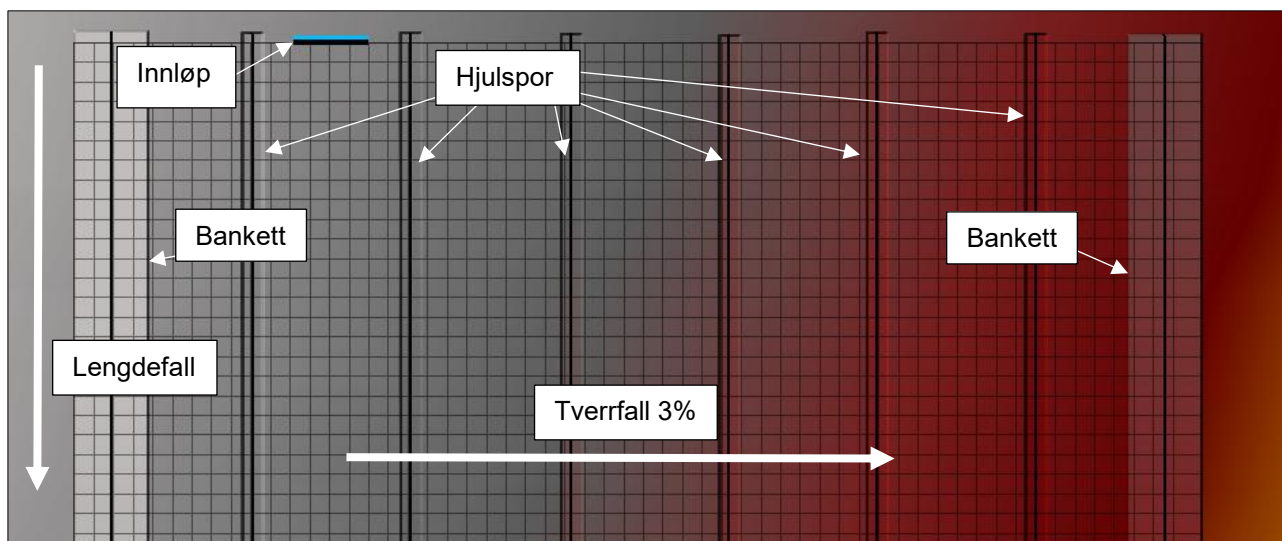
Figur B—15 — Tunnelprofil T11,5 med havarinisje (mål i m).

Figur 14 Tunnelprofilen som er undersøkt.

Simuleringer er gjort med og uten hjulspor. Dimensjoner på hjulspor er avklart med Statens Vegvesen og Vegdirektoratet, og er lagt inn med følgende dimensjoner:

- Bunnbredde 20 cm
- Dybde 2 cm og toppbredde 30 cm / Dybde 1 cm og toppbredde 25 cm
- Hjulsporene er sentrert i hvert kjørefelt, med 1,6 meter bredde mellom hjulsporene (senter-senter).

Innløpet til modellen (utslippspunktet) er plassert ca. midt mellom hjulsporene i kjørefeltet øverst i analyseområdet. Utklipp av analyseområder er vist i Figur 15.

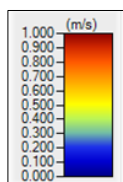


Figur 15 Utsnitt av analyseområdet inkl. hjulspor. Det er gjort simuleringer med henholdsvis 1%, 3%, 5% og 10% lengdefall. Rød farge viser laveste nivå.

5.3 Resultater fra simulering

Resultater med 10% lengdefall er ikke vist, da det ikke har vært mulig å få til en stabil modell.

Alle figurer er vist med væskeutbredelse og vannhastighet. Vannhastigheten er vist med en skalering som vist i Figur 16, der blå farge er lavest hastighet (ned mot 0 m/s), og rød farge viser høyest hastighet (1 m/s). Vanndybden er ikke vist.



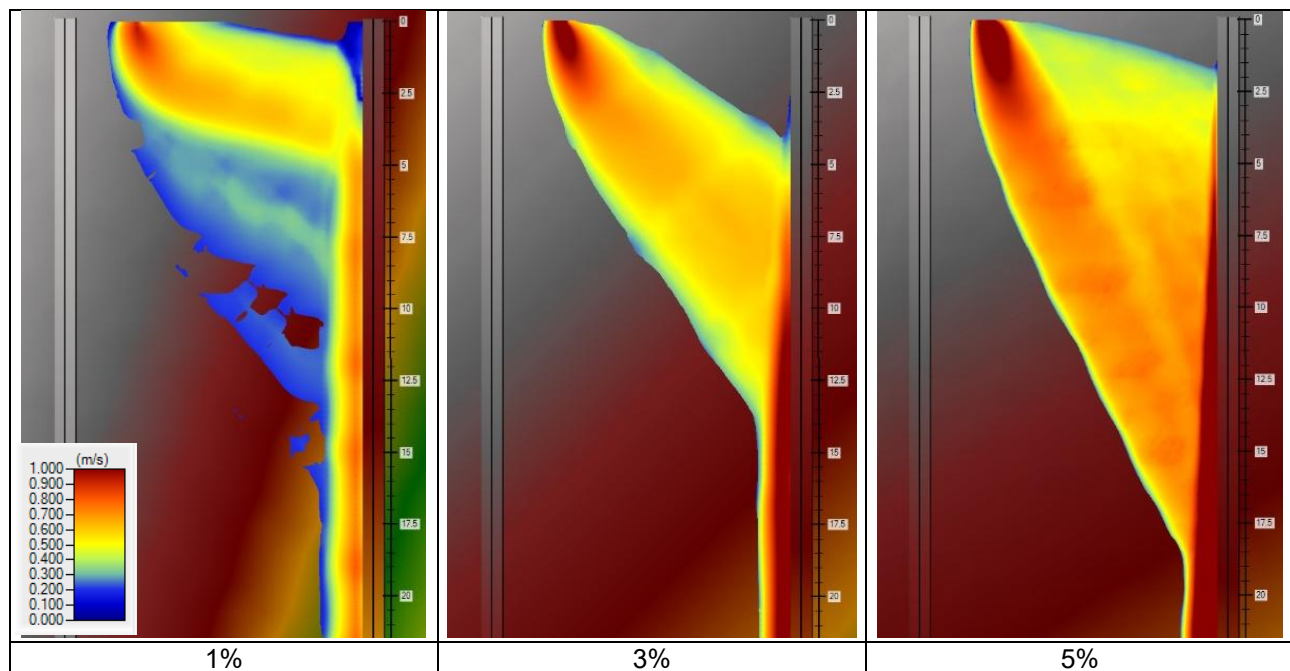
Figur 16. I figurene fra simulering er vannhastigheten vist med en fargeskala der blå er laveste hastighet (ned mot 0 m/s), og rød farge er høyest hastighet (1 m/s).

5.3.1 Simulering uten hjulspor

Vannhastighet og utbredelse mellom utslippspunkt og 20 meter nedstrøms er vist i Figur 17. Alle simuleringer uten hjulspor er gjort med vannføring på 20 l/s i 4 minutter.

Simuleringene viser at ved større lengdefall vil strekningen før væskestrømmen samles langs banketten være noe lengre. Ved 1 % lengdefall renner store deler av væskestrømmen langs banketten allerede etter 5-10 meter. Ved 3 % lengdefall er væskestrømmen samlet langs bankett etter ca. 15 meter, og ved 5 % lengdefall tar det nesten 20 meter før hele væskestrømmen er samlet langs bankett.

Etter 20 meter er maks hastighet henholdsvis 0,7 m/s, 1,2 m/s og 1,7 m/s for 1%, 3% og 5% lengdefall, og 3% tverrfall. Maks dybde ved bankett er 3 - 4 cm i alle tilfellene, og bredden ca. 1,1 meter.



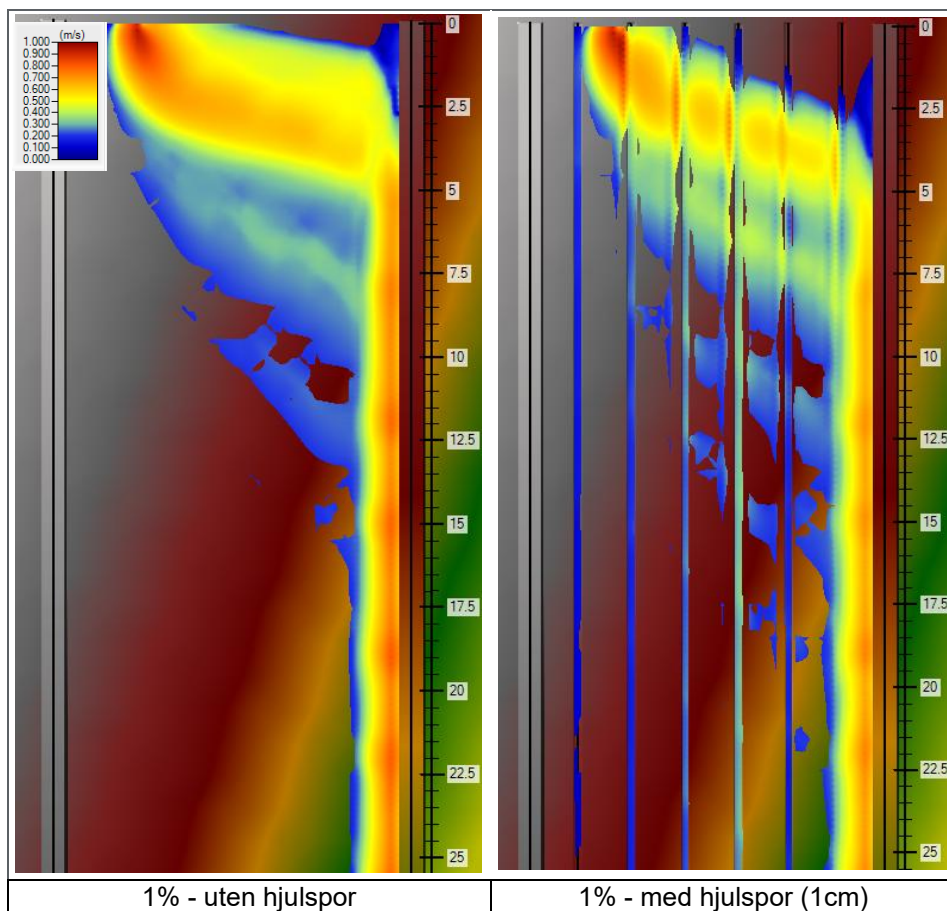
Figur 17 Simulering uten hjulspor med vannføring på 20 l/s i 4 minutter, med henholdsvis 1%, 3% og 5% lengdefall. Tverrfall er 3% i alle simuleringer. Figurene viser vannhastighet i m/s, og skalaen på siden viser avstand i meter.

5.3.2 Simulering med 1 cm dype hjulspor

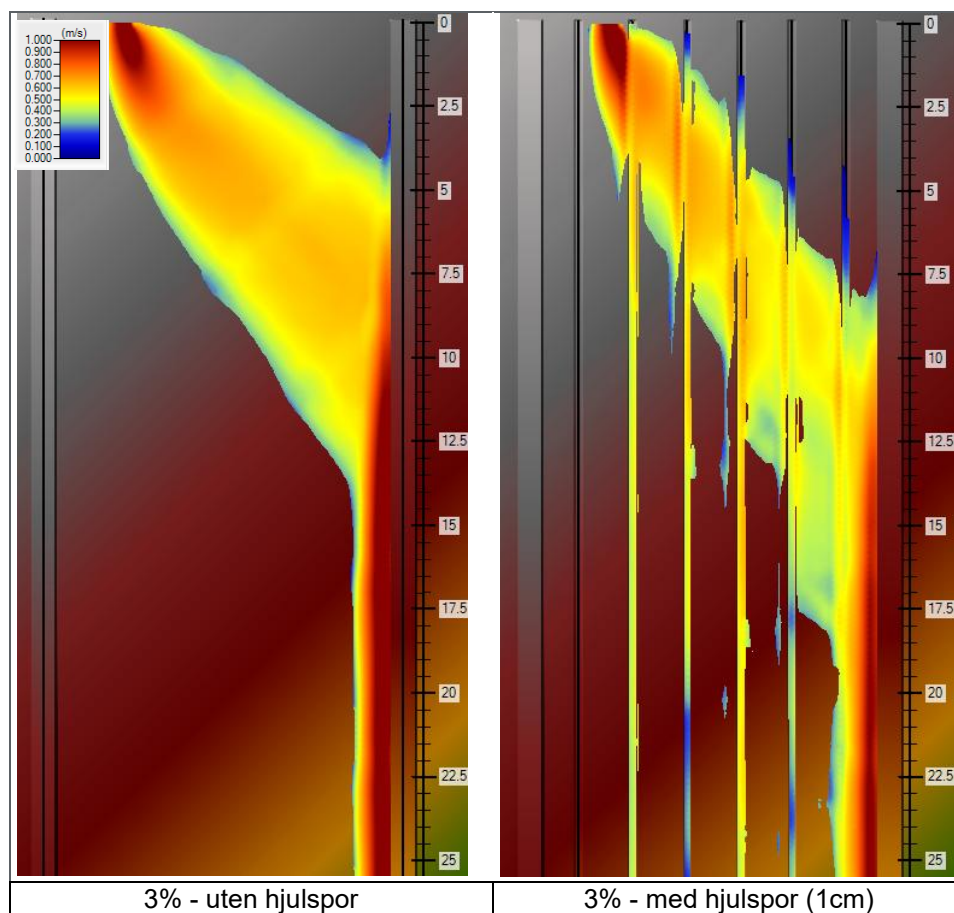
Simulering med 1 cm dype hjulspor er gjort med vannføring på 20 l/s, og med lengdefall 1%, 3%, 5% og 10%, og 3% tverrfall. Ved simulering over 5% lengdefall er det vanskelig å få helt stabile resultater, og resultater for 10% lengdefall er derfor ikke vist.

Resultatene fra simuleringene er vist i Figur 18 - Figur 20. Resultatene viser at noe vann vil følge hjulsporene, men at en stor andel av vannet vil renne mot banketten som i situasjonen uten hjulspor. Hvor mye vann som følger hjulsporene er vanskelig å tallfeste, da dette bare er noen få liter per sekund (HEC-RAS benytter m³/s tilsvarende 1000 l/s).

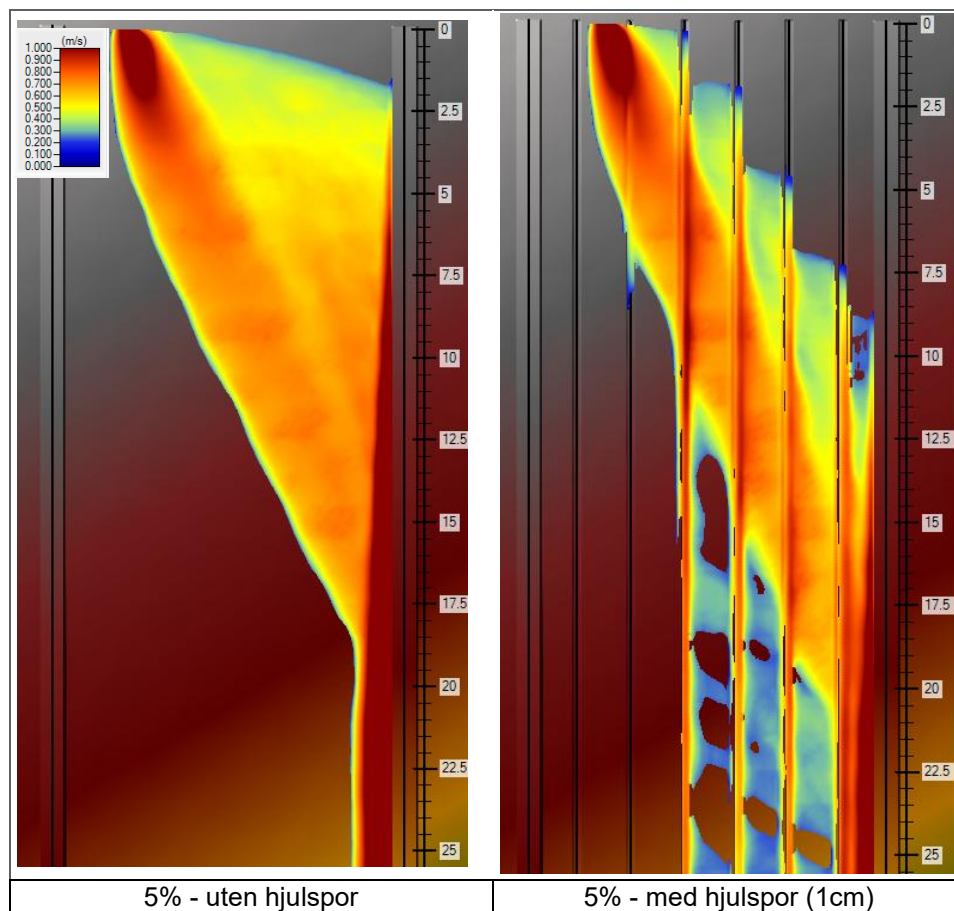
Vannhastigheten i hjulsporene er høyere ved økende lengdefall. For situasjonen med 1 % lengdefall er vannhastigheten lav (blå), mens ved økende tverrfall er vannhastigheten større (gul ved 3 % lengdefall og rød ved 5 % lengdefall).



Figur 18 Simulering med og uten 1 cm dype hjulspor, med 1% lengdefall og 3% tverrfall.



Figur 19 Simulering med og uten 1 cm dype hjulspor, med 3% lengdefall og 3% tverrfall.



Figur 20 Simulering med og uten 1 cm dype hjulspor, med 5% lengdefall og 3% tverrfall.

5.3.3 Simulering med 2 cm dype hjulspor

Simulering med 2 cm dype hjulspor er gjort med vannføring på henholdsvis 16 og 20 l/s, og med lengdefall 1%, 3%, 5% og 10%, og med 3% tverrfall. Ved simulering over 5% lengdefall er det vanskelig å få helt stabile resultater, og resultater for 10% lengdefall er derfor ikke vist. Resultatene fra simuleringene er vist i Tabell 9 og Figur 21. Resultatene viser at ved 5% lengdefall renner tilnærmet hele vannmengden i hjulsporene.

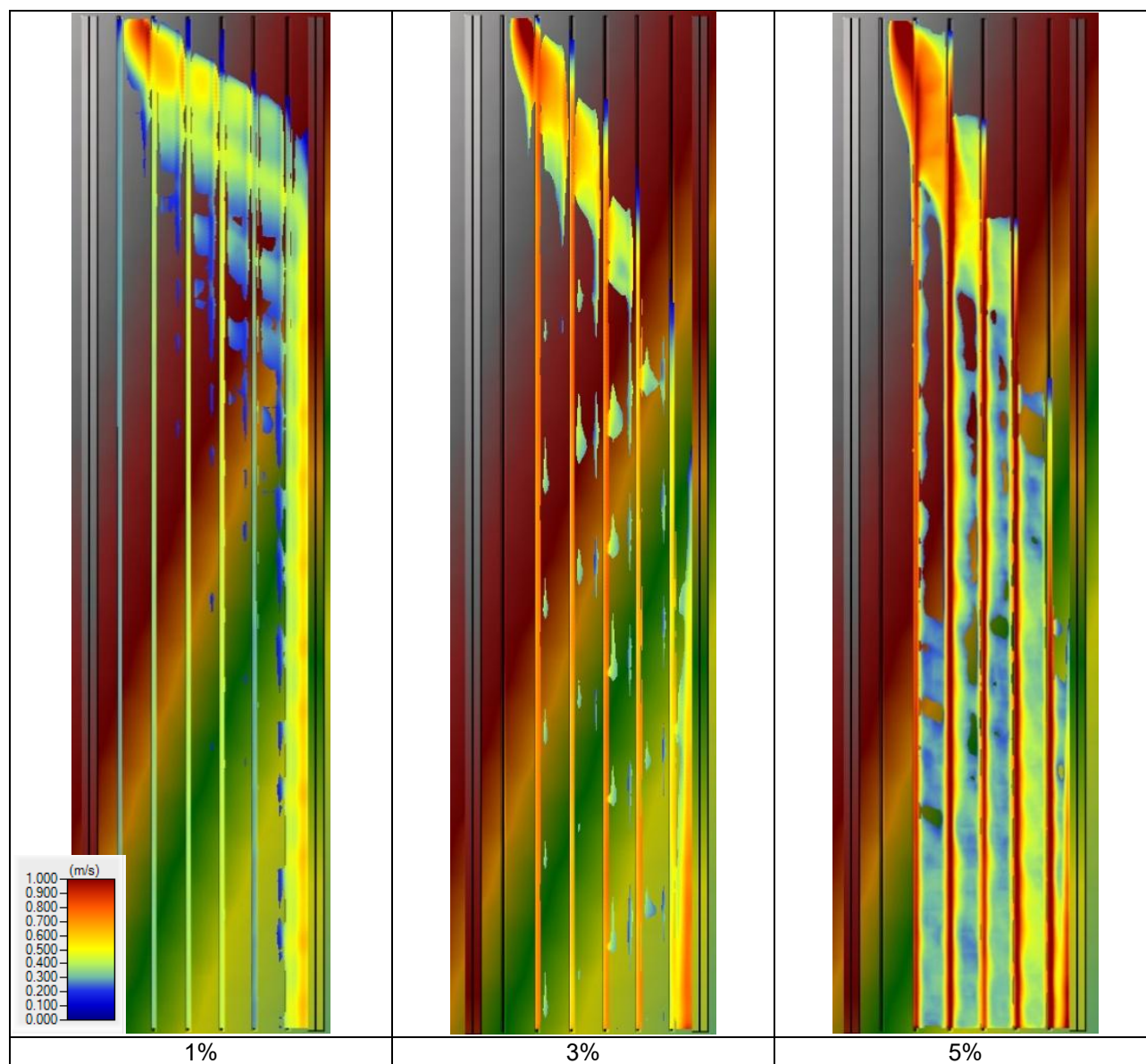
Simulering med hjulspor viser at andelen vann som følger hjulsporene øker med økende lengdefall, som vist i Tabell 9. Dette skyldes økt vannhastighet som følge av økt fall, og dermed økt avrenningskapasitet i hjulsporene.

Tabell 9 Simulering med 2 cm dype hjulspor

Nr.	Lengdefall	Vannmengde tilført	Maks vannmengde i hjulspor	Prosent av maks avrenning
1	1 %	16 l/s	8 l/s	50 %
2		20 l/s	10 l/s	50 %
3	3 %	16 l/s	15 l/s	94 %
4		20 l/s	15 l/s	75 %

Nr.	Lengdefall	Vannmengde tilført	Maks vannmengde i hjulspor	Prosent av maks avrenning
5	5 %*	16 l/s		≈ 100 %
6		20 l/s		≈ 100 %

*vanskelig å få stabil modell



Figur 21 Simulering med 2 cm dype hjulspor ved ulike lengdefall.

5.4 Sensitivitetsanalyse

5.4.1 Mannings tall

Simuleringer er gjort med Mannings tall $M=70$ ($n=0,014$).

Det er utført sensitivitetsanalyse med Mannings tall $M=55$ ($n=0,018$), det vil si et noe ruere/grovere underlag. Resultatet fra analysen viser noe redusert vannføring i hjulspor. Dette skyldes lavere vannhastighet ved økt ruhet, noe som igjen gir lavere vannføringskapasitet i hjulspor. Endringen i vannføring er så liten at den er vanskelig å tallfeste, og antas dermed neglisjerbar.

5.4.2 Laminær strømning

HEC-RAS er i utgangspunktet utviklet for turbulent strømning i vassdrag. Ved lav dybde og jevnt underlag vil strømningen derimot være tilnærmet laminær. HEC-RAS beregner strømning under 6 cm dybde som laminær strømning.

Det er ikke registrert dybder over 6 cm i simuleringen. Det er likevel gjort en sensitivitetsanalyse der overgangen til laminær strømning er satt til 20 cm. Analysen er gjort med 3 % lengdefall med og uten hjulspor (2 cm). Resultatene viser at økning av grense for overgang til laminær strømning fra 6 cm til 20 cm ikke påvirker resultatet.

5.5 Kontrollberegning med Mannings formel

For kontrollberegning av resultatene fra hydraulisk simulering, er det gjort beregninger med Mannings formel for kanalstrømning. Det er benyttet Mannings tall $M=70$. Resultatene fra kontrollberegning er sammenfallende med resultatene fra hydraulisk simulering.

Mannings formel er gitt ved

$$v = M * R^{\frac{2}{3}} * \sqrt{I}$$

der v = Middelhastighet (m/s)

M = Mannings tall ($m^{1/3}/s$)

$R = A_v/P$ = Hydraulisk radius (m)

A_v = Vått tverrsnittsareal (m^2)

P = Våt tverrsnittspereferi (m)

I = Fall (m/m)

Manningstall påvirkes av ruheten til asfalten. Vanlig Mannings tall for asfalt er $M=70$.

5.5.1 Vannføringskapasitet i hjulspor

Resultatene fra beregning med Mannings formel er vist i Tabell 10. Fordi utslippspunktet er satt mellom to hjulspor, er total kapasitet vist for både 5 og 6 hjulspor.

Resultatene viser at ved 2 cm dype hjulspor og 1 % lengdefall, vil hjulsporene ha kapasitet til ca. halve utslippsmengden på 20 l/s. Økt lengdefall gir økt vannhastighet i lengderetning, og kapasiteten per hjulspor

vil da øke. Resultater fra simuleringer, vist i tabell 9, og kontrollberegning med mannings formel, viser at ved lengdefall større enn 3% vil hjulsporene ha kapasitet til opp mot hele den simulerte utslippsmengden.

Vannføringskapasitet i hjulspor reduseres betydelig ved 1 cm dybde.

Resultatene fra kontrollberegning sammenfaller med funn fra hydraulisk simulering.

Tabell 10 Beregnet kapasitet i hjulspor med Mannings formel.

Lengdefall	Kapasitet per hjulspor (l/s)	Total kapasitet i hjulspor - 5 spor (l/s)	Total kapasitet i hjulspor - 6 spor (l/s)
Dybde 2 cm			
1 %	2,2	11,0	13,2
3 %	3,9	19,5	23,4
5 %	5,0	25,0	30,0
Dybde 1 cm			
1 %	0,7	3,5	4,2
3 %	1,2	6,0	7,2
5 %	1,5	7,5	9,0

5.5.2 Beregnet vanndybde ved bankett uten hjulspor

Vanndybde ved bankett er beregnet med kanalprofil med ensidig tverrfall på 3 %, lengdefall på henholdsvis 1, 3 og 5 %, og vannføring på 20 l/s. Beregningen viser at vanndybden ved bankett vil være mellom 3,0 - 4,5 cm, og hastigheten mellom 0,6 – 1,3 m/s. Bredden på vannspeilet er beregnet til 1 – 1,5 meter. Resultatene er oppsummert i Tabell 11

Tabell 11 Beregnet vannhastighet og dybde ved bankett med ulike lengdefall, uten hjulspor.

Lengdefall	Vannhastighet (m/s)	Maks dybde (cm)	Bredde på vannspeil (m)
1 %	0,6	4,5	1,5
3 %	1,0	3,5	1,2
5 %	1,3	3,0	1,0

Til sammenligning viste resultatene fra simulering uten hjulspor dybde på 3 – 4 cm, hastighet på 0,7 – 1,7 m/s, og bredde på vannspeilet på ca. 1,1 meter. Dette samsvarer bra med beregningene.

6 Sammenstilling labtest og simulering

Faktorer som påvirker væskestrøm på veioverflaten

Avrenning på vei påvirkes av en kombinasjon av geometriske forhold (lengde-/tverrfall), overflateegenskaper (ruhet, våthet), og strukturelle elementer (hjulspor, veimerking og slukplassering). Slukets kapasitet er teoretisk høy, men praktisk effektivitet avhenger av hvordan væsken faktisk fordeler seg på overflaten.

Lengdefall og tverrfall: Det resulterende fallet, som er en kombinasjon av disse, avgjør hovedretningen for væskestrømmen.

Veimerking: Kan midlertidig avlede væsken, særlig ved små væskemengder.

Hjulspor: Langsgående fordypninger kan samle og lede væsken langs sporene, og påvirke strømningsretningen.

Asfaltens ruhet: Økt overflateruhet gir høyere friksjon og kan redusere strømningshastigheten og endre utbredelsen.

Slukets plassering: Slukets beliggenhet i forhold til væskestrømmens startpunkt er avgjørende for effektiv oppsamling og avrenning.

Disse faktorene må vurderes samlet for å forstå og modellere væskestrømmens oppførsel på veiens overflate.

6.1 Ulike sluktypers oppsamlingskapasitet

De slukene som er benyttet i laboratorietestene er ikke skalert i henhold til testtriggens dimensjoner eller de anvendte væskemengdene. Slukenes oppsamlingskapasitet er derfor kun relevant innenfor det spesifikke væskevolumet som er testet. Begge sluktypers oppsamlingskapasitet er ved testede væskemengder ikke utnyttet maks.

Ved lavt lengdefall har rennestensluk generelt høyere oppsamlingskapasitet. Testresultater viser imidlertid at ved et lengdefall på 5 % har både kjeftesluk og rennestensluk tilnærmet lik kapasitet.

Når væsken samles langs banketten, vil bredden på væskestrømmen (Mannings formel) variere avhengig av væskemengde, lengdefall og tverrfall. Ved væskemengder over 0,3 l/s og et tverrfall på 3 % vil væskestrømmen teoretisk dekke hele innløpsarealet til ett kjeftesluk. For rennestensluk kreves noe høyere væskemengde for å oppnå tilsvarende dekning.

Teoretisk innløpskapasitet for rist kan beregnes etter NS EN124, ved formelen

$$Q = C * A * \sqrt{2 * g * h}$$

der Q = vannmengde (m^3/s)

C = utløpskoeffisient (normalt 0,6)

A = Åpningsareal (m^2), gitt av produsent

g = tyngdeakselerasjon ($9,8 \text{ m/s}^2$)

h = vannhøyde over åpning

Formelen gjelder ved stillestående vann, men kan benyttes for å vurdere/beregne slukets oppsamlingspotensiale.

Teoretisk innløpskapasitet ved 2 cm vannhøyde;

- a. Kjeftesluk, Ulefos UFK-650 TR ca. 24,4 l/s
- b. Ristlokk, Ulefos Oslo rennestensluk ca. 33,9 l/s

Teoretisk innløpskapasitet, viser at potensiale i de sluktyper som er testet ikke er fullt utnyttet ved de væskemengder som benyttet. Ved større væskemengder vil innløpskapasiteten utnyttes bedre.

6.1.1 Lengde- og tverrfall

Lengdefall påvirker væskens hastighet og retning i hovedstrøms retningen. Jo større lengdefall, desto raskere vil væsken renne i lengderetningen, og strømmen blir mer konsentrert og rettlinjert.

Tverrfall styrer hvordan væsken fordeler seg sideveis på overflaten. Et større tverrfall vil føre til at væsken renner raskere inn mot bankett, og kan gi en asymmetrisk utbredelse av lekkasjen.

Kombinasjonen av lengde- og tverrfall bestemmer dermed både retningen, hastigheten og utbredelsen av væskestrømmen.

Bredden på væskestrømmen (langs bankett) er særlig viktig ved vurdering av slukets innløpsbredde og kapasitet.

6.1.2 Veimerking (kun labtest)

Veimerking har begrenset betydning ved store væskemengder, men kan avlede mindre væskestrømmer. Ved heltrukken veimerking kan væsken ledes over lengre avstander før den «returnerer til hovedstrømmen».

6.1.3 Hjulspor (kun simulering)

Hjulspor fungerer som langsgående renner der vann kan samle seg, spesielt ved lite tverrfall. Væske som normalt ville ha fulgt veibanens helning, ledes langs hjulsporet. Dette kan føre til uforutsigbare strømningsmønstre og påvirke hvordan lekkasjer eller utslipp sprer seg.

Ved væskelekkasje vil hjulspor forsinke vannets vei til bankett og oppsamling i sandfang.

Hjulspor kan avlede væskestrømmen midlertidig, men effekten er begrenset av volumet som hjulsporet kan romme. Ved simulering med 16 l/s og 20 l/s avledes tilnærmet hele den utspilte væsken av hjulsporene ved 5 % lengdefall, dersom hjulsporene er 2 cm dype.

6.2 Asfalt

Grov eller ru asfalt gir økt friksjon mot væsken, noe som reduserer strømningshastigheten og kan føre til mer turbulent strøm. En jevn og glatt asfaltflate gir mer laminær strøm og raskere avrenning, mens ru overflate kan føre til ujevn spredning og lokal opphopning. Dette er særlig relevant ved lekkasjer, hvor ruheten kan påvirke hvor langt og i hvilken retning væsken beveger seg.

Ru asfalt kan ha større mikroporer og tekstur som midlertidig holder på væske, noe som kan forsinke avrenning og påvirke målinger av utbredelse. Ved lab tester er overflaten simulert ved bruk av membran påført med grov kost. Det er ikke vurdert hvor representativt valgt overflate er ift. asfalt.

Våt asfalt

En våt overflate har lavere friksjonsmotstand enn en tørr overflate, noe som kan føre til økt strømningshastighet og mer laminær strømning.

Væske som tilføres en allerede fuktig overflate vil lettere spre seg bredere og jevnere, ettersom overflatespenningen mellom væsken og underlaget er redusert. Dette kan føre til større utbredelse av væskestrømmen, spesielt ved små helninger.

Tester utført på våt overflate (test 15 og 16) viser at overflatens tilstand har betydning for hvordan væsken fordeler seg og spres.

7 Anbefalinger

I det følgende følger hovedfunnene fra arbeidet, med tilhørende anbefaling til hvordan funnet kan håndteres på en god måte.

Funn 1; Laboratorietester og simulering viser at overflateavrenning i stor grad påvirkes av både lengde- og tverrfall. Ved stort lengdefall fordeler vannet seg først i lengderetningen, slik at det beveger seg et stykke før det samles og ledes langs banketten. På samme måte vil et markert tverrfall føre til at vannet raskt samles inn mot banketten. Ved mindre resulterende fall enn 2,0 %, som er minstekravet, vil ujevnheter og oppmerking i større grad påvirke væskestrømmen og avrenningshastigheten.

Anbefaling 1; I veitunnel anbefales å ikke avvike fra krav i N100, som angir minimum 2,0 % resulterende fall.

Funn 2; Laboratorietester viser at veimerking har liten innvirkning på væskestrømmen når det benyttes stiptet oppmerking. Ved sammenhengende oppmerking kan en mindre væskestrøm følge linjen langs merkingen.

Anbefaling 2; Langs kjørebane kant anbefales at heltrukken oppmerking splittes oppstrøms sluk, slik at væsken kan samles inn mot bankett før sluk.

Funn 3; Simuleringene viser at hjulspor har betydelig innvirkning på væskestrømmen. Ved maksimal hjulspordybde i henhold til R610 og stort lengdefall kan hjulsporene ha en væskekapasitet som overstiger den normale overflateavrenningen. Simuleringen viser videre at hjulsporenes innvirkning på væskestrømmen reduseres betydelig dersom dybden reduseres fra 2 cm til 1 cm, spesielt ved lengdefall over 3 %.

Anbefaling 3; Vurdere om gjeldende krav til spordybde skal benyttes ved lengdefall > 3 %

Funn 4; Væskestrømmens bredde vil allerede ved små væskemengder være bredere enn slukets ristbredde, som medfører at deler av væskestrømmen ikke nødvendigvis vil samles opp, men vil renne videre forbi sluket mot neste sluk.

Anbefaling 4; I stopp-/havarilommer bør det vurderes å benytte runde ristlokk. Runde ristlokk DN650 vil dekke en større andel av væskestrømmen.

8 Referanser

- [1] Samferdselsdepartementet, «Forskrift om minimum sikkerhetskrav til visse vegtunneler (tunnelsikkerhetsforskriften),» Samferdselsdepartementet, 2007.
- [2] Samferdselsdepartementet, «Forskrift om minimum sikkerhetskrav til visse tunneler på fylkesvegnettet og kommunalt vegnett i Oslo (tunnelsikkerhetsforskrift for fylkesveg m.m.),» Samferdselsdepartementet, 2015.
- [3] Statens vegvesen, «N500 Vegtunneler,» Statens vegvesen, 2024.
- [4] Statens vegvesen, «N302 Vegoppmerking,» Statens vegvesen, 2025.
- [5] Statens vegvesen, «R610 Standard for drift og vedlikehold av riksveger,» Statens vegvesen, 2025.
- [6] Statens vegvesen, «N200 Vegbygging,» Statens vegvesen, 2024.
- [7] Statens vegvesen, «N100 Veg- og gateutforming,» Statens vegvesen, 2023.

Appendiks A Relevante krav i tunnelsikkerhetsforskriften

TUNNELSIKKERHETSFORSKRIFTEN:

§ 1 FORMÅL

«Formålet med forskriften er å sikre laveste tillatte sikkerhetsnivå for trafikanter i tunneler ved krav til å forebygge kritiske hendelser som kan sette menneskeliv, miljøet og tunnelanlegg i fare og til å sørge for vern i tilfelle av ulykker.»

PKT. 2.6

«Dersom det er tillatt med transport av farlig gods, skal det finnes avløp for brannfarlige og giftige væsker, gjennom godt utformede sluk eller andre tiltak innenfor tunnelens tverrprofil. I tillegg skal avløpssystemet være konstruert og skal vedlikeholdes for å hindre at brann og brannfarlige og giftige væsker sprer seg inne i løp og mellom løp.»

PKT. 2.7

«Konstruksjonenes brannmotstand. Hovedkonstruksjonen i alle tunneler der et lokalt sammenbrudd i konstruksjonen kan ha katastrofale konsekvenser (f.eks. oversvømte tunneler eller tunneler som kan føre til sammenbrudd i viktige nabokonstruksjoner) skal ha et tilstrekkelig brannmotstandsnivå.»

Appendiks B Føringer fra N500:2024 – Sluk

Krav 9.2.4—1 SKAL

«I tunneler med kantstein skal det monteres sluk for å lede overvannet og vaskevannet til sandfangene. Slukets utforming og lengde skal vurderes spesielt for å kunne fange opp væsker i tunneler med langsgående fall. Det benyttes en sluktype som integreres i skulder/kantstein og som tar hensyn til plassbehovet for trekkerør mv. som legges forbi sluket. Sluktypen skal være enkel å åpne og vedlikeholde for å sikre åpent nedløp.»

Krav 9.2.4-2 SKAL

«Sluk i lavbrekk skal dimensjoneres spesielt.»

Appendiks C NTNU-rapport



NTNU

Norwegian University of
Science and Technology

Report

Performance of roadside drainage systems for collection of accidental spilled liquids inside tunnels

1. Introduction

1.1.Context

Transporting hazardous materials through tunnels has long been recognized as a safety challenge, leading to the development of regulations that limit or control the movement of dangerous goods in many tunnels. Over the past decades, several tunnel fire incidents triggered by spilled liquid fuels have resulted in severe consequences for tunnel users and damage to tunnel linings (Guo et al., 2022).

In July 2015, a serious fire incident occurred in the Skatestraum tunnel in Norway, involving a heavy goods vehicle carrying large volumes of gasoline: 19,000 L in the main tanker and 16,500 L in the trailer (Statens Havarikommisjon for Transport (SHT), 2016). The Skatestraum tunnel is an underwater road tunnel with a steep 10 % longitudinal gradient. When the trailer detached and struck the tunnel wall, approximately 4,500 liters of gasoline leaked onto the road surface. The fuel flowed rapidly toward the tunnel's lowest point and ignited, producing a fire that spread approximately 900 meters along the tunnel. The incident highlighted significant design limitations in the tunnel's drainage and stormwater management systems (SHT, 2016)). The drainage system was not designed to handle the large volume of flammable liquid released, and leaks in drainage pipes allowed gasoline to enter the surrounding ground. These factors contributed to the spread and intensity of the fire, underlining the critical importance of accounting for hazardous spills in tunnel drainage design.

Previous research has shown that the behavior of spilled liquid fuel on tunnel road surfaces is strongly influenced by factors such as slope and leakage flow rate. Early experiments (Ingason, 1994) and later studies (Klein et al., 2018) have highlighted that tunnel slope can significantly affect the spread area and width of fuel spills, which in turn impacts the potential heat release rate (HRR) in the event of fire. The thickness of the spilled layer is typically thin (2–7 mm), resulting in lower HRR per unit area compared to deep fuel pools used in laboratory tests. In addition, surface roughness and the physical properties of the liquid (such as viscosity and surface tension) further shape the spillage profile and influence fire behavior (Mealy et al., 2014).

Models for estimating leakage rates, spillage sizes, and heat release rates for different scenarios have also been developed. Ingason & Li, (2017) performed large-scale tests on the release of liquids inside tunnels, investigating the impact of variables such as leakage rates, liquid types, spillage sizes on sloping surfaces, and resulting heat release rates. The resulting models can be used to estimate spillage sizes and HRR for different scenarios. Guo et al., (2022) investigated the impact of longitudinal and transverse tunnel slopes, surface roughness, liquid type, and leakage flow rate on spillage width and area through numerical simulations using OpenFOAM. They developed empirical models to predict the spread of leaked liquid in sloped tunnels, accounting for both tunnel slope and leakage flow rate.

While the results of these studies provide valuable information on liquid spill behavior and fire risk in tunnels, useful for designing active fire protection systems, there remains a significant gap regarding the role of tunnel drainage systems during such incidents. Exploring the efficiency of drainage systems inside tunnels and understanding how drainage system design affects the collection and potential spread of hazardous liquid spills, can help inform fire protection guidelines for tunnel safety design. In this regard, the current report focuses on investigating drainage system efficiency through hydraulic experiments, aiming to identify design limitations and propose improvements to better model and enhance the efficiency of tunnel drainage systems in Norway.

1.2.Objectives and scope

The main focus of the current report is to evaluate the efficiency of roadside drainage systems inside tunnels. Two drain types will be investigated (Figure 1), and the efficiency of the two drain types will be compared. Furthermore, the study will investigate the influence following variables on the efficiency of the drains:

1. Leakage Flow Rate (L/s) – Discharge rate of the flow onto the rig
2. Longitudinal slope (%) – Slope along the length of the test setup
3. Impingement point (m) – The point of impact of water on the surface of the road
4. Road markings – Does the road markings impact the way the flow is conveyed on the surface?

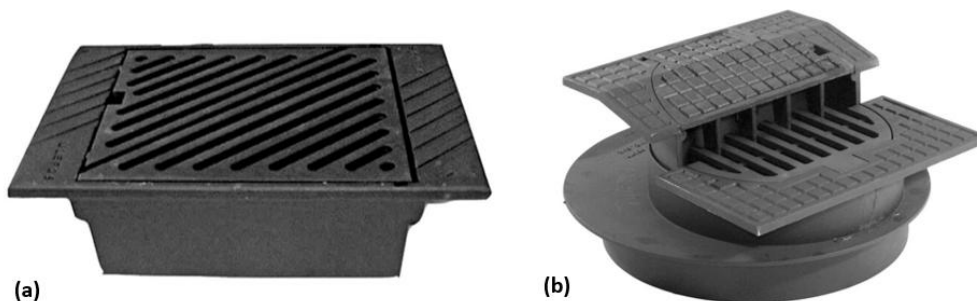


Figure 1 - a) Ulefos OSLO rennestensluk and b) Ulefos UFK-650 TR kjeftsluk drain types are investigated in the current project

The hydraulic experiments were conducted using a 1/2 scale model based on the Froude similarity laws. In section 2, the scaling method and design of the test setup and experiments will be explained in detail. Finally, Section 3 will discuss the results of the experiments and the implications they have for the design of drainage systems inside tunnels in Norway.

2. Methodology

Based on the information provided from the Norwegian road guideline N500 (Statens vegvesen, 2024), the minimum distance between drains inside tunnels are 40 meters. In addition, for the purposes of the current study, the T11.5 road profile was chosen to be investigated. According to N100 (Statens vegvesen, 2023a), Norwegian guideline for Road and street design, the T11.5 profile has a traffic width (Bk) of 9.5 meters. Figure 2 illustrates the tunnel section under investigation.

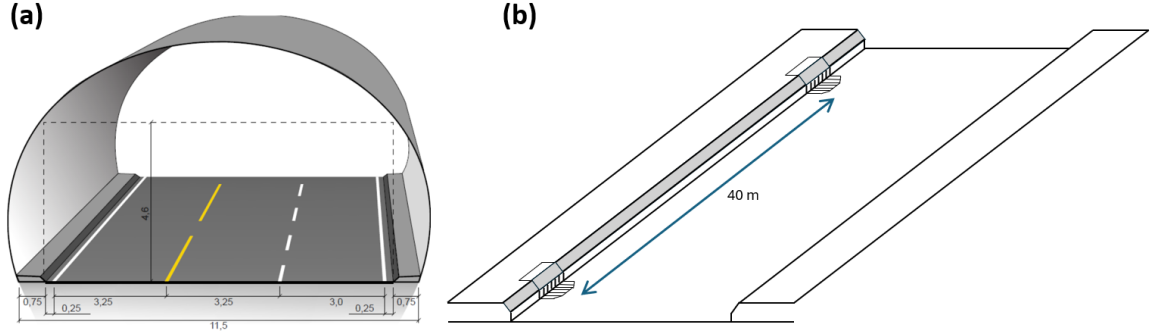


Figure 2 – a) Tunnel profile for T11.5GS road profile (Source: N100:2023 - Tillegg B), and b) the minimum distance between consecutive drains

To create a cost-effective and laboratory-feasible model that accurately simulates real-world flow behaviors, it was decided for the model to be scaled to half the size of the real-world conditions. The physical model is a scaled representation of a hydraulic flow situation. For the model to be a correct representation of the real-world conditions, the model should display similarity of form (geometric similarity), similarity of motion (kinematic similarity), and similarity of forces (dynamic similarity). For free surface flows, such as liquid spills on a road surface, similarity is achieved through the principle of Froude scaling.

2.1.Froude scaling principles

Traditionally, model studies are performed using geometrically similar models. In a geometrically similar model, true dynamic similarity is achieved if and only if each dimensionless parameter has the same value in both model and prototype. Geometric similarity implies that the ratios of prototype characteristic lengths to model lengths are equal:

$$L_r = \frac{L_p}{L_m} = \frac{D_p}{D_m} = \frac{H_p}{H_m} \quad (1)$$

where the subscripts p and m refer to prototype (full scale) and model parameters, respectively, and the subscript r indicates the ratio of prototype-to-model quantity. Length, area and volume are the parameters involved in geometric similarity.

In open-channel flows, the presence of the free surface means that gravity effects are important. The Froude number is always significant. Secondary scale ratios can be derived from the constancy of the Froude number which implies:

$$Fr = V / \sqrt{gL} \quad (2)$$

$$Fr_m = Fr_p \quad \text{Froude similitude} \quad (3)$$

Based on Equation (3), other ratios are calculated as follows:

$$\frac{V_p}{\sqrt{gL_p}} = \frac{V_m}{\sqrt{gL_m}}$$

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\frac{L_p}{L_m}}$$

$$V_r = \sqrt{L_r} \quad (4)$$

$$Q_r = V_r L_r^2 = L_r^{5/2} \quad (5)$$

$$t_r = \frac{L_r}{V_r} = L_r^{1/2} \quad (6)$$

$$Vol_r = L_r^3 \quad (7)$$

In which V is flow velocity (m/s); g is local gravity field; and L is characteristic length (m). Furthermore, V_r , Q_r , t_r and Vol_r are the scale ratios between the prototype and model for velocity, leakage discharge rate, time, and volume, respectively.

For a model that is scaled down to half, the geometric ratios would be calculated as:

$$L_r = \frac{L_p}{L_m} = 2$$

As mentioned above, the distance between each drain is 40 meters, meaning a 20-meter-long test rig will be needed for a 1:2 scale. Aside from significant practical and financial challenges, constructing a 20m long setup would be impractical as studies such as Guo et al., (2022) demonstrate that liquid spills generally reach the roadside shoulder within a relatively short distance from the point of impingement, after which the flow stabilizes into continuous movement downslope. The following section reviews the model provided by Guo et al., (2022) and considers its implications for designing a more cost-effective experimental setup.

2.2. Study of spilled liquids

Based on the study by Guo et al., (2022) the maximum area of the spillage is a function of liquid discharge rates and the tunnel slopes. The following model was suggested to calculate the width of spillage at any point along the trajectory of the spill:

$$W_{spill} = 3.56\dot{Q}^{0.48}[1.16 \exp(-333s) + 0.38 \exp(-37s) + 0.14] + 0.47\dot{Q}^{0.65}y_{traj}^{0.23+0.34\exp(-74.6s)} \quad (9)$$

In which W_{spill} is the width of the spillage along the trajectory of the flow (y_{traj}), which is a function of the slope (s), and $\dot{Q}$ is the leakage flow rate (L/s).

The formula provided by the study calculates the width that would be covered by the spillage before reaching the shoulder of the road, where the flow stabilizes and moves down the slope towards the drain. Based on this, the model only needs enough space to replicate the full width of spillage on the surface (from the impingement point until it reaches the shoulder of the road). For a tunnel with both longitudinal and transverse slopes, a liquid spill usually behaves as a gravity flow after a short distance from the impingement point. It travels neither along the longitudinal direction nor along the transverse direction of the tunnel, and instead it travels along the lumped slope due to gravity, which can be expressed as:

$$s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \quad (10)$$

And the trajectory is calculated as (Ingason & Li, 2017):

$$y_{traj} = \frac{(B_k - c)}{\cos(\gamma)} \cdot \gamma = \arctan(s_y/s_x) \quad (11)$$

In which c is the distance between the point of impact of the fluid and the shoulder (on the opposite side of the drain) (m). This means that the full length of the spillage would consist of the width of the spillage at the shoulder, plus the lateral width of the spill perpendicular to the trajectory (y_{traj}) at the point where the flow reaches a stable and uniform condition. To calculate the effective width of the spread at the location where the flow stabilizes, we need to calculate the sum of the W_{spill} at the furthest point in the trajectory, and the lateral width of the spill. Figure 3 illustrates the parameters used in Equations (9 – 11).

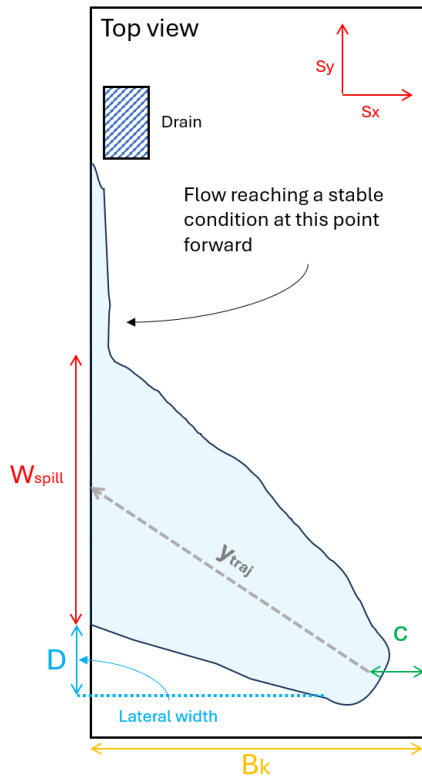


Figure 3 – Parameters in model developed by Guo et al., (2022)

2.3.Experimental setup design

To calculate the width of the spillage, it is necessary to specify the leakage discharge rate as well as the longitudinal and transverse slopes that will be tested. Experience from the Skatestraum tunnel incident showed that the discharge rate was between 16 to 20 (L/s). Applying the principles of Froude scaling and using Equation (5), minimum and maximum discharge rates for the scaled model will be calculated as such:

$$Q_r = \frac{Q_p}{Q_m} = L_r^{5/2} = 2^{5/2} = 5.65$$

$$Q_{minimum} = \frac{16}{5.65} = 2.83 \text{ lit/sec}$$

$$Q_{maximum} = \frac{20}{5.65} = 3.54 \text{ lit/sec}$$

Based on the Norwegian standard for tunnel roads (N500:2024), the minimum and maximum longitudinal road slope inside tunnels should be equal to or less than 5 percent, and the transversal slope should be 3 percent. Accordingly, the current study will be looking at longitudinal slopes between 1 and 5 percent.

In the next step, Equations (9 - 11) were used to calculate the width of the spillage along its trajectory, and to decide the length of the model based on that information. The maximum width of the spillage was calculated for the model considering the effects of scaling. Table 1 reports the results of the calculations.

Table 1 - Calculations for the maximum length of the spillage for different slopes and minimum and maximum discharges, using Equations (9 - 11)

a) Minimum discharge rate, scaled 1:2					
Bk (m)	c (m)	Sy	Sx	Q (l/s)	Length (m) (W + D)
4.25	0.50	0.01	0.03	2.83	4.35
4.25	0.50	0.02	0.03	2.83	5.69
4.25	0.50	0.03	0.03	2.83	7.01
4.25	0.50	0.04	0.03	2.83	8.36
4.25	0.50	0.05	0.03	2.83	9.72
b) Maximum discharge rate, scaled 1:2					
Bk	C (m)	Sy	Sx	Q (l/s)	Length (m) (W + D)
4.25	0.50	0.01	0.03	3.54	4.74
4.25	0.50	0.02	0.03	3.54	6.07
4.25	0.50	0.03	0.03	3.54	7.39
4.25	0.50	0.04	0.03	3.54	8.72
4.25	0.50	0.05	0.03	3.54	10.08

Based on the results of the model, the highest widths needed for the spillage was calculated to be 10 meters. The range of values used for Table 1, was according to the range of values for discharge rates and slopes that would be tested in the hydraulic experiments. According to this result, in order to have enough space for the spillage to form on the surface of the setup, the model needs to be at least 10 meters long and 4.5 meters wide (half scale of T11,5).

2.4. Building the model

The model was built at the Norsk Hydroteknisk Laboratorium at NTNU, in Trondheim. The model was built as a wooden frame that represents the tunnel surface and the shoulders, installed on a steel frame that is held on by multiple adjustable jacks (Figure 4 (a-b)). The wooden frame is 4.8 meters wide and 12 meters long. In order to change the slopes a crane is used to lift one part of the rig and then change the height of the jacks.



Figure 4 - a) The surface of the wooden frame which represents the road surface in the tunnel, and b) four adjustable jacks are used to hold the frame while having the option to change the slopes

In order to test the effect of the impingement point on the efficiency of the drains, the inlet section on to the frame was designed to be movable along the two axes. The inlet consists of a bypass. The bypass is used before starting the test, to stabilize the discharge rate of the flow (Figure 5 (a – d)).

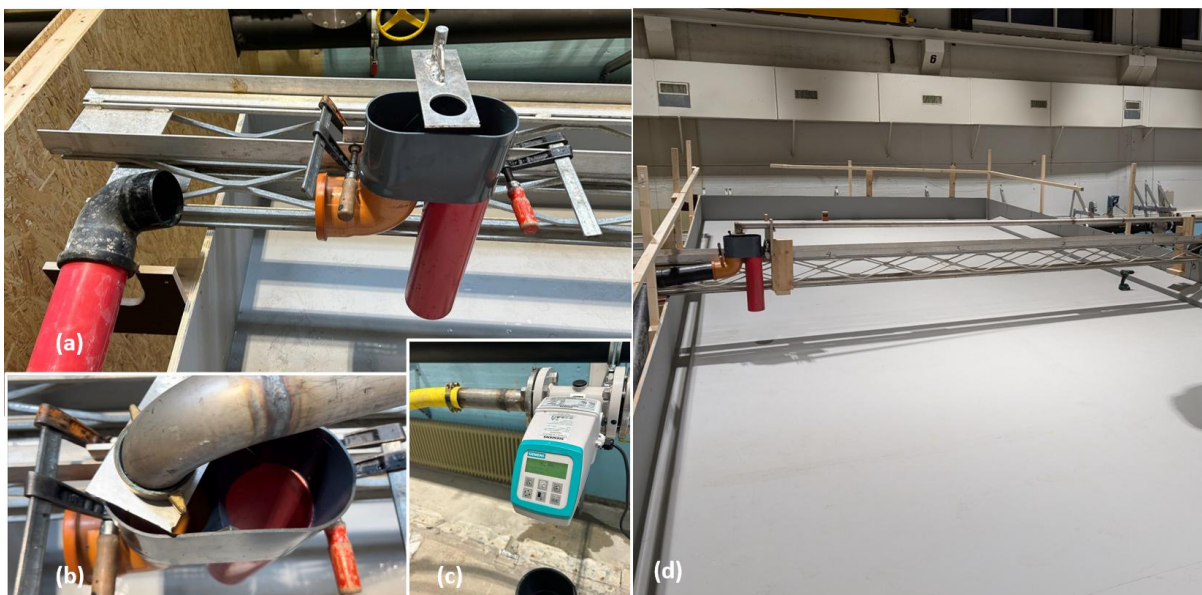


Figure 5 - a) The inlet section is movable by adding a larger pipe along the width or moving the red bypass pipe along the length of the setup, b) the inlet consists of a bypass section to let the water out of the system, c) a water meter is used to adjust the discharge before starting the test, and d) the inlet section on the test setup

When the test starts, the inlet will be on the bypass until the flow discharge has stabilized. Then using the adjustable pipe (Figure 5 – b) the water would be redirected to the surface. As the water moves on the surface alongside the slope, it would either enter the drain or move alongside the surface downstream. To collect both portions of the flow, two containers were installed under the test set, each with a volume of 1000 liters (Figure 6). One pressure sensor is installed on each container to record the changes in the height of the water in containers during the tests.



Figure 6 - a) Containers collecting water from the tests, and b) a pressure sensor installed on each container

The two pressure sensors were calibrated using a setup shown in Figure 7, which consisted of a tube that allowed filling with different heights of water to check and validate the sensors. In the first step, the zero-pressure point for sensors were adjusted, and then water was poured inside the tube to check the pressure outputs for 0.5 m and 1 m heights of water above the pressure sensor (Table 2).

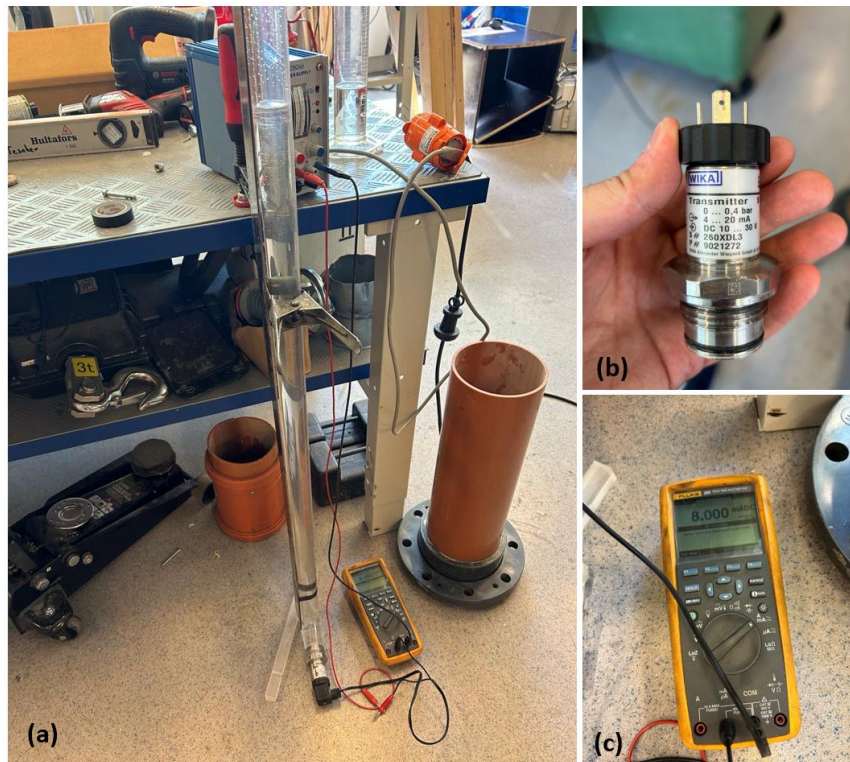


Figure 7 - a) The calibration set up, b) The pressure sensor and, c) reading the output of the sensor

Table 2 - Sensor calibration results

Water column height (m)	Drain sensor output	Bypass sensor output
0	4.000	4.000
0.5	5.998	6.004
1	8.000	8.001

The drains were installed according to the designs provided by the project clients and the N500:2024 guideline. Figure 8(a) shows the specifics used for adding a sloped shoulder section and installing the Rennestensluk, while Figure 8(b) shows the Rennestensluk after installation. After finishing the tests with Rennestensluk, the Kjeftsluk was installed inside the shoulder at the same location (Figure 8(c)).

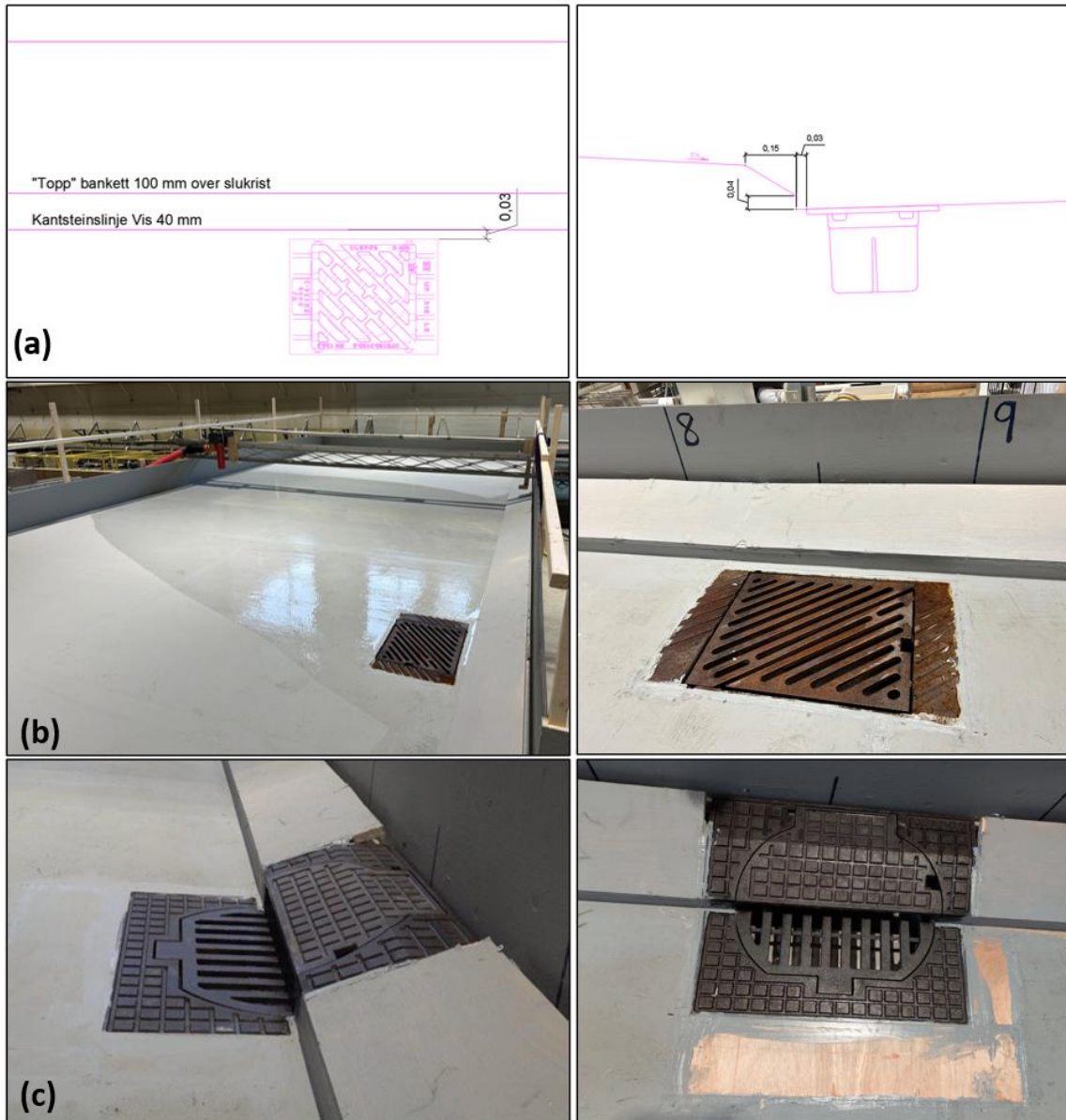


Figure 8 - a) Rennestensluk installation specifications, b) Rennestensluk as installed on the test setup, and c) the Kjeftsluk after installation

After finishing the base tests on both inlets, road markings were added with the kjeftsluk in place. This was done to study the impact of road markings on fluid behaviour on the surface of the road. The road markings were added based on the information from N302:2025 (Statens vegvesen, 2025) guideline for road markings on Norwegian roads, and scaled down to $\frac{1}{2}$ in width, length and depth. Figure 9(b) shows the road markings after addition to the setup.

LINJETYPE	GRUNNFORM	FARTSGRENSE ≤ 50 KM/T			FARTSGRENSE 60, 70, 80 KM/T			FARTSGRENSE ≥ 90 KM/T		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
1000 Kjørefeltlinje		1	3	0,10	3	9	0,10 0,15 ¹	3	9	0,15
1002 Varsellinje		3	1 0,75 ¹	0,25 ²	9	3	0,10 0,15 ¹	9	3	0,15
1004 Sperrelinje				0,10			0,10 0,15 ¹			0,15
1006.1 Kjørefeltlinje/Varsellinje				0,10			0,10 0,15 ¹			0,15
1006.2 Kjørefeltlinje/Sperrelinje				0,10			0,10 0,15 ¹			0,15
1006.3 Varsellinje/Sperrelinje				0,10			0,10 0,15 ¹			0,15
1006.4 Dobbel Sperrelinje				0,10			0,10 0,15 ¹			0,15
1006.5 Dobbel Varsellinje		3	1	0,10	9	3	0,10 0,15 ¹	-	-	-
1008 Skillelinje		2 1 ¹	2 1 ¹	0,20	2 1 ¹	2 1 ¹	0,20	2	2	0,20 0,30 ¹
1010 Ledelinje		1	1	0,10	1	1	0,15 ¹ 0,30 ¹	1	1	0,15 ¹
1012.1 Helltrukken kantlinje				0,10			0,10 0,15 ¹			0,15 0,30 ¹
1012.2 Stiplet kantlinje		3 2 ¹	3 2 ¹	0,10 0,10 ¹	3 2 ¹	3 2 ¹	0,10 Var ¹	2 ¹	2 ¹	- 0,15 ¹

Tegnforklaring:

A = Linjelengde

B = Linjefølgning

C = Linjebredde/Linjeavstand

¹ På tofeltsveger med kjørefeltbredde ≥ 3,25m og bredde av fast dekke ≥ 7,5m, og på flerfeltsveger

² For sykkelveg og gang-sykkelveg

³ For sykkelfelt

⁴ Akselerasjons- og retardsjonsfelt

⁵ Samme bredde som den linje den ligger i forlengelse av

⁶ På motorveier. Venstre kantlinje skal da være gul



Figure 9 - a) The road markings used for the test are highlighted, and b) the setup after the addition of road markings

2.5. Test design and procedure

The incident at Skatestraum tunnel resulted in discharge of 4,500 liters of fluid in 4 minutes. Based on Equation (6) for calculating the time of the tests:

$$t_r = L_r^{1/2} = (2)^{1/2} = 1.41$$

$$t_r = \frac{t_p}{t_m} = \frac{4}{t_m} = 1.41$$

$$t_m = \frac{4}{1.41} = 2.81 * 60 = 170 \text{ seconds}$$

In which t_p is the time of the incident in the prototype, and t_m is the run time for the model. Based on this, it was decided to run the tests for 3 minutes (180 seconds) with water flowing on the setup, and 2 more minutes after the flow is disconnected (A total of 5 minutes for each test).

To measure the performance of the inlets on different slopes and flow discharges, for each run the volume of water captured by the drain and the volume that passed the drain will be collected in the separate containers (Figure 8). The collected volumes will then be used to calculate the efficiency of the drain using Equation 12:

$$Efficiency = \frac{Vol_1}{Vol_1 + Vol_2} * 100 \quad (12)$$

Figure 10 illustrates the volumes collected for use in Equation 12.

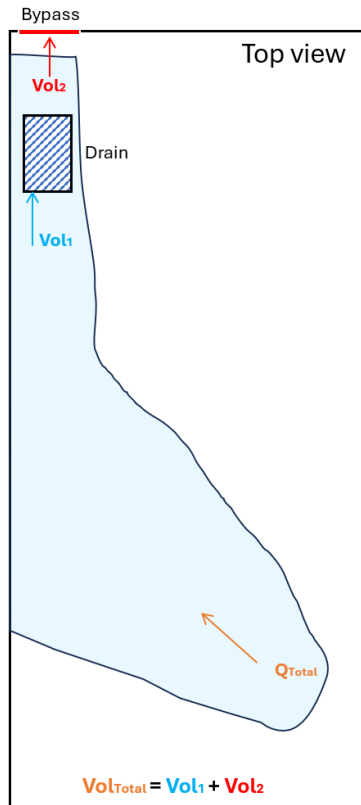


Figure 10 - The volumes collected for each test

For each run of the experiment, the procedure is as follows:

1. Check that containers are empty, and the data logger and cameras are ready.
2. Open the valve to set the flow rate to the correct value using the flow meter.
3. Waiting for the flow discharge value on the flow meter to stabilize.
4. Start the recording of the data logger application (containers), and the recording of the cameras.
5. **(Starting the test)** Move the nozzle (Figure 5(b)) to direct the water on to the surface of the rig. At this point a timer needs to be started to keep account of the duration of the test.
6. Let the water flow onto the surface for 3 minutes.
7. **(Stopping the water flow)** Move the nozzle to the outlet position to stop the water from flowing on the surface.
8. Wait for 2 minutes for the water on the surface to drain into the containers.
9. **(Stopping the test)** Stop the data logger and cameras.

During the experiments, different sets of variables will be tested to study their effect on the volume of water that is collected by the two types of inlets. The experiment cases are listed in Table 3. Each test will be run three rounds to determine the uncertainty levels of the results.

Table 3 - List of the planned tests for the two inlet types. Changes in the test variables are indicated with color. All the tests will be run for 5 minutes (3 minutes with water running and 2 minutes after the water is cut off). The transversal slope for all the tests is 3 percent.

Test no.	Inlet type	Impingement Point (m)		Longitudinal slope (%)	Leakage flow rate (L/s)	Description
		x	y			
1	Rennestensluk	0.5	0.5	5	2.83	Test with minimum flow rate
2		0.5	4	5	2.83	Moving inlet's position along the length to 4 meters and testing with minimum flow rate
3		0.5	0.5	5	3.54	Similar to 1 with maximum flow
4		0.5	4	5	3.54	Similar to 2 with maximum flow
5		0.5	0.5	3	2.83	Change of slope to 3 percent
6		0.5	4	3	2.83	
7		0.5	0.5	3	3.54	
8		0.5	4	3	3.54	
9		0.5	0.5	1	2.83	Change of slope to 1 percent
10		0.5	5	1	2.83	Moved to 5 meter to test when there is a part of flow passing the inlet
11		0.5	0.5	1	3.54	
12		0.5	5	1	3.54	
13	Kjeftsluk	0.5	0.5	5	2.83	Change of inlet to Kjeftsluk
14		0.5	0.5	5	3.54	
15		0.5	0.5	3	2.83	
16		0.5	0.5	3	3.54	
17		0.5	0.5	1	2.83	
18		0.5	0.5	1	3.54	
19	Kjeftsluk with the addition of road markings	0.5	0.5	1	0.3	Very short discharge rates were tested to check the impact of road markings on flow behaviour.
20		0.5	0.5	1	2.83	
21		0.5	0.5	1	3.54	
22		0.5	0.5	5	0.3	
23		0.5	0.5	5	2.83	
24		0.5	0.5	5	3.54	

3. Results and Discussion

The pressure sensors on each container were set to collect 10 points per second. The pressure sensors collect the height of the water above them during the test. Figure 11 illustrates the sensor outputs for the drain and bypass containers for one test. There is noise in the collected data for which a moving average method is applied in python, to create smoother values. This figure shows the amount of accumulated water in each container for the period of 5 minutes that the test runs. The blue line shows the raw data for the drain and the red line shows the values based on moving average method. The grey line shows the raw data for the bypass, with the yellow line showing the result of the moving average method for the bypass.

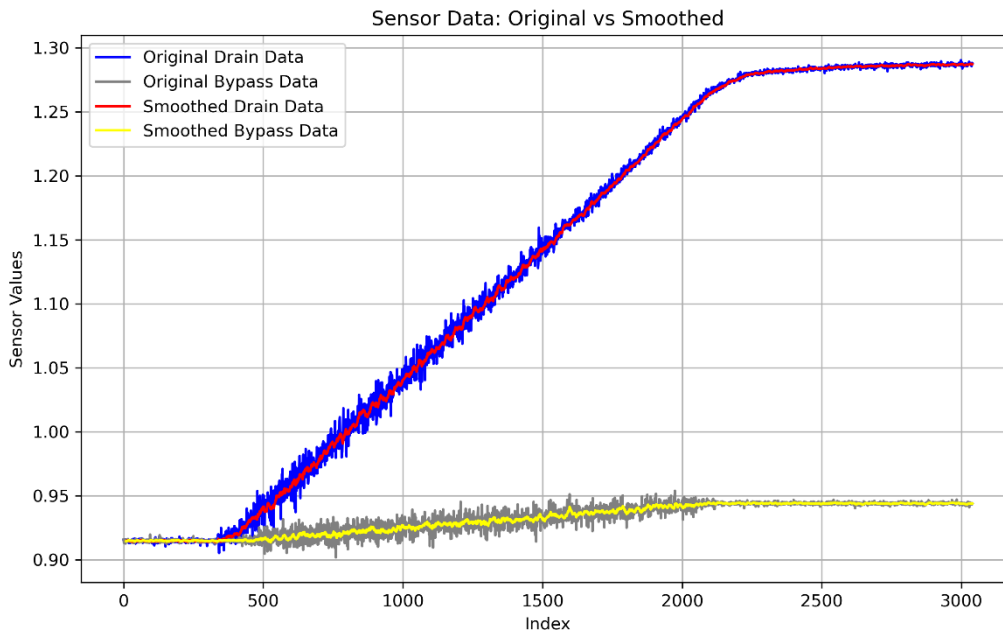


Figure 11 - Collected sensor data and the moving average results

In order to calculate the efficiency for the drain, the difference between the lowest and the highest point in the sensor data could be used as an indication on the amount of the total water that was collected by each container. Using Equation (12), the efficiency based on the smoothed sensor data will be calculated:

$$Efficiency = \frac{df_{drain}}{df_{drain} + df_{bypass}} * 100 \quad (13)$$

In which df indicates the difference between the highest and lowest sensor values (smoothed) for each container.

3.1. Rennestensluk

Table 4 lists the changes in sensor values for drain and the bypass, the calculated efficiencies, the average efficiency and standard deviations for the tests on Rennestensluk.

Table 4 - Test results for Rennestensluk

Test no.	df _{drain}	df _{bypass}	Drain Efficiency	Average efficiency in 3 runs	Standard deviation
1.1	0.320	0.147	68.52%	68.52%	0.002
1.2	0.319	0.148	68.23%		
1.3	0.325	0.147	68.81%		
2.1	0.110	0.356	23.61%	22.26%	0.010
2.2	0.102	0.367	21.67%		
2.3	0.101	0.370	21.50%		
3.1	0.397	0.192	67.35%	66.01%	0.010
3.2	0.378	0.205	64.80%		
3.3	0.383	0.198	65.88%		
4.1	0.135	0.453	22.98%	23.99%	0.009
4.2	0.149	0.442	25.20%		
4.3	0.140	0.449	23.80%		
5.1	0.402	0.069	85.32%	85.81%	0.004
5.2	0.399	0.066	85.76%		
5.3	0.399	0.063	86.36%		
6.1	0.278	0.189	59.58%	57.14%	0.021
6.2	0.255	0.214	54.37%		
6.3	0.271	0.201	57.47%		
7.1	0.504	0.081	86.18%	85.85%	0.002
7.2	0.501	0.084	85.60%		
7.3	0.500	0.083	85.76%		
8.1	0.331	0.257	56.31%	55.18%	0.008
8.2	0.323	0.266	54.90%		
8.3	0.321	0.269	54.35%		
9.1	0.430	0.041	91.35%	91.35%	0.000
9.2	0.430	0.041	91.33%		
9.3	0.428	0.040	91.39%		
10.1	0.422	0.045	90.42%	89.08%	0.010
10.2	0.416	0.053	88.71%		
10.3	0.416	0.056	88.11%		
11.1	0.535	0.048	91.83%	91.75%	0.001
11.2	0.531	0.048	91.74%		
11.3	0.537	0.049	91.67%		
12.1	0.509	0.076	86.99%	85.92%	0.009
12.2	0.499	0.081	86.02%		
12.3	0.505	0.091	84.73%		

To evaluate the repeatability of each test condition, three runs were performed. The calculated standard deviations for drain efficiency across runs were consistently low (ranging from 0.000 to 0.021), indicating that the variations between runs are negligible. In the next sections, the values in Table 4 will be analyzed in more detail to study the impact of slopes, discharge rates, and the impingement point on the efficiency of the drain.

3.1.1. Longitudinal slope and discharge rate

To analyze the impact of slopes, tests that were similar in other variables (Discharge and the impingement point) will be used. The first group of tests are listed in Table 5. The tests are sorted by changes in longitudinal slope from 1 to 5 percent and separated based on discharge rates. To compare the efficiency values visually, both groups of results (minimum and maximum discharge) are plotted in Figure 12.

Table 5 – Tests used for studying the impact of slope on the efficiency of the Rennestensluk

Test no.	Longitudinal Slope	Impingement point (m)		Discharge rate (L/sec)	Average Efficiency (%)
		x	y		
9	1%	0.5	0.5	2.83	91.35%
5	3%	0.5	0.5	2.83	85.81%
1	5%	0.5	0.5	2.83	68.52%
11	1%	0.5	0.5	3.54	91.75%
7	3%	0.5	0.5	3.54	85.85%
3	5%	0.5	0.5	3.54	66.01%

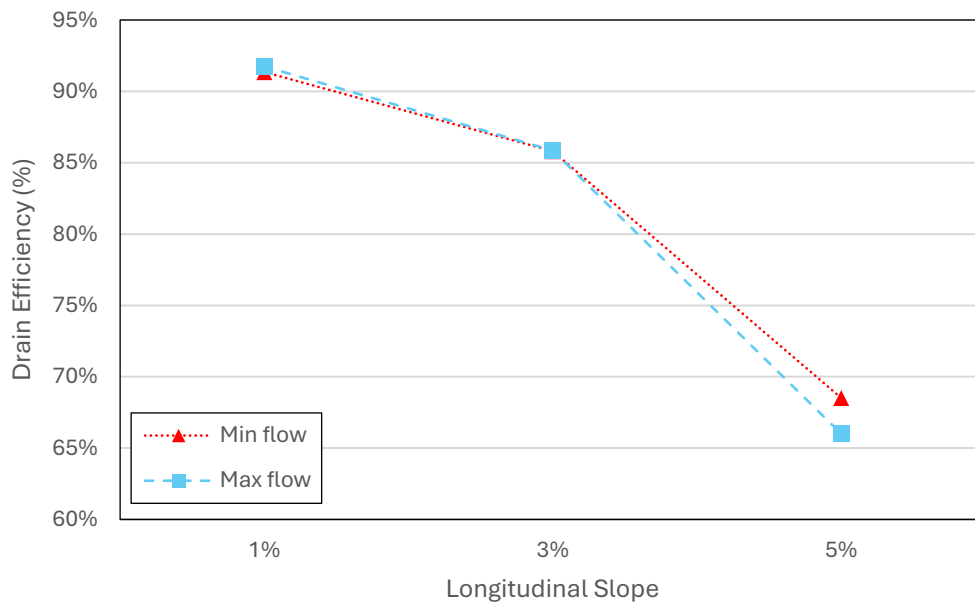


Figure 12 – Changes in the efficiency of the Rennestensluk based on the changes in the longitudinal slope and discharge rates

As the figure shows, higher slopes show lower efficiency as more water has passed the Rennestensluk. The highest efficiency was 91% on the 1% slope, while the lowest was 66% on the 5% slope. The flow rate did not have a significant impact on efficiency. Moreover, the high drop in efficiency on the 5% slope is due to the higher slumped slope, which causes more water to pass the front side of the Rennestensluk and move further down the road.

3.1.2. Impingement point

To study the change in efficiency, a number of tests were performed on the Rennestensluk where the inflow point (impingement point) was moved further downstream. For the tests where the longitudinal slope was 1%, the impingement point was moved to y=5 meters. This was done because on the 1 percent slope the spillage would quickly reach the shoulder and the conditions would be the same as the tests at y=0.5 meter. For the other slopes, the inlet was moved to y=4 meters. The tests for this part of analysis are listed in Table 6. To compare the efficiency values visually, both groups of results (minimum and maximum discharge) are plotted in Figure 13.

Table 6 - Tests used for studying the impact of impingement point on the efficiency of the Rennestensluk

Test no.	Longitudinal Slope	Impingement point (m)		Discharge rate (L/sec)	Average Efficiency (%)
		x	y		
10	1%	0.5	5	2.83	89.08%
6	3%	0.5	4	2.83	57.14%
2	5%	0.5	4	2.83	22.26%
12	1%	0.5	5	3.54	85.92%
8	3%	0.5	4	3.54	55.18%
4	5%	0.5	4	3.54	23.99%

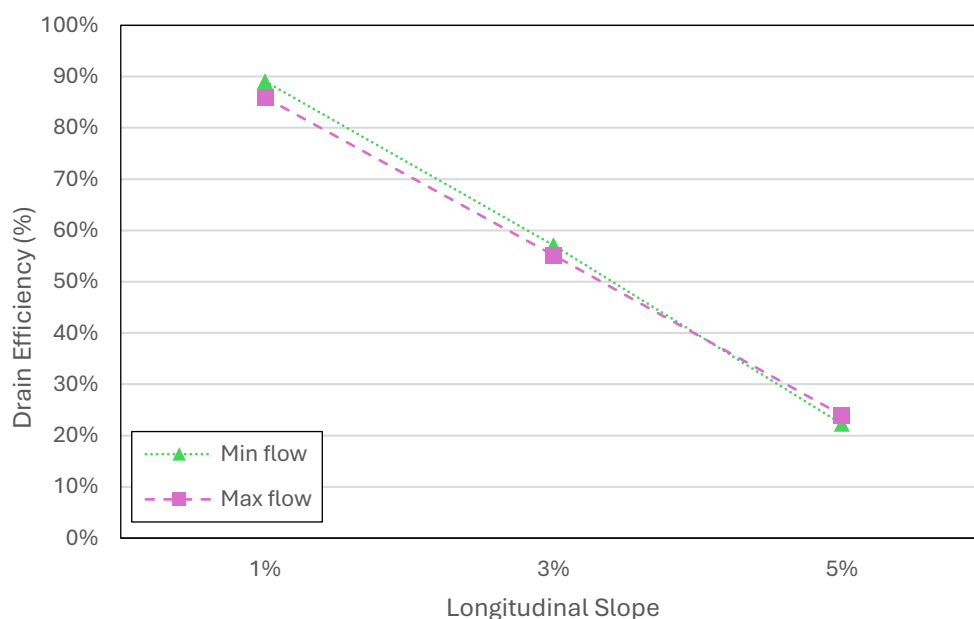


Figure 13 - Changes in the efficiency of the Rennestensluk with the slope when the impingement point is at y=5 meters

Like the last section, higher slopes show lower efficiency here as well. The highest efficiency was 89% on the 1% slope, while the lowest was 22% on the 5% slope. The flow rate did not have a significant impact on efficiency. However, the increase in slope leads

to a larger drop in efficiency. This is better illustrated in Figure 14. For the 1 percent slope, the difference was not that much, while the drop is 46% for the 5 percent slope.

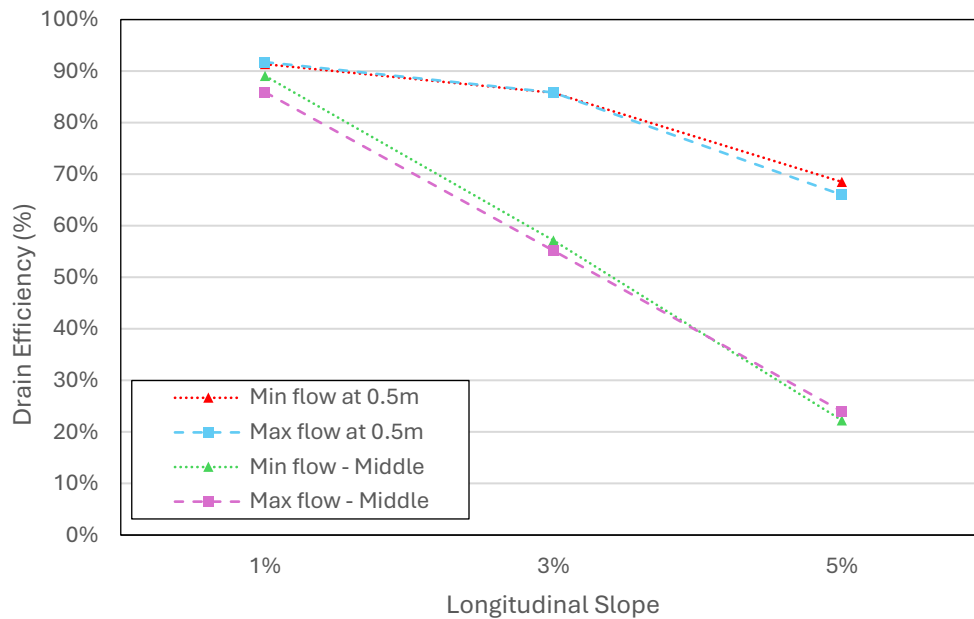


Figure 14 - Changes in the efficiency of the Rennestensluk based on the changes in the impingement point

3.2.Kjeftsluk

Table 7 lists the changes in sensor values for drain and the bypass, the calculated efficiencies, the average efficiency and standard deviations for the tests on Kjeftsluk. The tests were only performed at the impingement point $y=0.5$ meter.

Table 7 - Test results for Kjeftsluk

Test no.	df _{drain}	df _{bypass}	Drain Efficiency	Average efficiency in 3 runs	Standard deviation
13.1	0.325	0.135	70.59%	70.74%	0.006
13.2	0.334	0.133	71.50%		
13.3	0.320	0.136	70.13%		
14.1	0.385	0.192	66.74%	66.26%	0.004
14.2	0.380	0.197	65.89%		
14.3	0.378	0.193	66.14%		
15.1	0.340	0.128	72.69%	72.73%	0.000
15.2	0.341	0.128	72.72%		
15.3	0.337	0.126	72.77%		
16.1	0.404	0.178	69.36%	69.32%	0.000
16.2	0.400	0.177	69.27%		
16.3	0.406	0.179	69.35%		
17.1	0.343	0.119	74.32%	74.43%	0.004
17.2	0.346	0.122	73.97%		
17.3	0.348	0.116	75.00%		
18.1	0.408	0.173	70.18%	69.94%	0.003

18.2	0.402	0.172	70.08%		
18.3	0.405	0.177	69.57%		

The calculated standard deviations for drain efficiency across runs were consistently low (ranging from 0.000 to 0.006), indicating that the variations between runs are negligible. In the next sections, the values in Table 7 will be analyzed in more detail to study the impact of slopes and discharge rates on the efficiency of the drain.

3.2.1. Longitudinal slope and discharge rate

The kjeftsluk tests are listed here with more detail in Table 8. The tests are sorted by changes in longitudinal slope from 1 to 5 percent and separated based on discharge rates. To compare the efficiency values visually, both groups of results (minimum and maximum discharge) are plotted in Figure 12.

Table 8 - Tests used for studying the impact of impingement point on the efficiency of the Kjeftsluk

Test no.	Longitudinal Slope	Impingement point (m)		Discharge rate (L/sec)	Average Efficiency (%)
		x	y		
17	1%	0.5	0.5	2.83	74.43%
15	3%	0.5	0.5	2.83	72.73%
13	5%	0.5	0.5	2.83	70.74%
18	1%	0.5	0.5	3.54	69.94%
16	3%	0.5	0.5	3.54	69.32%
14	5%	0.5	0.5	3.54	66.26%

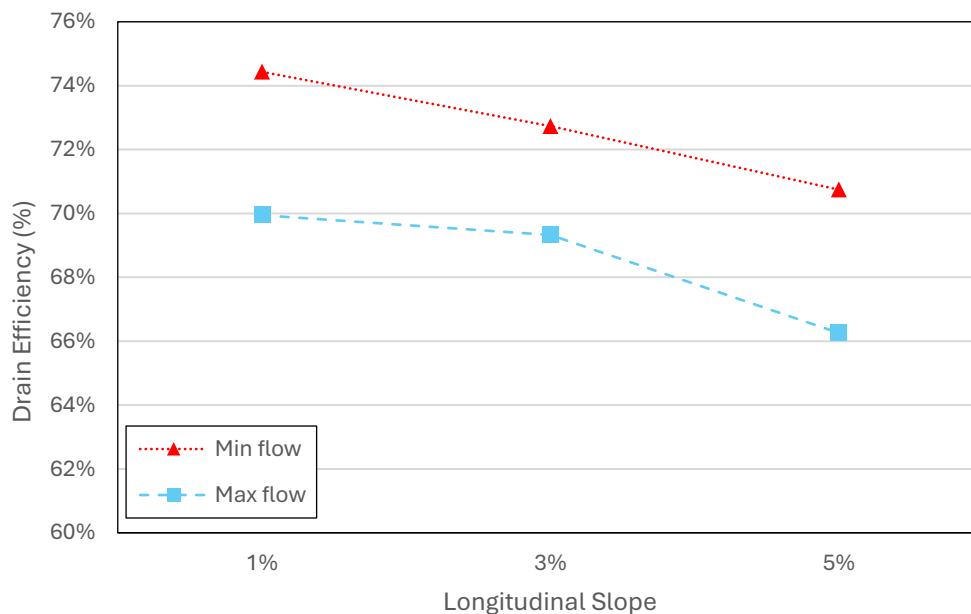


Figure 15 - Changes in the efficiency of the Kjeftsluk with changes in the slope and the discharge rate

3.2.2. Kjeftsluk vs Rennestensluk

To compare the performance of the two drain types, similar tests in terms of slope, discharge and impingement point will be compared in this section. The details of the

tests are already reported in Table 5 and Table 8. Figure 16 shows the efficiency values of the two drain types, side by side.

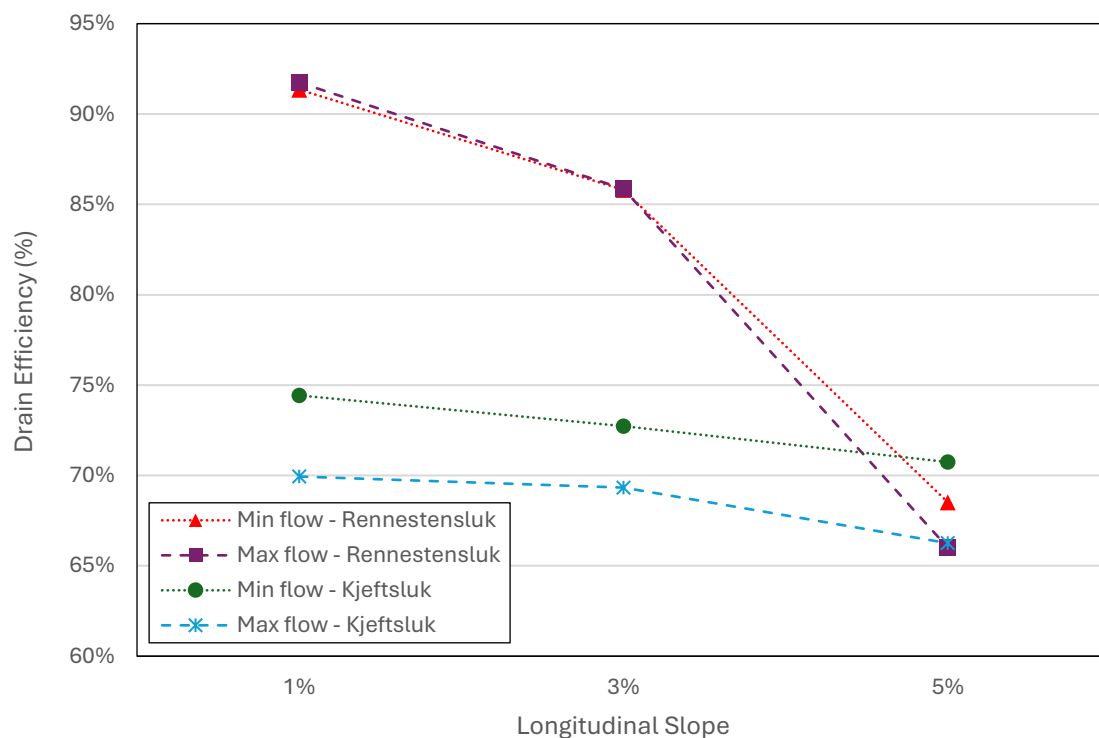


Figure 16 - Comparison of efficiency values between Kjeftsluk and Rennestensluk

Comparing the results, the Rennestensluk shows a higher efficiency on 1 and 3 percent slopes, while similar results are achieved in the 5 percent slope. The difference in the performance could be attributed to the design specifics of the two drains, as the Rennestensluk covers a bigger area on the surface of the road. From the tests, it was visible that as the water reaches the shoulder, a large area is covered on the side of the road. This meant that for the kjeftsluk, which covers a smaller area on the surface, higher amounts of water would pass the drain and move downstream. This is illustrated in Figure 17 where the area covered by the Kjeftsluk is compared with the Rennestensluk.

On the other hand, the Kjeftsluk is showing a more consistence performance with the change of slopes. Between 1 and 5 percent slopes, the decrease in performance is 4 percent for Kjeftsluk, while for Rennestensluk it's more than 20 percent. A possible

reason for this may be the gap between the Rennestensluk and the shoulder. Kjeftsluk's design make it possible to catch more of the water passing near the shoulder.

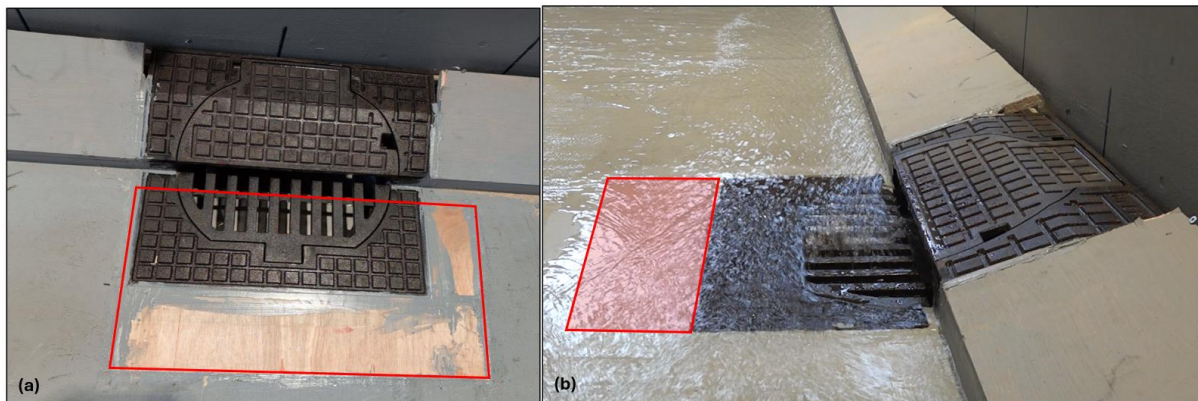


Figure 17 - a) location of Rennestensluk in comparison to Kjeftsluk, and b) the area of water passing Kjeftsluk in comparison to Rennestensluk

3.3.Kjeftsluk with road markings

After finishing the base tests on both inlets, road markings were added with the kjeftsluk in place. This was done to study the impact of road markings on fluid behaviour on the surface of the road. Only one series of tests were ran as experience from the other experiments showed no significant difference between test results. The results are listed in

Table 9 - Test results for Kjeftsluk with the addition of road markings

Test no.	df_{drain}	df_{bypass}	Drain Efficiency
19	0.051	0.003	93.93%
20	0.341	0.122	73.65%
21	0.397	0.184	68.28%
22	0.047	0.006	89.13%
23	0.318	0.162	66.25%
24	0.350	0.215	61.93%

The tests were only performed on 1 and 5 percent slopes, with the addition of 2 tests that were run at a 0.3 L/sec discharge (tests number 19 and 22). The goal was to monitor how a flow with a low depth would behave around the road markings. On the 1 percent slope, the 0.3 L/sec test didn't show any difference, the low discharge caused the water to quickly move towards the shoulder, and the water moving around the road markings end up reaching the shoulder and moving towards the drain.

On the 5 percent slope and with the 0.3 L/sec discharge, a stream was formed along the middle lines. It caused the stream to pass the drain. The effect is shown in Figure 18.



Figure 18 - A stream of water forming along the middle road markings, passing the drain. The test was performed on a 5 percent slope and a 0.3 L/sec discharge.

For the tests with 2.83 and 3.54 L/sec discharge rates, a comparison will be made with the tests without the road markings. The tests used in this part of the analysis are listed in Table 10. Figure 19 compares the values of efficiency based on the discharge rates.

Table 10 - Tests used for comparing the impact of road markings on the efficiency of the Kjeftsluk

Test no.	Longitudinal Slope	Impingement point (m)		Discharge rate (L/sec)	Road markings	Average Efficiency (%)
		x	y			
20	1%	0.5	0.5	2.83	Yes	73.65%
17	1%	0.5	0.5	2.83	No	74.43% *
23	5%	0.5	0.5	2.83	Yes	66.25%
13	5%	0.5	0.5	2.83	No	70.74% *
21	1%	0.5	0.5	3.54	Yes	68.28%
18	1%	0.5	0.5	3.54	No	69.94% *
24	5%	0.5	0.5	3.54	Yes	61.93%
14	5%	0.5	0.5	3.54	No	66.26% *

* Average efficiency value is used

Based on Figure 19, the change in efficiency in the 1 percent longitudinal slope is not significant. The difference could be a result of slow velocity rates, meaning that some water stayed standing on the surface and did not reach the drain during the tests. On the other hand, the difference in efficiency in the 5 percent slope was around 5 percent in the two tests. During the tests, the stream of water (Figure 18) was forming even when the flow rates were higher than 0.3 L/sec. The stream is possibly causing the 5 percent decrease in the efficiency values.

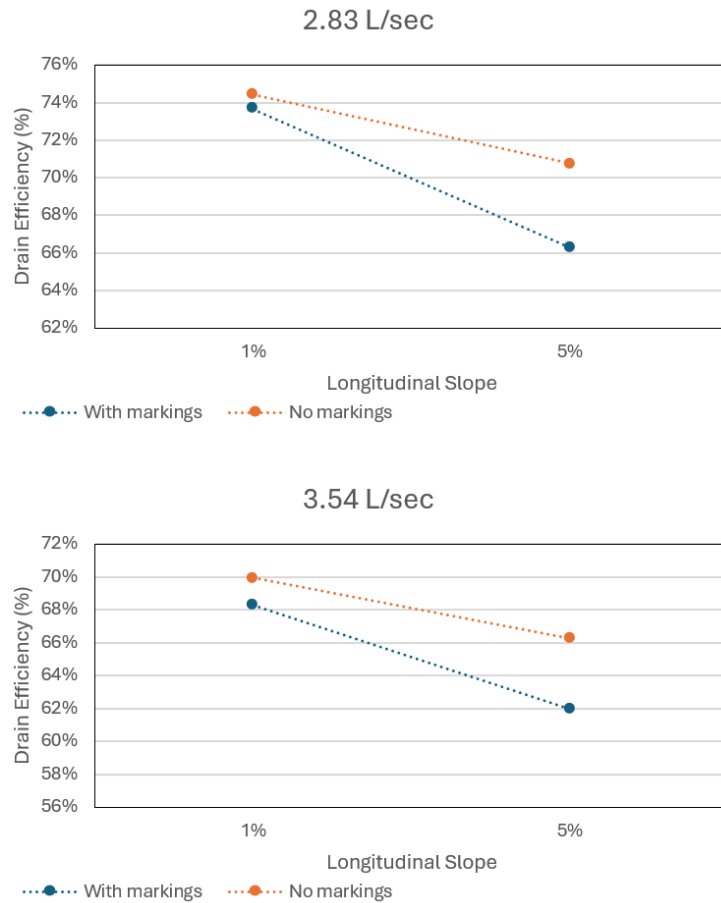


Figure 19 - Comparison of drain efficiencies for Kjeftsluk before and after the addition of road markings. Top: 2.83 L/sec discharge rate, and Bottom: 3.54 discharge rate

4. Concluding remarks

The hydraulic experiments conducted in this study provides insights into the performance of roadside drainage systems inside tunnels under conditions simulating hazardous liquid spills. The results confirm that longitudinal slope significantly influence the efficiency of drain inlets, while discharge rate showed comparatively minor effects. Higher longitudinal slopes consistently led to lower drain efficiencies, with the most pronounced decline observed for the Rennestensluk, where efficiency dropped by more than 20 % between 1 % and 5 % slopes. In contrast, the Kjeftsluk demonstrated more consistent performance across the same range, suggesting it is less sensitive to variations in slope.

The comparison between the two drain types highlighted that while Rennestensluk generally achieved higher peak efficiencies, its performance declined more sharply with increased slope. The wider surface area covered by the Rennestensluk appears advantageous at lower slopes but contributes to increased bypass at higher slopes due to design gaps near the shoulder. The Kjeftsluk, with its more compact surface coverage and better alignment with the shoulder edge, captured flow more consistently, although with slightly lower maximum efficiencies.

Tests with road markings added to the Kjeftsluk setup indicated limited impact on drain efficiency at low slopes and discharge rates. However, at higher slopes and lower discharge rates (0.3 L/s), road markings created channelized flow along the markings, allowing water to bypass the drain. This stream caused a moderate efficiency reduction of approximately 5 % at 5 % longitudinal slopes. These findings emphasize that while road markings may have limited impact under gentle slopes, their design and placement should be carefully considered in steeper tunnel sections to avoid unintended flow paths.

Overall, the study underscores the importance of accounting for drain type, tunnel slope, and surface features such as road markings in the design and placement of drainage inlets. Based on the results, refining inlet designs to better intercept flow near the shoulder, even under steeper slopes, could enhance drainage system effectiveness.

References

- Guo, Q., Li, Y. Z., Ingason, H., Yan, Z., & Zhu, H. (2022). Study on spilled liquid from a continuous leakage in sloped tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104290>
- Ingason, H. (1994). Small scale test of a road tanker fire. *Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels, Borås, Sweden*, 238–248.
- Ingason, H., & Li, Y. Z. (2017). Spilled liquid fires in tunnels. *Fire Safety Journal*, 91, 399–406. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.065>
- Klein, R., Maevski, I., Ko, J., & Li, Y. (2018). Fuel pool development in tunnel and drainage as a means to mitigate tunnel fire size. *Fire Safety Journal*, 97, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.09.007>
- Mealy, C., Benfer, M., & Gottuk, D. (2014). Liquid Fuel Spill Fire Dynamics. *Fire Technology*, 50(2), 419–436. <https://doi.org/10.1007/s10694-012-0281-x>
- Statens Havarikommisjon for Transport (SHT). (2016). *RAPPORT OM BRANN I TANKTILHENDER I SKATESTRAUMTUNNELEN I SOGN OG FJORDANE 15. JULI 2015*.
- Statens vegvesen. (2023a). *N100 Veg-og gateutforming*. <https://store.vegnorm.vegvesen.no/n100>
- Statens vegvesen. (2024). *N500 Vegtunneler*. <https://store.vegnorm.vegvesen.no/n500>
- Statens vegvesen. (2025). *N302 Vegoppmerking*. <https://store.vegnorm.vegvesen.no/n302>



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag