

Tømning efter behov

Opskalering til hele Glostrup kommune



Over en periode på et halvt år i 2020-2021, har Vestforbrændingen, Glostrup Forsyning og Urbaser i samarbejde gennemført et projekt, hvor 53 husstande har fået afhentet deres affald baseret på individuelle behov. I forsøget har borgerne i de udvalgte husstande selv skulle bestille tømning af deres affalds- og genbrugsbeholdere når disse var ved at være fyldte, fremfor at beholderne blev tømt med fast frekvens. Selve bestillingen foregik, for ca. halvdelen af borgernes vedkommende, ved hjælp af en app. For den anden halvdel foregik bestillingen ved hjælp af en *slider*, som blev monteret på beholderen. Når borgeren flyttede en skyder på denne slider, sendte den automatisk en anmodning om tømning af beholderen til det bagvedliggende system. Efter bestilling, kunne borgerne, som udgangspunkt, forvente tømning af beholderen inden for to dage. Igennem forsøgsperioden blev der opsamlet information om alle bestillinger og tømninger. Disse informationer danner grundlaget for denne rapport.

I denne rapport analyseres *kørselsbehovet* ved tre indsamlingssystemer hvor der indsamles fra husstandene efter behov i forhold til kørselsbehovet ved det nuværende system med faste indsamlingsintervaller. Der betragtes altså fire systemer:

- **Fast.** Det eksisterende system, hvor hver fraktion indsamles med faste ruter og med fast tømninginterval på 1, 3, 4, eller 8 uger afhængigt af fraktionen.
- **Dynamisk.** Indsamling efter behov, hvor beholderne tømmes efter højst to dage, men hvor tømninger der bestilles torsdag skal tømmes fredag og hvor bestillinger foretages fredag og lørdag skal tømmes mandag.
- **3-dags.** Indsamling efter behov, hvor der indsamles tre dage om ugen, således at bestillinger fra mandag og tirsdag indsamles onsdag, bestillinger fra onsdag og torsdag indsamles fredag og bestillinger fra ugens sidste dage indsamles mandag.
- **Uge.** Indsamling efter behov, hvor alle bestillinger fra en hel uge serviceres på samme dag.

Bemærk at Ugesystemet ikke er fundet relevant at analysere for dagrenovation.

Rapporten anvender betegnelsen "affaldsfraktion" for det der indsamles i en enkelt beholder i Glostrup kommune, fx papir og plastik, selvom der reelt set er tale om to fraktioner i genbrugsøjemed. Analysen er foretaget for følgende fire affaldsfraktioner:

- Dagrenovation
- Papir og plastik
- Pap
- Glas og metal

Rapporten er opbygget som følger: I afsnit 2 analyseres dataet fra forsøgsområdet. I afsnit 3 gennemgås det hvordan opskaleringen er lavet. Afsnit 4 indeholder resultaterne af opskaleringen og i afsnit 5 forsøges det at give en intuitiv forståelse af resultaterne, samtidig med at resultaterne er valideret matematisk. Med andre ord: Afsnit 4 fortæller *hvad* resultatet af opskaleringen er og afsnit 5 fortæller *hvorfor* resultaterne er sådan, mens afsnit 3 blot forklarer *hvordan* resultaterne er fremkommet.

1 Basisinformationer

Analysen er lavet på baggrund af følgende informationer fra Vestforbrændingen og Urbaser.

	Dagrenovation	Papir og plastik	Pap	Glas og metal
Nuværende frekvens	Ugentligt	3 uger	4 uger	8 uger
Max tømninger pr. rute	600	600	300	300

Tabel 1. Information vedrørende de nuværende ordninger.

Vejdata for Glostrup kommune og omegn er leveret fra Geograf A/S. Det er koblet med informationer om beholderstørrelser, samt om hvilke adresser der har tømning af dagrenovation hele året og hvilke der kun har tømning i sommerhalvåret, leveret af Glostrup forsyning. Det er oplyst fra Urbaser at alle adresser der har en dagrenovationsbeholder ligeledes har genbrugsbeholdere til papir og plast samt til glas og metal. Det er antaget at det samme gør sig gældende for pap.

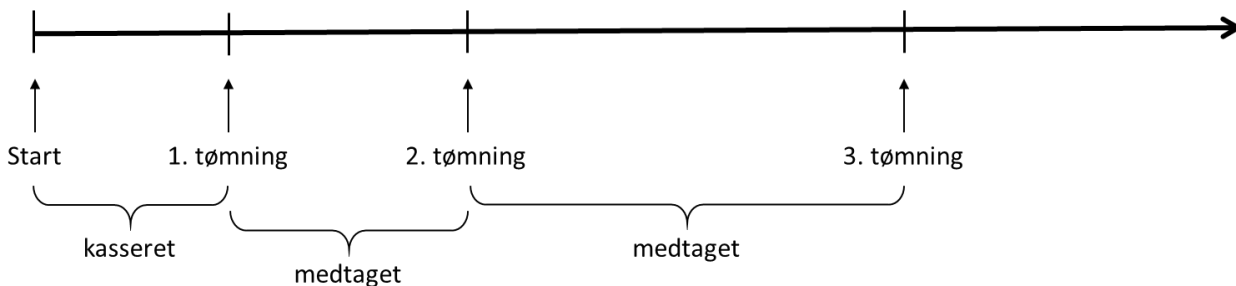
2 Analyse af tømningssdata

I dette afsnit analyseres bestillings- og tømningssdata fra forsøgsperioden.

2.1 Behandling af data

For at kunne analysere tømningssintervallerne, dvs. tiden mellem to på hinanden følgende tømninger hos den enkelte husstand, på basis af dataet fra forsøgsperioden, er der, for dagrenovation, tre faktorer der skal håndteres.

For det første er der fjernet et antal fejlregistreringer hvor tømning f.eks. er bestilt to gange inden tømningen blev foretaget. I disse tilfælde er den ene bestilling fjernet. For det andet var der en indkørselsperiode for Ejbyholm, der anvendte en app til bestilling. Her blev tømningerne manuelt registreret, og i starten var der forsinkelse i denne proces, hvilket har gjort at tømningstidspunktet i denne periode kan være forsinket. For Ejbyholm er tømninger før 16/10 derfor udeladt af analysen. For det tredje, er det nødvendigt at have tidspunkterne for to på hinanden følgende tømninger for at kunne bestemme tiden mellem dem. Derfor er tiden før første tømning i forsøget fjernet for hver husstand. Dette er illustreret i figur 1.



Figur 1. Illustration af hvordan tømningssintervaller bestemmes.

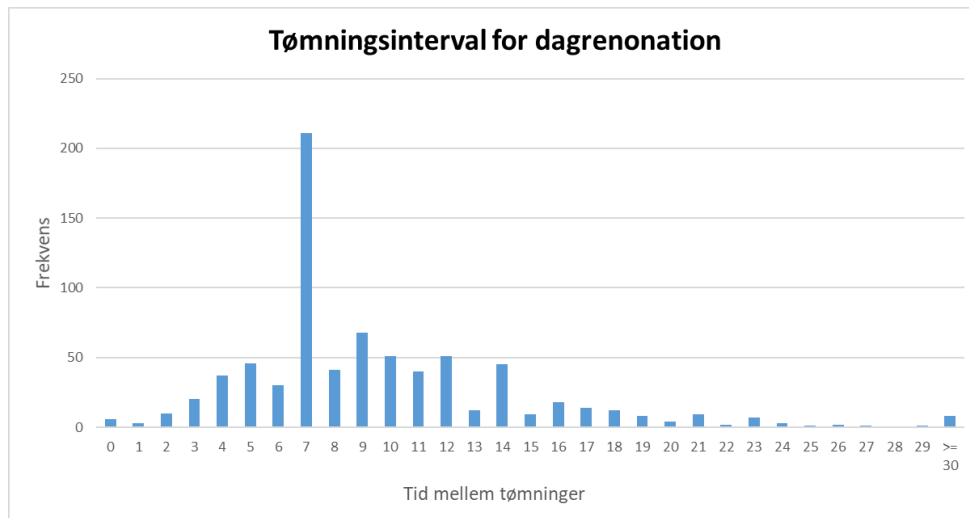
For de tre genbrugsfraktioner er det kun første faktor, altså fejlregistreringer, der er fjernet. Det skyldes dels at tømningssintervallerne er så lange at anden faktor ikke har nogen praktisk betydning og dels at der er så lidt data at det har været nødvendigt at søge information om sidste tømning inden forsøgsstart for at kunne undgå tredje faktor.

2.2 Dagrenovation

Efter databehandlingen er der 770 brugbare tømningssintervaller for dagrenovation fra pilotprojektet.

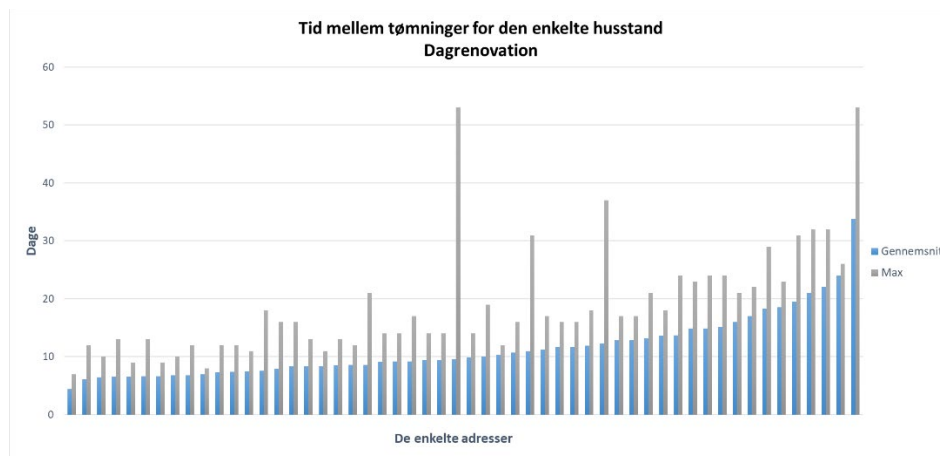
Det observerede gennemsnitlige tømningssinterval i forsøgsperioden er 9,6 dage, hvilket er 37,4 % længere end den uge der pt. anvendes i den faste tømning. I 27,4% af observationerne er beholderen tømt med et interval på 7 dage, som svarer til det der anvendes i den eksisterende ordning med fast interval. Knap 20% af tømningssintervallerne er under en uge, mens 11,7% er over tre uger. 8 af de 770 tømningssintervaller er over en

måned og det længste er 53 dage. Det tyder på at man måske bør overveje om der, af hygiejnæssige årsager, bør være en øvre grænse for hvor langt tid der bør gå efter en tømning inden det automatisk udløser en ekstra tømning. Figur 2 viser hvordan de 770 observationer fordeler sig på forskellige tømningsintervaller.



Figur 2. Tømningsintervaller for dagrenovation i forsøgsperioden. Det observeres at der har været 1 dag imellem tømninger 3 gange og 7 dage mellem tømningerne 211 gange.

Antallet af tømninger for den enkelte husstand, henover hele forsøgsperioden, varierer fra 4 til 26, med et gennemsnit på 16,5. En tilsvarende, men mere detaljeret, indsigt opnås ved at betragte bestillingsintervallerne for den enkelte husstand. Det gøres i figur 3, som for hver af de 53 husstande viser det gennemsnitlige tømningsinterval for husstanden samt det længste tømningsinterval for husstanden i forsøgsperioden. Her ses tydeligt at der er store variationer både imellem husstandene og mellem tømningerne for den enkelte husstand.



Figur 3. Længste og gennemsnitligt tømningsinterval for hver af de 53 husstande.

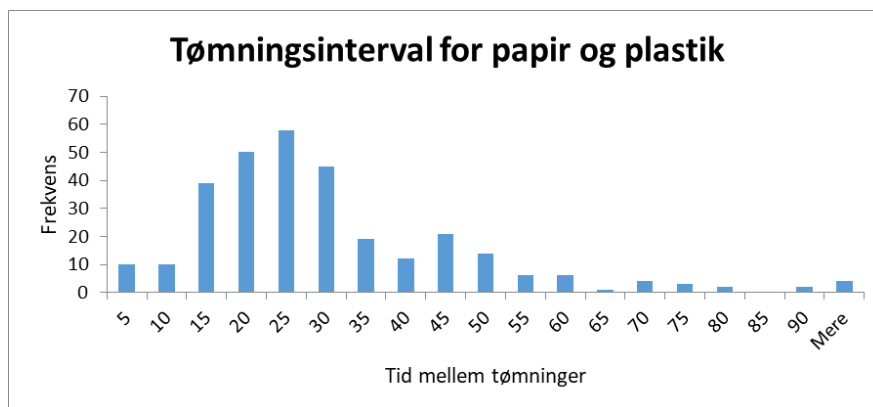
2.3 Genbrugsfraktioner

Vi betragter nu det tilgængelige data fra forsøgsperioden for de tre genbrugsbeholdere.

2.3.1 Papir og plastik

For papir og plastik er der 306 brugbare registreringer af bestilling og tømning fra pilotprojektet. Da det er oplyst at beholderne blev tømt sidste gang inden starten af forsøget d. 21/8 2020, er målinger fra denne dag til første bestilling medregnet for papir og plastik. En af de 53 adresser har ikke fået tømt beholderen for papir og plastik i forsøgsperioden.

Det observerede gennemsnitlige tømninginterval i forsøgsperioden er 4 uger (28,5 dage), hvilket er markant længere end de 3 uger der pt. anvendes i den faste tømningsskema. Dette tal dækker dog over meget store variationer. Det højst observerede tømninginterval er 112 dage, dvs. knap 4 måneder. Antallet af tømninger i perioden for den enkelte husstand varierer fra 2 til 11. Figur 4 viser hvordan de 306 observationer fordeler sig på forskellige tømningintervaller.

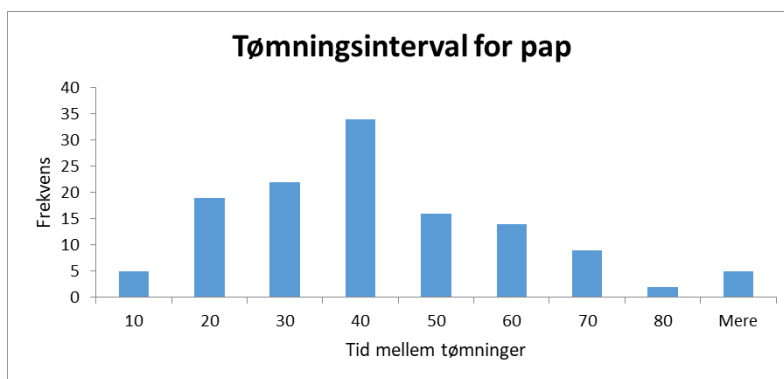


Figur 4. Tømningintervaller for papir og plastik i forsøgsperioden. Første søjle viser at der har været 1-5 dage imellem tømninger 10 gange, mens tredje søjle angiver at der har været 11-15 dage mellem tømningerne 39 gange.

2.3.2 Pap

For pap er der kun 126 brugbare registreringer af bestilling og tømning fra pilotprojektet og kun 32 af de 53 adresser har fået tømt deres papbeholder i forsøgsperioden. Det er oplyst at beholderne blev tømt sidste gang inden starten af forsøget d. 14/8 2020 og målinger fra denne dag til første bestilling er medregnet for pap.

Det observerede gennemsnitlige tømninginterval i forsøgsperioden er 39 dage (5,6 uger), hvilket igen er markant længere end de 4 uger der pt. anvendes i den faste tømningsskema for pap. Igen dækker tallet over meget store variationer. Det højst observerede tømninginterval er 160 dage, dvs. over 5 måneder. Antallet af tømninger for den enkelte husstand varierer fra 1 til 9. Figur 5 viser hvordan de 126 observationer fordeler sig på forskellige tømningintervaller.

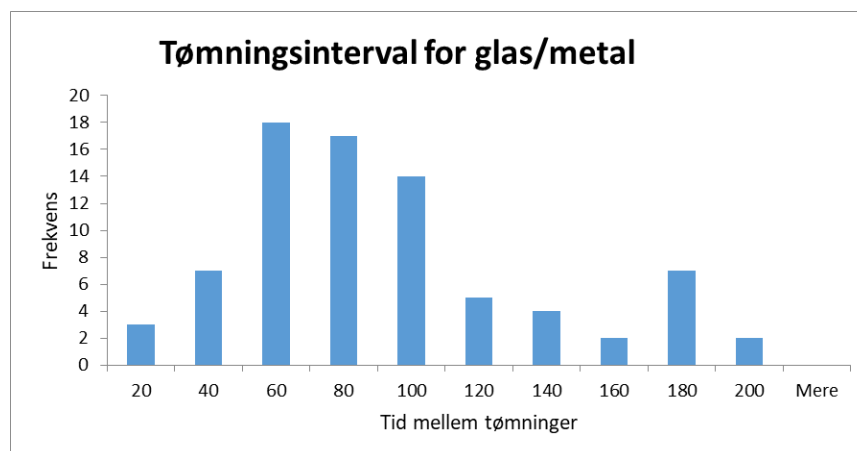


Figur 5 Tømningsintervaller for pap i forsøgsperioden. Første søjle viser at der har været 1-10 dage imellem tømninger 5 gange, mens tredje søjle angiver at der har været 21-30 dage mellem tømningerne 22 gange.

2.3.3 Glas og metal

For glas og metal er der kun 79 brugbare registreringer af bestilling og tømning fra pilotprojektet. Da det er oplyst at beholderne blev tømt sidste gang inden starten af forsøget d. 28/8 2020, er målinger fra denne dag til første bestilling for hver husstand medregnet for glas og metal. Ti af de 53 adresser har ikke fået tømt glas og metal beholderen i forsøgsperioden.

Det observerede gennemsnitlige tømningsinterval i forsøgsperioden er næsten 12 uger (82,7 dage), hvilket igen er markant længere end de 8 uger der pt. anvendes i den faste tømningsordning. Igen er der store variationer, med tømningsintervaller fra en uge til et halvt år (182 dage). Antallet af tømninger for den enkelte husstand varierer fra 1 til 5. Der er altså tale om en beholder der tømmes meget sjældent. Figur 6 viser hvordan de 79 observationer fordeler sig på forskellige tømningsintervaller.



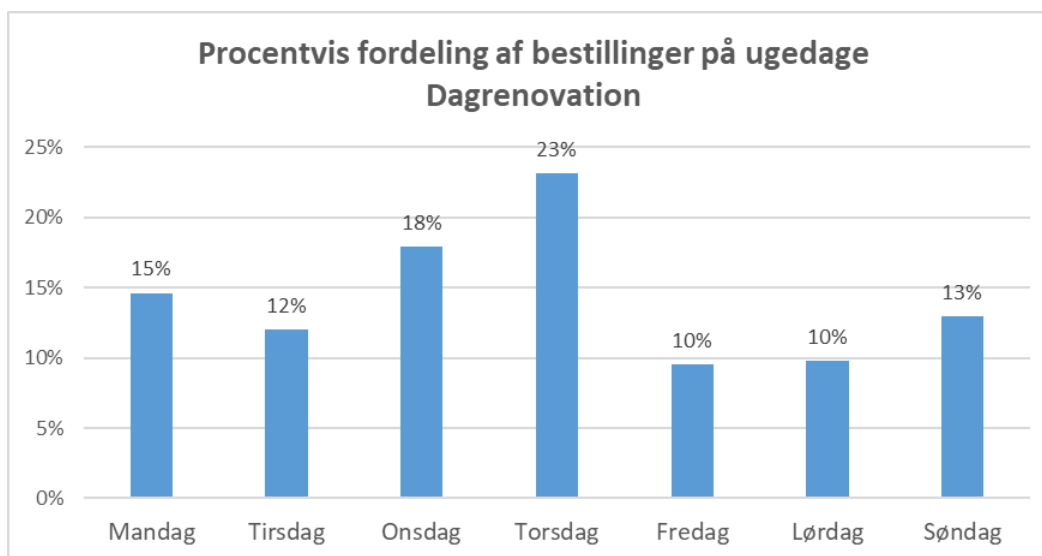
Figur 6 Tømningsintervaller for glas og metal i forsøgsperioden. Første søjle viser at der har været 1-20 dage imellem tømninger 3 gange, mens tredje søjle angiver at der har været 41-60 dage mellem tømningerne 18 gange.

2.4 Bestillingernes fordeling på ugedage

Det undersøges nu i hvor høj grad borgerne har tendens til at bestille tømning på bestemte ugedage.

For at undersøge dette, anvendes bestillingsinformation for dagrenovation, som er den fraktion der har det bedste statistiske grundlag. Der ses på bestillingsdage i perioden 16/10-2020 – 25/2-2021 (19 uger). Dermed er en opstartsperiode på halvanden måned skåret fra, således at det er sikret at borgerne har lært at bruge systemet. Ligeledes er det sikret at alle ugedage er repræsenteret lige mange gange i analyseperioden. Da bestillinger afgivet fredag først tømmes ugen efter, er perioden valgt så ugerne går fra fredag til torsdag i denne analyse.

Der er 725 bestillinger i den pågældende periode. Figur 7 viser hvordan disse bestillinger fordeler sig imellem ugedagene. Der ses en klar tendens til at borgerne oftere foretager bestilling af tømning torsdag (23%), og til dels onsdag (17%), end de øvrige dage i ugen. Da torsdagsbestillingerne skal tømmes fredag og da en del af onsdagsbestillingerne eventuelt også vil skubbes til fredag af hensyn til rutelægningen, bliver fredag en relativt travl dag, i modsætning til under den faste planlægning, hvor fredagen kan gøres kort. Bestillinger, der foretages fredag samt i weekenden, skal alle tømmes mandag. Det drejer sig om 32% af bestillingerne i den pågældende periode.



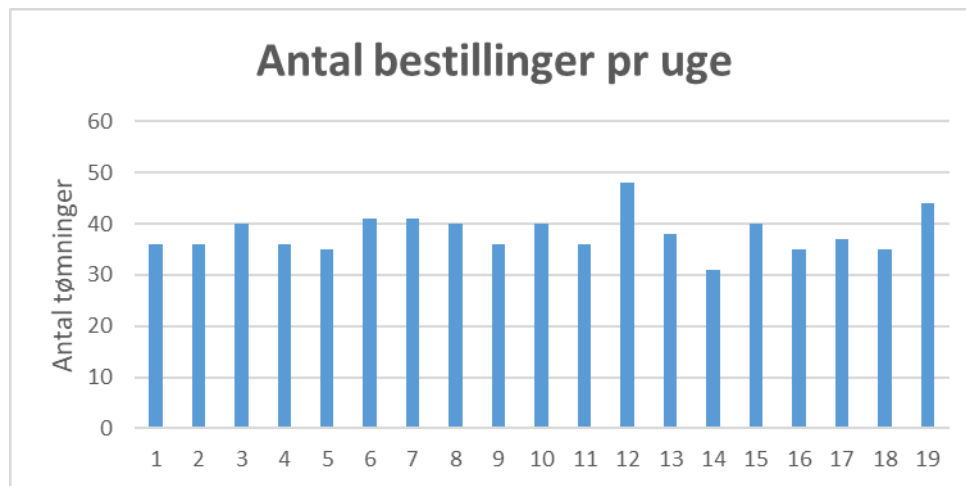
Figur 7. Procentvis fordeling af bestillinger på ugedage for dagrenovation i en 19-egers periode.

Ud over den samlede procentvise fordeling på ugedage, er det relevant at se på variationen for ugedagene henover de 19 uger. Denne variation er summeret i figur 8, hvor hver række viser antallet af bestillinger, der er foretaget på den pågældende ugedag i hver af de 19 uger. For at tydeliggøre variationen, er store mængder markeret med en mørkere farve. Vi observerer f.eks. at antallet af tømninger der er foretaget om torsdagen den enkelte uge, varierer fra 3 til 19, hvilket er meget store udsving når man tager i betragtning at der kun er 53 husstande i forsøgsområdet.

Mandag	6	8	8	6	5	4	5	5	3	7	8	6	4	3	5	5	5	5	8
Tirsdag	7	2	3	2	3	7	4	3	3	7	7	3	10	7	5	8	1	3	2
Onsdag	7	5	5	5	1	13	9	9	6	6	3	6	7	5	8	5	5	8	17
Torsdag	7	9	8	9	10	8	13	14	12	3	3	11	9	7	9	6	12	9	9
Fredag	3	5	2	5	7	3	2	3	3	4	4	6	2	3	5	4	2	2	4
Lørdag	2	3	9	4	3	2	2	4	4	3	5	9	2	0	4	2	5	6	2
Søndag	4	4	5	5	6	4	6	2	5	10	6	7	4	6	4	5	7	2	2

Figur 8. Antal bestillinger foretaget i hver af de 19 uger, fordelt på ugedage.

Betragter vi i stedet det samlede antal bestillinger hver af de 19 uger, ser billedet lidt mere stabilt ud. Det er summeret i figur 9, hvor vi ser at antallet af bestillinger af tømning af dagrenovation varierer mellem 31 og 48 for de 53 husstande henover de 19 uger, med et gennemsnit på 38 bestillinger pr. uge.



Figur 9. Antal bestillinger hver af de 19 uger.

Som det ses af ovenstående er der meget store variationer i antallet af bestillinger, både imellem ugerne og imellem de enkelte ugedage. Det betyder af tømning efter bestilling vil give meget store udsving i arbejdsmængden for renovationsmedarbejderne fra dag til dag og fra uge til uge, ikke mindst med få dages tømningsfrist. Endvidere er arbejdsmængden den enkelte dag ikke kendt før sent om aftenen dagen før. Hvorvidt dette er acceptabelt tages der ikke stilling til her. I afsnit 3.3 illustreres det hvad denne variation betyder når der skaleres op til hele Glostrup kommune.

2.5 Sammenfatning af dataanalyse

Dataanalysen sammenfattes i tabel 2.

	Dagrenovation	Papir og plastik	Pap	Glas og metal
Nuværende frekvens	1 uge	3 uger	4 uger	8 uger
Observeret gennemsnit	9,6 dage	28,5 dage	39,2 dage	82,8 dage
Observeret højeste interval	53 dage	112 dage	160 dage	182 dage
Stigning	37,4 %	35,8 %	39,9 %	47,6 %

Tabel 2. Sammenfatning af resultater om variation i tømningstidspunkter fra forsøgsperioden.

3 Fra dataanalyse til opskalering

På basis af den viden der er opnået gennem dataanalysen, er der lavet et simulationsstudie for at opskalere resultaterne fra forsøgsområdet til hele Glostrup kommune. I dette afsnit gennemgås i overordnede træk hvordan dette er gjort.

3.1 Området

Der er taget udgangspunkt i listen over tømningssaftaler for dagrenovation fra Glostrup forsyning. Store beholdere, dvs. nedgravede containere samt containere på 660 l eller derover, er ikke medtaget i analysen. Det drejer sig om 339 beholderadresser. Det skyldes at der ikke er nogen af disse store fællesbeholdere i forsøgsområdet. Fastsættelse af dynamiske tømningintervaller ville derfor udelukkende kunne bero på en fornemmelse og risikerer at skævvride analysen mere end en udeladelse af dem vil gøre. Konsekvensen af at udelade dem har ikke afgørende betydning i sammenligningen mellem de fire systemer, men betyder at de faktiske kilometertal ligger i den lave ende.

Et antal beholdere tømmes kun i sommerhalvåret. Der er derfor lavet to overordnede datasæt, der danner grund for analysen:

- **Sommer.** Her er alle beholdere i kommunen, der ikke er frasorteret pga. størrelse, medtaget. Der er 5573 beholderadresser i sommer.
- **Vinter.** Her er alle beholderadresser der kun har tømning i sommerhalvåret fjernet. Der er 4134 beholderadresser i vinter.

3.2 Simulering af bestillinger

For at simulere bestillinger i hele Glostrup kommune, er der tre parametre der skal fastgættes for hver affaldsfraktion og hver sæson:

- Det gennemsnitlige ugentlige antal bestillinger.
- Hvor meget antallet af bestillinger den enkelte uge varierer i forhold til gennemsnittet.
- Hvordan det bestilte antal for en uge fordeler sig imellem ugedagene.

Denne fremgangsmåde er benyttet fremfor at simulere på basis af den enkelte husstands tømninginterval for at sikre at de tydelige adfærdsmønstre der ses i fordelingen mellem ugedagene kommer med i simulationen. Endvidere betyder det, at alle husstande har lige stor sandsynlighed for at være en husstand der tilfældigvis har mange (eller få) tømninger henover perioden. Dette er ønskeligt fordi vi ikke har information om den enkelte husstand i kommunen, der kan danne grundlag for at behandle dem forskelligt.

Det gennemsnitlige ugentlige antal bestillinger.

Dette er bestemt for to forskellige måder for dagrenovation og for genbrugsfraktioner.

For dagrenovation anvendes gennemsnittet af to estimater. For det første fandt vi i afsnit 2.2, at det gennemsnitlige antal dage mellem tømninger i forsøgsperioden var 9,6. Det betyder at der i gennemsnit er $7/9,6 = 72\%$ af de aktive husstande, der har bestilt tømning hver uge. For det andet, for at tage højde for til- og fraflytning og ferier, foretages estimeringen også som et simpelt gennemsnit over hele perioden på 172 dage, hvor der var i alt 770 brugbare tømningsintervaller. Dvs. at 31 af de 53 husstande i gennemsnit har bestilt tømninger hver uge, hvilket svarer til 59%. For dagrenovation bruger vi et gennemsnit af de to estimater, og dermed en gennemsnitlig andel på 65%. Om sommeren svarer det til at 3676 husstande i gennemsnit bestiller tømning af dagrenovation hver uge. Om vinteren er gennemsnittet 2726.

For genbrugsfraktionerne er indsamlingsfrekvenserne så lange at tiden mellem sidste tømning og forsøgsperiodens slutning risikerer at have for stor betydning i anden estimeringsmetode. Derfor at kun den første metode anvendt for genbrugsfraktionerne. Øverste del af tabel 3 summerer resultatet af disse beregninger. For pap var der kun målinger fra forsøgsområdet for godt halvdelen af husstandene. Opskaleringen er lavet med en forventning at alle husstande i kommunen vil få en beholder til denne fraktion.

Hvor meget antallet af bestillinger den enkelte uge varierer i forhold til gennemsnittet.

På basis af beregningerne bag figur 9 ved vi at for dagrenovation har antallet af bestillinger om ugen varieret med en andel på $\pm 23\%$ i forhold til gennemsnittet. Denne variation fastholdes i simulationen til bestemmelse af højeste og laveste antal ugentlige efterspørgsler. De er angivet i nederste del af tabel 3. Der er anvendt en uniform fordeling mellem disse to værdier, dvs. alle mængder mellem mindste og største mængde er lige sandsynlige.

	Dagrenovation		Papir og plastik		Pap		Glas og metal	
	Sommer	Vinter	Sommer	Vinter	sommer	Vinter	Sommer	Vinter
Andel	65%		24,5%		17,8%		8,5%	
Gennemsnit	3676	2726	1368	1015	996	739	471	350
Mindst	2831	2099	1053	782	767	569	363	370
Højst	4521	3353	1683	1248	1225	909	579	431

Tabel 3. Basisgrundlag for simulationen.

Hvordan det bestilte antal for en uge fordeler sig imellem ugedagene.

Figur 7 i afsnit 2.4 viser hvordan fordelingen af bestillinger fordeler sig på ugens dage for dagrenovation. Denne fordeling er anvendt for alle fire fraktioner i simulationen.

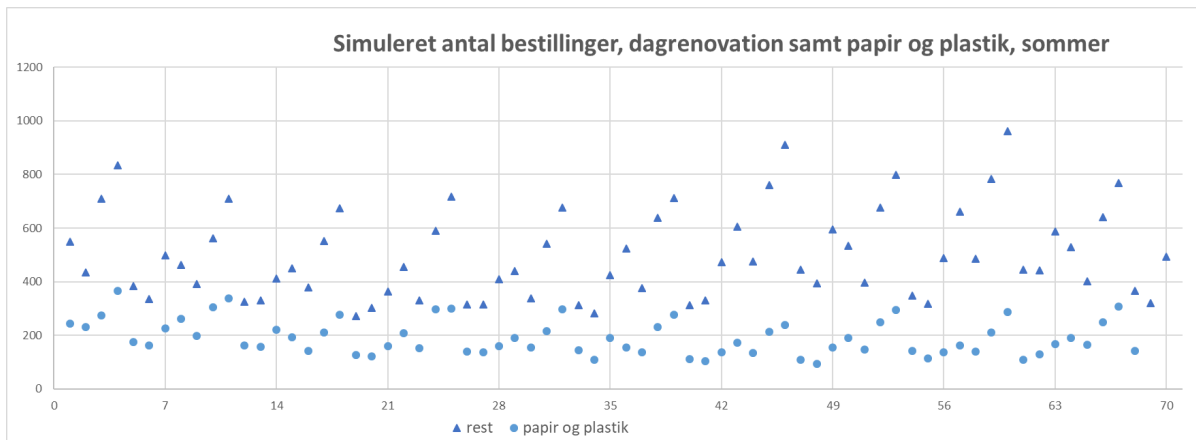
3.3 Simulationsprocessen

På basis af ovenstående er der simuleret daglige bestillinger over en periode på 81 uger og på basis af disse bestillinger er indsamlingen planlagt. Resultaterne for de første tre uger er fjernet i de endelige beregninger for at sikre stabilitet.

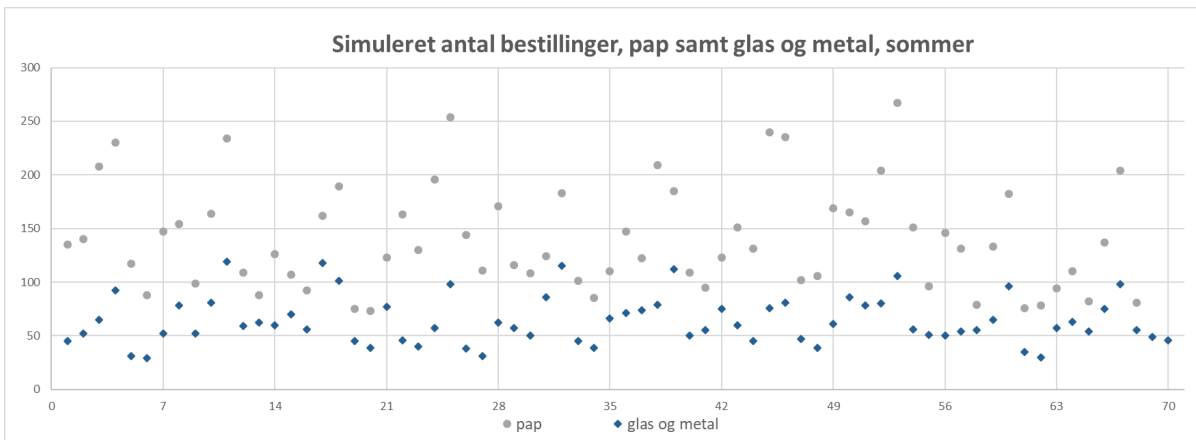
For hver fraktion er processen således:

- Først bestemmes antallet af bestillinger den pågældende uge som et tilfældigt antal mellem mindste og højeste værdi for fraktionen og årstiden i henhold til informationerne i tabel 3.
- Dernæst udvælges dette antal husstande tilfældigt fra den samlede liste af adresser i henhold til årstiden. Dette angiver de husstande der har efterspørgsel den pågældende uge.
- For hver af disse husstande bestemmes bestillingdagen i ugen tilfældigt på basis af fordelingen mellem ugedage fra figur 7.

Denne proces gentages for de 81 uger og for hver af de fire affaldsfraktioner og de to årstider. Figur 10 og 11 illustrerer hvordan de simulerede antal bestillinger kan fordele sig henover en periode på 10 uger.



Figur 10. Eksempel på simuleret antal bestillinger for dagrenovation samt papir og plastik i en periode på 10 uger.



Figur 11. Eksempel på simuleret antal bestillinger for pap samt glas og metal i en periode på 10 uger.

3.4 Rutelægning på basis af bestillinger

På basis af de simulerede bestillinger er indsamlingen planlagt for hvert af de fire systemer. Der er to algoritmer i spil til dette formål:

For de tre systemer *Fast*, *Uge* og *3-dags*, er det pr. definition af systemerne fastlagt hvilke dage de forskellige bestillinger skal tømmes. F.eks. skal alle bestillinger fra mandag og tirsdag tømmes om onsdagen i 3-dags systemet. Der anvendes derfor, for disse tre systemer, udelukkende en *rutelægningsalgoritme* til at planlægge ruterne for hver dag og derved fremskaffe et estimat for det kørte antal kilometer.

For systemet *Dynamisk* benyttes først en *planlægningsalgoritme* til at bestemme hvilke bestillinger der skal tømmes på de forskellige dage. F.eks. skal bestillinger fra mandag tømmes enten tirsdag eller onsdag. Når planlægningsalgoritmen har lavet denne fordeling, anvendes *rutelægningsalgoritmen* med udgangspunkt i denne fordeling til at planlægge ruterne for hver dag og derved fremskaffe et estimat for det kørte antal kilometer.

3.4.1 Planlægningsalgoritme for Dynamisk.

I det dynamiske system er der, for hver dag, brugt en planlægningsalgoritme til at beslutte hvilke beholdere der skal tømmes den enkelte dag, således at alle beholdere tømmes efter højst to dage, men hvor tømninger der bestilles torsdag altid bliver tømt fredag og hvor bestillinger foretaget fredag og lørdag altid tømmes mandag.

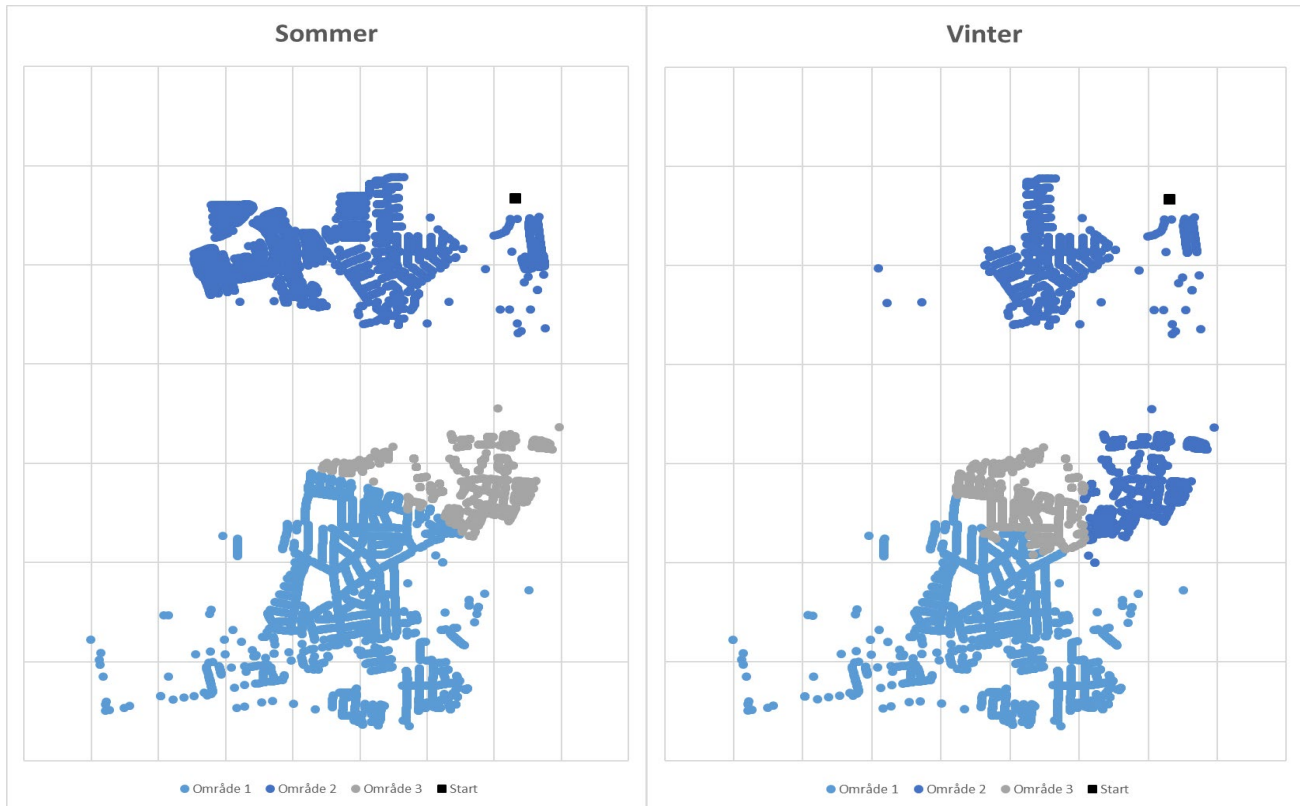
Algoritmen arbejder dynamisk. Dvs. hver dag ved algoritmen hvilke bestillinger fra i forgår der endnu ikke er tømt (disse *skal* tømmes i dag) samt hvilke bestillinger der kom i går (disse *kan* tømmes i dag). Med udgangspunkt i dette, træffes beslutning om dagens tømninger som beskrevet nedenfor. Endvidere kender algoritmen gennemsnitstallene, dvs. informationerne fra afsnit 3.2, men den har ingen informationer om de simulerede bestillinger for de kommende dage fra afsnit 3.3.

Kommunen er opdelt i tre områder således at

- Område 1 dækker 40% af husstandene og dækker den sydvestlige del af kommunen.
- Område 2 dækker ca. 40% af husstandene og dækker den nordlige og nordøstlige del af kommunen.
- Område 3 dækker ca. 20% af husstandene og dækker midten.

De tre områder er vist i figur 12 for hhv. sommer og vinter.

Algoritmen arbejder med en værdi, *mål*, som er antallet af tømninger, den gerne vil tømme den enkelte dag, for at opnå en jævn arbejdsbyrde. For hver dag er *mål* først sat til en femtedel af den forventede ugentlige efterspørgsel. Det svarer til det antal, der skal tømmes den enkelte dag for at opnå jævn arbejdsbyrde hvis alt er gennemsnitligt. Vi ved dog at to dage vil have særligt højt arbejdspress på grund af reglerne for den dynamiske indsamling: mandag og fredag. Mandag kan ikke reddes, da alt fra weekenden *skal* indsamles mandag. For at mindste arbejdsbyrden fredag er målværdien for torsdag hævet med 20% og værdien for onsdag er hævet med 10%. Dette gøres for at presse algoritmen til at servicere en god del af onsdagens bestillinger allerede om torsdagen så de ikke hænger til fredag.



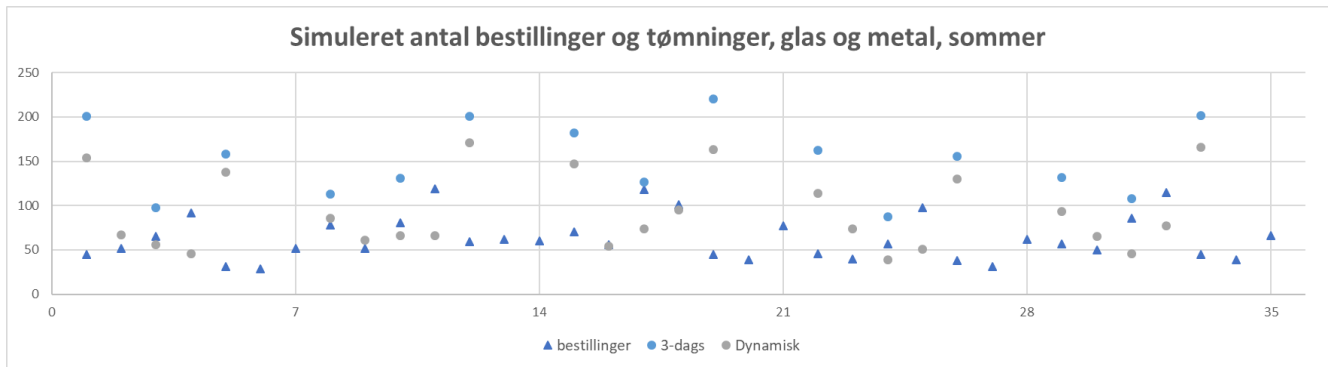
Figur 12. Opdeling af kommunen i tre områder

Algoritmen vælger nu hvilke af de bestilte beholdere der skal tømme på følgende måde:

- Alle dage vælges alle *skal*-beholdere.
- Mandage, onsdage og fredage i lige uger samt tirsdage og torsdage i ulige uger vælges endvidere alle *kan*-beholdere i område 1. Hvis der endnu ikke er opnået er antal der svarer til dagens *mål*-værdi, vælges beholdere fra område 3 (det grå område i figur 12), startende fra den sydvestlige ende indtil måltallet er nået eller der ikke er flere *kan*-beholdere i område 3.
- De øvrige dage (mandage, onsdage og fredage i ulige uger samt tirsdage og torsdage i lige uger) gøres præcist det samme blot med udgangspunkt i område 2, med efterfølgende *kan*-beholdere fra den nordøstlige ende af område 3.

Denne fremgangsmåde sikrer at der kun køres i område 1 og 2 hver anden dag, hvorimod der køres i område 3 de fleste dage. Dermed mindskes mængden af stjerneførsel.

Figur 13 viser et eksempel på hvordan det daglige antal bestillinger og antallet af tømninger med hhv. det dynamiske system og 3-dags systemet udvikler sig. Her ses især hvordan de mange bestillinger torsdag trækker antallet af tømninger om fredagen op i begge systemer. Betragtes tredje uge (bemærk at tirsdagens og torsdagens bestillingspunkter er delvist dækket), ses det hvordan det høje antal bestillinger onsdag trækker antallet af torsdagstømninger op i det dynamiske system. Det modsatte ses i uge 4, hvor bestillinger onsdag er lave, og som følge deraf er der få tømninger torsdag.



Figur 13. Eksempel på sammenhængen mellem bestillinger og tømninger via 3-dags systemet hhv. det dynamiske system, simuleret over 5 uger.

Det er absolut muligt at opnå en bedre udligning af antallet af tømninger henover uge. Det kan gøres ved at lave område 1 og 2 mindre og område 3 større. Konsekvensen af dette vil dog være endnu mere stjerneførsel. Det andet ekstrem er 3-dags systemet, hvor reglerne fra det dynamiske system også overholdes. Der er stjerneførslen, og dermed kørt distance, mindsket, til gengæld er der store variationer i arbejdsbyrden idet der kun tømmes tre dage ugentligt. Størrelsen af områderne er altså fastsat i algoritmen, så der opnås en vis balance mellem ønsker om at minimere stjerneførsel og have en jævn arbejdsbyrde.

3.4.2 Selve rutelægningen.

Efter det er besluttet hvilke beholdere der skal tømmes den enkelte dag, anvendes en rutelægningsalgoritme til at planlægge ruterne for hver dag og derved fremskaffe et estimat for det kørte antal kilometer. Til dette formål er der anvendt den såkaldte HGS-CVRP algoritme af T. Vidal, som er en af de bedste algoritmer til løsning af denne type af rutelægningsproblemer.

Til at begrænse mængden af arbejde på den enkelte rute, er der efter aftale udelukkende anvendt antallet af tømninger, som ses i tabel 1.

Samlet set er der løst 5668 daglige rutelægningsproblemer. Der er anvendt beregningstider varierende fra 20 minutter for de mindste (glas og metal i det dynamiske system) til 100 timer for de største (det faste system).

4 Resultat af opskalering

I det følgende beskrives resultaterne af opskaleringen for de fire fraktioner. På basis af resultaterne fra simulationen er kørslen (km) beregnet for hver uge. For genbrugsfraktionerne repræsenterer *Fast* systemet kørsel hver tredje, fjerde eller ottende uge. Den er således delt med hhv. 3, 4 eller 8. Alle tal vedrørende kørsel i dette afsnit er således angivet som kørsel pr. uge og kan dermed sammenlignes.

Kørslen i de forskellige systemer for den enkelte fraktion kan altså trykt sammenlignes med hinanden som forholdstal, men det pointeres at de faktiske kilometertal skal tages med et gran salt og ikke direkte kan sammenlignes med de eksisterende kørselsplaner, idet de eksisterende kørselsplaner tager højde for diverse arbejdsmæssige forhold som simulationen ikke tager højde for.

4.1 Dagrenovation

Tabel 4 sammenfatter resultaterne af opskaleringen for dagrenovation om sommeren hhv. om vinteren. De første tre linjer viser algoritmens gennemsnitlige ugentlige kørsel samt den mindste og største ugentlige kørsel observeret i simulationsresultaterne. Dernæst angives det gennemsnitlige antal tømninger pr. uge fra simulationen. Det er altså her vi ser effekten af at tømning efter behov resulterer i færre ugentlige tømninger end det faste system hvor alle beholdere tømmes hver uge. Samme information er vist som procent i sjette linje. For at vise effekten af at 3-dags systemet indsamler på tre dage mens det dynamiske system indsamler alle hverdage er endvidere angivet det gennemsnitlige antal indsamlinger pr. indsamlingsdag (hhv. 3 og 5) fra simulationen.

De sidste to linjer præsenterer sammenligningen mellem de to testsystemer og den nuværende faste kørsel. Næstsidste linje viser hvor meget mere kørsel testsystemet bruger end det faste system. De 67% for 3-dags systemet betyder altså at 3-dags systemet, i gennemsnitlige, bruger 67% flere kilometers kørsel til indsamling af dagrenovation end det nuværende faste system. Dette er til trods for at antallet af beholdere der tømmes kun er 63% i forhold til den faste indsamling.

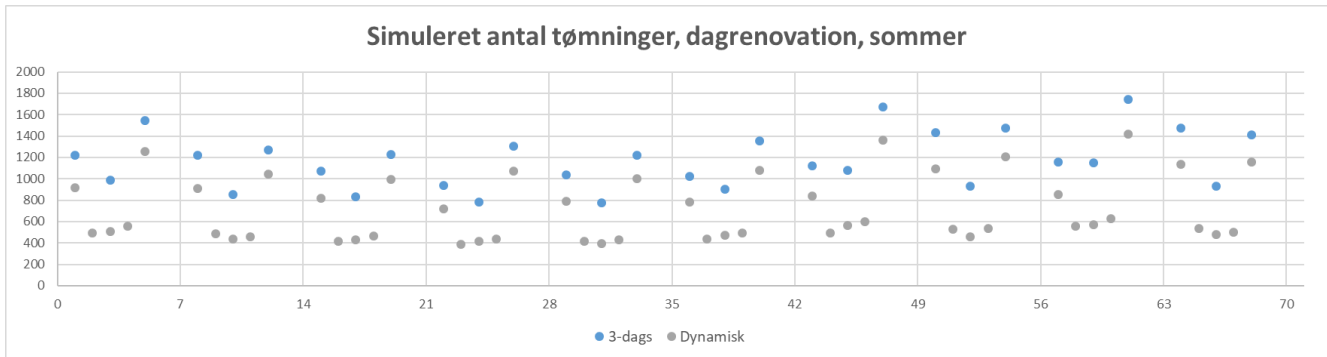
Sidste linje viser samme information, blot præsenteret på en anden måde. Her betyder de 1,7 ved 3-dags systemet at 3-dags systemet, i gennemsnit, bruger 1,7 gange så meget kørsel som den nuværende faste indsamling. Tallet siger altså at "km med 3-dags system = 1,7 * km med det nuværende system".

Dagrenovation	Sommer			Vinter		
	Fast	3-dags	Dynamisk	Fast	3-dags	Dynamisk
Km pr. uge, gennemsnit	196	327	384	166	272	315
Km pr. uge, mindst		303	282		249	217
Km pr. uge, størst		353	424		295	343
Tømninger pr. uge, gns.	5573	3507	3507	4134	2632	2632
Tømninger pr. dag, gns.		1169	699		887	524
Andel tømninger pr. uge		63%	63%		64%	64%
Procentvis mere kørsel		67%	96%		64%	90%
Forholdsmæssigt mere kørsel		1,7	2,0		1,6	1,9

Tabel 4. Resultat af opskalering for dagrenovation.

Tabel 4 viser samlet set at både 3-dags systemet og den dynamiske indsamling resulterer i mere kørsel end det nuværende system med faste indsamling af alle beholdere, til trods for at der tømmes færre beholdere.

For at give et indblik i variationen bag det gennemsnitlige antallet af tømninger pr. dag (de 1169 hhv. 699 for de to systemer om sommeren), viser figur 14 antallet af tømninger de enkelte dag for en 10-ugers periode fra simulationen.



Figur 14. Illustration af antallet af tømninger af dagrenovation henover ugedagene. Illustreret over en periode på 10 uger.

4.2 Papir og plast

Vi gennemgår nu den tilsvarende analyse af resultaterne af opskaleringen for papir og plastik med fokus på sommerhalvåret. Resultaterne er summeret i tabel 5.

Papir og plastik indsamles pt. med et fast interval på 3 uger. Ligesom for dagrenovation kan der tømmes 600 beholdere pr. rute, og da antal beholdere er den eneste begrænsende faktor i rutelægningen, kan der bruges samme ruter i det faste indsamlingssystem. For papir og plastik skal disse ruter dog kun køres hver tredje uge. Den gennemsnitlige ugentlige kørsel bliver dermed $196/3 = 65$ km og der tømmes i gennemsnit 1858 beholdere om ugen.

Fra simulationen fås at det gennemsnitlige antal beholdere der ønskes tømt pr. uge er 1329. Det er 72% af de 1858 beholdere der i gennemsnit tømmes pr. uge i det faste system. Det giver et temmelig lavt antal beholdere der, i gennemsnit, skal tømmes den enkelte dag. For det dynamiske system skal der kun tømmes 266 beholdere pr. dag i gennemsnit, hvilket svarer til en halv rute når kapaciteten er 600 tømninger pr. rute. Tilsvarende skal der tømmes i gennemsnit 443 beholdere hver af de tre dage der tømmes i 3-dags systemet.

De færre tømninger pr. uge når der tømmes efter behov resulterer, samlet set, i en del mere kørsel på grund af stjerneførsel. Således resulterer 3-dags systemet i 3,6 gange mere kørsel end det nuværende system med faste ruter og det dynamiske system resulterer i mere end fire gange så meget kørsel.

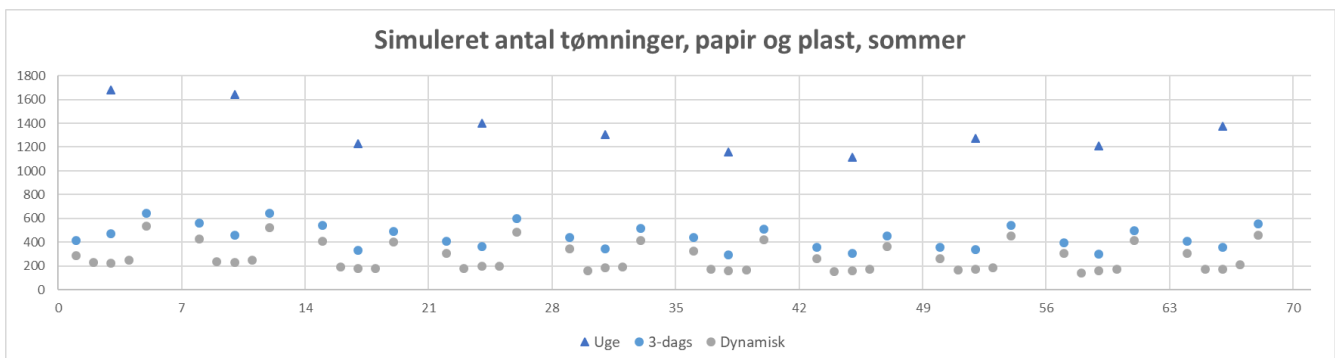
Fraviges kravet om at tømningen skal ske inden for to dage, fås Uge systemet. Her tømmes stadig efter behov, men således at beholderen tømmes mandag efter bestillingen. Det kan naturligvis også være en anden ugedag. Kernen i systemet er, at algoritmen har muligheden for at lave god rutelægning over en hel uges bestillinger, fremfor at være begrænset af de to dage. Uge systemet har altså mindre stjerneførsel end 3-dags systemet og

det dynamiske system, men da der stadig skal køres over hele kommunens område hver uge fremfor kun én gang hver tredje uge, resulterer også dette system i mere kørsel end det faste system, dog kun 1,7 gange mere.

Papir og plast	Sommer				Vinter			
	Fast	Uge	3-dags	Dynamisk	Fast	Uge	3-dags	Dynamisk
Km pr. uge, gennemsnit	65	113	236	280	55	95	192	232
Km pr. uge, mindst		103	215	256		87	175	209
Km pr. uge, størst		127	263	314		104	210	252
Tømninger pr. uge, gns.	1858	1329	1329	1329	1378	1005	1005	1005
Tømninger pr. dag, gns.			443	266			335	201
Andel tømninger pr. uge		72%	72%	72%		73%	73%	73%
Procentvis mere kørsel		73%	262%	330%		71%	247%	318%
Forhold, mere kørsel		1,7	3,6	4,3		1,7	3,5	4,2

Tabel 5. Resultat af opskalering for papir og plastik.

Figur 15 illustrerer variationen bag de 433 hhv. 266 gennemsnitlige tømninger på kørselsdage i 3-dags og det dynamiske system samt de gennemsnitlige 1329 tømninger i uge systemet. Igen ses store variationer i den daglige tømningmængde.



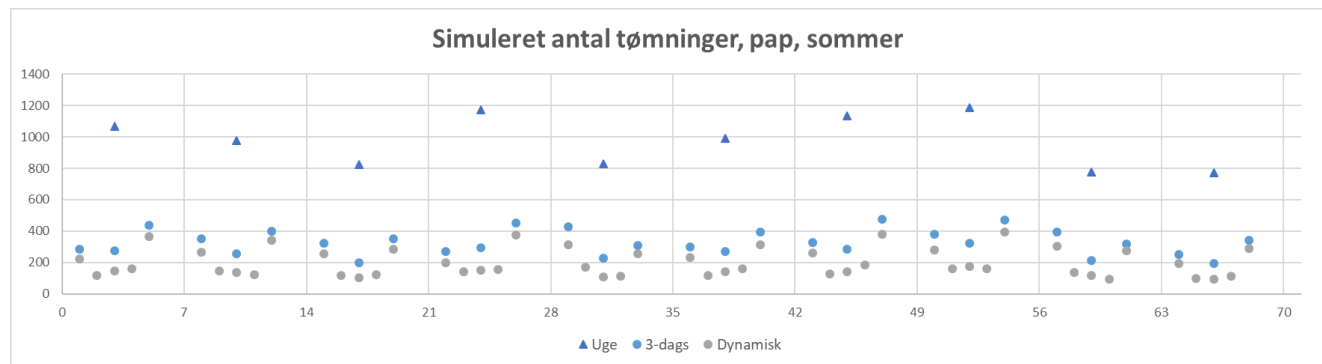
Figur 15. Illustration af antallet af tømninger af papir og plastik henover ugedagene. Illustreret over en periode på 10 uger.

4.3 Pap

Resultaterne af opskaleringen for tømning af papbeholdere er summeret i tabel 6 og variationen bag det gennemsnitlige antal tømninger er illustreret i figur 16. Resultaterne for pap minder meget om dem for papir og plastik og kræver ikke yderligere forklaring.

Pap	Sommer				Vinter			
	Fast	Uge	3-dags	Dynamisk	Fast	Uge	3-dags	Dynamisk
Km pr. uge, gennemsnit	68	117	223	261	57	96	177	211
Km pr. uge, mindst		100	192	231		84	156	191
Km pr. uge, størst		130	244	282		111	198	233
Tømninger pr. uge, gns.	1393	1021	1021	2021	1034	742	742	742
Tømninger pr. dag, gns.			340	204			247	149
Andel tømninger pr. uge		73%	73%	73%		72%	72%	72%
Procentvis mere kørsel		73%	228%	284%		67%	209%	268%
Forhold, mere kørsel		1,7	3,3	3,8		1,7	3,1	3,7

Tabel 6. Resultat af opskalering for pap.



Figur 16. Illustration af antallet af tømninger af pap henover ugedagene. Illustreret over en periode på 10 uger.

4.4 Glas og metal

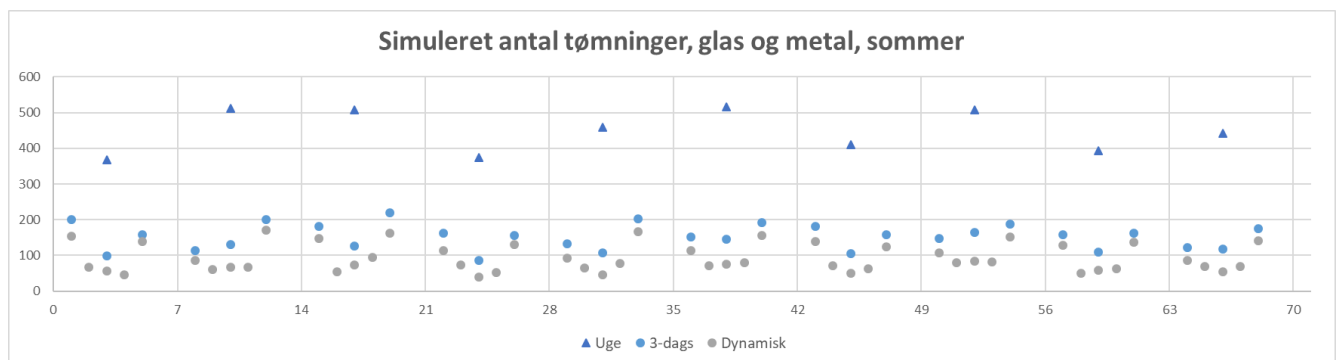
Resultaterne af opskaleringen for tømning af glas og metal er summeret i tabel 7 og variationen bag det gennemsnitlige antal tømninger er illustreret i figur 17.

Det er værd at bemærke at glas og metal i det faste system kun tømmes hver 8. uge. Dvs. at der i gennemsnit kun tømmes 697 beholdere pr. uge. Igen pointeres det at det ikke nødvendigvis betyder at der tømmes glas og metal hver uge. Der er udelukkende tale om et beregnet gennemsnitstal for at klargøre sammenligningen med de øvrige systemer.

Da de gennemsnitlige intervaller mellem bestillinger er længere end 8 uger, vil det gennemsnitlige antal tømninger pr. uge kun være 67% af disse 697 tømninger. Det ses meget tydeligt i de lavtliggende kurver i figur 17. Det laveste antal tømninger på en enkel dag, der er observeret i simulationen af det dynamiske system er 39 i sommerhalvåret og 32 i vinterhalvåret. Det er en enormt dårlig udnyttelse af ressourcerne, hvilket er afspejlet i de meget høje forholdstal for kørslen, der tydeligt viser at der køres mange gange længere når glas og metal indsamles efter behov, i særdeleshed hvis der indsamles 3 eller 5 gange om ugen.

Glas og metal	Sommer				Vinter			
	Fast	Uge	3-dags	Dynamisk	Fast	Uge	3-dags	Dynamisk
Km pr. uge, gennemsnit	34	85	164	195	29	71	132	161
Km pr. uge, mindst		73	143	174		60	116	145
Km pr. uge, størst		95	186	216		80	147	179
Tømninger pr. uge, gns.	697	468	468	468	517	352	352	352
Tømninger pr. dag, gns.			156	94			117	71
Andel tømninger pr. uge		67%	67%	67%		68%	68%	68%
Procentvis mere kørsel		151%	381%	473%		147%	360%	460%
Forhold, mere kørsel		2,5	4,8	5,7		2,5	4,6	5,6

Tabel 7. Resultat af opskalering for glas og metal.



Figur 17. Illustration af antallet af tømninger af glas og metal henover ugedagene. Illustreret over en periode på 10 uger

5 Intuitiv forståelse af konsekvensen af indsamling efter behov

Vi ved fra afsnit 4, at bestilling efter behov resulterer i mere kørsel til trods for at der er færre tømninger. Vi ved også at det skyldes stjerneførsel, men det kan alligevel stride imod intuitionen fordi det virker så oplagt at færre tømninger burde resultere i mindre kørsel. I dette afsnit gives en intuitiv forklaring på hvorfor kørslen stiger når der tømmes efter behov. Til dette formål bruges matematik.

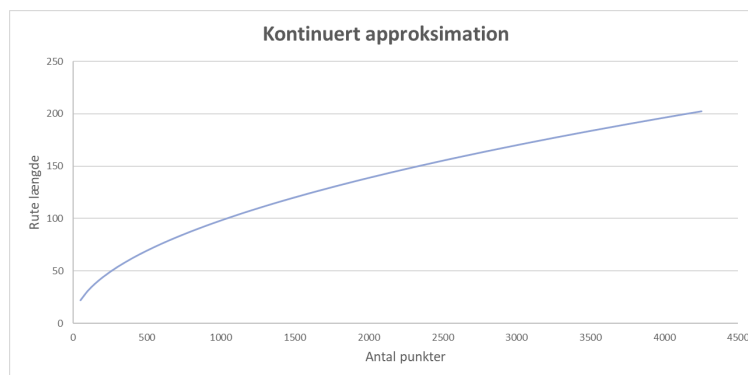
Det er muligt at lave en grov estimering af længden af en rute ved hjælp af en nogenlunde simpel matematisk formel. Der er mange antagelser og de er ikke helt opfyldt når vi taler om affaldsindsamling, men vi kan alligevel bruge formelen til at opnå en intuitiv forståelse af hvorfor resultaterne af opskaleringen er som de er.

De væsentligste antagelser bag formelen er at 1) punkterne vi skal besøge er pænt jævnt fordelt over området, 2) der laves én rute der besøger alle punkter og 3) der er mange punkter. Formlen siger så, at en rute der besøger N punkter, der er fordelt i et område med areal A er ca.

$$\text{rutelængde} \approx k \cdot \sqrt{A \cdot N}$$

Hvor k er en konstant, som afhænger af hvordan man bevæger sig mellem punkterne. For fugleflugt er k for eksempel 0,75. For rigtige vejafstande er k større. Figur 18 illustrerer hvordan rutelængden for én rute, ifølge formelen, stiger når antallet af punkter der skal besøges vokser.

Bemærk hvordan kurven bøjer når antallet af punkter stiger. Det betyder at f.eks. forskellen i rutelængde når man skifter fra 10 til 20 punkter er væsentligt større end ved at skifte fra 1000 til 1010 punkter. Men andre ord: når beholderne er spredt ud over hele kommunen, er kørsel pr. beholder man tømmer langt større når der er få beholdere at tømme end når der er mange. Det er altså præcist effekter af stjerneførsel vi ser her.



Figur 18. Illustration af kontinuert approksimation på et område med areal på $A = 13,3 \text{ km}^2$ og $k=0,85$.

Lad os nu prøve at bruge denne formel til at lave et groft estimat af forholdet mellem 3-dags systemet og fast indsamling for glas og metal, dvs. der hvor simulationen gav 4,8. Der anvendes $k=0,85$.

For fast indsamling skal vi én gang hver 8. uge tømme $N=5573$ beholdere fra et areal på $13,3 \text{ km}^2$. Hvis det gøres med en enkelt rute, vil længden ca. være

$$\text{kørsel, fast system} \approx 0,85 \cdot \sqrt{13,3 \cdot 5573} = 231,5 \text{ km}$$

Hvis man derimod bruger et 3-dags system, skal der kun tømmes 67% af 5573 beholdere henover de 8 uger. Dvs. 3748 beholdere. Det er 468 beholdere om ugen og i gennemsnit 156 beholdere hver tømningdag. På en 8-ugers periode er der altså $8 \cdot 3 = 24$ ruter, der hver tømmer 156 beholdere, i gennemsnit. Disse beholdere er spredt ud over samme areal. Bruger vi formlen på det, får vi

$$kørsel, 3 - dags system \approx 24 \cdot 0,85 \cdot \sqrt{13,3 \cdot 156} = 24 \cdot 38,7 = 930 \text{ km}$$

Tages forholdet mellem de to tal fås $930/231,5 = 4$, en udemærket validering af de 4,8 vi fandt frem til i opskaleringen, på basis af en grov, men simpel formel.

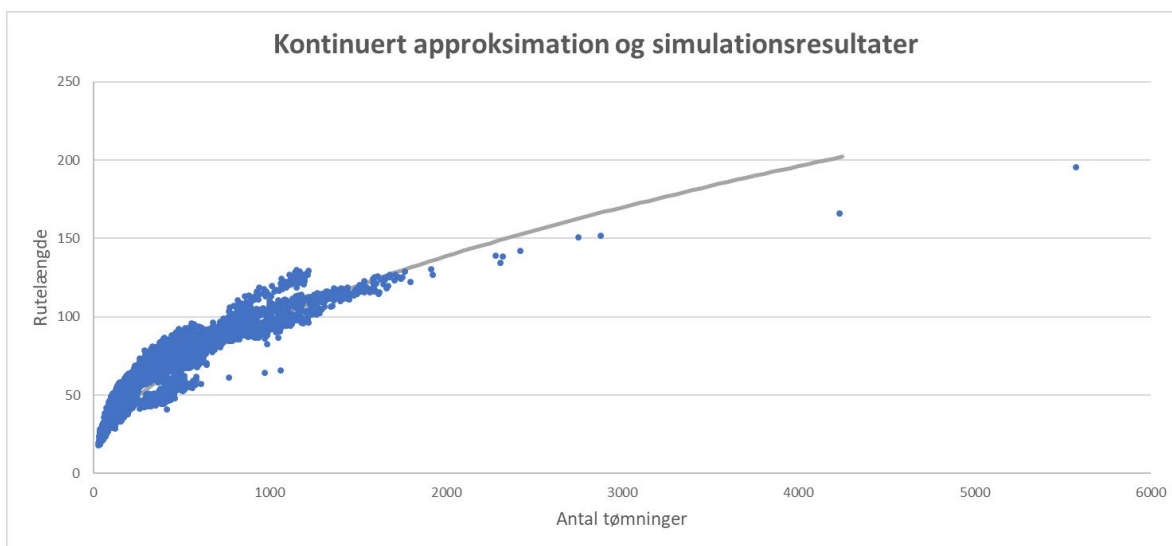
For at forstå hvad det er der presser kørslen i 3-dags systemet op, skrives formlen igen, idet vi direkte skriver hvordan vi kom frem til de 156 tømninger. Vi havde

$$kørsel, 3 - dags system \approx 24 \cdot 0,85 \cdot \sqrt{13,3 \cdot \frac{67\% \cdot 5573}{24}} = 24 \cdot 38,7 = 930 \text{ km}$$

Dvs. det faktum at kørslen spredes over 24 dage der alle skal rundt i hele området, gør at vi deler med de 24 inde i kvadratroden men ganger med 24 udenfor. Det øger omkostningen med en faktor 4,9 ($\sqrt{24}$) og besparelsen i antal tømninger er slet ikke i nærheden af at veje op for dette.

Det er altså det faktum at tømning efter behov spreder indsamlingen over mange dage *uden* at indsamlingsarealet samtidig mindskes der får kørselsdistancen til at stige. Det er også der vi finder forklaringen på hvorfor systemerne der spreder meget (3-dags og dynamisk) er dyrere end dem der spreder lidt (Uge) og hvorfor effekten er større for fraktioner med lange indsamlingsintervaller frem for dem med få. Dertil kommer effekten af variationen, men det er ikke den der for alvor er skadelig for kørselsdistances. Den er først og fremmest generende i forhold til arbejdsvilkår og planlægning.

Slutteligt illustreres rutelængderne for samtlige 5668 daglige rutelægningsproblemer sammen med den grove approksimationslinje i figur 19.



Figur 19. Rutelængder for alle ruter i simulationen sammen med en kontinuert approksimationslinje.

6 Konklusion

Konklusionen af opskaleringen er ret klar: Tømning efter behov resulterer i væsentligt mere kørsel end i det nuværende system med fast tømning. Til trods for at der er 65-70% færre tømninger når der tømmes efter behov er dette altså ikke tilstrækkeligt til at opveje den væsentligt mere kørsel der kommer af stjernekeørslen.

Hvorvidt arbejdsbyrden ved den faktiske tømning af en beholder er tilstrækkelig stor til at det samlet set kan betale sig at køre mere for at få fordelen af at tømme færre gange skal vurderes af en fagekspert.

Informationerne i tabel 4-7 kan godt danne grundlag for sammenligning af systemerne i forhold til CO2 udledning forudsat at konklusionerne derom drages på baggrund af forholdstal mellem systemerne på samme måde som der er gjort ovenfor med kørt distance.

Hele analysen er lavet ud fra en antagelse om at observationer for de 53 husstande i forsøgsområdet er repræsentative for Glostrup kommune som helhed.

7 Kilder

[1] Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., Lahrichi, N., Rei, W. (2012). A hybrid genetic algorithm for multidepot and periodic vehicle routing problems. *Operations Research*, 60(3), 611-624. (Available [HERE](#) in technical report form).

[2] Vidal, T. (2020). Hybrid genetic search for the CVRP: Open-source implementation and SWAP* neighborhood. Technical Report PUC-Rio. Available in ArXiv: <https://arxiv.org/abs/2012.10384>.

8 Kontakt

Rapporten er udarbejdet i april 2021 af Sanne Wøhlk, professor ved Institut for Økonomi på Aarhus Universitet.

Kontakt: sanw@econ.au.dk