

DDUrban; ny urbanhydrologisk modell. Resultater fra SURF prosjektet

Av Thomas Skaugen, Deborah Lawrence og Rengifo Zenon Ortega

Thomas Skaugen er PhD i hydrologi og forskningsprofessor ved Hydrologisk avdeling, NVE. Deborah Lawrence er PhD i hydrologi og seniorforsker ved Hydrologisk avdeling, NVE. Rengifo Zenon Ortega er MSc i Geomatikk og overingeniør ved Hydrologisk avdeling, NVE.

Summary

A new urban hydrological model, DDUrban-results from the SURF project. Increased urbanization and climate change call for urban hydrological models capable of describing urban flow dynamics, often in data-scarce areas. We present a parameter parsimonious rainfall-runoff model, DDUrban, in which most model parameters are estimated from a digital elevation model using GIS. The model aims to describe the water balance of the urban catchment. The model has been calibrated and validated on runoff data at a 10 min temporal resolution for two catchments in Oslo and Trondheim with acceptable validation results ($KGE = 0.56-0.69$). Simulations show that i) calibrated subsurface velocities agree well with measured saturated hydraulic conductivity, ii) precipitation infiltrated on permeable areas contributes, on average, to the total flow at a fraction corresponding to the areal fraction of permeable areas and iii) for saturated conditions, a significant part (~30 -60 %) of the flood peak is due to saturation excess overland flow.

Sammendrag

Økt urbanisering og klimaforandringer etter spør urbanhydrologiske modeller som kan beskrive urban avrenning også for områder med lite målinger. Vi presenterer en parameter gjerrig

nedbør-avløps modell, DDUrban som beskriver vannbalansen i et urbant nedbørsfelt og hvor de fleste modellparametere er bestemt fra en terrengeanalyse ved hjelp av GIS. DDUrban er kalibrert og validert for to nedbørsfelt i Oslo og Trondheim med vannføringsdata på 10 min oppløsning med tilfredsstillende valideringsresultater ($KGE= 0.56-0.69$). Modellsimuleringer viser at i) kalibrerte grunnvannshastigheter stemmer overens med målt mettet hydraulisk konduktivitet, ii) nedbør som faller over permeable områder bidrar til totalavrenningen tilsvarende fraksjonen av permeable områder og iii) ved mettet tilstand vil en signifikant del (~30 -60 %) av flomtappen være overflate avrenning fra mettede permeable områder.

Introduksjon

Denne artikkelen er basert på en større artikkel publisert i Journal of Hydrology i år (Skaugen et al., 2020, <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2020.100060>). Artikkelen er publisert som «open access», og kan fritt lastes ned. På grunn av plasshensyn i VANN er ikke alle elementer i den opprinnelige artikkelen tatt med. Opplysninger som mangler i denne artikkelen kan innhentes ved å følge lenken. Det ble vurdert som hensiktsmessig å publisere en norskspråklig versjon for å bidra til best mulig informasjon til norske

vannfaglige miljøer innen forskning, forvaltning og allmennheten.

Det er viktig å forstå urbanhydrologiske prosesser siden graden av urbanisering øker (Fletcher et al, 2013; Salvatore et al. 2015) samtidig som vi kan forvente oss mer frekvent og intens nedbør (Hanssen-Bauer et al., 2017). Dette vil øke belastningen på eksisterende urbane avrenningsystemer og forårsake skader på infrastruktur (NOU 2015). Å få kvantifisert urbanhydrologisk respons på intens nedbør er imidlertid krevende siden det urbane landskapet endrer seg, og generelt sett, mangler lange, statistisk stasjonære tidsserier av urbant avløp (Bayazit, 2015). I tillegg er ofte tilgjengelige tidsserier av urbant avløp av typen felles avløp (både spillvann og nedbørsgenerert avrenning) som gjør hydrologiske analyser svært usikre. Vi trenger derfor verktøy som realistisk kan simulere urbanhydrologisk respons, også under forhold med begrenset data tilgang.

Dagens metoder for å kvantifisere urbanhydrologiske prosesser går fra svært enkle metoder som lineært omgjør nedbørshendelser til avrenning til komplekse modeller som har en mer fysikalsk forankring til hydrologiske prosesser. Et eksempel på førstnevnte kategori er den Rasjonale Formel (Grimaldi og Petroselli, 2015), mens eksempler på sistnevnte kategori kan være Storm Water Management Model (SWMM) (Rossmann og Huber, 2016), og MOdel for Urban SEwers (MOUSE) (DHI, 2017; MIKE, 2020). Fordelen med enkle metoder er selvsagt at man får et resultat med minimal data input, men vannbalansen og effekten av fordrøyning fra ulike landskapselementer er ignorert. Klassiske urbanhydrologiske modeller, som SWMM og MOUSE, inkluderer vanligvis prosesslikninger for å beskrive grunnvann og fordampning. Grunnvannets rolle og bidrag til urban avrenning er identifisert som et område med manglende kunnskap (Elliott og Trowsdale, 2007; Fletcher et al., 2013; Salvatore et al., 2015) selv om mange har rapportert om grunnvann som viktig både i urban avrenning og urban flom (Belhadj et al., 1995; Berthier, et al, 2004; Hailegeorgis and Alfredsen, 2018;

Broekhuizen et al. 2019). Kvantifisering av fordampning fra urbane områder er også identifisert som viktig for å avhjelpe urban hete og for å kunne slutte den urbane vannbalansen (Fletcher et al., 2013). Samtidig pleier slike urbanhydrologiske modeller å ha et stort antall parametere som dessverre ofte er konseptuelle og vanskelig å knytte til målbare fysiske egenskaper. Slike parametere må derfor bestemmes ved hjelp av kalibrering, og bestemmelsen kan bli svært usikker på grunn av korte og ikke-stasjonære dataserier.

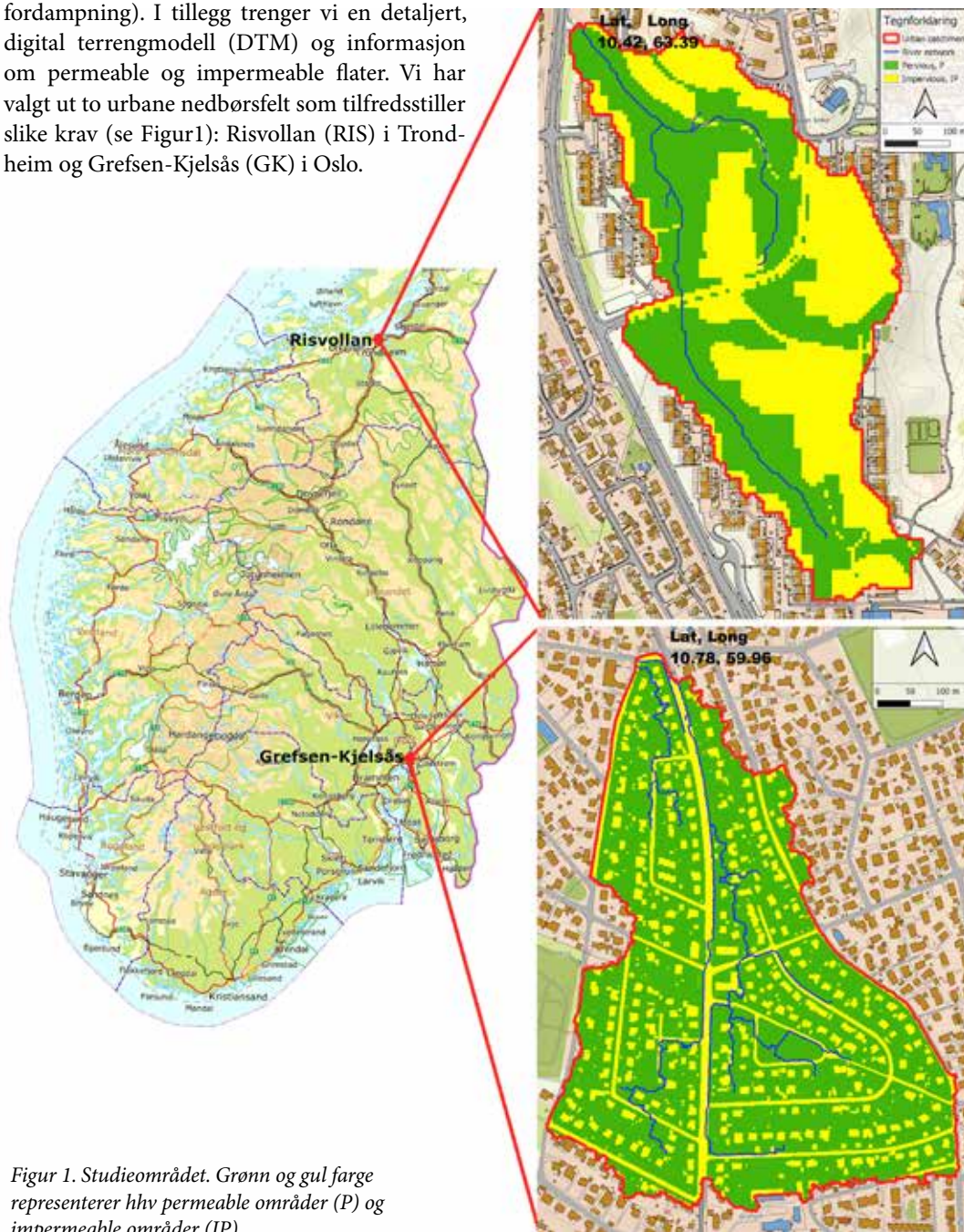
Forskjellige tilnærminger og strategier har blitt anvendt for å kunne modellere hydrologi for områder med begrenset data tilgang først og fremst for naturlige nedbørsfelt (se Blöschl et al, 2013). En slik tilnærming har vært å redusere antall parametere som behøver kalibrering. Ved å forenkle (og forbedre) de hydrologiske prosessbeskrivelsene og inkludere andre data, kan modellparametere fjernes eller få faste verdier. I tillegg kan modellkompleksiteten reduseres ved å identifisere de dominerende hydrologiske prosesser for det problemet som skal løses (se Salvatore et al., 2018 med referanser). Da kan prosesser som varierer over lengre eller kortere lengde- og tidsskalaer enn de som definerer problemet vi er interessert i, enten neglisjeres eller bli veldig enkelt representert (f.eks. med en konstant).

Distance Distribution Dynamics modellen (DDD, Skaugen og Onof, 2014; Skaugen og Mengistu, 2016) er et eksempel på en hydrologisk nedbør avløpsmodell, anvendt for naturlige felt, hvor tidligere kalibrerte prosessbeskrivelser (som snøsmelting, fordampning etc.) er byttet ut med prosessbeskrivelser parameterisert med nye data (f.eks. digitale kart). DDD modellen med sine relativt få parametere å bestemme har vist seg å kunne predikere hydrologi for umålte naturlige felt på 24 t oppløsning (Skaugen et al. 2015) og også på 1 t oppløsning for mindre felt, (Tsegaw et al., 2019). Gode resultater for høy tidsoppløsning kombinert med få og fysisk baserte modellparametere gir grunn til å prøve ut DDD konseptet på urbanhydrologiske problemstillinger.

Studie område og data

For å undersøke modellens evne til å beskrive et urbant nedbørsfelts vannbalanse og avrenningsdynamikk trenger vi målinger av høy tidsoppløsning (10 min brukes her) av både vann inn (nedbør og vannforbruk) og vann ut (avløp og fordampning). I tillegg trenger vi en detaljert, digital terrengmodell (DTM) og informasjon om permeable og impermeable flater. Vi har valgt ut to urbane nedbørsfelt som tilfredsstiller slike krav (se Figur1): Risvollan (RIS) i Trondheim og Grefsen-Kjelsås (GK) i Oslo.

RIS ligger 4 km sydøst for Trondheim sentrum og er et forskningsfelt for Norges Teknisk-Naturvitenskaplige Universitet (NTNU) i Trondheim. Feltets størrelse er 0.18 km², har høydefordeling 82 -129 moh, og har separate



Figur 1. Studiemrådet. Grønn og gul farge representerer hhv permeable områder (P) og impermeable områder (IP).

systemer for overvann og spillvann. Området har mange bolighus og andelen permeable og impermeable flater (tak og veier) er hhv 0.51 og 0.49. RIS har vært gjenstand for mange urbanhydrologiske undersøkelser gjennom årene (se Dalen et al, 2016 med referanser) og Hailegeorgis og Alfredsen (H&A) (2018) brukte RIS til utviklingen av sin urbanhydrologiske modell.

GK ligger ca 5 km nordøst av Oslo sentrum, har et areal på 0.3 km² og har en høydeforskjell 170-188 moh. GK har felles avløpsystem for spillvann og nedbørgenerert avrenning. Også her er det mest bolighus og andelen permeable og impermeable flater er henholdsvis 0.73 og 0.27.

Tidsserier av avløp fra RIS og GK er målt av henholdsvis Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE) og Oslo Kommune (VAV). NVE har målt vannføring på RIS siden 1986 (om enn ikke helt kontinuerlig) og vi bruker fire tidsserier i denne studien: RIS1 (1993-1-1 00:00 – 1994-10-4 15:20), RIS2 (1994-10-12 15:50 – 1997-7-25 18:50), RIS3 (1997-7-28 11:00 – 1997-9-23 07:20) og RIS4 (1997-11-18 16:00 – 1998-8-31 23:20). RIS3 er brukt til kalibrering og de andre tidsseriene til validering. Vannføringsserien ved GK er gjort av Oslo kommune, VAV, som en kampanjemåling og vi har data kun for juni-november, 2010 for GK. Denne tidsserien er delt i to: GK1 (2010-9-1 00:00 – 2010-8-31 23:50) og GK2 (2010-9-1 00:00 – 2010-11-15 12:20). GK2 brukes til kalibrering og GK1 for validering.

Ved RIS måles avløp, nedbør og temperatur ved avløpsstasjonen. Ved GK måles nedbør ca 100 meter fra avløpsstasjonen og vi bruker temperatur data fra Meteorologisk Institutt sin målestasjon Blindern (ca 3 km nordvest fra GK).

Digitale datasett for veger, tak og arealdekke er hentet fra henholdsvis Felles Kart dataBase (FKB) og Norsk Institutt for BIOøkonomi (NIBIO) og nedbørsfeltene kan deles inn i permeable og impermeable flater. DTM (0.5 m oppløsning) for GK er fra Oslo Kommune og for RIS er det brukt en DTM (2.0 m oppløsning) fra kartverket (<https://www.kartverket.no/data/hoydedata-og-terrengmodeller/>). Verktøy fra GRASS GIS gir muligheten til å generere et

hydrologisk korrekt elvenettverk som er nødvendig for å beregne modellparametere i DDDUrban.

Metoder

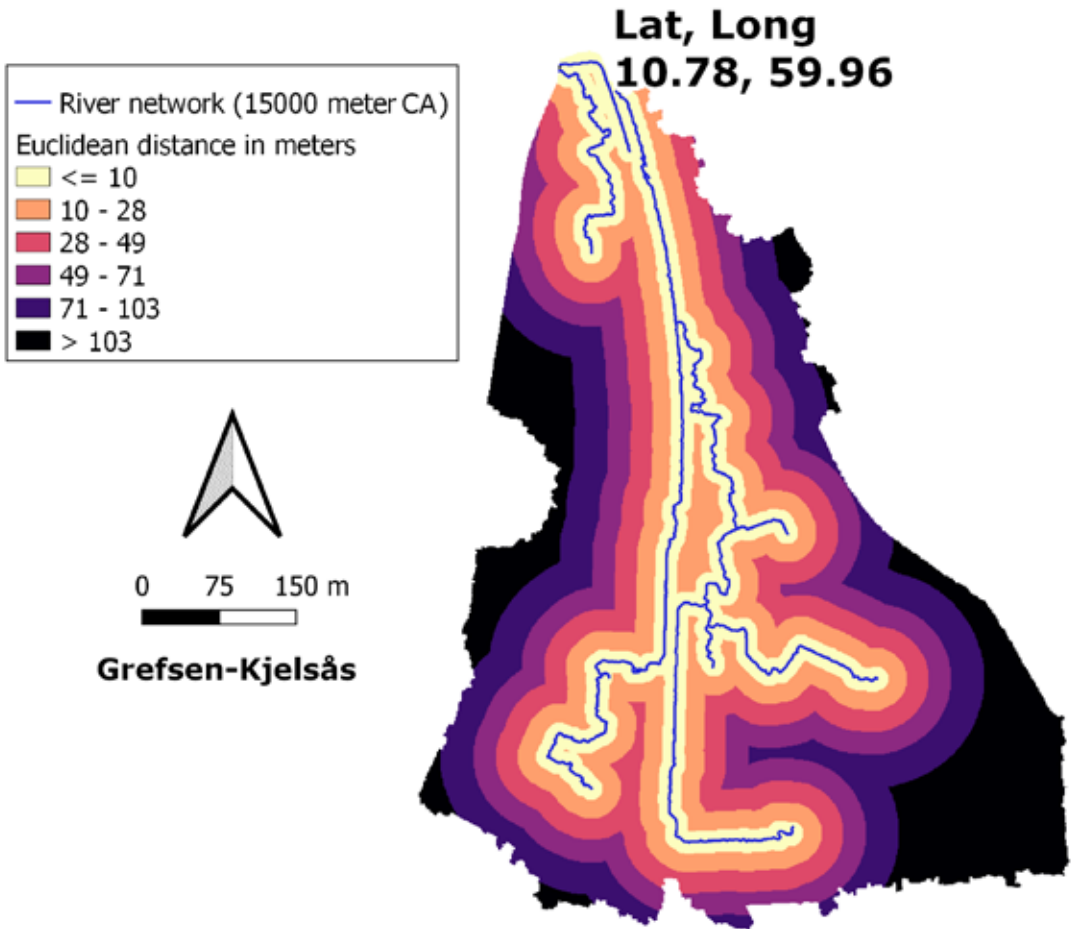
Avstandsfordelinger i urbane områder

I DDDUrban modellen er det to landskapstyper, permeable (P) og impermeable (IP) flater (se Figur 1). Tak og veier er klassifisert som IP og resten som P. Fra GIS, kan vi, for hver landskapsklasse, bestemme fordeling av avstander (eng. distance distributions, DD) fra punkter i landskapet til nærmeste elvestreng. Figur 2 illustrerer beregningen av DD.

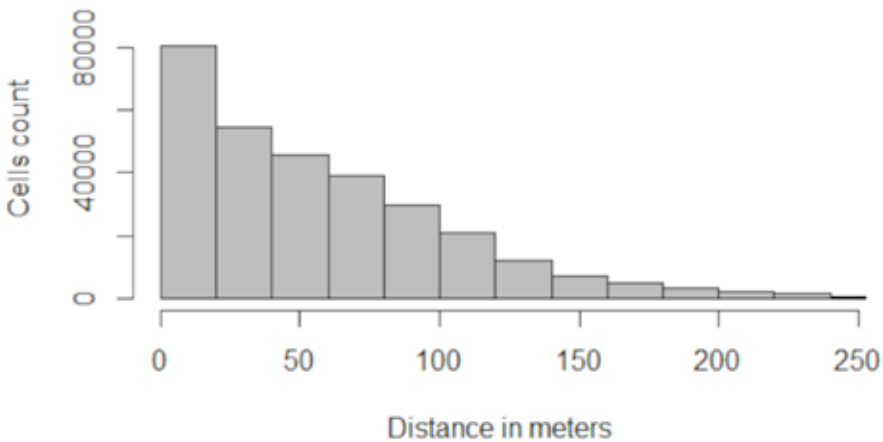
Avstandsfordelingene (DD) er en svært viktig modellkomponent, siden den beskriver fordelingen av avstander vannet må reise under og over terrenget for å komme til en elv. Under og over terreng beveger vannet seg vesentlig saktere enn i elven og forskjellen i hastigheter kan godt være over 3-4 størrelsesordner. Siden det urbane landskapet som regel mangler et naturlig elvenettverk, vil ledningsnett for felles avløp eller overvann representere elvenettverket. Hvis informasjon om ledningsnett mangler, kan vi anvende et GIS verktøy, som for eksempel “the multiple flow algorithm” (Holmgren, 1994; Ehl-schlaeger, 1989) for å generere et plausibelt elvenettverk. Heretter vil ledningsnett bli referert til som “elvenettverket». Tidligere arbeid (Skaugen and Onof, 2014) har, for naturlige nedbørsfelt, vist at formen på fordelingen til avstand mellom punkter i feltet og elvenettverket er eksponentiell, mens fordelingen av avstander mellom punkter i elvenettverket og utløpet av feltet er normal. GIS analysen tallfester parametere (middelverdi for eksponentialfordelingen og middelverdi og standardavvik for normalfordelingen) for DD'ene.

Urbane vannhastigheter

Hastigheter for vannstrømmer i et urbant landskap er bestemt ved litteraturverdier for overflatestrøm og ved kalibrering for grunnvannsstrøm. Estimerte verdier av mettet hydraulisk konduktivitet fra undersøkelser av Solheim (2017) ved GK og Muthanna et al (2018) ved



Distribution of euclidean distances to river network



Figur 2. Beregning av DD for GK. Merk at fordelingen av avstanden har en eksponentiell form.

Tabell 1. Karakteristiske hastigheter, tid og avstander for GK and RIS

Avløpstype	Hastighet [m/s]		Midlere avstand for prosess [m]		Midlerer tidsskala [timer]		Antall tidssteg ved 10 min tidsoppløsning		Kilde for hastighets estimat
	GK	RIS	GK	RIS	GK	RIS	GK	RIS	
Overflate prosesser									
Overflate avrenning, P-arealer	0.007	0.007	47	31	1.9	1.23	11	7	Holden et al. (2008)
Overflate avrenning, IP-arealer	0.01	0.01	45	69	1.25	1.9	8	12	Sedyowati et al. (2017)
Grunnvanns prosesser									
Infiltrasjon (høye verdier) og mettet hydraulisk konduktivitet (lave verdier)	5.3*10 ⁻³ - 5.3*10 ⁻⁵	5.3*10 ⁻³ - 2.7*10 ⁻⁶	0.1 - 2	0.1 - 2	0.005 - 10	0.005 - 206	0.03 - 60	0.03 -1236	Solheim (2017) (GK) og Muthanna et al. (2018) (RIS)
Grunnvann Lag 1	0.00015	0.00012	47	31	87	71	522	430	Estimerte hastighets profiler for grunnvann, se Skaugen og Mengistu (2016). Hastigheten avtar med dybden.
Grunnvann Lag 2	7.9*10 ⁻⁵	6.3*10 ⁻⁵	47	31	165	137	991	820	
Grunnvann Lag 3	4.1*10 ⁻⁵	3.5*10 ⁻⁵	47	31	318	246	1910	1476	
Grunnvann Lag 4	1.4*10 ⁻⁵	1.3*10 ⁻⁵	47	31	932	662	5595	3974	
Infrastruktur									
Ledninger	1.45	1.55	632	142	0.12	0.03	0.7	0.15	Midlere hastighet i ledninger observert av Oslo kommune (GK) og NVE (RIS)

RIS brukes som validering av de kalibrerte hastighetene. Vi antar at hastighetene på grunnvannsstrøm er en funksjon av hvor mettet grunnen er og at den følger en to-parameter gammafordeling. Form- (*Gsh*) og skala (*Gsc*) parameterne til denne fordelingen, er input til DDDUrban

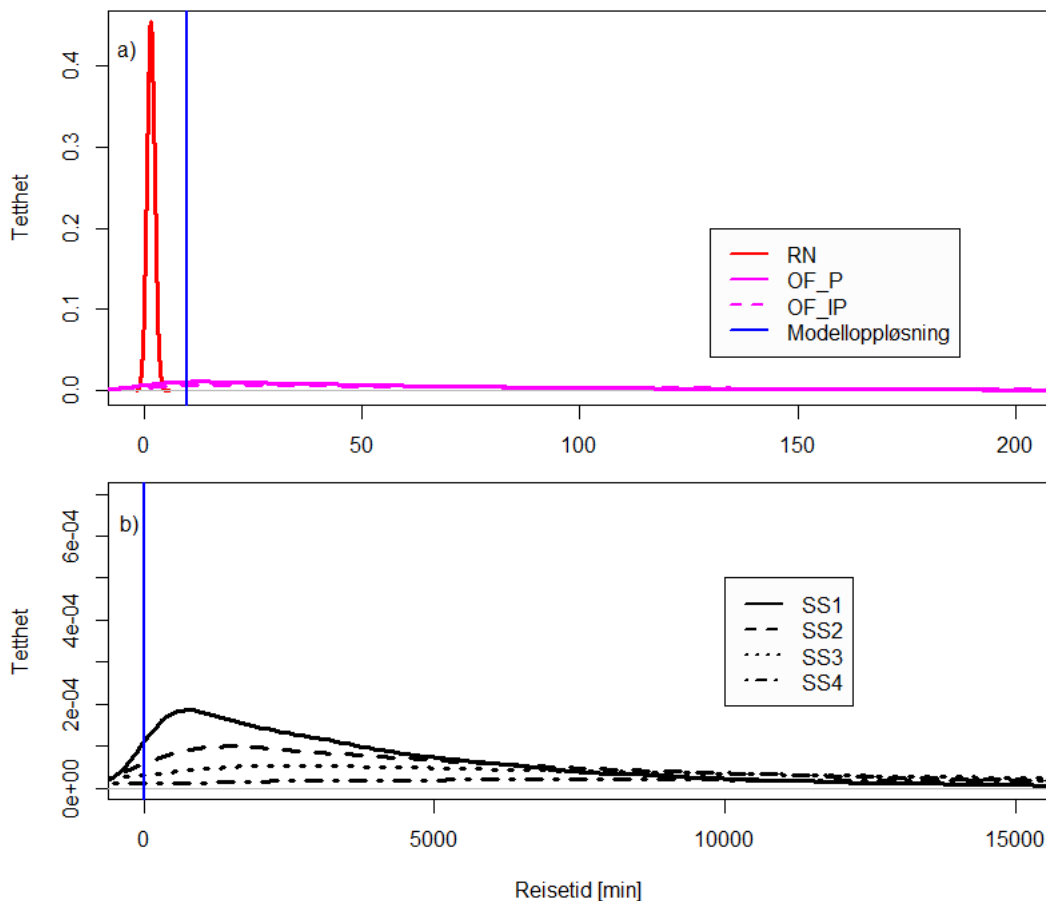
Tabell 1 viser karakteristiske avstander og hastigheter for de forskjellige avrenningsprosessene for GK og RIS.

Fra Tabell 1 kan vi se at vanntransport i rør forgår såpass raskt at hvis vi har en modell med tidsoppløsning på 10 minutter, skjer transporten på under ett tidssteg. Avstanden vannet skal reise er relativt lang, men hastigheten er høy. For infiltrasjon finner vi at hastigheten er lav, men avstanden til mettet sone kort (Tabell 1 indikerer at avstand for infiltrasjon er relativt usikker). Reisetidsfordelinger er illustrert i Figur 3 hvor vi har plottet reisetidsfordelingene for de forskjellige prosessene som har en avstandsfordeling vi kan måle (infiltrasjon er en prosess vi ikke har

avstandsfordeling for, men den er inkludert Tabell 1 for illustrasjonsformål). Reisetidsfordelinger framkommer ved å dividere avstander trukket fra sin respektive fordeling med prosessens karakteristiske hastighet. I Figur 3 har vi også plottet inn modellopløsningen vi har brukt i denne studien og igjen ser vi at vanntransport i rør er en veldig rask prosess som ikke blir representert ved valgt modellopløsning. De andre prosessene er fordelt over mange tidssteg i modellen.

DDUrban, modellstrukturen

DDUrban simulerer avrenning, grunn- og markvann, snø og fordampning separat for landskapsklassene P og IP (se Figur 1). Simulert avløp fra landskapsklassene kobles sammen i elvenettet. Formen på DD'ene er basis for avrenningsdynamikken (dvs. hvor mye kommer når?). En DD og en vannhastighet gir oss et enhetshydrogram som fordeler vannet i tid. En DD og fem hastigheter (en for overflate avrenning og



Figur 3. Reisetidsfordelinger for urbanhydrologiske prosesser sammenliknet med tidsoppløsning for modell (avstandstall fra GK). a) RN er elvenettverk, OF_P og OF_IP er overflate avrenning for P og IP og b) SS1-4 indikerer metnings nivå for grunnvann med avtakende hastighet.

fire for grunnvannstrøm) gir oss fem enhetshydrogram i parallell som transporterer vannet fram til elvenettverket. De har alle lik form, siden DD'en er den samme, men har forskjellig skala siden hastighetene er forskjellige. Transport av vann i elvenettverket gjøres på samme måte, dvs at fra DD'en for elvenettverket og estimert hastighet i rørene får vi et enhetshydrogram som fordeler vann i tid gjennom elvenettverket til utløpet. Hovedforskjellen mellom DDDUrban og DDD for naturlige felt er at infiltrasjonskapasitet er eksplisitt representert i DDDUrban. For P-arealer er infiltrasjonskapasiteten satt lik gjennomsnitts grunnvannshastighet. For eksempel tilsvarer en grunnvannshastighet på $5.3 \cdot 10^{-5}$ m/s en infiltrasjonskapasitet

på 3.2 mm/minutt, som er en ekstremt høy nedbørsintensitet for Oslo området og nær IDF estimatet for 50-års regnet i Oslo (<https://klima-servicesenter.no/faces/desktop/idf.xhtml>). Overflateavrenning for P-arealer skjer når infiltrasjonskapasiteten overskrides eller når kapasiteten til grunnvannsmagasinet nås og vi får «mettet overflate avrenning» (Dunne and Black, 1970). For IP-arealer er infiltrasjonskapasiteten satt veldig lav (men ikke til null siden det er vist at asfalterte areal har en viss infiltrasjon (Ramier, et al., 2011; Fletcher et al., 2013)) og bidraget til avrenning fra IP-arealer er i all hovedsak overflate avrenning.

Når vannet infiltrerer (dvs. når nedbørsintensiteten er lavere enn infiltrasjonskapasiteten)

Tabell 2. Modell parameter til DDDUrban for GK

Parameter	Verdi (GK)	Beskrivelse	Estimeringsmetode
Feltkarakteristika			
Hypsografisk kurve	170,177,179,180, 181, 182, 182, 183, 185, 188, 208	Høyde ved kvantilene: 0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100.	Fra GIS
Lengdegrad Breddegrad	59.95487, 10.78591	Lokalisering	Fra digitale kart
MAD [m ³ /s]	0.00664	Midlere årsavrenning	Fra observasjoner
Areal [m ²]	301626	Nedbørsfelt	Fra GIS
Hydrologiske prosess parameter			
θ_{pc} [-]	1.0	Korreksjons faktor for nedbør	Fast
θ_{sc} [-]	1.0	Korreksjons faktor for nedbør som snø	Fast
θ_u [m/s]	1.5	Midlere årlig vindhastighet	Fast
θ_{ws} [%]	0.05	Maksimalt fritt vann i snø.	Fast
θ_{TX} [°C]	0.5	Terskeltemperatur regn/snø	Fast
α_0 [-], D [-]	42.36, 413	Skala parameter til en enhet nedbør og korrelasjonslengde til romlig nedbør. Brukes til å estimere den romlige fordelingen av snø (like verdier for P og IP)	Estimert fra romlig variabilitet av nedbør (fast, ihht Skaugen and Weltzien, 2016).
NOL [-]	5	Antall grunnvannslag.	Fast, se Skaugen and Onof, (2014).
R [-]	0.3	Feltkapasitet	Fast, se Skaugen and Onof, (2014).
Avstandsfordelinger			
Pfrac, IPfrac [-]	0.73, 0.21	Fraksjon av landskapsklasser	Fra GIS
Pmax, IPmax [m]	240, 235	Max observert avstand for landskapsklasser	Fra GIS
Pmid, IPmid [m]	47, 45	Middel av avstandsfordeling for landskapsklasser.	Fra GIS
Pz, IPz [-]	0.01, 0.0	Arealfraksjon av 0-avstand til elvenettverk for landskapsklasser	Fra GIS
RNmid, RNstd, RNmax [m]	632, 332,1232	Middel, standardavvik, og max av avstandsfordeling for elvenettverk	Fra GIS
Hastighetsparametere			
OF_P, OF_IP [m/s]	0.007, 0.1	Hastighet overflateavrenning for landskapsklasser.	Fra litteraturen (see Tabell 1)
Gsh, Gsh [-]	2.23, 0.000285	Form og skala parameter for gammafordelt resesjonsmål. For å bestemme grunnvannshastigheter	Kalibrert
θ_{vr} [m/s]	1.45	Midlerer hastighet i elvenettverk.	Fra observert avløp
Spillvannparametere			
Antall personer	3200	Bidrag til avløp for fellessystem	Kommune

fylles grunnvannsmagasinet opp med de langsomme lagene først. Metningsgraden og hastigheten på grunnvannet øker altså med oppfylling

av grunnvannsmagasinet. Skaugen og Mengistu (2016) beskriver hvordan kapasiteten for grunnvannet kan estimeres fra gjennomsnitts grunn-

vannshastighet og et estimat av årlig middeldavrenning.

Tabell 2 gir en oversikt of DDDUrban's modellparametere, beskrivelse og hvordan den er estimert. Selv om det er mange parametere, kan mesteparten av dem bestemmes uavhengig av kalibrering. Kalibrerte parametere i Tabell 2 er uthevet.

Snø, snøsmelting og fordampning

DDDUrban bruker prosedyrer for snøfordeling og snøsmelting hentet fra hhv Skaugen og Weltzien (2016) og Skaugen et al. (2018). For snøsmelting og fordampning brukes en energibalans modell, som bruker nedbør og temperatur som inngangsdata. Mere detaljer om denne finnes i Skaugen et al. (2020) med tilhørende referanser.

Resultater

DDDUrban er kalibrert med tidsseriene GK2 and RIS3 and validert med de resterende tidsseriene. Kun parameterne *Gsh* and *Gsc* (parameterne til den gamma fordelte hastighetsfordelingen) ble kalibrert og de resterende parameterne er bestemt ved hjelp av GIS eller fra litteraturen (se Tabell 2). DDDUrban er kodet i programmeringsspråket Julia (<https://julia-lang.org/>) og Kling Gupta effektivitets kriteria (KGE; Gupta et al, 2009; Kling et al., 2012) ble optimalisert ved hjel av en global optimaliserings prosedyre, BlackBoxoptim (<https://github.com/jbrea/BlackBoxOptim.jl>). KGE får verdien 1 for en perfekt simulering og går til minus

uendelig og beskriver simuleringens feil i bias for middelvei og varians, og korrelasjon.

Figur 4 viser eksempler for DDDUrban simulering av tidsserier for GK (a, med spillvannsbidrag tilpasset tørrværsavrenningen) og RIS (b). Avløp fra både P- og IP arealer bidrar begge til god overenstemmelse i timing og nivå av avløpstoppene mellom observert og simulert avløp. Som forventet er bidraget fra IP-arealer dominerende for avløpstoppene.

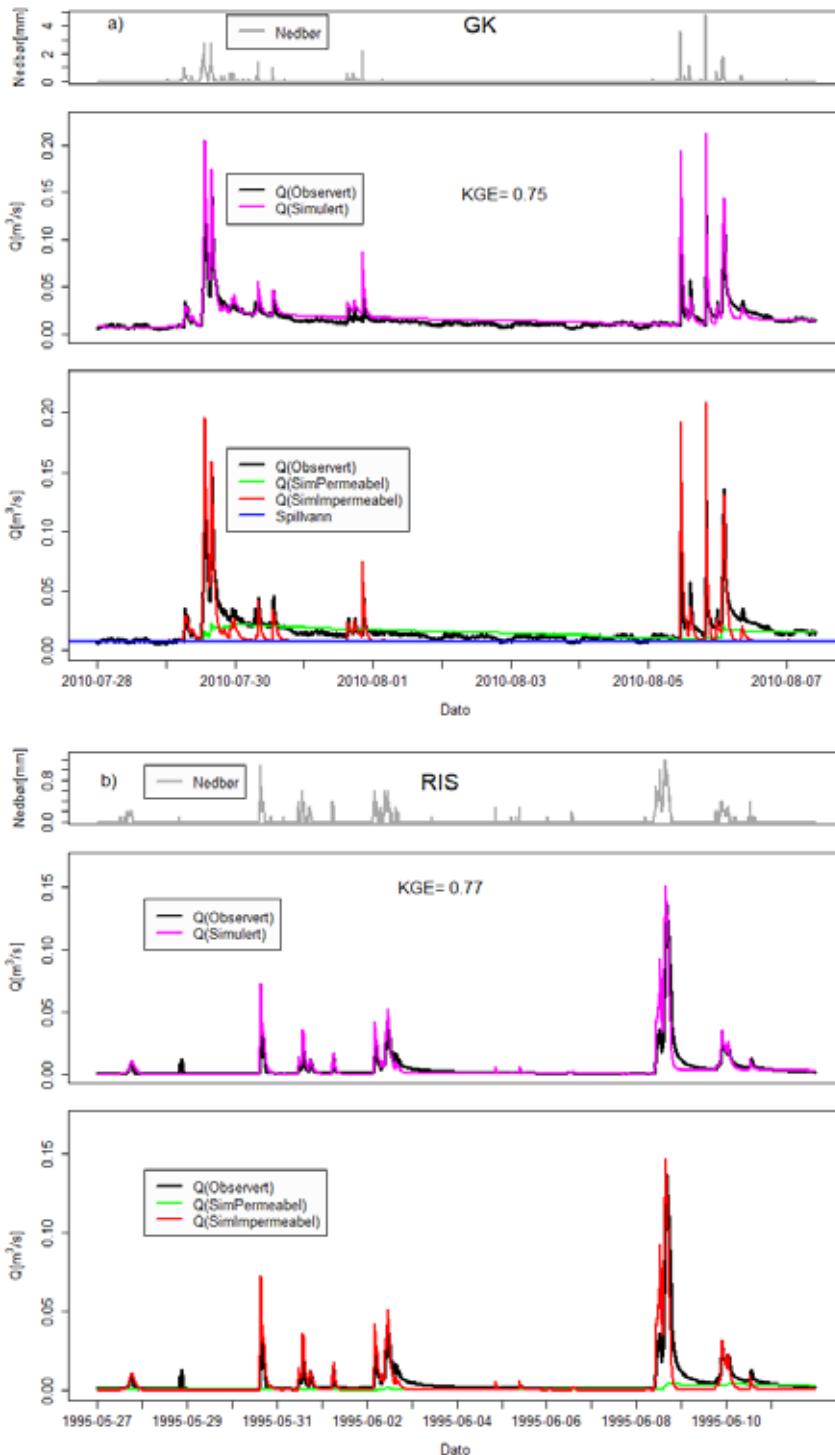
Tabell 3 viser KGE for kalibrering (for tidsseriene RIS3 og GK2) og validering. Vi får relativt høye verdier av KGE for kalibreringsperioden og lavere for valideringsperioden. Vi ser også fra Tabell 3 at grunnvannsbidraget er signifikant og bidrar i gjennomsnitt til vannføringen med en andel som korresponderer med arealandelen av permeable flater. For GK ser vi også at aktuell fordampning avtar klart fra sommer (GK1) til høst (GK2), men er en signifikant del av den urbane vannbalansen. Simulert årlig aktuell fordampning for RIS for årene 1995 og 1996 er henholdsvis 196 og 200 mm. Estimaten kan ikke verifiseres mot målte data, men er i god overenstemmelse med det modellerte langtidsmiddelet (1983-2012) på 204 mm/år, beregnet av en griddet nedbør-avløpsmodell for et område på 9 km², som inkluderer RIS (Huang et al., 2019).

Mettet overflateavrenning

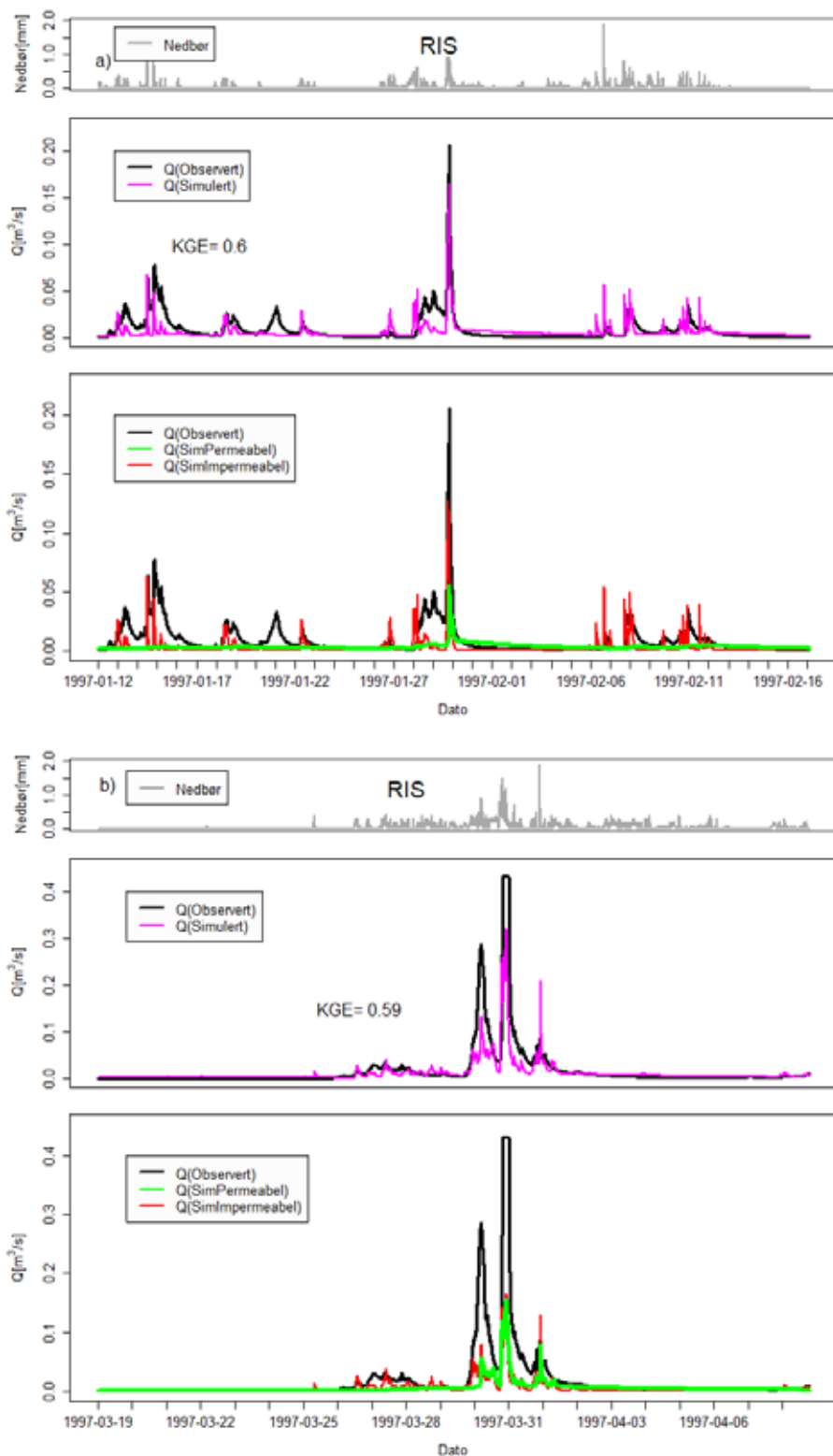
I Figur 5 ser vi at for vedvarende, men ikke nødvendigvis intens, nedbør for RIS, endrer avløpet fra P-arealer karakter og viser en hurtig respons

Tabell 3. KGE, bias, fordampning (*Ea*) og gjennomsnittlig bidrag av avløp fra P-arealer for RIS og GK. Tidsserier brukt til kalibrering er uthevet.

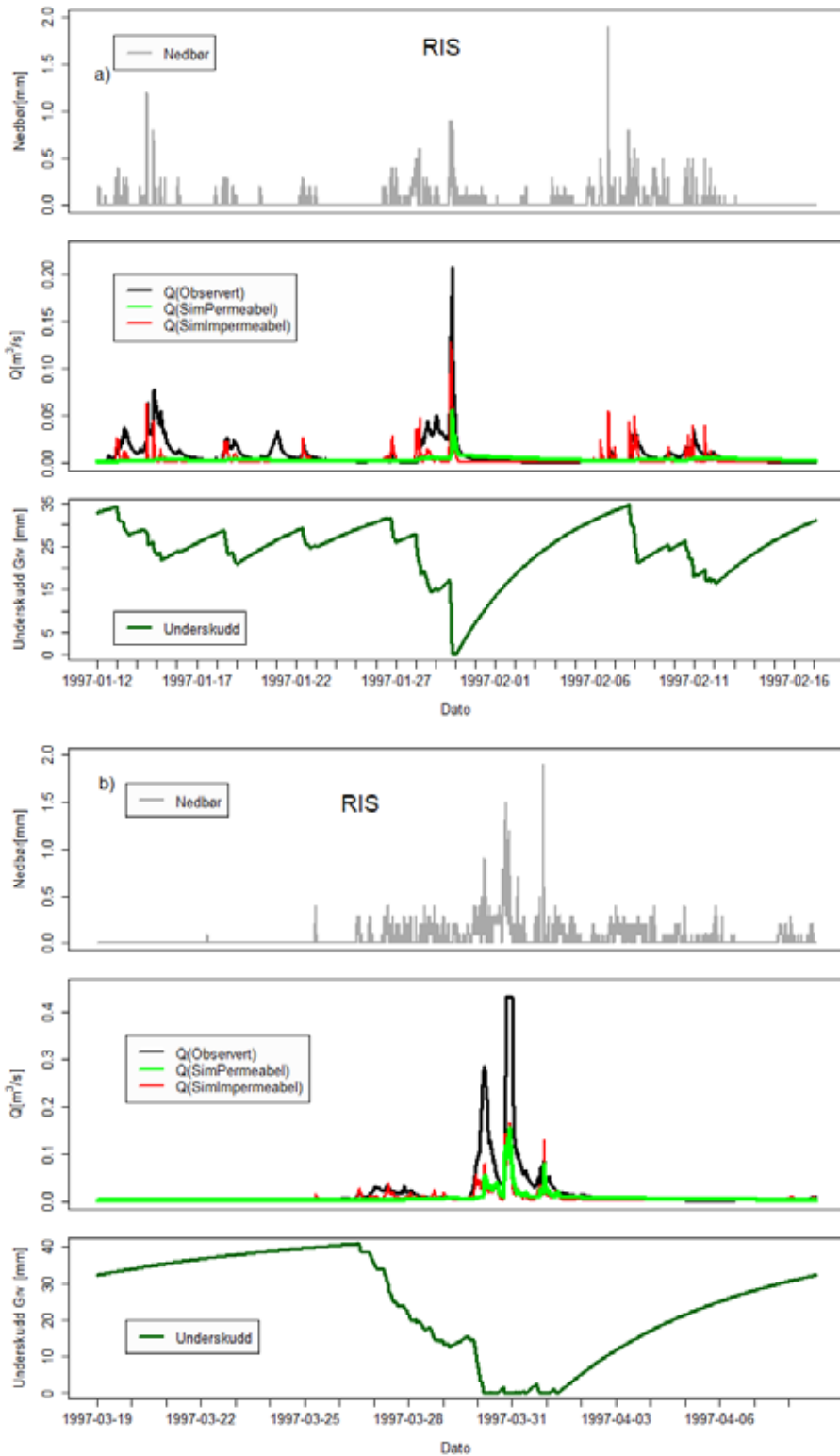
	Periode	KGE	Bias	Ea/Nedbør	Gjennomsnittlig bidrag til avløp fra P-arealer
RIS1	1993-1-1 00:00 – 1994-10-4 15:20	0.56	1.03	0.29	0.46
RIS2	1994-10-12 15:50 – 1997-7-25 18:50	0.62	1.05	0.21	0.48
RIS3	1997-7-28 11:00 – 1997-9-23 07:20	0.92	1.03	0.19	0.45
RIS4	1997-11-18 16:00 – 1998-8-31 23:50	0.6	0.86	0.30	0.45
GK1	2010-6-30 10:0 – 2010-8-31 23:50	0.69	1.04	0.42	0.57
GK2	2010-9-1 00:00 – 2010-11-15 12:20	0.81	0.90	0.16	0.70



Figur 4. Simulert og observert avløp ved GK a), og RIS b). Svart kurve, $Q(\text{Observert})$ er observert totalt avløp, mens magenta kurve $Q(\text{Simulert})$ er simulert total avløp. Grønn kurve, $Q(\text{SimPermeabel})$ er avløp fra P- arealer og rød kurve $Q(\text{SimImpermeabel})$ er avløp fra IP-arealer. Den horisontale streken i Figur 4 a er spillvann. RIS har intet spillvannsbidrag. KGE er beregnet for tidsperioden vist i plottene.



Figur 5. Avløp og mettet overflate avrenning fra P-arealer for RIS januar, 1997 a) og mars, 1997, b).

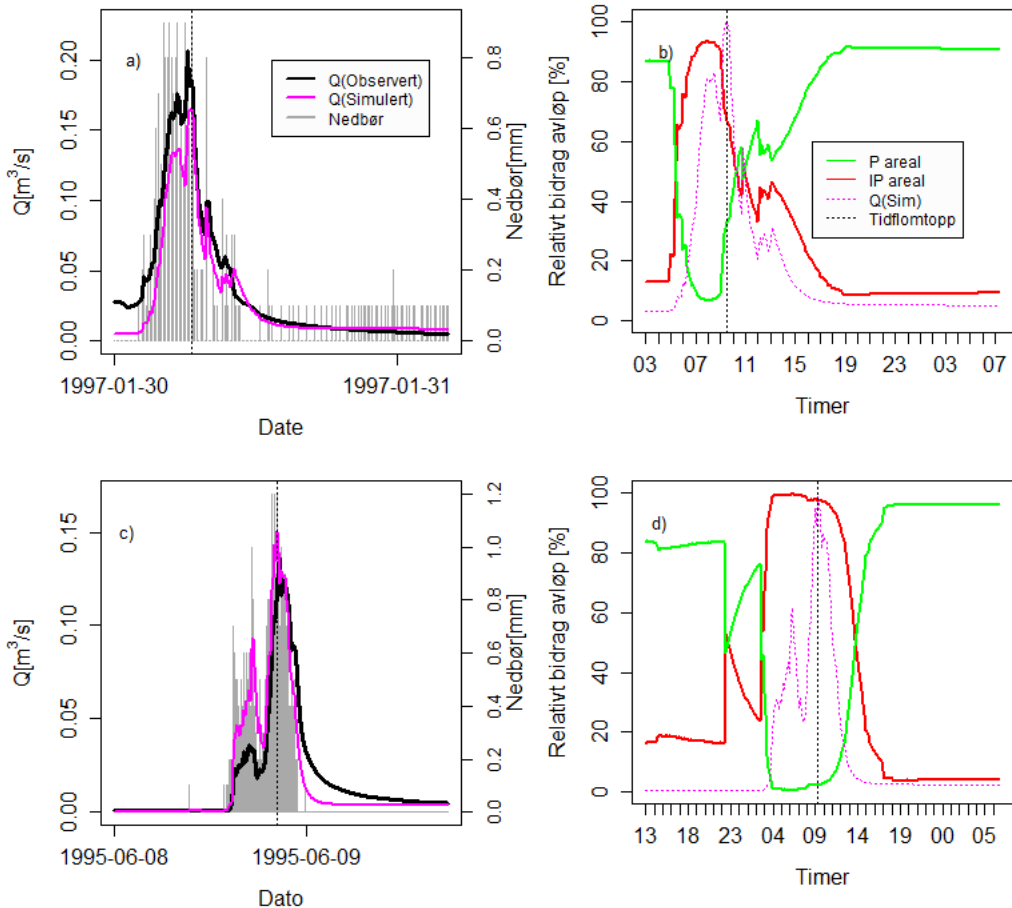


Figur 6. Avløp, mettet overflate avrenning og grunnvannsunderskudd ved RIS a) januar 1997 og b) mars, 1997.

(30 januar, 1997, Figur 5 a, og 30 mars 1997, Figur 5 b).

I Figur 6 har vi plottet grunnvannsmagasinetts underskudd for samme tidsperiode som i Figur 5. Vi kan se at den simulerte hurtige responsen skyldes at underskuddet blir null, dvs. at grunnvannsmagasinet er mettet og nedbør går til elvenettverket som relativt hurtig overflateavrenning. Flomtoppen i slutten av mars er den høyeste observerte for RIS i perioden 1993-98. Selv om flomtoppen ikke er spesielt godt simulert, ser vi at avløp fra IP-arealer alene ikke er tilstrekkelig for å forklare en så høy observert vannføring. Rask vannføring fra andre områder (P-arealer) må ha kommet i tillegg som mettet overflateavrenning (Dunne og Black, 1970).

Figur 7 viser nedbør og hydrogram sammen med det relative bidraget til det totale avløp fra P- og IP arealer for to hendelser ved RIS (30 januar, 1997, a, b, og 8 juni, 1995, c, d). Figur 7 b viser at bidraget fra P-arealer til første flomtopp er mellom 30-40 % og nesten 60 % av den neste flomtoppen, mens Figur 7 d viser at bidraget fra P-arealer for denne hendelsen er svært beskjedent selv om forskjell i nivå av flomtopp for de to hendelsene ikke er så forskjellig. Resultatene viser at flomgenererende prosesser for urbane områder må inkludere overflate avrenning fra permeable flater og at modeller må inkludere grunnvannsprosesser for å kunne simulere feltets metningsdynamikk.



Figur 7. Relativt bidrag av avløp fra P- og IP arealer for to hendelser ved RIS, 30 januar, 1997 (a, b) og 8 juni, 1995, (c, d).

Tabell 4. Kalibrerte verdier av *Gsh* og *Gsc* med korresponderende midlere grunnvannshastigheter

	<i>Gsh</i>	<i>Gsc</i>	Pmid [m] (se Tabell 2)	Midlere hastighet [m/s]
GK	2.23	0.00029	47.0	5.1*10 ⁻⁵
RIS	2.97	0.00026	31.0	4.0*10 ⁻⁵

Kalibrerte grunnvannshastigheter

Tabell 4 viser kalibrerte verdier av *Gsh* og *Gsc* sammen med korresponderende estimater av midlere grunnvannshastigheter (se Skaugen et al, 2020).

De kalibrerte gjennomsnittshastighetene for GK og RIS er ganske like og nære verdier av mettet hydraulisk konduktivitet målt av Solheim (2017) for GK og Muthanna et al. (2018), selv om verdiene til Muthanna et al. (2018) varierer mye (dvs. med en størrelsesorden $1.5 \cdot 10^{-6} - 5.5 \cdot 10^{-5}$ m/s). Resultatene antyder at med gode målinger av mettet hydraulisk konduktivitet kan vi få et estimat av midlere grunnvannshastighet som vil gjøre DDDUrban mindre avhengig av målt avløp med tilhørende kalibrering.

Diskusjon

Som nevnt i introduksjonen er det et behov for urbanhydrologiske simulering for områder med lite data. I denne sammenheng er det interessant at den kalibrerte grunnvannshastigheten denne studien (gjennom parameterne i hastighetsfordelingen, *Gsh* og *Gsc*) er såpass lik den mettede hydrauliske konduktiviteten man kan måle gjennom infiltrasjonsforsøk. Dette er lovende med hensyn på å anvende modellen til hydrologiske analyser for urbane områder uten vannføringsdata, men hvor man relativt enkelt kan foreta infiltrasjonsforsøk.

Den enkle analysen over reisetider for forskjellige urbanhydrologiske prosesser ble utført for å finne ut hvilke prosesser som, gitt modellens tidsoppløsning, har en respons over tid og som faktisk er med på å forme hydrogrammet (se Tabell 1 og Figur 3). Analysen viser at infiltrasjon og vanntransport i rør er svært raske prosesser som ikke blir fanget opp av modellens tidsoppløsning og da heller ikke bidrar til å beskrive nedbørsfeltets respons på nedbør.

Analysen viser at den urbanhydrologiske dynamikken i stor grad er bestemt av vanntransport over og under overflater og at ganske enkle beskrivelser av vanntransport i rør er tilstrekkelig.

Mettet overflateavrenning fremstår som en viktig flomgenererende prosess også for urbane områder, og belyser viktigheten av å beskrive grunnvannsdynamikken i urbanhydrologiske modeller. De to eksemplene i figur 5 og 6 viser at avløp kun fra tette flater ikke er tilstrekkelig for å beskrive flomtopper, og at en annen kilde til rask avrenning er nødvendig. I DDDUrban er denne raske avrenningen overflate avrenning fra mettede permeable flater. Dette virker som et realistisk scenario for denne typen omgivelser og gir tillit til hvordan DDDUrban er bygget opp, dvs. at kalibrerte hastighetene bestemmer grunnvannskapasiteten som igjen bestemmer når mettet overflateavløp skal genereres. Andre urbanhydrologiske modeller, som for eksempel SWMM, kan ha forskjellige infiltrasjonsmodeller (Green-Ampt eller Horton, se Rossmann and Huber, 2016) slik at flom som følge av overskridelse av infiltrasjonskapasitet kan modelleres. Fra resultatene i denne studien, for de valgte studieområdene, finner vi at ekstreme nedbørsintensiteter er nødvendig for at en slik prosess skal finne sted og at mettet overflateavrenning er en viktigere flomgenererende prosess.

DDDUrban simuleringene viser at alt vann som faller over de to nedbørsfeltene finner vi igjen ved målestedet eller fordamper. Vannbalansen for GK er usikker gitt usikkert vannforbruk, men vannbalansen ved RIS virker rimelig og summen av simulert og observert avløp er nesten identisk for tre av fire tidsserier. Ingen korreksjon av nedbøren er utført, og fordampningsrutinen har ingen kalibrerte parametere og simulerte fordampningsverdier er verifisert fra en uavhengig modellingsstudie

(Huang et al, 2019). At alt vannet som ikke har fordampet finner sin vei til rørene, indikerer at grunnvannstrøm kommer inn i rørene gjennom sprekker og sannsynligvis fra bygningers dreneringssystemer. Disse er ofte tilknyttet felles avløp eller overvannssystemer. Hensikten til felles-avløps ledninger er å transportere spillvann og avrenning fra tette flater til vannbehandlingsanlegg. Infiltrert vann skal, i prinsippet, ikke utfordre kapasiteten til disse anleggene. At vann infiltrert på permeable flater også finner veien til ledningene med et volum tilsvarende andel av permeable flater, indikerer at grunnvann er en signifikant del av det urbane vannbudsjetten og at avrenningssystemer (elver) må planlegges også i urbane områder.

Konklusjoner

En nedbør-avløps modell for urbane områder med få parametere som krever kalibrering er utviklet. Målet med modellen er å evaluere og kvantifisere de viktigste urbanhydrologiske prosessene.

Studien viser at infiltrert vann (grunnvannsstrøm) utgjør, i gjennomsnitt, en andel av den totale avrenningen som tilsvarer andelen permeabel overflate. I tillegg viser studien at avrenning fra de permeable arealene, ved mettet tilstand, bidrar til flomtoppen med 40-60%.

Fordampning er en viktig del av det urbane vannbudsjetten, og estimater for årlig middel fra DDDUrban for RIS korresponderer bra med årlig langstidsmiddel beregnet av Huang et al. (2019).

Validering av DDDUrban er akseptabel med KGE verdier mellom 0.56-0.69.

De fleste av DDDUrban's parametere er avledet fra en DTM ved hjelp av GIS, eller fra litteraturen. Kun to parametere, som beskriver hastighetsfordelingen av grunnvannstrøm som funksjon av fuktighet, er kalibrert. De kalibrerte hastighetene samsvarer godt med målte verdier av mettet hydraulisk konduktivitet. Dette er lovende resultater med hensyn til å bruke modellen for urbane nedbørsfelt uten vannføringsmålinger.

Takk

Denne studien er en leveranse til "Sustainable Urban Flood management- modelling, mitigation and predicting urban and semi-urban flooding" (SURF) prosjektet, 281022, finansiert av Norges Forskningsråd, Finans Norge, Norsk Vann og Statens Vegvesen.

Referanser

- Bayazit, M., 2015. Nonstationarity of Hydrological Records and Recent Trends in Trend Analysis: A State-of-the-art Review. *Environ. Process.* 2:527-542, DOI 10.1007/s40710-015-0081-7
- Belhadji N, C. Joannis og G. Raimbault, 1995. Modelling of rainfall induced infiltration into separate sewerage. *Water Sci Technol* 1995;32:161-8.
- Berthier, E., Andrieu, H., Creutin, J.D., 2004. The role of soil in the generation of urban runoff: development and evaluation of a 2D model. *J. Hydrol.* 299, 252-266. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.008>.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., Savenije, H., 2013. *Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales.* Cambridge University Press, Cambridge.
- Broekhuizen, I., Muthanna, T., Leonard, G., Viklander, M., 2019. Urban drainage models for green areas: structural differences and their effects on simulated runoff. *J. Hydrol.* 5. <https://doi.org/10.1016/j.jhydroa.2019.100044>.
- Dalen, E., B.L Ree, A Vatne og F. Wenger, 2016. NVE sitt urbanstasjonsnettverk, Rapport, 50 2016, ISBN: 978-82-410-1503-8, ISSN:1501-2832.
- DHI, 2017. MOUSE Rainfall Dependent Inflow and Infiltration (MOUSE RDII), URL: <https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Cities/MOUSER-DIIRreference.pdf> (accessed 21.02.2020)
- Dunne, T. og R.D. Black, 1970. Partial area contribution to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resour. Res.* 6, 5, 1296-1311.
- Ehlschlaeger, C. R., 1989. Using the AT search algorithm to develop hydrologic models from digital elevation data. *Proceedings of the international geographic information system (IGIS) symposium, Baltimore, MD USA.*
- Elliott A. H., S. A. Trowsdale, 2007. A review of models for low impact urban stormwater drainage, *Environmental Modelling & Software* 22, 394-405, doi: 10.1016/j.envsoft.2005.12.005

- Fletcher, T.D., H. Andrieu og P. Hamel, 2013. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources* 51,261-279, doi:10.1016/j.advwatres.2012.09.001
- Grimaldi, S., Petroselli, A., 2014. Do we still need the Rational Formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins. *Hydrological Sciences Journal* 67-77. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.880546>.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., og Martinez, G. F.: Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, *J. Hydrol.*, 377, 80-91, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003, 2009.
- Hailegeorgis, T.T. og K. Alfredeisen, 2018. High spatial-temporal resolution and integrated surface and subsurface precipitation-runoff modelling for a small stormwater catchment. *Journal of Hydrology*, 557,613-630. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.12.054.
- Hanssen-Bauer, I., E.J. Førland, I. Haddeland, H. Hisdal, S. Mayer, A. Nesje, J.E. Ø. Nilsen, S. Sandven, A.B. Sandø, A. Sorteberg og B. Ådlandsvik, 2017: Climate in Norway 2100 – a knowledge base for climate adaptation. Norwegian Centre for Climate Services, Report 1/2017 48pp. ISSN: 2387-3027 (<https://cms.met.no/site/2/klimate-servicesenteret/rappporter-og-publikasjoner/attachment/11592?ts=15c10419731>) (accessed 26.03.2020)
- Holden, J., M.K. Kirkby, S.N. Lane, D.G. Milledge, C.J. Brookes, V. Holden and A.T. McDonald, 2008. Overland flow velocity and roughness properties in peatlands. *Water Resources Research*, 44, W064415, Doi:10.1029/2007WR006052
- Holmgren, P. 1994. Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: an empirical evaluation. *Hydrological processes* 8, 4, 327-334.
- Huang, S. S. Eisner, J. O. Magnusson, C. Lussana, X. Yang og S. Beldring, 2019. Improvements of the spatially distributed hydrological modelling using the HBV model at 1 km resolution for Norway, *Journal of Hydrology* 577. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.051>
- Kling, H., Fuchs, M. og Paulin, M. 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *J. Hydrol.* 424, 264-277. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.01.011.
- MIKE, 2020. MIKE URBAN, Collection system-Modelling of storm water drainage network and sewer collection system. URL: <https://manuals.mike-poweredbydhi.help//2020/Cities/CollectionSystem.pdf> (accessed 21.02.2020).
- Muthanna, T.M., E. Sivertsen, D. Klierer og L. Jotta, 2018. Coupling field observations and Geographical Information System(GIS)-based analysis for improved Sustainable urban Drainage Systems (SUDS) performance, *Sustainability*, 10, 4683; doi:103390/su10124683.
- NOU, 2015. Overvann I byer og tettsteder, <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2015-16/id2465332/>
- Ramier, D., E. Berthier og H. Andrieu, 2011. The hydrological behaviour of urban streets: long-term observations and modelling of runoff losses and rainfall-runoff transformation. *Hydrological Processes*, 25, 2161-2178.
- Rossmann, L. A. og W.C. Huber, 2016. Storm Water Management Model- Reference manual volume I- Hydrology (revised), EPA/600/R-15/162A. URL <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> (accessed 21.02.2020)
- Salvadore, E., J. Bronders og O. Batelaan, 2015. Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology*, 529, 62-81, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.028>
- Sedyowati, L., S. Suhardjono, E. Suhartanto and M. Sholochin, 2017. Runoff velocity behaviour on smooth pavement and paving blocks surfaces measured by a tilted plot. *Journal of water and land development*, 33 (IV-VI): 149-156, PL ISSN 1429-7426.
- Skaugen T. og C. Onof, 2014. A rainfall runoff model parameterized from GIS and runoff data. *Hydrol. Process.* 28, 4529-4542, DOI:10.1002/hyp.9968
- Skaugen, T., I. O. Peerebom og A. Nilsson, 2015. Use of a parsimonious rainfall-runoff model for predicting hydrological response in ungauged basins. *Hydrol. Process.* 29, 1999-2013, DOI:10.1002/hyp.10315.
- Skaugen, T. og Z. Mengistu, 2016. Estimating catchment scale groundwater dynamics from recession analysis-enhanced constraining of hydrological models. *Hydrol. Earth. Syst. Sci.* 20, 4963-4981, doi: 10.5194/hess-20-4963-2016.
- Skaugen, T. og I. H. Weltzien, 2016. A model for the spatial distribution of snow water equivalent parameterised from the spatial variability of precipitation, *The Cryosphere*. 10, 1947-1963, doi:10.5194/tc-10_1947_2016.
- Skaugen, T., H. Luijting, T. Saloranta, D. Vikhamar-Schuler og K. Müller, 2018. In search of operational snow model structures for the future - comparing four snowmodels for 17 catchments in Norway. *Hydrology Research*, 49,6, <https://doi.org/10.2166/nh.2018.198>

Skaugen, T. D. Lawrence og R. Z. Ortega, 2020. A parameter parsimonious approach for catchment scale urban hydrology – Which processes are important?. *Journal of Hydrology X*, 8, <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2020.100060>

Solheim, E.B., 2017. Infiltrasjon for lokal overvannsdiskosponering (LOD) (Infiltration for sustainable urban drainage systems (SUDS)), Master thesis at the Norwegian University for life sciences (NMBU), (in Norwegian), <http://hdl.handle.net/11250/2443302>.

Tsegaw, A.T, K. Alfredsen, T Skaugen og T. M. Muthanna. 2019. Predicting hourly flows at ungauged small rural catchments using a parsimonious hydrological model. *J. of Hydrol.* <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.090>.