



Besvarelse

Til Emil Moselund Østergaard (MB)

Svar til Emil Moselund Østergaard (B) - Opfølgning på spørgsmål vedr. HOFOR og fjernvarme

Emil Moselund Østergaard har stillet en række opfølgende spørgsmål vedrørende HOFOR og fleksibilitet i fjernvarmen. Der er desuden spurgt til en kopi af Energy Modelling Labs analyse om fleksibelt varmeforbrug, som derfor er vedlagt nærværende svar.

HOFOR har, i det vedlagte notat, besvaret de tekniske spørgsmål mv. vedrørende arbejdet med fleksibilitet i fjernvarmen.

Som det fremgår af svarene, er der både tekniske og juridiske udfordringer ved et stort demonstrationsprojekt. Det handler dels om, at flere leverandører skal kunne levere tekniske løsninger, som muliggør overstyring, dels om at HOFOR i dag mangler hjemmel til selv at installere løsninger i kundernes varmecentraler.

HOFOR er i kontakt med Energistyrelsen om rammevilkårene for, at HOFOR selv kan gå ind og mere aktivt deltage i udrulningen af øget fleksibilitet.

Økonomiforvaltningen vurderer, at der er store fordele ved mere fleksibilitet i forbruget, når det gælder optimering af produktionen (mindre spidslast mv.). Desuden er der væsentlige afledte fordele i form af lavere forbrug og dermed lavere omkostninger hos borgere og erhverv.

Så længe det udestår, at rammevilkårene ændres, er det Økonomiforvaltningens vurdering, at der mangler et juridisk hjemmelsgrundlag for udrulning i større skala. Teknisk er der hindringer, fx om kundernes varmecentraler kan overstyres mv.

17-08-2026

Sagsnummer i F2
2026 - 15043

Dokumentnummer i F2
11697625

Sagsnummer eDoc
2026-0214558

Sagsbehandler
Jesper Svensson

Svar på opfølgende politikerspørgsmål fra Emil Moselund Østergaard (B) vedr. HOFOR og fleksibel fjernvarme

Københavns Kommune har bedt HOFOR besvare nedenstående opfølgende politikerspørgsmål fra Emil Moselund Østergaard (B):

1. *Spørgsmål: Vurderer Økonomiforvaltningen, at arbejdet med fleksibelt fjernvarmeforbrug nu er modent nok til et større demonstrationsprojekt i København? Her tænker jeg særligt på, om kommunale bygninger, større etageejendomme og eventuelt udvalgte boligforeninger kan bruges som testplatforme i en næste fase.*

Svar: HOFOR har fokus på to former for forbrugsfleksibilitet. Den ene form er adfærdsregulerende på forbrugssiden, hvor forbrugerne påvirkes af prissignaler. Den anden form er teknisk fleksibilitet, som er testet i flexumer-pilotprojekterne, hvor HOFOR får adgang til fleksibilitet gennem overstyring af kundernes varmecentraler. Her er adfærd hos den endelige slutforbruger mere sekundær. HOFOR vurderer, at hvis der i forhold til sidstnævnte skal gennemføres et større pilotprojekt, er der behov for yderligere udvikling af tekniske løsninger i kundernes varmecentraler.

HOFOR arbejder videre med dette i pilotprojektet BMS4Flexumers, som gennemføres i samarbejde med Københavns Kommune. Desuden er der etableret kontakt til Energistyrelsen omkring afklaring af rammevilkårene for bedre at kunne vurdere mulighederne for en fremtidig udrulning. Konkret er der fokus på dels at finde flere leverandører og tekniske løsninger til de mange forskellige typer og fabrikater af varmestyringer hos kunderne, der kan levere den nødvendige fleksibilitet til HOFOR. Dels at finde en løsning, der giver HOFOR mulighed for selv at installere en løsning i kundernes varmecentral, hvilket HOFOR ikke har hjemmel til under de nuværende rammevilkår.

2. *Spørgsmål: Vurderer forvaltningen, at processen er moden nok til, at der kan udarbejdes en tydelig skaleringsplan for arbejdet? Altså en plan for, hvad der skal til for at gå fra pilotprojekter til en bredere udrulning i København, og hvilke beslutningspunkter der i så fald vil være relevante politisk.*

Svar: Jf. svaret ovenfor vurderer HOFOR, at der er behov for yderligere udvikling og demonstration, førend løsningerne er modne nok til fuld udrulning. Konkret er der derudover brug for at få to afgørende forhold på plads:

- Varmecentralerne skal være tilgængelige for HOFOR online, da det er en forudsætning for fleksibel fjernvarme.

- HOFOR skal have hjemmel til at installere udstyr og styre varmecentralerne i henhold til aftale med kunderne.

3. *Spørgsmål: HOFOR oplyser, at der arbejdes på at erstatte den flade årstarif med månedlige variable fjernvarmetariffer. Kan forvaltningen eller HOFOR uddybe, hvorfor der arbejdes med en månedlig model frem for eksempelvis en ugentlig, daglig eller timebaseret model?*

Svar: Det er HOFORs vurdering, at der med en indførelse af månedspriser fremfor den nuværende flade årstarif tages et stort skridt i retning af at opnå en mere kostægte tarifiering. Ved indførelse af månedspriser får fjernvarmeforbrugerne et mere korrekt incitament i forhold til blandt andet varmebesparelser og eventuelt udnyttelse af egen overskudsvarme/VE.

Der er ikke nødvendigvis et behov for timepriser på fjernvarme på samme måde som i elmarkedet. Det gælder også, selv om varmeproduktionen knyttes tættere til elpriserne i takt med udbygningen af elbaseret varmeproduktion. Det skyldes, at der i varmesystemet er indbygget varmelagre og anden fleksibilitet, som er med til at udjævne udsvingene i varmeprisen.

En indførelse af timepriser på fjernvarme vil endvidere være forbundet med meget høj kompleksitet. Den helt store forskel er, at månedspriser, ligesom den nuværende årspris, kan beregnes/estimeres i god tid forinden, typisk ved årets udgang for det kommende år, mens en timepris, som varierer langt mere, vil skulle beregnes lige inden den enkelte driftstime. Foruden kompleksiteten vil en eventuel indførelse af timepriser give udfordringer i forhold til, at fjernvarmeprisen skal være prisanmeldt til Forsyningstilsynet, inden den kan træde i kraft. HOFOR vurderer derfor, at det for nuværende ikke vil være praktisk muligt at overgå til timepriser. Timepriser på fjernvarme er dog noget, som kan være relevant at kigge nærmere på i de kommende år.

Det bemærkes, at nogle fjernvarmeselskaber, som har indført varierende priser over året, alene har indført sæsonpriser med to til fire forskellige priser i løbet af året. Selv med sæsonpriser fanges det helt afgørende parameter; at enhedsomkostningen er højere om vinteren end om sommeren.

4. *Spørgsmål: Kan der på sigt arbejdes med bonusmodeller eller andre incitamentsmodeller, der belønner fleksibilitet i varmeforbruget? Herunder om det vil være muligt at belønne kunder eller ejendomme, der konkret bidrager til at reducere belastningen i de perioder, hvor fjernvarmesystemet er mest presset.*

Svar: HOFOR vurderer, at incitamentsmodeller er relevante og indgår i selskabets overvejelser. Én model kunne være afregning ved aktivering af

fleksibilitet, men det forudsætter, at værdien af fleksibiliteten kan kvantificeres ret præcist, hvilket er en udfordring.

Det bemærkes, at kunder, som i dag deltager i fleksibilitetsprojekterne, i gennemsnit opnår en varmebesparelse på cirka 5 % som følge af, at deres online varmecentral får adgang til en vejrprognosebaseret styring. Denne funktion har ikke umiddelbart noget med fleksibel fjernvarme at gøre, men er et eksempel på en digital energitjeneste, som kunderne kan få adgang til med en online varmecentral. Dermed opnår kunderne en økonomisk gevinst som følge af en lavere varmeregning.

Herudover kan nævnes, at HOFOR overordnet set arbejder på en øget incitamentsstruktur overfor kunderne med henblik på at belønne kunder, som understøtter et velfungerende og energieffektivt fjernvarmesystem.

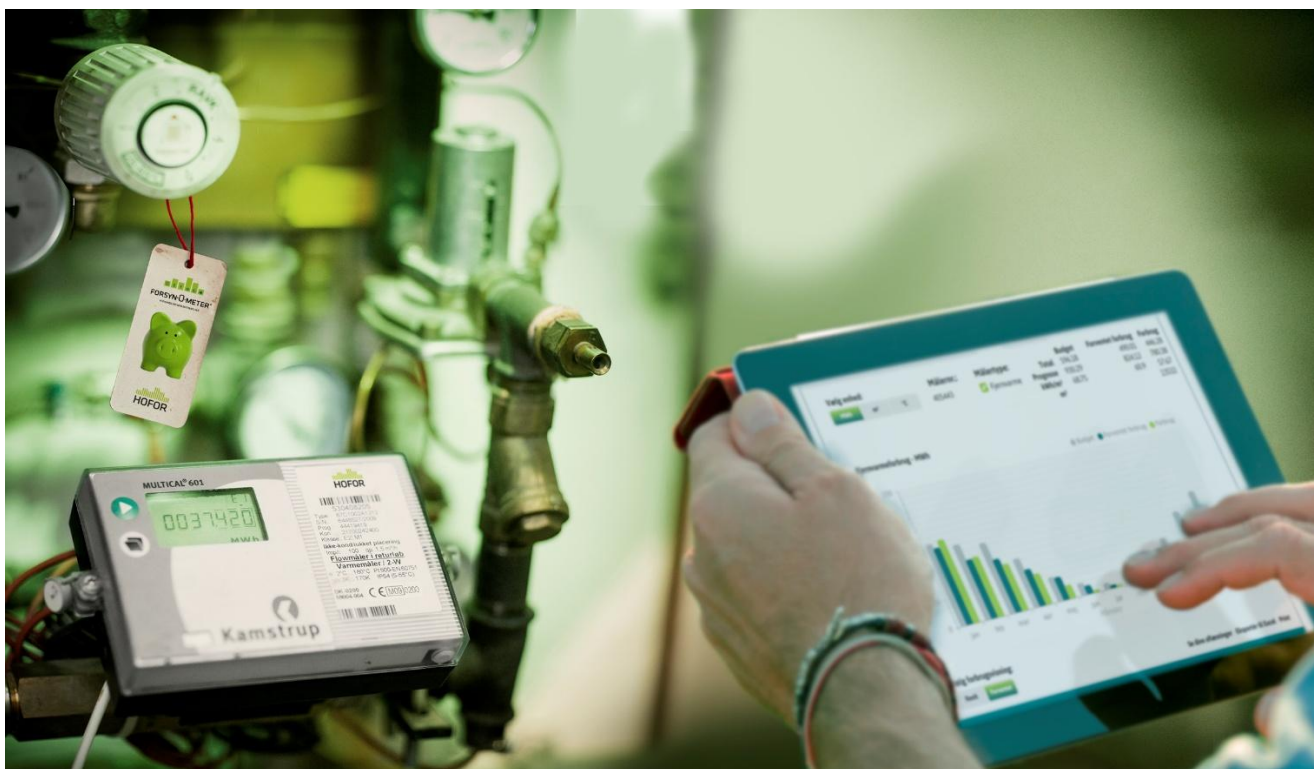
5. *Spørgsmål: Vil det være muligt i et demonstrationsprojekt at måle den faktiske reduktion i spidslastperioder, CO₂-aftryk og biomasseforbrug? Her tænker jeg både på effekten ved månedlige variable tariffer og på muligheden for på længere sigt at teste mere finmaskede modeller, eksempelvis på ugentlig, daglig eller timevis basis.*

Svar: I udgangspunktet vil det ikke være muligt at måle den faktiske reduktion i spidslastperioder, CO₂-aftryk og biomasseforbrug som følge af månedlige variable fjernvarmepriser eller fleksible varmekunder. Effekterne vil imidlertid kunne estimeres, hvilket dog vil være behæftet med usikkerhed. Generelt er CO₂-aftrykket i den københavnske fjernvarme ret lille, da fjernvarmen er ca. 94% CO₂-neutral.

HOFOR vurderer imidlertid, at de nævnte reduktioner vil kunne undersøges nærmere i et demonstrationsprojekt. Det forudsætter, at der er installeret de nyeste dataloggere i kundernes varmecentraler, og at kundernes varmecentraler er tilgængelige online. Derfor bør et demonstrationsprojekt finde sted i et område med nyere byggeri som f.eks. Vesterbro, som har nyere bygninger langs havnefronten. HOFOR overvejer pt., om sådanne aktiviteter kan indtænkes og realiseres i enten eksisterende eller kommende projekter.

6. *Spørgsmål: Hvordan vurderer forvaltningen, at dette bedst kan løftes politisk?*

Svar: Jf. svarene på de øvrige spørgsmål er det HOFORs vurdering, at der behov for justerede rammevilkår, som giver HOFOR mere handlerum i forhold til varmestyring, herunder styring af varmecentraler, installering af udstyr mv.



VÆRDISÆTNING AF FLEXUMERS

Analyse af værdien af fleksibilitet i fjernvarmeforbruget
for fjernvarmesystemet i København

Modtager: Flexumers4Future projektet

Afsender: HOFOR Fjernvarme P/S

Analyse udarbejdet af Energy Modelling Lab ApS, september 2025 til maj 2026

KS af/dato: Indtast dato

Godkendt af/ dato: Indtast dato

Version: Juni, 2026

Indhold

1	Resumé.....	3
2	Baggrund og formål.....	9
3	Metode og tilgang.....	11
3.1	Inkludering af flexumers.....	11
3.2	Analyser: Scenarier og følsomhedsanalyse.....	13
4	Marginalværdianalyse.....	14
4.1	Metode.....	14
4.2	Værdi af flexumers i den marginale analyse.....	14
4.3	Implikationer for implementering.....	15
5	Systemværdi under normale driftsforhold.....	16
5.1	Monte Carlo scenarier.....	17
5.2	Samlet systemværdi af flexumers under normale driftsforhold.....	18
5.3	Værdistrømme.....	19
5.4	Implikationer for implementering.....	25
6	Analyse af krisescenarie.....	25
6.1	Krisescenariet.....	26
6.2	Krisescenariet: Definition og afgrænsning.....	27
6.3	Værdisætning af flexumers i krisescenariet.....	28
6.4	Implikationer for implementering.....	30
7	Konklusion og perspektivering.....	31
7.1	Fremadrettede perspektiver.....	35
7.2	Afsluttende bemærkninger.....	36
	Referencer.....	37
	Forudsætninger og kontakt.....	39

1 Resumé

Denne rapport præsenterer en kvantitativ analyse af værdien af forbrugsfleksibilitet (flexumers) i hovedstadsområdet fjernvarmesystem, der dækker forbrugsområderne for HOFOR, CTR, VEKS og Vestforbrændingen. Dette detaljerede systemperspektiv sikrer, at analysen indfanger komplekse systemeffekter og den værdi som flexumers skaber på tværs af produktion, transmission og distribution.

Analysen er udarbejdet af Energy Modelling Lab ApS for HOFOR Fjernvarme som del af Flexumers4Future-projektet, der er et EU-støttet samarbejde mellem HOFOR og Københavns Kommune.

Samlet vurdering

Rapporten tager udgangspunkt i en samlet flexumer-kapacitet på 200 MW. Det svarer til ca. 16 % af det årlige fjernvarmeforbrug i hovedstadsområdet og repræsenterer en indledende implementeringsfase. Det kan groft oversættes til 73.000 ud af de ca. 450.000 husstande i HOFOR's og CTR's forsyningsområde deltager - svarende til ca. 2.000 standard etageboligejendomme.

Analysen viser, at flexumers kan bidrage positivt til fjernvarmesystemet på tværs af driftsforhold. Under normal drift skaber flexumers en estimeret systemgevinst på 17 mio. kr. årligt ved 200 MW kapacitet (spænd: 14,4–19,6 mio. kr.), primært drevet af reducerede flaskehalse og undgået spidslastkapacitet. Under krisescenarier har flexumers en samfundsøkonomisk værdi på 48–116 mio. kr. per hændelse. Nutidsværdien af de kvantificerede gevinster over en 25-årig periode estimeres til 278–481 mio. kr., afhængigt af markedsforhold og den antagne krisehyppighed (se Boks 1).

Hertil kommer ikke-kvantificerede gevinster. Flexumers med indbygget prædiktiv vejrkompensering kan realisere kunders varmebesparelser i størrelsesordenen 3–5%¹. Med de planlagte reduktioner i fremløbstemperatur i de kommende år øges den hydrauliske belastning af fjernvarmenettet, og flexumers' evne til at reducere den samtidige spidsbelastning (samtidighedsfaktoren) kan reducere behovet for kostbare investeringer i netforstærkning.

Analysens resultater peger slutteligt på, at værdien af flexumers forventes at stige i takt med elektrificeringen af fjernvarmesystemet. Med investeringer i varmepumpe- og elkedelkapacitet og reduceret termisk baseload bliver fjernvarmesystemet mere følsomt over for elprisvariationer, og koblingen til eldistributionsnettet stærkere. Intelligent forbrugsfleksibilitet kan i den kontekst bidrage til at navigere i et system, hvor timing af energiforbrug får tiltagende betydning for både økonomi og forsyningssikkerhed - og hvor flexumers også kan aflaste eldistributionsnettet, når lokale flaskehalse kræver, at varmepumper eller elkedler midlertidigt neddrøses.

Marginalværdianalysen viser i samme ombæring, at de første MW flexumer-kapacitet giver det højeste afkast, hvilket understøtter en trinvis implementeringsstrategi, hvor tidlige investeringer kan realisere en høj værdi pr. MW.

¹ https://www.energiforumdanmark.dk/media/vrspbnyx/signaturprojektet_fin-1.pdf

Baggrund og analyseramme

En flexumer er en fjernvarmekunde - typisk en etageejendom, en villa eller en erhvervsbygning - hvis varmecentral kan styres intelligent gennem Internet-of-Things (IoT) opkobling, så bygningens termiske masse udnyttes som et virtuelt varmelager. Dette sker ved at forvarme bygninger i perioder med lav systembelastning eller udskyde varmekonsum i perioder med høj belastning, så tusindvis af bygninger tilsammen fungerer som en fleksibel ressource for fjernvarmesystemet. Under normale driftsforhold sker dette uden mærkbar komfortpåvirkning for bygningens brugere.

Analysen tager udgangspunkt i hovedstadens fjernvarmesystem som det så ud i 2025, og på denne baggrund kvantificeres den værdi, flexumers kunne have skabt, hvis de var indgået som en del af systemet.

Analysen kvantificerer værdien af flexumers for fjernvarmesystemet i 2025 gennem tre komplementære tilgange alle baseret på energisystemsmodellen TIMES-VL:

1. Fokus på den marginale værdi af den første flexumerkapacitet.
2. Fokus på at forstå robustheden af den værdi som 200 MW flexumers skaber under forskellige markedsforhold baseret på 48 Monte Carlo-simuleringer til estimering af sandsynligheden for forskellige udfald i systemet.
3. Fokus på den værdi flexumers kan skabe i et konkret krisescenarie ved at kunder står helt uden varme i længere tid.

De gevinster der kvantificeres i denne analyse, opgør den samlede bruttosystemværdi af flexumers for fjernvarmesystemet.

Fordi fjernvarme i Danmark er omkostningsreguleret efter hvile-i-sig-selv-princippet, vil besparelserne komme fjernvarmekunderne til gode gennem lavere varmepriser.

Analysen omfatter ikke omkostninger til etablering og drift af flexumer-infrastrukturen eller kompensation til de bygningsejere, der stiller forbrugsfleksibilitet til rådighed. En del af den kvantificerede systemværdi skal anvendes til disse formål.

Den samlede bruttosystemværdi angiver dermed det økonomiske råderum, inden for hvilket implementering af flexumers kan skabe nettoværdi for fjernvarmesystemet og dets kunder.

Marginalværdi: De første MW er mest værdifulde

Analysen af den marginale værdi af flexumers for hovedstadens fjernvarmesystem viser, at værdien pr. MW flexumer-kapacitet er højest ved lave kapacitetsniveauer og aftager i takt med udrulningen.

Ved 20 MW flexumers, hvilket groft skønnes at svare til 200-300 standard etageboligejendomme i CTR's og HOFOR's forsyningsområder, er den marginale årlige værdi op til ca. 200.000 kr./MW flexumer, mens værdien ved 200 MW flexumers er faldet til ca. 85.000kr./MW.

Den aftagende værdi afspejler, at de mest værdifulde aktiveringer - undgåelse af fossil spidslastproduktion og aflastning af kritiske flaskehalse i fjernvarmenettet - udnyttes fuldt allerede ved moderate kapacitetsniveauer. Den yderligere kapacitet aktiveres primært i mindre kritiske timer med lavere systemværdi.

For implementeringen betyder dette, at selv en begrænset initial udrulning af flexumers kan generere en høj værdi pr. MW. Det reducerer risikoen ved tidlige investeringer og understøtter en

trinvis implementeringsstrategi, hvor erfaringer fra den første fase kan informere den videre udrulning.

Den aftagende marginalværdi pr. MW bør ikke læses som, at gevinsten ved yderligere udrulning er begrænset. Den samlede volumen af flexumer-kapacitet repræsenterer fortsat en væsentlig systemværdi, og samspillet mellem muligheden for både at aflaste systemet i spidstimer og omfordele forbrug til timer med ledig kapacitet på tværs af af værdistrømme betyder, at også de senere MW bidrager meningsfuldt. Derudover kan lokale udfordringer i fjernvarmenettet - flaskehalse og belastningstoppe i afgrænsede områder - afhjælpes ved en geografisk målrettet udrulning, hvor placeringen tilpasses, hvor den lokale værdi er størst.

Systemværdi under normale driftsforhold: 17 mio. kr. årligt

I Monte Carlo-simuleringen estimeres gevinsten af flexumers under normale driftsforhold at spænde mellem 14,4 til 19,6 mio. kr. Spændet afspejler usikkerhed om de fremtidige markedsforhold, som analysen tester systematisk ved at variere tre parametre: elpriser, biomassepriser og rådigheden af centrale produktionsanlæg. I alt giver det 48 scenarier, der tilsammen dækker et bredt udfaldsrum for fjernvarmesystemets normale driftsbetingelser.

Elpriserne er den vigtigste enkeltfaktor. Store udsving i elprisen - som forventes at blive mere udtalte i takt med udbygningen af vindkraft og solenergi - øger værdien af flexumers, fordi de gør det muligt at flytte fjernvarmeproduktion til timer med lave elpriser og udskyde forbrug i timer med høje elpriser. Det er i disse scenarier, at den højeste gevinst opnås (19,6 mio. kr.). Omvendt er gevinsten lavest (14,4 mio. kr.) når elpriserne er generelt lave, fordi der er færre prisspredninger at udnytte.

At gevinsten forbliver på 14,4 mio. kr. selv i det mindst favorable scenarie understreger, at en væsentlig del af flexumers' værdi - primært fra reducerede flaskehalse og undgået spidslastkapacitet - er robust over for markedsforholdene.

Net- og kapacitetsflaskehalse (7,8 mio. kr.) - Fjernvarmesystemet har en begrænset kapacitet til at transportere varme fra produktionsanlæg til forbrugerne. I perioder med høj samtidig efterspørgsel kan der opstå flaskehalse, hvor kapaciteten på kritiske forbindelser i fjernvarmenettet udnyttes fuldt ud. Flexumers reducerer disse spidsbelastninger ved at sprede forbruget over tid og geografi, så den eksisterende infrastruktur udnyttes mere effektivt. Det kan reducere eller udskyde behovet for kostbare investeringer i udbygning af fjernvarmenettet (netforstærkning), som ellers ville være nødvendige for at håndtere de voksende belastninger fra lavere fremløbstemperaturer i de kommende år. Denne værdistrøm er den største enkeltkomponent og udgør gennemsnitligt 7,8 mio. kr. i 2025.

Kapacitetsbesparelser (4,8 mio. kr.) - Fjernvarmesystemet dimensioneres efter den maksimale belastning, som typisk kun optræder i få timer om året. Det kræver fossile spidslastkedler (gas og olie), som er dyre at opretholde i forhold til deres begrænsede driftstid. Flexumers reducerer antallet af timer, hvor spidslastkapacitet er nødvendig, ved at flytte forbrug væk fra de mest belastede perioder. Det reducerer behovet for at opretholde og investere i ny spidslastkapacitet svarende til 27–118 MW, afhængigt af scenariet. Værdien af dette reducerede kapacitetsbehov estimeres til gennemsnitligt 4,8 mio. kr. årligt. Opgjort som sparede investeringsomkostninger til ny spidslastkapacitet svarer det til et samlet beløb på op til 56 mio. kr. baseret på Energistyrelsens Teknologikatalog.

Reduceret CO₂-udledning (2,5 mio. kr.) - Når flexumers reducerer driften af fossile spidslastkedler, reduceres samtidig CO₂-udledningen. Den gennemsnitlige reduktion udgør ca.

3.300 ton CO₂ årligt i 2025. Værdisat til den gældende CO₂-afgift på 761 kr./ton svarer det til en gevinst på gennemsnitligt 2,5 mio. kr. årligt. CO₂-afgiftsniveauet forventes at stige frem mod 2030 som led i den politiske aftale om grøn skattereform, hvilket alt andet lige vil øge denne værdistrøm.

Elmarkedsværdi (1,9 mio. kr.) - Flexumers muliggør en bedre timing af elproduktion fra kraftvarmeanlæg og elforbrug fra varmepumper og elkedler i forhold til variationer i elprisen. Når flexumers forskyder fjernvarmeforbruget, frigøres der kapacitet til at producere og sælge elektricitet i timer med høje elpriser eller til at købe el i timer med lave priser. Dette bidrager gennemsnitligt med 1,9 mio. kr. i 2025, men kan i scenarier med høj elprisvolatilitet nå op mod 5 mio. kr. Omvendt ses den laveste elmarkedsværdi på -3,8 mio. kr. i scenarier med høje biomassepriser, meget volatile elpriser og mange alvorlige havarier, hvor flexumers primært skaber værdi ved at reducere fjernvarmesystems afhængighed af kraftvarmeproduktion, hvilket også medfører lavere elproduktion. Denne værdistrøm er den mest variable på tværs af scenarierne.

Forsyningssikkerhed: Flexumers som krisestyringsværktøj

For at illustrere, hvordan flexumers kan bidrage til forsyningssikkerheden, opstiller rapporten et konkret krisescenarie.

Krisescenariet viser, hvordan flexumers kan afbøde en pressende forsyningssituation og sikre, at færre kunder står helt uden varme i længere tid. Dernæst er det undersøgt, hvad samfundet er villigt til at betale for at undgå et sådant scenarie - dvs. for at opretholde en kontrolleret forsyning til flere fjernvarmekunder. Endelig er resultaterne omregnet til en forventet årlig forsikringsværdi.

I det analyserede krisescenarie - simultane havarier på flere centrale anlæg kombineret med ekstraordinært høj varmeefterspørgsel - kan fjernvarmesystemet ikke dække det samlede varmebehov. Uden flexumer-kapacitet står omkring 34.000 husstande helt uden varme i op til 48 timer. Det samlede omfang af ikke-leveret fjernvarme udgør 13.000 MWh for husholdninger og erhverv i HOFORs og CTRs forsyningsområder, hvoraf husholdninger alene tegner sig for ca. 9.000 MWh.

Med 200 MW flexumer-kapacitet reduceres antallet af berørte husstande fra 34.000 til 21.000, svarende til en 38 % reduktion i den samlede mængde ikke-leveret fjernvarme. Ved en udvidet flexumer kapacitet på ca. 500 MW reduceres antallet af berørte husstande med ca. 31.000 til omkring 3.000, svarende til en 91 % reduktion af det samlede forsyningssvigt.

En central egenskab ved flexumers under krisescenarier er muligheden for aktiv prioritering af forsyningen.

Kritiske kunder - såsom sygehuse, plejehjem og andre samfundsvigtige institutioner - kan sikres kontinuerlig varmforsyning ved at foretage en kontrolleret og midlertidig reduktion af forbruget hos mindre kritiske kunder. Det står i kontrast til et scenarie uden flexumers, hvor forsyningssvigt primært rammer kunder længst fra varmevekslerstationer baseret på hydrauliske forhold, uden mulighed for målrettet prioritering. Analysen viser desuden, at strategisk placering af flexumer-kapacitet - dvs. placering i de forsyningsområder der er mest udsatte for fx transmissionsflaskehalse, kan reducere det nødvendige kapacitetsbehov til ca. 350 MW for at sikre fuld forsyning i det analyserede krisescenarie.

For at sætte en økonomisk værdi på den forsyningssikkerhed, som flexumers bidrager med, er der gennemført en samfundsøkonomisk analyse baseret på benefit transfer-metoden. Analysen

estimerer husholdningers betalingsvillighed (willingness to pay, WTP) for at undgå det analyserede krisescenarie, ved at overføre og justere resultater fra international forskning i værdien af forsyningssikkerhed.

Det samlede velfærdstab for husholdninger i krisescenariet - opgjort som husholdningernes betalingsvillighed for at undgå situationen - estimeres til ca. 126 mio. kr. pr. krisehændelse. Flexumers reducerer dette tab markant: ved 200 MW falder velfærdstabet til 77 mio. kr., og ved ca. 500 MW, svarende til fuld kriedækning, til 11 mio. kr. Værdien af flexumers som kriseberedskab fastsættes dermed til ca. 48 mio. kr. ved 200 MW og ca. 116 mio. kr. ved 500 MW pr. krisehændelse.

Den forventede årlige forsikringsværdi afhænger af, hvor hyppigt krisesituationer af denne karakter forventes at opstå. Ved en returperiode på hvert 10. år svarer det til en forventet årlig værdi på ca. 4,8 mio. kr. for 200 MW-scenariet.

Boks 1: Samlet nutidsværdi af flexumers' kvantificerede gevinster

For at give et samlet billede af den langsigtede økonomiske værdi af flexumers kan de årlige gevinster omregnes til en nutidsværdi. Beregningen anvender en samfundsøkonomisk diskonteringsrente på 3,5% og en antaget levetid for flexumer-infrastrukturen på 25 år, svarende til en nutidsværdifaktor på 16,5.

Driftsoptimering (normal drift)

Den estimerede årlige gevinst ved 200 MW flexumer-kapacitet er 17 mio. kr. (spænd: 14,4–19,6 mio. kr. på tværs af Monte Carlo-scenarierne). Nutidsværdien af denne betalingsstrøm over 25 år udgør ca. 279 mio. kr. i det centrale scenarie. I det konservative scenarie, hvor elpriser og markedsforhold er mindst favorable for flexumers, er nutidsværdien ca. 238 mio. kr., mens den i det høje scenarie udgør ca. 323 mio. kr.

Forsikringsværdi (krisescenarier)

Den estimerede værdi af at undgå forsyningssvigt udgør ca. 48 mio. kr. per krisehændelse ved 200 MW flexumer-kapacitet. Den forventede årlige forsikringsværdi afhænger af, hvor hyppigt sådanne krisesituationer forventes at opstå:

Interval mellem krisescenarier	Forventet årlig værdi	Nutidsværdi over 25 år
Konservativt (1-i-20 år)	2,4 mio. kr.	40 mio. kr.
Centralt (1-i-10 år)	4,8 mio. kr.	78 mio. kr.
Højt (1-i-5 år)	9,6 mio. kr.	158 mio. kr.

Samlet nutidsværdi

Den samlede nutidsværdi af de kvantificerede gevinster ved 200 MW flexumer-kapacitet estimeres til mellem 278 og 481 mio. kr. over 25 år, afhængigt af den antagne krisehyppighed.

Scenarie	Driftsoptimering	Forsikringsværdi	Samlet nutidsværdi
Konservativt	238 mio. kr.	40 mio. kr.	278 mio. kr.
Centralt	279 mio. kr.	79 mio. kr.	358 mio. kr.
Højt	323 mio. kr.	158 mio. kr.	481 mio. kr.

Note: konservativt kombinerer laveste Monte Carlo gevinst med 1-i-20-års krisehyppighed, og højt kombinerer højeste Monte Carlo gevinst med 1-i-5-års krisehyppighed.

Beregningen omfatter alene bruttosystemværdien. Omkostninger til etablering og drift af flexumer-infrastrukturen samt kompensation til deltagende bygningsejere er ikke inkluderet, da disse afhænger af den konkrete implementerings- og forretningsmodel. Nutidsværdien bør derfor fortolkes som det samlede økonomiske råderum for flexumer-implementering - dvs. den øvre grænse for, hvad der samlet kan investeres i infrastruktur, drift og kompensation, før flexumers ophører med at være en nettogevinst for fjernvarmesystemet.

2 Baggrund og formål

Med den stigende elektrificering af fjernvarmeproduktionen gennem varmepumper og elkedler samt den øgede anvendelse af vedvarende energi, opstår et øget behov for fleksibilitet i fjernvarmesystemet. Samtidig kobles fjernvarme- og elsystemet tættere sammen, og belastningen af eldistributionsnettet stiger i takt med, at varmeproduktionen flyttes fra termiske anlæg til elbaserede teknologier. Flexumers repræsenterer i den sammenhæng et potentiale for systemoptimering på tværs af sektorerne, dvs. fjernvarmekunder der via deres bygninger og online varmecentraler kan stille aggregeret varme-fleksibilitet til rådighed for både fjernvarme- og elsystemet.

Denne rapport giver HOFOR Fjernvarme et kvantitativt grundlag for vurdering af investeringer i flexumer-teknologi, udvikling af forretningsmodeller samt prioritering af implementeringsområder. Rapporten bidrager dermed til forståelsen af, hvordan forbrugsfleksibilitet kan styrke fjernvarmens konkurrenceevne og understøtte den grønne omstilling og elektrificeringen af fjernvarmesystemet i hovedstadsområdet.

Den samlede analyseopgave

Analysen er gennemført af Energy Modelling Lab ApS for HOFOR Fjernvarme som del af Flexumers4Future-projektet og omfatter tre komplementære tilgange:

En marginalværdianalyse, der kvantificerer den trinvis systemværdi af flexumers ved stigende kapacitetsniveauer fra 20 MW til over 200 MW, og dermed belyser, hvornår de mest værdifulde aktiveringer er udnyttet.

En systemanalyse baseret på energisystemsmodellen TIMES-VL med Monte Carlo-simuleringer af 48 scenarier, der kvantificerer flexumers' driftsøkonomiske værdi under varierende elpriser, biomassepriser og anlægssikkerhed - herunder et dedikeret forsyningskrisescenarie med simultane havarier under en ekstrem kuldeperiode.

En samfundsøkonomisk værdisætning af flexumers' bidrag til forsynings sikkerheden, baseret på benefit transfer-metoden, der estimerer husholdningernes betalingsvillighed for at undgå de analyserede krisescenarier.

Som grundlag for analysen er TIMES-VL blevet opdateret til at repræsentere fjernvarmesystemet i 2025 med forudsætninger baseret på Klimastatus- og fremskrivning 2025 (KF25). Analysen fokuserer på resultater for 2025, men den bagvedliggende analyse peger på at behovet for fleksibilitet vil stige i takt med den fortsatte elektrificering af fjernvarmesystemet.

Analysen opgør alene bruttosystemværdien af flexumers og omfatter ikke omkostninger til etablering og drift af flexumer-infrastrukturen.

De analyserede værdistrømme

Flexumers kan aktiveres under to fundamentalt forskellige betingelser, som påvirker hvilke typer fleksibilitet der er tilgængelige: Normale driftsforhold og Ikke-planlagte havarisituationer.

Under normale driftsforhold med forudsigelig efterspørgsel og kendte elprisvariationer kan flexumers anvendes strategisk til både opladning (forvarmning af bygninger) og afladning (udskydelse af varmekonsum). Dette muliggør optimering omkring planlagte forbrugsspidser og

kendte høje elpriser, hvor systemet kan "forberede" sig ved at forvarme bygninger i timer med lavere elpriser eller lavere systembelastning.

Uforudsete driftsforstyrrelser dækker over et bredt spektrum af hændelser - fra mindre afvigelser som målerfejl, uventede udsving i udetemperaturen, prognoseafvigelser og kortvarige forsinkelser i produktionen, til mere alvorlige hændelser som havarier på produktionsanlæg eller transmissionsnet. Fælles for hændelserne er, at det ikke er muligt at oplade flexumers strategisk forud for hændelsen. I disse situationer kan flexumers bidrage ved at udskyde forbrug - det vil sige ved at udnytte den termiske masse i bygningerne til midlertidigt at acceptere mindre levering af fjernvarme. Ved de almindelige driftsforstyrrelser sker dette uden mærkbar påvirkning af kundernes komfort, mens et mærkbart komforttab kun vil forekomme ved ekstreme hændelser. Under begge typer betingelser kan flexumers skabe økonomisk og systemisk værdi, men gennem forskellige mekanismer. Ved normale driftsforhold skabes værdi primært gennem optimering af driftsomkostninger og udnyttelse af elprisvariationer, mens værdien under havarisituationer primært ligger i at sikre forsyningssikkerhed og rationere tilgængelig kapacitet.

Rapporten kvantificerer følgende værdistrømme:

1. **CO₂-reduktion** - Flexumers reducerer behovet for drift af fossile spidslastkedler (gas/olie) ved at flytte fjernvarmeforbrug til perioder med lavere systembelastning, hvilket medfører reducerede CO₂-udledning.
2. **Kapacitetsbesparelser** - Fjernvarmesystemet dimensioneres efter den maksimale belastning, som typisk kun optræder i få timer om året. Det kræver fossile spidslastkedler (gas og olie), som er dyre at opretholde i forhold til deres begrænsede driftstid. Flexumers reducerer antallet af timer, hvor spidslastkapacitet er nødvendig, ved at flytte forbrug væk fra de mest belastede perioder. Det reducerer behovet for at opretholde og investere i ny spidslastkapacitet
3. **Elmarkedsværdi** - Flexumers muliggør en bedre timing af elproduktion fra kraftvarmeanlæg og elforbrug fra varmepumper og elkedler i forhold til variationer i elprisen. Når flexumers forskyder fjernvarmeforbruget, frigøres der kapacitet til at producere og sælge elektricitet i timer med høje elpriser eller til at købe el i timer med lave priser.
4. **Net- og kapacitetsflaskehalse** - Fjernvarmesystemet har en begrænset kapacitet til at transportere varme fra produktionsanlæg til forbrugerne. I perioder med høj samtidig efterspørgsel kan der opstå flaskehalse, hvor kapaciteten på kritiske forbindelser i fjernvarmenettet udnyttes fuldt ud. Flexumers reducerer disse spidsbelastninger ved at sprede forbruget over tid, så den eksisterende infrastruktur udnyttes mere effektivt. Det kan reducere eller udskyde behovet for kostbare investeringer i udbygning af fjernvarmenettet (netforstærkning), som ellers ville være nødvendige for at håndtere de voksende belastninger fra lavere fremløbstemperaturer i de kommende år.
5. **Forsyningssikkerhed** - Under kritiske driftsforstyrrelser kan flexumers rationere fjernvarmeforbruget og prioritere kritiske kunder (sygehuse, plejehjem), hvilket reducerer omfanget af forsyningssvigt og fordeler belastningen mere ligeligt på tværs af forbrugsområder.

3 Metode og tilgang

Analysen er baseret på energisystemsmodellen TIMES-VL, som tidligere er anvendt til at analysere lastfordelingsmetoder i hovedstadsområdet fjernvarmesystem i 2030². Modellen opererer på timeniveau og inkluderer:

- Detaljeret repræsentation af det københavnske fjernvarmesystem
- Individuelle varmeproducerende anlæg og fjernvarmenet med kapacitetsbegrænsninger
- Varmelagre og forbrugsområder

For at kunne lave analysen for HOFOR er TIMES-VL blevet opdateret, så den repræsenterer 2025. Modellens antagelser er baseret på Klimastatus- og fremskrivning 2025 (KF25), og aktiviteten på affaldsværker forudsættes niveau-mæssigt at svare til Energiproducenttællingen i 2024 (Energi styrelsen, n.d.).

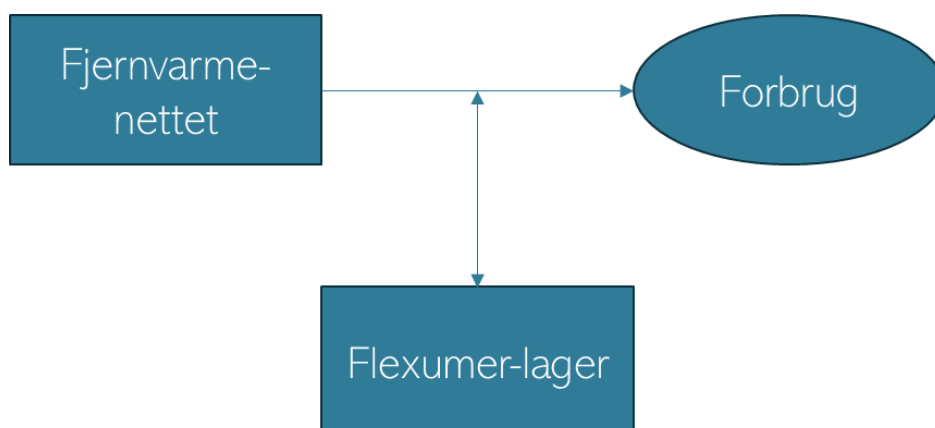
Fjernvarmesystemet i hovedstadsområdet står over for en række strukturelle ændringer i de kommende år, som forventes at øge værdien af forbrugsfleksibilitet. Overgangen til lavere fremløbstemperaturer reducerer den hydrauliske kapacitet i det eksisterende fjernvarmenet og øger dermed risikoen for transmissionsflaskehalse i spidslastperioder. Samtidig foregår en omfattende elektrificering af varmeproduktionen med betydelige investeringer i varmepumpe- og elkedelkapacitet, som gør fjernvarmesystemets driftsøkonomi mere følsom over for elprisvariationer. Hvis et eller flere centrale kraftvarmeanlæg samtidig lukkes eller får reduceret drift, øges afhængigheden af el-baseret produktion yderligere. I den kontekst kan flexumers spille en voksende rolle - dels ved at aflaste transmissionsflaskehalse gennem udjævning af samtidige forbrugsspidser, dels ved at optimere driften af el-baserede anlæg i forhold til elprisen.

Værdien af flexumers i det fremtidige fjernvarmesystem er ikke kvantificeret i denne analyse på grund af den betydelige usikkerhed om graden af elektrificering af fremtidens sammenhængende fjernvarmesystem i hovedstadsområdet. Analysens resultater for 2025 peger dog på, at de værdistrømme, der drives af elprisvariationer og spidslastoptimering, vil styrkes i takt med elektrificeringen, hvilket indikerer en stigende systemværdi af flexumers i de kommende år.

3.1 Inkludering af flexumers

Flexumers modelleres som lagringsteknologier med specificeret effekt, kapacitet og varighed i enkelte forbrugsområder, hvor fleksibilitet kan aktiveres med tilknyttede omkostninger. Figur 1 viser, hvordan sammenhængen er mellem fjernvarmenettet og forbruget. Fra fjernvarmenettet kan forbruget udtages direkte, eller flexumers kan bruges til en midlertidig forskubning af forbruget – enten ved forvarmning af bygningen eller ved at udskyde varmebehovet.

² Se <https://www.varmelast.dk/-/media/varmelast/dokumenter/eml-lastfordeling-efter-kontraktpriser-v2.pdf>



Figur 1: Skitsering af hvordan flexumers modelleres

Fleksibiliteten, der kan udnyttes, afhænger af hvilken forbrugstype, der er tale om. Efterspørgslen i hvert forbrugsområde er derfor opdelt på tre forbrugstyper - etageejendomme, villaer og erhverv - med to formål: dels at afspejle den overordnede fordeling af fjernvarmeforbruget på bygningstyper, dels at fange at forskellige bygningstyper har forskellige potentialer for at forskyde forbrug. Erhvervsbygninger vurderes at have et lavere fleksibilitetspotentiale end boliger i etageejendomme og villaer, da driftsmønstre og komfortkrav vurderes at være mindre fleksible.

Da det ikke var muligt at foretage en detaljeret kortlægning af den faktiske bygningssammensætning i hvert enkelt forbrugsområde, er der anvendt en ensartet fordelingsantagelse på tværs af alle områder. Denne forenkling vurderes at have begrænset betydning for analysens samlede resultater, da modellen opererer på systemniveau, og den samlede flexumer-kapacitet og -aktivering i højere grad er bestemt af de systemiske driftsbetingelser (elpriser, anlægsrådighed og netbegrænsninger) end af den lokale fordeling af forbrugstyper inden for det enkelte område.

For hver forbrugstype udnyttes information om fleksibiliteten af flexumers, hvilket repræsenteres af, hvor mange timer forbruget kan skubbes og hvor stor en andel af det samlede forbrug, der kan skubbes. Dette er givet i Tabel 1. For eksempel skønnes etageejendomme at udgøre ca. 60% af fjernvarmeforbruget og at op til 24% af fjernvarmeforbruget i en given time kan udskydes eller fremrykkes med op til 5 timer. Parametrene repræsenterer et forsigtigt gennemsnitligt skøn.

Erfaringer fra pilotprojekter med flexumer-teknologi indikerer, at det faktiske fleksibilitetspotentiale kan være højere end de anvendte værdier. Men en mere præcis vurdering af fleksibilitetspotentialet forudsætter analyse af konkrete bygninger, hvilket ikke er foretaget i nærværende analyse.

Tabel 1: Fordeling af fjernvarmeforbruget oversigt over fleksibiliteten af flexumers på forbrugstype

Forbrugstype	Andel af det samlede fjernvarmeforbrug	Fleksibilitet: Antal timer	Andel af forbruget på timeniveau
Etageejendomme	60%	Op til 5	Op til 24%
Villaer	10%	Op til 5	Op til 24%
Erhverv	30%	Op til 3	Op til 24%

For at modellere et realistisk flexumers-potentiale implementeres tekniske begrænsninger i TIMES-VL. Modellen forudsætter en samlet flexumer-kapacitet på 200 MW, svarende til en indledende

implementeringsfase. Det skønnede kapacitetsniveau svarer til op til 16% af det gennemsnitlige årlige fjernvarmeforbrug i TIMES-VL, hvilket med stor forsigtighed kan oversættes til ca. 73.000 ud af ca. 457.000 husstande i de fem kommuner som forsynes af CTR/HOFOR³.

I modellen opnås dette implementeringsniveau gennem to mekanismer:

- Faste årlige omkostninger på 9.000 kr./MW begrænser den samlede kapacitet, som modellen kan investere i, til 200 MW.
- Variable omkostninger på 0,5 kr./MWh begrænser den gennemsnitlige aktivering af flexumers til 1.500 fuldlasttimer årligt, hvilket sikrer, at flexumers kun aktiveres i en afgrænset del af året til forbrugsudjævning.

Tilsammen forhindrer disse begrænsninger, at modellen overvurderer værdien af flexumers. Uden en aktiveringsomkostning vil en optimeringsmodel udnytte flexumers i enhver time, hvor selv den mindste systemgevinst kan opnås - også justeringer så små, at de i praksis ikke ville retfærdiggøre den nødvendige kommunikation, styring og komfortpåvirkning hos kunderne.

Omkostningsparameteren sikrer, at modellen kun aktiverer flexumers, når systemgevinsten er tilstrækkelig til at opveje en realistisk aktiveringsbarriere.

Omkostningsparametrene skal ikke fortolkes som faktiske markedspriser, men som modeltekniske forudsætninger, der afspejler en indledende implementeringsfase og sikrer, at TIMES-VL opererer inden for teknisk og kommercielt plausible rammer. Kapacitetsbegrænsningen på 200 MW ved 1.500 fuldlasttimer svarer til en aggregeret fleksibilitet på cirka 3% af det samlede fjernvarmeforbrug i hovedstadsområdet.

For at belyse potentialet under mere modne implementeringsscenarier er der gennemført en følsomhedsanalyse med halverede omkostningsparametre (4.500 kr./MW og 0,25 kr./MWh). Lavere omkostninger kan afspejle skalaøkonomi og teknologisk modenhed, der reducerer barriererne for implementering. I denne følsomhed investerer modellen i op mod 500 MW flexumer-kapacitet, hvilket skønnes at svare til op til 40% af det gennemsnitlige årlige fjernvarmeforbrug i i TIMES-VL.

3.2 Analyser: Scenarier og følsomhedsanalyse

Analysen af flexumers' systemværdi gennemføres via tre komplementære tilgange, der tilsammen dækker hele spektret fra den marginale investeringsbeslutning over daglig drift med realistisk usikkerhed til ekstreme krisesituationer:

- I. Marginalværdianalysen (afsnit 4) isolerer den marginale systemværdi pr. MW flexumer-kapacitet ved fire kapacitetsniveauer (20, 50, 100 og 200 MW). Formålet er at besvare, hvornår investeringen i de første MW giver størst afkast, og hvordan værdien udvikler sig i takt med at kapaciteten udvides.
- II. Monte Carlo-scenarier (afsnit 5) kvantificerer flexumers' værdi under realistiske driftsforhold, hvor usikkerheden i markedsparametre og anlægsrådighed afspejler det normale driftsspektrum. Gennem systematisk variation af elpriser, biomassepriser og anlægsrådighed evalueres flexumers' bidrag på tværs af 48 scenarier for 2025. Monte

³ Analysen af flexumers i modellen dækker også VEKS og Vestforbrændingens forsyningsområder.

Carlo-tilgangen fanger dermed både den daglige optimeringsværdi fra prisvolatilitet og forbrugsudjævning og værdien under uforudsete - men realistiske - driftsforstyrrelser som havarier og kapacitetsudfald.

- III. Forsyningskrisescenariet (afsnit 6) går ud over det normale driftsspektrum og tester flexumers' rolle under ekstremt systemstress, hvor den samlede produktions- og transmissionskapacitet ikke kan dække varmeefterspørgslen. Her skifter spørgsmålet fra optimering af omkostninger og CO₂-udledning til, hvordan tilgængelig varmekapacitet bedst fordeles for at minimere samfundsmæssige konsekvenser. Formålet med forsyningskrisescenariet er at vurdere, i hvilket omfang flexumers kan anvendes til intelligent rationering af varmemforsyningen under kritiske kapacitetsmangel-situationer. Specifikt undersøges det, om flexumers kan reducere antallet af timer, hvor husholdninger står helt uden varmeleverance, ved at muliggøre midlertidig udskydelse af forbrug i ikke-kritiske områder og dermed frigøre kapacitet til kritiske forbrugere. Resultaterne fra krisescenariet værdisættes efterfølgende samfundsøkonomisk ved hjælp af benefit transfer-metoden, som estimerer husholdningernes betalingsvilje for at undgå forsyningsafbrydelser.

Tilsammen giver de tre analysetilgange et omfattende billede af flexumers' værdi - fra løbende systemoptimering under normale driftsforhold til kritisk sikkerhedsressource under ekstreme kritesituationer.

4 Marginalværdianalyse

Før vi ser på den samlede systemværdi ved 200 MW, er det relevant at spørge: Hvad er den første MW flexumer-kapacitet værd sammenholdt med et fjernvarmesystem uden flexumers? Og hvordan ændrer værdien sig i takt med udrulningen? Svarene er afgørende for at vurdere, om det er attraktivt at påbegynde implementeringen, og om en trinvis udrulning giver mening.

4.1 Metode

Marginalværdianalysen er baseret på TIMES-VL-kørsler ved fire forskellige kapacitetsniveauer: 20, 50, 100 og 200 MW. For hvert niveau beregnes den samlede systemværdi af flexumers, og den gennemsnitlige værdi pr. MW installeret kapacitet opgøres. Ved at sammenligne værdierne på tværs af kapacitetsniveauer kan den aftagende marginalværdi kvantificeres.

Analysen anvender de samme forudsætninger som hovedanalysen (kapitel 3), herunder de Monte Carlo-scenariernes centrale parametervalg for elpriser, biomassepriser og anlægsrådighed.

4.2 Værdi af flexumers i den marginale analyse

Tabel 2 viser den gennemsnitlige årlige værdi pr. MW flexumer-kapacitet ved de fire analyserede kapacitetsniveauer. Tabellen viser at værdien pr. MW er højere for den første flexumer kapacitet i modellen aftager gradvist i takt med udrulningen. Ved 20 MW er den gennemsnitlige årlige værdi ca. 200.000 kr./MW. Ved 200 MW er den faldet til ca. 85.000 kr./MW. Værdien pr. MW ved det laveste analyserede kapacitetsniveau er dermed 2,4 gange højere end ved 200 MW. Den samlede årlige systemværdi stiger imidlertid fra 4,0 mio. kr. ved 20 MW til 17 mio. kr. ved 200 MW. Selvom marginalværdien pr. MW aftager, vokser den samlede gevinst for fjernvarmesystemet altså fortsat markant med øget kapacitet.

Tabel 2 Værdien af flexumer-kapacitet som funktion af installeret kapacitet

Flexumer-kapacitet	Værdi pr. MW	Samlet årlig systemværdi
20 MW	ca. 200.000 kr./MW	4,0 mio. kr.
50 MW	ca. 129.000 kr./MW	6,5 mio. kr.
100 MW	ca. 100.000 kr./MW	10 mio. kr.
200 MW	ca. 85.000 kr./MW	17 mio. kr.

Den aftagende marginalværdi kan forklares ved tre samvirkende mekanismer.

For det første reducerer de første MW flexumers de dyreste spidslastaktiveringer. Fossile spidslastkedler (gas og olie) anvendes kun i få timer om året, men til høje marginalomkostninger. Flexumers eliminerer de timer med højest marginalomkostning først. Når disse timer er dækket, aktiveres yderligere kapacitet i timer med lavere marginalomkostninger og dermed lavere systemværdi.

For det andet aftager værdien af flaskehalsaflastning. De mest kritiske flaskehalse i fjernvarmenettet - typisk transmissionsforbindelser under spidsbelastning - aflastes effektivt af de første MW flexumers. Yderligere kapacitet aflaster mindre belastede forbindelser, hvor den sparede omkostning er lavere.

For det tredje reduceres elmarkedsværdien pr. MW. Flexumers' evne til at flytte fjernvarmeproduktion til timer med favorable elpriser er mest værdifuld for de første MW, som kan udnytte de største prisspredninger. Yderligere kapacitet udnytter progressivt mindre prisspredninger, fordi de mest profitable tidsforskydninger allerede er udnyttet.

4.3 Implikationer for implementering

Marginalværdianalysen peger på tre centrale indsigter for implementeringen af flexumers som beredskabsressource i Storkøbenhavns fjernvarmesystem.

Det understøtter en tidlig investering. De første MW flexumer-kapacitet vil typisk være forbundet med højere implementeringsomkostninger og -risiko, da teknologien endnu ikke har opnået skalafordele og driftserfaringer er begrænsede. Marginalanalysen viser imidlertid, at den potentielle systemgevinst pr. MW netop er højest ved lave kapacitetsniveauer. Den højere forventede gevinst kan dermed bidrage til at opveje højere omkostninger og risici forbundet med implementering af de første flexumers.

Det understøtter en trinvis implementeringsstrategi. En udrulning i faser gør det muligt at høste erfaringer med flexumer-teknologien og dens integration i fjernvarmesystemet, samtidig med at en væsentlig andel af den samlede systemværdi realiseres. Den marginale analyse peger på, at 50 MW allerede realiserer ca. 39% af den samlede systemværdi ved 200 MW.

Marginalværdien forbliver positiv. Det indikerer, at systemet har et vedvarende behov for yderligere fleksibilitet, og at udvidelser ud over en initial fase fortsat vil generere systemværdi - om end med et lavere afkast pr. MW. Hvorvidt dette lavere afkast er tilstrækkeligt til at retfærdiggøre

implementeringsomkostningerne, afhænger af den konkrete omkostningsstruktur for flexumer-infrastrukturen.

Den aftagende men vedvarende marginalværdi etablerer, at flexumers har en robust systemværdi over et bredt kapacitetsspænd. I det følgende kapitel undersøges den samlede værdi ved 200 MW i detaljer, herunder hvordan systemværdien fordeles sig på de fire overordnede værdistrømme.

5 Systemværdi under normale driftsforhold

Monte Carlo-simulering er en statistisk metode, der kvantificerer usikkerhed ved systematisk at variere centrale input-parametre over et stort antal modelkørsler. Hver kørsel repræsenterer ét muligt udfald af de usikre parametre, og tilsammen giver kørslerne et billede af både de typiske og de mere kritiske systemtilstande, som fjernvarmesystemet kan opleve. Alle systemtilstand forudsættes dog at afspejler normale driftsforhold.

Traditionelle energisystemsmødelles opererer typisk med deterministiske optimeringer baseret på perfekt forudseenhed og gennemsnitlige parameterverdier. Dette skaber tre fundamentale udfordringer for flexumers-analyse:

- Forudseenhed: Mødellesne "ved" på forhånd, hvornår der vil opstå spidsbelastning, havarier eller prisekstremes, hvilket gør det muligt at optimere produktionen perfekt. I virkeligheden aktiveres flexumers netop i situationer med usikkerhed og uforudsete hændelser.
- Gennemsnitsfælden: Standardmodellering med gennemsnitspriser og -belastninger kan ikke fange flexumers' værdi, som netop kommer fra deres evne til at reagere på ekstreme situationer og prissvingninger.
- Mangel på systemstress: Uden realistisk modellering af simultane havarier og ekstreme vejrforhold undervurderes flexumers' rolle som kritisk backup-ressource.

Monte Carlo-simuleringerne imødegår disse problemer på følgende måder:

- Realistisk usikkerhed: Ved at variere elpriser, biomassepriser og anlægsrådighed samtidigt skabes forskellige systemtilstande, herunder de sjældne men kritiske situationer, hvor flexumers har størst værdi.
- Ekstremverdier: Mens gennemsnitlige elpriser ikke viser flexumers' potentiale, fanger Monte Carlo-simuleringerne situationer med både negative priser og ekstreme spidsbelastningspriser, hvor flexumers kan skabe betydelig værdi.
- Simultane systemudfordringer: Simuleringerne kan modellere realistiske "perfect storm"-scenarier, hvor f.eks. fjernvarme transmission kapacitet og flere centrale kraftvarme anlæg er ude af drift samtidigt under ekstreme kuldeperioder – situationer som flexumers er designet til at håndtere.

Monte Carlo tilgang gør det muligt at kvantificere både flexumers hyppige bidrag til systemoptimering og deres kritiske rolle som "forsikring" i lavfrekvente højkonsekvens-situationer - en værdi der ikke fanges i standard energisystemsoptimering.

- I Monte Carlo scenarierne forudsættes det, at modellen ikke kan forudse havarier og derfor ikke strategisk kan oplade flexumers forud for driftsforstyrrelser. Dette sikrer en realistisk vurdering af flexumers' værdi under både normale og kritiske forhold. For krisescenariet i afsnit 3.2 implementeres denne begrænsning eksplicit ved at forhindre forvarmning af

bygninger i timerne umiddelbart før havariscenariet starter (time 1-5), hvorved modellen ikke kan "spekulere" i at forvarme bygninger for at imødegå det kommende havari.

5.1 Monte Carlo scenarier

For at analysere flexumers rolle i varmesystemet gennemføres komparative scenarier med og uden flexumer-aktivering, hvilket muliggør direkte kvantificering af den økonomiske gevinst ved at implementere forbrugsfleksibilitet.

Monte Carlo simuleringerne evaluerer flexumers' værdi under usikkerhed ved at variere biomassepriser, elpriser og rådigheden af centrale anlæg simultant. De testede parameters variationer kan ses i Tabel 3. I alt generer Monte Carlo-tilgangen 24 parameterkombinationer, som løses med og uden flexumers for år 2025 – samlet 48 scenarier.

Tabel 3: Parametre i Monte Carlo analysen

Parametre	Variationer
Biomassepriser	• Basis • Høj – 25% højere
Elpriser	• Basis • Lav – 70% af basis • Høj – 130% af basis • Høj varians – 2 gange afvigelse fra gennemsnit
Rådighed af centrale anlæg	• Basis – 90% rådighedsfaktor og revisionsuger i sommerperioden. • Som basis, men 3 centrale anlæg, hver ude i en sammenhængende uge – de andre anlæg kan ikke køre de 10 timer efter udetiden starter • Som ovenfor, men ét centralt anlæg ude i 8 uger i træk overlappende med nedetiden for 2 andre centrale anlæg

Biomassepriser varieres med en følsomhed, hvor priserne på træflis og træpiller øges med 25% for at teste systemets robusthed overfor stigende brændselspriser. Dette er relevant, da kraftvarmeproduktion baseret på biomasse udgør en betydelig andel af varmeproduktionen i hovedstadsområdet, og prisudviklingen på biomasse er behæftet med usikkerhed.

Elpriser testes i fire variationer for at belyse flexumers' værdi under forskellige markedsforhold. Udover basisscenariet analyseres både et lavt prisscenarie (70% af basis) og et højt prisscenarie (130% af basis) for at afspejle usikkerhed omkring den fremtidige gennemsnitlige elpris. Derudover testes et scenarie med høj elprisvolatilitet, hvor prisafvigelserne fra gennemsnittet fordobles, mens gennemsnitsprisen fastholdes. Dette scenarie belyser flexumers' værdi i et elsystem med øget vedvarende energi og dermed større prissvingninger mellem perioder med meget høj og meget lav elproduktion.

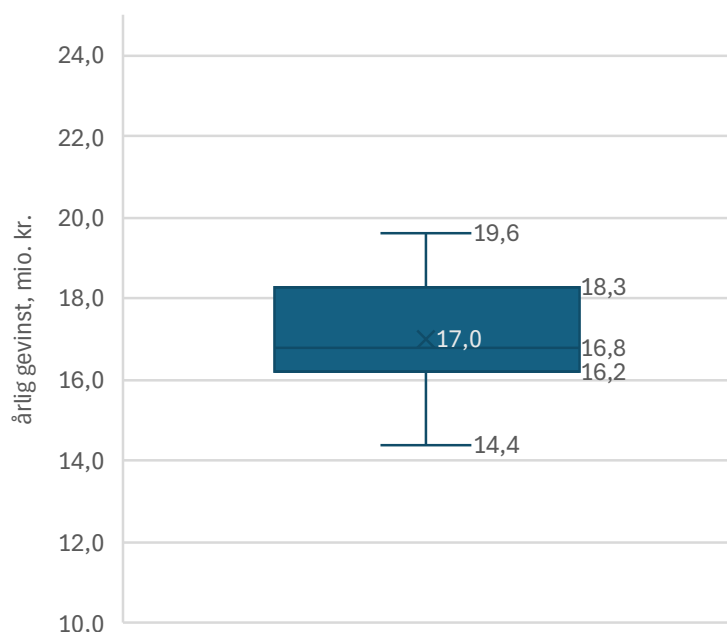
Rådigheden af centrale anlæg modelleres i tre variationer. I basisscenariet er kapacitetsfaktoren sat til 90% for alle centrale kraftvarmeanlæg, hvilket afspejler effekten af mindre, hyppigt forekommende havarier og driftsforstyrrelser gennem varmesæsonen. Disse små havarier kan typisk håndteres inden for timer eller få dage og repræsenterer den normale usikkerhed i systemets drift. Udover denne generelle nedjustering inkluderer modellen også planlagte revisionsperioder for hvert anlæg - perioder, hvor anlægget tages ud af drift med henblik på omfattende vedligeholdelsesarbejde. De to øvrige variationer for anlægsrådighed tester

længerevarende havarisituationer, hvor 3 centrale kraftvarmeanlæg er ude af drift i forlængede perioder. Dette belyser flexumers' værdi som backup-ressource under større systemudfordringer, hvor konventionelle sikkerhedsmarginaler udfordres.

5.2 Samlet systemværdi af flexumers under normale driftsforhold

Monte Carlo-analysen kvantificerer flexumers' værdi ved at sammenligne 24 scenarier med og 24 scenarier uden flexumers - samlet 48 kørsler - der varierer elpriser, biomassepriser og anlægsrådighed. For hvert scenariepar opgøres forskellen i systemomkostninger, hvilket giver et direkte mål for den økonomiske gevinst ved flexumers under de pågældende markedsforhold. Resultaterne viser både den samlede gevinst og de underliggende værdistrømme, der driver den - fra kapacitetsbesparelser og CO₂-reduktion til elmarkedsoptimering og aflastning af netflaskehalse.

Ved et flexumer-potentiale på 200 MW estimeres den samlede årlige gevinst for fjernvarmesystemet til 17 mio. kr. i 2025. Resultatet er baseret på den gennemsnitlige værdi fra Monte Carlo-analysens 24 scenariepar, som tilsammen dækker et bredt udfaldsrum for fjernvarmesystemets driftsbetingelser. Figur 2 illustrerer at spændet fra Monte Carlo-analysen går fra 14,4 til 19,6 mio. kr. Spændet afspejler usikkerhed om de fremtidige markedsforhold, som analysen tester systematisk ved at variere elpriser, biomassepriser og rådigheden af centrale produktionsanlæg.



Figur 2 Estimeret gevinst ved flexumers i 2025, mio. kr.

Note: Boxplottene viser gennemsnittet (kryds), median (streg), interkvartilområde (boks, 25.–75. percentil) samt whiskers der dækker 1,5 gange interkvartilafstanden.

Elpriserne er den vigtigste enkeltfaktor

Store udsving i elprisen - som forventes at blive mere udtalte i en fremtid med mere variabel el-produktion og med mere elbaseret varmeproduktion - øger værdien af flexumers, fordi

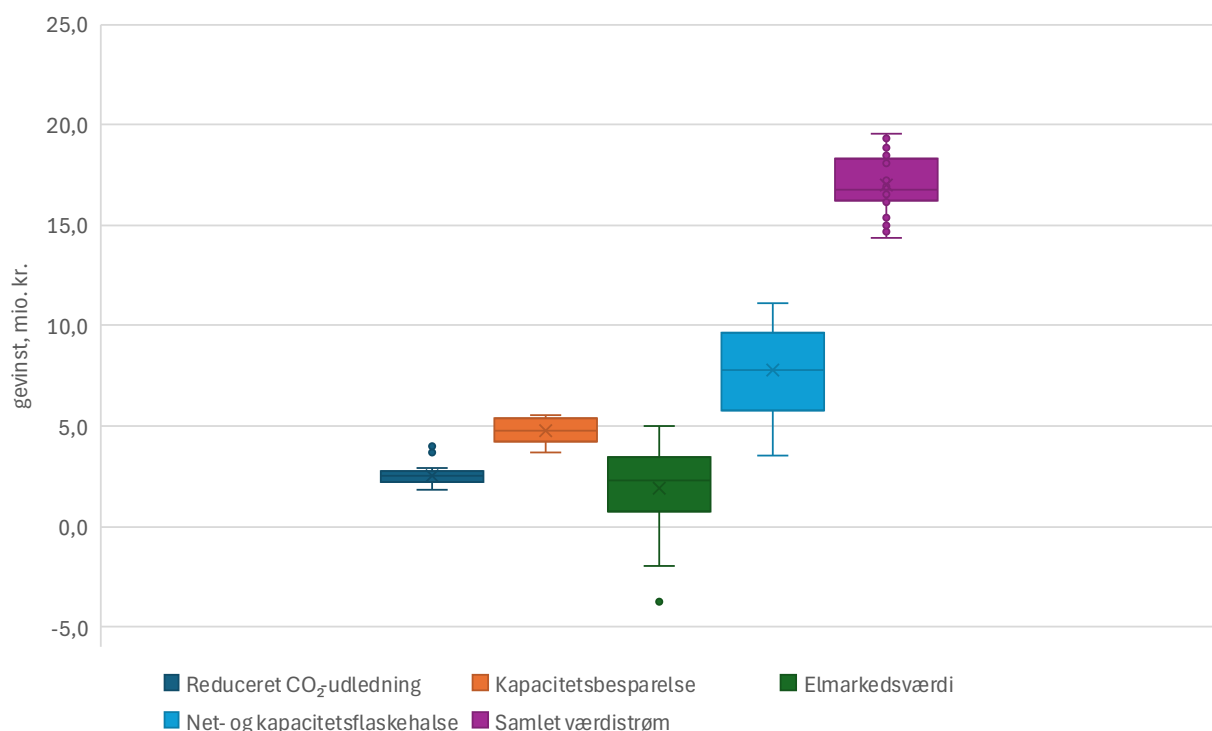
forbrugsforskydning giver forskellige typer anlæg større frihed til at tilpasse sig elpriserne. Konkret gør flexumers det muligt for varmepumper og elkedler at købe el i timer med lave priser, samtidig med at kraftvarmeanlæg kan koncentrere deres produktion i timer med høje elpriser, hvor elsalget er mest værdifuldt. Det er i scenarier med høj elprisvolatilitet, at den højeste gevinst opnås (19,6 mio. kr.), mens gevinsten er lavest (14,4 mio. kr.) når elpriserne er generelt lave og biomassepriser høje, fordi der er færre prisspredninger at udnytte og varmepumperne allerede kører mange timer.

Den lavest gevinst ved flexumers ses i scenariet med høje biomassepriser, mange havarier og lave elpriser. At gevinsten er 14,4 mio. kr. selv i det mindst favorable scenarie understreger, at en væsentlig del af flexumers' værdi - primært fra reducerede flaskehalse og undgået spidslastkapacitet - er robust over for markedsforholdene.

I TIMES-VL aktiveres flexumers svarende til mellem 219.000 og 298.000 MWh. Variationen i aktiveringsomfanget afspejler, at flexumers i scenarier med høj elprisvolatilitet aktiveres hyppigere, fordi der er flere timer hvor tidsforskydning af forbrug skaber systemværdi. Systemværdien pr. aktiveret flexumer varierer mellem 55 og 86 kr./MWh på tværs af de 24 scenariekombinationer.

5.3 Værdistrømme

I dette afsnit opdeles den samlede gevinst i de fire overordnede værdistrømme. Figur 3 viser fordelingen på tværs af de 48 scenarier.



Figur 3: Spredning i de individuelle værdistrømme i 2025

Note: Boxplottene viser median (streg), interkvartilområde (boks, 25.–75. percentil) samt whiskers der dækker 1,5 gange interkvartilafstanden. Punkter uden for whiskers er outliers - dvs. scenarier med parameterkombinationer, der giver resultater væsentligt over eller under hovedparten af scenarierne.

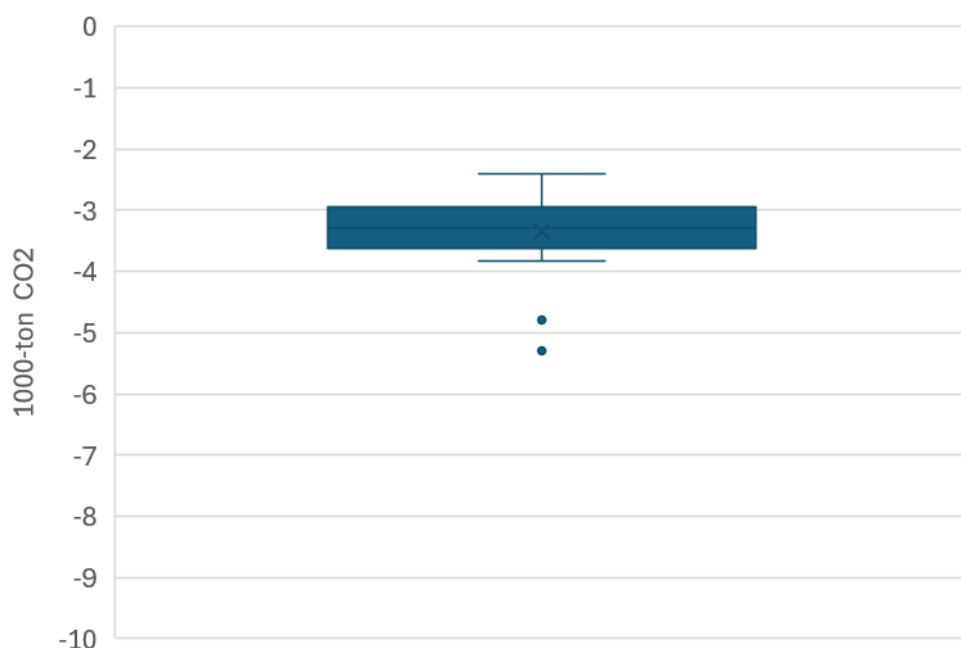
5.3.1 Reduceret CO₂-udledning (2,5 mio. kr.)

Flexumers bidrager til at reducere driften af fossile spidslastkedler og dermed CO₂-udledningen fra fjernvarmesystemet. Den gennemsnitlige reduktion udgør ca. 3.300 ton CO₂ årligt i 2025 med en spredning fra 2.400 til 5.300 ton CO₂ på tværs af scenarierne. Se Figur 4.

De højeste reduktioner ses i scenarier med lave elpriser og mange anlægsudfald, hvor spidslastkedlerne i scenariets udgangspunkt uden flexumers har flest driftstimer, og flexumers derfor kan reducere den største mængde fossil produktion fjernvarmeproduktion.

Reduktionen sker primært i vintersæsonen under spidsbelastning - de samme timer, hvor fossile spidslastkedler aktiveres for at dække den højeste efterspørgsel. Det er dermed de timer, hvor fjernvarmesystemets CO₂-intensitet er højest, og hvor flexumers' forbrugsforskydning har den største klimaeffekt.

De reducerede CO₂-udledninger er værdisat til det gældende CO₂-afgiftsniveau på 761 kr. pr. ton CO₂, da dette skønnes at afspejle samfundets aktuelle værdisætning af CO₂-udledning. Baseret på denne pris estimeres værdistrømmen til gennemsnitligt 2,5 mio. kr. årligt (spænd: 1,8–4,0 mio. kr.).

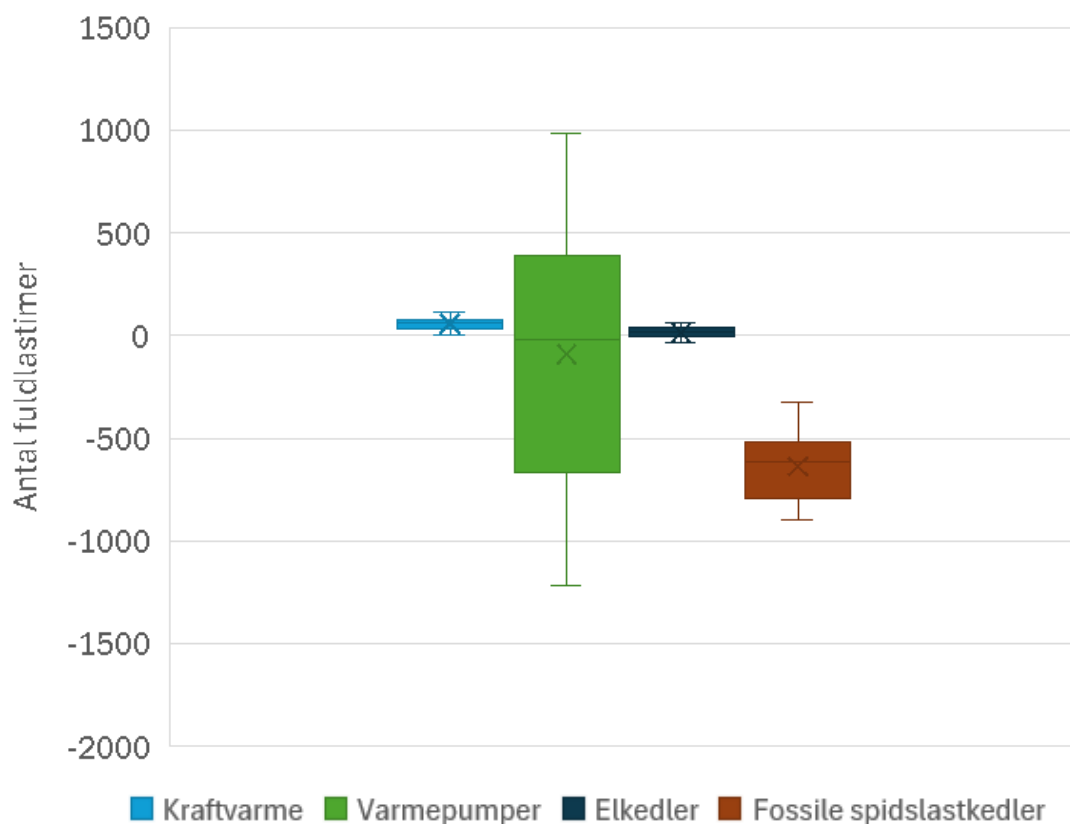


Figur 4: Reduktion i CO₂-udledning fra ledningsgas og fossile brændsler ved introduktion af flexumers i 2025 (1000-tons)

Note: Boxplottene viser median (streg), interkvartilområde (boks, 25.–75. percentil) samt whiskers der dækker 1,5 gange interkvartilafstanden. Punkter uden for whiskers er outliers - dvs. scenarier med parameterkombinationer, der giver resultater væsentligt over eller under hovedparten af scenarierne.

5.3.2 Kapacitetsbesparelser (4,8 mio. kr.)

Nedenfor analyseres effekterne for hver anlægstype separat, mens afsnittet afsluttes med vurdering af værdien af kapacitetsbesparelser fra flexumers.



Figur 5: Samlet ændring i antal fuldlasttimer på tværs af anlægstype ved introduktion af flexumers i 2025

Figur 5 viser, at flexumers omfordeler driftstimer på tværs af anlægstyperne i 2025-scenarierne.

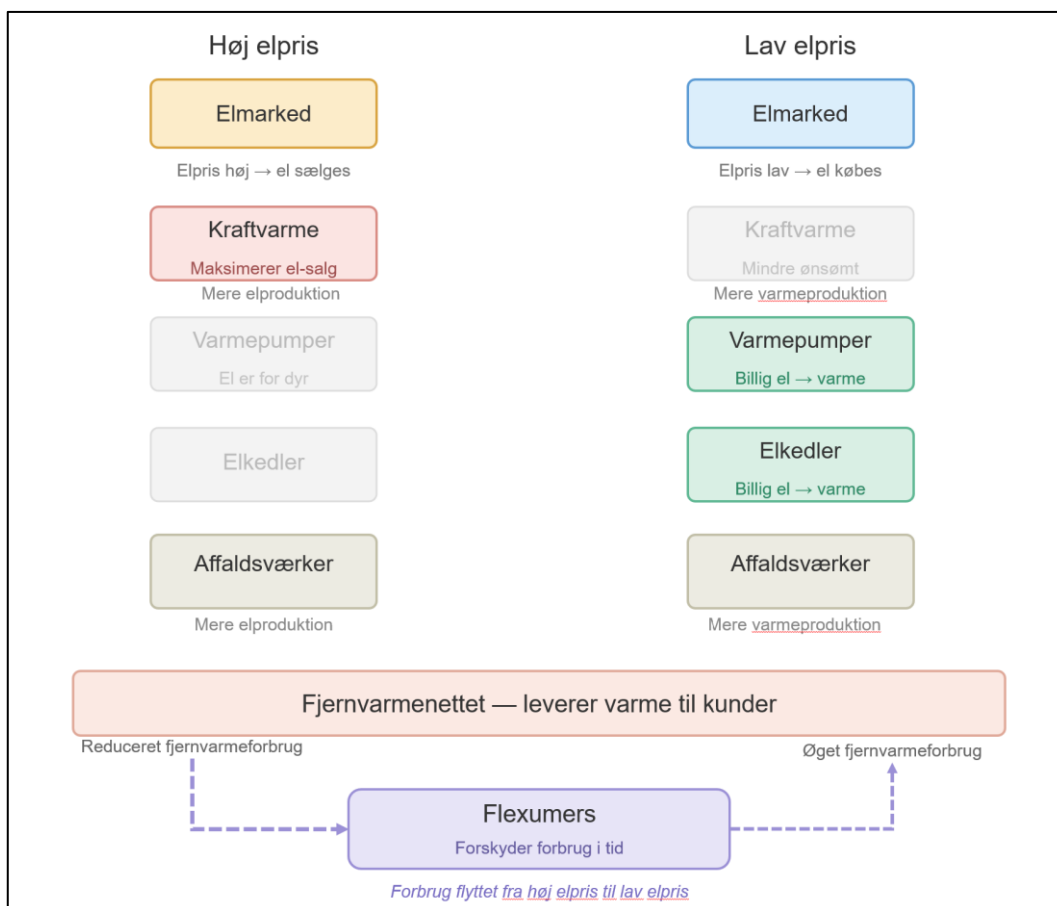
Den mest robuste effekt ses på fossile spidslastkedler, der samlet reduceres med i gennemsnit 636 fuldlasttimer. En reduktion på 636 fuldlasttimer i TIMES-VL svarer til en gennemsnitlig reduktion i fjernvarmeproduktionen fra spidslastkedler med 2,5% eller 12.100 MWh. Effekten på spidslast er konsistent på tværs af scenarier.

Kraftvarmeanlæg opnår gennemsnitligt 11.400 MWh ekstra fjernvarmeproduktion og 500 MWh ekstra elproduktion. Dette som resultat af at flexumers frigør kapacitet til elproduktion i timer med høje elpriser og giver bedre mulighed for at udnytte varmeproduktion fra kraftvarmeanlæg i timer ved lavere elpriser.

Effekten på varmepumper og elkedler er mere scenarieafhængig og i gennemsnit begrænset. For varmepumper skyldes den store spredning, at flexumers ved lave elpriser frigør driftstimer til varmepumper, mens de ved normale eller høje elpriser primært optimerer kraftvarmeproduktionen på bekostning af varmepumpedrift. I det fremtidige system med mindre termisk kapacitet forventes flexumers i højere grad at understøtte elkedeldrift ved at flytte forbrug væk fra spidsbelastningsperioder.

Figur 6 illustrerer den centrale logik. Flexumers flytter isoleret set fjernvarmeforbrug fra timer med høje elpriser til timer med lave elpriser, hvor varmepumper og elkedler kan producere billig varme fra billig el. Samtidig skaber flexumers bedre vilkår for kraftvarmeproduktion i og omkring

højpristimerne: når fjernvarmeforbruget ikke længere er bundet til disse timer, kan kraftvarmeanlæg - herunder modtryksværker med bypass og udtagsværker - køre mere fleksibelt og optimere mod elsalget uden at være begrænset af et samtidigt varmebehov. Affaldsværker får tilsvarende større frihed til at forskyde produktion mod højpristimer. Flexumernes forbrugsforskydning (de lilla kurver) erstatter i særlig grad fossil spidslast.



Figur 6 Flexumernes rolle i produktionsoptimering ved varierende elpriser

Værdien af kapacitetsbesparelser ved flexumers er baseret på omkostningerne ved ny spidslastkapacitet. I Energistyrelsens teknologikatalog (Danish Energy Agency, 2025) skønnes ny spidslastkapacitet at resultere i årlige investerings-, faste og variable omkostninger (eksklusive brændselsomkostninger) på mellem 40.000 – 45.000 kr. per MW⁴.

Baseret på analysen vurderes det, at behovet for spidslast reduceres svarende til 27 – 118 MW i 2025 (ud af 2000 MW fossil spidslast kapacitet i modellen). Værdisættes dette reducerede behov

⁴ Dette spænd repræsenterer både nye elkedler og som nye gaskedler og er baseret på en forventet levetid på 25 år og en diskonteringsrente på 3,5 pct.

ud fra sparede årlige omkostningerne til ny spidslastkapacitet skønnes flexumers at kunne give en kapacitetsbesparelse på mellem 3,7 – 5,5 mio. kr. i 2025. Se også orange boks i Figur 3.

Spændet afspejler, at flexumers kun kan omfordele forbrug i tid, ikke øge den samlede kapacitet: I scenarier med mange samtidige havarier, høj elprisvarians og høje biomassepriser er det resterende spidslastbehov så stort, at tidsforskydning alene kun reducere spidslastbehovet med 27 MW. I scenarier med få havarier og lave elpriser skyldes spidsbelastningen derimod primært, at et stort antal kunder efterspørger varme i de samme timer, f.eks. morgenspidsen. Denne type sammenfaldende spidsbelastning er netop hvad flexumers kan udjævne, og her opnås den største reduktion (118 MW).

Opgjort som sparede investeringsomkostninger til ny spidslastkapacitet svarer kapacitetsbesparelsen til et samlet beløb på op til 56 mio. kr. ved 118 MW baseret på Energistyrelsens Teknologikatalog.

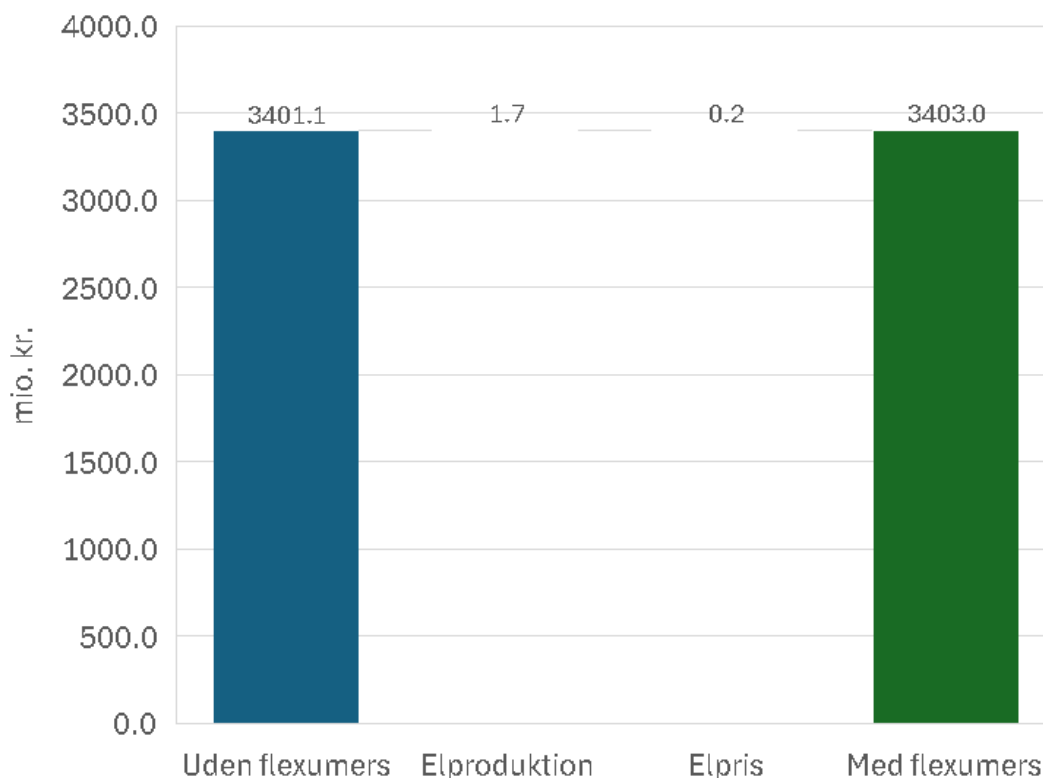
5.3.3 Elmarkedsværdi (1,9 mio. kr.)

Flexumers muliggør en bedre timing af elproduktion fra kraftvarmeanlæg. Når flexumers forskyder fjernvarmeforbruget, frigøres kapacitet til at producere og sælge elektricitet i timer med høje elpriser eller til at købe el i timer med lave priser.

Elmarkedsværdien består af to hovedkomponenter: ændret elproduktion fra kraftvarme og ændret timing af elsalg. Figur 7 illustrerer begge komponenter som forskellen mellem det gennemsnitlige scenarie med og uden flexumers. Når flexumers er aktiveret, producerer kraftvarmeanlæggene gennemsnitligt mere elektricitet, svarende til en merværdi på 1,7 mio. kr. i 2025. Hertil kommer en prisgevinst på 0,2 mio. kr. fra bedre timing af elsalget - dvs. at elektriciteten i højere grad sælges i timer med høje elpriser.

Elmarkedsværdien fra flexumers er den mest volatile værdistrøm og kan resultere i både gevinster og tab afhængigt af scenariebetingelserne.

Den største gevinst på op til 5 mio. kr. opnås i scenarier med høje elpriser, hvor flexumers giver kraftvarmeanlæg rum til i højere grad at fokusere på elproduktion. Den laveste elmarkedsværdi på -3,8 mio. kr. ses derimod i scenarier med høje biomassepriser, meget volatile elpriser og mange alvorlige havarier. Her skaber flexumers primært værdi ved at reducere afhængigheden af dyr kraftvarmeproduktion, hvilket samtidig mindsker den elproduktion, der ellers kunne sælges på markedet. Set i forhold til den samlede elmarkedsværdi i TIMES-VL, som i gennemsnit udgør 3.400 mio. kr., er flexumers' effekt på elmarkedet derfor begrænset.



Figur 7: Værdistrømmen for salg af el til markedet vist som et gennemsnit for scenarierne i 2025

5.3.4 Net- og kapacitetsflaskehalse (7,8 mio. kr.)

Fjernvarmenettet har en begrænset kapacitet til at transportere varme fra produktionsanlæg til forbrugerne. Kapaciteten bestemmes af rørenes dimensioner, pumpekapaciteten og temperaturdifferencen mellem frem- og returløb. I perioder med høj samtidig efterspørgsel - typisk kolde vintermorgener, hvor tusindvis af bygninger har varmebehov på samme tid - kan kapaciteten på kritiske forbindelser i nettet udnyttes fuldt ud. Når det sker, kan varme fra billige produktionsanlæg ikke transporteres til alle forbrugsområder, og dyrere lokal spidslastproduktion må tages i brug.

Flexumers reducerer disse spidsbelastninger ved at sprede forbruget over tid. Når en del af bygningerne forvarmes i timerne inden morgenspiden, eller udskyder deres varmeforbrug til timerne efter, reduceres den samtidige belastning på nettet. Det gør det muligt at udnytte den eksisterende infrastruktur mere effektivt og kan reducere eller udskyde behovet for kostbare investeringer i udbygning af fjernvarmenettet (netforstærkning).

I det nuværende system estimeres denne værdistrøm knyttet til net- og kapacitetsflaskehalse til gennemsnitligt 7,8 mio. kr. i 2025, hvilket gør den til den største enkeltkomponent i den samlede flexumer-værdi.

Værdistrømmens spredning på tværs af scenarierne fra 3,5 til 11,2 mio. kr. indikerer desuden, at værdien af flexumers er særlig afhængig af kritiske driftsforhold: I scenarier med samtidige anlægsudfald og høj systembelastning stiger værdien af flaskehalsaflastning markant. Se også lyseblå boks i Figur 3.

Denne værdistrøm forventes at blive mere betydningsfuld i de kommende år.

De planlagte reduktioner i fremløbstemperaturen medfører, at der skal cirkulere større vandmængder for at levere den samme varmeeffekt. Det øger den hydrauliske belastning af rørsystemet, pumper og varmevekslere og skaber flere potentielle flaskehalse. I den kontekst bliver flexumers' evne til at reducere den samtidige spidsbelastning (samtidigheidsfaktoren) et instrument til at mindske behovet for kostbare netforstærkninger.

5.4 Implikationer for implementering

Monte Carlo-resultaterne peger på tre faktorer, der er afgørende for flexumers' systemværdi og for en fremtidig implementeringsstrategi. Hertil kommer flexumers' rolle som virtuel reservekapacitet, som undersøges nærmere i det følgende kapitel.

Elprisvolatilitet er den vigtigste enkeltfaktor. Den højeste flexumer-værdi opnås i scenarier med store prisspredninger mellem høj- og lavlastperioder, hvor flexumers optimerer driften af varmepumper, elkedler og kraftvarmeverker. Den laveste værdi ses ved lave gennemsnitlige elpriser, hvor varmepumperne allerede kører mange timer og potentialet for optimering er begrænset. I takt med udbygningen af vedvarende energi forventes elprisvolatiliteten at stige, og med investeringer i varmepumpe- og elkedelkapacitet forventes fjernvarmesystemet at blive mere følsomt over for elprisvariationer, hvilket peger på en øget systemværdi af flexumers i fremtiden.

Ændringer i termisk baseload-kapacitet. Det fremtidige fjernvarmesystem kan stå over for væsentlige ændringer i den termiske baseload-kapacitet, hvis større anlæg lukkes eller får reduceret drift. En sådan udvikling vil øge afhængigheden af el-baseret varmeproduktion og dermed systemets følsomhed over for høje elpriser. I det scenarie kan flexumers spille en kritisk rolle ved at flytte forbrug væk fra timer med høje elpriser og reducere behovet for dyr el-baseret spidslastproduktion - om end omfanget af denne effekt afhænger af, hvilke anlæg der konkret berøres og i hvilket tempo.

Synergier med øvrige anlægstyper. Analysen dokumenterer væsentlige synergier mellem flexumers og de øvrige anlægstyper i fjernvarmesystemet. Flexumers kan aktiveres på forskellige måder afhængigt af den konkrete driftssituation - fra at understøtte kraftvarmeproduktion i timer med høje elpriser til at supplere varmepumpe- og elkedeldrift ved forskellige elpriseniveauer. Denne brede synergi indebærer, at flexumers' værdi ikke er knyttet til én enkelt anlægstype, men opstår i samspillet på tværs af produktionsporteføljen.

Det skal dog bemærkes, at en fuld realisering af disse synergier forudsætter, at flexumers integreres med det eksisterende eller kommende varmelastsystem. I modellen optimeres aktiveringen automatisk med henblik på at minimere systemomkostningerne, men i praksis kræver det opsætning af styringssystemer og kommunikationsinfrastruktur, der gør det muligt for flexumers at reagere på driftssignaler i realtid.

Flexumers bidrager desuden som virtuel reservekapacitet i scenarier mod samtidige udfald på centrale kraftvarmeanlæg, hvor de reducerer net- og kapacitetsflaskehalse. Denne backup-funktion undersøges i detaljer i det følgende kapitel om krisescenarier.

6 Analyse af krisescenarie

Dette afsnit præsenterer resultaterne fra analysen af flexumers' rolle i et ekstremt krisescenarie. Analysen omfatter en sammenligning mellem håndtering af krisen med og uden anvendelse af flexumers. Betalingsvilligheden (WTP) blandt husholdninger i Storkøbenhavn, for at undgå

krisescenarie og på den baggrund værdisættes værdien af flexumers i krisescenariet, baseres på en vurdering af konsekvenser af krisescenariet i TIMES-VL modellen.

Krisescenariet repræsenterer en stiliseret krisesituation, designet til at illustrere flexumers' potentielle bidrag under ekstreme forhold. Resultaterne skal derfor ses som et indikativt billede af flexumers' systemunderstøttende potentiale fremfor præcise prognoser for krisehåndtering.

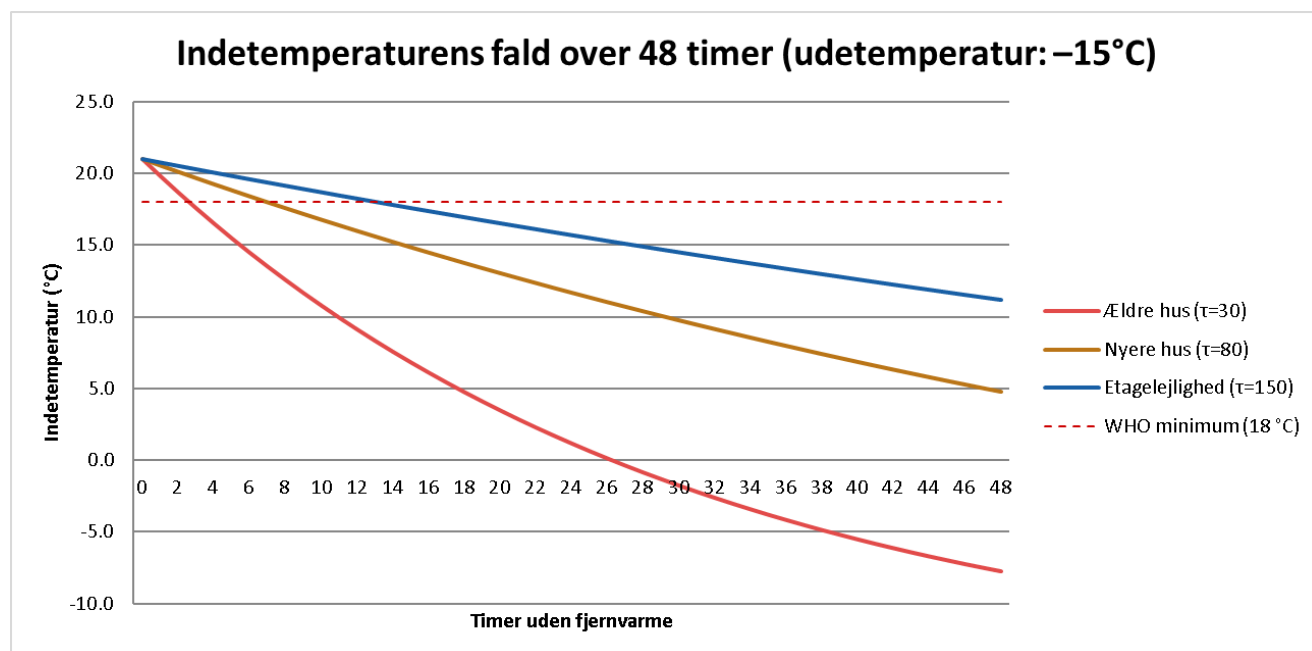
6.1 Krisescenariet

Det er en kold januar morgen. Termometeret viser -15°C – den koldeste uge i årtier. Københavns fjernvarmeforbrug er 30% over det normale vinterforbrug som følge af de ekstreme temperaturer, samtidig med at flere centrale kraftvarmeanlæg og/eller vekslerstationer falder ud med tekniske problemer, der kræver op til flere dages reparation.

De enkelte hændelser vil normalt kunne håndteres af fjernvarmesystemets indbyggede redundans og sikkerhedsmarginaler. Men når de indtræffer samtidigt, opstår der en kritisk situation, hvor almindelige backup-løsninger ikke længere er tilstrækkelige. I sådanne øjeblikke overgår flexumers fra en optimeringsmulighed til en afgørende sidste sikkerhedslinje.

Hvor konventionelle reservekapaciteter allerede er fuldt udnyttet, kan aggregeret forbrugsfleksibilitet fra tusindvis af bygninger i de mest belastede områder frigive den nødvendige kapacitet til at opretholde forsyningssikkerheden og prioritere kritiske kunder som sygehuse og plejehjem.

Når fjernvarmeforsyningen afbrydes under disse forhold, begynder indetemperaturen at falde i takt med bygningens varmetab til omgivelserne. Afkølingshastigheden kan beskrives med Newtons afkølingslov, hvor den termiske tidskonstant (τ) udtrykker forholdet mellem bygningens varmekapacitet og dens varmetabskoefficient. Figur illustrer temperaturforløb for tre typiske bygningstyper i den københavnske boligmasse ved en udetemperatur på -15°C og en starttemperatur på 21°C .



Figur 7: Illustration af det omtrentlige temperaturforløb for en typisk etagebolig ved en udetemperatur på $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$

For et ældre, dårligt isoleret enfamiliehus ($\tau \approx 30$ timer) falder indetemperaturen til ca. $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ efter blot 6 timer og til under frysepunktet efter ca. 26 timer. Et nyere, velisoleret hus ($\tau \approx 80$ timer) når ca. $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ efter 6 timer og ca. $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ efter 24 timer. For en midterlejlighed i en etageejendom med tung konstruktion ($\tau \approx 150$ timer) er afkølingen langsommere - ca. $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ efter 6 timer og ca. $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ efter 24 timer - fordi den termiske masse er stor, og naboelighedens restvarme reducerer varmetabet.

Det understreges, at etageejendomme udgør størstedelen af boligmassen i HOFORs forsyningsområde, og at afkølingen i denne bygningstype derfor er mest repræsentativ for det typiske forløb.

De simple temperaturberegningerne illustrerer, at krisescenariet ikke alene repræsenterer et abstrakt energitab, men har potentielt alvorlige konsekvenser for de berørte husholdningers sundhed og velfærd - særligt for sårbare grupper. Denne kontekst er central for fortolkningen af betalingsvilligheden for at undgå denne type krisescenarie.

6.2 Krisescenariet: Definition og afgrænsning

Krisescenariet er modelleret i TIMES-VL energisystemmodellen og beskriver en kritisk situation i uge 4 (en af de koldeste vinteruger), hvor samtidige havarier på flere produktions- og transmissionsanlæg medfører, at fjernvarmesystemet ikke kan dække det samlede varmebehov.

Scenariets nøgleparametre er:

- Totalt fjernvarmeforbrug i den kritiske uge: 640.000 MWh
- Forhøjet fjernvarmeforbrug: faktor 1,3 (ca. 30 % over normalen for den koldeste vinteruge)
- Varighed af krisesituationen: 168 timer (fuld uge), heraf ca. 48 timer med aktive havarier
- Antal berørte forsyningsområder: 28 (udelukkende CTR- og HOFOR-områder)
- Andel af forbrug ikke-leveret i kritiske timer: op mod 5,9 % af det samlede fjernvarmeforbrug i modellen.

Uden flexumer-kapacitet medfører scenariet 13.000 MWh ikke-leveret fjernvarme. Det skønnes at 9.100 MWh af den ikke-leverede fjernvarme rammer husholdninger, således at deres ejendom ikke modtager varme. Dette svarer til at i omegnen af 35.000 husstande står helt uden fjernvarme i op til 48 timer. Med 200 MW flexumer-kapacitet reduceres dette til ca. 21.000 husstande (38 % reduktion), og med ca. 500 MW flexumer-kapacitet til ca. 3.000 husstande (91 % reduktion).

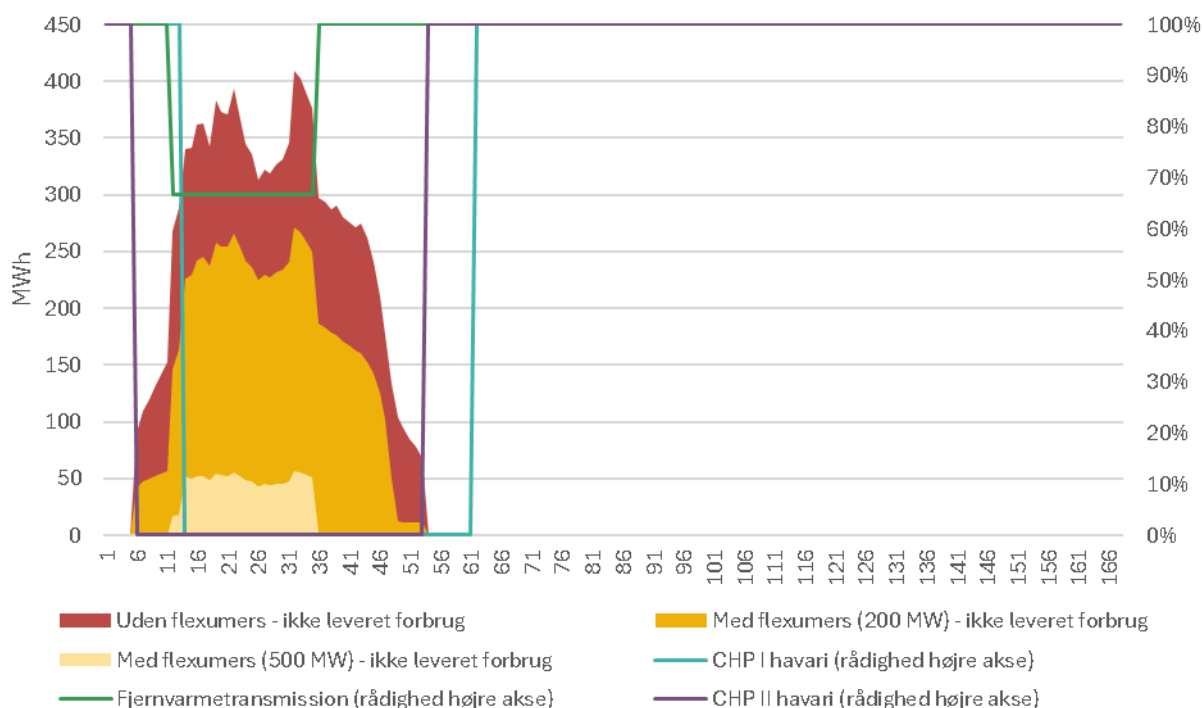
Det er væsentligt at understrege, at flexumers ikke eliminerer gabet mellem udbud og efterspørgsel i krisescenariet - husholdningerne får ikke nødvendigvis al den varme, de efterspørger.

Flexumers muliggør derimod en omfordeling af den tilgængelige kapacitet i nettet, så den tilgængelige varme fordeles over flere bygninger i stedet for at bestemte forsyningsområder helt afskæres. Forskellen er afgørende: i stedet for at nogle bygninger står uden varme i op til 48 timer, mens andre er upåvirkede, kan flexumers bidrage til at alle bygninger opretholder et vist

opvarmningsniveau - om end lavere end normalt. Dermed reduceres risikoen for de alvorligste konsekvenser, herunder sundhedskritiske indeklimaforhold for sårbare grupper.

Figur 8 illustrerer forløbet som modelleret i TIMES-VL, hvor der i det konkrete scenarie forudsættes et havari på et centralt kraftvarmeanlæg (CHP I), efterfulgt af havarier på et andet kraftvarmeanlæg (CHP II) og et delvist havari på en fjernvarmetransmissionscentral. Figur 8 illustrerer videre, hvordan flexumers bidrager til at reducere mængden af varme som ikke leveres.

Fjernvarmeforbruget, som ikke kan tilfredsstilles, når sit højeste niveau omkring time 19-25, hvor scenariet uden flexumers (rød) toppe ved cirka 400 MWh, mens scenariet med flexumers (orange og gul) holder sig omkring 250 MWh og 50 MWh.



Figur 8: Fordeling af forbruget der ikke leveres over de kritiske timer (krisescenariet uge 7)

6.3 Værdisætning af flexumers i krisescenariet

Husholdningernes betalingsvillighed for at undgå en fjernvarmeafbrydelse er estimeret ved hjælp af benefit transfer i særskilt analyse for HOFOR [13]. Benefit transfer er en velkendt metode i miljø- og energiøkonomi, der gør det muligt at overføre værdisætningsestimater fra eksisterende studier til en ny kontekst, når det ikke er praktisk muligt eller omkostningseffektivt at gennemføre et primært værdisætningsstudie. Metoden er særligt velegnet i situationer, hvor der eksisterer en robust litteraturbase for et beslægtet gode, men ikke for det specifikke gode i den specifikke kontekst.

I nærværende analyse anvendes benefit transfer, fordi der ikke eksisterer primære WTP-studier for fjernvarmeafbrydelser i Danmark. Den primære kilde til overførslen er estimater fra litteraturen om gasafbrydelser, som i kraft af varmforsyningsens fysiske karakter vurderes at være det mest sammenligneligt med fjernvarmeafbrydelser. Derudover inddrages den omfattende litteratur om Value of Lost Load (VoLL) for elektricitet til at krydsvalidere estimaterne. Den centrale udfordring i

overførslen er at tage højde for forskelle i købekraft, inflation og forskellen mellem de oprindelige studiers kontekst og fjernvarmeafbrydelsers konsekvenser for husholdningerne.

Husholdningernes betalingsvillighed er estimeret til ca. 13.800 kr/MWh - svarende til ca. 17 gange den normale fjernvarmepris i HOFORs område. Til sammenligning er VoLL for el for danske husholdninger af Energistyrelsen estimeret til at ligge mellem 15 og 71 gange den gennemsnitlige elpris⁵.

Tabel 4. Krisescenariets omfang og den estimerede værdi af flexumer-kapacitet (2025-priser, husholdninger)

	Uden flexumers	Flexumers, 200 MW	Flexumer, 500 MW	Enhed
Krisescenariets omfang				
Ikke-leveret fjernvarme (husholdninger)	9000	5.600	700	MWh
Reduktion i ikke leveret fjernvarme (husholdninger)	-	-3.500	-8.400	MWh
Husstande uden varme i op til 48 timer	~34.000	~21.000	~3.000	husstande
Reduktion ift. uden flexumers	-	38 %	91 %	
Betalingsvillighed (VoLL)	-	13.800	-	kr/MWh
Flexumer-værdi per hændelse				
Samlet værdi for husholdninger	-	48	116	mio. kr.
Per MW flexumer	-	240.000	230.000	kr./MW
Per husstand (VoLL for at undgå 48t forsyningsvigt)	-	3.400	3.600	kr.

Note: Betalingsvilligheden er estimeret til ca. 13.700 kr/MWh - svarende til ca. 17 gange den normale fjernvarmepris i HOFORs område (786 kr/MWh ekskl. effekt og afkøling). Estimaterne angiver værdien per krisehændelse for husholdninger (70 % af forbruget). Erhverv (30 %) er ikke inkluderet. Spredningen i de underliggende antagelser giver et interval på ca. 12.600–15.400 kr/MWh; tabellen viser det centrale estimat.

Tabel 4 illustrerer den samfundsøkonomiske værdi som flexumer skaber ved at reducere antallet af husholdninger som står helt uden varme. Ved 500 MW flexumer-kapacitet - en reduktion på 91 % - estimeres værdien til ca. 116 mio. kr. per krisehændelse, svarende til ca. 3.600 kr. per husstand der undgår at stå uden varme i op til 48 timer. Selv med 200 MW flexumer-kapacitet - en mere moderat udbygning - er værdien ca. 48 mio. kr. per hændelse.

Analysen har ikke set nærmere på sandsynligheden for, at krisescenariet indtræffer i et givet år. Hvis et scenarie af denne størrelse skønnes at indtræffe én gang hvert 10. år, svarer det til en forventet årlig værdi på ca. 12 mio. kr. for 500 MW og ca. 6 mio. kr. for 200 MW flexumer-kapacitet.

⁵ Baseret på Energistyrelsens VoLL-hovedrapport (<https://ens.dk/media/6678/download>) og den gennemsnitlige elpris for husholdninger i andet halvår af 2025 (2,47 kr/kWh, Danmarks Statistik). Variationen i betalingsvilligheden afspejler, at VoLL opgjort i kr/kWh aftager ved længerevarende afbrydelser (op til 24 timer).

6.4 Implikationer for implementering

Krisescenariets resultater peger på tre centrale indsigter for implementeringen af flexumers som beredskabsressource i hovedstadsområdets fjernvarmesystem.

Flexumers som kritisk beredskabsressource. Analysen viser, at flexumers kan fungere som et styringsværktøj i krisesituationer, der gør det muligt at rationere fjernvarmeforbruget kontrolleret på tværs af forsyningsområder. Uden flexumers bestemmes fordelingen af forsyningssvigt af hydrauliske forhold i fjernvarmenettet - kunder længst fra varmevekslere og produktionsanlæg rammes hårdest, uden mulighed for målrettet prioritering. Med flexumers kan kritiske kunder som f.eks. plejehjem sikres kontinuerlig forsyning, mens ikke-kritiske kunder oplever en midlertidig, men håndterbar reduktion i indetemperaturen. Det er i disse lavfrekvente, men højkonsekvens-scenarier, at flexumers-infrastrukturen kan demonstrere sin værdi som en kritisk beredskabsressource. Infrastruktur til flexumers er allerede i drift i Stockholm og under udrulning i Göteborg. Stockholm Exergi anvender fjernstyring til at fordele knaphedskapacitet jævnt frem for at lade hydrauliske forhold bestemme, hvem der rammes hårdest (Intelligi Solutions, 2024). Göteborg Energi er i gang med at digitalisere samtlige fjernvarme- og fjernkølecentraler med henblik på at kunne omfordele varmekapaciteten kontrolleret i en krisesituation frem for at efterlade kunder yderst i nettet uden forsyning (Göteborg Energi, 2025). Begge løsninger bygger på et juridisk fundament, hvor standardleveringsbestemmelserne for fjernvarme i Sverige eksplicit giver leverandøren ret til at installere og aktivere effektbegrænsningsudstyr hos kunderne (Värmemarknadskommittén, 2023).

Udjævning af belastningen reducerer systemrisikoen. En central egenskab ved flexumers i krisescenariet er den markante udjævning af belastningen på tværs af modellen i 48 forsyningsområder⁶. Det er udelukkende CTR- og HOFOR-områder som rammes af forsyningsproblemer i det konkrete krisescenarie. Der er samtidig stor forskel på, hvor hårdt forskellige efterspørgselsområder påvirkes. For Østerbro Øst er problemet størst med næsten 35% af forbruget, der ikke kan leveres i de kritiske timer. I alt bliver 28 forbrugsområder ramt i krisescenariet ned til Gladsaxe, hvor 1-2% af forbruget ikke leveres i de kritiske timer. Med 200 MW flexumer-kapacitet overstiger ingen områder 20% påvirkning, og størstedelen ligger under 10%. Denne mere ligelige fordeling letter ikke blot situationen for de enkelte fjernvarmekunder, men reducerer også risikoen for, at kritisk nedkøling i enkeltområder udløser kaskadeeffekter i det samlede fjernvarmenet. Desuden accelererer den mere jævne belastningsfordeling genopretningen til normal drift - i scenariet med 200 MW flexumers er leveringen normaliseret allerede fra time 48.

Strategisk kapacitetsplanlægning. Værdien af flexumers i krisescenariet afhænger ikke kun af den samlede kapacitet, men i høj grad af *hvor* i fjernvarmenettet kapaciteten er placeret. Med strategisk placering menes, at flexumer-kapaciteten koncentrerer i de forsyningsområder, der er mest udsatte i en krisesituation - typisk områder nedstrøms for transmissionsflaskehalse, områder med begrænset adgang til alternativ produktionskapacitet, eller områder der i kraft af deres placering i nettet vil blive hårdest ramt ved samtidige anlægsudfald.

⁶ Et forsyningsområde er et individuelt forbrugsområde som i modellen er beskrevet med et fjernvarmeforbrug og fjernvarme-transmission-kapacitet til naboområder.

Det er værd at bemærke, at modellen ved en fri optimering af flexumer-placeringen kan nøjes med at bruge 350 MW flexumers og sikre levering af al fjernvarmen i dette konkrete krisescenarie. Dette resultat underbygger potentialet ved strategisk kapacitetsplanlægning.

Det skal dog bemærkes, at strategisk placering i praksis er forbundet med begrænsninger. For det første kendes det konkrete krisescenarie ikke på forhånd - reelle krisesituationer kan ramme andre dele af nettet end dem, modellen optimerer for, og den optimale placering vil variere afhængigt af, hvilke anlæg der falder ud og under hvilke vejrforhold. For det andet kan praktiske forhold som bygningsbestandens egnethed, ejerforhold og tilslutningsomkostninger begrænse, om flexumer-kapacitet reelt kan etableres i de mest udsatte forsyningsområder.

7 Konklusion og perspektivering

Denne analyse kvantificerer værdien af forbrugsfleksibilitet (flexumers) i hovedstadsområdets fjernvarmesystem for 2025 gennem tre komplementære tilgange: en marginalværdianalyse, en systemanalyse baseret på energisystemsmodellen TIMES-VL med Monte Carlo-simuleringer af 48 scenarier samt en samfundsøkonomisk værdisætning af flexumers' bidrag til forsynings sikkerheden baseret på benefit transfer-metoden.

De gevinster der kvantificeres i denne analyse, opgør den samlede bruttosystemværdi af flexumers for fjernvarmesystemet. Fordi fjernvarme i Danmark er omkostningsreguleret efter hvile-i-sig-selv-princippet, vil besparelserne komme fjernvarmekunderne til gode gennem lavere varmepriser.

Analysen omfatter ikke omkostninger til etablering og drift af flexumer-infrastrukturen eller kompensation til de bygningsejere, der stiller forbrugsfleksibilitet til rådighed. En del af den kvantificerede systemværdi skal anvendes til disse formål.

Den samlede bruttosystemværdi angiver dermed det økonomiske råderum, inden for hvilket implementering af flexumers kan skabe nettoværdi for fjernvarmesystemet og dets kunder.

Marginalværdi: De første MW er mest værdifulde

Analysen af den marginale systemværdi viser, at værdien pr. MW flexumer-kapacitet er højest ved lave kapacitetsniveauer og aftager i takt med udrulningen. Ved 20 MW er den marginale årlige værdi op til ca. 200.000 kr./MW, mens den ved 200 MW er faldet til ca. 85.000 kr./MW. Den aftagende værdi afspejler, at de mest værdifulde aktiveringer - undgåelse af fossil spidslastproduktion og aflastning af kritiske flaskehalse i fjernvarmenettet - udnyttes fuldt allerede ved moderate kapacitetsniveauer.

For implementeringen betyder dette, at selv en begrænset initial udrulning af flexumers kan generere en høj værdi pr. MW.

Det reducerer risikoen ved tidlige investeringer og understøtter en trinvis implementeringsstrategi, hvor erfaringer fra den første fase kan informere den videre udrulning.

Systemværdi under normale driftsforhold: 17 mio. kr. årligt

Ved et flexumer-potentiale på 200 MW estimeres den samlede årlige gevinst for fjernvarmesystemet til 17 mio. kr. i 2025. Gevinsten spænder fra 14,4 til 19,6 mio. kr. på tværs af de 48 Monte Carlo-scenarier. Spændet afspejler usikkerhed om de fremtidige markedsforhold, som

analysen tester systematisk ved at variere elpriser, biomassepriser og rådigheden af centrale produktionsanlæg.

At gevinsten forbliver på 14,4 mio. kr. selv i det mindst favorable scenarie understreger, at en væsentlig del af flexumers' værdi er robust over for markedsforholdene.

Gevinsten fordeler sig på fire hovedområder:

- I. Net- og kapacitetsflaskehalse (7,8 mio. kr.) som den største enkeltkomponent.
- II. Kapacitetsbesparelser fra reduceret behov for fossil spidslastkapacitet (4,8 mio. kr.).
- III. Reduceret CO₂-udledning fra mindre drift af fossile spidslastkedler (2,5 mio. kr.).
- IV. Elmarkedsværdi fra optimeret timing af el-produktion og -forbrug (1,9 mio. kr.).

Flexumers aktiveres i TIMES-VL svarende i gennemsnit 250.000 MWh, hvilket svarer til en gennemsnitlig systemværdi pr. aktiveret flexumer på 69 kr./MWh.

Forsyningssikkerhed: Flexumers som krisestyringsværktøj

I det analyserede krisescenarie - simultane havarier på flere centrale anlæg kombineret med ekstraordinært høj varmeefterspørgsel - kan fjernvarmesystemet ikke dække det samlede varmebehov. Uden flexumers skønnes op mod 35.000 husstande at være berørt af 48 timers perioder uden varmelevering i løbet af den kritiske uge, svarende til ca. 9.000 MWh ikke-leveret fjernvarme.

Med 200 MW flexumer-kapacitet reduceres antallet af berørte husstande fra 35.000 til 21.000, svarende til en 38% reduktion i den samlede mængde ikke-leveret fjernvarme. Med en udvidet flexumer-kapacitet på ca. 500 MW reduceres antallet af berørte husstande til ca. 3.000 - svarende til en 91% reduktion af det samlede forsyningssvigt.

En central egenskab ved flexumers under krisescenarier er muligheden for aktiv prioritering af forsyningen. Kritiske kunder - såsom sygehuse, plejehjem og andre samfundsvigtige institutioner - kan sikres kontinuerlig varmforsyning ved at foretage en kontrolleret og midlertidig reduktion af forbruget hos ikke-kritiske kunder. Det står i kontrast til et scenarie uden flexumers, hvor forsyningssvigt primært rammer kunder længst fra varmevekslerstationer baseret på hydrauliske forhold, uden mulighed for målrettet prioritering.

Flexumers fordeler samtidig belastningen væsentligt mere ligeligt på tværs af forbrugsområder. Uden flexumers rammes enkelte områder af op til 35% påvirkning, mens ingen områder med 200 MW flexumers oplever mere end 20% påvirkning. Analysen viser desuden, at strategisk placering af flexumer-kapacitet kan reducere det nødvendige kapacitetsbehov til ca. 350 MW for at sikre fuld forsyning i det analyserede krisescenarie.

For at opgøre den økonomiske værdi af flexumers' bidrag til forsyningssikkerheden er der gennemført en samfundsøkonomisk analyse baseret på benefit transfer-metoden. Analysen estimerer husholdningers betalingsvillighed (willingness to pay, WTP) for at undgå det analyserede krisescenarie ved at overføre og justere resultater fra international forskning i værdien af forsyningssikkerhed. Det centrale resultat er, at det samlede velfærdstab for husholdninger i krisescenariet estimeres til ca. 126 mio. kr. per krisehændelse uden flexumers. Med 200 MW

flexumer-kapacitet reduceres dette tab med ca. 48 mio. kr. og en udvidet kapacitet på ca. 500 MW (svarende til fuld kriedækning) reduceres tabet med ca. 116 mio. kr.

Estimaterne er baseret på en konservativ tilgang, hvor betalingsvilligheden for at undgå fjernvarmeafbrydelser antages at være lavere end for el-afbrydelser, fordi husholdninger i nogen grad kan kompensere for varmetab via beklædning og alternative varmekilder. Den justerede VoLL (Value of Lost Load) for fjernvarme er estimeret til 12.600-15.000 kr/MWh, sammenlignet med typiske el-VoLL-estimerer på 3–15 €/kWh.

Den forventede årlige forsikringsværdi afhænger af, hvor hyppigt krisesituationer af denne karakter forventes at opstå. Ved en returperiode på hvert 10. år svarer det til en forventet årlig værdi på ca. 4,8 mio. kr. for 200 MW-scenariet.

Samlet vurdering

Analysen viser, at flexumers kan bidrage positivt til fjernvarmesystemet på tværs af driftsforhold.

Under normal drift skaber flexumers en estimeret systemgevinst på 17 mio. kr. årligt ved 200 MW kapacitet (spænd: 14,4–19,6 mio. kr.), primært drevet af reducerede flaskehalse og undgået spidslastkapacitet. Under krisescenarier har flexumers en forsikringsværdi på 48–116 mio. kr. per hændelse. Nutidsværdien af de kvantificerede gevinster over en 25-årig periode estimeres til 278–481 mio. kr., afhængigt af markedsforhold og den antagne krisehyppighed (se Boks 1).

Det skal desuden bemærkes, at beregningen konservativt antager en konstant årlig gevinst over perioden. I takt med elektrificeringen af fjernvarmesystemet og reduktion af termisk baseload-kapacitet forventes behovet for fleksibilitet - og dermed værdien af flexumers - at stige. Hertil kommer ikke-kvantificerede gevinster fra energibesparelser hos kunder (3–5%) og reduceret behov for netforstærkning, som ikke indgår i ovenstående beregning.

Endeligt kan flexumers også aflaste eldistributionsnettet. I situationer, hvor lokale flaskehalse i elnettet gør det nødvendigt midlertidigt at nedrosle eller stoppe en lokal elkedel eller varmepumpe, kan flexumers træde til ved at udnytte bygningernes termiske masse til at oppebære varmforsyningen. Flexumers kan på den måde fungere som et bindeled mellem fjernvarme- og elsystemet og bidrage til at håndtere de stigende belastninger på eldistributionsnettet, som følger af elektrificeringen.

Boks 1: Samlet nutidsværdi af flexumers' kvantificerede gevinster

For at give et samlet billede af den langsigtede økonomiske værdi af flexumers kan de årlige gevinster omregnes til en nutidsværdi. Beregningen anvender en samfundsøkonomisk diskonteringsrente på 3,5% og en antaget levetid for flexumer-infrastrukturen på 25 år, svarende til en nutidsværdifaktor på 16,5.

Driftsoptimering (normal drift)

Den estimerede årlige gevinst ved 200 MW flexumer-kapacitet er 17 mio. kr. (spænd: 14,4–19,6 mio. kr. på tværs af Monte Carlo-scenarierne). Nutidsværdien af denne betalingsstrøm over 25 år udgør ca. 279 mio. kr. i det centrale scenarie. I det konservative scenarie, hvor elpriser og markedsforhold er mindst favorable for flexumers, er nutidsværdien ca. 238 mio. kr., mens den i det høje scenarie udgør ca. 323 mio. kr.

Forsikringsværdi (krisescenarier)

Den estimerede værdi af at undgå forsyningssvigt udgør ca. 48 mio. kr. per krisehændelse ved 200 MW flexumer-kapacitet. Den forventede årlige forsikringsværdi afhænger af, hvor hyppigt sådanne kritesituationer forventes at opstå:

Interval mellem krisescenarier	Forventet årlig værdi	Nutidsværdi over 25 år
Konservativt (1-i-20 år)	2,4 mio. kr.	40 mio. kr.
Centralt (1-i-10 år)	4,8 mio. kr.	78 mio. kr.
Højt (1-i-5 år)	9,6 mio. kr.	158 mio. kr.

Samlet nutidsværdi

Den samlede nutidsværdi af de kvantificerede gevinster ved 200 MW flexumer-kapacitet estimeres til mellem 278 og 481 mio. kr. over 25 år, afhængigt af den antagne krisehyppighed.

Scenarie	Driftsoptimering	Forsikringsværdi	Samlet nutidsværdi
Konservativt	238 mio. kr.	40 mio. kr.	278 mio. kr.
Centralt	279 mio. kr.	79 mio. kr.	358 mio. kr.
Højt	323 mio. kr.	158 mio. kr.	481 mio. kr.

Note: konservativt kombinerer laveste Monte Carlo gevinst med 1-i-20-års krisehyppighed, og højt kombinerer højeste Monte Carlo gevinst med 1-i-5-års krisehyppighed.

Beregningen omfatter alene bruttosystemværdien. Omkostninger til etablering og drift af flexumer-infrastrukturen samt kompensation til deltagende bygningsejere er ikke inkluderet, da disse afhænger af den konkrete implementerings- og forretningsmodel. Nutidsværdien bør derfor fortolkes som det samlede økonomiske råderum for flexumer-implementering - dvs. den øvre grænse for, hvad der samlet kan investeres i infrastruktur, drift og kompensation, før flexumers ophører med at være en nettogevinst for fjernvarmesystemet.

7.1 Fremadrettede perspektiver

Analysens resultater peger samlet set på, at værdien af flexumers forventes at stige i takt med elektrificeringen af fjernvarmesystemet.

Med igangværende investeringer i varmepumpe- og elkedelkapacitet og reduceret termisk baseload bliver fjernvarmesystemet fremadrettet mere følsomt over for elprisvariationer. Intelligent forbrugsfleksibilitet kan i den kontekst bidrage til at navigere i et system, hvor timing af energiforbrug får tiltagende betydning for både økonomi og forsyningssikkerhed.

Marginalværdianalysen viser desuden, at de første MW flexumer-kapacitet giver det højeste afkast, hvilket understøtter en trinvis implementeringsstrategi, hvor tidlige investeringer kan realisere en høj værdi pr. MW.

Analysens resultater peger på flere centrale udviklingsretninger for fremtidig implementering af flexumers:

- **Strategisk kapacitetsplanlægning.** Krisescenarierne viser betydeligt potentiale i optimal placering af flexumer-kapacitet. TIMES-VL-modellen kan anvendes til at teste forskellige udfaldsscenarioer gennem året og identificere den mest robuste placering baseret på sandsynlighed for udfald og tilgængelig alternativ produktionskapacitet.
- **Differentieret flexumer-kapacitet.** Der er potentiale i at etablere forskellige niveauer af flexumer-aktivering - fra daglig optimering med begrænsede komfortpåvirkninger til dedikeret „krisetidskapacitet“ med større acceptable temperaturreduktioner, som kun aktiveres under særligt kritiske forhold.
- **Reduktion af implementeringsbarrierer.** Følsomhedsanalysen med halverede implementeringsomkostninger viser, at systemet har betydelig efterspørgsel efter fleksibilitet. Investeringer i at reducere tekniske, økonomiske og regulatoriske barrierer gennem teknologisk innovation, forbedrede forretningsmodeller eller regulatoriske tiltag kan derfor give betydelige systemøkonomiske gevinster.
- **Integration med kommende systemændringer.** I takt med implementering af lavtemperaturfjernvarme og yderligere elektrificering vil behovet for intelligent forbrugsfleksibilitet stige. Flexumers kan i denne kontekst bidrage til at håndtere de øgede hydrauliske belastninger fra lavere fremløbstemperaturer og den større elprisfølsomhed fra el-baseret varmeproduktion. Samtidig kan flexumers fungere som bindeled mellem fjernvarme- og elsystemet ved at aflaste eldistributionsnettet i situationer, hvor lokale flaskehalse kræver, at varmepumper eller elkedler nedrosles - en sektorkoblingsværdi, som ikke er kvantificeret i analysen, men som potentielt kan blive betydelig i takt med den fortsatte elektrificering. En fuld realisering af flexumers' systemværdi forudsætter dog, at forbrugsfleksibiliteten kan koordineres med den overordnede varmelastfordeling. I den forbindelse kan den igangværende udvikling af et ubalancesystem i Varmelast-regi åbne muligheder for at integrere flexumers som en styrbar ressource i den samlede systemdisponering.

7.2 Afsluttende bemærkninger

Samlet set dokumenterer denne analyse, at flexumers kan skabe en bruttosystemværdi på 278 og 481 mio. kr. over en 25-årig periode ved 200 MW kapacitet - både gennem løbende systemoptimering under normal drift og som beredskabsressource under ekstreme belastningsforhold. En del af denne værdi skal anvendes til at finansiere flexumer-infrastruktur og kompensere deltagende bygningsejere.

Hertil kommer potentielle energibesparelser og reducerede netinvesteringer, som ikke er søgt kvantificeret i denne analyse.

I et fjernvarmesystem under transformation mod øget elektrificering og reduceret termisk baseload-kapacitet kan flexumers bidrage som en optimeringsmulighed og en komponent til at sikre både økonomisk effektivitet og forsyningssikkerhed.

Værdien forventes at stige i takt med elektrificeringen, hvilket understøtter, at tidlig implementering kan skabe grundlaget for en fleksibel og robust fjernvarmeforsyning i hovedstadsområdet.

Referencer

- [1] Energistyrelsen, »Data: Oversigt over energisektoren - Energiproducenttællingen (EPT 2024),« [Online]. Available: <https://ens.dk/analyser-og-statistik/data-oversigt-over-energiesektoren>. [Senest hentet eller vist den 11 09 2025].
- [2] Varmeplan Hovedstaden, »Anvendte FFH50 forudsætninger, potentialer og prognoser,« [Online]. Available: <https://varmeplanhovedstaden.dk/publikationer/anvendte-ffh50-forudsætninger-potentialer-og-prognoser/>.
- [3] K. KOMMUNES, »KØBENHAVNS KOMMUNES GUIDE TIL ARBEJDET MED FLEKSIBEL ENERGI-OPTIMERING,« KØBENHAVNS KOMMUNES , København, 2025.
- [4] Danish Energy Agency, »Technology Data - Energy Plants for Electricity and District heating generation,« Danish Energy Agency, Copenhagen, 2025.
- [5] Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, »Klimastatus og -fremskrivning,« 2025. [Online]. Available: <https://www.kefm.dk/klima/klimastatus-og-fremskrivning/klimastatus-og-fremskrivning-2025>.
- [6] Energistyrelsen, »Samfundsøkonomiske Beregningsforudsætninger,« 2022. [Online]. Available: <https://ens.dk/media/3563/download>. [Senest hentet eller vist den 13 08 2025].
- [7] PwC, »Afgiftsvejledning 2025 - Samlet overblik over afregning og godtgørelse af afgifter,« 2025.
- [8] Energinet, »Energinets Eltariffer,« [Online]. Available: <https://energinet.dk/el/elmarkedet/tariffer/aktuelle-tariffer/>.
- [9] Radius, »Tariffer og netabonnement,« [Online]. Available: <https://radiuselnet.dk/elnetkunder/tariffer-og-netabonnement/>.
- [10] Energistyrelsen, » Teknologikatalog for produktion af el og fjernvarme - opdateret maj 2025 « [Online]. Available: <https://ens.dk/media/6571/download>
- [11] Miljø- og Fødevareministeriet, »Have-/parkaffald til energiudnyttelse ved forbrænding,« 2019. [Online]. Available: <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2019/06/978-87-7038-084-3.pdf>.
- [12] Ingeniøren, »Derfor blev nedbruddet på fjernvarmen i København historisk langvarigt,« [Online]. Available: <https://ing.dk/artikel/derfor-blev-nedbruddet-paa-fjernvarmen-i-koebenhavn-historisk-langvarigt>. [Senest hentet eller vist den 20 Januar 2025].
- [13] HOFOR, »Analyse af værdien af at undgå et fjernvarme-krisescenarie i hovedstadens fjernvarmesystem: Benefit-transfer-analyse af den samfundsøkonomisk betalingsvillighed«, Juni 2026.

- [14] Intelligy Solutions (2024) »Styrning vid brist. Stockholm Exergi« Hentet fra <https://intelligysolutions.se/tjanster/briststyrning/>
- [15] Värmemarknadskommittén (2023): »Allmänna avtalsvillkor för leverans av fjärrvärme som används i näringsverksamhet (gäller fr.o.m. 2023-09-01) «. Antagna av Stockholm Exergi AB. Hentet fra <https://www.stockholmexergi.se/wp-content/uploads/2023/07/Allmanna-avtalsvillkor-for-naringsidkare-galler-from-2023-09-01-fjarrvarme.pdf>
- [16] Värmemarknadskommittén (2023): »Allmänna avtalsvillkor fjärrvärme näringsidkare (01SEP23) « Göteborg Energi AB. Hentet fra <https://www.goteborgenergi.se/>
- [17] Göteborg Energi. (2025). »Digitalisering av fjärrvärme- och fjärrkylasystemet« Hentet fra <https://www.goteborgenergi.se/kundservice/digitalisering-av-fjarrvarme-och-fjarrkylasystemet>

Forudsætninger og kontakt

Analysen og modellen er som udgangspunkt bygget på forudsætningerne fra FFH50 [2] Varmeplan Hovedstaden, men er blevet opdateret med de seneste fremskrivninger hvor relevant. For yderligere information kontakt venligst:

Kristian Honoré, Energiplanlægger, krih@hofor.dk, tlf. 2795 4726