



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 21031

Examensarbete 30 hp
Juni 2021

Distributed Temperature Sensing för kontroll av inläckage i spillvattenledningar

Moa Sandberg

REFERAT

Distributed Temperature Sensing för kontroll av inläckage i spillvattenledningar

Moa Sandberg

Tillskottsvatten är ett vanligt problem i spillvattenledningsnätet. DTS, Distributed Temperature Sensing är en metod som inte är vanlig i Sverige för kontroll av spillvattenledningar. Tekniken bygger på kontinuerliga temperaturmätningar under en tidsperiod över en förutbestämd sträcka och registrerar temperaturavvikelse som kan uppstå i samband med inläckage av tillskottsvatten. Syftet med projektet var att granska tidigare utförda studier med DTS för att ta reda på hur tekniken kan användas för att lokalisera inläckage i spillvattenledningar.

För att vidare illustrera problematiken med tillskottsvatten i spillvattennätet samt föreslå hur DTS kan appliceras i Sverige genomfördes en analys av mätdata på inkommande vatten till reningsverket på Ön, Umeå. Både visuella och automatiserade analyser genomfördes där tolkningar gjordes utifrån mätdata från reningsverket tillsammans med nederbörds- och lufttemperaturdata. En regressionsanalys genomfördes som automatiserad analys för att undersöka eventuella samband mellan spillvattentemperatur, spillvattenflöde och nederbörd.

Projektet inleddes med en litteraturstudie där det utreddes hur DTS fungerar teoretiskt och praktiskt. Litteraturstudien visade att DTS är praktiskt möjligt att applicera i spillvattenledningsnätet för att leta inläckagepunkter för tillskottsvatten. Inläckage kan registreras som ökning eller sänkning i spillvattentemperaturen beroende på lufttemperaturen. Den är inte beroende av material på ledningarna men däremot är DTS beroende av att tillskottsvattnet är av annan temperatur än spillvattnet. Det är en dyr teknik men kan vara värt investeringskostnaderna om mätningar tänkt ske många gånger under längre perioder. Vid kontroll av större områden med hjälp av röktest kombinerat med färgning av vatten och filmning är kostnaderna ungefär de samma.

Utifrån mätdata från reningsverket och nederbördsdata från Umeå universitet kunde vissa samband påvisas mellan spillvattentemperatur, spillvattenflöde och nederbörd. Ett visst samband kunde även urskiljas mellan spillvattentemperatur och spillvattenflöde. Utspädningsgraden av spillvattnet beräknades till 1,34 vilket innebär att cirka 25% av vattnet i spillvattenledningarna är tillskottsvatten. Slutsatsen som kunde dras utifrån detta

var att tillskottsvatten existerar i spillvattenledningsnätet som leder till reningsverket på Ön i Umeå. Däremot kunde inga slutsatser dras för att säga var inläckage av tillskottsvatten sker. DTS skulle kunna appliceras i ledningsnäten för att undersöka närmare var inläckagepunkterna är och tillskillnad från rökning, färgning av vatten och filmning som används idag kan DTS sannolikt upptäcka fler typer av inläckage.

Nyckelord: Tillskottsvatten, spillvatten, spillvattenledningar, DTS, Distributed Temperature Sensing

*Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet
Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala*

ABSTRACT

Using Distributed Temperature Sensing to detect infiltration and inflow in foul sewers

Moa Sandberg

Infiltration and inflow (I/I) are common problems in the foul sewer system. A method to detect I/I that is not commonly used in Sweden is DTS, Distributed Temperature Sensing. DTS is based on continuous measurements of temperature over a predetermined distance in the sewer system. The I/I is detected as temperature differences in the temperature data that is registered in the sewer system. The measurements often take place over a couple of weeks or months in the sewer system. The aim of this project was to review previous studies where DTS was used to detect I/I in foul sewers.

Data from a wastewater treatment plant in Umeå together with meteorological data were analysed to be able to visualize the problem of I/I and then suggest how DTS can be applied in Sweden. Both automated and visual analyses was performed to find if there were any relationships between wastewater temperature, wastewater flow and precipitation.

The outcome was that it is possible to apply DTS in the foul sewages to detect I/I. DTS seemed to be able to detect I/I in all types of sewage material, however it is dependent on that the I/I temperature differs from the temperature of the foul sewage water. It is an expensive technique but if it is meant to be used many times to analyse bigger areas it can be worth the costs. If larger areas are to be investigated, the costs for DTS and current methods are approximately the same.

At the wastewater treatment plant in Umeå, a slight relationship between wastewater temperature, wastewater flow and precipitation could be detected. The degree of dilution was calculated to 1,34 which means that about 25% of the sewage water is I/I. The conclusion from this was that I/I exists in the foul sewers in Umeå. The leakage points could not be located with this analysis. DTS could be a possible method to detect the leakage points of I/I in foul sewers. Unlike smoke tests, colouring and video-inspection of the sewers, DTS might be able to detect smaller leakage points.

Keywords: DTS, Distributed Temperature Sensing, Infiltration and Inflow, foul sewer

Department of Earth Sciences, Uppsala University
Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala, Sweden

FÖRORD

Projektet har utförts som examensarbete om 30 hp som avslutar min utbildning till Civilingenjör i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Arbetet genomfördes under våren 2021 hos företaget Tyréns.Handledare på Tyréns var Ola Fängmark, ämnesgranskare var Roger Herbert vid institutionen för geovetenskaper samt examinator Rickard Pettersson vid institutionen för geovetenskaper.

Jag vill tacka min handledare Ola och kontaktperson Nicholas South på Tyréns för att ni gett mig möjlighet att genomföra detta examensarbete och för att ni väglett och stöttat mig under projektets gång. Jag vill också tacka min ämnesgranskare Roger för all stöttning och vägledning. Ett tack riktas också till min examinator Rickard och min opponent Matilda Gunnarsson. Sedan skulle jag vilja rikta ett tack till Karl Andersson på Pollex, Annelie Hedström professor i VA-teknik vid Luleå tekniska universitet och Rémy Schilperoort kontaktperson för Partners4UrbanWater för era otroligt viktiga erfarenheter och insikter gällande nuvarande kontrollmetoder och DTS. Jag vill tacka Vakin för att jag fick ta del av er data från reningsverket och Klockarbäcken. Ytterligare ett tack riktas till Svenskt Vatten för att jag fick tillstånd att använda era illustrationer i min rapport.

Ett stort tack till min mamma Anita och min sambo Samuel som funnits där för mig genom hela utbildningen, stöttat mig och trott på mig. Jag vill också tacka min kära pappa som tyvärr inte finns kvar hos oss mer. Sist men absolut inte minst vill jag tacka mina studiekamrater, framför allt Tove Engvall, utan dig hade det inte gått.

Moa Sandberg

Uppsala, juni 2021

Copyright © Moa Sandberg och Institutionen för geovetenskaper, Luft- vatten- och landskapslära, Uppsala universitet.

UPTEC W 21031, ISSN 1401–5765

Digitalt publicerad i DiVA, 2021, genom institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet. (<http://www.diva-portal.org/>)

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Distributed Temperature Sensing för kontroll av inläckage i spillvattenledningar

Moa Sandberg

Inläckande vatten är ett problem som blir allt vanligare i de svenska avloppsledningsnäten. För att åtgärda inläckagen är första steget att lokalisera defekterna i ledningarna. Distributed Temperature Sensing, DTS är en relativt ny metod som kan användas för detta syfte.

Det inläckande vattnet kan ha sitt ursprung i exempelvis regnvatten och grundvatten, men också komma från en läckande dricksvattenledning. Det inläckande vattnet kallas för tillskottsvatten och är inte i behov av samma rening som det vatten som har sitt ursprung i disk, tvätt och toalett. Tillskottsvattnet tar alltså onödig plats i avloppsledningarna och sedan onödiga resurser i avloppsreningsverket. För att undersöka och åtgärda platserna i avloppsledningarna som inläckaget sker i använder man sig idag av röktest, färgning och filmning i avloppsledningarna. En ny teknik som inte använts i lika stor utsträckning i Sverige är DTS men som potentiellt skulle kunna effektivisera kontrollerna av avloppsledningarna.

I och med klimatförändringarna och den framtida förväntade nederbördsökningen kommer sannolikt även tillskottsvattenmängden öka vilket i sig kan leda till överbelastning i avloppssystemet. Problemen innebär att orenat avloppsvatten behöver släppas ut för att minska belastningen. Då befolkningens mängd också ökar leder även detta till ett än mer belastat avloppssystem. I detta projekt undersöktes DTS som metod för kontroll av tillskottsvatten och jämfördes med dagens metoder. Problematiken med tillskottsvatten illustrerades även med dataanalys av data från reningsverket på Ön, Umeå.

Resultatet av dataanalysen var att tillskottsvatten fanns under den undersökta tidsperioden i avloppsledningarna som ledde till reningsverket på Ön, Umeå. Andelen tillskottsvatten var 25% vilket innebär att reningsverket renade under denna tidsperiod 25% mer vatten än vad som skulle behöva renas. Analysen visade på att det fanns en viss koppling mellan nederbörd och temperaturen samt flödet i avloppsledningarna, vilket även detta tydde på att det fanns defekter i avloppsledningarna som gjorde det möjligt för tillskottsvatten att tränga in i ledningarna.

DTS är en metod som bygger på temperaturmätningar i avloppsledningarna som sker under en viss tid på en viss sträcka. Då tekniken mäter temperaturen längs en kabel så bestäms sträckan som mäts av längden på kabeln. Resultatet av litteraturstudien var att det är möjligt att lokalisera inläckagepunkter i avloppsledningarna med DTS. Inläckagen speglas i data av temperaturmätningar som temperaturhöjningar eller temperatursänkningar, beroende på om temperaturen i luften är varmare eller kallare än temperaturen i avloppsledningarna.

Metoden för denna studie var att tidigare gjorda studier med DTS granskades. Även data från reningsverket på Ön, Umeå analyserades genom att nederbördstillfällena jämfördes med avloppsvattenflödet samt avloppsvattentemperaturen.

Man kan inte via reningsverkets mätdata avgöra var inläckagen sker, bara att det sker. I och med detta arbete kan kunskaperna om DTS och dess möjligheter att användas för att hitta inläckagen spridas. DTS har sina fördelar i jämförelse med dagens metoder men även sina nackdelar men kan vara en metod att överväga vid större problematik med tillskottsvatten. Fördelarna med DTS jämfört med dagens metoder kan vara att det är möjligt att lokalisera fler typer av inläckage med hjälp av DTS. En nackdel är att tekniken kan vara dyr om enbart kortare sträckor i avloppsledningarna ska undersökas. Om däremot stora problem ses med tillskottsvatten kan det vara en investering väl värd pengarna då tekniken kan användas i flertalet undersökningar om utrustningen hanteras varsamt.

ORDLISTA

Spillvatten	Vatten som är förorenat från hushåll, industrier, serviceanläggningar etcetera (Svenskt Vatten AB 2016b)
Dagvatten	Regnvatten och smältvatten som avrinner ytligt (Svenskt Vatten AB 2016b)
Avloppsvatten	Vatten som avleds i dike, rörledning eller dylikt som i regel är förorenat. Kan bestå av dagvatten, spillvatten, processvatten, kylvatten och dränvatten (Svenskt Vatten AB 2016b).
Dränvatten	Vatten som avleds från dränering, exempelvis husgrundsdränering (Svenskt Vatten AB 2016b).
Tillskottsvatten	Det vatten som utöver spillvattnet avleds i spillvattenledningar. Kan vara dränvatten, dagvatten, inläckande sjö- eller havsvatten med mera (Svenskt Vatten AB 2016b).
Läck- och dränvatten	Vatten som tar sig in i spillvattensystemet via otätheter eller medveten avledning via spillvattensystemet. Är grundvatten och markvatten med mera (Svenskt Vatten AB 2016b).
VA	Förkortning för ”Vatten och Avlopp”
Förbildning	Innebär att spillvattnet vid ett reningsverk renas mindre effektivt och släpps ut mindre renat än det borde (Svenskt Vatten AB 2020b)
Bräddning	Tillfälligt utsläpp av orenat spillvatten vid överbelastning av spillvattenledning (VASYD 2021)
Kevlar	Handelsnamn för armidfiber. Mycket stark fiber som används till material som skall fungera skyddande (Nationalencyklopedin u.å)
Tidsperioden	Syftar i denna rapport till perioden för mätdata från Vakin. Tidsperioden är 20191101-20201130.
Inläckage	Syftar i denna rapport till tillskottsvatten som tar sig in i spillvattenledningar via otätheter eller felaktiga kopplingar.

Innehåll

REFERAT	i
ABSTRACT	iii
FÖRORD	v
POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING	vi
ORDLISTA	viii
1 INLEDNING	1
1.1 SYFTE	2
1.2 FRÅGESTÄLLNINGAR	2
1.3 AVGRÄNSNINGAR	3
2 TEORI	3
2.1 SVERIGES AVLOPPSNÄT	3
2.1.1 Kombinerade system	4
2.1.2 Separatsystem	4
2.1.3 Duplikatsystem	5
2.2 TILLSKOTTSVATTEN.....	6
2.2.1 Direkt nederbördspåverkan.....	7
2.2.2 Indirekt nederbördspåverkan	7
2.2.3 Läck- & dränvatten, basflödet	7
2.2.4 Grundvattenpåverkan.....	8
2.3 UTSPÄDNINGSGRAD - ETT SÄTT ATT UPPSKATTA TILLSKOTTSVATTENMÄNGDEN	8
2.4 BEFINTLIGA TEKNIKER FÖR KONTROLL AV INLÄCKAGE TILL SPILLVATTENLEDNINGAR.....	9
2.4.1 Röktester	9
2.4.2 Visuell metod - Filmning.....	9
2.4.3 Färgning av vatten	10
2.5 DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSING	10
2.5.1 Hur mätning sker teoretiskt med DTS	10
2.5.2 Metod för kalibrering av utrustningen	13
2.5.3 Hur mätning sker med DTS praktiskt	13
3 METOD	15
3.1 LITTERATURSTUDIE	15
3.2 FALLSTUDIER – TIDIGARE GENOMFÖRDA FÖRSÖK MED DTS	15
3.3 DATA- OCH INFORMATIONSSINSAMLING - UMEÅ	16
3.3.1 Nederbördsdata	16

3.3.2	Data erhållen från reningsverket på Ön	17
3.3.3	Områdesbeskrivning för reningsverket Ön, Umeå Kommun	18
3.3.4	Åtgärder som tidigare genomförts för att minska mängden tillskottsvatten18	
3.4	DATAANALYS FALLSTUDIE UMEÅ	19
3.4.1	Analys av spillvattentemperaturen för inkommande spillvatten till reningsverket på Ön, Umeå	19
3.4.2	Analys av det beräknade inflödet till reningsverket på Ön, Umeå	20
3.4.3	Analys av spillvattentemperatur i spillvattenbrunn Klockarbäcken, Umeå	21
3.4.4	Analys av samband mellan spillvattenflödesderivata och spillvattentemperaturderivata	21
4	FALLSTUDIER	23
4.1	WOENS DRECHT, NEDERLÄDERNA & WUPPERTAL, TYSKLAND 2011 ..	23
4.1.1	Områdesbeskrivning	24
4.1.2	Använd teknik och data	24
4.1.3	Databearbetning	24
4.1.4	Studiens resultat och slutsatser	25
4.1.5	Kostnader	27
4.2	SKELLEFTEÅ, SVERIGE 2015.....	28
4.2.1	Områdesbeskrivning	28
4.2.2	Använd teknik och data	28
4.2.3	Databearbetning	29
4.2.4	Antaganden	29
4.2.5	Studiens resultat och slutsatser	29
4.2.6	Kostnader	31
4.3	TRONDHEIM, NORGE 2015.....	31
4.3.1	Områdesbeskrivning	31
4.3.2	Använd teknik och data	32
4.3.3	Databearbetning	32
4.3.4	Antaganden	32
4.3.5	Studiens resultat och slutsatser	33
4.3.6	Kostnader	34
5	RESULTAT FRÅN DATAANALYS FALLSTUDIE UMEÅ	34
5.1	SPILLVATTENTEMPERATUR RENINGSVERKET PÅ ÖN	34
5.2	SPILLVATTENFLÖDE RENINGSVERKET PÅ ÖN	36
5.3	SPILLVATTENTEMPERATUR I KLOCKARBÄCKEN	38
5.4	SAMBAND MELLAN SPILLVATTENFLÖDE OCH SPILLVATTENTEMPERATUR VID RENINGSVERKET PÅ ÖN	39

6	DISKUSSION	41
6.1	ERFARENHETER FRÅN FALLSTUDIerna	41
6.1.1	Praktiska erfarenheter gällande mätningar	41
6.1.2	Typ av utrustning och kostnader.....	42
6.1.3	Vinster med DTS	43
6.2	JÄMFÖRELSE AV TEKNIKER FÖR KONTROLL AV SPILLVATTENLEDNINGAR.....	44
6.3	DATAANALYSEN.....	45
6.3.1	Spillvattentemperatur och spillvattenflöde reningsverket på Ön.....	45
6.3.2	Spillvattentemperatur Klockarbäcken.....	47
6.4	SITUATIONEN I FRAMTIDEN	48
6.5	OSÄKERHETER	48
6.6	FORTSATTA STUDIER	49
7	SLUTSATSER	50
8	REFERENSER	52
Bilaga A	.....	56
Bilaga B	.....	58
Bilaga C	.....	58
Bilaga D	.....	59
Bilaga E	.....	59

1 INLEDNING

Dagens vatten- och avloppsledningsnät (VA-ledningsnät) byggdes till största del under 1950-, 60- samt 70-talen. Detta innebär att det idag finns ett investeringsbehov för att underhålla ledningsnätet och VA-försörjningen. I och med dagens urbanisering som både innebär ökande och minskande antal innevånare i kommuner, uppstår olika typer av problem. Finansiering av VA-ledningsnätet är ett av de större problem eftersom det finns ett behov av att anpassa och bygga ut VA-ledningsnäten i de växande kommunerna medan de krympande kommunerna har ett sämre taxeringsunderlag för att finansiera en upprätthållning av det befintliga VA-ledningsnätet (Svenskt Vatten AB 2020b). Ett problem i spillvattenledningsnätet som både växande och krympande kommuner har är tillskottsvatten i systemet som egentligen inte är spillvatten.

Tillskottsvatten kan ha många olika källor. Exempel på källor till tillskottsvatten i spillvattenledningsnätet är inläckage vid sprickor, otäta kopplingar och brunnar samt felaktiga anslutningar från hustak och husdränering. Problemen med tillskottsvatten kan innebära överbelastade spillvattenledningar som kan leda till förbiledning vid reningsverken (ofullständig rening av spillvatten) samt bräddning då orenat spillvatten släpps ut i naturen för att avlasta ledningarna (Svenskt Vatten AB 2020b).

Om andelen tillskottsvatten enligt förväntningarna ökar i framtiden, förväntas även problematiken med förbiledning och bräddning öka. Anledningen till en förväntad ökad tillskottsvattenandel är att Sveriges klimat förutspås bli varmare i framtiden och mer nederbördsrik (Eklund et al. 2015). Lufttemperaturen förväntas bli högre i hela landet, primärt i norra Sverige under vintern. I och med detta kommer medelnederbörden och även den extrema korttidsnederbörden att öka i Sverige. Då tillskottsvatten delvis härrör från regnvatten finns risken att även andelen tillskottsvatten ökar om nederbörden gör det.

För att i framtiden kunna säkerställa en fungerande infrastruktur krävs reinvesteringar i spillvattennätet ofta i form av punktvis lagning eller nya ledningssträckor (Svenskt Vatten AB 2020a). För att effektivt kunna reparera defekter som leder till inläckage krävs kunskap om ledningsnätet och lokalisering av inläckagen (Schilperoort et al. 2013). Idag undersöks spillvattennätet på olika sätt för att lokalisera inläckage, främst filmning av ledningarna, röktest och färgning av vattnet (Svenskt Vatten AB 2020a). Det finns

nackdelar med dagens tekniker vilket innebär att alternativa eller kompletterande tekniker borde utredas.

En metod som inte är särskilt utbredd i Sverige men som kan appliceras i spillvattennäten för att kontrollera inläckagepunkter är DTS, *Distributed Temperature Sensing*. Tekniken bygger på kontinuerlig temperaturmätning under en tidsperiod över en förutbestämd sträcka. DTS är därför möjligt att applicera i delar av spillvattennätet under en tidsperiod med olika typer av väder. Genom att tekniken registrerar temperaturförändringar som kan uppstå i samband med inläckage i spillvattenledningarna kan läckagepunkterna lokaliseras. DTS är en teknik som skulle kunna appliceras vid undersökning av spillvattenledningarna för att få fram mer underlag till reinvesteringar i dagens avloppsnät för att bibehålla en fungerande infrastruktur. Det är därför nödvändigt att utreda DTS som teknik och huruvida det är ekonomiskt och praktiskt möjligt att implementera detta i större skala i Sverige.

1.1 SYFTE

Syftet med projektet var att undersöka hur DTS kan tillämpas för att lokalisera läckage i spillvattenledningar, både ur ett praktiskt och ett teoretiskt perspektiv. För att illustrera problemet med tillskottsvatten i spillvattenledningar samt föreslå hur DTS skulle kunna implementeras i Sverige analyserades data från vanliga temperatur- och flödessensorer i spillvattenledningar tillsammans med nederbörds- och lufttemperaturdata.

1.2 FRÅGESTÄLLNINGAR

Följande frågeställningar behandlas i detta projekt:

- Hur fungerar tekniken bakom DTS?
- Hur används tekniken vid kontroll av spillvattenledningar?
- Hur kan olika typer av inläckage som sker till spillvattenledningarna urskiljas ur mätningar gjorda med DTS?
- Hur förhåller sig spillvattentemperaturen vid nederbörd under olika årstider? Kan samband identifieras mellan spillvattentemperatur och mängd nederbörd?
- Vilka för respektive nackdelar finns med DTS i jämförelse med andra tekniker vid kontroll av tillskottsvatten?

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Avgränsningar i projektet var att enbart studier genomförda med DTS i spillvattennätet valdes som fallstudier samt enbart studier gjorda i Europa, med en prioritering på Skandinavien.

2 TEORI

Syftet med detta avsnitt är att ge läsaren kunskap om Sveriges avloppsnetts uppbyggnad, begrepp kopplade till spillvatten och spillvattennätet samt hur inläckage i spillvattenledningar kontrolleras idag. Slutligen introduceras läsaren för DTS och hur detta används för kontroll av inläckage i spillvattenledningar.

2.1 SVERIGES AVLOPPSNÄT

I Sverige finns idag totalt cirka 101 000 km avloppsledningar (Svenskt Vatten AB 2020b). Sveriges befintliga avloppsnet har byggts upp under mer än 100 år och under åren har avloppsnetets utformning ändrats. De hygieniska förhållandena var svåra under 1800-talet då smuts och diverse föroreningar transporterades i rännstenar, avloppstrummor eller diken med hjälp av nederbörden till närmaste vattendrag. När befolkningmängden ökade i tätorterna under 1800-talets senare hälft, prioriterades en högre sanitär standard vilket ledde till att allmänna vatten- och avloppsledningar började uppföras. Under 1930-talet börjades utbyggnaden av avloppsreningsverk med mekanisk rening och under 1950-talet introducerades biologisk rening. Kemisk fällning och kvävereduktion påbörjades under 1970- respektive 1990-talet. Till en början bestod de flesta avloppsledningssystem av kombinerade system. Från 1950-talet vid nyanläggning av avloppssystem började dagvattnet separeras från spillvatten (Svenskt Vatten AB 2016a).

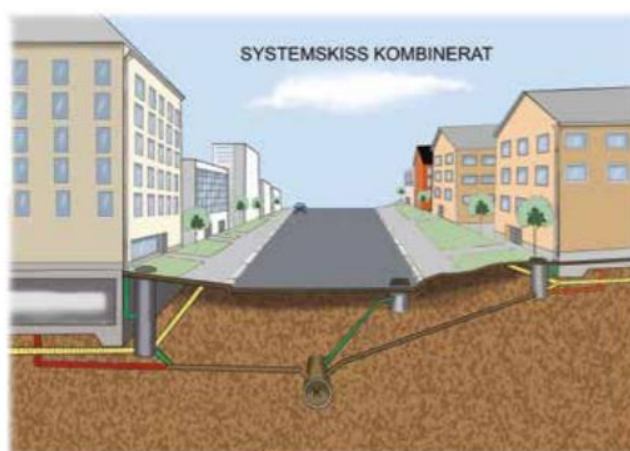
För nya spillvattenledningar gäller att dimensionerande flöden ska kunna avledas utan att ledningarna går fyllda. Vid dimensionering av spillvattenledningarna bör en säkerhetsfaktor på minst 1,5 användas då hänsyn bör tas till framtida ökande belastning på grund av tillkommande bebyggelse och framtida försämringar på ledningarna som kan ske när ledningarna åldras. Till spillvattenledningen får idag inte husgrundsdränering anslutas på grund av risk för överbelastning (Svenskt Vatten AB 2016a).

I alla typer av system för ledningsnäten finns möjligheter för bräddning, där det vid en viss fastställd utspädningsgrad eller ett bestämt flöde kan ske utsläpp av spillvatten.

Bräddningen sker för att inte trycknivåerna i systemet skall bli för höga och därmed orsaka översvämningar i källare samt för att inte få för högt flöde till reningsverken (Svenskt Vatten AB 2016a).

2.1.1 Kombinerade system

Ett kombinerat avloppssystem innebär att kombinerade ledningar används vid avledning av dag-, drän- samt spillvatten (Figur 1). Dessa ledningar förekommer ofta i äldre områden då denna typ av ledningssystem byggdes från slutet av 1800-talet fram till cirka 1940-1950-talet. Idag utgör de kombinerade avloppssystemen cirka 13% av Sveriges avloppssystem (Svenskt Vatten AB 2016a).



Figur 1: Utformning av kombinerat system. Gröna ledningar leder dagvatten, röda spillvatten och gula husgrundsdränering (Svenskt Vatten AB 2016a, med tillstånd).

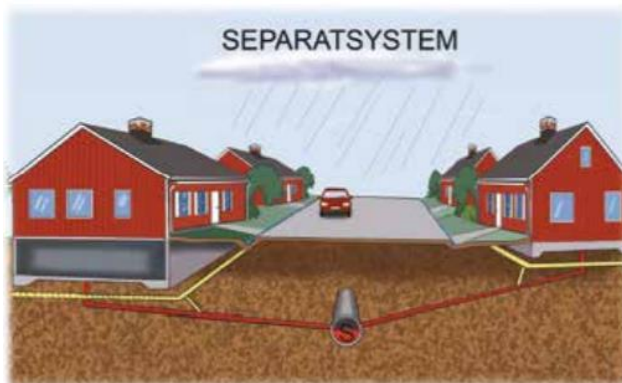
Det finns risker med ett kombinerat avloppssystem, så som källaröversvämningar. Källaröversvämningar sker när den kombinerade ledningen blir överbelastad vilket i sin tur kan leda till att spill- och dagvatten kan tränga upp via toaletter eller golvbrunnar i källarvåningar om inte bakvattenventiler eller spillvattenpumpar installerats (Svenskt Vatten AB 2016a).

Ett funktionskrav för kombinerade avloppssystem är att inte oftare än vart tionde år får en uppdämning ske över den kritiska källargolvnivån, vilket då leder till källaröversvämningar (Svenskt Vatten AB 2016a).

2.1.2 Separatsystem

I separatsystem leds spillvattnet samt dräneringsvattnet från husgrundsdränering i en rörledning medan dagvattnet avleds via rännsten (Figur 2), dike eller tas hand om lokalt

enligt LOD (Lokalt Omhändertagande av Dagvatten). Från 1950-talet fasades denna typ av system ut vid nyanläggning av avloppssystem och anläggs inte idag på grund av risk för överbelastning av spillvattenledningen (Svenskt Vatten AB 2016a).



Figur 2: Utformning av separatsystem. Röda ledningar leder spillvatten och gula ledningar leder husgrundsdränering. Dagvattnet leds ovan mark (Svenskt Vatten AB 2016a, med tillstånd).

2.1.3 Duplikatsystem

I ett duplikatsystem leds spillvattnet i en rörledning och dagvattnet i en annan rörledning (Figur 3). Vid nyanläggning av ett avloppssystem är duplikatsystem den krävda systemlösningen (Svenskt Vatten AB 2016a).

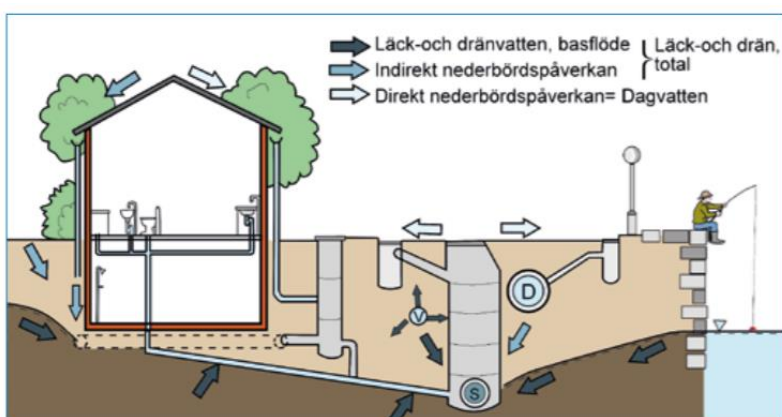
Många före detta kombinerade avloppssystem och separatsystem är idag kompletterade med en nyare dagvattenledning. Där leder alltså den gamla ledningen bort spillvattnet medan dagvattnet avleds via en ny ledning. VA-huvudmannen har på alla platser inte följt upp alla äldre kopplingar från till exempel husgrundsdränering vilket kan innebära att felkopplingar existerar på spillvattenledningen (Svenskt Vatten AB 2016a).



Figur 3: Duplikatsystemets utformning. Gröna ledningar leder dagvatten, röda spillvatten och gula husgrundsdränering (Svenskt Vatten AB 2016a, med tillstånd).

2.2 TILLSKOTTSVATTEN

Enligt Svenskt Vatten AB definieras tillskottsvatten enligt följande: ”Samlingsbegrepp för vatten, som utöver spillvattnet avleds i spillvattenförande avloppsledning. Tillskottsvatten kan således vara dagvatten, dränvatten, inläckande sjö- eller havsvatten med mera.” (Svenskt Vatten AB 2016c:60). Tillskottsvatten kan också bestå av dricksvatten som på grund av överläckage från vattenledningen hamnat i spillvattenledningen. I optimala fall skall ett reningsverk inte ta emot tillskottsvatten utan enbart spillvatten, men så är inte fallet idag. I avlopps nätet kommer alltid en del av vattnet att vara tillskottsvatten då ledningsnätet är så pass stort och ligger ofta i direktkontakt med diverse vattenförande marktyper. Ledningsnätet kan även på vissa ställen vara i kontakt med grundvattnet vilket det till exempel är via anslutna husgrundsdräneringar (Figur 4). Anledningen bakom detta är att lagstiftningen för dräneringsvatten ändrats över tid och att människor förr fick koppla sin dränering på spillvattenledningen medan den idag ska kopplas på dagvattenledningen (Svenskt Vatten AB 2020b).



Figur 4: Flödesvägar för tillskottsvatten in i spillvattenledningar i ett duplikatsystem. I detta fall har man även tillåtit att avleda husgrundsdräneringen via spillvattenledningen (Svenskt Vatten AB 2016a, med tillstånd).

Utöver detta finns ett underhållsbehov på ledningsnäten hos många svenska ledningsägare idag vilket leder till att tillskottsvatten på många platser i landet utgör en för stor del av vatten-volymer som finns i spillvattenledningsnätet som sedan leds till avloppsreningsverken. Tillskottsvatten leder till olika typer av problem i ledningsnätet och vid avloppsreningsverket, så som källaröversvämningar, bräddningar och störda reningsprocesser. Problemen leder till stora kostnader i form av underhåll, olägenheter i privata fastigheter, ökade reningsbehov och även en ökad miljöbelastning med bristande resurshushållning av kemikalier och energi. Tillskottsvatten är en av de större orsakerna

till att ledningarna överbelastas och bräddning behöver ske vid avloppsreningsverket. Bräddning kan innebära att miljön och människor påverkas negativt då näringsämnen släpps ut och smittspridning kan ske via fekalier (Svenskt Vatten AB 2020b).

Det finns många olika typer av källor för tillskottsvatten (Figur 4). Vilken typ av tillskottsvatten man har i ett system beror de lokala förutsättningarna så som geologi, topografi samt uppbyggnad av spillvattenledningsnätet. Man kan dela in tillskottsvatten via olika källor men man kan även gruppera efter hur påverkan i spillvattenledningarna ser ut (Svenskt Vatten AB 2020b).

2.2.1 Direkt nederbördspåverkan

Denna typ av tillskottsvatten härrör från dagvatten vilket är vatten från hårdgjorda ytor som är i direkt anslutning till ett spillvattenförande ledningsnät (ljusblåa pilar, Figur 4). Den direkta nederbördspåverkan ger upphov till ett kraftigt momentant toppflöde som avtar vid nederbördstillfällets slut. Källaröversvämningar, bräddningar samt förbiledning vid reningsverk är konsekvenser av den direkta nederbördspåverkan (Svenskt Vatten AB 2020b).

2.2.2 Indirekt nederbördspåverkan

Indirekt nederbördspåverkan uppstår dygnet efter eller i samband med nederbörd. Via läckage från mark, anslutna husdräneringar och överläckage från dagvatten- till spillvattenledning är några sätt som den indirekta nederbördspåverkan tar sig in i ledningsnätet (mellanblå pilar Figur 4). Vid överläckage mellan dag- och spillvattenledningar kan responsen bli snabb efter ett nederbördstillfälle vilket vid flödesanalys kan vara svårt att skilja från den direkta nederbördspåverkan. Även flöden via husgrundsdränering och ett långsamt överläckage mellan dag- och spillvattenledningar kan vara svåra att urskilja från inläckande grundvatten då de har likartade flödes- och hastighetsresponser. För att skilja dessa åt kan kompletterande undersökningsmetoder utöver mätning av flödet krävas. Denna typ av nederbördspåverkan bidrar till toppflödesproblematik, särskilt vid reningsverk som leder till ökad förbiledning eller bräddning (Svenskt Vatten AB 2020b).

2.2.3 Läck- & dränvatten, basflödet

Inläckage av grundvatten till husdränering, serviser samt huvudledning som är årstidsbundet, inläckage från sjöar, hav och andra vattendrag samt inläckage av

dricksvatten från närliggande läckande dricksvattenledning är exempel på källor till basflödet (Svenskt Vatten AB 2020b) (mörkblå pilar Figur 4).

2.2.4 Grundvattenpåverkan

Grundvattenpåverkan kan urskiljas som en lågintensiv och en mer årstidsbunden tillskottsvariation. Under ett år kan denna komponent bidra till stora volymer i tillskottsvatten. Denna typ av påverkan kan till exempel uppstå vid otäta, lågt belägna delar av spillvattennätet eller vid låga husgrundsdräneringar. Vid beräkning av denna komponent krävs tidsserier om minst ett år då transporttiderna i marken ofta är långa och kan vara flera månader (Svenskt Vatten AB 2020b).

2.3 UTSPÄDNINGSGRAD - ETT SÄTT ATT UPPSKATTA TILLSKOTTSVATTENMÄNGDEN

Utspädningsgrad (*USG*) är en variabel som definieras enligt Ekvation 1 (Svenskt Vatten AB 2020b).

$$USG = \frac{\text{Total avloppsvattenvolym till reningsverk}}{\text{Teoretisk spillvattenvolym}} \quad (1)$$

Då andelen spillvatten och tillskottsvatten är lika stora, är $USG=2,0$. Att beräkna utspädningsgraden kräver inte data av särskilt hög kvalitet vilket gör den till en relativt enkel variabel att beräkna. Däremot ger inte utspädningsgraden någon detaljerad information om hur tillskottsvatten påverkar ledningsnätet och reningsverken vilket innebär att den heller inte ger någon vägledning för vidtagande av åtgärder. Det är alltså ingen parameter som rekommenderas som uppföljningsparameter för tillskottsvatten. En parameter som däremot används vid uppföljning av tillskottsvattenproblematik är procentuell andel tillskottsvatten av det totala avloppsvattenflödet som ses i Ekvation 2 (Svenskt vatten AB 2020b).

$$\text{Andel tillskottsvatten} = 1 - \frac{1}{USG} \quad (2)$$

Ofta beräknas variabeln årsvis vilket medför att resultatet ofta är fluktuerande från år till år. Anledningen bakom detta är att utspädningsgraden beror av nederbördsvolymen under året, vilket gör att parametern blir olika beroende på om året varit nederbördsrikt eller

fattigt. Detta medför att USG är som mest sanningsenligt som medelvärde över en längre period, ca 4-5 år (Svenskt Vatten AB 2020b).

2.4 BEFINTLIGA TEKNIKER FÖR KONTROLL AV INLÄCKAGE TILL SPILLVATTENLEDNINGAR

Det finns inte någon definierad standardmetod för att identifiera inläckage i spillvattenledningar men de vanligaste metoderna idag är rökning, färgning av vattnet samt filmning av spillvattenledningarna (Beheshti & Saegrov 2019).

2.4.1 Röktester

Röktester används idag för att hitta felkopplingar av till exempel hustaksdränering på spillvattenledningar. I denna metod används växtbaserad rök som produceras av en rökgenerator som sedan injiceras i avgränsade delar av spillvattenledningen där misstanke om felaktiga kopplingar på spillvattenledningen finns (Beheshti & Saegrov 2019). Visuellt kan det sedan ses där röken sipprar ut, till exempel ur stuprören från ett hus, en dagvattenbrunn eller vid andra defekter på ledningen där röken kan ta sig ut (Beheshti et al. 2015; Hoes et al. 2009).

Röktestning är en praktisk möjlig metod som kan vara relativt billig om starka misstankar om var man har felaktiga påkopplingar finns. Det går däremot inte att hitta alla typer av inläckage i spillvattenledningar med hjälp av denna metod, därför används den ofta tillsammans med andra metoder som ett komplement (Beheshti & Saegrov 2019).

2.4.2 Visuell metod - Filmning

Filmning av ledningarna är en vanlig metod som idag används vid underhåll av både spillvattenledningar och dagvattenledningar. Metoden går ut på att spillvattenledningarna filmas från insidan med hjälp av en fjärrstyrd kamera. Kameran är fäst på en typ av robot som når spillvattenledningarna via en spillvattenbrunn. Sedan kan roboten styras för att filma inuti rören av en operatör som inspekterar ledningarna live ovan mark, materialet sparas även för senare inspektion. Ur videomaterialet kan bland annat felkopplingar och sprickor i ledningarna ses. Däremot missas ofta mindre defekter på ledningarna med denna metod vilket inte gör de helt tillförlitlig för identifiering av alla typer av inläckage (Beheshti & Saegrov 2019).

2.4.3 Färgning av vatten

För att lokalisera felkopplade hustaksdräneringar eller dagvattenbrunnar används ofta färgning av vatten. Denna metod baseras på att vatten (exempelvis dagvatten från tak) färgas med hjälp av en färg som inte är giftig. Det färgade vattnet släpps sedan ut i till exempel stuprören i ett hus eller i en dagvattenbrunn. För att kunna se om det färgade vattnet når spillvattenledningen kan spillvattenbrunnar öppnas för att se om det färgade vattnet når brunnen (Beheshti & Saegrov 2019; Hoes et al. 2009).

2.5 DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSING

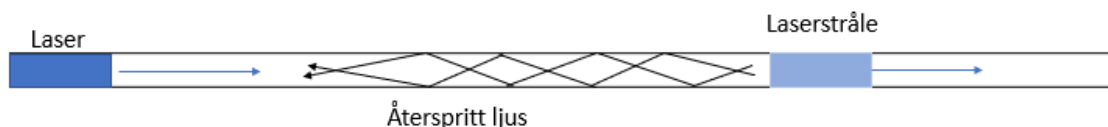
Distributed Temperature Sensing (DTS) är en teknik som bygger på distribuerade temperaturmätningar, det vill säga (relativt) kontinuerliga temperaturmätningar längs en viss sträcka i stället för förutbestämda punkter där temperaturen mäts diskret (Sensornet 2020a).

Tekniken har många appliceringsområden så som övervakning av läckage i gasledningar, vattenledningar och dammar (Sensornet 2020b). DTS har även använts inom brandskydd, gruvindustrins säkerhetssystem och inom byggbranschen för övervakning av olika typer av byggnader (Ukil et al. 2012).

DTS mäter temperaturen längs med en optisk fiberledning och beroende på leverantör av utrustning kan upplösningen för mätningarna se olika ut. Ofta erhålls en temperatursäkerhet på +/- 1 °C med en upplösning på 0,01 °C. Den rumsliga upplösningen för DTS är ofta cirka 1 m och kan användas på distanser upp till 30 km (Ukil et al. 2012).

2.5.1 Hur mätning sker teoretiskt med DTS

Mätningen av temperaturen sker genom att en typ av dator (DTS-enhet) sänder ut en optisk puls (laserstråle) längs med fiberledningen. Laserstrålarna färdas i den optiska fiberledningen där de slutligen sprids tillbaka till DTS-enheten (Figur 5) (Sensornet 2020a; Ukil et al. 2012).



Figur 5: Spridning av laserstråle i den fiberoptiska kabeln.

Primärt finns det tre typer av spridningssätt i optiska fiber, Rayleigh-, Brillouin- och Ramanspridning. För DTS är det vanligast med Ramanspridning. Brillouin- och Ramanspridning är två olika former av oelastisk spridning vilket innebär att återspridningen har våglängder som är större (stokes-spridning) än och mindre (anti-stokes-spridning) än laserstrålens ursprungliga våglängd. Rayleighspridning är en form av elastisk spridning vilket innebär att det återspridda ljuset har samma våglängd som ljuset ursprungligen hade (Selker et al. 2006).

I de fall där brillouinspridning används, uppstår spridningen på grund av små densitetsförändringar i glasfibern. Densitetsförändringarna uppstår på grund av de elektromagnetiska krafterna som ett resultat av då laserstrålen färdas i den optiska fiberkabeln (Kurashima et al. 1990 se Selker et al. 2006). Dessa densitetsförändringar fortplantar sig längs fibern som akustiska vågor eller fotoner som i sin tur ger upphov till resonans. Förändringen i våglängd när ljuset spridits med stokes- och anti-stokes-spridning är proportionellt till den akustiska hastigheten i fibern, vilket i sin tur är en funktion av fiberns täthet (densitet). Hastigheten i fibern korrelerar med materialet för fibern vilket kan variera beroende på leverantör. Fiber materialet brukar inte finnas med i specifikationerna för fiberkabeln vilket innebär att en kalibrering ofta kan behövas (Selker et al. 2006).

För ramanspridning uppstår oscillationer på grund av den termiska effekten längs med fibern. När ljuset från lasern möter de termiskt exciterade molekylerna interagerar fotonerna i ljuset med dessa. Det spridda ljuset har en spektralförskjutning som motsvarar resonansfrekvensen för oscillationen som tidigare beskrevs (Dakin et al. 1985, Hartog 1985 se Ukil et al. 2012). Rayleighspridning, stokes-spridning och anti-stokes-spridning är de tre komponenterna som det återspridda ljuset i Ramanspridning består av. Anti-stokes-spridningen är temperaturberoende vilket inte stokes-spridningen är (Shiota & Wada 1991 se Ukil et al. 2012). Temperaturberoendet som innebär att antalet elektroner med mycket energi ökar med ökande temperatur och leder till att andelen anti-stokes-spridning ökar relativt stokes-spridningen. Förhållandet mellan signalerna (stokes och anti-stokes) skapar en ljusberoende kvantitet som enbart beror (exponentiellt) av temperaturen på fibern på en specifik plats som identifieras av transporttiden av ljuset sedan ljusstrålen sändes ut från lasern (Selker et al. 2006; Tyler et al. 2009). Transporttiden beräknas med hjälp av Ekvation 3 (AFL 2013).

$$t = \frac{2z}{v} \quad (3)$$

I ekvationen är v ljusets hastighet i den fiberoptiska kabeln som beräknas med hjälp av Ekvation 4. z är avståndet från laserkällan i den fiberoptiska kabeln. v beror av brytningsindex (n) för den fiberoptiska kabeln samt av ljusets hastighet i vakuum, c ($3 \cdot 10^8$ m/s) (AFL 2013).

$$v = \frac{c}{n} \quad (4)$$

Endast en liten andel av ljuset sprids i den optiska fibern vilket innebär att signalstyrkan blir låg och begränsar noggrannheten för DTS-mätning. För att förbättra signalstyrkan kan tiden ökas för mätningarna, fler laserimpulser skickas ut och sedan summeras antalet stokes & anti-stokes. En annan typ av laser kan även användas för att förbättra signalstyrkan vid mätningarna (Selker et al. 2006; Tyler et al. 2009).

Väl tillbaka i enheten analyseras spektrumet och tidsfördröjningen av det återspridda ljuset för att sedan översätta detta till temperatur och avstånd längs med fiberkabeln (Panasiuk et al. 2019). Översättningen till temperatur i DTS-enheten sker med hjälp av Ekvation 5 (AFL 2013).

$$T(z) = T_{ref} * \left(1 + \left(\frac{\Delta\alpha z}{\ln\left(\frac{C_{Stokes}}{C_{Anti-stokes}}\right)} \right) + \left(\frac{\ln\left(\frac{I_{Stokes}(z)}{I_{Anti-stokes}(z)}\right)}{\ln\left(\frac{C_{Stokes}(z)}{C_{Antistokes}(z)}\right)} \right) \right) \quad (5)$$

$T(z)$ är temperaturen i Kelvin (K) i den fiberoptiska kabeln vid längden z , T_{ref} är referenstemperaturen i K, $\Delta\alpha$ är den differentiella försvagningen mellan Stokes och Anti-stokes återspridnings våglängder. C_{Stokes} och $C_{Anti-stokes}$ är konstanter som beror av temperaturen. $I_{Stokes}(z)$ samt $I_{Anti-stokes}(z)$ är intensiteten av stokes respektive anti-stokes som funktion av längden z i den fiberoptiska kabeln (AFL 2013). För varje enskild mätning behöver hänsyn tas till omgivningen då detta till exempel kan påverka val av kabeltyp, utplacering samt kalibreringsmetoder (Tyler et al. 2009).

2.5.2 Metod för kalibrering av utrustningen

Vid exakt temperaturmätning kan kalibrering av utrustningen krävas. Kalibreringen av utrustningen innebär att man placerar hela eller delar av kabeln i en miljö med konstant temperatur som mäts av en annan temperatursensor. Kabeln ska vara ansluten till DTS-enheten och kalibreras genom att göra ett lång-tids integrations-dataset (Selker et al. 2006).

2.5.3 Hur mätning sker med DTS praktiskt

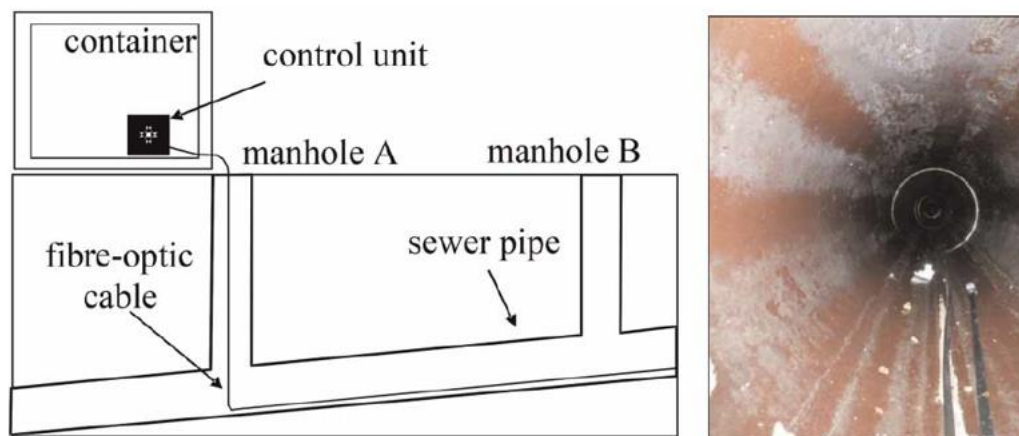
I flertalet studier har en spolning skett av den aktuella ledningssträckan. Spolning av spillvattenledningarna sker för få den aktuella ledningssträckan så fri från föroreningar som möjligt för att temperaturmätningarna ska optimeras (Schilperoort & Clemens 2009; Schilperoort et al. 2013; Panasiuk & Hedström 2019). Ett rep dras mellan två närliggande brunnar genom att repet fästes i spolanordningen (Schilperoort & Clemens 2009; Schilperoort et al. 2013) eller i en inspektionskamera som förs mellan brunnarna (Panasiuk & Hedström 2019).

Vid installation av den fiberoptiska kabeln så är det smidigast om kabeln från början befinner sig på en rulle eller en vinda då det underlättar utdragningen. Genom att efter detta fästa den fiberoptiska kabeln i ena änden på repet och sedan dra i repets andra ände i den närliggande brunnen placeras kabeln i spillvattenledningen. I detta skede är det viktigt att kabeln dras mot mätområdet, antingen från uppströmsänden av mätområdet eller från nedströmsänden. De fall då mindre förgreningsledning skall undersökas görs detta ofta i en ”loop”. En ände av DTS kabeln fästs i huvudledningen och med samma metod fästs ett rep och som dras mot den brunn som ligger på förgreningsledningen. Detta skapar en loop i kabeln. Det är vid sådana tillfällen extra viktigt att dragningen i repet sker med försiktighet då risk finns att kabeln blir för böjd och detta orsakar skador i den fiberoptiska ledningen (Panasiuk & Hedström 2019).

Vid låg lufttemperatur (≤ 0 °C) vid installation av den fiberoptiska kabeln kan rullen av kabel behöva förvaras i ett värmtäkt. Detta beror på att den fiberoptiska kabeln är relativt skör och hantering vid låga temperaturer kan i värsta fall leda till kabelbrott (Panasiuk & Hedström 2019).

Vid installationen av den fiberoptiska kabeln bör denna fästas i avloppsledningarna vid utvalda punkter. Antalet fästpunkter i avloppsledningen beror på flödet och längden på fiberkabeln. Efter installationen i avloppsledningarna kopplas den fiberoptiska kabeln till

en DTS-enhet (Figur 6) (Panasiuk & Hedström 2019). Oftast används en container som förvaring för själva DTS-enheten och även här behövs uppvärmningsmöjligheter undersökas för containern då vissa DTS-enheter ej klarar minusgrader (Panasiuk & Hedström 2019; Schilperoort et al. 2013).



Figur 6: Hur den fiberoptiska ledningen appliceras i spillvattensystemet, samt bild på den fiberoptiska ledningen i en spillvattenledning (Schilperoort et al. 2013, med tillstånd).

Det rekommenderas att vid installation ha en lite längre fiberoptisk kabel än vad som egentligen behövs (cirka 50-150 m utöver längden för mätområdet) om kabelbrott sker och reparation av kabeln behövs. Vid brott på kabeln utförs reparationen av en fiberoptiker. Denne behöver även vara närvarande vid installation då den fiberoptiska kabeln måste svetsas fast på kontaktenheten som sedan kopplas till DTS-enheten (Panasiuk & Hedström 2019).

Gällande underhåll när mätningen pågår bör mätdata laddas ned till en annan lagringsenhet med jämna mellanrum beroende på DTS-enhetens lagringskapacitet samt hur många temperaturmätningar per timme som genomförs. Ledningarna bör också kontrolleras 1-2 gånger per vecka så att inte blockad av spillvattenledningarna sker på grund av den fiberoptiska kabeln. Vid behov kan även ledningarna behöva spolas under mätperioden, detta utförs om föroreningar börjat samlas längs ledningen vilket kan upptäckas i temperaturdatan i form av att temperaturmätningarna dämpas under mätperioden (Panasiuk & Hedström 2019).

För att vid databearbetningen lättare kunna lokalisera platserna för exempelvis brunnarna, kan den fiberoptiska kabeln vid brunnarna tas upp ur vattnet för att sprayas med kylspray.

Vid användning av denna metod bör platsen och tidpunkt för lokalisering vid dataanalysen noteras (Panasiuk & Hedström 2019).

3 METOD

För att undersöka hur DTS kan appliceras för att lokalisera inläckage i spillvattenledningar genomfördes en litteraturstudie om tekniken och fallstudier granskades. Då tankar och åsikter från människor som använt tekniken för detta ändamål är av stor betydelse för denna studie, genomfördes samtal med personer som arbetat direkt och indirekt med DTS i spillvattenledningar. För vidare undersökning av problematiken med tillskottsvatten i spillvattenledningsnäten samt för att identifiera implementeringsmöjligheter genomfördes en fallstudie med temperatur- samt flödesdata från reningsverket på Ön, Umeå samt en spillvattenbrunn i området Klockarbäcken, Umeå. I detta avsnitt presenteras metoden för detta.

3.1 LITTERATURSTUDIE

För att svara på frågeställningarna gällande hur DTS fungerar teoretiskt och praktisk genomfördes en litteraturstudie. För att finna lämplig information om DTS användes sökmotorerna Google och Google Scholar samt databaserna IEEE Explore Digital Library, ScienceDirect, Scopus och Web of Science. Sökorden som användes var ”illicit connections”, ”foul sewer”, ”DTS” och ”distributed temperature sensing” samt olika kombinationer av de olika sökorden. Då DTS kan användas för temperaturmätning i andra sammanhang än i spillvattenledningar användes även studier som inte handlade om spillvatten som referenser för teorin bakom tekniken.

3.2 FALLSTUDIER – TIDIGARE GENOMFÖRDA FÖRSÖK MED DTS

För att välja ut tidigare genomförda försök med DTS som fallstudier användes kombinationer av sökorden som användes vid litteraturstudien, ett exempel på en kombination som användes var ”DTS foul sewer”. Tre studier valdes slutligen ut utifrån följande kriterier:

- Utförda i Europa, helst Skandinavien.
- Genomförda i spillvattenledningar
- Ska helst innehålla information gällande till exempel områdesbeskrivning, använd teknik, kostnader, databearbetning samt ha signifikanta resultat och slutsatser.

Studierna som valdes ut var alla utförda i Europa varav två var genomförda i Skandinavien (en i Sverige, en i Norge och en studie som var utförd i både Tyskland och Nederländerna). Alla studierna var gjorda i spillvattenledningar.

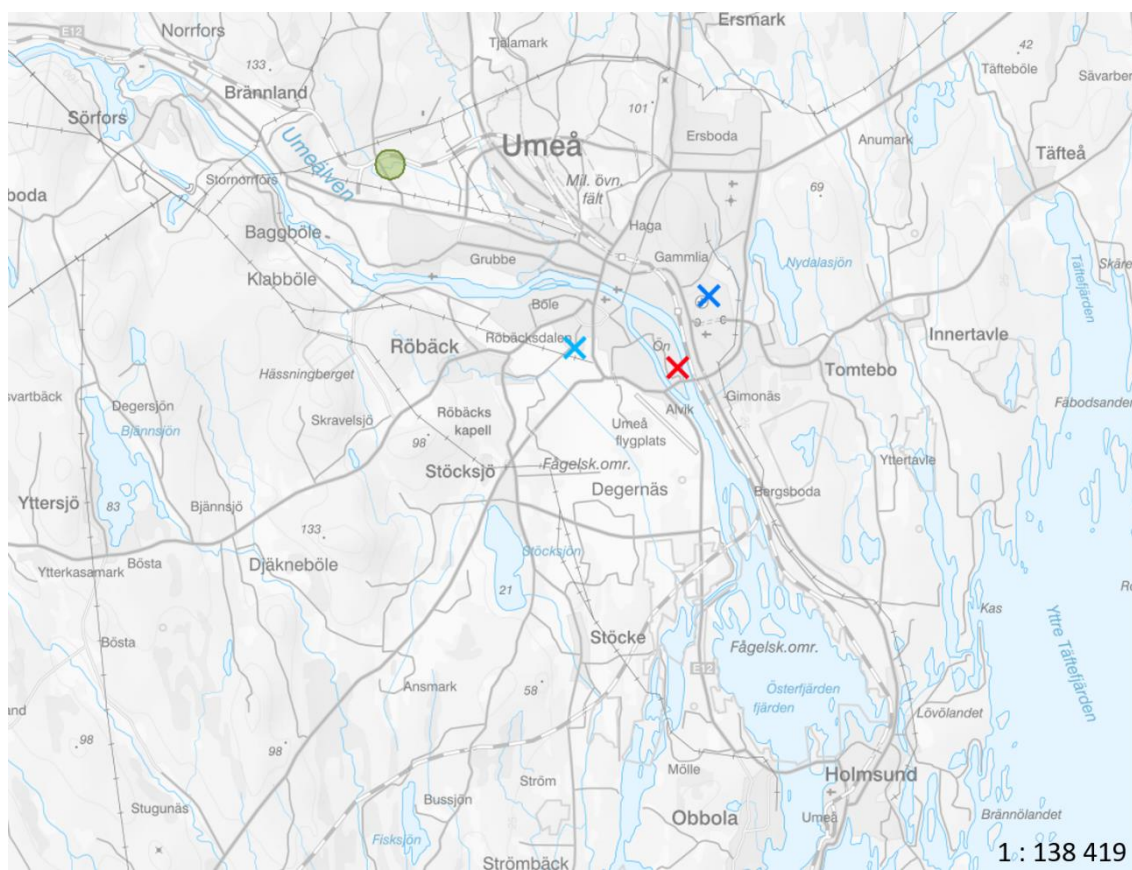
3.3 DATA- OCH INFORMATIONSSINSAMLING - UMEÅ

För att kunna påvisa problematiken med tillskottsvatten och hitta möjliga appliceringsområden för DTS i spillvattenledningarna samlades data in från reningsverket på Ön, Umeå för tidsperioden 20191101-20201130. Datan erhöles från Vakin. Även en beskrivning av området samt annan relevant information gällande reningsverket och spillvattennätet kopplat till reningsverket på Ön samlades in.

3.3.1 Nederbördsdata

Då datan från reningsverket hade hög upplösning (tim- och minutvärden) och SMHI:s nederbördsdata enbart registrerade dygnsvärden användes nederbördsdata uppmätt varje timme från Umeå universitet. Nederbördsdata validerades mot dygnsdata från SMHI (SMHI 2021; mätstation "Röbäcksdalen") då reningsverket på Ön använt samma nederbördsstation i tidigare arbete (Vakin 2018). Detta genomfördes genom att summera alla 24 timvärden från datan från Umeå universitet för att sedan visualiseras i en graf tillsammans med dygnsvärdena från SMHI. Resultatet av valideringen ses i Bilaga C.

SMHI:s mätstation "Röbäcksdalen" befinner sig på en höjd på 10 meter över havet (m.ö.h), latitud 63,8130 och longitud 20,2398 (ljusblått kryss Figur 7).



Figur 7: Karta över Umeå. Rött kryss markerar reningsverket. Mörkblått kryss representerar nederbördsstationen vid Umeå universitet. Ljusblått kryss representerar SMHI:s station Rönnskaldalen och grönt inringat område visar ungefärlig placering av spillvattentemperaturdata hämtad från Klockarbäcken (VISS 2021). Kryssen markerar ungefärliga positioner.

Nederbördsstationen vid Umeå Universitet saknar exakt position men är belägen vid universitetet (se mörkblått kryss i Figur 7) och registrerar nederbördsdata varje timme. Datan är ej korrigerad vilket innebär att vind-, avdunstnings- samt vätningsförluster kan uppstå. För vissa tidpunkter saknades nederbördsdata under tidsperioden och för att åtgärda detta genomfördes en interpolering av intilliggande datapunkter. Nederbördsdata för tidsperiodens ses i Bilaga A.

3.3.2 Data erhållen från reningsverket på Ön

Reningsverket är beläget på Ön, Umeå (rött kryss i Figur 7). Denna data innehöll lufttemperatur, spillvattentemperatur i inkommande vatten till reningsverket samt beräknat inkommande flöde (utgående flöde + bräddning) vilket kan ses i Bilaga A. Datan innehöll minutvärden samt timvärden för respektive parameter. För de båda

temperaturparametrarna var timvärdena medelvärden för timmens alla minuter. Flödet för minut- samt timdatan var beräknade som flöde i enheten m³/h.

3.3.3 Områdesbeskrivning för reningsverket Ön, Umeå Kommun

Reningsverket på Ön är lokaliserat söder om centrala Umeå på en ö i Umeälven. Via fem tryckledningar når avloppsvattnet reningsverket. Detta reningsverk behandlar avloppsvatten från cirka 100 000 personer vilket omfattar områdena i Umeås centralort samt orterna Sörfors, Brännland, Klabböle, Ersmark, Anumark, Yttertavle, Innertavle, Stöcksjö, Holmsund, Obbola, samt Täfteå. Reningsverket tar även emot avloppsvatten från Dåva industriområde i Umeå kommun. Öns avloppsreningsverks upptagningsområde tillhör Forslunda Vattenverks distributionsområde (Vakin 2018).

Ledningsnätet som leder till reningsverket består av cirka 400 km spillvattenledningar, tryckledningar samt servisledningar. Utöver detta finns 68 avloppspumpsstationer. I huvudsak avleds dagvattnet i separata dagvattenledningar eller i diken (Vakin 2018).

Antalet bräddpunkter på spillvattennätet är totalt 95. Av de 95 bräddningspunkterna är 76 i anslutning till en pumpstation och resterande 19 bräddpunkter är nödavlopp för ledningsnätet. På alla pumpstationer finns larm för hög nivå och vid samtliga bräddavlopp finns utrustning för att registrera bräddfrequensen (Vakin 2018).

3.3.4 Åtgärder som tidigare genomförts för att minska mängden tillskottsvatten

För att minska frekvenserna för bräddning och för att förbättra reningsprocesserna i avloppsreningsverket arbetar Vakin aktivt med att avskilja tillskottsvatten från spillvatten. Årligen tas planer fram för prioriterade reinvesteringar i det befintliga avloppsnätet. År 2009 togs en strategi fram för förnyelse av vatten- och spillvattenledningar mellan 2010-2020. Då uppskattades förnyelsebehovet av de befintliga spillvattenledningarna vara cirka 2000 m om året, det vill säga en utbytelsetakt på 200 år. För att sträva mot målen med minskat tillskottsvatten och därmed minskade bräddningstillfällen har bland annat kapacitetsstudier, inventering av fastigheters dagvattenanslutningar samt flödesanalyser genomförts (Vakin 2018).

Under året 2017 genomfördes flertalet åtgärder för att på sikt minska andelen tillskottsvatten i spillvattenledningarna. Med hjälp av flödesmätning har stora källor till tillskottsvatten från felaktigt kopplat dagvatten påträffats för att sedan kunna åtgärdas. Under 2017 lades även 1300 m spillvattenledning om i samband med gatuombyggnad

samt så strumpinfodrades en ledningssträcka på 960 m. Även dessa åtgärder ledde till mindre andel tillskottsvatten (Vakin 2018).

3.4 DATAANALYS FALLSTUDIE UMEÅ

3.4.1 Analys av spillvattentemperaturen för inkommande spillvatten till reningsverket på Ön, Umeå

För att analysera eventuella samband mellan temperatur i spillvattnet, lufttemperatur och nederbördsdata var första steget att skapa en översikt av datan. Datan bearbetades i programmen MATLAB och Excel. En form av bearbetning som skedde på datan var linjär interpolation. Då vissa tidssteg i datan saknade registrerade mätvärden genomfördes en linjär interpolation mellan de intilliggande datapunkterna. Detta utfördes med hjälp av Ekvation 6.

$$l(x) = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) \quad (6)$$

Ekvationen ger linjens ekvation mellan punkterna, x är tid och $l(x)$ funktionen för mätdatat (spillvattentemperaturen). I Ekvation 6 är y_1 den sista punkten för data innan mätutrustningen inte registrerade mer data, y_2 motsvarar nästkommande registrerade datapunkt. x_1 samt x_2 representerar motsvarande mätdatas tidpunkt, skillnaden mellan dessa blir antalet timmar emellan mätdata y_1 och y_2 .

För att urskilja eventuella samband mellan spillvattentemperaturen och nederbördstillfällena beräknades derivatan av spillvattentemperaturen mellan alla dygn för tidsperioden. Att analysera derivatan av spillvattentemperaturen genomfördes för att på ett automatiserat sätt välja ut temperatursänkningarna för att undersöka om mängden nederbörd hörde ihop med temperaturparametern. För att genomföra detta togs först ett dygnsmedelvärde för spillvattentemperaturen för varje dygn under tidsperioden fram. Efter detta kunde derivatan beräknas mellan dygnen. Detta gjordes med hjälp av Ekvation 7.

$$T' = \frac{T_{d+1} - T_d}{t_{d+1} - t_d} \quad (7)$$

Variabeln T_d representerar spillvattentemperaturen ett visst dygn medan T_{d+1} representerar spillvattentemperaturen nästkommande dygn, båda med enheterna °C.

Variablerna i nämnaren representerar tiden och skillnaden i dessa motsvarade ett dygn. Då spillvattnet har en naturlig årstidsvariation samt dygnsvariation användes temperaturderivatan mellan dygnen i stället för minutvärden av spillvattentemperaturen.

För att urskilja vilka av dygnen som uppvisade störst temperaturvariation och därmed förmodligen är kopplat till annat än normala dygnsvariationer sorterades datamängden utifrån storlek på derivatan. Detta utfördes genom att använda $-0,5 \text{ }^\circ\text{C/dygn}$ som tröskelvärde. Anledningen till att detta värde valdes som tröskelvärde var det visuellt kunde ses att större temperatursänkningar än detta registrerades i samband med nederbörd. Genom en visuell inspektion av spillvattentemperaturen urskildes främst temperatursänkningar som skulle kunna kopplas till nederbörd. Detta innebar att det var de negativa temperaturderivatorna som var av intresse i denna analys. Alla temperaturderivator som hade ett mer negativt värde än $-0,5 \text{ }^\circ\text{C/dygn}$ plockades därmed ut tillsammans med datumen för respektive temperaturförändring. Datumen parades ihop med nederbördsdata och om ett nederbördstillfälle var kopplat till dessa datum summerades då hela nederbördsmängden i mm för det regntillfället. För att slutligen identifiera eventuella samband visualiserades parametrarna temperaturderivata under $-0,5 \text{ }^\circ\text{C/dygn}$ och nederbördsmängd för nederbördstillfället kopplat till dygnet grafiskt, där temperatursänkningarna visualiserades som absolutbelopp.

För att till sist undersöka det eventuella sambandet mellan dessa två parametrar genomfördes en regressionsanalys med hjälp av linjär regression vilket innebar att en rät linje anpassades till datapunkterna för att representera hur x-parametern påverkar y. I detta fall studerades hur nederbördsmängden påverkade sänkningen i spillvattentemperaturen.

3.4.2 Analys av det beräknade inflödet till reningsverket på Ön, Umeå

För att få en bild över hur mycket tillskottsvatten som fanns i spillvattenledningsnätet i Umeå börjades analysen med att beräkna utspädningsgraden, USG. För att beräkna detta användes Ekvation 1 (indata ses i Tabell 2).

Då den analyserade tidsperioden har månader i både 2019 och 2020 användes ett medelvärde mellan dessa två år som *Total renad spillvattenvolym* för tidsperioden. Den uppskattade totala spillvattenvolymen togs fram genom att visuellt analysera flödes- och nederbördsgraferna och välja ut en period med lågt flöde, utan någon nederbörd under minst en vecka. Därför användes i detta fall ett medelvärde för timflödet under en vecka

utan nederbörd i mitten av augusti (Se Bilaga B). Flödet som valdes var 1083 m³/h. Detta värde multiplicerades med en konstant om 8760 h/år vilket omvandlade flödet till 9 487 080 m³/år (Tabell 2).

Efter beräkningen av USG genomfördes en liknande analys på flödesdatan från reningsverket på Ön som genomfördes på spillvattentemperaturdatan. Först summerades alla timvärden för varje dygn till ett dygnsvärde och sedan beräknades skillnaden i flöde mellan dygnen med hjälp av Ekvation 8.

$$Q' = \frac{Q_{d+1} - Q_d}{t_{d+1} - t_d} \quad (8)$$

Q' är flödesderivatan, skillnaden i flöde mellan två efterföljande dygn. Q_d är flödet för ett dygn och Q_{d+1} är flödet för nästkommande dygn. Variablerna i nämnaren representerar tiden och skillnaden i dessa kommer att motsvara ett dygn. Anledningen till att dygnsvärdena för flödet valdes i denna analys var för att de naturliga dygnsvariationerna i flödet som fanns i datan inte skulle påverka analysen.

För att urskilja de dygn med störst flödesskillnad valdes +5000 m³/dygn som tröskelvärde. I flödesanalysen valdes positiv derivata ut då flödet förväntas öka vid eventuellt inläckage av regnvatten, vilket resulterar i en positiv derivata. De positiva derivatorna över +5000 m³/dygn kopplades ihop med tillhörande datum och kopplades sedan ihop med ett eventuellt tillhörande nederbördstillfälle. Hela nederbördstillfallets regnmängd summerades då hela nederbördstillfallet antogs påverka flödet. En graf ritades upp där flödesderivatan och nederbördsmängden för det tillhörande nederbördstillfallet befann sig på x- respektive y-axeln. En linjär regressionsanalys utfördes sedan på datan på samma sätt som i avsnitt 3.4.1.

3.4.3 Analys av spillvattentemperatur i spillvattenbrunn Klockarbäcken, Umeå

För att undersöka sambandet mellan spillvattentemperaturen och nederbörden vid Klockarbäcken ritades en graf upp som innehåll spillvattentemperaturen och nederbörden. Denna spillvattentemperaturdata analyserades enbart visuellt.

3.4.4 Analys av samband mellan spillvattenflödesderivata och spillvattentemperaturderivata

För att analysera huruvida något samband finns mellan spillvattentemperaturderivatan och spillvattenflödesderivatan genomfördes även en analys av dessa två parametrar.

Respektive derivata beräknades enligt Ekvation 7 samt 8. En linjär regression enligt tidigare beskrivning genomfördes sedan för att visualisera det eventuella sambandet parametrarna.

4 FALLSTUDIER

Sammanlagt granskades fyra tidigare genomförda studier där DTS använts i syftet att identifiera inläckage i spillvattenledningar. Utifrån dessa valdes studier gjorda i Skellefteå, Trondheim (Norge) samt Woensdrecht och Wuppertal (Nederländerna och Tyskland) utifrån nämnda kriterier i avsnitt 3.2 (översiktlig information från dessa ses i Tabell 1). I detta avsnitt redovisas resultatet av granskningen.

Tabell 1: Översiktligt information från relevanta fallstudier. ”-” indikerar på att uppgifterna saknades.

Plats för studie	Woensdrecht, Nederländerna & Wuppertal, Tyskland (Schilperoort et al. 2013)	Skellefteå, Sverige (Panasiuk et al. 2019)	Trondheim, Norge (Beheshti & Saegrov 2018)	Nederländerna (Schilperoort & Clemens 2009)
Typ av spillvattensystem	Duplikat	Separat	Separat	Kombinerat
Mätperiod	Woensdrecht: 22/4 - 6/5 2011. Wuppertal: 17/8 - 13/9 2011.	20/3-23/6 2015	23/8-20/11 2015	1 vecka
DTS-enhet och leverantör	HALO DTS, Sensornet, London	XT-DTS, Silixa Ltd, London	DTSx3000, Yokogawa	HALO DTS, Sensornet, London
Fiber-optisk kabel	Kaiphone Technology, Taiwan, typ MultiMode 50/125µm	MultiMode 50/1125 µm-OM2/OM3 klass	-	Kaiphone Technology, Taiwan, typ MultiMode 50/125µm
Skyddande hölje	PBT, rostfritt stål, Kevlar, flätad metall och PE.	-	-	PBT, rostfritt stål, Kevlar, flätad metall och PE.
Tidsupplösning [s]	60	14	18	30 s
Rumsupplösning [m]	2	0,25	0,5	2 m
Temperaturupplösning [°C]	0,1	0,1	0,01	0,15 °C
Längd på fiber-optisk kabel	Woensdrecht: 1500 m Wuppertal: 1200 m.	2050 m kabel 1, 1225 m kabel 2, 355 m sidoleddningar. Totalt: 3630 m	Cirka 4800 m	Cirka 1850 m
Antal hushåll på mätsträcka	-	543 (innevånare uppströms)	Cirka 200	Cirka 15000
Påvisat inläckage	Ja	Ja	Ja	Ja
Kostnad	10-12€/m	Cirka 1 miljon kr	-	-

4.1 WOENSDRECHT, NEDERLÄDERNA & WUPPERTAL, TYSKLAND 2011

Studien genomfördes i två olika städer i två olika länder, Woensdrecht, Nederländerna och Wuppertal, Tyskland. Mätperioden var 22/4 - 6/5 2011 i Woensdrecht respektive 17/8

- 13/9 2011 i Wuppertal. Syftet med studien var att presentera en alternativ lokaliseringsteknik för tillskottsvatten i spillvattensystem (Schilperoort et al. 2013).

4.1.1 Områdesbeskrivning

Andelen hushåll som var kopplade till separata avloppssystem var omkring 25% i Nederländerna och i Tyskland var andelen 40%. Felaktiga kopplingar på det separata avloppssystemet var ett problem. De felaktiga kopplingarna kunde bestå av antingen spillvatten som var felaktigt påkopplat på dagvattenledningarna eller dagvatten som felaktigt var påkopplat på spillvattenledningarna. Problemen med dagvatten som tog sig in i spillvattenledningarna var det som motiverade studien som genomfördes i Woensdrecht i Nederländerna och Wuppertal i Tyskland (Schilperoort et al. 2013).

De båda mätplatserna valdes utifrån tidigare genomförda inspektioner där misstänkta platser för inläckage av tillskottsvatten lokaliserats. De tidigare inspektionerna hade skett visuellt samt med filmning av spillvattenledningarna (Schilperoort et al. 2013).

4.1.2 Använd teknik och data

I studien användes fiberoptiska kablar innehållande två glasfibrer. Fibern var omgiven av skyddande gel för att förhindra yttre spänningar på kabeln som omgavs av ett kraftigt skyddande hölje. För att registrera temperaturen i spillvattenledningarna användes en DTS-enhet av typen HALO-DTS av tillverkaren Sensornet. Upplösningen i tid, rum samt temperaturupplösning för enheten ses i Tabell 1. Utrustningen i denna studie kalibrerades inte då enbart temperaturskillnader och inte exakta temperaturer analyserades i resultatet. Enligt författarna skulle eventuella temperaturförskjutningar i utrustningen inte påverka resultatet av en temperaturdifferens (Schilperoort et al. 2013).

Samma typ av utrustning användes i de båda städerna. Det som skiljde utrustningen åt var längden på den fiberoptiska kabeln (Tabell 1) (Schilperoort et al. 2013).

Nederbördsdatan som användes i denna studie specificerades inte mer än att de kom från lokala nederbördsräknare (Schilperoort et al. 2013).

4.1.3 Databearbetning

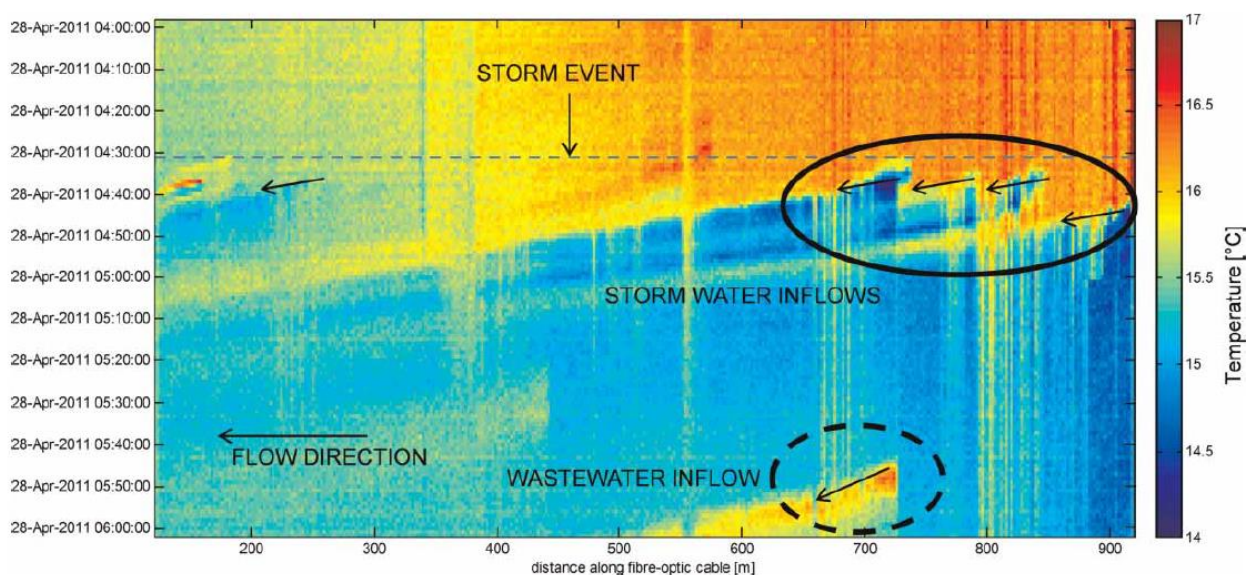
Vid analysen av mätdatan från dessa två platser var det inledande steget att dela in datan i dagar med och utan regnevent. Mätdatan från dagarna utan regnevent användes för att analysera spillvatteninflödet som inte är relaterat till dagvatteninflödet. Datat från dagarna med regnevent användes för att analysera och lokalisera var inflödena av

dagvatten skedde. All mätdata i studien analyserades manuellt och jämfördes med lokala nederbördsmätningar, men det ansågs att det skulle underlätta framtida analyser att göra analyserna automatiserade (Schilperoort et al. 2013).

4.1.4 Studiens resultat och slutsatser

Delar av studiens resultat visualiseras i Figur 8-Figur 10 där avståndet från DTS-enheten på ses x-axeln och tiden på y-axeln. De olika färgerna motsvarar uppmätta temperaturer i °C där blått motsvarar lägre temperaturer och rött varmare.

Resultatet av mätningarna i Woensdrecht den 28 april 2011 visade en temperatursänkning på omkring 2 °C i spillvattenledningen några minuter efter att ett regn börjat (inringade pilar i Figur 8). Regneventet visualiseras i en blå streckad linje och i grafen ses först hur spillvattentemperaturen innan regneventet var ca 16 °C för att kort efter regneventet sjunka till omkring 14 °C (Schilperoort et al. 2013).

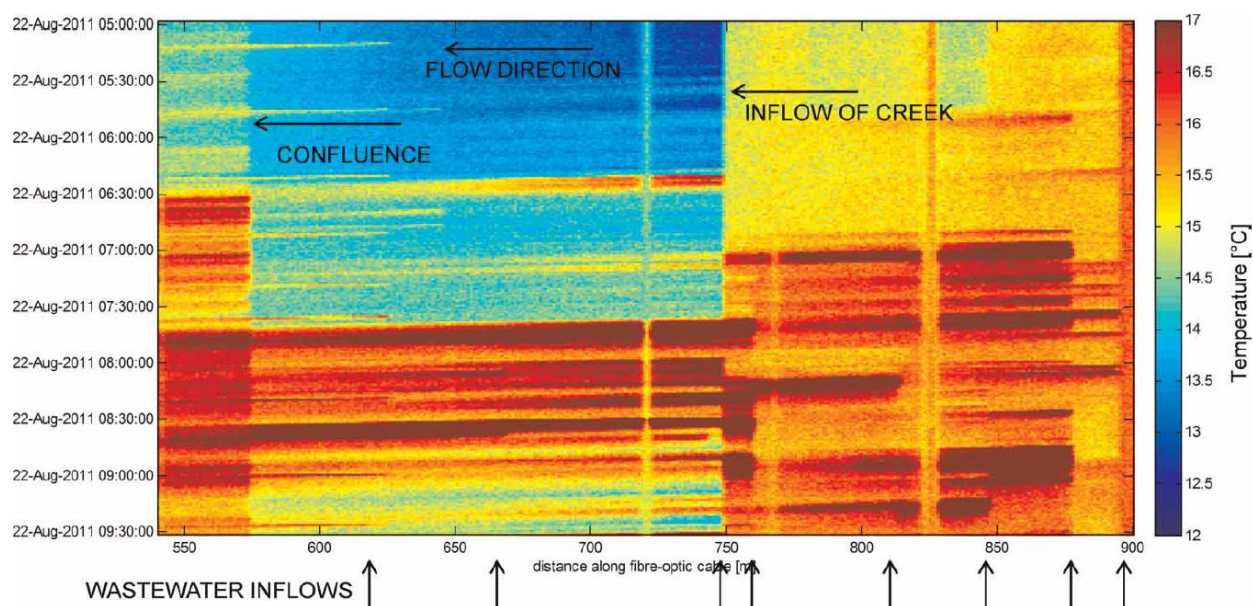


Figur 8: Resultatet för DTS-mätning i Woensdrecht den 28:e april 2011 (Schilperoort et al. 2013, med tillstånd).

Temperatursänkningen förväntas vara kopplad till inflöde av relativt kallt dagvatten som tagit sig in i spillvattenledningen (Figur 8). Det kallare tillskottsvattnet rann nedströms i spillvattenledningen vilket innebar att spillvattentemperaturen (med en viss fördröjning) sänktes längre nedströms i spillvattenledningen. Ett högre spillvattenflöde under regneventet kunde även urskiljas. Detta indikerar på att DTS kan användas för att övervaka flödets utbredning i spillvattenledningar och därmed även kunna studera

advektionsprocesser i avloppsledningar i samband med mätningar av temperaturen (Schilperoort et al. 2013).

I Wuppertal upptäcktes ett tillflöde från en bäck till en spillvattenbrunn (Figur 9). Detta speglades i temperaturdatat från mätningarna med DTS då en kraftig temperatursänkning kunde urskiljas under hela mätperioden vid avståndet 750 m från DTS-enheten, bortom detta är spillvattentemperaturen varmare (ca 15 °C) under hela mätperioden. Detta fenomen indikerade på ett kontinuerligt inflöde av vatten från bäcken. På samma plats som denna upptäckt gjordes, urskildes även varmare tillflöden till spillvattenledningen (cirka 17 °C). Detta berodde på att det även fanns ett tillflöde från ett hus för spillvatten i brunnen. Under tidigare inspektion med filmning kunde inte tillflödet från bäcken ses då det skedde på samma plats som en påkopplad servisledning från en fastighet (Schilperoort et al. 2013).

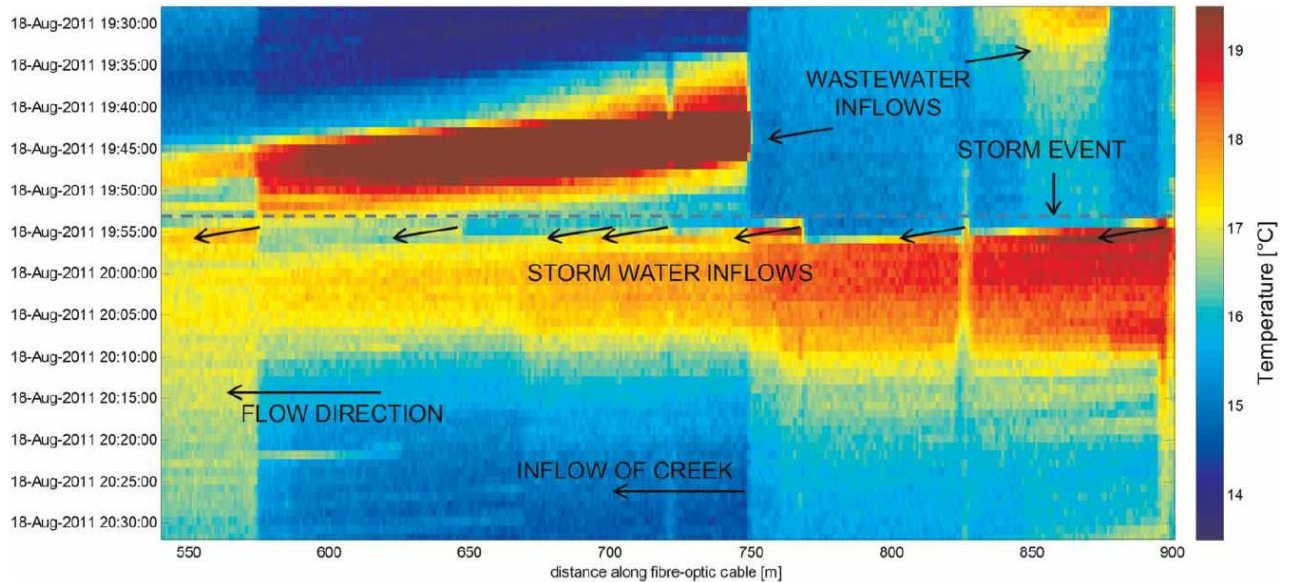


Figur 9: Resultatet för DTS-mätning i Wuppertal den 22:a augusti 2011 (Schilperoort et al. 2013, med tillstånd).

I Wuppertal påvisades samma fenomen som i Woensdrecht, att temperaturen på vattnet i spillvattenledningarna förändrades strax efter att ett regnevent startat. Här sågs däremot en temperaturökning i stället för en sänkning i vattentemperaturen i spillvattenledningen (Figur 10) (Schilperoort et al. 2013).

Anledningen till att temperaturen ökade vid regneventet var att mätperioden ägde rum under sommaren med höga lufttemperaturer (och därmed höga regnvattentemperaturer). I allmänhet sågs att temperaturförändringarna i spillvattnet överensstämde med platserna

för brunnar vilket tydde på att dagvatten tog sig ner i spillvattenledningarna genom brunnslöck. För att förhindra detta ansågs brunnslöcken behöva ersättas av tätare alternativ (Schilperoort et al. 2013).



Figur 10: Resultatet för DTS-mätning i Wuppertal 18:e augusti 2011 (Schilperoort et al. 2013, med tillstånd).

Slutsatserna från studien var att DTS är en kraftfull teknik vid analys av processer i avloppsledningarna som kan påverka avloppsvattentemperaturen. Det visade sig att det var möjligt att installera fiberoptiska kablar och applicera DTS-mätning i spillvattenledningar. Då endast en enhet används vid mätningarna blir det relativt enkelt att placera ut DTS-enheten. När tekniken väl är installerad kräver den inget fortsatt underhåll utöver insamling av data på en enda plats. Genom att genomföra undersökningen av felaktiga påkopplingar på spillvattenledningen i själva ledningen gör också att mätningarna inte behöver ske på privat mark. Ur studien drogs slutsatsen att det är möjligt att hitta exakta källor till dagvatten i spillvattenledningar med hjälp av DTS (Schilperoort et al. 2013).

4.1.5 Kostnader

Kostnaden approximerades till 10-12 €/m, där 30% av denna kostnad var dataanalys, 30% var installationskostnader i avloppsledningen, 25% var kostnader för utrustningen (kabel samt DTS-enhet) och resterande 15% var förvaltningskostnader (Schilperoort et al. 2013). Huruvida kostnaden var för inköp eller hyra av utrustning specificerades ej.

4.2 SKELLEFTEÅ, SVERIGE 2015

Denna studie utfördes i Skellefteå kommun, Västerbottens län, Sverige. Den valda tidsperioden för denna studie var 20/3-23/6 2015. Syftet med denna studie var huruvida DTS kan användas för att bestämma källorna till tillskottsvatten före, under och efter snösmältning (Panasiuk et al. 2019).

4.2.1 Områdesbeskrivning

Till området och spillvattenledningen som studerades kom spillvatten från ett område uppströms med 543 innevånare (Panasiuk et al. 2019).

Studieområdet föreslogs av kommunen då flödesmätningar tidigare gjorts under hösten 2013 och våren 2014 och det konstaterats att avloppssektionen just här var påverkad av tillskottsvatten (Panasiuk et al. 2019).

4.2.2 Använd teknik och data

Vid studien användes två fiberoptiska kablar som installerades så att 2180 m av huvudledningen var täckt. Fem sidoleddningar undersöktes även där den totala längden var 355 m. I alla sidoleddningar installerades den fiberoptiska kabeln i form av en loop, vilket innebar att kabeln löpte två gånger i rören, både medströms och motströms. 60 m extra kabel av nr 1 samt 325 m av kabel nr 2 lämnades i brunnar om eventuella skador skulle uppstå på den delen av ledningen som befann sig i spillvattenledningen (Panasiuk et al. 2019).

DTS-enheten som användes i denna studie var ”XT-DTS” av tillverkaren Silixa Ltd, London, UK. De fiberoptiska kablarna kopplades till DTS-enheten med hjälp av Multimode E2000/APC8 kopplingar från samma tillverkare (Tabell 1). DTS-enheten placerades i en uppvärmd container (Panasiuk et al. 2019).

I studien genomfördes även nederbörds­mätningar 2,6 km från DTS-enheten, där regnmätare av typerna Genor T-200B ”weighting bucket” samt MJK Meteorologisk ”tipping-bucket” användes. Dessa hade en mätosäkerhet på 0,2 mm (Panasiuk et al. 2019).

Lufttemperaturmätningar utfördes var 30:e sekund med hjälp av en MicroLite USB temperatur-logger vars mätosäkerhet var omkring 0,03 °C (Panasiuk et al. 2019).

Data för snödjup hämtades från SMHI där mätpunkter för detta fanns 14,6 km samt 16,4 km från området där studien genomfördes (Panasiuk et al. 2019).

4.2.3 Databearbetning

För att matcha DTS-graferna med korrekta avstånd i avlopps nätet sprayades frysspray på kablarna under 30-120 s. Vid analys av rådatan sågs hur temperaturen kraftigt förändrades under en kort tid och därmed kunde distansen beräknas. Detta utfördes på 28 utvalda punkter på fiberledningen (Panasiuk et al. 2019).

4.2.4 Antaganden

I denna studie gjordes följande antaganden:

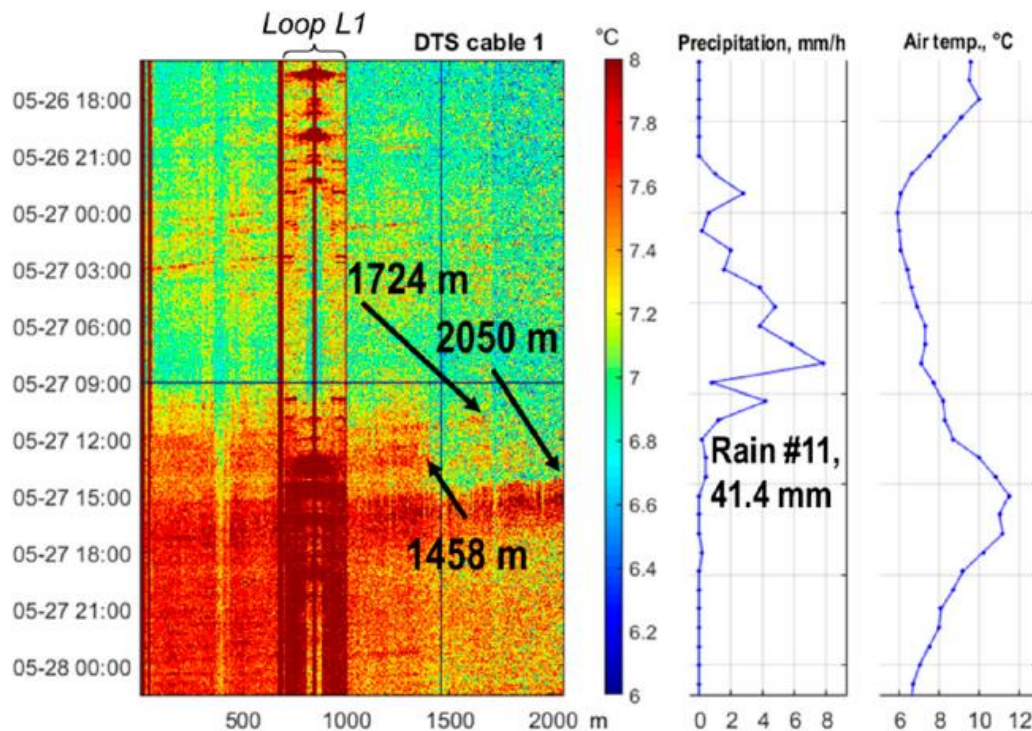
- Inom området fanns inget traditionellt dagvattensystem vilket innebär att felkopplingar mellan spill- och dagvattenledningar kunde uteslutas från studien (Panasiuk et al. 2019).
- Regntillfällena ansågs som separata om det var minst 3 h uppehåll emellan dem (Panasiuk et al. 2019).

4.2.5 Studiens resultat och slutsatser

Vid granskning av klimatdatan för området sågs att snön smält den 16:e april och att de kommande mätmånaderna var snöfria. Under mätperioden skedde 28 regnfall som innehöll en regnmängd över 2 mm. Av dessa event innehöll 14 en regnmängd som var större än 5 mm (Panasiuk et al. 2019).

I resultatet av mätdatan sågs temperaturavvikelser i temperaturdatan från DTS-mätningen. Mellan 5 april och 21 april urskildes temperaturavvikelser som sänkte temperaturen i spillvattenledningen. Efter den 21 april kunde inte någon sådan temperaturavvikelse (temperatursänkning) ses (Panasiuk et al. 2019).

Efter snösmältningen skett inträffade mätperiodens största regnfall med en vattenmängd på 41,4 mm. Detta ledde till en temperaturökning i spillvattenledningarna (Figur 11) (Panasiuk et al. 2019).



Figur 11: Resultatgraf från studien gjord i Skellefteå. Avståndet från DTS-enheten ses på x-axeln och tiden ses på y-axeln i den vänstra grafen. I de högra graferna ses nederbörd och lufttemperatur vid det största nederbördstillfället under mätperioden. Här representerar x-axeln nederbördsmängd respektive lufttemperatur (Panasiuk et al. 2019, med tillstånd).

Analysen av datan visade att det fanns temperaturförändringar som faktiskt kunde kopplas till inläckage i spillvattenledningarna. De olika typerna av inflödena som studien hade som mål att identifiera var kontinuerligt grundvatteninflöde samt inflöde från regn, snösmältningsavrinning och grundvatteninflöde (orsakat av temporär höjning av grundvattenytan) inducerat från snösmältning eller regn. För att identifiera olika typer av inläckage jämfördes DTS-mätningarna med aktuella klimatdata (Panasiuk et al. 2019).

Ingen temperaturförändring vid regnfall som var kortvariga och hade låg intensitet kunde urskiljas. Detta hade förmodligen skett om felkopplade takavvattningssystem existerade. I området hade tidigare gjorts färgning av takvatten och kunde inte lokalisera detta i spillvattnet vilket gör att denna teori stärks. Ingen av sträckorna där temperaturavvikelse hittades hade spillvattenbrunnar vilket kunde utesluta denna faktor till inläckage (inläckage via brunnslocken). Däremot kunde en temperaturförändring ses i spillvattenledningarna vid det största regntillfället vilket förmodligen innebar att grundvattennivån höjts tillräckligt mycket för att inducera grundvatteninläckage i ledningarna (Panasiuk et al. 2019).

Författarna drog slutsatsen att begränsningar med tekniken kunde vara att det är svårare att hitta direkta inflöden med mindre volymer vatten som har större temperaturskillnad än vatten med stor volym som har mindre temperaturskillnad jämfört med befintliga vattnet i spillvattenledningen. Detta med anledning av mätbrus från utrustningen. Temperaturen för det inläckande vattnet beror också på flera olika faktorer så som längd på avloppssystemet, luft-, jord-, jordyte- och takytetemperatur (Panasiuk et al. 2019).

I resultatet från studien kunde inget kontinuerligt grundvatteninflöde i spillvattenledningarna urskiljas. Däremot sågs temperaturförändringen i ledningarna inte på samma ställen under perioden för snösmältning och för perioden utan snö vilket beror på snöns vattenhållandeförmåga och bör därför vara ett incitament för att mäta över flera årstider. Studien kvantifierade inte inläckaget i spillvattenledningarna då inga flödesmätningar genomfördes (Panasiuk et al. 2019).

Ur graferna som skapades från DTS mätningen kunde relativ flödes hastighet och flödesriktning i spillvattenledningarna urskiljas, vilket kan vara av intresse vid denna typ av undersökningar (Panasiuk et al. 2019).

4.2.6 Kostnader

Denna studie uppskattades kosta en miljon kronor. Delkostnaderna för projektet var bland annat 210 000 kr för hyra av DTS-enheten samt 40 000 kr för den fiberoptiska kabeln. Till de resterande kostnaderna räknades installation, spolning av spillvattenledningar, förvaring av DTS-enheten och övriga administrativa avgifter. Det poängterades däremot att om projektet varit kommersiellt, skulle kostnaderna förmodligen blivit lägre (Panasiuk & Hedström 2019).

4.3 TRONDHEIM, NORGE 2015

Syftet med denna studie var att undersöka huruvida det var möjligt att kvantifiera tillskottsvatten i spillvattensystemet. Studien genomfördes i Trondheim, Norge och mätperioden var 23/8 – 20/11 2015 (Beheshti & Saegrov 2018).

4.3.1 Områdesbeskrivning

I Trondheim består avlopps nätet av cirka 52% separata avloppssystem (Beheshti & Saegrov 2019). Enligt tidigare beräkningar var det externa inflödet från inläckage i spillvattenledningarna cirka 50% av den totala mängden vatten som kom till

reningsverken. Spillvattenledningarna bestod av PVC och hade en innerdiameter på 160 mm i området för studien (Beheshti & Saegrov 2018).

Utöver naturliga tillskottsvattenmätningar undersöktes även artificiella tillskottsvattentillskott. En vattentank användes där temperatur och vattennivån mättes för att kunna använda i beräkningar på mängden inläckage i avloppsledningarna. På ett kontrollerat sätt släpptes vatten ut från tanken för att sedan undersöka om en temperaturändring i DTS-mätningen sågs. Vattnet släpptes ut i en spillvattenbrunn (Beheshti & Saegrov 2018).

För att göra mätningarna med det artificiella inflödet/tillskottsvattnet så rättvisa som möjligt hade redan DTS-mätningar samt filmning utförts i denna sektion, vilka inte indikerade på någon typ av inflöde från omgivande mark. Inom denna sektion fanns heller inga hushåll påkopplade på ledningen (Beheshti & Saegrov 2018).

4.3.2 Använd teknik och data

DTS-enheten som användes i denna studie var av tillverkaren Yokogawa av modellen DTSx3000 (Tekniska specifikationer för studien ses i Tabell 1) som förvarades utanför spillvattenledningsnätet i en pumpstation och var kopplad till den fiberoptiska ledningen på nedströmssidan (Beheshti & Saegrov 2018).

Nederbörden mättes med hjälp av en ”tipping bucket” med upplösning om 0,2 mm. Även flödesmätningar utfördes i spillvattenledningarna. Dessa mätningar gjordes med hjälp av en Ultrasonic Doppler flödesmätare. Flödesmätningen gjordes för att tillsammans med de artificiella inflödena kunna kvantifiera osäkerheten för DTS-mätningarna i ett senare skede (Beheshti & Saegrov 2018).

4.3.3 Databearbetning

Studien saknade information om hur datan bearbetades.

4.3.4 Antaganden

Antaganden som gjordes i studien var bland annat följande:

- Ytavrinning och markflöden antogs ha samma dyngsmedelvärde som lufttemperaturen. Avrinningen från uppvärmda ytor av solstrålning kan däremot i början av ett regnfall ha en högre temperatur (Beheshti & Saegrov 2018).

- Avrinningen från snösmältning approximerades till 0,1 °C (Beheshti & Saegrov 2018).
- Grundvattentemperaturen approximerades till 1-2 °C högre än det årliga medelvärdet för lufttemperaturen (Som behövs vid approximering av grundvatteninträning) (Beheshti & Saegrov 2018).

4.3.5 Studiens resultat och slutsatser

Studien gav insikter om att det är viktigt att kalibrera DTS-utrustningen innan den används för att bestämma mängden inläckande vatten mer precist. I studien kalibrerades den fiberoptiska kabeln med referensmätningar i sex olika sektioner. Kalibreringen genomfördes tillsammans med vanliga temperatursensorer. Andra insikter som erhöles från studien var att skräp som fastnar längs kabeln kan minska känsligheten och noggrannheten av temperaturmätningen vid lågt flöde i spillvattenledningarna. Det fanns även en ökad risk för blockad avloppsledningarna vid långvarig installation av de fiberoptiska kablarna. I studien förhindrades detta då ledningarna spolades under mätperioden (Beheshti & Saegrov 2018).

Korrelationen mellan flödet uppmätt med flödesmätaren (Ultrasonic Doppler) samt beräknat från DTS-mätningarna var cirka 72% vilket innebär att det är möjligt att beräkna flödet i avloppsledningarna utifrån DTS-mätningar. Däremot hade flödesmätningarna gjorda med flödesmätaren många osäkerheter vid exempelvis låga och grunda flöden vilket hade kunnat förbättras med en kalibrering på laboratorium, vilket inte utfördes i denna studie (Beheshti & Saegrov 2018).

Ur mätdata noterades en sänkning i temperaturen nedströms i jämförelse med avloppsvattentemperaturen uppströms. Detta skedde efter ett regnfall med intensiteten 6 mm/h börjat den 11 november 2015. Inläckaget som upptäcktes var relaterat till det regnvattnet från felkopplad takavvattning och trädgårdsdränering och lufttemperaturen var relativt låg (3 °C). Temperaturen före regneventet var cirka 8,2 °C och när det kallare vattnet (som estimerades vara samma temperatur som lufttemperaturen) nådde ledningarna, sänktes temperaturen markant. Tillskottsvattnet från tak- och husgrundsdränering uppskattades vara cirka 20,7% av det totala spillvattnet under regneventet (Beheshti & Saegrov 2018).

Den 28 augusti kunde även en positiv temperaturförändring ses i mätdatat från DTS-mätningarna. Lufttemperaturen under detta tillfälle var 11-13 °C vilket var varmare än det 8-9 °C varma spillvattnet. Under samma antaganden om det inkommande tillskottsvattnets temperatur som gjordes vid regneventet den 11 november beräknades här andelen tillskottsvatten av totalt spillvatten vara 18,3% (Beheshti & Saegrov 2018).

Slutsatsen från studien var att det är möjligt att applicera DTS för att kvantifiera mängden tillskottsvatten så länge temperaturen på det inläckande vattnet är en annan än spillvattnet i spillvattenledningarna. Ytterligare en slutsats var att det är svårare att upptäcka temperaturskillnader när flödet i spillvattenledningarna är låg, detta då det är svårt att skilja temperaturskillnaden från mätbruset som uppstår från tekniken. DTS-mätning presterade däremot bra vid mätning av inläckage vid artificiellt tillskottsvatten. Vid analys av temperaturförändringar i avloppsledningen under regnevent sågs att det regnpåverkade inläckaget var beroende av den omgivande temperaturen, vilket innebär att lufttemperaturmätningar i samband med DTS-mätningar i spillvattenledningsnätet krävs. Det var även svårt att urskilja specifika tillskottsvattenkällor när man hade många olika typer av inläckage (Beheshti & Saegrov 2018).

En annan slutsats var att DTS kunde användas som hjälpmedel vid inläckagebedömning för att veta var avloppsnätet behöver repareras eller åtgärdas. Ytterligare en slutsats från studien var att mättekniken är värdefull för både hållbar urban vattenhantering och VA-infrastrukturens kapitalförvaltning (Beheshti & Saegrov 2018).

4.3.6 Kostnader

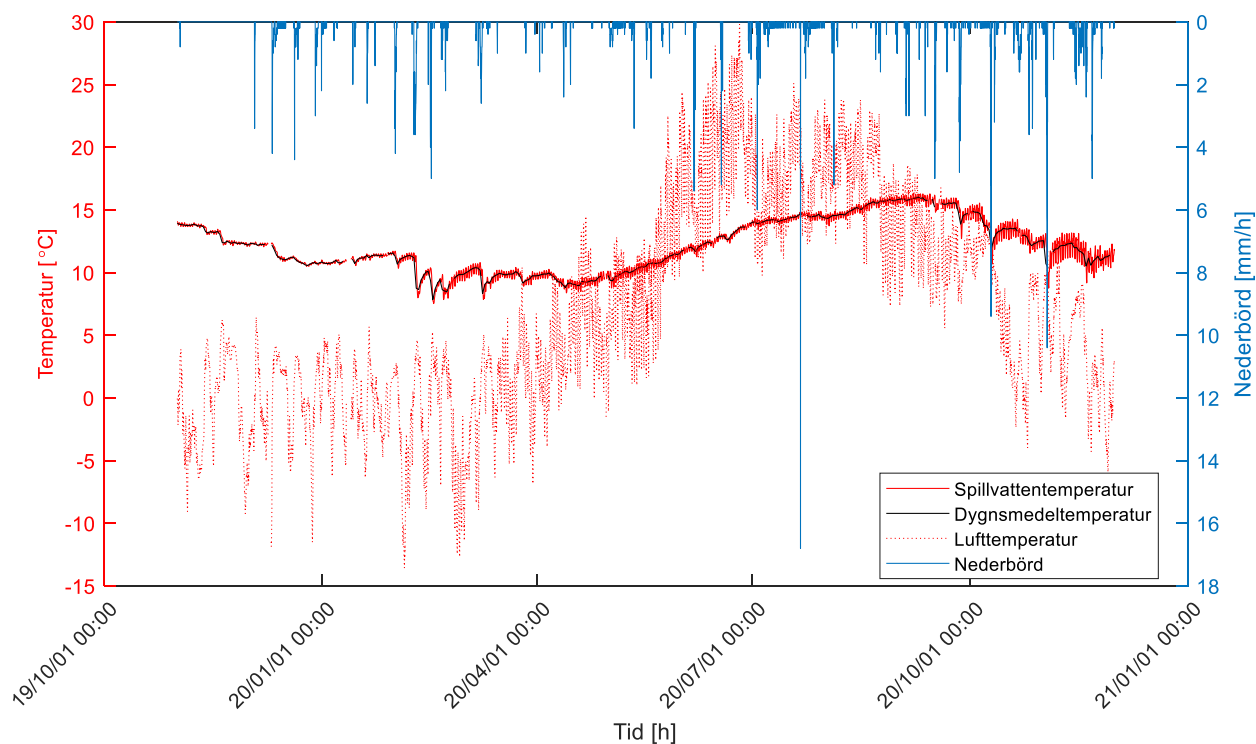
Studien saknade information om kostnader för DTS-enhet, fiberoptisk kabel och övriga kostnader.

5 RESULTAT FRÅN DATAANALYS FALLSTUDIE UMEÅ

I detta avsnitt presenteras resultaten från dataanalysen som genomfördes på erhållna data från Vakin, Umeå.

5.1 SPILLVATTENTEMPERATUR RENINGSVERKET PÅ ÖN

I Figur 12 ses variationen i temperatur för luft samt spillvatten tillsammans med nederbörden under perioden 20191101-20201101. Även dygnsmedeltemperaturen i spillvattnet visualiseras i figuren. Lufttemperaturen samt spillvattentemperaturen är uppmätt vid reningsverket på Ön (Figur 7).

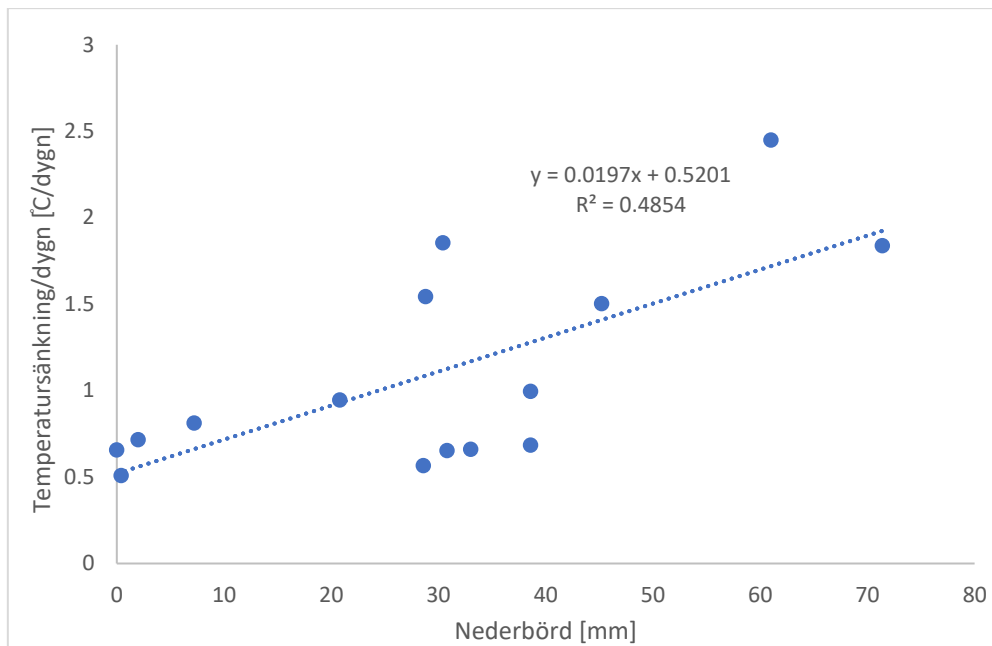


Figur 12: Lufttemperatur samt spillvattentemperatur vid reningsverket på Ön, Umeå tillsammans med nederbördsdata från Umeå universitet för perioden 20191101-20201101.

Ur figuren ses en tydlig årstidsvariation av utomhustemperaturen samt spillvattentemperaturen. Under tidsperioden hade utomhustemperaturen maxvärdet 29,8 °C den 25 juni 2020 kl. 14.00 samt minvärdet -13,6 °C den 5 februari 2020 kl. 00.00. Spillvattentemperaturen hade sitt maxvärde 16,4 °C den 7 september 2020 kl. 02.00 samt minsta värdet 7,5 °C den 17 februari 2020 kl. 9.00. En förskjutning av maxtemperaturen ses för spillvattentemperaturen då det tar längre tid för marken att värmas upp på det djupa ledningarna befinner sig på.

Maximala uppmätta nederbörden under en timme under tidsperioden gjordes den 21 juli 2020 kl. 08.00 och var 21,8 mm.

Ett antal kraftiga sänkningar i spillvattentemperaturen som sammanfaller med nederbördstillfällena sågs under tidsperioden (Figur 12). Sambandet mellan skillnaden i spillvattentemperaturen mellan dygnet (det vill säga derivatan i spillvattentemperaturen) och nederbörds mängd kopplat till temperatursänkningarna ses i Figur 13.

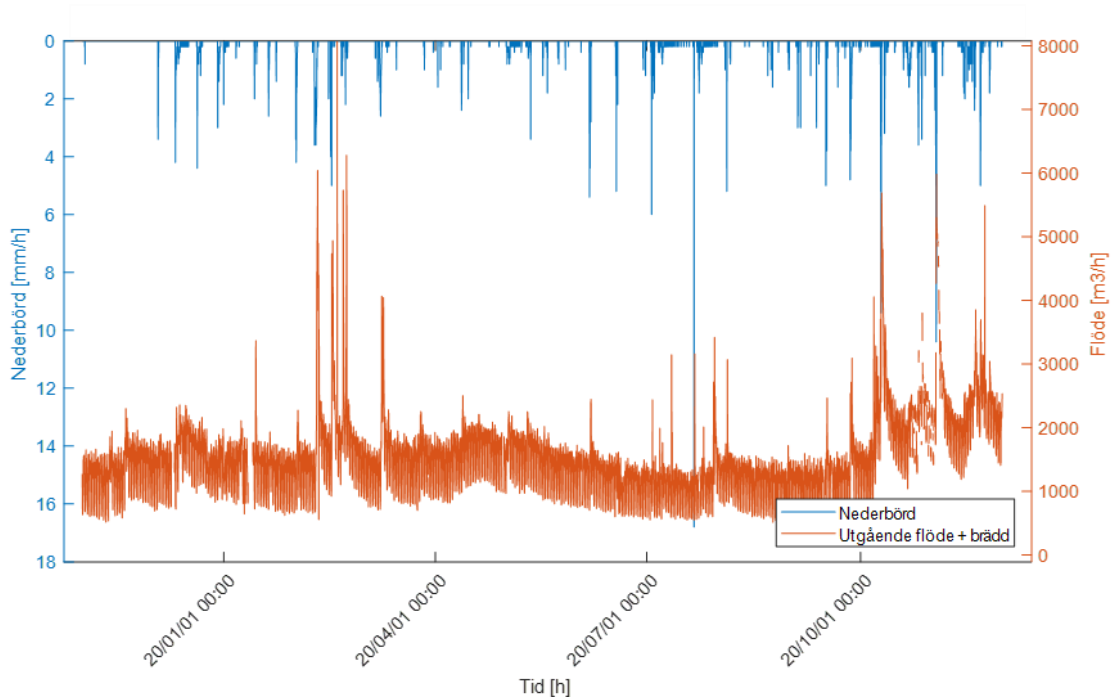


Figur 13: Sambandet mellan spillvattentemperatursänkning i °C/dygn och nederbördsmängd i mm. R^2 -värdet påvisar ett visst samband dem emellan.

Enligt resultatet från regressionsanalysen (Figur 13) ses att ett nederbördstillfälle innehållande 30 mm regn resulterar i en temperatursänkning i spillvattenledningsnätet på cirka 1 °C över ett dygn.

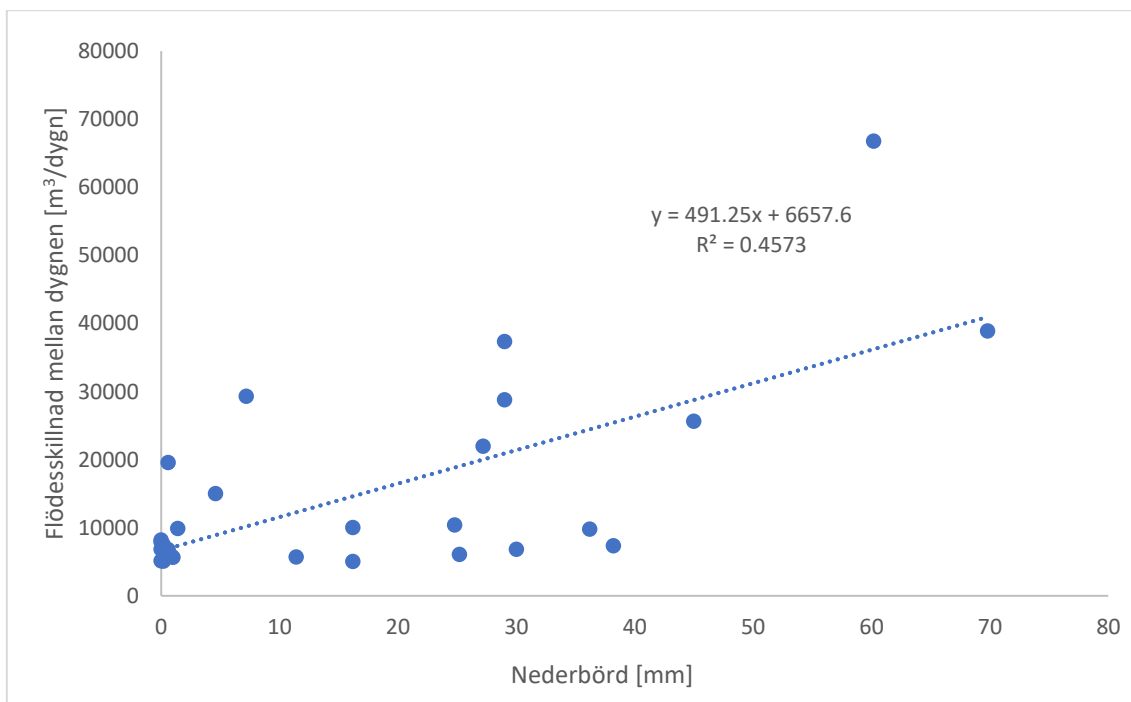
5.2 SPILLVATTENFLÖDE RENINGSVERKET PÅ ÖN

I Figur 14 ses nederbörden tillsammans med det beräknade inflödet (utgående + brädd) till reningsverket på Ön. Figuren visar ett antal flödestoppar som avviker från det normala. Det högsta flödet avläses den 18:e februari 2020 kl. 19.00 och var 8178 m³/h. Det lägsta flödet under perioden var 457 m³/h den 15:e september 2020 kl. 08.00. Ur figuren ses även en svag trend på ett något högre flöde under hösten/våren. En dygnsvariation i flödet kan även urskiljas ur figuren där lägre flöden registrerats under natten och högre flöden under dagen.



Figur 14: Det beräknade inkommande spillvattenflödet till reningsverket på Ön tillsammans med nederbörden för tidsperioden.

I Figur 15 ses hur nederbördsmängden i mm korrelerar med skillnaden i flöde mellan två dygn. Sambandets R^2 värde är cirka 0,46 vilket tyder på ett visst samband dem emellan.



Figur 15: Sambandet mellan spillvattenflödesökning i $m^3/dygn$ och nederbördsmängd i mm. R^2 -värdet påvisar ett visst samband dem emellan.

Sambandet som kan urskiljas (Figur 15) innebär att vid en större nederbördsmängd finns möjligheten att detta ger en respons på flödet i spillvattenledningarna. I figuren ses även att datapunkten längst till höger har stor betydelse för regressionen.

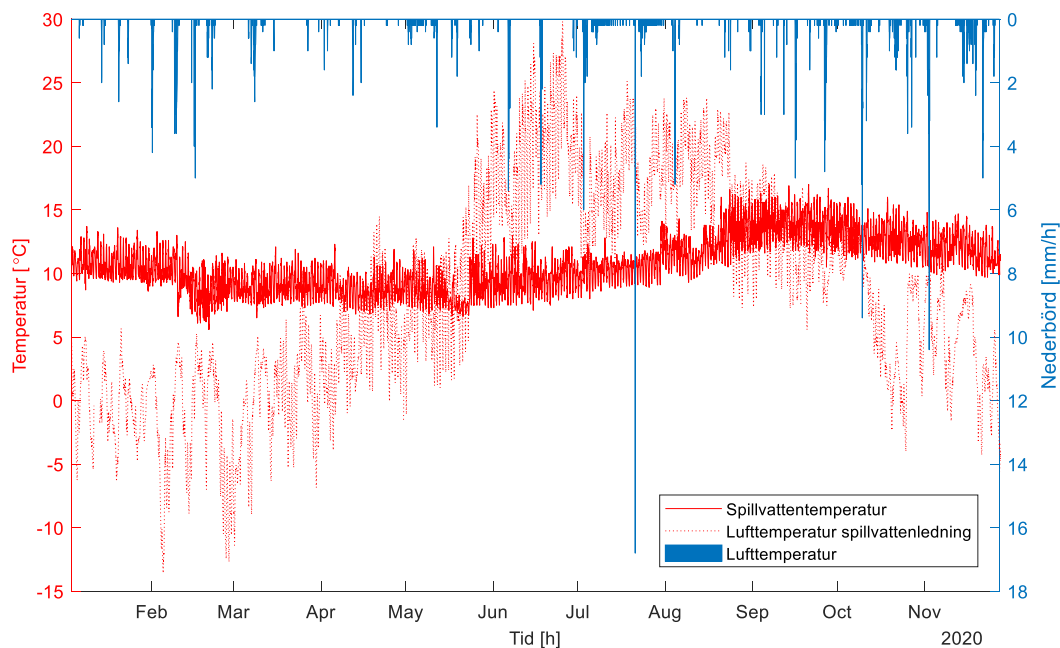
Resultatet för den uppskattade totala spillvattenvolymen för tidsperioden 20191101-20201130, den uppmätta totala volymen renat spillvatten samt resultatet för beräkning av USG ses i Tabell 2.

Tabell 2: Resultat från beräkning av USG för den analyserade tidsperioden.

Total renad spillvattenvolym 2019 [m3]	Total renad spillvattenvolym 2020 [m3]	Total renad spillvattenvolym (medelvärde 2019-2020) [m3]	Total spillvattenvolym, uppskattad	USG
11 425 196	13 997 898	12 711 547	9 487 080	1,34

5.3 SPILLVATTENTEMPERATUR I KLOCKARBÄCKEN

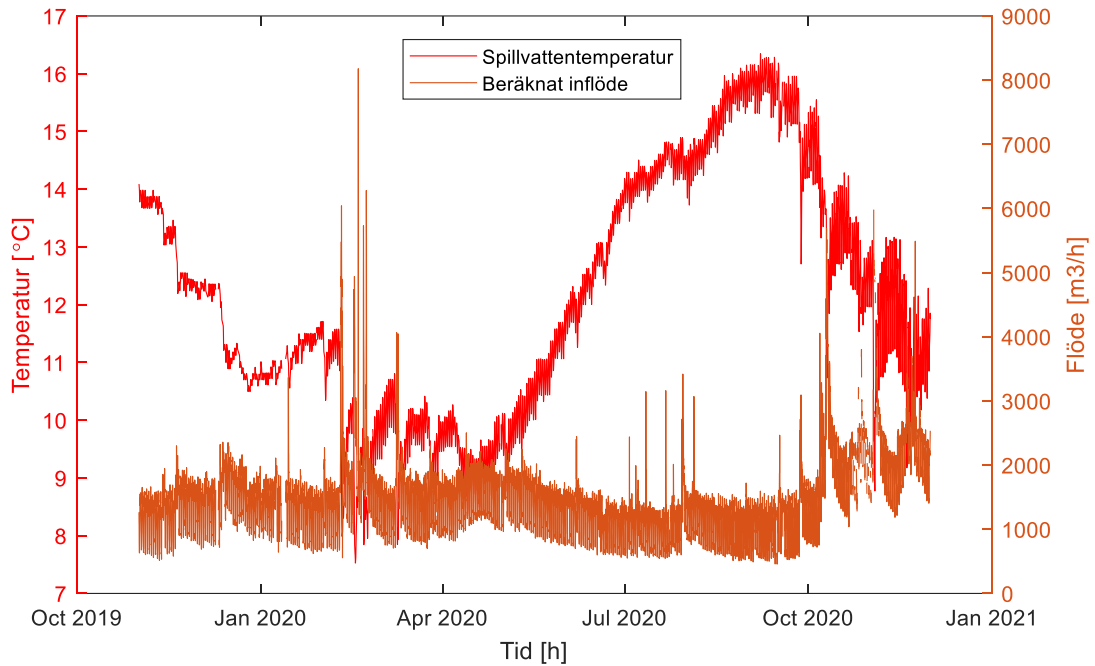
I Figur 16 ses variationen för spillvattentemperaturen under perioden 20200104-20201130 mätt i en brunn i Klockarbäcken (ungefärlig lokalisering inringat område i Figur 7) utanför Umeå, cirka 8,6 km (fågelväg) (Lantmäteriet 2021) från reningsverket på Ön.



Figur 16: Temperaturer i vatten och luft i spillvattenledning mätt i området "Klockarbäcken" utanför Umeå tillsammans med nederbördsdata uppmätt vid Umeå Universitet.

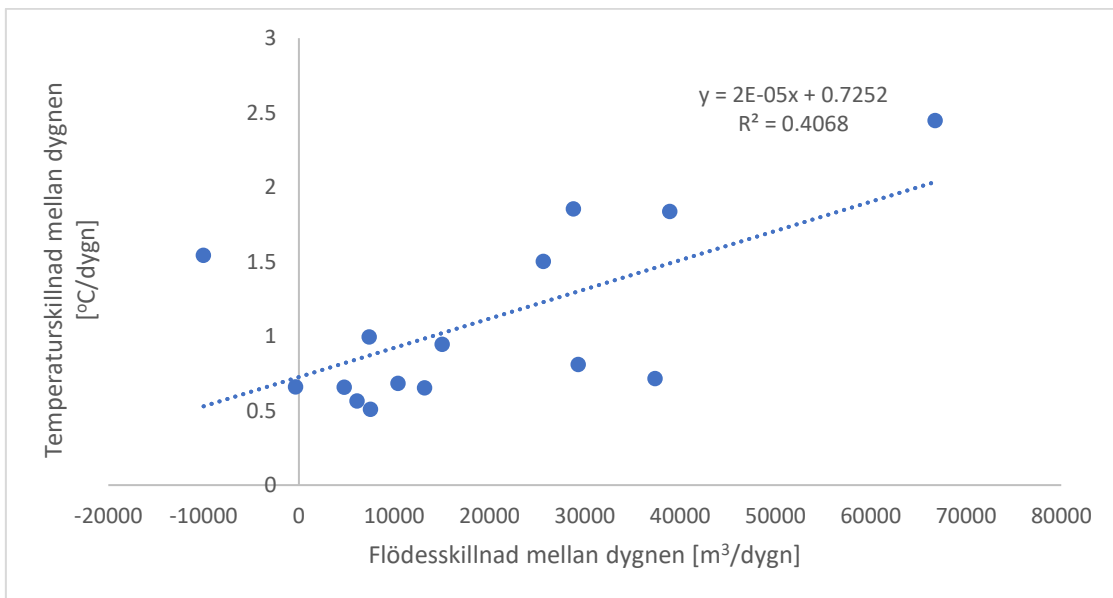
5.4 SAMBAND MELLAN SPILLVATTENFLÖDE OCH SPILLVATTENTEMPERATUR VID RENINGSVERKET PÅ ÖN

I Figur 17 ses det beräknade inkommande flödet tillsammans med spillvattentemperaturen på det inkommande flödet till reningsverket på Ön. I grafen syns att vid en kraftig temperatursänkning i spillvattensystemet finns även påverkan på flödet i form av ökat flöde, vilket tyder på tillskottsvatten i spillvattenledningen.



Figur 17: Det beräknade inkommande flödet till reningsverket tillsammans med spillvattentemperaturen för det inkommande spillvattnet till reningsverket.

För att visualisera det eventuella samband mellan dessa två parametrar ritades flödesderivatan upp mot spillvattentemperaturderivatan vid en temperatursänkning (Figur 18). Då R^2 värdet är 0,45 indikerar detta på att ett visst samband mellan parametrarna.



Figur 18: Sambandet mellan spillvattenflödesökning i $m^3/dygn$ och spillvattentemperatursänkning (absolutbeloppet av den negativa derivatan). R^2 -värdet påvisar ett visst samband dem emellan.

Ur figuren ses många datapunkter i x-intervallet 0-1500 $m^3/dygn$ samt y-intervallet 0,5-1 $^{\circ}C/dygn$.

6 DISKUSSION

I detta avsnitt diskuteras främst praktiska erfarenheter som erhållits från de granskade fallstudierna samt två av de medverkande författarna i två av fallstudierna. Avsnittet innehåller även en diskussion gällande dataanalysen som genomförts på data från Vakin i Umeå samt hur DTS kan appliceras i detta fall. Avsnittet avslutas sedan med en diskussion kopplad till osäkerheter och fortsatta studier.

6.1 ERFARENHETER FRÅN FALLSTUDIERN

6.1.1 Praktiska erfarenheter gällande mätningar

I samtliga fallstudier som undersökts i denna studie kunde temperaturvariationer (som kopplas till regnevent) i spillvattentemperaturen urskiljas. Både temperaturökningar och temperatursänkningar sågs beroende på vilken säsong som mätperioden skedde under. Vid mätningar under sommaren och de varmare månaderna kunde temperaturökningar ses i samband med nederbörd medan temperatursänkningar sågs under perioder med kallare lufttemperaturer. I en av fallstudierna använde man sig även av temperaturmätningarna för att uppskatta flödet vilket visade sig gå till en viss grad.

Av resultatet från samtliga fallstudier bör den fiberoptiska kabeln kunna finnas i avloppsledning under ett antal månader. Detta kan dock kräva att kabeln är fäst i avloppsledningen på ett antal platser för att hållas på plats under mätperioden. Däremot i mindre ledningar, med en diameter på exempelvis 250 mm, kan mätperioden behöva begränsas till några veckor då risken för blockad i ledningarna är större än i rör med större diameter (Schilperoort et al. 2013).

DTS fungerar i alla typer av ledningsmaterial enligt informationen från de granskade studierna (Hedström 2021, pers. ref.). Om det under mätperiodens gång skulle fastna föroreningar på den fiberoptiska ledningen kan man spola spillvattenledningen för att få bort detta. När man efter mätperiodens slut ska ta upp den fiberoptiska kabeln från spillvattenledningar dras de upp för hand, på omvänt sätt som de sattes ned i spillvattenledningarna.

Om det inom ett område har många inläckagepunkter för tillskottsvatten kan det ta längre tid att lokalisera alla. För bästa resultat kan defekterna repareras i spillvattenledningarna under mätperioden. När ett inläckage lokaliseras kan detta åtgärdas för att sedan se på mätdata att åtgärden har fungerat. Risken finns också att när ett inläckage åtgärdas så

lokaliseras ett annat som inte syns då en annan kanske större inläckagepunkt tagit uppmärksamheten (Schilperoort 2021, pers. ref.).

I de undersökta fallstudierna har väl skyddade fiberoptiska kablar använts. Kablarna har haft olika typer av plasthöljen tillsammans med höljen av kevlar och rostfritt stål. Att kablarna behöver vara väl skyddade beror på att de i avloppsledningarna påfrestas av spillvattnet och dess föroreningar under tiden den befinner sig i spillvattenledningen. Höljet ger även skydd mot skadedjur (exempelvis råttor) som kan skada den fiberoptiska kabeln (Schilperoort 2021, pers. ref.).

6.1.2 Typ av utrustning och kostnader

I fallstudierna har olika typer av utrustning använts. Olika typer av DTS-enheter ger olika upplösning och osäkerheter i mätdatan. DTS-enheten HALO DTS från tillverkaren Sensornet förekom i två av fallstudierna som undersökts. I samtliga studier har den fiberoptiska kabeln varit av typen MultiMode 50/125 μm . Kostnaderna för att utföra en DTS-mätning har inte framgått i samtliga studier och i studierna det framgått i har det varit ottydligt huruvida man köpt in utrustningen eller hyr den. Det har också funnits ospecificerade höga kostnader vilket gör det svårt att veta utifrån dessa vad nya mätningar skulle kosta.

Utifrån tidigare studier där kostnader framkommit har det även framkommit att kostnaderna varit relativt höga (Schilperoort 2021, pers. ref.; Hedström 2021, pers. ref.). Inköp av DTS-enheten HALO DTS innebär en investeringskostnad på drygt 150 000 kr samt kostnad för kabel cirka 80 kr/m (Sensornet 2021). Utöver dessa kostnader skulle även kostnader för kopplingar tillkomma samt kostnader för spolning av ledningar, installation, analys av data samt kostnader för förvaring av DTS-enheten under mätperioden. Kostnaderna varierar även beroende på tillverkare av utrustningen, däremot har inga övriga tillverkare kontaktats för prisuppgifter. Lista över olika leverantörer/tillverkare av DTS-utrusning ses i Bilaga E.

Det som däremot måste poängteras är att DTS-enheten inte är en engångsartikel, den kan användas under många mätningar i många år. Även kabeln kan återanvändas under flera olika mättillfällen. Hur många gånger den kan återanvändas beror av kvalitén på kabeln och hur mycket påfrestningar den utstått under tiden den befunnit sig i spillvattenledningsnätet (Schilperoort 2021, pers. ref.). För att den fiberoptiska kabeln ska gå att återanvända så många gånger som möjligt är det därför viktigt att den hanteras på

ett korrekt sätt. Exempel på bra hantering av kabeln är att den installeras genom att dra den för hand mellan brunnar (som tidigare beskrivits) och undviker att fästa den i ett spolningsverktyg, robot eller liknande. Detta förhindrar att kabeln fastnar och får skador som kan uppstå om den dras i för hårt. Enligt Rémy Schilperoort, kontaktperson hos Partners4UrbanWater kan man även använda sig av kortare sektioner (cirka 200-500m) av den fiberoptiska kabeln som man sedan kopplar ihop med hjälp av kontakter nere i spillvattenbrunnarna. Genom att använda sig av kortare sektioner i stället för flera kilometerlånga kablar underlättar vid hantering av kabeln vid installation och upptagning av kablarna från spillvattenledningarna. Detta gör även att risken är mindre för att kablarna böjs för mycket som i sin tur kan leda till försämring av ledningen i kabeln. Den fiberoptiska kabeln kan även vara extra känslig under kallare perioder, vilket kan innebära att installationerna i spillvattenledningarna tar längre tid och därmed blir mer kostsamma.

6.1.3 Vinster med DTS

För att investeringen i utrustningen samt mätningar skall vara befogade krävs därför insikten i att tekniken är dyr, men effektiv. Finns stora problem med tillskottsvatten i ett spillvattensystem och detta resulterar i utgifter varje år i form av onödig rening i reningsverket så kan mätningar gjorda med DTS vara en utmärkt investering för att få ner andelen tillskottsvatten. Om tillskottsvattnet i framtiden ökar med åldrande ledningssystem samt mer nederbörd på grund av klimatförändringar och dessutom blir högre belastade av en befolkningsökning kan det vara en god investering att minska andelen tillskottsvatten för att använda reningsverkets kapacitet på ett effektivt sätt. Mätningar med DTS som sedan resulterar i smarta reinvesteringar i spillvattensystemet i form av lagningar skulle alltså potentiellt kunna innebära att reningsverken inte behöver byggas ut för att öka kapaciteten i framtiden.

Då DTS är en teknik som kan användas i andra sammanhang än spillvattenledningar kan även detta också vara ett incitament till att köpa in utrustningen. Utöver flertalet undersökningar i spillvattenledningar kan man även använda utrustningen till undersökning av dagvattenledningar. Men som tidigare nämnt i denna rapport används DTS inom andra branscher så som olja/gas-industrin samt kontrollering av dammar.

6.2 JÄMFÖRELSE AV TEKNIKER FÖR KONTROLL AV SPILLVATTENLEDNINGAR

Vid jämförelse av DTS med röktestning som ofta sker tillsammans med färgning av vatten är den senare kombinerade metoden förmodligen en billigare teknik om enbart ett mindre område skall undersökas. Röktestning tillsammans med färgning av vatten fungerar extra bra om en stark misstanke på exempelvis felaktigt kopplade takavvattningar finns. I dessa fall kan det vara motiverat att inte lägga kostnaderna för DTS på att hitta dessa felkopplingar. Däremot kan det vara motiverat om stora bostadsområden eller hela stadsdelar där misstanke finns om felaktiga kopplingar, sprickor i ledningarna eller andra typer av inläckage. Röktestning tillsammans med färgning av vatten kommer inte påvisa alla typer av källor till tillskottsvatten som till exempel mindre sprickor och om metoden skall göras på större områden kan det både ta lång tid och krävas mycket arbetskraft som i slutändan kan bli dyrt. När färgning av vatten skall genomföras för att kontrollera exempelvis takavvattning så behöver färgen släppas ut i stupröret. Det innebär alltså att metoden delvis kommer att ske på privat mark vilket i sig kan väcka missnöje bland de boende. Om DTS används i syfte att kontrollera takavvattningar som är felkopplade behöver inte privat mark beträdas. Inte heller lika mycket arbetskraft skulle krävas då mätningarna sker automatiskt när de fiberoptiska kablarna installerats. Däremot skulle mätperioden behöva innehålla perioder med regn som inte har samma temperatur som spillvattnet för att kunna registreras som en ökning eller sänkning i spillvattentemperaturen. DTS kan alltså appliceras över längre sträckor utan att i förhand ha misstanke om felaktiga kopplingar.

Vid kontroll av spillvattenledningarna med filmning kan ett specifikt väder, till exempel regn krävas för att alla läckage skall upptäckas när ledningarna filmas. Detta kan göra det svårt att i förväg planera vilken dag filmningen skall ske. DTS kräver också regnevent men då mätningarna ofta sker under en längre period är chansen att regn förekommer större. Filmning kan däremot vara bättre om misstanke finns om att tillskottsvattnet har samma temperatur som spillvattnet.

De tekniker som används idag används ofta tillsammans och letar efter direkt nederbördspåverkan medan möjligheten med DTS finns att lokalisera både direkt och indirekt nederbördspåverkan. Färgning av vatten görs ofta i kombination med röktester och kan kosta omkring 1500 kr per fastighet som undersöks (Andersson 2021, pers. ref.).

Vid behov av extra utredning efter föregående röktest och filmning behöver ledningarna filmas. Detta brukar ske för var 5:e-10:e fastighet som undersöks och kan kosta ytterligare omkring 1500 kr per fastighet (Andersson 2021, pers. ref.).

Om man jämför kostnaderna för DTS med de tekniker som är vanliga idag så kostade studien i Skellefteå cirka 1 miljon kronor och där var 543 fastigheter påkopplade på området man undersökte. Ska man med hjälp av röktester och färgning av vatten undersöka 543 fastigheter skulle det kosta 814 500 kronor. Ska dessutom var 5:e till var 10:e fastighet undersökas med filmning tillkommer en kostnad om 81 450-162 900 kronor. Detta resulterar slutligen i en kostnad på omkring 1 miljon kronor även för dessa tester. De båda metoderna för att undersöka spillvattenledningarna hade alltså kostat ungefär lika mycket rent teoretiskt. Däremot kanske inte samma antal fastigheter skulle undersökts med röktester, färgning samt filmning då möjligheten finns att man slutat undersöka då man hittat inläckagepunkterna. Om så vore fallet är det möjligt att dagens metoder är billigare än DTS. DTS-enheten i den tidigare nämnda studien kostade 220 000 kr att hyra (Panasiuk & Hedström 2019) i 3 månader men enligt uppgift från Sensornet (2021, pers. ref.) så kostar DTS HALO omkring 150 000 kr att köpa in. Detta innebär alltså att möjligheten finns att köpa in en enhet som fungerar för syftet i liknande prisklass och därmed ha möjlighet att återanvända enheten i fler än ett mättilfälle.

6.3 DATAANALYSEN

Syftet med projektet var även att illustrera problemet med tillskottsvatten i spillvattenledningar samt föreslå hur DTS skulle kunna implementeras i Sverige analyserades data från vanliga temperatur- och flödessensorer i spillvattenledningar tillsammans med nederbörds- och lufttemperaturdata. I detta avsnitt diskuteras detta.

6.3.1 Spillvattentemperatur och spillvattenflöde reningsverket på Ön

Regressionsanalyserna för de båda parametrarna (spillvattentemperatur och spillvattenflöde) och nederbördsmängden visade på ett visst samband. Både flödestoppar och temperatursänkningar kunde ses som skedde i spillvattnet i samband med regnevent. Detta innebär att tillskottsvatten finns i spillvattenledningsnätet i Umeå, speciellt vid till exempelvis nederbördstillfällen.

De datapunkter som resulterade i sambandet mellan spillvattentemperatur och nederbördsmängd var främst under vår och höst (se Bilaga D). Detta beror förmodligen på att lufttemperaturen är lägre än spillvattentemperaturen vilket gör att

temperaturdifferensen mellan tillskottsvattnet och spillvattentemperaturen förmodligen är stor. Det kalla tillskottsvattnet som tar sig in i ledningarna innebär en kraftig sänkning relativt momentant i spillvattnet. En annan anledning till att de flesta punkter var under vår och höst kan vara att marken under vintern är frusen och mindre andel tillskottsvatten har möjlighet att ta sig till spillvattenledningsnätet. Vintern 2019-2020 var onormalt blöt och mild med mindre snömängder i jämförelse med andra vintrar (SVT 2020; SMHI 2020). Under vintern var marken periodvis snöfri och den meteorologiska våren kom omkring en månad tidigare än normalt (SMHI 2020). Sådana förhållanden kan leda till att marken får djupare tjäle då inget snötäcke finns som isolerar marken. I kombination med att det var en blöt vinter, det vill säga att nederbörd föll som regn, kan innebära att mer ytavrinning än normalt skapas och tränger in i spillvattenledningarna via exempelvis spillvattenbrunnslock. Om detta vore fallet hade detta syns i mätdatan under vintern, vilket det inte gjorde. Om däremot regnet fryser då det når marken ackumuleras vattnet i stället i form av is vilket kan frysa igen dagvattenbrunnar och fördröja ytavrinningen närmare våren då lufttemperaturen blir högre. Ytterligare en anledning skulle kunna vara att nederbörd faller under våren då lufttemperaturen högre vilket kan göra att snön smälter samtidigt som det faller regn. Även störst flödestoppar (de datapunkter som resulterade i sambandet mellan spillvattenflöde och nederbördsmängd) sågs under vår och höst, alltså samma trend som kunde ses i spillvattentemperaturen vilket förmodas ha samma anledningar som ovan. Detta bekräftar att analys av spillvattentemperatur kan påvisa tillskottsvatten.

I Figur 12 samt Figur 15 sågs även att återhämtningen i spillvattentemperaturen samt spillvattenflödet sker relativt snabbt efter en sänkning respektive ökning. Detta skulle kunna indikera på att den påverkan som ses av nederbörden i dessa fall är exempel på direkt nederbördspåverkan. I Figur 12 ses även en årstidstrend med kallare spillvatten under vintermånaderna och varmare under sensommar/höst. Anledningen till detta är förmodligen att ledningarna som leder till reningsverket ligger så pass djupt att marken tar lång tid på sig att värmas upp och sedan kylas ned i jämförelse med lufttemperaturen. Men det skulle också kunna innebära att påverkan finns av ett så kallat basflöde från läck- och dränvatten som beror av grundvattentemperaturen som också är årstidsberoende. Det är därför svårt att säga om ett sådant inläckage existerar eller inte i detta fall men hade kanske kunnat urskiljas om mätperioden varit längre.

Under sommaren ses inte heller lika höga flödestoppar eller temperatursänkningar. En anledning till detta skulle kunna vara att marken är torrare vilket innebär att mer vatten kan hållas kvar i marken, alltså skapas inte lika mycket ytavrinning då vattnet har möjlighet att perkolera. Den största nederbördstoppen i juli gör ingen större påverkan på spillvattenflödet. En möjlig förklaring till detta skulle kunna vara att det regnat lokalt, vilket gör att hela Umeå inte fått den mängden regn. Detta innebär att när vattnet från regnet i så fall når spillvattenledningen så blir det ingen stor volym. Ett krav för att analys av temperaturen ska fungera vid undersökning av tillskottsvatten är dock att tillskottsvattnets temperatur skiljer sig från spillvattnets befintliga temperatur.

När sambandet mellan spillvattentemperatur och spillvattenflöde undersöktes med regressionsanalys sågs även där ett visst samband. Detta var ytterligare något som tydde på att spillvattentemperaturen hänger ihop med ett ökat flöde som borde bero på tillskottsvatten som tar sig in i spillvattensystemet.

Ingenting kan sägas om var inläckagen sker i spillvattennätet utifrån analysen av spillvattenflödes- respektive spillvattentemperaturdatan. Däremot hade inläckagepunkter förmodligen kunnat lokaliseras genom att till exempel mäta temperaturen med hjälp av DTS sektionvis. Om tillskottsvattenkällorna åtgärdas bör inte liknande samband ses mellan de två analyserade parametrarna.

För att få så bra resultat som möjligt med DTS utrustningen skulle perioden för applikation i ledningsnätet förmodligen vara under vår eller höst, då störst variationer i spillvattentemperaturen och flödet ses för det inkommande spillvattnet.

Under sommaren bör inläckage kunna lokaliseras som temperaturökningar då lufttemperaturen (och därmed även tillskottsvattentemperaturen) är högre än spillvattentemperaturen. I fallstudien som genomfördes i Skellefteå kunde värmeökningar lokaliseras i slutet av mätperioden. Det antogs då att detta var varmare tillskottsvatten som sökt sig in i ledningen på specifika platser. Men utifrån dataanalysen kan det däremot inte sägas huruvida mätningar med DTS skulle fungera under sommaren.

6.3.2 Spillvattentemperatur Klockarbäcken

I denna datamängd kunde inga tydliga flödestoppar ses, däremot sågs årstidsvariationer. Detta skulle kunna bero på att mätstationen ligger så pass mycket uppströms i systemet att inte stora ytor är direkt felkopplade och att det inte finns stora mängder tillskottsvatten

i systemet här. Ur denna data kan alltså inga slutsatser dras om huruvida tillskottsvatten är ett problem eller inte.

6.4 SITUATIONEN I FRAMTIDEN

Eftersom klimatet blir varmare på grund av klimatförändringar förutspås även nederbördsmängden öka vilket även kan leda till att andelen tillskottsvatten som härrör från regnvatten även kommer att öka om spillvattenledningssystemet inte förbättras. Den andelen tillskottsvatten som detta handlar om är den direkta nederbördspåverkan och indirekta nederbördspåverkan. Ökade tillskottsvatteninflöden i systemet skulle på sikt kunna leda till överbelastade reningsverk som gör att ofullständigt renat spillvatten förbileds vid reningsverket och bräddning av orenat spillvatten vid bräddpunkter i spillvattennätet. Utspädningsgraden var under den aktuella tidsperioden för dataanalysen 1,34. Detta innebär att man under perioden renade cirka 75% spillvatten och 25% tillskottsvatten. För att undvika en problematisk situation i framtiden kan det vara aktuellt att undersöka spillvattensystemet närmare för att minska tillskottsvattenandelen. Som tidigare nämnt är detta möjligt att göra med hjälp av DTS.

Ur Figur 13 kunde det ses att nederbörden har en koppling till spillvattentemperaturen. Detta är av stor betydelse för den biologiska reningsprocessen i reningsverket på Ön då en sådan sänkning kan försämra spillvattenreningen under de kallare årstiderna (Jönsson et al. 2003).

6.5 OSÄKERHETER

Osäkerheter gällande mätvärdena från Umeå universitet kan vara att väderstationen på universitetet inte kontrolleras dagligen. Detta kan medföra att skräp blockerar utloppet från regnmätaren vilket innebär att ingen nederbörd registreras. När skräpet avlägsnas finns risken att för mycket nederbörd för den aktuella dagen skräpet avlägsnades registreras. För att validera denna nederbördsdata summerades nederbörden dygnsvis och jämfördes med dygnsdata från SMHI. Liknande trender kunde urskiljas med undantag för vissa nederbördstoppar vilket gör att datan från Umeå universitet ansågs pålitligt och därmed användes vid analysen. De avvikande topparna skulle kunna bero på lokala avvikelser mellan de båda mätplatserna eller eventuella mätfel.

Antaganden gjordes om att ett nederbördstillfälle som användes i regressionsanalysen kunde ske upp till ett dygn innan en spillvattentemperaturförändring om $-0,5$ °C/dygn registrerades. Med antagandet följer osäkerheter så som exempelvis risk för överskattning

av nederbörd som påverkar temperatursänkningen. Även risk för underskattning av nederbörden som påverkar spillvattentemperatursänkningstillfället då flera dygns regn kan påverka.

Osäkerheter gällande regressionsanalysen för respektive parameter finns kopplade till datapunkterna. Osäkerheten finns i R^2 värdet som i dessa regressionsanalyser tyder på ett visst samband. Då regressionsanalysen är baserad på ett begränsat antal punkter från en kortare tidsperiod leder detta till att enstaka punkter kan ha stor betydelse för utfallet av regressionen. I Figur 15 kan det ses att om enstaka punkter hade andra värden hade utfallet av regressionen förmodligen varit sämre. Då nederbördsmängden har stor betydelse för var datapunkterna hamnar kan därför även tidigare nämnda osäkerheter påverka resultatet av dataanalysen.

6.6 FORTSATTA STUDIER

Denna studie har haft fokus att studera DTS som teknik och sedan hur tillskottsvatten är ett problem i Umeå för att koppla ihop hur DTS skulle kunna användas för att minska tillskottsvattnet. För att på ett mer säkert sätt kunna analysera hur spillvattentemperaturen varierar över årstider och av nederbörd hade data över en längre tidsperiod kunnat analyserats. Då Umeå har vinter med tjälad mark och nederbörd i form av snö skulle det även vara intressant att i framtida studier analysera data från en stad som har varmare vintrar där nederbörden faller som regn under vintern och därmed förmodligen ger mer respons i spillvattnet. För att se hur pass mycket Umeås reningsverk påverkas av tillskottsvattnet hade också kunnat förklaras på ett bättre sätt om en längre tidsperiod hade analyserats. Ett annat sätt att undersöka hur regn påverkar spillvattentemperaturen skulle kunna vara att analysera (värme)energimängden i regnet som påverkar energimängden i spillvattentemperaturen.

Som tidigare nämnts i denna rapport är DTS en relativt dyr teknik att använda. Analysen av spillvattentemperaturen är del av kostnaden som är tidskrävande och därmed kostsamt. Denna kostnad skulle kunna begränsas om analysen inte skedde manuellt utan automatiserades. Därför skulle det vara relevant att utreda hur exempelvis artificiell intelligens kan appliceras på analysen av spillvattentemperaturen. Det finns genomförda studier som analyserat olika automatiserade tillvägagångssätt för analys av mätdata från mätningar gjorda med DTS vilket denna studie inte hade som syfte att undersöka. Därför

finns behovet att undersöka hur effektiva de befintliga metoderna för dataanalysen är och om behov finns för att utveckla dessa metoder mer.

Ytterligare en osäkerhet kopplad till dataanalysen är att dygnsderivatan valdes att användas i regressionsanalysen. Analysen hade förmodligen haft ett annat bättre resultat om i stället derivatan mellan exempelvis två dygn valts då temperaturpåverkan i spillvattnet ofta sågs vara mer än ett dygn. Sambandet hade då förmodligen varit starkare mellan de två parametrarna.

7 SLUTSATSER

Syftet med detta projekt var att undersöka hur DTS kan tillämpas för att lokalisera inläckage i spillvattenledningar ur ett praktisk och ur ett teoretiskt perspektiv samt undersöka tillskottsvattenproblematiken i Umeå för att se hur DTS skulle kunna appliceras där. DTS är en teknik som baseras på temperaturmätning med fiberoptiska kablar. Temperaturmätningen sker relativt kontinuerligt (beroende på DTS-enhetens specifikationer) över en förutbestämd sträcka. För att på ett så effektivt sätt som möjligt använda denna teknik i spillvattenledningarna används med fördel kortare fiberoptiska kablar som sedan kopplas ihop med varandra för att bilda en längre. Kabeln sätts ner i spillvattenledningen genom att dra kabeln mellan brunnar och om risk för dämning i ledningarna finns bör ledningarna spolas innan och eventuellt under mätperioden.

Ur tidigare studier har inläckage av tillskottsvatten till spillvattenledningarna kunnat identifieras och lokaliseras. Inläckagen har identifierats som både temperaturökningar och temperatursänkningar i spillvattnet. De inläckage som främst har skrivits om i studierna är felaktigt kopplat takavvattning.

Vid jämförelse av DTS med rökning, filmning samt färgning av vatten för kontroll av tillskottsvatten i spillvattenledningar så är DTS en bra metod för att lokalisera inläckage av många typer av tillskottsvatten. Under en mätperiod bör det kunna lokaliseras direkt nederbördspåverkan, indirekt nederbördspåverkan och förhoppningsvis även påverkan på basflödet från läck- och dränvatten. De befintliga teknikerna är begränsade då de är arbetskraftskrävande, ofta beroende av en viss typ av väder och det är främst möjligt att lokalisera direkt nederbördspåverkan med dessa befintliga metoder. DTS kan även vara bättre än dagens metoder då de kan vara mindre arbetskraftskrävande samt för att genomföra mätningarna behövs inte privat mark beträdas. Den främsta nackdelen med

DTS är att det är en dyr teknik att använda sig av enligt de som använt den. En annan nackdel med DTS är att för att hitta tillskottsvatteninläckagepunkter så behöver tillskottsvattentemperaturen vara en annan än spillvattentemperaturen. Detta kan innebära att alla årstider inte är lämpliga för undersökning med DTS.

I Umeå var det under mätperioden cirka 25% tillskottsvatten av den totala renade avloppsvattenvolymen vilket innebär en utspädningsgrad om 1,34. Under sommar- och vintermånaderna gick det inte att urskilja något samband mellan spillvattentemperaturen och nederbörds mängd. Resterande tid kunde ett visst samband ses mellan spillvattentemperatur och nederbörds mängd samt mellan spillvattenflöde och nederbörds mängd. Under samma tidsperiod kunde även ett visst samband ses mellan spillvattentemperatur och spillvattenflöde vilket innebär att slutsatsen kan dras att det går att kontrollera tillskottsvatten med hjälp av spillvattentemperatur. För att få ner tillskottsattenmängden skulle man därför kunna installera DTS sektionsvis i Umeå för att lokalisera inläckagepunkterna för tillskottsvattnet för att sedan kunna åtgärda problemen. Om det idag inte anses vara ett problem med tillskottsvatten finns risken att det i framtiden blir ett större problem då klimatförändringarna som sker gör klimatet varmare och mer nederbördsrikt. Då ett visst samband påvisas mellan nederbörden och spillvattentemperaturen/spillvattenflödet dras därmed slutsatsen att om nederbörden i framtiden ökar, kommer även tillskottsvattnet i spillvattensystemet att öka.

8 REFERENSER

AFL (2013). *Distributed temperature sensing*.

<https://www.aflglobal.com/productionFiles/resources/White-Papers/Distributed-Temperature-Sensing.pdf> [2021-04-05]

Beheshti, M., Ugarelli, R. & Saegrov, S. (2015). Infiltration/Inflow Assessment and Detection in Urban Sewer System. *Vann* (01), 24-34.

https://www.researchgate.net/publication/325090081_Infiltration_Inflow_Assessment_and_Detection_in_Urban_Sewer_System

Beheshti, M. & Saegrov, S. (2018). Quantification Assessment of Extraneous Water Infiltration and Inflow by Analysis of the Thermal Behavior of the Sewer Network.

Water 10(8), 1070. <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/8/1070>

Beheshti, M. & Saegrov, S. (2019). Detection of extraneous water ingress into the sewer system using tandem methods – a case study in Trondheim city. *Water Sci Technol*

79(2), 231-239. <https://iwaponline.com/wst/article/79/2/231/65869/Detection-of-extraneous-water-ingress-into-the>

Beheshti, M., Ugarelli, R. & Saegrov, S. (2015). Infiltration/Inflow Assessment and Detection in Urban Sewer System. *Vann* (01), 24-34.

https://www.researchgate.net/publication/325090081_Infiltration_Inflow_Assessment_and_Detection_in_Urban_Sewer_System

Eklund, A., Mårtensson Axén, J., Bergström, S., Björck, E., Dahné, J., Lindström, L., Nordborg, D., Olsson, J., Simonsson, L. & Sjökvist, E. (2015). *Sveriges framtida klimat – Underlags till dricksvattenutredningen*. (Klimatologi 14, 2015). Norrköping: SMHI.

http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.89529%21/Menu/general/extGroup/attachmentColH/old/mainCol1/file/klimatologi_14.pdf

Hoes, O.A.C., Schilperoort, R.P.S., Luxemburg, W.M.J., Clemens, F.H.L.R. & van der Giesen, N.C. (2009). Locating illicit connections in stormwater sewers using fibre-optic distributed temperature sensing. *Water Research* 43(20), 5187-97.

https://www.researchgate.net/publication/26794898_Locating_Illicit_Connections_in_Storm_Water_Sewers_Using_Fiber-Optic_Distributed_Temperature_Sensing

Jönsson, R., Jonasson, C. & Nilsson, G. (2003). *Biologisk rening i kallt klimat – konsekvenser för Norrlands kommunala reningsverk av artikel 4.2 i avloppsdirektiv 91/271/EEG*. (VA-forsk 2003-38) Svenskt Vatten AB. http://vav.griffel.net/filer/VA-Forsk_2003-38.pdf

Lantmäteriet (2021).

[https://kartor.eniro.se/?c=63.821117,20.300417&z=15&d={%22r%22:\[\[63.810134,20.23922,63.819697,20.312047\]\]}&q=%22R%C3%B6b%C3%A4cksdalen,%20UME%C3%A5%22;geo](https://kartor.eniro.se/?c=63.821117,20.300417&z=15&d={%22r%22:[[63.810134,20.23922,63.819697,20.312047]]}&q=%22R%C3%B6b%C3%A4cksdalen,%20UME%C3%A5%22;geo) [2021-04-05]

Nationalencyklopedin (u.å). Aramid. <http://www-ne-se.ezproxy.its.uu.se/uppslagsverk/encyklopedi/lang/aramid> [2021-05-19]

Panasiuk, O. & Hedström, A. (2019). Ett sätt att upptäcka vatten i fel ledning: DTS – Distributed Temperature Sensing. *Ny forskning och teknik* (7). https://www.ltu.se/cms_fs/1.130333!/file/artikel%207_Ett%20s%C3%A4tt%20att%20uppt%C3%A4cka%20vatten%20i%20fel%20ledning_DTS_webbversion.pdf

Panasiuk, O., Hedström, A., Langeveld, J., de Haan, C., Liefing, E., Schilperoort, R. & Viklander, M. (2019). Using Distributed Temperature Sensing (DTS) for Locating and Characterising Infiltration and Inflow into Foul Sewers before, during and after Snowmelt Period. *Water* 11(8), 1529. <https://doi.org/10.3390/w11081529>

Schilperoort, R., Hoppe, H., de Haan, C. & Langeveld, J. (2013). Searching for storm water inflows in foul sewers using fibre-optic distributed temperature sensing. *Water Science & Technology* 68(8), 1723-60. https://www.researchgate.net/publication/258253163_Searching_for_Storm_Water_Inflows_in_Foul_Sewers_Using_Fibre-Optic_Distributed_Temperature_Sensing

Schilperoort, R & Clemens, F.H.L.R. (2009). Fibre-optic distributed temperature sensing in combined sewer systems. *Water Sci Technol.* 60(5), 1127-34. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19717898/>

Selker, J., Thévenaz, L., Huwald, H., Mallet, A., Luxemburg, W., Giesen, N., Stejskal, M., Zeman, J., Westhoff, M. & Parlange, M. (2006). Distributed fibre optic temperature sensing for hydrologic systems. *Water resources research* 42(12).

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006WR005326>

- Sensornet (2020a). *FAQ's - What is Distributed Sensing?*
<https://www.sensornet.co.uk/faqs/#1464184839467-8ffe3516-a864> [2021-01-21]
- Sensornet (2020b). *Case Studies*. <https://www.sensornet.co.uk/case-studies/> [2021-01-21]
- SMHI (2020). *Vintern 2020 – Ovanligt rekordrik vinter*.
<https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/arets-vader/vintern-2020-ovanligt-rekordrik-vinter-1.155690> [2021-05-25]
- SMHI (2021). *Ladda ner meteorologiska observationer – Umeå- Röbbäcksdalen*.
<https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer#param=precipitationType24Hours,stations=all,stationid=140490> [2021-02-11]
- Svenskt Vatten AB (2016a). *Avledning av dag-, drän- och spillvatten: Funktionskrav, hydraulisk dimensionering och utformning av allmänna avloppssystem. Del 1- Policy och funktionskrav för samhällens avvattning*. (P110 del 1). Stockholm: Svenskt Vatten AB. http://vav.griffel.net/filer/P110_del1_web_low_180320.pdf
- Svenskt Vatten AB (2016b). *Avledning av dag-, drän- och spillvatten: Funktionskrav, hydraulisk dimensionering och utformning av allmänna avloppssystem. Del 2 - Hydraulisk dimensionering*. (P110 del 2). Stockholm: Svenskt Vatten AB.
- Svenskt Vatten AB (2016c). *Avloppsfakta*. <https://www.svensktvatten.se/fakta-om-vatten/avloppsfakta/> [2021-02-02]
- Svenskt Vatten AB (2020a). *Investeringsbehov och framtida kostnader för kommunalt vatten och avlopp*. (Oktober 2020). Bromma: Svenskt Vatten AB.
https://www.svensktvatten.se/globalassets/rapporter-och-publikationer/investeringsrapporten/svenskt_vatten_investeringsrapport_202010.pdf
- Svenskt Vatten AB (2020b) Clementson, I., Alenius, E. & Gustafsson, L-G.
Tillskottsvatten I avloppssystem – nya tankar om nyckeltal. (2020-13). Bromma: Svenskt Vatten AB. <https://vattenbokhandeln.svensktvatten.se/produkt/tillskottsvatten-i-avloppssystem-nya-tankar-om-nyckeltal/>

SVT (2020). *Så var vädret i Västerbotten 2020*.

<https://www.svt.se/nyheter/lokalt/vasterbotten/sa-var-vaderaret-i-vasterbotten-2020>

[2021-05-12]

Tyler, S., Selker, J., Hausner, M., Hatch, C., Torgersen, T., Thodal, C. & Schladow, G. (2009) Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods. *Water Resources Research* 45(4). W00D23.

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008WR007052>

Ukil, A., Braendle, H. & Krippner, P. (2012). Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications. *IEEE Sensors Journal* 12(5). 885-892.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/5955066>

Umeå Universitet (2021). *Institutionen för tillämpad fysik och elektronik - Om du vill hämta väderdata*. http://www8.tfe.umu.se/weather-new/hamta_vaderdata.html [2021-02-11]

Vakin (2018). *Miljörapport Öns avloppsreningsverk år 2017*. Umeå: Vakin.

<https://www.vakin.se/download/18.10867f716735e77b4311ec/1542899265380/Milj%C3%B6rapport%20%C3%96n%202017%20rev..pdf>

VISS. (2021). *Enkla vattenkartan*. [https://ext-](https://ext-geoportal.lansstyrelsen.se/standard/?appid=3e0dd9145e6e44f298111f47f5b4184d)

[geoportal.lansstyrelsen.se/standard/?appid=3e0dd9145e6e44f298111f47f5b4184d](https://ext-geoportal.lansstyrelsen.se/standard/?appid=3e0dd9145e6e44f298111f47f5b4184d)

[2021-04-30]

VASYD (2021). Vad är bräddning och när bräddar vi?

<https://www.vasyd.se/Artiklar/Avlopp-och-rening/Braddning> [2021-05-19]

Muntliga referenser:

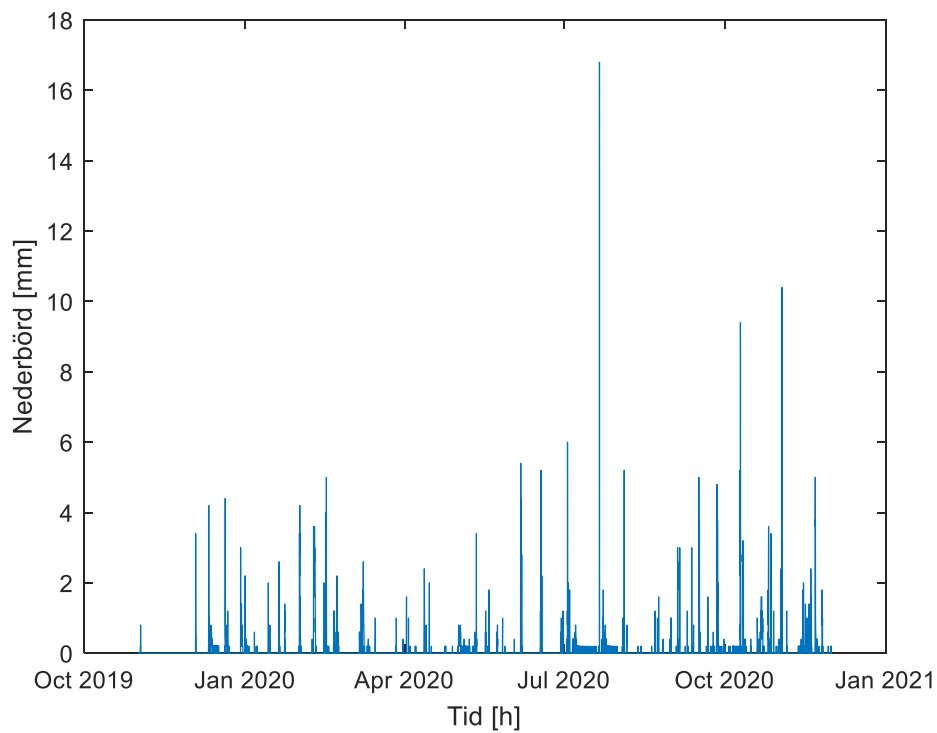
Annelie Hedström, professor VA-teknik, Luleå Tekniska Universitet (2021).

Karl Andersson, kundansvarig, Pollex (2021).

Rémy Schilperoort, kontaktperson, Partners4UrbanWater (2021).

Sensornet (2021)

Bilaga A



Figur A.1: Nederbördsdata som använts vid dataanalysen för tidsperioden 20191101-20201130 (Umeå Universitet 2021).

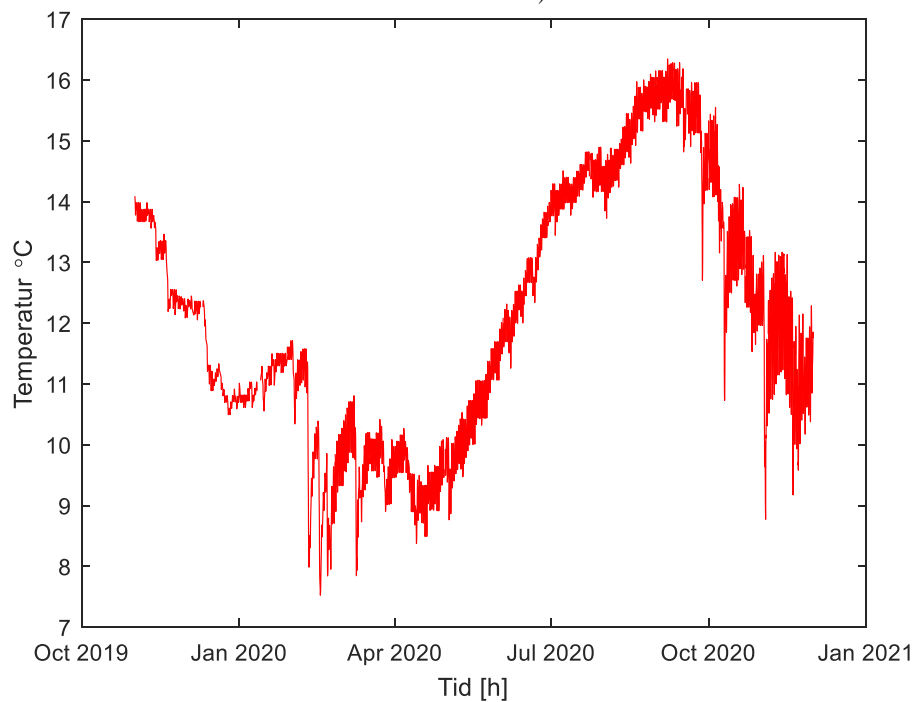
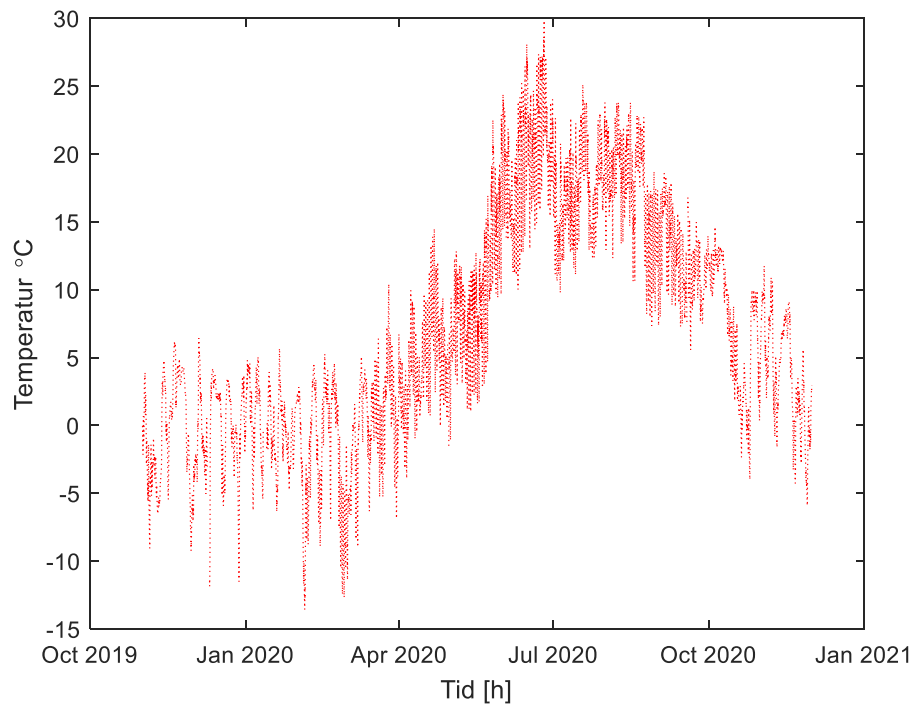
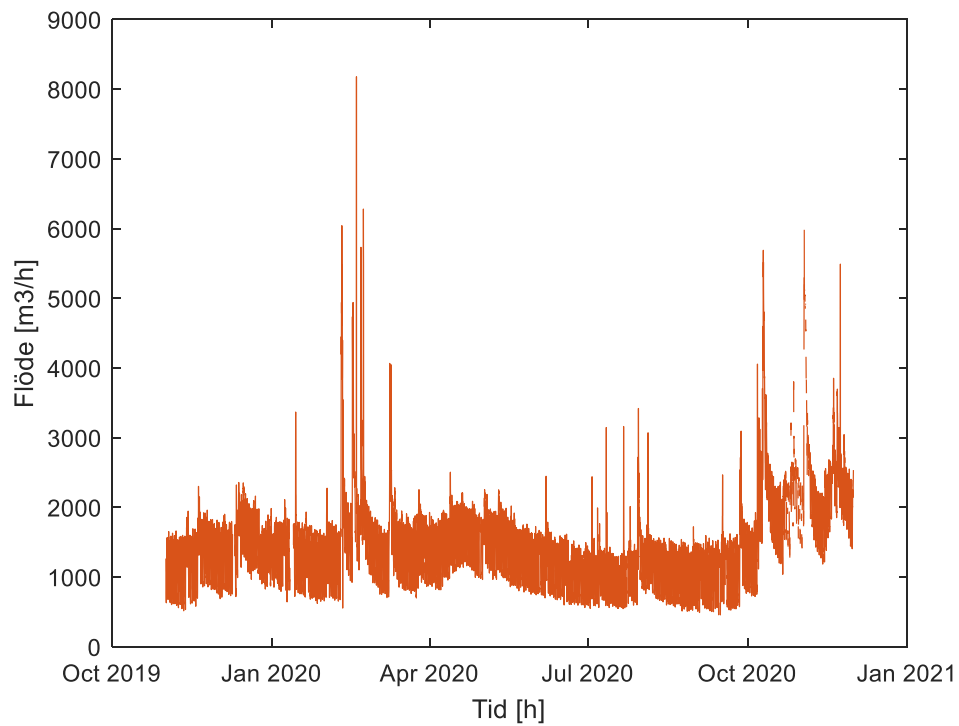


FigurA.2: Inkommande spillvattnets temperatur för hela tidsperioden till reningsverket på Ön. Data erhållen från Vakim.

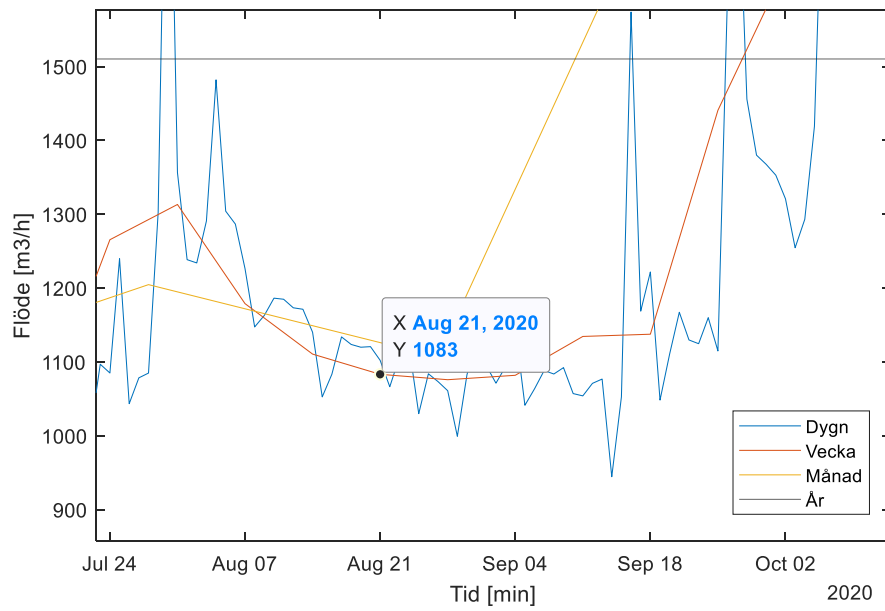


Figur A.3: Lufttemperaturen vid reningsverket på Ön för hela tidsperioden. Data erhållen från Vakin.



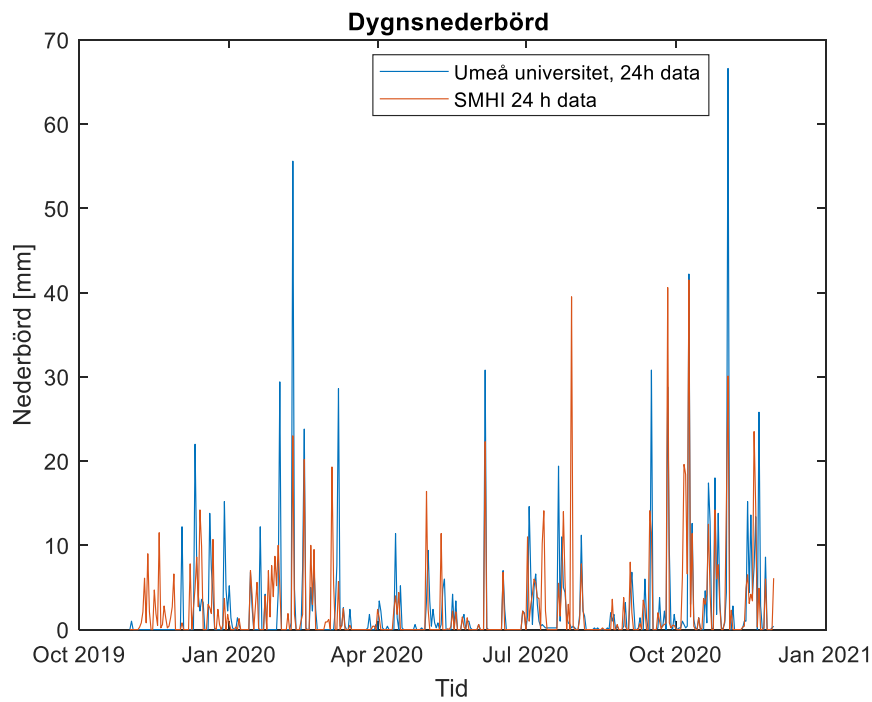
Figur A.4: Beräknat inkommande flöde till reningsverket på Ön för hela tidsperioden. Data erhållen från Vakin.

Bilaga B



Figur B.1: "Basflödet" som användes vid beräkning av USG.

Bilaga C



Figur C.1: Validering av nederbördsdata från Umeå universitet mot data från SMHI, station Rübäcksdalen.

Bilaga D

Tabell D.1: Tabell över datum från flödesderivataanalysen samt temperaturanalysen

Datum Flödesderivataanalys	Datum Temperaturderivataanalys
'12-Nov-2019 00:00:00'	'19-Nov-2019 00:00:00'
'18-Nov-2019 00:00:00'	'01-Feb-2020 00:00:00'
'12-Dec-2019 00:00:00'	'09-Feb-2020 00:00:00'
'07-Jan-2020 00:00:00'	'15-Feb-2020 00:00:00'
'31-Jan-2020 00:00:00'	'16-Feb-2020 00:00:00'
'08-Feb-2020 00:00:00'	'20-Feb-2020 00:00:00'
'09-Feb-2020 00:00:00'	'08-Mar-2020 00:00:00'
'15-Feb-2020 00:00:00'	'15-Sep-2020 00:00:00'
'18-Feb-2020 00:00:00'	'25-Sep-2020 00:00:00'
'20-Feb-2020 00:00:00'	'26-Sep-2020 00:00:00'
'07-Mar-2020 00:00:00'	'06-Oct-2020 00:00:00'
'08-Mar-2020 00:00:00'	'09-Oct-2020 00:00:00'
'24-Mar-2020 00:00:00'	'01-Nov-2020 00:00:00'
'11-Apr-2020 00:00:00'	'18-Nov-2020 00:00:00'
'01-May-2020 00:00:00'	'20-Nov-2020 00:00:00'
'09-May-2020 00:00:00'	
'02-Jul-2020 00:00:00'	
'29-Jul-2020 00:00:00'	
'25-Sep-2020 00:00:00'	
'26-Sep-2020 00:00:00'	
'05-Oct-2020 00:00:00'	
'06-Oct-2020 00:00:00'	
'08-Oct-2020 00:00:00'	
'09-Oct-2020 00:00:00'	
'01-Nov-2020 00:00:00'	
'13-Nov-2020 00:00:00'	
'18-Nov-2020 00:00:00'	
'20-Nov-2020 00:00:00'	

Bilaga E

Nedan följer en lista på DTS-leverantörer (Ukil et al. 2012).

Slb.com

omnisens.ch

LIOS-technology

Halliburton

AP-sensing

Sensornet