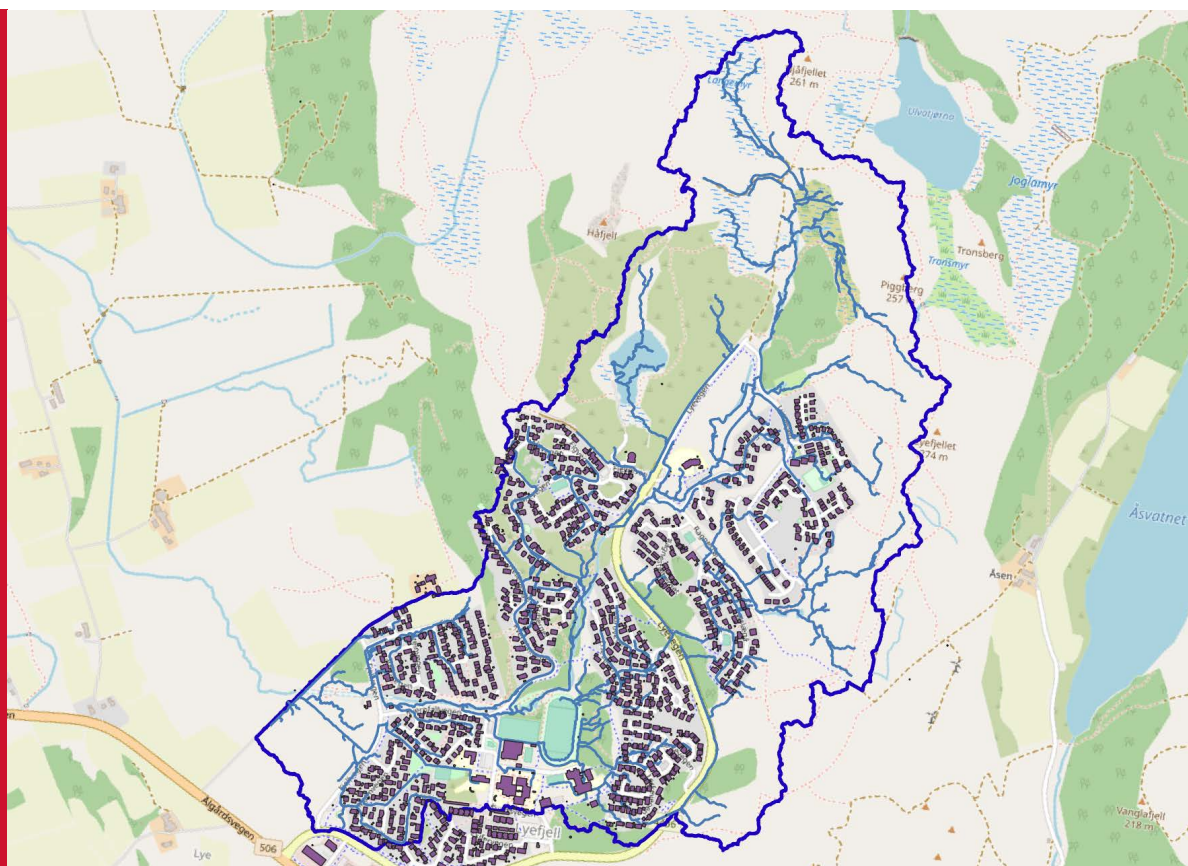


Karakteristiske tidsparametere for hydrologisk respons i urbane og naturlige nedbørfelt

Thomas Skaugen



NVE Rapport nr. 25/2020

Karakteristiske tidsparmetre for hydrologisk respons i urbane og naturlige nedbørsfelt

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat
Forfatter: Thomas Skaugen
Forsidefoto: Thomas Skaugen/NVE

ISBN: 978-82-410-2237-1
ISSN: 1501-2832
Trykk: NVEs hustrykkeri
Opplag: 50
Saksnummer: GD22-21689

Sammendrag: Ved å vurdere reisetidsfordelinger, dvs hvordan avløp fra en nedbørshendelse fordeles i tid, kan vi angi en karakteristisk varighet for nedbørhendelser som bør ligge til grunn for ekstremverdianalyse og dimensjonering. I tillegg kan det vurderes hvilken tidsoppløsning som er nødvendig for å gi en tilstrekkelig detaljert beskrivelse av avrenningen. I denne rapporten beskriver vi hvordan transporttid i elvenettverket blir bestemmende for karakteristisk varighet av input (nedbør), og vi beskriver hvordan tidsoppløsningen på avrenningssimuleringer bestemmer hva som er tilstrekkelig detaljeringsgrad for en gitt nedbørfeltstørrelse og midlere hastighet av avrenningsprosessene.

Emneord: Dimensjonerende varighet, konsentrasjonstid, tidsoppløsning for måling og modellering

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthuns gate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 22 95 95 95
E-post: nve@nve.no
Internett: www.nve.no

august, 2022

Innhold

Forord	4
Sammendrag.....	5
1 Introduksjon	6
2 Metode	8
3 Resultater	14
4 Diskusjon.....	17
5 Konklusjon	19
6 Referanser	20

Forord

NVE er gitt et ansvar for å bistå faglig inn mot kommunenes håndtering av overvannsproblemer. Dette innebærer også at NVE skal bygge opp egen kompetanse i urbanhydrologi. Blant temaer som har vært i fokus for FoU i denne sammenhengen er hydrologiske modellens egnethet i urbane områder, og det er utviklet en egen variant av modellen DDD for bruk i urbane strøk (DDDUrban). En slik modell setter oss i stand til å undersøke problemstillinger rundt forholdet mellom intensitet og varighet av nedbørshendelser. Videre kan man med en slik modell undersøke den hydrologiske responsen av kortvarige nedbørshendelser i små felt og som følge av feltets fuktighetstilstand før nedbørshendelse. Dette er problemstillinger som har stor praktisk betydning, blant annet fordi vi må vite hva slags nedbørshendelser som skal ligge til grunn for dimensjonering av overvannsinfrastruktur.

Rapporten som her foreligger, undersøker en del grunnleggende begreper og størrelser knyttet til hvor raskt en nedbørshendelse vil gi avløpsmaksimum ved utløpet, ofte betegnet som «konsentrasjonstid» i urbanhydrologi litteraturen. Videre svarer rapporten på hvor detaljert i tid, nedbør og avrenning må måles og modelleres, sett i forhold til størrelsen av feltet. Dette for at man både skal kunne fange opp og beskrive relevante dimensjonerende hendelser, men også for å gi nødvendige inngangsdata til modellering av vannføring i små felt.

Hege Hisdal
direktør
Hydrologisk avdeling

Ivar Berthling
seksjonssjef
Seksjon for hydrologisk modellering

Dokumentet sendes uten underskrift. Det er godkjent i henhold til interne rutiner.

Sammendrag

Ved å vurdere reisetidsfordelinger, dvs hvordan avløp fra en nedbørshendelse fordeles i tid, kan vi angi en karakteristisk varighet for nedbørhendelser som bør ligge til grunn for ekstremverdianalyse og dimensjonering. I tillegg kan det vurderes hvilken tidsoppløsning som er nødvendig for å gi en tilstrekkelig detaljert beskrivelse av avrenningen. For et urbant nedbørfelt beskriver vi tidskarakteristika for avrenningsprosesser fra tre landskapstyper: 1) avrenning fra permeable flater (P-areal), 2) avrenning fra ikke-permeable flater (IP-areal), og ruting av vannføringen i elvenettverket. Alle landskapstypene (P, IP og elvenettverket) har sine karakteristiske avstandsfordelinger og hastigheter, som kombinert gir reisetidsfordelinger. For et naturlig nedbørfelt har vi avrenning fra permeable flater (P-areal) og ruting av vannføringen i elvenettverket. I denne rapporten beskriver vi hvordan transporttid i elvenettverket blir bestemmende for karakteristisk varighet av input (nedbør), og vi beskriver hvordan tidsoppløsningen på avrenningssimuleringer bestemmer hva som er tilstrekkelig detaljeringsgrad for en gitt feltstørrelse og midlere hastighet av avrenningsprosessene.

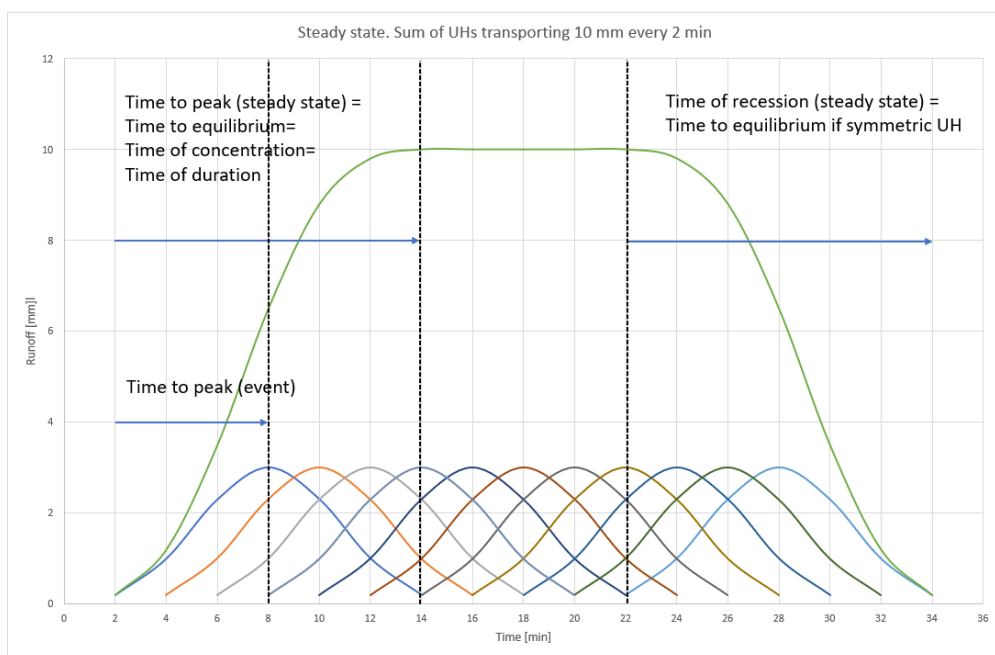
1 Introduksjon

Intuitivt har vi en forståelse av at størrelsen på et nedbørfelt har innflytelse på hvilken **tidsoppløsning**, ΔT det er hensiktsmessig å modellere hydrologien med. Det har lite for seg å modellere Glomma, med et nedbørfeltareal på over 40 000 km², med 10 minutters tidsoppløsning. Grunnen er at det ikke forventes noen vesentlig endring fra det ene 10 minutters intervallet til det neste. Likeledes har det lite for seg å bruke 24 timers oppløsning på målinger og simuleringene for et 0.1 km² stort urbant nedbørfelt. Intuitivt antas det at avrenningen fra tette flater og i rørsystemet er så rask at både nedbørshendelse og vannføringsrespons er over i løpet av 24 timers tidskrittet. Med tilstrekkelig tidsoppløsning vil vi få riktig målefrekvens og få simulert en vannføring som for praktiske formål er lik momentanvannføringen. Momentanvannføringene vil være det riktige utgangspunkt for hydrauliske vannlinjeberegninger for vurdering av skadepotensial, dimensjonering av rør, kulverter etc.

For dimensjoneringsformål er det viktig å vite hvilken **varighet**, T_D dimensjonerende inngangsdata skal ha. For ekstremnedbør vil intensiteten avta med økende varighet, for et gitt gjentakintervall, og vi ønsker å finne den varigheten (kritisk nedbørsvarighet) som tilsvarer høyest mulig nedbørsintensitet over lengst mulig tid. Er varigheten for lang får vi en likevektssituasjon (eng. steady state) med for lav nedbørsintensitet og for lav flomtopp. En likevektssituasjon har vi når, for hvert tidskritt, like mye vann kommer inn som det som renner ut. Er varigheten for kort får vi ikke nedbør i hele tidsrommet tilgjengelig (konsentrasjonstiden) for å skape høyest mulig flomtopp. Gericke og Plessis (2011) setter likhetstegn mellom kritisk nedbørsvarighet for nedbørfeltet og konsentrasjonstid (eng. time of concentration), T_C .

Konsentrasjonstid er et sentralt begrep og er ofte brukt for å beskrive den temporale sammenhengen mellom et nedbørstilfelle og den hydrologiske respons. T_C er noen steder definert som «den nødvendige tiden det tar for avløp, skapt av effektiv blokknedbør, til å bidra til flomtoppen ved feltets utløp» (Gericke og Smithers, 2014; Gericke og Plessis, 2011). Effektiv nedbør er den delen av nedbøren som går til avrenning og som ikke blir holdt igjen i umettet sone. Dessverre finnes det mange, og relativt forskjellige, definisjoner av T_C (se for eksempel Gericke og Smithers, 2014 og Dingman, 2002, p.400). Den mest kjente definisjonen av T_C er den tiden en vannpartikkel tar fra ytterst i feltet til feltets utløp (Vassdragshåndboka, 2010, p 52; Stenius og Glad, 2015). Denne definisjonen bygger på Glossary of Hydrology (WMO, 1974): «the period of time required for storm runoff to flow from the most remote part of a drainage basin to the outlet», (se Beven, 2020). Det er ikke enkelt å umiddelbart se det praktiske i en slik definisjon, og i litteraturen finner vi ganske forskjellige tolkninger. Dingman (2002, p. 400) definerer T_C til tiden det tar fra hydrogrammets topp til resesjonen er ferdig og vannføringen er på samme nivå som forut for hendelsen. Gericke og Smithers (2014) derimot, betegner T_C som tiden det tar til flomtopp er nådd (eng. time to peak, T_P , $T_C \approx T_P$). Beven (2020) fremholder at definisjonen gitt av WMO reflekterer en fundamental misoppfatning av hydrologiske prosesser og misforståelsen har vært en del av hydrologiens historie i mer enn 100 år. Problemet er hvor og med hvilken hastighet en vannpartikkel forflytter seg, over og under bakken og i selve elvenettverket. I tillegg er det et problem at målt hydrologisk

respons mer er et resultat av energipulser enn av vannpartikler som forflytter seg (se McDonnell og Beven, 2014). Figur 1 forsøker å illustrere hvordan definisjonene til Dingman (2002) og Gericke og Smithers (2014) begge beskriver T_C kun hvis den hydrologiske responsen kan beskrives som å være i en likevektssituasjon. T_C blir da identiske med tid-til-likevekt, T_{eq} (eng. time to equilibrium) som i figur 1 er 12 minutter. Hydrogrammet (likevektshydrogrammet, grønn kurve) i figur 1 framkommer når vi summerer responsen av en nedbørspuls på 10 mm (en nedbørspuls kan forstås som momentan blokknedbør) som forekommer hvert andre minutt. Tiden til vi har nådd flomtopp for *likevektshydrogrammet* vil være lik T_{eq} ($= T_D = T_C$) og lik T_p i Gericke og Smithers (2014) men ikke T_p for *hydrogrammet til en enkelt regnhendelse*. Resesjonstiden for likevektshydrogrammet vil være lik T_C i Dingman (2002), kun hvis enhetshydrogrammet er perfekt symmetrisk. At definisjonene gir samme T_C forutsetter altså at 1) den hydrologiske responsen er en likevektssituasjon, og 2) at responsen til enhver puls er symmetrisk. Flere forfattere setter T_{eq} lik T_C (Eagleson, 1970; Beven, 1982; 2020; Wong, 2009) og i denne rapporten vil vi se at varigheten T_D (som altså er lik T_{eq} som igjen er lik T_C) er tiden det tar for hele avløpet skapt av en nedbørspuls å passere utløpet, dvs. tiden det tar for vannpartikkelen fra den ytterste delen av *elvenettverket* å nå utløpet.



Figur 1. Summen (grønn kurve) av hydrologisk respons for 10 mm nedbørspuls hvert andre minutt. Siste nedbørshendelse skjedde etter 22 minutter. Likevekt (steady state) oppnås etter $T_D = 12$ minutter.

For et nedbørfelt med hydrologisk respons tilsvarende den i figur 1, er T_D varigheten på nedbør som gir høyest avløp, dvs varigheten til dimensjonerende nedbør. Er varigheten lengre, vil ikke høyere avløp oppnås (vi får en likevektssituasjon), og er varigheten kortere, vil avløpet bli mindre siden en del av konsentrasjonstiden vil være uten nedbør.

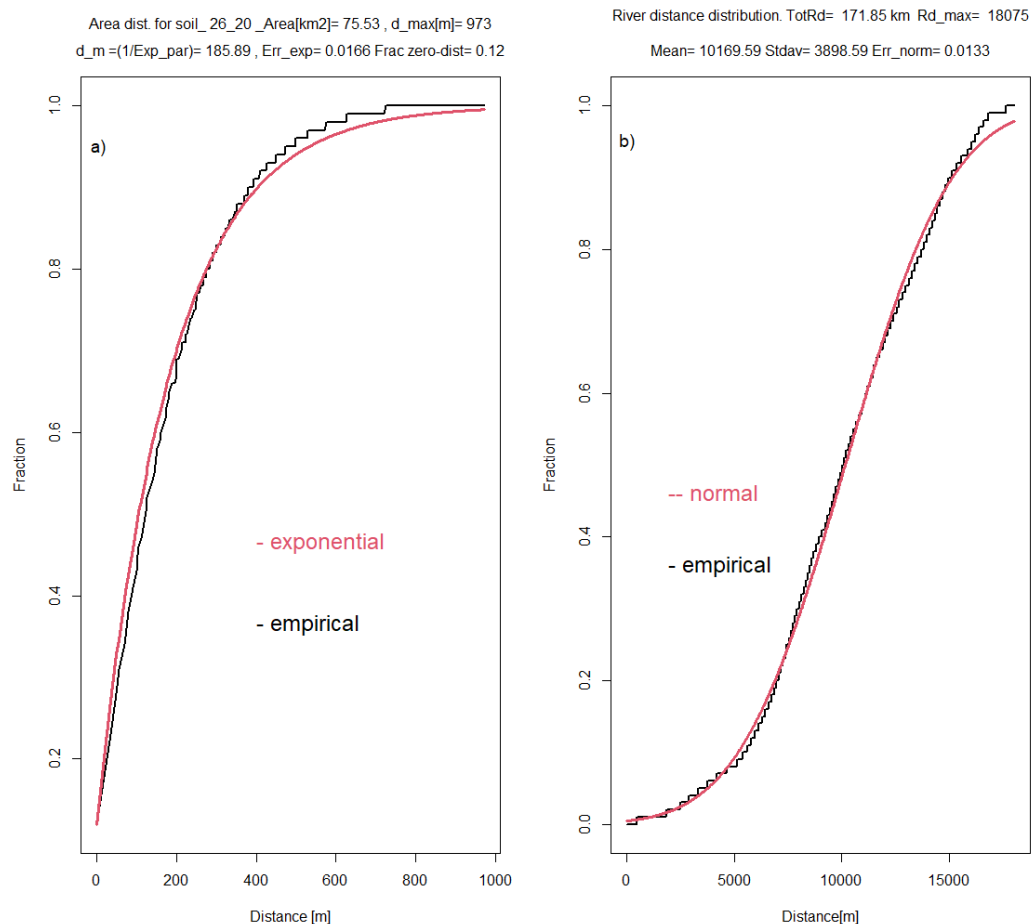
Dette betyr at T_D er en avgjørende parameter for å kunne beregne momentanflom, og også en parameter som varierer med nedbørsfeltets størrelse og elvenettverk. Vi mangler klare, kvantitative anbefalinger for varighet på inngangsdata, og nødvendig tidsoppløsning for hydrologisk dimensjonering og simulering. Denne rapporten vil forsøke å belyse varigheter og tidsoppløsning ut fra en analyse av 1) avstander vannet skal reise i skråninger (permeable- og ikke permeable flater) og i elvenettverk, 2) karakteristiske hastigheter for vanntransport i skråninger og i elvenettverk og 3) feltstørrelse.

2 Metode

En urbanhydrologisk modell (DDDUrban) og en hydrologisk modell for naturlige nedbørfelt (DDD) er satt opp og kalibrert for en rekke nedbørfelt i Norge (Skaugen og Onof, 2014; Skaugen et al. 2020). Parameterfilen for modellen inkluderer statistikk som beskriver avstand til – og i elvenettverket, og hastighetsestimater for avrenning over permeable flater (P-areal) og impermeable flater (IP-areal), og i elvenettverket.

For P og IP arealer er avstandsfordelingen (avstand mellom punkter i terrenget og elvenettverket) modellert som en eksponentiell fordeling. Parametere som brukes for å beskrive avstandsfordelingen er middel- og maksimumsavstand. Disse verdiene er beregnet som avstand til nærmeste elvestreng i elvenettverk, enten fra digitaliserte kart (ELVIS i NVE) eller fra et GIS-beregnet digitalt elvenettverk.

For selve elvenettverket finner vi fra GIS-baserte analyser at fordelingen av avstander mellom punkter i elvenettverket og utløpet kan tilpasses en normalfordeling. Parametere som brukes for å beskrive denne avstandsfordelingen er middel- og maksimumsavstand og standardavviket. Figur 2 viser empiriske og analytiske avstandsfordelinger for a) avstander fra terreng til elvenettverket og b) avstander i elvenettverket til utløp.



Figur 2. Empiriske (svart linje) og analytiske (rød linje) kumulative avstandsfordelinger for avstander fra terreng til elvenettverket a) og avstander i elvenettverket til utløp b) basert på GIS analyse av digitaliserte EN.

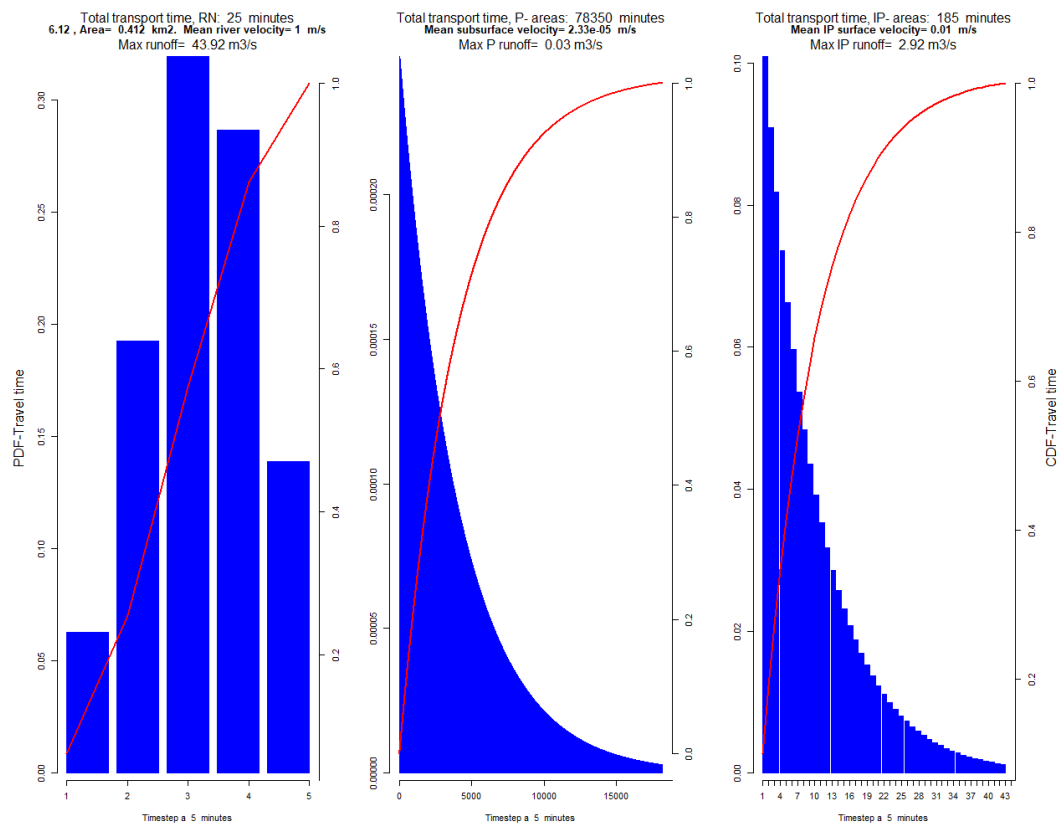
Hastighetsestimater for vanntransport for P-, og IP- arealer og i EN er kalibrert og/eller bestemt fra litteraturverdier, og karakteristiske verdier er gitt i tabell 1 (fra Skaugen et al, 2020).

Tabell 1. Karakteristiske hastigheter og avstander for arealtyper for to urbane nedbørfelt. Grefsen-Kjelsås i Oslo (GK) og Risvollan (RIS) i Trondheim (Fra Skaugen, et al. 2020).

Avløpstype	Hastighet [m/s]		Midlere avstand for prosess [m]		Midlere tidsskala [hrs]		Antall tidsskritt med 10 min tidsoppløsning		Kilde for hastighets- estimat
	GK	RIS	GK	RIS	GK	RIS	GK	RIS	
Overflateprosesser									
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)
Grunnvannsprosesser									
Infiltrasjon (høye verdier) og mettet hydraulisk konduktivitet (lave verdier)	5.3*10 ⁻³ - 5*10 ⁻⁵	5.3*10 ⁻³ - 3*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	Kalibrerte hastighetsprofiler for grunnvann, se Skaugen og Mengistu (2016). Hastigheten avtar med dybden.
Grunnvann Lag 2	8*10 ⁻⁵	6*10 ⁻⁵	47	31	165	137	991	820	
Grunnvann Lag 3	4*10 ⁻⁵	4*10 ⁻⁵	47	31	318	246	1910	1476	
Grunnvann Lag 4	1*10 ⁻⁵	1*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)

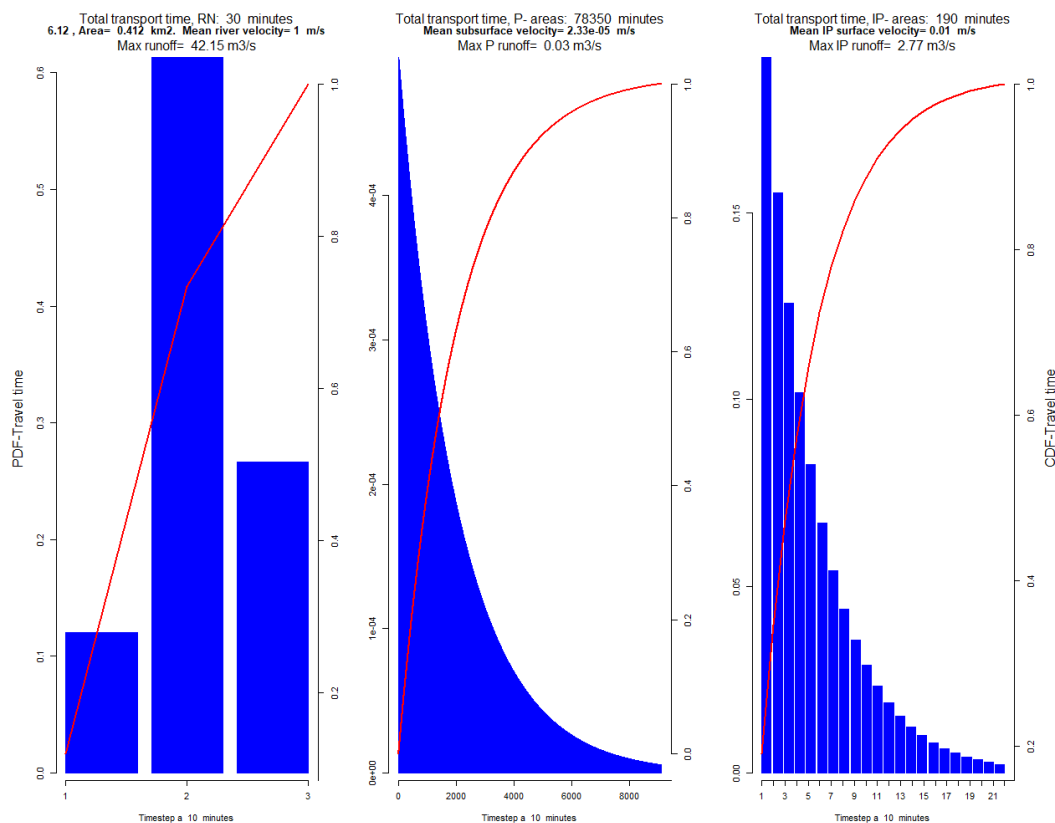
For naturlige felter er typiske kalibrerte gjennomsnittverdier for grunnvannstransport $1.0 \cdot 10^{-4}$ - $1.0 \cdot 10^{-5}$ m/s, og for hastighet i elv ca 1.0 m/s. Dette er verdier som i størrelsesorden virker rimelige, men det forekommer selvsagt lavere og høyere verdier enn dette i virkeligheten.

Basert på avstandsfordelinger og hastigheter er det beregnet reisetidsfordelinger for areal typer og elvenettverk i urbane og naturlige felt. En reistidsfordeling er det samme som et enhetshydrogram (UH), der verdien per tidskritt er fraksjonen av en nedbørspuls som renner ut av feltet. Figur 3 viser et eksempel på reisetider for urbanfeltet 6.12 Vestli, basert på en nedbørspuls på 100mm over feltet ved $t=0$, og tidsoppløsningen er satt til 5 minutter. Denne nedbørspulsen gir avrenning fordelt over tid på de forskjellige areal typene (P og IP) og i elvenettverket. Det er viktig å merke seg at siden avstandsfordelingene til P-arealer og IP-arealer er eksponentielle vil vannbidraget til elvenettverket fra en nedbørspuls fra disse områdene være størst i det første tidskrittet. Dette fordi det største arealet befinner seg nærmest elvenettverket og vannet herfra havner først i elven (se figur 2 og i Skaugen og Onof, 2014). Transporten videre i elvenettverket bestemmer maksvannføringen ved utløpet (den dimensjonerende verdien) og når den inntreffer. Vanntransporten i elvenettverket er altså nøkkelen til å forstå nedbørfeltets karakteristiske **varighet**, T_D , og hva som er tilstrekkelig **tidsoppløsning** ΔT . Tidsoppløsningen må gi tilstrekkelig høy detaljeringsgrad på observasjoner og simuleringer slik at vi har en realistisk verdi for estimert momentanvannføring.

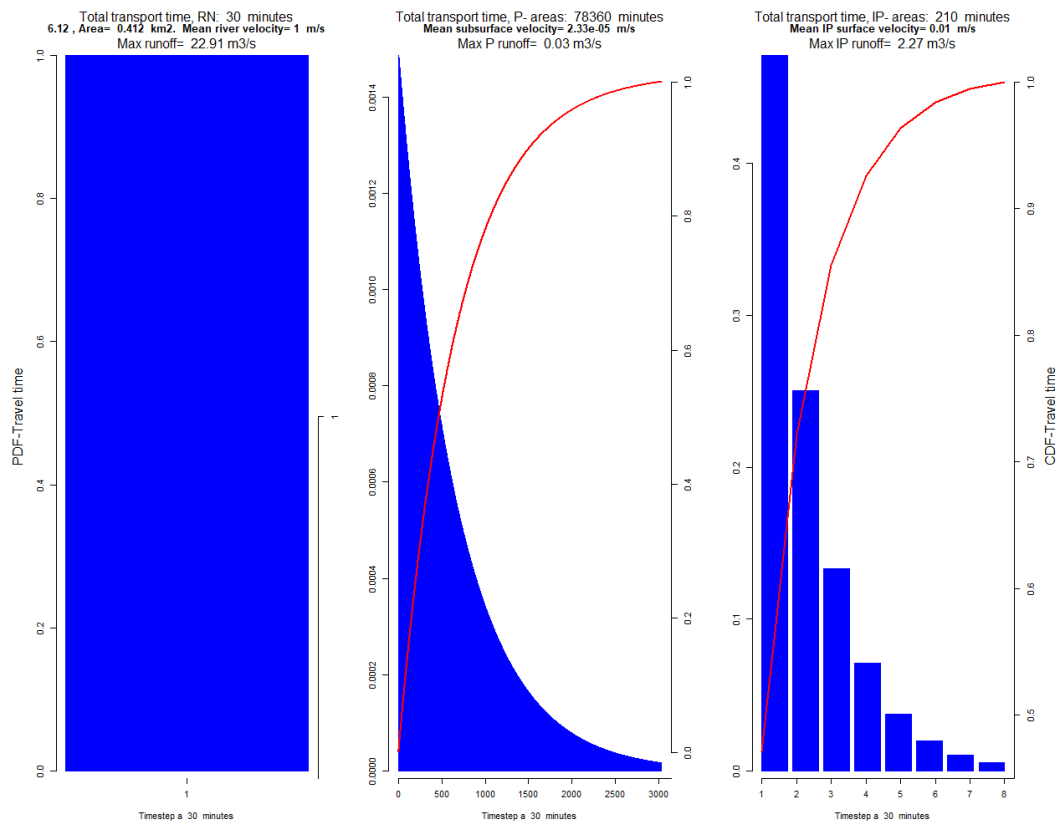


Figur 3 Reisetidsfordelinger for 6.12 Vestli, 5 minutters tidsoppløsning. Reisetidsfordeling i elvenettverket (til venstre), til P-arealer (i midten) og for IP-arealer (til høyre). Blå søyler viser histogram av reisetidsfordeling (fraksjon per tidskritt), og rød linje viser kumulativ reisetidsfordeling.

Figur 3 viser at med avstandsstatistikk for hhv elvenettverk, P-arealer og IP-arealer og med vannhastigheter som antydnet i overskriften på de forskjellige panelene i figur 3, vil varighet på transport i elvenettverket være 25 minutter, for P-arealer 138 dager (grunnvannstrømning) og for IP arealer (kun overflateavrenning) 3 timer. Figur 4 og 5 viser også reisetider for urbanfeltet 6.12 Vestli, men med tidsoppløsningene 10 og 30 minutter.



Figur 4 Reisetidsfordelinger for 6.12 Vestli, 10 minutters tidsoppløsning. Reisetidsfordeling i elvenettverket (til venstre), til P-arealer (i midten) og for IP-arealer (til høyre). Blå søyler viser histogram av reisetidsfordeling (fraksjon per tidskritt), og rød linje viser kumulativ reisetidsfordeling.



Figur 5 Reisetidsfordelinger for 6.12 Vestli, 30 minutters tidsoppløsning. Reisetidsfordeling i elvenettverket (til venstre), til P-arealer (i midten) og for IP-arealer (til høyre). Blå søyler viser histogram av reisetidsfordeling (fraksjon per tidsskritt), og rød linje viser kumulativ reisetidsfordeling.

Vi ser at med tidsoppløsning på 30 minutter har vi ikke en transport fordelt i tid for elvenettverket. En konsekvens av dette er at simulert maksverdi blir redusert fra ca. 42 m³/s til 22 m³/s. Det er imidlertid ikke stor forskjell i simulert maksverdi for transport i elvenettverket for 5 og 10 minutter, *noe som antyder at 10 minutter er en tilstrekkelig tidsoppløsning* for dette feltet da finere tidsoppløsning ikke vil gi flere detaljer. Simulerte maksverdier for P- og IP- arealer er ikke sensitive for valgt tidsoppløsning, da vanntransporten for disse arealtypene fordeles over veldig mange tidsskritt. Vi ser videre (i tittel på panel til venstre i figurene 3-5) at varigheten for transport i elvenettverket ikke varierer vesentlig for de forskjellige tidsoppløsningene, og *gjennom denne analysen kan vi også få et estimat av feltets karakteristiske varighet T_D* .

3 Resultater

I dette kapittelet vil vi estimere varighet, T_D og tidsoppløsning, ΔT for urbane og naturlige felt. Vi ønsker å se hvordan størrelsene T_D og ΔT varierer med nedbørfeltstørrelse, og konfigurasjon av elvenettverk. Med konfigurasjon mener vi variabiliteten av avstander i elvenettverket, målt med variasjonskoeffisienten

$EN_{CV} = EN_{std}/EN_m$, hvor EN_m og EN_{std} er henholdsvis middelværdi og standardavvik av avstandene i elvenettverket. I tillegg vil vi, for naturlige felt hvor elvenettverket er beregnet fra GIS, se hvordan forskjellig tetthet av elvenettverk påvirker T_D og ΔT . T_D er hele multipler av ΔT slik at valg av ΔT påvirker T_D . Optimal ΔT er valgt som den tidsoppløsning som gir tilstrekkelig detaljeringsgrad målt ved at maksimalavrenningen ikke øker mer enn 10% når ΔT reduseres ytterligere.

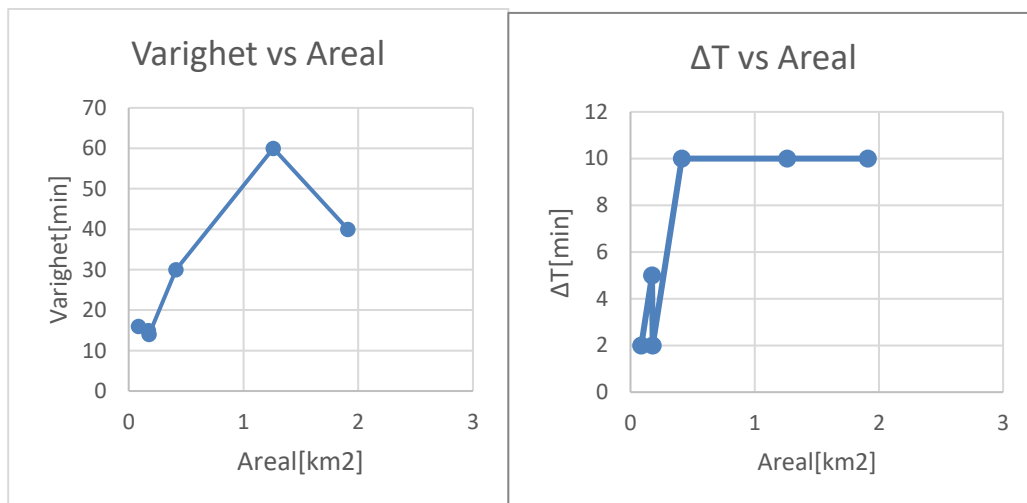
I tabell 1 har vi også estimert konsentrasjonstid (varighet) ved hjelp av et mye brukt formelverk gitt av Berg, et al (1992):

$$T_D = 0.02 L_F^{1.15} \Delta h^{-0.39}$$

hvor L_F er feltlengde [m] (i utregningen er maksimal avstand i elvenettverket brukt) og Δh er høydeforskjell i feltet.

Tabell 1. T_D og ΔT (i minutter) for noen urbanfelter sortert etter feltstørrelse. Elvenettverket er beregnet vha GIS.

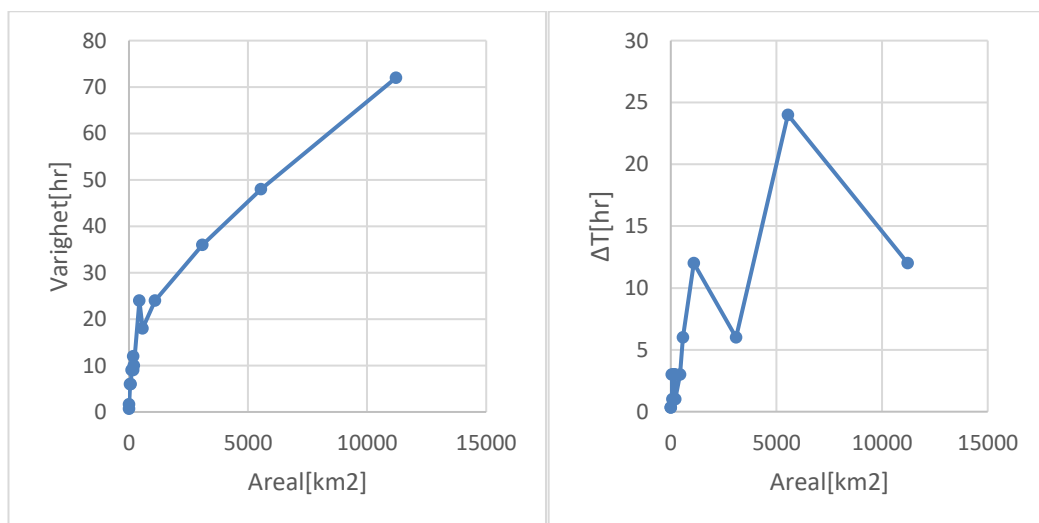
Stasjon	T_D [min]	T_D [min] Berg et al, 1992	ΔT [min]	Areal [km ²]	EN_m [m]	EN_std [m]	EN_CV	EN_max [m]
56.1	16	14	2	0.087	436	275	0.6	929
5.17	15	11	5	0.17	246	147	0.6	608
123.38	14	16	2	0.18	142	77	0.54	1238
6.12	30	15	10	0.41	697	382	0.6	1448
2.2001	60	33	10	1.26	1628	733	0.45	3329
28.11	40	17	10	1.91	1076	486	0.45	2027



Figur 6 Varighet (venstre) og tidsoppløsning (høyre) plottet mot areal for urbanfelter.

Tabell 2. T_D og ΔT (i timer) for noen naturlige nedbørfelt sortert etter feltstørrelse. Elvenettverket er fra ELVIS, ikke beregnet fra GIS.

Stasjon	T_D [hr]	ΔT [hr]	Areal [km ²]	EN_m [m]	EN_std [m]	EN_CV	EN_max [m]
55.5	0.66	0.33	3.31	1103	573	0.52	2300
8.6	1.66	0.33	6.33	2504	1205	0.48	4975
55.4	6	3	50	10774	4936	0.46	19125
26.20	6	1	77	10171	3893	0.38	18075
2.11	9	3	119	9994	6881	0.68	22475
2.634	9	3	183	14673	8749	0.6	31475
27.24	12	3-6	185	18669	8078	0.43	35575
133.7	10	1	207	16307	8817	0.54	32825
2.279	24	3	432	31060	19443	0.63	67575
12.70	18	6	570	26480	14966	0.57	62350
62.5	24	12	1092	38189	19373	0.51	73650
122.9	36	6	3085	67866	25764	0.38	122050
212.10	48	24	5544	85502	41193	0.48	161325
2.145	72	12	11213	138374	57052	0.41	240200



Figur 7 Varighet (venstre) og tidsoppløsning (høyre) plottet mot areal for naturlige nedbørfelter.

I figur 7 kan man se en struktur på sammenhengen mellom varighet og areal og i noen grad mellom tidsoppløsning og areal. Denne strukturen er mindre synlig for urbanfeltene i figur 6. Fra tabell 2 er det vanskelig å se at EN_CV, vårt mål for elvenettets konfigurasjon, er relatert til areal, tidsoppløsning eller varighet.

4 Diskusjon

Riktig varighet for et dimensjonerende nedbørstilfelle er kritisk for å finne den nedbørsintensitet som maksimerer hydrologisk respons. I denne studien viser vi at det er tidsbruk forbundet med vanntransport i elvenettverket som 1) bestemmer hva som er nedbørfeltets karakteristiske varighet, T_D eller konsentrasjonstid, T_C og 2) hvilken tidsoppløsning, ΔT for simuleringer (og observasjoner) som er nødvendig for å beskrive den hydrologiske respons i tilstrekkelig detalj.

Verdier for varighet T_D , i tabell 2 antyder at varigheten, naturlig nok, er en funksjon av nedbørfeltets størrelse. Større nedbørfelter har lengre avstander i elvenettverket. Det tar dermed lengre tid å transportere vannet om ikke lengre avstander kompenseres med høyere hastigheter. Vi kan legge merke til at for de små urbanfeltene har vi behov for dimensjonerende nedbørsverdier for varigheter det sjelden finnes data for. For eksempel kan det se ut som om varigheter på ca 1 time er passende for nedbørfeltstørrelser på litt under 1 km² (se figur 6), som vil være et ganske stort urbant nedbørfelt. For naturlige felt ser det ut som om nedbørfeltstørrelsen skal opp i over 500 km² før vi kan bruke varigheter på 24 timer.

Varigheter utregnet ved hjelp av metoden presentert i denne rapporten korresponderer bra med verdiene man får ved å bruke formelen til Berg et al (1992) for de minste urbanfeltene. I utregningen brukte vi av praktiske årsaker maksimal lengde i elvenettverket i stedet for feltlengde. Hvis vi antar at maksimal lengde av elvenettverket er noe kortere enn feltlengde, vil vår bruk av formelen beregne litt for korte konsentrasjonstider.

Verdier for tidsoppløsning, ΔT i tabell 1 og 2 viser at ønsker vi målinger og simuleringer av vannføring i en detalj som gjør at det likner på momentanvannføring, må vi for noen av urbanfeltene ha tidsoppløsning på ca. 2 minutter med antatt hastighet i elvestrengen på 1 m/s. En hastighet på 1 m/s antas som langsamt for vann i rør (Skaugen et al, 2020), men kan være raskt for vann i bekk (D'Odorico og Rigon, 2003). For naturlige felter ser vi at bare for svært store nedbørfelt (> 5500 km²) gir 24 timers tidsoppløsning en simulering som likner på momentanavrenning. Vi ser videre at for mange av de naturlige nedbørfeltene er det behov for tidsoppløsning på 3 timer og mindre, noe som i en operativ sammenheng, f.eks. flomvarsling, setter store, og til dels nye krav til hydrologiske og meteorologiske observasjoner og prognoser.

Våre beregninger er gjort for antatte gjennomsnittsførhold, men nedbørfeltets aktuelle fuktighetsforhold vil influere på hastigheter for alle arealtyper og for hastigheten i elvenettverket. Jo våtere forhold i nedbørfeltet, jo større hastigheter kan

man anta at de hydrologiske prosessene har. I tillegg er det mye litteratur som beskriver hvordan elvenettverket ekspanderer og kontrakterer som funksjon av fuktighetsforhold (Godsey og Kirchner 2014; Tsegaw et al. 2019; Botter og Durighetto, 2020). Avstandsfordelingene vi har brukt i denne studien kan derfor ikke antas å være konstante for ulike fuktighetsforhold. Et våtere utgangspunkt vil gi et lengre og tettere elvenettverk (se f.eks Godsey og Kirchner 2014) som i utgangspunktet vil forlenge tiden til vanntransport i elvenettverket. På den annen side vil mer vann gi raskere hastigheter, noe som vil korte ned på tiden til vanntransport i elvenettverket. I hvilken grad disse prosessene kompenserer er det vanskelig å uttale seg om, men det styrker en antakelse om at en vurdering gjort under gjennomsnittsførhold slik som beskrevet her, har verdi og er nyttig som en første ordens tilnærming.

Metoden som er beskrevet her krever et elvenettverk som enten er laget på bakgrunn av en digital terrengmodell og GIS, eller blir digitalisert fra kart. Videre vil en GIS-analyse beregne avstandsfordelinger for elvenettverk og arealtypene (P og IP arealer) i feltet. Er elvenettverket bestemt av GIS, innebærer dette en subjektiv vurdering av GIS operatøren av hvor tett et elvenettverk skal være. En slik vurdering får selvsagt konsekvenser for avstandsfordelingene og kan ha innvirkning på T_D og ΔT . Vi har sammenliknet parameterverdiene av de normalfordelte avstandene i elvenettverket for elvenettverk tatt ut ifra kart (ELVIS), eller laget fra GIS med forskjellige CA. CA (contributing area, også kalt «tilrenningsareal», pers. komm. Rune Bratlie, NVE) er arealet som skal til for å samle nok vann til å lage en elv. Liten CA gir mye elver, et tett elvenettverk, og stor CA gir lite elver. Tabell 3 viser parameterverdier av avstandsfordelingen for elvenettverk fra ELVIS og fra GIS med lite, middels og stort CA for nedbørsfeltet 26.20. Det er brukt en DTM med 10 meters oppløsning fra Statens Kartverk, og GRASS GIS rutiner i QGIS er brukt for å lage elvenettverk (se Skaugen et al., 2020, for mer detaljer). Det viser seg at, for dette feltet, er elvenettverket fra ELVIS mer detaljert enn elvenettverket fra GIS med selv den minste CA som ble testet. Elvenettverket laget fra GIS vil dermed ha kortere avstander. Med konstant hastighet på vann i elven får vi da estimert en kortere varighet ($T_D = 4t$) for elvenettverk fra GIS enn for elvenettverk fra ELVIS ($T_D = 6t$).

Tabell 3. Varighet, tidsoppløsning og parametre i avstandsfordeling for forskjellige elvenettverk for stasjon 26.20 med feltareal 77 km²

Stasjon	T_D [hr]	ΔT [hr]	EN_m [m]	EN_std [m]	EN_CV	EN_max [m]
ELVIS	6	1	10171	3893	0.38	18075
GIS CA= 0.025 km ²	4	1	6355	2711	0.43	12840
GIS CA= 0.5 km ²	4	1	6208	2740	0.44	12292
GIS CA= 2.0 km ²	4	1	5815	2704	0.46	11875

Tabell 4 viser parameterverdier av avstandsfordelingen for elvenettverk fra GIS med CA = 500, 1000, 2000, 35000, 5000 og 7500 m²l for urbanfeltet Lye2, 28.11. Vi ser at vi kan bruke CA fra 500- 5000 m² uten at det influerer på estimert T_D og ΔT .

Tabell 4. Varighet, tidsoppløsning og parametere i avstandsfordeling for forskjellige elvenettverk for stasjon 28.11 med feltareal 1.91 km².

Stasjon	T_D [min]	ΔT [min]	EN_m [m]	EN_std [m]	EN_CV	EN_max [m]
GIS CA= 500 m ²	40	10	1075	486	0.45	2027
GIS CA= 1000 m ²	40	10	1052	482	0.46	2010
GIS CA= 2000 m ²	40	10	1010	473	0.47	1993
GIS CA= 3500 m ²	40	10	993	469	0.47	1951
GIS CA= 5000 m ²	40	10	991	472	0.48	1933
GIS CA= 7500 m ²	35	5	973	457	0.47	1921

5 Konklusjon

I denne studien har vi brukt fordelinger av avstander i et elvenettverk og avstander fra punkter i terrenget til et elvenettverk sammen med antatte vannhastigheter for å beregne kritiske varighet av nedbør og tidsoppløsning av hydrologiske målinger og modellering. Analysen er gjort for urbane og naturlige nedbørfelter av forskjellig størrelse. Et nedbørfelts konsentrasjonstid blir satt lik kritisk varighet, og er den tiden det tar å transportere en vannpuls i elvenettverket. Dette er også tiden det tar for å oppnå likevekt med lik input som output i et nedbørfelt. Optimal tidsoppløsning er den laveste tidsoppløsning vi kan ha uten at simulert maksvannføringen blir vesentlig (> 10%) redusert fra momentanvannføringen.

Kritisk varighet øker med nedbørfeltets størrelse, og er ca. 24 timer for nedbørfelt med størrelse ca. 500 km². Varigheter under 60 minutter er nødvendig for nedbørfelter under ca. 1 km².

Nødvendig tidsoppløsning for simulert vannføring varierer mindre klart med nedbørfeltareal, men det antydes at tidsoppløsningen blir grovere med økende nedbørfeltareal. Vi finner at 3 timer kan være tilstrekkelig tidsoppløsning for nedbørfelt med størrelser fra 50 til 430 km². Vi finner også at 1 time kan være

nødvendig for nedbørfelt opp til ca 200 km². For enkelte svært store felt > 5000 km² kan tidsoppløsning på 24 timer brukes, men også for felt av denne størrelse kan det være nødvendig med en finere tidsoppløsning.

6 Referanser

Berg, A., Lunde, T og Mosevoll, G. (1992): Flomberegning og kulvertdimensjonering. Trondheim, SINTEF. 89 s

Beven, K. J., 1982. On subsurface stormflow: predictions with simple kinematic theory for saturated and unsaturated flows, *Water Resour. Res.*, 18, 1627–1633.

Beven, K. J., 2020. A history of the concept of time of concentration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 2655–2670, 2020, <https://doi.org/10.5194/hess-24-2655-2020>.

Botter, G., Durighetto, N. (2020). The Stream Length Duration Curve: A tool for characterizing the time variability of the flowing stream length. *Water Resources Research*, 56, e2020WR027282. <https://doi.org/10.1029/2020WR027282>

Dingman SL. 2002. *Physical Hydrology*. 2nd ed. PrenticeHall:NewJersey, U.S.

Eagleson, P.: *Dynamic Hydrology*, McGraw-Hill, New York, NY, 1970.

Godsey, S.E. and J.W. Kirchner, 2014. Dynamic, discontinuous stream networks: hydrologically driven variations in active drainage density, flowing channels and stream order. *Hydrol. Process.* 28, 5791–5803, DOI: 10.1002/hyp.10310

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

D’Odorico, P and R. Rigon, 2003. Hillslope and channel contributions to the hydrological response, *Water Resources Research*, 39, 5, 1113, doi:10.1029/2002WR001708.

McDonnell, J.J og K. Beven, 2014. Debates- The future of hydrological sciences: A (common) path forward? A call to action aimed at understanding velocities celerites and residence times distributions of the headwater hydrograph. *Water Resour. Res.*, 10.1002/2013WR015141

Muthanna, T.M., E. Sivertsen, D. Kliewer 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:10.3390/su10124683.

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. 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. 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 overvannsdiskonering (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., Skaugen, T, Alfredsen, K & Muthanna, T.M: A dynamic river network method for the prediction of floods using a parsimonious rainfall-runoff model. Hydrology Research 2019; doi.org/10.2166/nh.2019.003, ISSN 1998-9563

Wong, T. S. W., 2009. Evolution of kinematic wave time of concentration formulas for overland flow, J. Hydrol. Eng., 14, 739–744.



NVE

Norges vassdrags- og energidirektorat

.....

MIDDELTHUNS GATE 29
POSTBOKS 5091 MAJORSTUEN
0301 OSLO
TELEFON: (+47) 22 95 95 95

www.nve.no