

Infrastrukturval för att nå Sveriges bredbandsmål En teknoekonomisk studie

Författare: Marco Forzati, marco.forzati@ri.se
Jie Li, jie.li@ri.se

Stockholm, oktober 2019

Rapporten citeras som:

M. Forzati and J. Li, “Infrastrukturval för att nå Sveriges bredbandsmål – en teknoekonomisk studie”, RISE rapport, Stockholm, 2019.

RISE RESEARCH INSTITUTES OF SWEDEN

Box 857, 501 15 Borås

info@ri.se

RISE är Sveriges forskningsinstitut och innovationspartner. I internationell samverkan med företag, akademi och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. Våra 2 800 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. RISE är ett oberoende, statligt forskningsinstitut som erbjuder unik expertis och ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra teknologier, produkter och tjänster.

Sammanfattning

Sverige har kommit långt i sitt arbete med att nå det nationella bredbandsmålet för 2025, som också ligger i linje med det som EU antagit. Men tillgång till snabbt bredband skiljer sig mellan stad och land. Aktörer inom bredbandssektorn har under 2019, på olika sätt, aviserat att det i stor utsträckning är hushåll och företag som inte är möjliga att nå på kommersiell väg som återstår att ansluta. Denna bild stärks av att investeringarna i utbyggnaden av det fasta bredbandsnätet minskade under 2018 jämfört med året innan.

Röster har istället lyft möjligheten att ansluta kvarvarande hushåll med så kallade fast trådlös access, (fixed wireless access, FWA). FWA kan vara en kostnadseffektiv metod för att ansluta många användare spridda över stora geografiska område, och moderna radiolösningar kan leverera höga nedladdningshastigheter, i närheten av Sveriges bredbandsmål. Dessa två målsättningar går dock inte att uppnå samtidigt då billigt och bra i detta fall är motstridiga faktorer. Denna rapport presenterar en teknoekonomisk analys som kvantifierar just detta och tydliggör skillnaderna mellan olika trådlösa scenarier jämfört med fortsatt fiberutbyggnad.

Analysen räknar på skillnaderna i ned- och uppkopplingshastighet samt kostnad för utbyggnad mellan olika scenarier. Resultatet visar att de FWA-lösningar som kan erbjuda hastigheter i linje med bredbandsmålen överstiger kostnaderna för fiberutbyggnad. Ett sådant scenario innebär också ökad energiåtgång samt risker för minskad valfrihet mellan olika tjänsteleverantörer för konsumenten.

Det FWA-alternativ som erbjuder en mer kostnadseffektiv utbyggnad innebär istället att hushållen och företagen ges tillgång till anslutningshastigheter långt under bredbandsmålen. Störst skillnad mellan infrastrukturlagen syns på uppladdningshastigheterna, vilket gör att hushåll och företag med FWA-lösningar riskerar att inte kunna nyttja framtida digitala tjänster (från smarta industri- och jordbrukssystem för näringslivet till välfärdstjänster för medborgare) i samma utsträckning som övriga samhället.

En fortsatt fiberutbyggnad blir den säkraste och kostnadseffektivaste lösning för att ansluta 98 procent av befolkningen med 1 Gbit/s, som även ger bättre förutsättningar att ansluta de resterande 2 procenten med en kombination av fiber och trådlös teknik. Fortsatt fiberutbyggnad bedöms även möjliggöra uppgradering av befintliga och framtida radionät, vilket kan tidigarelägga möjligheten att erbjuda hushåll och företag på landsbygden tillgång till höga kapaciteter via mobilnäten, exempelvis via 5G.

1 Bakgrund

Sveriges nationella bredbandsstrategi, antagen 2016, slår fast att 98 procent av landets befolkning ska ha tillgång till bredbandsuppkoppling om minst 1 Gbit/s (gigabit per sekund) senast 2025. Även EU-kommissionen har antagit mål kopplade till området där ett av dem är att alla hushåll i medlemsländerna ska ha tillgång till ultrasnabbt bredband som kan uppgraderas till 1 Gbit/s senast 2025. I slutet av 2018 var, enligt statistik från Post- och telestyrelse (PTS), ungefär 89 procent av Sveriges hushåll (90,6 procent) och arbetsplatser (84,3 procent) tillgång till en sådan anslutning eller i sin absoluta närhet¹. Siffran är lägre för glesbygden, ungefär 50 procent².

I mitten av 2010-talet fortskred arbetet med att bygga ut fast bredbandsinfrastruktur i snabb takt. Flera telekomaktörer aviserade att de avsåg att investera stora belopp i utbyggnaden. Sedan dess har flera av dessa dragit tillbaka sina utbyggnadsplaner och hösten 2019 består marknaden vid sidan av de kommunala stadsnäten och lokala byalag av ett fåtal privata aktörer.

PTS, som har regeringens ansvar att följa upp den nationella bredbandsstrategin, bedömer att det behövs ytterligare investeringar, utöver förväntade kommersiella investeringar, på minst 22 miljarder kronor för att nå regeringens bredbandsmål för 2025³. Siffrans storlek blåste nytt liv i diskussionen huruvida resterande hushåll, företrädesvis på landsbygden, har behov av fiberbredband eller om dessa istället bör erbjudas andra alternativ. Exakt vad dessa alternativa lösningar innebär är inte klarlagt. Vissa röster lyfter fram radiolösningar (fixed wireless access, FWA) som alternativ till fiberbredband. FWA presenteras ibland som både billigare och lika effektiv som fiber och i vissa lägen används också begreppet 5G-ready kopplat till FWA, utan att vidare specificera vad som menas med detta.

Det är korrekt att radiolösningar kan vara en kostnadseffektiv metod för att ansluta många användare spridda över stora geografiska områden. Det är också korrekt att moderna radiolösningar, särskilt den kommande 5G-tekniken, kan leverera höga nedladdningshastigheter i närheten av såväl Sveriges och EU:s bredbandsmål (1 Gbit/s). Det som dock är tveksamt är möjligheten att nå båda dessa målsättningar samtidigt då billigt och bra i detta fall är motstridiga faktorer. Kvantitativa studier om vad som är tekniskt och ekonomiskt möjligt har tidigare saknats.

Syftet med denna studie är att åtgärda just detta, genom en teknoekonomisk analys som kvantifierar kostnader och prestanda för olika infrastruktursval för att nå Sveriges bredbandsmål.

¹ Enligt PTS definition, dvs "andel med tillgång till fast bredband via fiber, eller i absolut närhet till fiberansluten byggnad (finns på samma gata och gatunumret faller inom samma tital)".

² Observera att siffran ovan anger "tillgång till" vilket innebär att hushållen och företagen befinner sig i närheten av en anslutning. Andelen anslutna hushåll var vid samma mättillfälle 78 procent sett över hela landet och på landsbygden var motsvarande siffra 41 procent.

³ PTS nyhet "22 miljarder krävs för att nå bredbandsmål till 2025",

<https://www.pts.se/sv/nyheter/internet/2019/22-miljarder-kravs-for-att-na-bredbandsmal-till-2025/> (publicerat 2019-10-02). Se avsnitt 2.2 i den här rapporten om vad den siffran egentligen syftar till.

2 Teknoekonomisk analys

Som det går att läsa i appendix, har det inom ramen för arbetet med denna rapport utförts en analys av kostnad, energiförbrukning och prestanda (i form av nedladdningshastighet) för optisk fiber jämfört med olika FWA-baserade lösningar för att uppnå Sveriges och EU:s 2025-mål.

Av Sveriges hushåll och arbetsplatser, som i dag enligt PTS definition⁴ och statistik⁵ inte har tillgång till 1 Gbit/s, behöver ytterligare 427 304⁶ hushåll och arbetsplatser anslutas för att 98 procent av landets befolkning ska anses ha tillgång till en snabb anslutning i enlighet med målet. Av dessa har rapporten valt att studera kostnad och prestanda för att koppla alla 259 866 hushåll och arbetsplatser i tätbebyggda områden som i dag inte har tillgång till 1 Gbit/s, samt 167 438 hushåll och arbetsplatser i glesbyggda områden, enligt lågt-hängande-fruktprincipen. Notera att även byar och små orter ingår i definitionen för tätbebyggd, i enlighet med PTS definition⁷, vilket innebär att områden som av många upplevs tillhöra ”landsbygden” i vissa fall kan klassas som tätort i statistiken.

Detta innebär att alla hushåll och arbetsplatser som förväntas vara utan tillgång till 1 Gbit/s (2 procent av totalen i Sverige) förväntas finnas i glesbyggda områden, det vill säga områden som är mest utmanande att nå. Dessa hushåll och arbetsplatser (”de sista 2 procenten”) ska enligt Sveriges nationella bredbandsstrategi kopplas upp med 100 Mbit/s (1,9 procent) och 30 Mbit/s (0,1 procent). FWA-lösningar förväntas under normala förhållande kunna leverera dessa nedladdningshastigheter, i kombination med fiber.

Studien har utvärderat fyra olika lösningar (se figur 1): tre FWA-baserade scenarier som använder (1) befintliga kommersiell infrastruktur (”FWA med makroceller”), (2) förtätad infrastruktur med nyinstallerade antensajter och millimetervåg (mmWave) radioband (”FWA med mikroceller”) och (3) en hybrid med existerande infrastruktur och nyinstallerade mikroceller (”FWA hybrid”), samt ett scenario med endast fiber, fullfiber scenario (4). Alla fyra scenarier bygger på att FWA ska användas för ”de sista 2 procenten

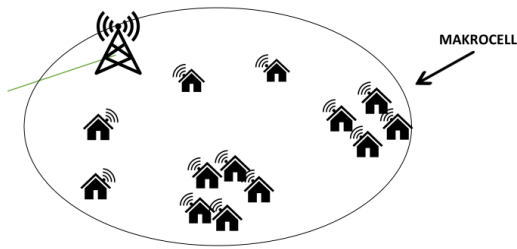
⁴ Rapport: PTS mobiltäcknings- och bredbandskartläggning 2018, PTS-ER-2019:5, Post- och telestyrelsen

⁵ PTS mobiltäcknings- och bredbandskartläggning 2018 - PTS-ER-2019:5 som publicerades i mars 2019, och som ger bild för oktober 2018

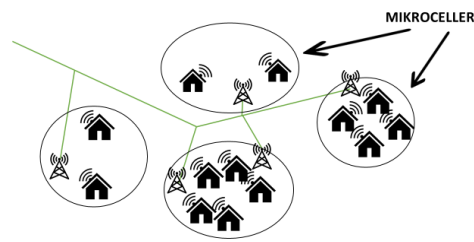
⁶ Detaljerna på hur vi har kommit fram till denna siffra finns i appendix

⁷ Enligt PTS definition i Rapport: PTS mobiltäcknings- och bredbandskartläggning 2018, PTS-ER-2019:5, Post- och telestyrelsen

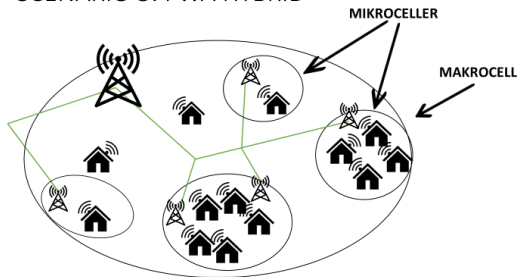
SCENARIO 1: FWA MAKROCELLER



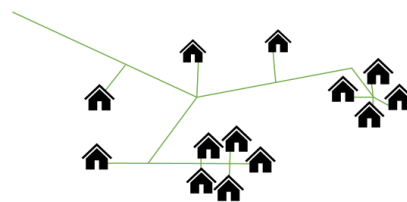
SCENARIO 2: FWA MIKROCELLER



SCENARIO 3: FWA HYBRID



SCENARIO 4: FULL FIBER



Figur 1 –Fyra scenarier för att ansluta upp till 98 procent. De gröna sträckorna visar fiberkablar som behöver installeras; de stora antensymbolerna visar var antensajterna finns i dag, medan de små antensymbolerna visar antensajter som behövs byggas. Hussymbolerna visar byar och mindre samhällen, samt isolerade hushåll.

2.1 Uppskattad kostnad för att ansluta upp till 98 procent

Studiens beräkningar presenteras i detalj i appendix. Tabellen nedan och figurerna på sida 7 presenterar, för varje scenario, total kostnad under 10 år, inklusive investeringskostnad (capital expenditure, CAPEX) och driftkostnader (operational expenditure, OPEX); energiförbrukning; samt prestanda i form av nedladdningshastighet.

	Kostnad under 10 år, Miljarder kronor			Energi- förbruk under 10 år, Miljon kWh	Genomsnittlig nedladdningshastighet ⁸ , Mbit/s	
	total	CAPEX	OPEX		tätbebyggd	glesbygd
Scenario 1, FWA med befintlig infrastruktur (makroceller)	14.3	10.8	3.5	1702	19	76
Scenario 2, FWA med förtätad infrastruktur (5G med mikroceller)	35.1	18.2	16.9	2893	554	1280
Scenario 3, FWA hybrid (5G med mikro och makroceller)	40.1	20.5	19.6	4397	573	1356
Scenario 4, fullfiber	27.5	26.9	0.6	350	symmetrisk upp till 10 Gbit/s i dag	

⁸ Studien är baserat på en förenklad modell där storlek av makro och mikroceller inte optimeras till befolkningstäthet, vilket förklarar att glesbygden får högre nedladdningshastigheter än tätbebyggd. En kommersiell utbyggnad skulle säkert göra en sådan optimering, vilket skulle leda till en justering av värdena i tabellen med ett något lägre hastighet i glesbygd och högre hastighet i tätbebyggd.

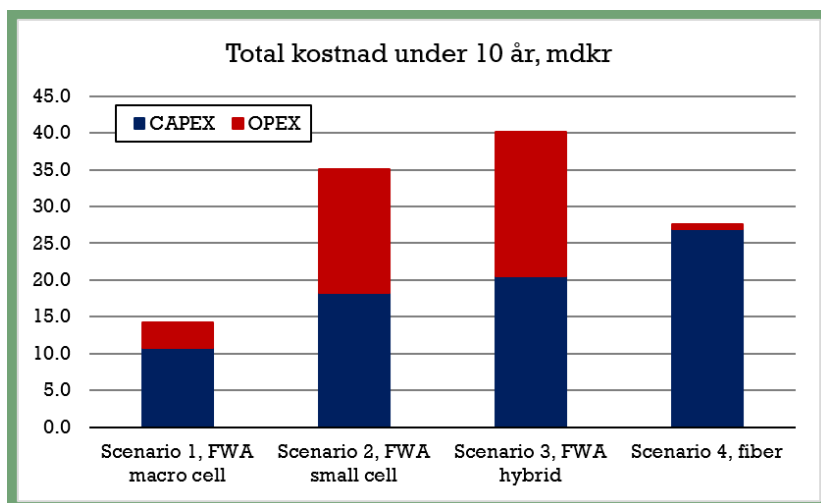
Notera att eftersom spektrum är en begränsad resurs byggs FWA-nät ofta på ett sådant sätt som ger mer utrymme till nedladdning än uppladdning. Dessutom är effekten i antennerna hos slutanvändare lägre än hos radiobasstationen, både av hälso- och tekniska skäl. Konsekvensen är att uppladdningshastighet med FWA normalt sätt blir väsentligt lägre än uppladdningshastigheten. Detta kan vara godtagbart för underhållstjänster som TV och videostreaming, men väntas skapa problem för tjänster som kräver datauppladdning från slutanvändare⁹.

Följande kan läsas i resultaten:

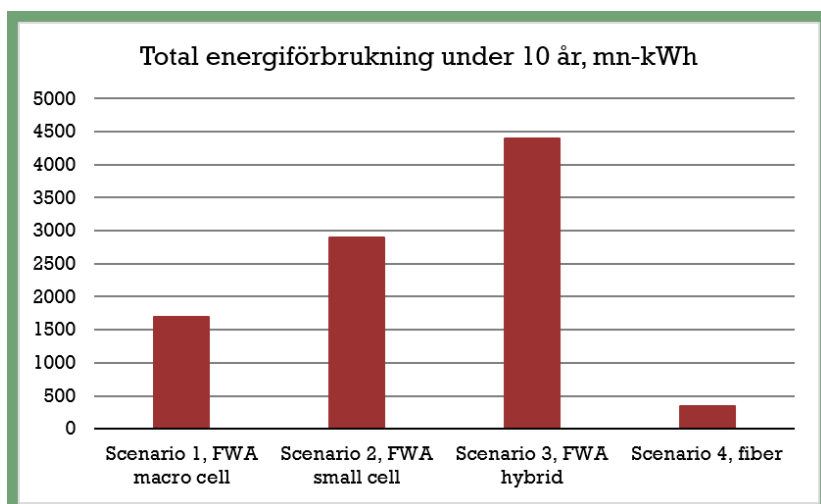
- FWA som använder den befintliga kommersiella infrastrukturen (scenario 1, makroceller), beräknas ha den lägsta totala kostnaden under en tio-årsperiod. Däremot blir den genomsnittliga nedladdningshastigheten som varje hushåll/arbetsplats kan förvänta sig långt under de hastigheter som kan uppnås vid fasta bredbandsanslutningar, exempelvis fiber- och kabel-tv-nät, vilket innebär att det inte heller bidrar i arbetet med att nå bredbandsmålen om 1 Gbit/s.
- FWA-lösningar som använder mmWave och mikroceller (scenarier 2 och 3) bedöms kunna leverera hastigheter i glesbebyggda områden runt 1 Gbit/s i nedladdningshastighet om man tillåter en fördubbling av mmWave-spektrumet (som dock innebär ökade kostnader och mer energiförbrukning utöver det som framkommer i rapportens beräkningar). Till följd av höga driftskostnader förväntas detta scenario innebära den högsta totala kostnaden under tio år, särskilt för FWA-hybridlösning med användning av befintliga makroceller förtätade med nyinstallerade mikroceller (scenario 3).
- FWA-lösningar har betydligt högre energiförbrukning än ett fiberbaserat nät. Dessutom betyder den genomsnittliga slutanvändarhastigheten inte nödvändigtvis att det blir den garanterade åtkomsthastigheten för alla hushåll och arbetsplatser eftersom nätverksprestanda varierar med avståndet från antennen, särskilt för makroceller där avstånden kan vara stora. Till detta bör tilläggas att uppladdningshastigheten vanligtvis är betydligt lägre än nedladdningshastigheten och att hastigheten kan degraderas av dåliga väderförhållanden (exempelvis tung dimma och regn¹⁰), eller av föremål mellan hushåll/arbetsplats och antenn (exempelvis skog och servicebyggnader). Det finns också risk att enskilda hushåll hamnar i så kallad radioskugga då det kan finnas faktorer som helt stänger ute radiosignaler (exempelvis berg).

⁹ Framtidens ökade behov av snabba upp- och nedladdningshastigheter lyfts också i bredbandsstrategin, där man skriver att *"Krav på symmetri, dvs. samma hastighet i upp- och nedlänk, kommer exempelvis att bli extra viktigt för tjänster som kräver möjlighet till interaktion, som digitala trygghetslarm, videokommunikation inom sjukvården eller deltagande i distansutbildningar i realtid med ett större inslag av interaktivitet."*, <https://www.regeringen.se/4b00e7/contentassets/a1a50c6a306544e28ebaf4f4aa29a74e/sverige-helt-uppkopplat-2025-slutlig.pdf>

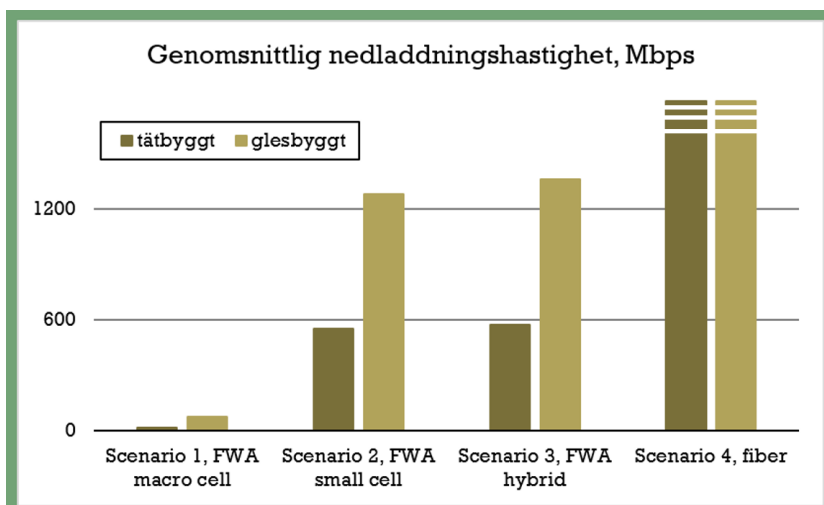
¹⁰ Se till exempel: CC Chen, "Attenuation of electromagnetic radiation by haze, fog, clouds, and rain", United States Air Force project Rand report, 1975, <https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/reports/2006/R1694.pdf>



Figur 2 – Total kostnad för att koppla upp för att ansluta upp till 98 procent i olika scenarier



Figur 3 – Total energiförbrukning för att ansluta upp till 98 procent i olika scenarier



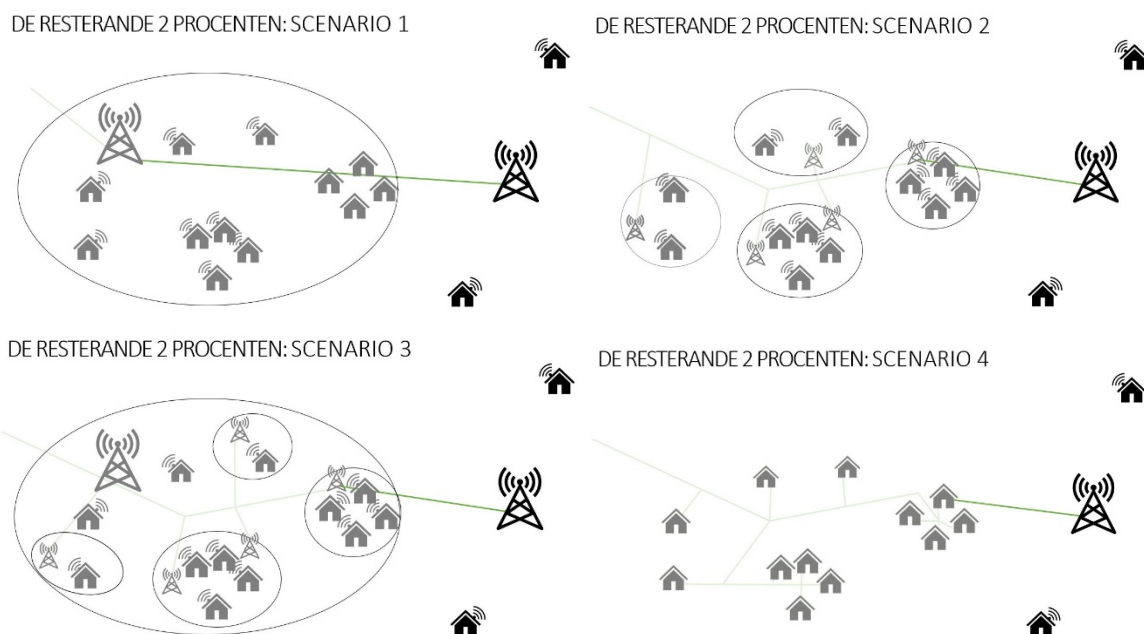
Figur 4 – Genomsnittlig nedladdningshastighet⁸ för att ansluta upp till 98 procent i olika scenarier. Fiberscenario ger symmetrisk upp och nedladdningshastigheter, och har i stort obegränsad kapacitet.

2.2 De resterande två procenten

Enligt Sveriges nationella bredbandsstrategi ska, utöver de 98 procent som ges tillgång till hastigheter om 1 gigabit per sekund, resterande 1,9 procent ha tillgång till 100 Mbit/s, och 0,1 procent till 30 Mbit/s. PTS bedömer att det behövs ytterligare investeringar, utöver förväntade kommersiella investeringar, på minst 22 miljarder kronor för att ansluta 99,9 procent (98+1,9) med fiber 2025¹¹. Vad det skulle kosta att uppnå målet med hjälp av andra tekniker, exempelvis trådlösa alternativ, är mycket osäkert, men det bedöms vara allmänt accepterat i telekombranschen att radiobaserade lösningar bör utnyttjas vid sidan om fiber för att nå ut till de sista två procenten. Studiens beräkningar ger en positiv indikation att en FWA-lösning som återanvänder existerande radioinfrastruktur har potential att nå dessa delmål.

Vad kostnaden och prestanda blir för dessa hushåll, som ofta befinner sig i mer extrem glesbygd, har inte analyserats inom ramen för arbetet med denna rapport. Det valet man gör för att nå upp till 98 procent av befolkning kommer dock även att ha en inverkan på de sista 2 procenten. Detta på grund av att närmaste fiberanslutningspunkt kommer att befinna sig olika långt bort från de antensajterna, som behövs uppgraderas, beroende på vilket av de fyra scenarierna som realiserats. Exakt hur mycket beror från fall till fall, men i snitt kan vi förvänta oss att (se även Figur 5):

- Under scenario 1 kommer närmaste fiberanslutningspunkt att vara den närmaste makro-antensajten; och den kommer med stor sannolikhet att ägas av en mobiloperatör.



Figur 5 – Att ansluta de resterande 2 procenten, baserat på olika scenarier för övriga befolkningen: illustration av hur mycket fiber behövs installeras för att koppla en antensajt.

¹¹ PTS rapport ”Uppföljning av regeringens bredbandsstrategi 2019”, PTS-ER-2019:11.

- Under scenarierna 2 och 3 kommer närmaste fiberanslutningspunkt att vara i närheten av det närmaste hushållet bland ”de 98 procenten”; och den kommer med stor sannolikhet att ägas av en mobiloperatör.
- Under scenario 4 kommer närmaste fiberanslutningspunkt att vara i närheten av närmaste hushåll bland ”de 98 procenten”; och den kommer med viss sannolikhet att ägas av en operatörneutral fibernätägare.

Avståndet från närmaste fiberanslutningspunkt väntas påverka framtida uppgraderingskostnad, medan ägarbilden förväntas påverka konkurrenssituationen på marknaden.

I dag finns det ett fåtal kommersiella fibernätägare som valt att inte själva erbjuda slutkundstjänster utan istället erbjuda en operatörsneutral plattform där kunden kan välja mellan en flora av tjänster och leverantörer. Av tradition har även de kommunägda stadsnäten, som stått för cirka hälften av fiberutbyggnaden, valt att erbjuda en sådan operatörsneutral plattform. En operatörneutral fibernätägare bedöms ha högre incitament att hyra ut fiber då denne inte erbjuder egna tjänster utan har tjänsteleverantörer som kunder; medan mobiloperatörer äger fiber i första hand för att sälja egna tjänster och kan därför antas ha lägre incitament att hyra ut fiber till potentiella konkurrenter.

2.3 Sammanfattning av den teknoekonomiska analysen

Baserat på ovanstående resultat bedöms att:

1. Den fullfiberbaserade lösningen, alltså scenario 4, bör vara det främsta valet om Sverige vill uppnå regeringens bredbandsmål, att 98 procent av landets hushåll och arbetsplatser ska ha tillgång till 1 Gbit/s år 2025.
2. Även om FWA, som använder mmWave och mikroceller, alltså scenario 2, är potentiellt kapabelt att uppnå målet om 1 Gbit/s till 98 procent, kommer det också innebära hög kostnad och energiförbrukning. Dessutom blir det svårt att garantera kontinuerlig tjänstekvalité till alla hushåll och arbetsplatser.
3. En FWA-lösning som i princip bara använder befintlig mobilinfrastruktur, alltså scenario 1, kommer att kosta betydligt mindre än andra lösningar. Prestandan förväntas dock vara synnerligen sämre än vad bredbandsmålet anger. Den uppskattade energiförbrukning är också betydligt högre än den fullfiberbaserade lösningen.
4. Den fullfiberbaserade lösningen ger utöver höga symmetriska hastigheter till anslutna hushåll och företag även bättre förutsättningar för att nå de resterande 2 procenten med en kostnadseffektiv FWA-baserad lösning.

3 Samhällsekonomiska beaktanden

Bortom de teknoekonomiska siffrorna, förväntas de olika scenarierna också ha effekter på telekommernaden, övriga näringslivet och inte minst det svenska samhället. Nedan lyfts ett antal aspekter.

3.1 Öppenhet och konkurrens.

Ett öppet nät är en infrastruktur som är tillgänglig för marknadens alla aktörer på likvärdiga villkor. I det öppna nätet konkurrerar tjänsteleverantörerna med tjänsteinnehåll. Nätägaren tillhandahåller svartfiber och/eller kommunikations-/transmissionstjänster exempelvis till tjänsteleverantörer. Öppna nät är i dag standard på den svenska bredbandsmarknaden.

Det är teoretiskt möjligt att applicera konceptet oberoende av vilken teknisk lösning som används. Dock finns det mekanismer som minskar sannolikheten för att en viss anslutningsform bedrivs i öppen form. När det gäller nättillgång på passiv nivå, alltså uthyrning av fysisk uppkoppling till en specifik slutanvändare, är detta bara möjligt när en dedikerat fysisk uppkoppling finns (exempelvis en fiber- eller kopparkabel). I fallet med FWA-lösningar baseras dessa på en fysisk uppkoppling (luften) delad mellan flera slutanvändare. När det gäller nättillgång på aktiv nivå, alltså bitstream-uppkoppling till slutanvändare, finns det i dag standardiserade tekniska lösningar och väletablerade affärsmodeller för koppar- och fibernät medan samma koncept inte utvecklats för anslutningar i trådlös kommunikation. Detta innebär att det finns en risk att en öppen modell inte utvecklas till standard i FWA-näten, vilket innebär att hushåll och företag som ansluts till dessa nät inte ges samma valfrihet och priskonkurrens som fiberanslutningar möjliggör.

3.2 Höjd för framtida behov

Att samhället kommer att öka sin efterfrågan på högre hastigheter har tidigare under bredbandshistorien ifrågasatts. Dock har historien istället visat att det finns en risk med kostsamma investeringar i tekniker med kapacitetsbegränsningar då samhällets behov av kapacitet snarare visat sig öka i snabbare takt än förutspått. ADSL-satsningen på 90-talet omgärdades av liknande bedömningar. Statistik från PTS visar också att det redan i dag finns en förflyttning från abonnemang från lägre till högre hastighet: år 2015 var mindre än hälften av abonnemangen på 100 Mbit/s eller högre, och i dag är tre fjärdedelar det. I dag är antalet abonnemang på 1 Gbit/s 123 000, en ökning med 28 procent jämfört med året innan. Abonnemang på 10 Gbit/s finns tillgängliga på fibernät, och trots att väldigt få sådana köps i dag är det med viss sannolikhet en fråga om tid innan även dessa blir vanliga.

Fiberutbyggnadens höga kostnader är i stor utsträckning kopplade till anläggningsarbetet av den fysiska infrastrukturen, exempelvis grävkostnader. En fiberkabel har i det närmaste obegränsade kapacitetsmöjligheter¹². Detta innebär att samma infrastruktur med enkla medel kan uppgraderas i takt med att samhällets behov av kapacitet förändras.

¹² Frekvensbandet är 4 till 5 storleksordningar – dvs 10 000 till 100 000 gånger – bredare än radiovågor.

Radiobaserade lösningar saknar samma möjlighet och väntas kräva kostsamma uppgraderingar, uppskattningsvis var tionde år.

3.3 Mobila tjänster och 5G-möjligheter

Trådlös kommunikation möjliggör mobilitet. Detta har Sveriges befolkning under de senaste decennierna lärt sig att uppskatta, först med mobiltelefoner under 90-talet, och mer nyligen med smartphones och mobilt internet. Det radiospektrum som nyttjas för att möjliggöra den trådlösa kommunikationen är dock en begränsad resurs. Används radiospektrum för att leverera uppkoppling till ett hushåll går samma del av spektrumet inte att nyttja för att koppla upp andra mobila enheter i dess närhet. Det finns därför en fördel med att avlasta det radiospektrum som finns tillgängligt för trådlös kommunikation och istället nyttja fast bredbandsinfrastruktur (fiberbroadband) för att på så sätt säkerställa tillgången till spektrum för de tjänster som är av rörlig karaktär.

För att leverera 5G-prestanda krävs att mobilcellerna blir mindre och mindre, medan den totala kapacitet som varje antenn måste ta hand om behöver öka. Detta väntas innebära ett ökat behov av fiberinfrastruktur (se vidare i appendix). Ett scenario där fiberinfrastruktur används för att nå det svenska 2025-målet bedöms därför vara en viktig förutsättning för utveckling av riktiga 5G-nät även på landsbygden, vilket är viktigt för bland annat det gröna näringslivet.

3.4 IoT och smarta samhällen

Internet of Things, IoT, och smarta samhällen väntas förändra bostäder och arbetsplatser, inte minst inom de gröna näringarna, med uppkopplade maskiner och sensornätverk¹³. Vissa tjänster väntas kräva stora kapacitetsbehov medan andra klarar sig med lägre hastigheter men kanske istället har krav på hög tillgänglighet och/eller låg fördröjning. Vissa applikationer väntas koppla upp stora anläggningar, andra små mobila föremål eller distribuerade sensorer. Via ett fibernät ges tillgång till den obegränsade kapacitet och näst intill obefintliga fördröjning som ett IoT och 5G-nät väntas behöva för att kunna garantera de mångfacetterade krav som framtidens digitala tjänster väntas ställa.

3.5 Samhällstjänster och bredare samhällsekonomiska nyttor

Fler studier¹⁴ har visat att en fiberbaserad bredbandsinfrastruktur väntas leda till positiva samhällsekonomiska effekter, exempelvis i form av ökad sysselsättning, minskad utflytt från glesbygdsområden och minskat resande. Studier har även konstaterat att bredbandsbaserade digitala samhällstjänster leder till ökad livskvalité och minskade utförarkostnader¹⁵.

Flera av ovanstående exempel bedöms också kunna genomföras med anslutningar av lägre kvalitet, men antalet och vikten av de som behöver symmetriska uppkopplingar med höga upp- och nedladdningshastigheter (exempelvis inom hälsa och omsorg eller skola) kommer

¹³ För en översyn, se till exempel Macklean, LRF, *Insikter #9, Internet of Things*, <https://www.macklean.se/Insikter/insikter-9/>

¹⁴ Se till exempel: <http://bredbandsnyttan.se>

¹⁵ Se till exempel: <https://www.pts.se/sv/nyheter/internet/2019/digitaliseringssnurran- visar-potentialen-med-digitalisering-av-kommunal-verksamhet/>

bara att växa. Samtidigt kommer en nästan obegränsad kapacitet och hög uppladdningshastighet (symmetriska uppkopplingar) att främja utvecklande av innovativa och ”bandbreddshungriga” tjänster till bredare utsträckning än i områden med sämre förutsättningar, med andra ord, mer företagande och bättre ekonomisk tillväxt.

En konsekvens av att dessa hushåll riskerar att inte kunna ta del av framtida, mer kapacitetskrävande, tjänster blir att möjligheten att ta del av det digitala samhällets utbud inte blir jämlik. Det faktum att cirka nio av tio svenska hushåll och företag redan i dag har tillgång till en fiberuppkoppling utan sådan kapacitetsbegränsning väntas öka risken för att utvecklingen av de digitala tjänster som erbjuds på den svenska marknaden anpassas till den breda majoriteten med tillgång till högre hastigheter. Utifrån ett samhällsperspektiv innebär ett sådant scenario också att offentliga instanser riskerar att behöva erbjuda parallella, mindre kapacitetskrävande, tjänster för hushåll med lägre tillgång till kapacitet.

4 Slutsatser

Studien har genomfört en teknoekonomisk analys som kvantifierar kostnader och prestanda för olika infrastruktursval för att nå Sveriges bredbandsmål, samt utvärderat bredare konsekvenser på bredbandsmarknad och samhällsekonomisk utveckling. Följande slutsatser kan dras:

- Mindre kostsamma trådlösa lösningar erbjuder garanterade hastigheter som är betydligt lägre än bredbandsmålen för 2025, vilket kan komma att påverka möjligheten att exempelvis nyttja digitala välfärdstjänster eller använda avancerade applikationer inom ramen för sin företagsverksamhet.
- Scenarier där landsbygden istället för fiber erbjuds 5G-hastigheter via trådlösa nät riskerar att resultera i en betydligt kostsammare utbyggnad jämfört med PTS estimerade kostnad för fortsatt fiberutbyggnad.
- Trots att inga specifika mål har definierats, lyfter regeringens strategi framtidens ökade behov av snabba upp- och nedladdningshastigheter, alltså symmetriska uppkopplingar, som en viktig fråga för vissa smarta tjänster inom näringslivet och välfärden. Fiberkommunikation är byggt för att leverera symmetriska uppkopplingar, men inte trådlösa lösningar.
- En fortsatt fiberutbyggnad även möjliggör uppgradering av befintliga och framtida radionät vilket kan tidigarelägga möjligheten att erbjuda hushåll och företag på landsbygden tillgång till höga kapaciteter via mobilnäten, till exempel med 5G.
- Utbyggnad av enbart radiobaserade nät riskerar att hämma tjänstekonkurrensen i näten förutsatt att dessa nät inte utvecklar en standard för så kallade öppna nät.

Appendix: Technoeconomic analysis

A.1 Introduction

This study performs an analysis on the cost, energy consumption and performance (in the term of download speed) of optical fiber versus 5G fixed wireless access (FWA) based solutions in order to achieve one of the government’s 2025 broadband goals that 98% of Swedish households and workplaces should have at least 1 Gbit/s broadband access. Alongside with the pure fiber-based solution, 3 FWA-based scenarios using existing commercial macro cells, newly installed mmWave small cells, and hybrid macro and small cells, are evaluated, as outlined in Table 1.

Table 1 Technical scenarios

Scenario 1	FWA using existing commercial macro cell sites
Scenario 2	FWA using newly installed mmWav small cells
Scenario 3	Hybrid FWA using existing macro cell sites densified with new small cells
Scenario 4	Pure fiber-based solution

A.2 Methodology

A.2.1 Relevant concepts

Access. This study follows PTS’s understanding¹⁶ of the “access” to 1 Gbit/s, i.e., if a household or workplace is “passed” by fiber, or is within FWA coverage, it is regarded as having an “access” to fiber or FWA broadband. Accordingly, in this work we just consider the deployment and operational cost of fiber or FWA networks, and any cost associated with the end user, e.g. the cost of installing a fiber drop to a house, or the cost of installing a FWA antenna on the roof of a house, and other equipment and associated cost (e.g. energy consumption, equipment renewal etc.) on the end user side, are not included.

“Tätbebyggd” vs. “Glesbygd”. In PTS broadband penetration statistics, apart from the total statistics, the corresponding statistics in urban (*tätbebyggd*) and rural (*glesbygd*) areas are also available. Still, it should be noted here that in PTS statistics, urban (*tätbebyggd*) area includes both “*tätort*”¹⁷ and “*småort*”^{18 19}, and rural (*glesbygd*) area refers to those outside

¹⁶ Rapport: PTS mobiltäcknings- och bredbandskartläggning 2018, PTS-ER-2019:5, Post- och telestyrelsen

¹⁷ <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/miljo/markanvandning/tatorter/>

¹⁸ <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/miljo/markanvandning/smaorter-arealer-befolkning/>

¹⁹ Rapport: PTS mobiltäcknings- och bredbandskartläggning 2018, PTS-ER-2019:5, Post- och telestyrelsen

“tätort” and “småort” areas. Accordingly, this study follows PTS’s definitions in the differentiation of urban (*tätbebyggd*) and rural (*glesbygd*) areas.

A.2.2 Estimation of targeted homes and workplaces

Accordingly to PTS’s latest broadband availability statistics²⁰, we use the parameter “*Tillgång till fast bredband om minst 1 Gbit/s, eller fiber i absoluta närheten*” to benchmark the latest status of the government’s goal of 1 Gbit/s broadband access. Based on this information, Table 2 showd the calculated total number of households and workplaces that are yet to be passed by fiber or covered by 5G FWA to reach the 98% @ 1 Gpbs goal. The calculations are carried out following the following procedures:

1. Total number of households and workplaces are extracted from *Kommun- och landstingsdatabasen, Kolada*;
2. Total number of households and workplaces that don’t have 1 Gbit/s broadband access or have not been passed by fiber are then calculated;
3. Assuming that the least-cost principle applies in order to reach the 98% @ 1 Gbit/s goal, the households and workplaces that are located in the most remote part in rural areas will thus be those that are not targeted. This also implies that all the unpassed homes and workplaces in urban areas are to be targeted to reach the goal;
4. Another modification is that, according to Kolada, there are 1298116 workplaces in Sweden, of which 880444 have no employees. These no-employee workplaces are most likely registered by home-run companies that use their homes as the actual workplaces. In order to count this overlapping effect, we assume that 80% of those workplaces with no employees are actually home-based, hence there is no need for double-connection or double-coverage to these workplaces. Based on this assumption, a shrinking factor of 0.46 $((1298116 - 880444 * 0.8) / 1298116)$ is used to estimate the “real” number of workplaces that are to be passed by fiber or covered by FWA solutions.

Table 3 shows the targeted households/workplaces relative to the total number of households & workplaces in urban and rural areas, respectively. More specifically, in rural and urban areas, 48.6% respective 5.7% of houses and workplaces don’t have 1 Gbit/s broadband access or have not been passed by fiber in PTS’s latest statistics. Furthermore, by taking away those households and workplaces in the most remote rural areas corresponding to 2% of the total in Sweden, a net 31.7% of households and workplaces are to be covered by FWA or passed by fiber in rural areas.

The total number of targeted households and workplaces shown in Table 2 are calculated in order to address the following two aspects in this study:

1. to estimate the total area that are to be covered by FWA, or the total road length (and hence the total length of new fiber that needs to be installed), both in urban and rural areas, as described in the section below;

²⁰ <https://www.pts.se/sv/dokument/rapporter/internet/2019/pts-mobiltacknings--och-bredbandskartlaggning-2018/>

- to compare the average cost and performance per targeted household/workplace between the studied scenarios as listed in Table 1.

Table 2 Targeted homes and workplaces

	Total	Tätbebyggd	Glesbygd
Total households unpassed 2018	439 339	225 111	214 228
Total workplace unpassed 2018	203 298	75 985	127 313
Total households unpassed 2018 targeted	346 191	225 111	121 080
Total workplace unpassed 2018 targeted	177 336	75 985	101 351
Total “real” workplace unpassed 2018 targeted	81 113	34 755	46 358
Total to cover to reach 98% coverage by fiber (2% uncovered only rural)	427 304	259 866	167 438

Table 3 Targeted households/workplaces relative to the total number of households & workplaces in urban and rural areas, respectively

	net	2% untargeted	total
Tätbebyggt	5.7%		
Glesbygd	31.7%	16.9%	48.6%

A.2.3 Estimated area and road length for targeted end users

In order to cost the studied technical scenarios, two key parameters are needed: the total area that needs to be covered by FWA for the targeted end users, and the total length of local roads that connect these end users. These two parameters determine the total number of FWA cells, and the total length of newly installed fibers.

In order to estimate the total area that the targeted end users utilize, we use statistics from SCB of the total developed area in Sweden, both in urban and rural areas.

According to SCB²¹, only 3% of Sweden’s total area are developed area for households and industrial & public service activities. Furthermore, urban areas (including both *tätort* and *småort* in this study) occupy 1.8% of the total area in Sweden, of which 63% are developed area^{22 23}. Based on these statistics, we can obtain the total developed area in Sweden both for urban and rural areas, as shown in Table 4.

²¹ <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/miljo/markanvandning/markanvandningen-i-sverige/pong/statistiknyhet/markanvandningen-i-sverige2/>

²² <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/miljo/markanvandning/tatorter/>

²³ <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/miljo/markanvandning/smaorter-arealer-befolkning/>

Table 4 Total developed area in Sweden

	Area (km²)
Total	11822
Tätbebyggt	4665
Glesbygd	7157

In order to estimate the total area that the targeted end users utilize, we use published studies²⁴ on the population distribution modelling which states that:

- urban land area (A) increases proportionally to population size (P) raised to a power (n)— i.e. $A \propto P^n$

while n is usually at ~ 2. Accordingly, in this study, we estimated the targeted areas in urban and rural areas with the following treatment:

- for urban areas, the power of n was set at 2;
- for rural areas, since we just consider those already developed areas (occupying just 1.5% of total area in Sweden), we assume that the power distribution still holds, but to a relatively higher degree, and is set at 2.5.

Table 5 shows the estimated total area to cover both for urban and rural areas, using the corresponding statistics in Table 3 and Table 4, respectively. Note here that in the estimation, the targeted end users are considered as those that are located in the most remote part of the urban and rural areas, i.e., all the households/workplaces that have 1 Gbit/s broadband access or have been passed by fiber are those that are located in the center part of the urban areas, or at the least remote places in rural areas.

Table 5 Total targeted area

	Targeted area (km²)	note
Tätbebyggt	519	$4665 * (1 - (1 - 5.7\%)^2)$
Glesbygd	3144	$7157 * ((1 - (1 - 48.6\%)^{2.5}) - (1 - (1 - 16.9\%)^{2.5}))$

According to SCB²⁵ there are over 550000 km roads in Sweden, of which:

De enskilda vägarna är längst med totalt ca 433 000 km. Majoriteten av de enskilda vägarna är skogsbilvägar som används för att avverka skog, men också vägar inom

²⁴ Urban Studies, Vol. 44, No. 10, 1889–1904, September 2007, "Urban Land Area and Population Growth: A New Scaling Relationship for Metropolitan Expansion"

²⁵

http://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__MI__MIo803__MIo803E/VaglangdKategori/

samfälligheter är vanligt förekommande. De statliga vägarna är ca 105 000 km och de kommunala vägarna är klart minst sett till längden med totalt ca 41 800 km.

In order to estimate the total road length that actually connects to a targeted end user, i.e., a permanent households or a workplace, it's more appropriate and feasible to use the reference numbers from Trafikverket²⁶, which states that:

Det svenska vägnätet består av:

- 98 500 km statliga vägar
- 42 300 km kommunala vägar
- 74 000 km enskilda vägar med statsbidrag

Based on the statistics from Trafikverket, we estimated the total local road length according to the following:

- *kommunala vägar* are considered as the local roads connecting households and workplaces in *tätbyggt* areas;
- *enskilda vägar med statsbidrag* are considered mainly connecting a permanent household or a workplace in *glesbyggt* areas²⁷. Even so, a part of them still could belong to (the most remote part of) *tätbyggt* area, or could be roads for e.g. a *fritidshus*. Hence, in this study, we assume that 5% of *enskilda vägar med statsbidrag* belong to *tätbyggt* area, and 5% more are those for reaching *fritidshus* etc. that are not targeted for 1 Gbit/s broadband access.

Base on these considerations, Table 6 outlined the total local road length in *tätbyggt* and *glesbyggt* areas, respectively.

Table 6 Total local road length connecting permanent households/workplaces in Sweden

	Total road length (km)	note
Tätbebyggt	46000	42300+74000*5%
Glesbygd	66600	74000-74000*5%-74000*5%

In order to estimate the total road length for the targeted end users, we assume the same principle for the road length distribution with population as for the area, i.e., for urban and rural areas, road length increases proportionally to population size (P) raised to a power of n at 2 and 2.5, for urban and rural areas, respectively. Based on these assumptions, Table 7 shows the corresponding estimated total targeted local road length. Again to note here is that in the estimation, the targeted end users are considered as those that are located in the most remote part of the urban and rural areas.

²⁶ <https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/vag/Sveriges-vagnat/>

²⁷ <https://www.trafikverket.se/tjanster/ansok-om/ansok-om-bidrag/ansok-om-bidrag-for-enskild-vagar/Vagkategori-A-F/>

Table 7 Total targeted local road length

	Targeted road length (km)	note
Tätbebyggt	5122	$46000 * (1 - (1 - 5.7\%)^2)$
Glesbygd	29254	$666000 * ((1 - (1 - 48.6\%)^{2.5}) - (1 - (1 - 16.9\%)^{2.5}))$

A.2.4 Estimated existing macro cells to be utilized

In order to evaluate the FWA solution using existing macro cells, the key parameter is the number of existing macro cells that are to be utilized. In doing this, we estimate that for a typical operator in Sweden, the existing commercial macro cells amounts to 8000 according to Analysys Mason ²⁸. Furthermore, of these 8000 macro cells, ~ 6000 belong to the urban area, while the rest are located in rural areas²⁹, as shown in Table 8.

In order to estimate the total number of existing macro cells that are located in areas occupied by the targeted households and workplaces, we adopted the following approach:

- in urban areas, we assume each macro cell cover the same amount of end users, i.e., the number of macro cells scales proportionally to the number of households and workplaces;
- in rural areas, we assume that each macro cell covers the same amount of area, in considering that the coverage of existing mobile networks is prioritized than the performance in rural areas.

Based on these assumptions, we can calculate the total number of existing commercial macro cells that can be used for our targeted end users, as shown in Table 9.

Table 8 Total number of existing commercial macro cells

	Number of exiting commercial macro cells
Total	8000
Tätbebyggt	6000
Glesbygd	2000

Table 9 Total number of existing commercial macro cells to be utilized

	Number of cells	note
Tätbebyggt	344	$6000 * 5.7\%$
Glesbygd	878	$2000 * (3144/7157)$

²⁸ Analysys Mason: Critical communications for public protection and disaster relief, 28.2.2018

²⁹ Reference data source: SSNF's macro cell database

A.2.5 Cost modelling

The cost modelling of the studied technical scenarios consists of two parts, i.e., the radio access network (RAN), and fiber deployment.

In this study, cost elements for 5G FWA RAN are based on two case studies in Britain and the Netherlands^{30 31}. Table 10 and Table 11 outlines the corresponding cost items for the macro cell 5G multicarrier upgrade, and 5G small cells, respectively. Worth note here is that the spectrum costs are not included as the spectrum considered at midband and mmWave band (see section A.2.6) is yet to be allocated and auctioned.

Table 10 Cost elements of macro cell 5G upgrade

	CAPEX (€)	CAPEX annual change	OPEX annual (€)	OPEX annual change
5G multicarrier BS	46200	-3%	4400	-5%
Additional carrier on current BS	16950	-3%	2000	
Civil works	20300	3%		
Site rental			5650	3%
core upgrade	10% of RAN and backhaul upgrade cost			

Table 11 Cost elements of 5G small cell

	CAPEX (€)	CAPEX annual change	OPEX annual (€)	OPEX annual change
Small cell equipment	2800	-3%	400	-3%
Small cell civil works	15000	-3%	2000	
Small cell site rental, urban			5650	
Small cell site rental, rural			2825	
core upgrade	10% of RAN and backhaul upgrade cost			

Table 11 lists the basic cost elements in deploying fiber active optical networks (AON), based on the model developed by RISE in the ESA project OCEAN³².

³⁰ Telecommunications Policy 42 (2018) 636–652, "The cost, coverage and rollout implications of 5G infrastructure in Britain"

³¹ Telematics and Informatics 37 (2019) 50–69, "Assessing the capacity, coverage and cost of 5G infrastructure strategies: Analysis of the Netherlands"

³² <https://artes.esa.int/projects/ocean>

Table 12 Cost elements of fiber deployment

Cost item	CAPEX (€)	Annual change
Cost per M1 of planning cost	0.25	
Cost per M1 for right of passage and other authorizations	0.30	
Cost per M1 of digging works	30.00	3%
% of increase in construction cost due to re-paving	100%	
Cost per M1 of installation works (blowing cable, splicing, measurements)	7.00	
Cost per M1 for material for passive infrastructure	10.00	
Cost per M1 for surveying and public cadastre registration	1.00	
Cost of acquisition or setting up the spaces for network's nodes	10,000	
Cost of network active equipment on the node, AON	20,000	

A.2.6 FWA capacity and power consumption

In this study, in order to obtain an indicative performance estimation for technical scenarios involving FWA, a hypothetical spectrum portfolio is envisioned, as shown in Table 13, following the case study in Ericsson's FWA handbook³³. In Table 13, the expected spectral efficiency, both for a single beam using SU-MIMO and for the sector total using MU-MIMO, are also listed, based on Ericsson's latest field trial results³⁴ and 3GPP's self evaluation study³⁵.

Based on the spectrum portfolio and the corresponding expected spectral efficiency, we may calculate both single beam and sector downlink capacities in the term of the total throughput, as shown in Table 14. Note here that the single beam throughput determines the maximum end user download speed when the beam capacity is consumed by one end user. On the other hand, the total sector throughput determines the average download speed for all the end users covered by the sector. Note also here is that for macro cells, we just consider carriers at midband and below. For carriers above midband, only small cells are considered, in considering that, on the one hand, in rural areas where the macro cell inter-site-distance (ISD) is large, mmWave signals can not reach all the end users with good signal-to-noise/interference-ratio (SNIR). On the other hand, in urban areas the physical

³³ Fixed Wireless Access handbook, Ericsson 2019

³⁴ GS Sickand: "Fixed Wireless Access - Path to Economical Rural Broadband", Ericsson, July 2019

³⁵ 3GPP: "Study on self evaluation towards IMT-2020 submission", 3GPP TR 37.910 V16.0.0 (2019-06)

environmental conditions e.g. a building block also limit the reach of mmWave signals despite the relative short macro cell ISD.

In regarding the power consumption, Table 15 listed power parameter values used in this study. For small cells, the parameter value is based on published pre-study on the energy efficiency of 5G small cell networks³⁶. Based on the same principle that the use of MIMO doubles the power consumption, for macro cells we assume that the total power of a 5G macro cell double that of a 4G LTE cell³⁷

Table 13 FWA spectrum portfolio and expected spectral efficiency

Carrier band	Total Bandwidth (MHz)	Single beam Spectral efficiency, bps/Hz	Sector spectral efficiency MU-MIMO, bps/Hz
LTE band 1 (Below 3 GHz)	20	5	40
LTE band 2 (Below 3 GHz)	20	5	40
Midband (e.g. 3.5 GHz)	50	5	40
Midband (e.g. 3.8 GHz)	50	5	40
mmWave band (e.g. 26 GHz)	200	4	30
mmWave band (e.g. 28 GHz)	200	4	30

Table 14 Macro and small cell sector downlink capacities

	Carrier bands	Single beam DL throughput (4:1 DL/UL), Gbit/s	Sector DL throughput (4:1 DL/UL), Gbit/s
Macro cell	midband and below	0.6	4.8
Small cell	mmWave	1.28	9.6

Table 15 Macro and small cell power

	Macro cell	Small cell
Unit power, watt	15000	1600

A.3 Evaluation implementation

In this study, the cost, energy consumption and performance evaluation are carried out for urban (tätbebyggd) and rural (glesbygd) areas separately, in regarding the differentiations of geographical and demographical features between them.

³⁶ X. Ge etc., “Energy Efficiency Challenges of 5G Small Cell Networks”, IEEE Communications Magazine (Volume: 55, Issue: 5, May 2017)

³⁷ <https://artes.esa.int/projects/ocean>

A.3.1 Pure fiber-based solution

For technical scenario 4, i.e., the pure fiber-based solution, the following treatments are taken in implementing the evaluation:

- For urban areas, the installed fiber length is increased by 30% as compared to the total estimated road length in Table 7, by assuming that fiber needs to be installed on both sides of the street roads corresponding to 30% of the total targeted road length in (the last part of) urban areas, in accordance with PTS's definition of "home passed"³⁸;
- For rural areas, on the other hand, the increase of the installed fiber length is considered at a significantly lower level at 10%, i.e., fiber just needs to be installed on one side of the road for most of the households or workplaces in rural areas;
- In urban areas, 70% of digging is assumed to take place on paved surfaces (i.e., requiring re-paving of the street/road after digging), while in rural areas, just 30% of digging is assumed needing re-paving.

A.3.2 FWA solution using macro cells

For the three FWA based solutions, in considering the goal to provide the targeted end users with Gbit/s speed, traffic back hauling using optical fiber for all the base stations was envisioned.

Apart from the total number of macro cell sites, as shown in Table 9, the other important parameter is the inter-site-distance (ISD), which is estimated according to Table 16. The attentive reader may notice here that for urban areas (*tätbebyggd*), we differentiate ISD between *tätort* and *småort*. For *tätort*, the ISD is estimated by the total area divided by the total number of cell sites (by assuming a 5:1 total site ratio between *tätort* and *småort* since the total area of *tätort* is 5 times more than *småort*). For *småort*, on the other hand, they are usually located outside major cities, and covered by macro cells less densely in a similar way as in rural areas. Accordingly, we set the ISD for *småort* and rural (*glesbygd*) areas at 8.0 and 10.0 km, respectively, using the corresponding typical indicative values in Sweden³⁹. Note here that in Table 16 the average number of households/workplaces covered by each cell is also listed. This parameter is used in the evaluation of the average download speed that the FWA network can provide to the covered end users.

Table 16 Macro cell parameters

	Inter site distance (ISD), km	Number of sites	Average number of end users per cell
Tätort	1.3	287	756
Småort	8.0	57	756
Glesbygd	10.0	878	191

³⁸ Rapport: PTS mobiltäcknings- och bredbandskartläggning 2018, PTS-ER-2019:5, Post- och telestyrelsen

³⁹ Reference data source: SSNF's macro cell database

Once the macro cell ISD is determined, the corresponding fiber back haul cost can be calculated (according to the fiber deployment model shown in Table 12). In costing the total fiber backhaul cost, the installed total fiber length was assumed to be increased by 50% for tätort, 20% for småort, and no increase for rural areas of the total macro cell ISD, respectively. Furthermore, all the digging for building the fiber backhaul network was assumed requiring re-paving in urban areas, and 70% of that requiring re-paving in rural areas, respectively.

A.3.3 FWA solution using small cells

For the cost and performance evaluation of FWA involving small cells, the key parameter is the maximum coverage of a small cell, which is set at 0.20 km⁴⁰. This results in an ISD of 0.34 km. The total number of small cells required is the ratio of the total targeted area (as shown in Table 5) divided by the coverage area of each small cell, as shown in Table 17.

Based on the ISD and the total number of small cells, the total length of fiber required for the data traffic back hauling can be obtained. Note here that in contrast to the macro cell scenario, no extra increase of fiber length is envisioned due to the short ISD. Furthermore, all the digging for building the fiber backhaul network was assumed requiring re-paving in urban areas, and 70% of that requiring re-paving in rural areas, respectively. In addition, in costing the small cell FWA, the site rental cost is assumed to be 50% lower in rural areas than in urban areas.

Note here that in Table 17 the average number of households/workplaces covered by each cell is also listed. This parameter is used in the evaluation of the average download speed that each end can obtain. One can see that for this scenario, while in urban areas each small cell can cover an average of 55 households/workplaces, in rural areas each small cell just covers 6 households/workplaces.

Table 17 Small cell parameters

	Inter site distance (ISD), km	Number of sites	Average number of end users per cell
Tätbyggt	0.34	4998	52
Glesbyggt	0.34	30254	6

A.3.4 FWA solution using hybrid scenario

In costing the hybrid scenario, the combined total cost of FWA using both macro cells and small cells is evaluated according to the following:

⁴⁰ Telematics and Informatics 37 (2019) 50–69, "Assessing the capacity, coverage and cost of 5G infrastructure strategies: Analysis of the Netherlands"

- The total site rental cost for small cells is deducted by the total number of macro cell sites, as those small cells targeting end users close to the macro cell site are envisioned to share the same site with the existing macro cells;
- The total fiber backhaul network cost is determined by the small cell network, as more fiber is needed to connect all the small cells.

A.3.5 OPEX and total cost

In this study, apart from the total one-time investment, CAPEX, we also evaluate the envisioned operational cost OPEX for the studied 4 technical scenarios regarding the following 3 aspects:

1. Energy consumption
2. Equipment and network node maintenance cost
3. FWA macro/small cell site rental cost

In order to obtain a full picture of the total cost, we also evaluate the envisioned total cost of CAPEX and OPEX over a 10-year period of time. Note here is that in the calculation of total OPEX, the cost items are adjusted according to their annual change rates as shown in Table 10 and Table 11. In addition, the deployment of the studied networks is assumed to be carried out over 5 years. Accordingly the cost items (equipment and civil work) are also adjusted over 5 years using the corresponding annual cost change rates as shown in Table 10 and Table 11.

A.4 Results and discussions

The evaluation on the 4 studied technical scenarios are carried out on the following 3 aspects:

1. CAPEX and OPEX;
2. Total energy consumption;
3. FWA indicative downlink speed.

Table 18-Table 29 summarize the evaluation results, which are also illustrated by Figure 1- Figure 12.

A.4.1 CAPEX and OPEX

As shown by Table 18-Table 25 and illustrated by Figure 1-Figure 8, for the expected cost, we can see that:

- In regarding the one-time investment CAPEX, the pure fiber-based approach is at the highest level, while FWA using existing macro cell sites is at the lowest level, followed by FWA using small cells. The hybrid scenario using both macro and small cells is the most expensive among the FWA based approaches;
- In regarding the OPEX, not surprisingly, the pure fiber-based approach has significantly lower OPEX than the other FWA based scenarios. Moreover, the two

FWA solutions using small cells have dramatically increased operational cost, which is mainly attributed to the maintenance cost of the large number of small cells required;

- In regarding the total cost over a 10-year period of time, we can see that on the one hand, FWA solutions using small cells will incur the highest total cost. On the other hand, FWA using macro cells will incur the lowest total cost, at levels around 50% of the total cost of the pure fiber-based approach.

A.4.2 Total energy consumption

As shown by Table 26-Table 27 and illustrated by Figure 9-Figure 10, we see that for the total energy consumption (in term of the total consumed electricity) over 10 years, FWA solutions especially the 2 scenarios using macro cells have significantly higher levels of energy consumption than the pure fiber-based approach. In particular, for the FWA hybrid solution, the total power consumption is expected to be nearly 5 times and over 3 times higher than the pure-fiber based approach in urban and rural areas, respectively, which is attributed to the FWA macro cell high power RAN equipment.

A.4.3 FWA indicative average end-user speed

Table 28-Table 29 and Figure 11-Figure 12 show the estimated average downlink speed each targeted household/workplace can expect for the 3 FWA based solutions, using the envisioned hypothetical spectrum portfolio and the corresponding expected downlink cell capacities shown in Table 13 and Table 14, respectively. Note here that, rather than mobile broadband applications where an operator usually assumes a temporal average factor, or the so-called overbooking factor of e.g. 50⁴¹ in the evaluation of the average end-user performance, it's apparently more appropriate to use the real average speed each end user can get *at the same time* to evaluate the FWA performance. This is because that for fixed broadband access the end-user behavior is expected to follow a similar pattern, i.e., for workplaces, the peak traffic hours are obviously during the daily working time, while at homes people are expected to consume most of the traffic during the early night hours after people have gone home, again, *at the same time*.

From Table 28-Table 29 and Figure 11-Figure 12, we can see clearly that:

1. compared to the “default” (symmetric) Gbit/s level end-user speed for the pure fiber-based approach, the expected average download speed for FWA based solutions is very much limited, particularly for the FWA scenario using only macro cells in urban areas when the total number of household/workplace covered by one cell becomes relatively large (see Table 16). More specifically, the average end-user download speed using only existing macro cell sits can be expected to reach only 19 Mbps and 76 Mbps in urban and rural areas, respectively. These expected download speeds are far away from the 1 Gbit/s goal, even if the operator can double or acquire even more midband

⁴¹ Telematics and Informatics 37 (2019) 50–69, "Assessing the capacity, coverage and cost of 5G infrastructure strategies: Analysis of the Netherlands"

spectrum than the hypothetical spectrum portfolio in Table 13. Furthermore, one may argue that mmWave band can also be used in the macro cell solution particularly in *tätort* areas where the ISD is at 1.3 km (see Table 16). Even so, from Table 14 one can see that this will increase the capacity by 200% that will enhance the average end-user speed from 19 Mbps to 57 Mbps in these (*tätort*) areas, still far away from the 1 Gbit/s goal;

2. For FWA solutions using small cells, due to the short coverage range (200 m assumed in this study), and hence significantly reduced number of end users covered by each cell (see Table 17), the expected average end-user download speed can reach the level slightly above 500 Mbps in urban areas, and beyond 1 Gbit/s in rural areas (in fact just 2 end users are covered by a small cell sector, hence each end user can get the full capacity of a small cell beam, as shown in Table 14). Apparently, by doubling the mmWave spectrum in Table 13, even in urban areas FWA using small cells has the potential to provide the targeted households/workplaces with 1 Gbit/s broadband access.

Nevertheless, it should be noted that for FWA solutions:

1. The upload speed is usually significantly lower than the download speed, e.g., even if the DL/UL spectral occupation is 5:1, the upload speed is expected to be significantly lower than 1/5 of the down speed, due to the lower transmitting power on the user side;
2. FWA speed can vary with physical environmental conditions e.g. forest and building blocks, and the performance can even be affected by whether conditions;
3. FWA end-user speed varies also with the distance to the FWA cell antenna, particularly for macro cells in *småort* and rural areas where the ISD is large (as shown in Table 16);
4. No temporal average/ overbooking factor is taken into account for FWA (rather than mobile broadband)

A.5 Summary and conclusions

This work performs a study on the cost, energy consumption and performance of optical fiber versus FWA-based solutions in order to achieve one of the government's 2025 broadband goals that 98% of Swedish households and workplaces should have at least 1 Gbit/s broadband access. More specifically, alongside with the pure fiber-based solution, 3 FWA technical scenarios using existing commercial macro cell sites, newly installed mmWave small cells, and hybrid macro and small cells, are evaluated.

From this study, firstly, we find that, in regarding the one-time investment requirement, the pure fiber-based solution is at the highest level, while FWA using existing macro cell sites is at the lowest level, followed by FWA using small cells and the hybrid scenario using both macro and small cells. In regarding the operational cost, the pure fiber-based solution has significantly lower OPEX than other FWA-based solutions, especially compared with the two FWA solutions using small cells that feature dramatically increased operational cost. Moreover, in regarding the total cost over a 10-year period of time, we find that on the one

hand, FWA solutions using small cells are expected to incur the highest total cost. On the other hand, FWA using macro cells is expected to incur total cost at levels over 40% and 50% of the total cost of the pure fiber-based solution in urban and rural areas, respectively.

Secondly, in regarding the energy consumption we find that FWA solutions using macro cells have significantly higher levels of energy consumption (in term of the total consumed electricity over 10 years) than the pure fiber-based solution. In particular, for the FWA hybrid solution, the total energy consumption is expected to be nearly 5 times and over 3 times higher than the pure-fiber based solution in urban and rural areas, respectively.

Thirdly, in regarding the average speed each targeted household/workplace can expect for the 3 FWA-based solutions using the envisioned spectrum portfolio and the corresponding expected spectral efficiency, we find that, compared to the “default” (symmetric) Gbit/s end-user speed for the pure fiber-based solution, on the one hand, the expected average download speed for the FWA scenario using only macro cells is very much limited. More specifically, the average end-user download speed can be expected to reach 19 Mbps and 76 Mbps in urban and rural areas, respectively. These expected download speeds are far away from the 1 Gbit/s goal, and the gap between them is not expected to be able to bridged even if the operator can double or acquire even more midband spectrum, or even add mmWave band to the existing macro cells in urban areas. On the other hand, For FWA solutions using small cells, due to the significantly reduced number of end users covered by each cell, the expected average end-user download speed can reach the level slightly above 500 Mbps in urban areas, and beyond 1 Gbit/s in rural areas. Apparently, by doubling the mmWave spectrum FWA using small cells has the potential to support the targeted households/workplaces with 1 Gbit/s broadband access even in urban areas. Nevertheless, it should be noted that for FWA solutions, unlike the “default” symmetric traffic pattern supported by the pure fiber-based solution, the upload speed is usually significantly lower than the download speed. In addition, FWA speed can vary with physical environmental conditions e.g. forest and building blocks, and the performance can even be affected by whether conditions. Moreover, FWA end-user speed varies also with the distance to the FWA cell antenna, particularly for macro cells in *småort* and rural areas where the ISD is large.

Based on the findings in this study, we can summarize that:

- Even though the total cost of FWA using existing commercial macro cell sites is estimated to have the lowest level of total cost over 10 years, the average download speed each targeted households/workplace can expect is far below the 1 Gbit/s goal, and the gap between them is not expected to be able to bridged even if the operator acquires more midband spectrum, or even add mmWave band to the existing macro cells;
- FWA solutions using mmWave small cells can provide the targeted households/workplaces in rural areas with over 1 Gbit/s download speed, and potentially can support the targeted households/workplaces even in urban areas with 1 Gbit/s broadband access by doubling the mmWave spectrum. However, due to high operational cost, FWA solutions using small cells are expected to incur the highest total cost over 10 years, particularly for the FWA hybrid scenario using existing macro cells densified with newly installed mmWave small cells;

- FWA solutions using macro cells have significantly higher levels of energy consumption than the pure fiber-based solution. In addition, the upload speed is usually significantly lower than the download speed, and can vary with whether and physical environmental conditions e.g. heavy fog, rain, forest and building blocks etc.. Moreover, end-user speed varies also with the distance to the FWA cell antenna, particularly for macro cells in *småort* and rural areas where the ISD is large.

Based on these summaries, we conclude that:

1. The pure fiber-based solution should be the “default” choice in order to achieve the government’s 2025 broadband goal to reach 98% of Swedish households and workplaces with at least 1 Gbit/s broadband access;
2. FWA using mmWave small cells is capable of achieving the 1 Gbit/s @ 98% goal as well, but at a higher total cost with more energy consumption. In addition, the end user speed varies with the whether and environmental conditions, as well as the distance to the network antenna, which affect the end user experience negatively;
3. FWA using existing commercial macro cell sites alone is not expected to have the capacity to reach the 1 Gbit/s @ 98% goal, despite the estimated relatively low cost.

Table 18 Average CAPEX, tätbebyggt

	FWA macro cell	FWA small cell	FWA hybrid	Fiber
Total, kkr	6.16	10.26	12.78	20.72
FWA RAN, kkr	2.42	4.46	6.98	
Fiber backhaul, kkr	3.74	5.80	5.80	20.72

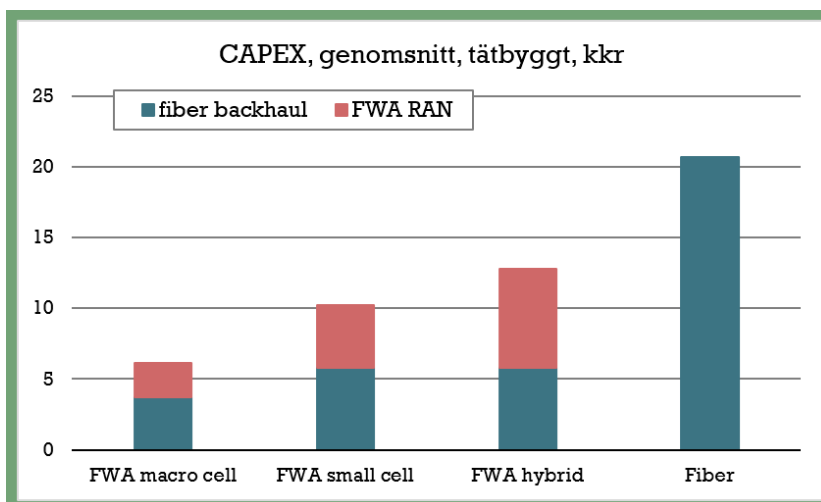


Figure 1 Average CAPEX per household/workplace, urban area

Table 19 Average CAPEX, glesbygd

	FWA macro cell	FWA small cell	FWA hybrid	Fiber
Total, kkr	54.69	93.05	102.92	128.43
FWA RAN, kkr	12.27	42.44	52.31	
Fiber backhaul, kkr	42.42	50.61	50.61	128.43

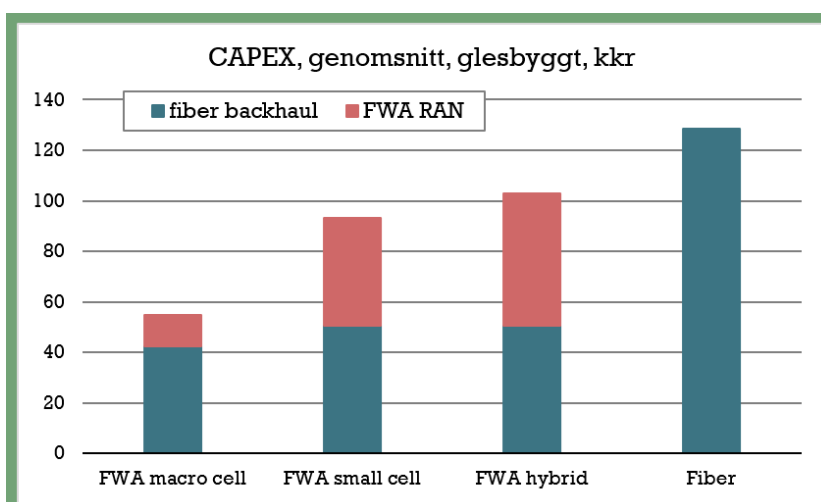


Figure 2 Average CAPEX per household/workplace, rural area

Table 20 Total CAPEX, tätbebyggt

	FWA macro cell	FWA small cell	FWA hybrid	Fiber
Total, mnkr	1601	2665	3319	5384
FWA RAN, mnkr	629	1159	1813	
Fiber backhaul, mnkr	972	1506	1506	5384

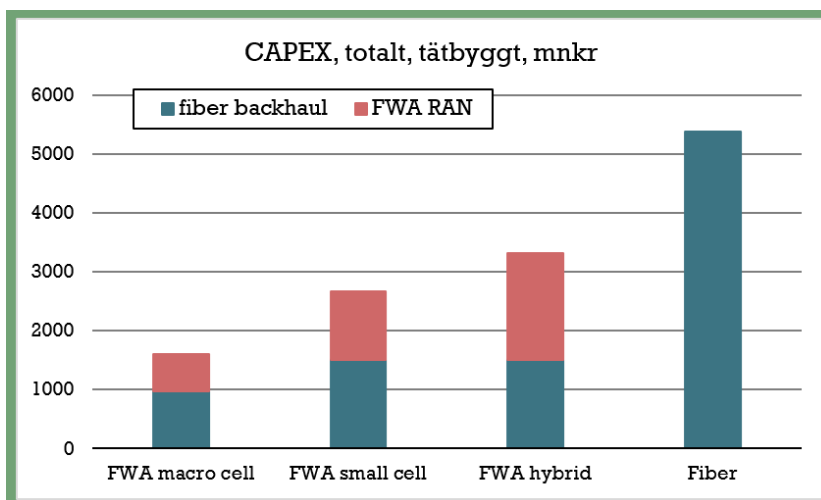


Figure 3 Total CAPEX, urban area

Table 21 Total CAPEX, glesbygd

	FWA macro cell	FWA small cell	FWA hybrid	Fiber
Total, mnkr	9158	15580	17233	21504
FWA RAN, mnkr	2055	7106	8759	
Fiber backhaul, mnkr	7103	8474	8474	21504

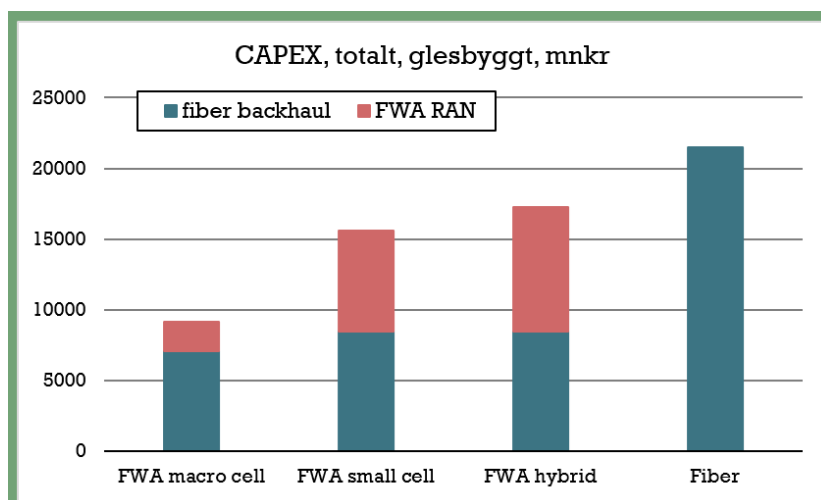


Figure 4 Total CAPEX, rural area

Table 22 Average OPEX per month, tätbebyggt

	FWA macro cell	FWA small cell	FWA hybrid	Fiber
Total, kr	30.9	129.3	150.8	3.5

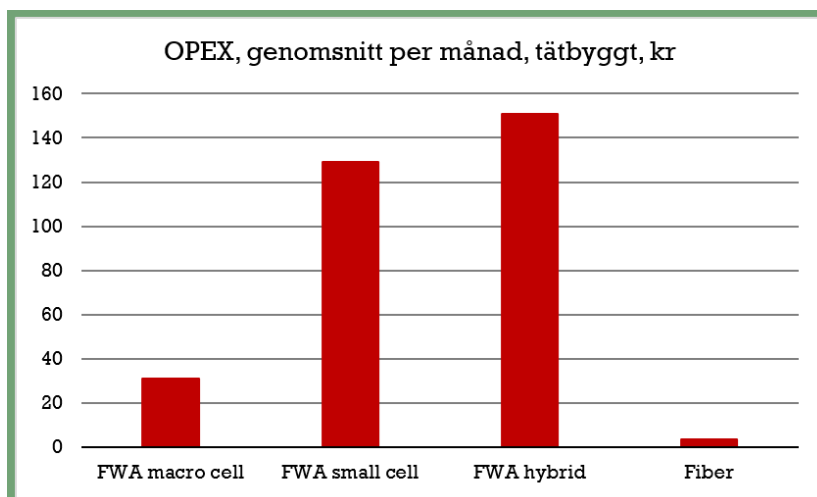


Figure 5 Average OPEX per household/workplace per month, urban area

Table 23 Average OPEX per month, glesbygd

	FWA macro cell	FWA small cell	FWA hybrid	Fiber
Total, kr	127.4	637.7	739.7	26.2

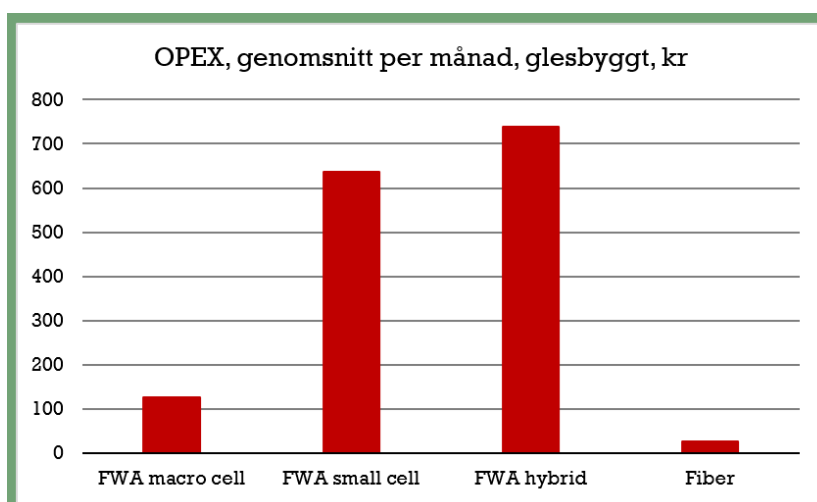


Figure 6 Average OPEX per household/workplace per month, rural area

Table 24 Total CAPEX and OPEX over 10 years, tätbyggt

	FWA macro cell	FWA small cell	FWA hybrid	Fiber
Total, mnkr	2566	6697	8023	5493
CAPEX, mnkr	1602	2665	3319	5384
OPEX, mnkr	964	4032	4704	109

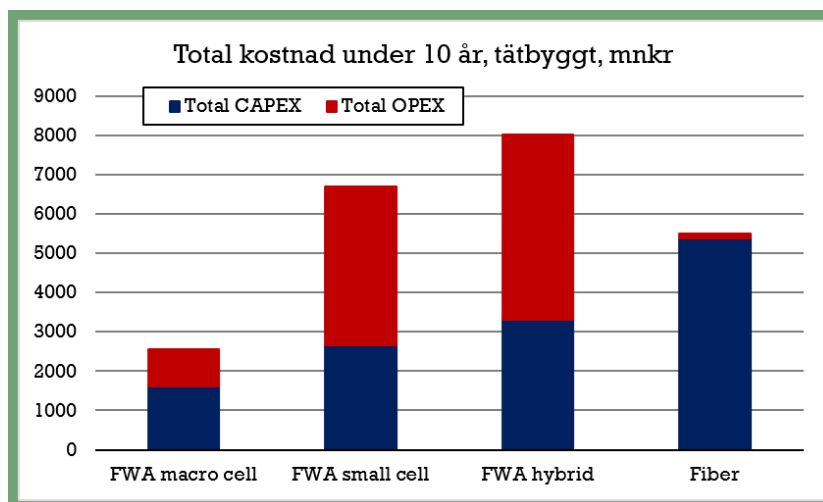


Figure 7 Total CAPEX and OPEX over 10 years, urban area

Table 25 Total CAPEX and OPEX over 10 years, glesbygd

	FWA macro cell	FWA small cell	FWA hybrid	Fiber
Total, mnkr	11718	28394	32096	22030
CAPEX, mnkr	9158	15580	17233	21504
OPEX, mnkr	2560	12814	14863	526

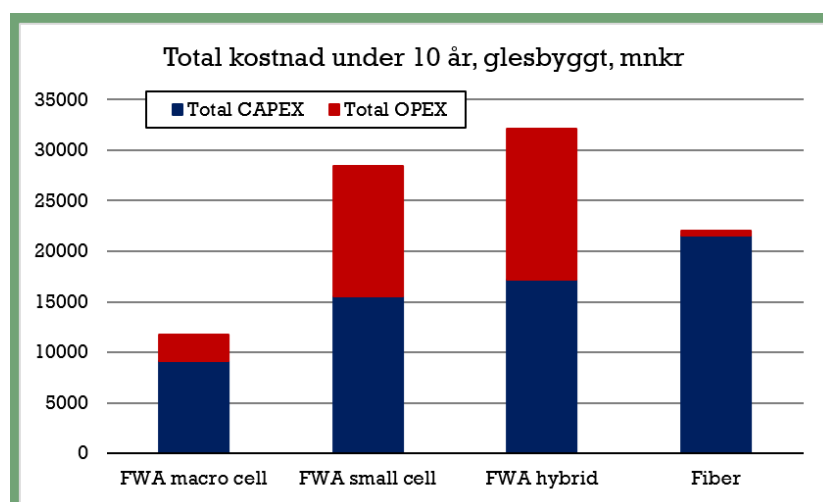


Figure 8 Total CAPEX and OPEX over 10 years, rural area

Table 26 Total energy consumption over 10 years, tätbyggt

	FWA macro cell	FWA small cell	FWA hybrid	Fiber
Total, mn-kWh	464	707	1113	60

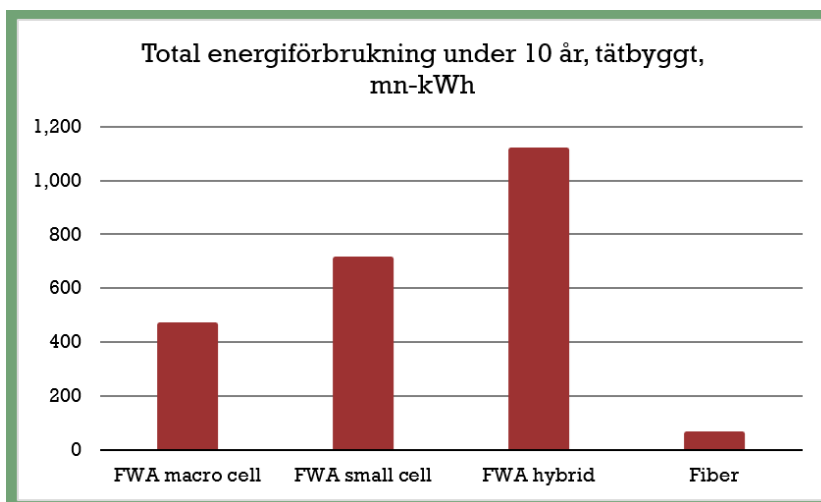


Figure 9 Total energy consumption over 10 years, urban area

Table 27 Total energy consumption over 10 years, glesbygd

	FWA macro cell	FWA small cell	FWA hybrid	Fiber
Total, mn-kWh	1238	2186	3284	290

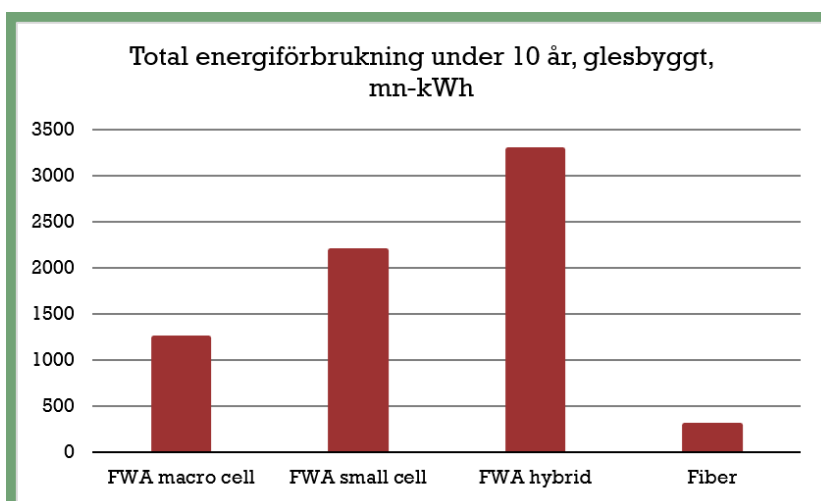


Figure 10 Total energy consumption over 10 years, rural area

Table 28 FWA average downlink speed, tätbebyggt

	FWA macro cell	FWA small cell	FWA hybrid
Mbps	19	554	573

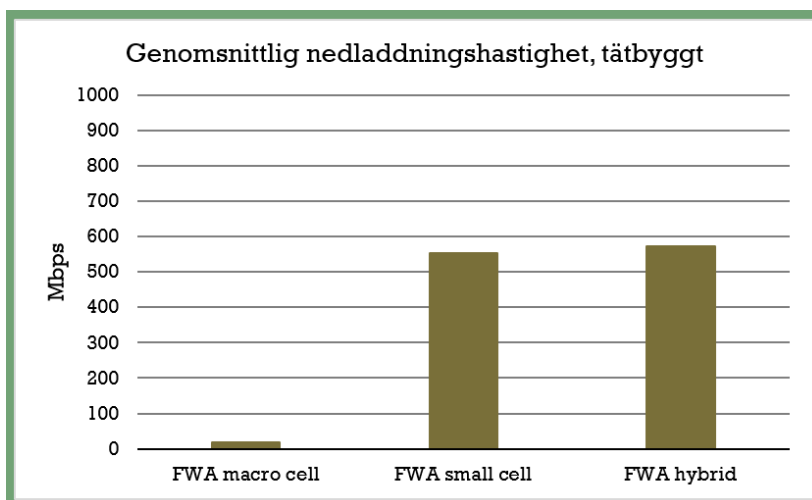


Figure 11 FWA average downlink speed, urban area

Table 29 FWA average downlink speed, glesbygd

	FWA macro cell	FWA small cell	FWA hybrid
Mbps	76	1280	1356

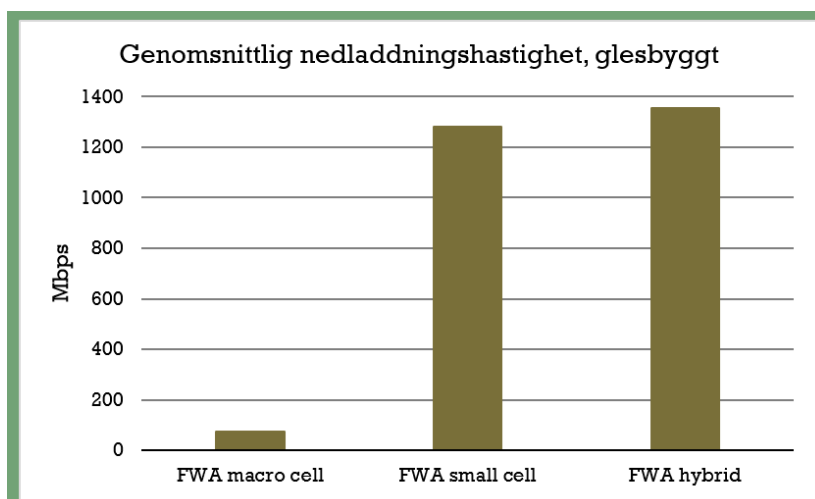


Figure 12 FWA average downlink speed, rural area