



Mobiltäckning i energieffektiva byggnader



Mobiltäckning i energieffektiva byggnader

Förstudie

Jan Carlsson, SP

Jan Welinder, SP



Energimyndighetens projektnummer:40794-1

E2B2



Förord

E2B2 Forskning och innovation för energieffektivt byggande och boende är ett program där akademi och näringsliv samverkar, både strategiskt och praktiskt.

I Sverige står bebyggelsen för cirka 35 procent av energianvändningen och det är en samhällsutmaning att åstadkomma verklig energieffektivisering så att vi ska kunna nå våra nationella mål inom klimat och miljö. I E2B2 bidrar vi till energieffektivisering inom byggande och boende på flera sätt. Vi säkerställer långsiktig kompetensförsörjning i form av kunniga människor. Vi bygger ny kunskap i form av nyskapande forskningsprojekt. Vi utvecklar teknik, produkter och tjänster och vi visar att de fungerar i verkligheten.

I programmet samverkar över 200 byggtreprenörer, fastighetsbolag, materialleverantörer, installationsleverantörer, energiföretag, teknik konsulter, arkitekter etcetera med akademi, institut och andra experter. Tillsammans skapar vi nyttiggörande av den kunskap som tas fram i programmet.

”Mobiltäckning i energieffektiva byggnader” är ett av projekten som har genomförts i programmet med hjälp av statligt stöd från Energimyndigheten. Det är en förstudie och har letts av SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB och SP Elektronik. Projektet har genomförts i samverkan med Kingspan (tidigare SPU Isolering), PTS Post- och telestyrelsen, SABO AB, Telenor Sverige AB, Veidekke Entreprenad AB, IKKAB, HSB living lab Göteborg AB, Sveriges Kommuner & Landsting, Fastighetsägarna Service Stockholm AB, Stockholm stad, NCC AB och Hi3G Access AB. Projektgruppen från SP har bestått av Jan Carlsson (projektledare), Jan Welinder, Peter Ankarson och Linda Olofsson.

Höga krav på energieffektivitet har lett till stora problem för fastighetsägare som tvingats sätta in åtgärder i efterhand för att säkerställa mobiltäckningen. Projektet har kartlagt problematik kring god värmeisolering och god genomträngning av radiovågor för relevanta frekvenser. Projektet har också påbörjat arbetet med att hitta energieffektiva lösningar som uppfyller båda kriterierna.

Stockholm, 20 december 2016

Anne Grete Hestnes,

Ordförande i E2B2

Professor vid Tekniskt-Naturvetenskapliga Universitet i Trondheim, Norge

Rapporten redovisar projektets resultat och slutsatser. Publicering innebär inte att E2B2 har tagit ställning till innehållet.



Sammanfattning

Denna förstudie har under sex månader studerat problematiken kring mobiltäckning inomhus i kombination med energieffektiva byggnader. Studien har bedrivits längs fyra huvudspår; intervjuer, litteraturstudie, mätningar i fastigheter samt numeriska simuleringar.

Intervjuer har dels gjorts av de i projektet ingående parterna och dels genom en web-enkät som skickades ut till boende i Norra Djurgårdsstaden. Resultaten visar att många boende har problem med inomhustäckning men ingen klar koppling till ett energieffektivt byggande och passivhus kan påvisas.

Litteraturstudien visar att det finns många publicerade artiklar och rapporter som rapporterar mätningar av dämpningen av mobilsignaler i byggnader, dock ganska få vad gäller energieffektiva byggnader. Energifönster pekas ut som en möjlig förklaring till dålig inomhustäckning och flera artiklar redovisar uppmätta dämpningsvärden för själva glaset, dock hittades inga som rapporterar dämpning för ett helt fönster inklusive fönsterkarm. Flera artiklar som presenterar metoder för att minska dämpningen i energiglas hittades också. Att använda så kallade frekvensselektiva mönster är en metod som presenteras i flera artiklar.

Mätningar i fyra fastigheter genomfördes med syfte att utvärdera mätmetodik och undersöka hur byggnadskonstruktionen påverkar dämpningen. Mätningarna gav värdefulla erfarenheter och insikter som lägger en bra grund för framtida mätningar. De uppmätta dämpningsvärdena i de studerade fastigheterna stämmer bra överens med resultat som framkom av litteraturstudien.

Numeriska simuleringar har för ett förenklat fall gjorts med ett kommersiellt simuleringsprogram. Resultaten visar att det skulle vara fullt möjligt att förutsäga inomhustäckning i en fastighet under förutsättningen att rätt typ av indata är tillgänglig för byggnaden och dess omgivning. Viss indata finns tillgängligt redan idag men vi har funnit att det finns ett behov av att komplettera med data för moderna byggkomponenter såsom t.ex. energifönster.

Nyckelord: Energieffektiva byggnader, inomhustäckning, mobiltelefoni



Summary

This pre-study has for six months been studying the problem of mobile coverage indoors, in combination with energy-efficient buildings. The study has been conducted along four main tracks; interviews, literature survey, measurements in buildings and numerical simulations.

Interviews have been made of the project partners and through a web questionnaire sent out to residents in Norra Djurgårdsstaden. The results show that many residents have problems with indoor coverage, but no clear link to an energy-efficient construction and passive house can be demonstrated.

The literature survey shows that there are many published articles and reports about measurements of the attenuation of mobile signals in buildings, though very few for energy-efficient buildings. Energy-efficient windows singled out as a possible explanation for poor indoor coverage and several articles are reporting the measured attenuation values for the glass itself. However, no reports treating an entire window including the window frame were found. Several articles that present methods to reduce the attenuation in energy-efficient glass were also found. The use of so-called frequency selective surfaces is a method presented in several articles.

Measurements in four buildings were carried out with the purpose of evaluating measurement methods and examine how the building structure affects the attenuation of radio waves. The measurements provided valuable experience and insights which lays a good foundation for future measurements. The measured attenuation values in the studied buildings were in good agreement with the results obtained from the literature survey.

Numerical simulations of a simplified case were made with commercial simulation software. The results show that it would be quite possible to predict indoor coverage in a building under the premise that the right kind of input is available for the building and its surroundings. Some input is available today but we have found that there is a need to supplement with data for modern building components such as energy-efficient windows.

Key words: Energy efficient buildings, indoor coverage, mobile phones



INNEHÅLL

1	INOMHUSTÄCKNING I MODERNA BYGGNADER	7
1.1	TRÅDLÖS KOMMUNIKATION – TRÅDLÖSA NÄTVERK I NUTID OCH FRAMTID	7
1.2	LAGLIG BAKGRUND	7
1.3	RADIOTEKNIK	8
1.4	BYGGNADSMATERIAL OCH KONSTRUKTION	9
2	INTERVJUER OCH ENKÄT	10
2.1	INTERVJUER	10
2.2	WEB-ENKÄT NORRA DJURGÅRDSSTADEN	11
3	MÄTNINGAR I FASTIGHETER	13
3.1	MÄTMETODIK OCH FASTIGHETER	13
3.2	MÄTRESULTAT	16
3.3	LÄRDOMAR AV MÄTNINGARNA	18
4	NUMERISKA SIMULERINGAR	19
4.1	UTVÄRDERING AV INVERKAN AV ENERGIFÖNSTER	20
4.2	JÄMFÖRELSE MED MÄTNINGAR	21
4.3	SLUTSATSER – SIMULERINGAR	21
5	LITTERATURSTUDIE	23
5.1	INOMHUSTÄCKNING GENERELLT SAMT RADIOKANALMODELLERING	23
5.2	RADIOUTBREDNING	24
5.3	MATERIALEGENSKAPER	25
5.4	FREKVENSSELEKTIVA YTOR	26
6	KVARSTÅENDE FRÅGESTÄLLNINGAR	28
7	REFERENSER	29
7.1	REFERENSER FÖR ALLMÄN TEXT	29
7.2	REFERENSER FÖR LITTERATURSTUDIE	29
7.2.1	INOMHUSTÄCKNING, KANALMODELLERING	29
7.2.2	RADIOUTBREDNING	29
7.2.3	MATERIALEGENSKAPER	30
7.2.4	FREKVENSSELEKTIVA YTOR	31



1 Inomhustäckning i moderna byggnader

1.1 Trådlös kommunikation – trådlösa nätverk i nutid och framtid

Som boende kommer man i kontakt med trådlös kommunikation på några olika sätt:

- Mobiltelefoni med samtal och data/internet
- Data/internet i trådlösa WiFi-nätverk
- Fjärrkontroller, trådlösa larm etc.

Alla de här typerna av system har funnits ganska länge. Det som händer nu är att antalet system växer snabbt och deras prestanda ökar. Vi vänjer oss vid att de finns och förväntar oss att de ska fungera med små problem. Det vi kan förvänta oss i framtiden är att systemen kommer samarbeta och integreras. Den nya telekomstandard som kommer efter 4G och just nu kallas 5G handlar om detta. Ibland används också begreppet "Internet of Things".

Alla typer av överföringar är numera digitala. Det gäller från 2G mobiltelefoni och därefter. Olika funktioner har olika tekniska krav. Ett trådlöst larm använder väldigt lite data och tål några sekunders fördröjning. Tal kräver låg datahastighet men det får inte förekomma långa avbrott och fördröjningar. Video kräver hög och avbrottsfri datahastighet men tål viss fördröjning. Dataspel kräver både hög hastighet och minimal fördröjning. En av utmaningarna med 5G är att integrera system med radikalt olika krav.

Framtidens kommunikation är trådlös. Men det kommer alltid att finnas en ryggrad av kabelbunden kommunikation eller numera fiber. Det pågår en snabb utbyggnad av fiberbaserade kabelnät som också kommer att vara en grund för framtidens kommunikation. Men också funktioner som kommer via fibern kommer att ha trådlös förbindelse sista biten till apparaten. Att bygga trådlösa nätverk som både finns i och utanför byggnader är alltså en utmaning som kommer att finnas kvar.

1.2 Laglig bakgrund

I sin fasta bostad har man rätt till en telefonitjänst bl.a. för att kunna nå 112. Det finns också ett krav att alla ska få tillgång till bredband. Skrivningarna är teknikneutrala vilket innebär att om det finns fast telefoni med möjlighet till bredband kan man inte kräva tillgång till mobiltelefoni. I några band med låga frekvenser ställer PTS krav på god utomhustäckning. Men mobiltelefoni överallt är alltså ingen rättighet [A1], [A2].

I större delen av mobilnäten styrs täckningen via kommersiella krafter. Frekvenser är en begränsad resurs och upplåts numera via en auktion. Operatörerna har därmed starka incitament att utnyttja sina frekvenser väl. Dels för att de kostar ganska mycket pengar men också för att tillgången är begränsad. Abonnenterna har allt starkare önskemål om att ha fullständig täckning. På det hela taget kan man säga att det fungerar väl. PTS uppger att 99,9 % av befolkningen har taltäckning utomhus vid sin bostad av någon operatör. Ser man till ytan och en enstaka operatör blir siffran lägre.

Som framgår av ovanstående finns det inga regelverk som hanterar inomhustäckning. PTS har studerat frågan men ser att frågan inte kan hanteras av regleringar [A3]. Ansvaret faller inte på en part. Om täckning nås beror på en kedja: basstation, byggnadsskal, inre huskonstruktion, mobiltelefon.



Operatören kan i sin nätplanering säkerställa att basstationen ger en given signalstyrka utanför huset. Byggnadsskalet dämpar signalen och dämpningen kan variera stort med konstruktionen. I lägenhetsfastigheter kan bärande innerväggar nästan helt stoppa signalen så att den varierar stort i ett våningsplan. Också mobiltelefonerna har varierande förmåga att ta emot låga signaler.

Inomhustäckning kan naturligtvis avtalas. Som synes blir det komplicerat eftersom flera olika parter inklusive de boende är involverade i kedjan som skapar täckning. Trots det är det nog den vägen man behöver gå. Hur ett sådant avtal ska utformas är inte bara en juridisk fråga utan också en teknisk. Vilka tekniska krav kan och ska man ställa, vilka tekniska utformningar som är acceptabla (antenner och kablar kan inte placeras hur som helst). Här krävs mer arbete.

1.3 Radioteknik

Radiovågor i mobiltelefonfrekvenser tar sig fram längs siktlinjen. Idealt sätt ska alltså mobilmasten befinna sig inom synhåll. Är så fallet blir räckvidden lång. En vanlig 2G-signal har en räckvidd på 35 km i en totalt ostörd miljö (dvs. över havet). Begränsningen sätts i tidsfördröjningen över 35 km som ger synkroniseringsproblem. I specialfall kan man nå 70 km. Siffrorna för 3G och 4G är liknande. Sådana räckvidder är möjliga över hav men sällan över land. De är heller inte alltid önskvärda som vi ska se.

Basstationen ska ta hand om alla uppkopplingar inom sitt täckningsområde. Den totala datahastigheten begränsas av basstationens frekvensband och ska delas av alla aktiva användare. Är det många användare får var och en bara en liten del.

Den datamängd som kan skickas från en antenn till en annan i ett givet frekvensband är fysikaliskt begränsad. I 4G närmar vi oss gränsen. För att komma runt gränsen och klara det ökande kravet på datahastighet finns det en del möjligheter som nu utvecklas i 5G:

- Celler görs mindre genom att fler basstationer med kortare räckvidd placeras ut. Färre personer befinner sig i samma cell och var och en kan då få en större del av tillgänglig datahastighet. I innerstaden talar vi om cellstorlekar i hundratal meter. Korta avstånd gör att samma frekvensband kan användas för andra uppkopplingar bara några hundra meter bort.
- Högre frekvens. Låga frekvenser är upptagna så man söker sig högre upp, först kanske 6 GHz med senare avsevärt högre. Det har ansetts svårt att använda höga frekvenser men med korta avstånd och smarta antensystem öppnas nya möjligheter.
- Avancerade antensystem. Olika tekniska trick gör att frekvensbanden kan utnyttjas effektivare. Basstationer kan ha ett stort antal antenner som i olika delgrupper riktas mot enskilda mobiler. Samma frekvens kan skickas till mobiler som befinner sig i olika riktningar. De första stegen har tagits i 4G och senare WiFi-varianter men det finns mer att göra i 5G.

De två första punkterna är kopplade till byggnader. Nya cell-layouter ska anpassas till stadsplanen.

Högre frekvenser påverkar vågutbredningen.

Telekomområdet har långt kvar till ett mognadsstadium då tekniken inte utvecklas längre. Vi kommer alltså se nya generationer utrustningar och en installation vi gör idag kanske inte blir så gammal. Hus har mycket längre livslängd än ett telekomsystem.



Den mesta kommunikationen kommer att ske in till och inuti byggnader så ytter- och innerväggar kommer att ställa till problem även för nästa generations kommunikationsteknik. Att förstå hur en byggnad påverkar radiokommunikation är alltså en kunskap som också behövs i framtiden.

1.4 Byggnadsmaterial och konstruktion

Att mobiltelefoni påverkas av byggnader är ingen ny upptäckt. Det har också länge varit bekant att olika hus har olika påverkan. Orsakerna kan spåras i material och konstruktion. Byggnadsmaterial dämpar och reflekterar radiovågor. Det är en rent fysikalisk materialegenskap som inte beror på om tekniken är analog eller liknande radiotekniska parametrar. Den enda egenskapen som kommer in är frekvensen. I allmänhet har högre frekvenser svårare att tränga igenom ett material än lägre. I sammansatta konstruktioner kan det finnas skarvar och öppningar som släpper igenom radiovågor. Här kommer också ett frekvensberoende in som kan vara tvärtom. Ett exempel är att armeringsnät spärrar låga frekvenser men släpper igenom höga.

En viktig följd av att enbart frekvensen är viktig är att karakteriseringar av material och byggnader är framtidssäkra. En ny radioteknik uppför sig på samma sätt som en äldre om de arbetar på samma frekvens.

Vill man uttrycka det enkelt så släpper lätta material igenom radiovågor med liten dämpning. Lätta material är i det här sammanhanget mineralull, polyuretanskum, tätskikt i plast och papp och liknande. Skivor av gips och träfiber dämpar också ganska lite. Tunga material som betong och naturligtvis metall dämpar kraftigt. Mycket tunna metalliska skikt finns på fönsterglas för att förbättra energiegenskaperna. Redan ett sådant skikt på en glasyta räcker för att dämpa radiovågor rejält. Det finns en hel del olika typer av fasadmaterial och skivor som inte är undersökta än och vars egenskaper alltså är osäkra.

Det görs ofta en koppling mellan mobiltäckning och olika typer av lågenergihus. Det finns t.ex. mätningar som visar en skillnad på 13 dB mellan nya och gamla hus [A4]. Skillnaden är nog just mellan gamla och nya hus. Att lägga på tjockare isolering och ytterligare beläggningar på fler glasytor i fönster gör inte så stor skillnad. Hus med ytterväggar av betong och moderna fönster har dålig mobiltäckning oberoende av hur bra isolering de har. Samtidigt tar sig radiovågorna in i ett trähus med tjock isolering.

Operatörerna har planerat sina nät till en början för utomhustäckning men numera också med hänsyn till inomhustäckning. I planeringen räknar man med rimlig dämpning av signalen i väggarna. Man kan naturligtvis inte ta höjd för alla typer av konstruktioner.



2 Intervjuer och enkät

I förstudien gjordes några försök att kvantifiera storleken på problem med inomhustäckning. Det visade sig svårt att hitta något rapporterat material där seriösa försök gjorts att kvantifiera. Olika möjligheter diskuterades men det visade sig svårt att inom ramen för förstudien genomföra en undersökning som skulle kunna ge ett resultat med någon rimlig grad av säkerhet.

Istället valdes att göra några stickprov. Parterna i projektet har en mer eller mindre direkt kontakt med problematiken och intervjuades om sina erfarenheter.

En annan metod som prövades var en web-enkät. Stockholms stad skickade ut en kort enkät som en del av ett nyhetsbrev till boende och andra intressenter till Norra Djurgårdsstaden.

2.1 Intervjuer

11 intervjuer genomfördes med projektdeltagare. De representerar PTS, operatörer, byggbolag och fastighetsägare. Svaren utgör personliga synpunkter och iakttagelser och redovisas därför avidentifierade. Här redovisas ett antal citat som antecknades under intervjuerna.

Intervjuerna kretsade kring fyra frågeställningar;

- Hur stora är problemen med inomhustäckning?
- Hur hanteras problemet?
- Synpunkter på aktiva lösningar
- Synpunkter på passiva lösningar

Hur stora är problemen med inomhustäckning?

- Inte ett jättestort problem idag, de boende ringer till operatörerna.
- I nybyggda områden vet vi att vi kommer få problem. Omfattande kundklagomål.
- Problem i mer än 10% av beståndet och växande med renovering och nybyggnation.
- Bland hus byggda med isolerande fönster mer än 50% problem.
- Ett reellt problem och derivatan är åt fel håll.
- Finns ingen statistik på fördelningen mellan klagomål gällande utomhus/inomhustäckning.
- Inte enbart passivhus. Alla betonghus har problem.
- Tror att problemet är större än vad man tror, man svär och går ut på balkongen.

Hur hanteras problemet?

- Komplext problem. Kan inte själva göra något.
- Viktigast att det finns ett intresse från beställaren. Man får betalt för att bygga det som beställs.
- Energikraven är överordnande. Idag projekteras för energi men inte för mobiltäckning.
- Det är en självklarhet att boende skall kunna ringa med mobil inomhus.
- Svårt att sätta krav på inomhustäckning, finns så många variabler t.ex. telefonen.

Ingen av de intervjuade hade några säkra siffror eller undersökningar med kvantitativa resultat. PTS har inte kvantifierat inomhustäckning utan enbart utomhus. Man var medveten om att



utomhustäckningen är mycket hög, >99% av befolkningen, och att dålig utomhustäckning inte är huvudorsaken. Däremot påpekades det att problemet växer och att det just nu inte finns en etablerad process som garanterar inomhustäckning.

En viktig sak som framhölls är att energikraven ofta beskylls för att vara orsaken till dålig mobiltäckning. Det är sant så långt att lågenergifönster har beläggningar som släpper igenom mobilsignaler väldigt dåligt. Det är viktigt att notera att det gäller alla moderna fönstertyper och inte enbart sådana som har allra bäst U-värde. I övrigt är det traditionella konstruktioner som betongväggar som ställer till problem. Kopplingen till t.ex. passivhus är alltså svag.

2.2 Web-enkät Norra Djurgårdsstaden

Enkäten var en länk i ett nyhetsbrev med mycket annat innehåll. Rubriken för stycket där länken fanns var "Har du problem med mobiltäckning?". 1 627 utskickade enkäter gav 110 svar. Tidigare erfarenheter visar att de är en förväntad svarsfrekvens i sammanhanget. Inramningen av enkäten medför att svaren inte är slumpmässiga utan den har varit mer intressant för de som upplever problem.

Alla svar med något enstaka undantag kommer från det nybyggda området Norra Djurgårdsstaden. Adresserna är väl spridda över området. Att svarsprocenten är låg (7%) gör naturligtvis att värdet av undersökningen är begränsat och att man ska vara försiktig med slutsatser. Trots det finns det 110 svar att analysera.

Kort sammanfattning av svaren till web-enkäten:

- Totalt antal svar: 110
- Svarsprocent: 7 %
- Antal som har problem: 92 – ja, 18 – nej
- Angivit adress: 82, varav 1 utanför området
- Vilken operatör: Oklar bild, basstationsplaceringen avgör!
- Varierar täckningen över dygnet: 9 – ja
- Varierar täckningen i bostaden: 67 – ja
- Var är den bättre: 70 anger plats, många anger utomhusutrymme.
- Hjälper det att öppna fönstren: 79 – ja, 4 – nej, 10 – vet ej
- Har åtgärder vidtagits: 5 anger nya basstationer

92 anger täckningsproblem. Alla adresser finns inte uppgivna men det verkar ganska väl spridda över området. De 18 som uppgett att de inte har problem har varit lite mer sparsamma när det fyllt i övriga uppgifter. Problemen går i svaren inte att koppla till adress eller operatör. Skillnader mellan operatörer beror på placering av basstationer och är därför vanliga när man tittar på en specifik plats men syns alltså inte tydligt i materialet. En statistisk bearbetning är inte försvarbar med tanke på svarsprocenten.



En tydlig iakttagelse är att byggnadsskalet påverkar. Det syns genom att de allra flesta som har problem har noterat att det hjälper att öppna fönstret. Det bekräftar mätningar som visar att moderna lågenergifönster släpper igenom väldigt lite av mobilsignalen. Det finns också platser i lägenheten som har bättre signal. Här nämns balkonger och uteplatser som bättre. Något motsägelsefullt nämns också fönster som en bättre plats. Det finns en tanke om att signalen skulle kunna ta sig igenom vid fönsterkarmen men det återstår att undersöka. Det finns olika byggnadskonstruktioner i Norra Djurgårdsstaden och man skulle kunna förvänta sig skillnader mellan dem. En sådan analys har inte utförts än och är kanske också tveksam med det begränsade materialet.

Ganska få skrev att några åtgärder vidtagits. 5 hade noterat att nya basstationsantennor har hjälpt dem. Ingen hade vidtagit någon egen teknisk åtgärd. Däremot har flera kontaktat operatörer, bytt operatör eller kontaktat fastighetsägaren. Några uttrycker en påtaglig frustration.



3 Mätningar i fastigheter

Som en del av förstudien genomfördes mätningar i fyra fastigheter i ett nybyggt bostadsområde söder om Göteborg. Syftet med mätningarna var, förutom kunskapsuppbyggnad och att samla erfarenheter, att utvärdera mätinstrument och mätmetodik samt undersöka hur byggnadskonstruktionen påverkar dämpningen.

Förutom personal från SP deltog personer från NCC, Kingspan (f.d. SPU Isolering), Tre och Telenor vid mätningarna. Tre och Telenor ställde upp med personal och professionell mätutrustning. För att utvärdera TEMS (Test Mobile System) gjordes även mätningar med SP:s TEMS Pocket [A5].

3.1 Mätmetodik och fastigheter

Mätningarna utfördes genom att mäta signalstyrkan för de olika mobiltelefon-system som kunde detekteras, i detta fall GSM, 3G och 4G. Mätningarna utfördes dels med en professionell scanner som mäter på flera mobilsystem och frekvenser samtidigt och dels en TEMS Pocket som mäter på ett system i taget, och för den operatör som SIM-kortet stödjer. Mätningarna med TEMS Pocket fick alltså upprepas tre gånger för att få resultat från alla tillgängliga system. Mätningarna med TEMS Pocket tog därmed i princip tre gånger så lång tid som mätningarna med scanner.

En satellitbild över området där mätningarna utfördes visas i

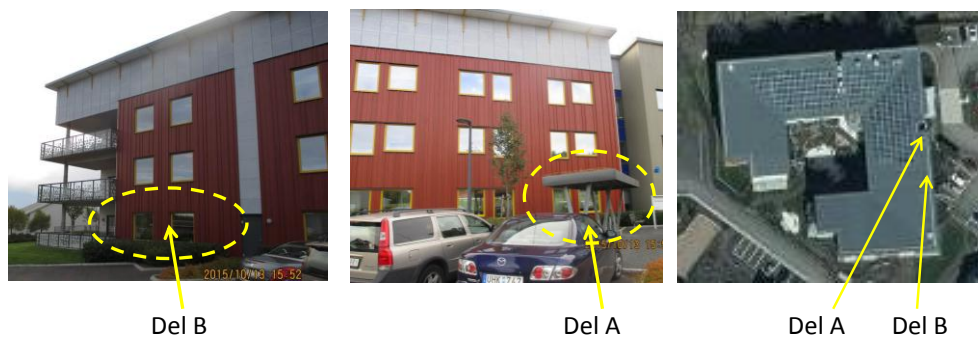


Figur 1. I figuren är de fastigheter där mätningar gjordes inringade och riktning och avstånd till basstationer är inritat.



Figur 1 Satellitbild över området där mätningar utfördes.

Detaljbilder på de fastigheter där mätningar utfördes visas i Figur 2 - Figur 5 nedan.



Figur 2 Äldreboende.



Figur 3 Tvåvånings bostadshus.



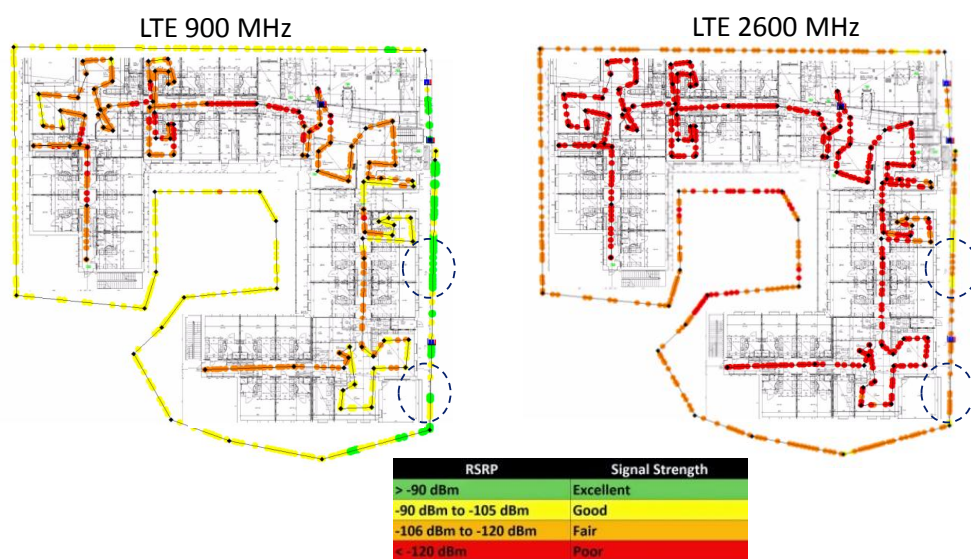
Figur 4 Seniorboende.



Figur 5 Gemensamhetslokal.



Signalstyrkan mättes både utanför fastigheten och inuti genom att gå runt med mätutrustningen. De loggade mätvärdena analyserades i efterhand och resultaten plottades på planritning över den aktuella fastigheten, ett exempel för äldreboendet visas i Figur 6.

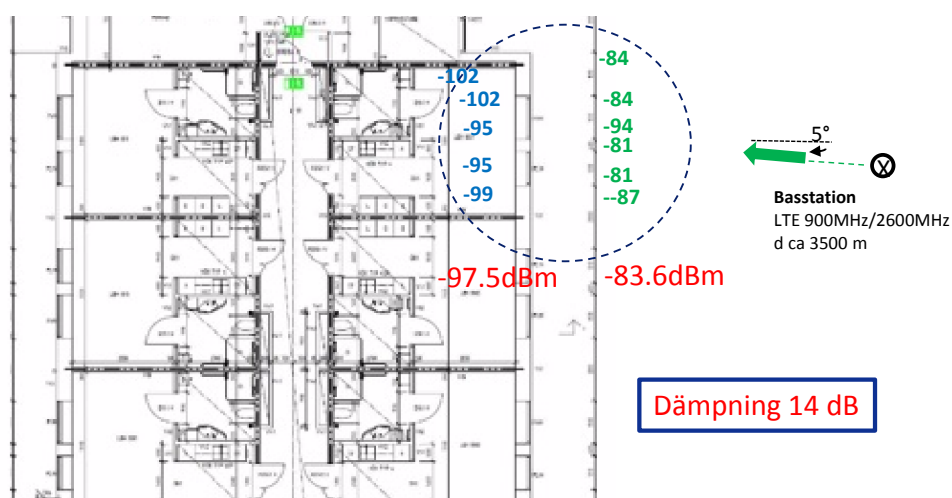


Figur 6 Exempel på mätresultat, äldreboende 900 MHz respektive 2600 MHz från en specifik basstation.

3.2 Mätresultat

Som framgår av exemplet i Figur 6 är insamlad mätdata omfattande. I området där mätningarna utfördes finns sex basstationer där var och en av dem stödjer flera system och frekvenser och mätningarna utfördes i fyra fastigheter. I figuren visas resultat för en basstation, två frekvenser och en fastighet.

För att ta reda på dämpningen i de olika fastigheterna analyserades data för några utvalda punkter och basstationer. Ett exempel på ett sådant val visas i Figur 7.



Figur 7 Valda mätpunkter för äldreboende. Värden för frekvensen 900 MHz.

Liknande val som visas i Figur 7 gjordes för alla de fyra fastigheterna och dämpningen beräknades som förhållandet mellan medelvärdet av signalstyrkan på ut- respektive insida. Medelvärden har beräknats av linjära värden, dvs. signalstyrkan i dBm har först konverterats till linjärt värde (W). De resulterande dämpningsvärdena presenteras i tabellen nedan.

Dämpningsvärden i dB			
	900 MHz	2600 MHz	
			Samtliga hus har träfasad
Äldreboende - Del A (Figur 2)	14	11	-
Äldreboende - Del B (Figur 2)	17	11	-
Tvåvånings bostadshus (Figur 3)	7	13	Isolering med al-skikt, 90% yta
Seniorboende (Figur 4)	4	7	Isolering grafitcellplast
Gemensamhetslokal (Figur 5)	8	7	-

Samtliga fastigheter som ingick i mätningarna var försedda med energifönster. De dämpningsvärden som uppmättes visar att dämpningen trots energifönster är relativt låg. Detta tyder på att signalen till stor del läcker in genom väggar, vilket verkar rimligt då samtliga fastigheter har träfasad. En av fastigheterna har väggisolering med aluminiumskikt men då man vid byggnation tänkt på eventuella problem med inomhustäckning var endast ungefär 90% av ytan folietäckt. De uppmätta dämpningsvärdena visar att det var tillräckligt.



3.3 Lärdomar av mätningarna

En viktig anledning till mätningarna var kunskapsuppbyggnad, de viktigaste lärdomarna redovisas här i punktform.

- Effektivare att mäta med scanner än med TEMS Pocket. Scanner mäter på flera system och för alla operatörer samtidigt, TEMS Pocket mäter på ett system i taget och för en operatör.
- Stor fördel att ha uppgifter om placering av basstationer innan mätning. Detta ger möjlighet att planera var man skall mäta. Mättrutter planeras med fördel innan mätning.
- Nödvändigt att förbereda med kartor och planritningar innan mätning.
- Fördel att ställa in mätinstrument på intressanta basstationer och kanaler innan mätning. Minskar datamängden och gör det lättare att sortera ut intressanta mätdata efteråt.
- Förflytta mätinstrumentet långsamt för att få mer data där det är intressant.
- Mät över en yta istället för längs linje. Ger bättre medelvärden och ger en bild av signalstyrkans variation i t.ex. ett rum.
- Räkna med att analys av mätdata tar betydligt längre tid än själva mätningarna.

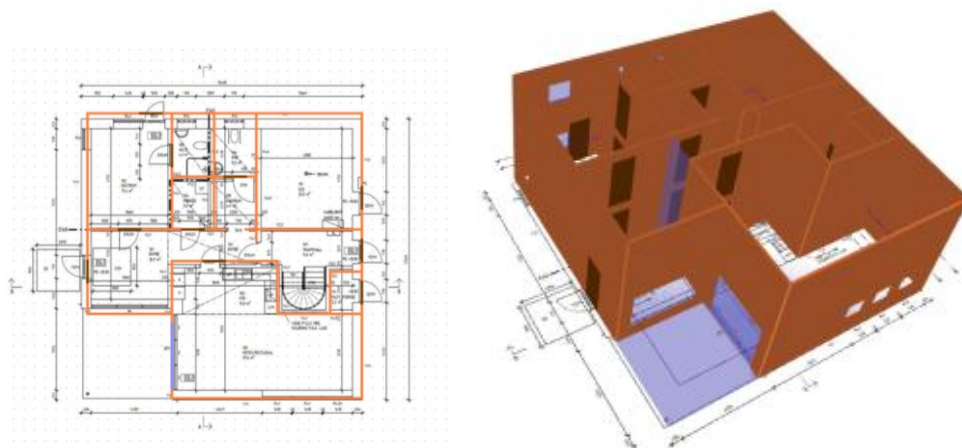


4 Numeriska simuleringar

Numeriska simuleringar har utförts med ett kommersiellt program [A6] med syfte att utreda om simuleringar kan användas för att på ett tidigt stadie bedöma inomhustäckningen i en fastighet. Programmet vi använt är ett program som normalt används av bl.a. operatörer vid nätplanering. Med programmet kan man förutom beräkna t.ex. täckningskartor utomhus även beräkna inomhusutbredning och kopplingen från en yttre basstation in i huset. Det är den senare typen av simulering som vi utfört i projektet.

Innan en simulering kan utföras måste alla data för den aktuella fastigheten läggas in i programmet. Programmet som vi har använt kan läsa in data från en databas så i princip skulle man kunna importera en 3D-ritning av fastigheten direkt. En möjlighet på sikt skulle i sammanhanget kunna vara att koppla detta eller något liknande simuleringsprogram till BIM [A7] som används av byggindustrin. Det skall också nämnas att även om vi haft tillgång till en färdig 3D-ritning av en fastighet hade vi ändå varit tvungna att komplettera den med de elektriska materialegenskaperna för de ingående byggnadsmaterialen.

I projektet har vi alltså inte haft tillgång till någon färdig ritning så vi har byggt upp fastigheten manuellt utgående från en planritning. Figur 8 nedan visar väggsektioner som definierats manuellt utgående från en planritning. Varje del av fastigheten har definierats för sig liksom de elektriska materialegenskaperna.



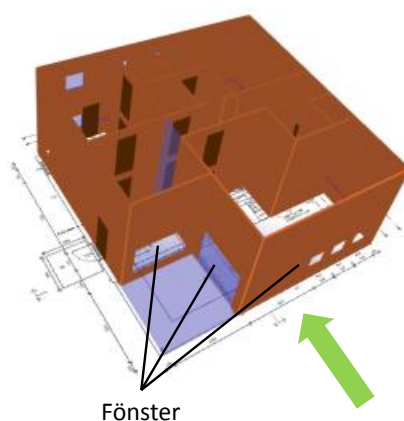
Figur 8 3D-simuleringsmodell byggd utgående från planritning.

När väl hela fastigheten, med väggar, golv, tak etc., har definierats är det dags att definiera omgivningen inklusive basstationer och sedan köra en simulering. Två exempel där vi simulerat på fastigheten i Figur 8 visas nedan.



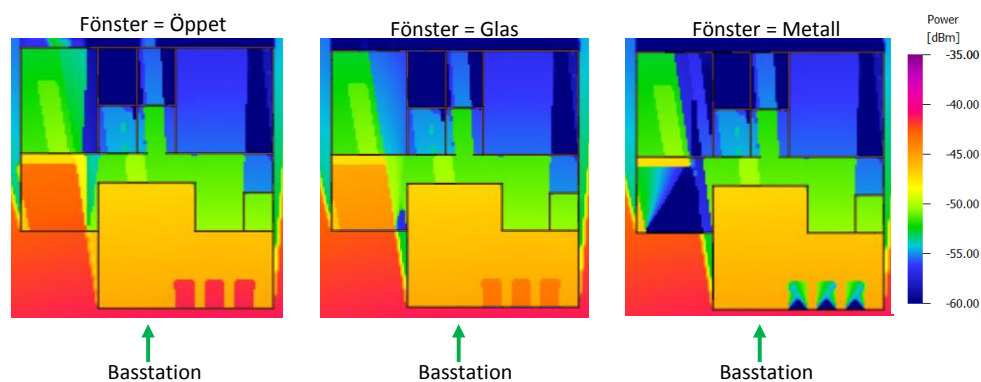
4.1 Utvärdering av inverkan av energifönster

För att utvärdera hur ett energifönster, dvs. ett fönster med metallbeläggning, påverkar signalnivån inomhus gjordes en enkel simulering. Då vi i detta fall enbart är intresserade av inverkan av materialet i fönster bryr vi oss inte om att lägga in andra byggnader, terräng etc. utan nöjer oss med att definiera en basstation långt ifrån huset. Signalen från basstationen faller då in mot huset såsom visas i Figur 9.



Figur 9 3D-simuleringsmodell. Grön pil indikerar signalriktning från basstation.

Resultatet av simuleringar där olika material använts i samtliga fönster i byggnaden visas i Figur 10 nedan. Refererande till figuren visar bilden till vänster fallet då fönstret är öppet, dvs. inget material i hålen i väggarna, bilden i mitten representerar fallet då vi har vanligt glas och bilden längst till höger fallet då fönstren har metallbeläggning.



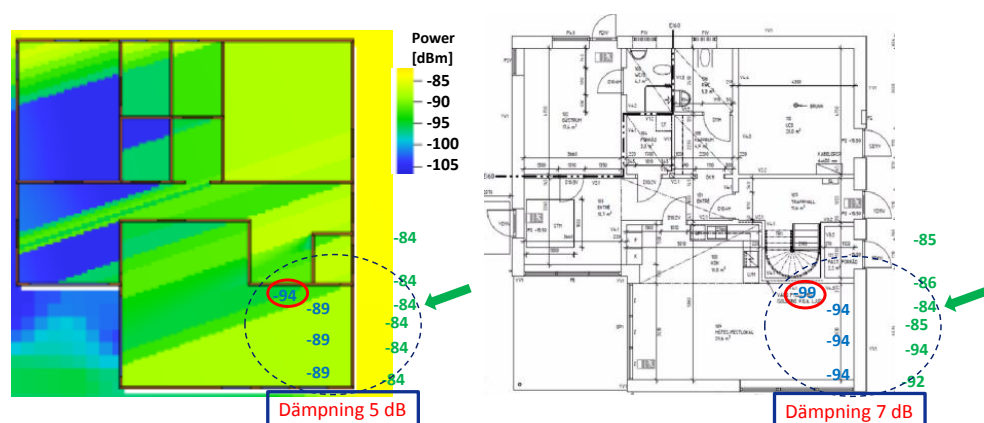
Figur 10 Beräknad effekt av olika typer av fönster.



Av resultaten i Figur 10 kan noteras att signalnivån direkt innanför de tre fönstren längst ner till höger i bilderna påverkas markant av materialet i fönstret. Då fönstret har metallbeläggning är signalnivån väldigt låg precis innanför fönstret. Man kan också notera att signalnivån i rummet i övrigt inte påverkas nämnvärt av de olika materialerna. Detta kan förklaras med att stor del av signalen läcker in genom väggen. En annan sak som kan noteras är att signalnivån i hela det lilla rummet längst ner till vänster i bilderna påverkas markant av materialet i fönstren. Förklaringen i detta fall är att fönstret i det rummet utgör en stor del av väggen.

4.2 Jämförelse med mätningar

I nästa exempel utgår vi från samma byggnad som tidigare, dvs. byggnaden i Figur 8. Syftet med detta exempel är att jämföra med mätningar som gjordes på gemensamhetslokalen (se Figur 5) som vår modell är tänkt att efterlikna. Inte heller i detta fall bryr vi oss om att modellera omgivningen utan vi har valt ut en basstation i en riktning med inga, eller åtminstone väldigt få, objekt mellan bygganden och basstationen. Eftersom vi inte har alla uppgifter om basstationen har vi skalat om simuleringsresultaten så att signalnivån direkt utanför väggen blir ungefär samma som vid mätningarna. Syftet är att kontrollera om vi kan beräkna den skillnad mellan signalnivå på ut- respektive insida som vi mätte, dvs. om vi får samma dämpning i byggnadens skal för det två fallen. En jämförelse mellan beräknade och uppmätta värden visas i Figur 11.



Figur 11 Beräknad dämpning jämfört med uppmätt.

Resultaten i Figur 11 visar på en god överensstämmelse mellan beräknad och uppmätt dämpning, skillnaden är 2 dB. Det är värt att notera att vi inte haft möjlighet att lägga in detaljerad beskrivning av väggarna. Hur en bättre detaljeringsgrad skulle påverka resultatet är svårt att säga men en överensstämmelse på några dB får betecknas som bra.

4.3 Slutsatser – Simuleringar

De enkla beräkningar som utförts i projektet visar att det är fullt möjligt att få en uppfattning om inomhustäckning redan vid konstruktion av fastigheten. Det som krävs är kännedom om alla ingående material i byggnaden, en 3D-ritning som kan importeras till simuleringsprogrammet och givetvis



kännedom om placering av basstationer i omgivningen. Då många huskonstruktörer använder sig av 3D CAD-modeller bör det vara ganska lätt att få in en modell i beräkningsprogrammet. Det som tillkommer är att definiera de elektriska egenskaperna för varje detalj. I det program vi använt finns standardvärden för väggar etc. men dessa behöver kompletteras, speciellt då vi kommer till framtidens 5G system och betydligt högre frekvenser än de som används idag. Kännedom om placering av basstationer och deras egenskaper (effekt, antenn etc.) finns hos operatörerna så ett samarbete mellan byggindustri och operatörer är nödvändigt.



5 Litteraturstudie

En väsentlig del av förstudien var att genomföra en litteraturstudie med syfte att kartlägga forskningsläget inom området inomhustäckning samt relevanta angränsande teknikområden. Nedan redovisas resultatet av denna undersökning i form av korta resuméer av varje referens. Referenserna är grupperade i fyra olika områden och återfinns i kapitel 7.2.

De, enligt författarna, mest läsvärda referenserna i respektive grupp är nedan markerade med en asterisk (*) i början av resumén.

Litteraturstudien visar att det finns en hel del artiklar som redovisar dämpningen av mobilsignaler i byggnader och även dämpningen i olika typer av material. Studien visar också att det saknas undersökningar av dämpningen av mobilsignaler i byggnadskomponenter såsom kompletta fönster inkluderande karmen.

5.1 Inomhustäckning generellt samt radiokanalmodellering

Referens [L1] ger en omfattande översikt över utbredningsmodeller för trådlösa system. Förutom ofta använda statistiskt baserade kanalmodeller diskuteras även mätmetoder och numeriska beräkningsmetoder. Modeller för såväl utomhus- som inomhusutbredning presenteras. Texten innehåller många formler och är på det stora hela teoretisk men är ändå nyttig läsning även för de som inte har behov av att sätta sig in i alla detaljer.

I referens [L2] beskrivs lösningar för täckning från basstationer utomhus, utifrån-och-in, samt redogör även för specifika inomhuslösningar. De lösningar som presenteras kan betraktas som aktiva i meningen att de involverar antenner och någon form av signalförstärkare. För varje lösning som beskrivs i rapporten analyseras relevanta telekom-, bygg- samt regleringsrelaterade aspekter. Som påpekas i rapporten är inventeringen inte heltäckande utan syftet är att lista de idag vanligaste lösningarna för inomhustäckning.

*Referens [L3] ger en bra och övergripande bild av problematiken kring inomhustäckning i lågenergihus samt förslag på olika lösningsmetoder, såväl passiva som aktiva. Rapporten är skriven av en arbetsgrupp som finansierats av finska staten. I rapporten hävdas att nya byggnader ger upp till 20 dB högre dämpning av mobilsignaler än motsvarande tio år äldre hus, i genomsnitt dämpar nya hus 13 dB mer än gamla. Dessa värden baseras på mätningar som utfördes i Tampere under 2012. Lågenergifönster pekas ut som en förklaring till att nya hus dämpar mer än gamla och man påpekar att även gamla hus med t.ex. betongväggar kan få problem med inomhustäckning efter renovering om energifönster monterats in. Rapporten diskuterar också hur situationen kan förbättras genom att låta några fönster vara av traditionell typ, dvs. utan metallfilm. Ett annat alternativt som nämns är att bygga in sektioner i väggarna med låg dämpning. Sådana genomsläppliga ytor skulle då ha en dimension på minst 30 gånger 60 cm och placeras i lämpliga väggar med hänsyn tagen till placering av basstationer. Rapporten föreslår ett antal långsiktiga åtgärder för att komma till rätta med problematiken. Behovet av ett närmare samarbete mellan inblandade parter (fastighetsägare, byggherrar, entreprenörer, mobiloperatörer, ...) samt en ökad satsning på forskning är två områden som nämns.



5.2 Radioutbredning

I referens [L4] presenteras mätningar av radiosignaldämpning i en sju våningar hög kontorsbyggnad. Byggnaden hade tegelfasad med en 10 centimeter tjock betongvägg bakom, fönstren var av vanligt glas, alltså inga energifönster. Mätningarna utfördes för frekvensen 5.1 GHz där sändaren var placerad i en helikopter och mottagaren inne i själva fastigheten på tre olika våningsplan, våning två, fem och sex. Resultaten visar att dämpningen i jämförelse med direkt "line-of-site" varierar mellan 10 och 45 dB, med ett medelvärde på ca. 20 dB. Det bör noteras att dessa dämpningsvärden representerar alla förluster mellan sändare och mottagare, vilket inte är detsamma som dämpningen enbart i byggnadsskalet, bl.a. ingår diffraktionsförluster.

En metod att lösa problematiken med dålig inomhustäckning är att använda små basstationer inomhus, s.k. femtoceller. Vid implementation av femtoceller är det viktigt att se till att de inte stör det vanliga mobilnätet, dvs. basstationer utomhus. I detta fall vill man alltså ha hög dämpning i byggnadens skal. Denna problematik studeras i referens [L5] för LTE-banden 800 och 2600 MHz. Inga specifika värden för dämpning i väggar och liknande anges men man konstaterar att det högre frekvensbandet är lämpligast att använda då dämpningen är högre där. Framgår inte vilken typ av fönster fastigheten har där mätningar utförts.

En undersökning av skillnaden i mottagen signalnivå utanför och inne i byggnader för frekvenserna 850 och 1900 MHz presenteras i referens [L6]. Mätningarna är utförda i ett riktigt GSM nätverk med basstationer på flera kilometers avstånd från byggnaderna. Resultaten visar att medelvärdet av dämpningen är 15 dB vid 850 MHz, och att dämpningen är nästan 3 dB högre vid 1900 MHz. En liknande undersökning för frekvensbandet 800 MHz presenteras i referens [L7]. Mätningarna i [L7] är gjorda i stadsmiljö där basstationerna är placerad på hög höjd, 25 respektive 60 meter. Syftet med mätningarna var att kartlägga hur signalen dämpas inomhus. Man konstaterar att signalen tar sig in via fönster och dämpningen precis innanför fönstret är i princip 0 dB för att sedan öka längre in i byggnaden. Även om det inte framgår av artikeln är det uppenbart att byggnaderna man mätt i inte har energifönster. Dämpningsvärden över 30 dB redovisas för mätpunkter långt in i byggnaden, dvs. i punkter långt från fönster.

*Dämpningsmätningar där man använt en antenn utanför huset och en inuti presenteras i referens [L8]. Mätningarna är gjorda för hela frekvensområdet 800 MHz till 18 GHz för att täcka in såväl befintliga som framtida mobiltelefonfrekvenser. Syftet var att jämföra en gammal byggnad med tre nya byggnader som byggts med modern teknik och moderna material för att vara energieffektiva. Resultaten visar att dämpningen i stort sätt är konstant över frekvens för den gamla byggnaden. Dämpningen är för den gamla byggnaden lägre än 10 dB i hela frekvensområdet. För de moderna energieffektiva byggnaderna är dämpningen högre och ökar med frekvens. Dämpningen är i genomsnitt 20-25 dB högre i de moderna husen jämfört med det gamla.

*I referens [L9] presenteras dämpningsmätningar i energieffektiva hus samt mätningar av några material, fönster och isoleringsmaterial. Mätningar i hus utfördes för 900 och 2100 MHz och totalt mättes 15 hus. Resultaten visar på en dämpning av 20-25 dB vilket konstateras vara 10-15 dB högre än i gamla (finska) hus.



Referens [L10] är en doktorsavhandling där författaren studerat kanalmodeller för utbredning från basstation till mottagare inomhus för mobiltelefonfrekvenser. Aspekten energieffektiva hus studeras inte.

5.3 Materialegenskaper

Referens [L11] är en omfattande engelsk rapport som behandlar problematiken med mobilsignaldämpning i moderna energieffektiva byggnader. Rapporten innehåller materialegenskaper för vanliga byggnadsmaterial, egenskaper som t.ex. kan användas i simuleringsprogram för signalutbredning. Resultat från mätningar i hus där man bl.a. provat att belägga fönster och väggar med metallfolie presenteras också. Resultaten visar att dämpningen i frekvensområdet 88 MHz till 5.7 GHz är 5-15 dB högre med metallfolie än utan, baserat på fem diskreta frekvenser.

I referens [L12] presenteras en teoretisk modell för beräkning av signaldämpning från en satellit till en mottagare placerade inuti en byggnad. Resultaten visar på en dämpning i storleksordningen 15 dB i frekvensområdet 800 MHz till 2 GHz.

En teoretisk modell för beräkning av dämpning av elektromagnetiska vågor i ett metalliskt rutnät presenteras i referens [L13]. Modellen kan t.ex. användas för att uppskatta dämpningen som erhålls av armering i betongvägg.

I referens [L14] diskuteras hur olika faktorer såsom infallsvinkel, konfiguration av yttervägg och basstationens höjd påverkar uppmätta dämpningsvärden. Mätningar är utförda med TEMS för frekvensen 900 MHz. Medelvärde av dämpningen befanns vara 18 dB, baserat på mätningar i fyra byggnader.

En numerisk studie av dämpningen i en väggsektion med ett fönster presenteras i referens [L15]. Studien är baserad på enkla transmissionsledningsmodeller och är gjord för frekvenserna 100 MHz, 300 MHz och 3 GHz.

*Jämförande mätningar utförda i gamla och nya energieffektiva hus presenteras i referens [L16]. Mätningarna utfördes i befintliga mobilnät för frekvensbanden 900 MHz och 2100 MHz, dvs. 2G och 3G system. Resultaten visar att moderna energieffektiva hus har en medeldämpning på 19 respektive 23 dB (för 900 respektive 2100 MHz) medan den för gamla hus är 6 respektive 9 dB. Man fann alltså att energieffektiva hus dämpar 13 respektive 14 dB mer än gamla. Experiment där man lagt in sektioner i väggarna med låg dämpning (genom att ta bort metallskikt) presenteras också. För den största aperturen man provade (60 cm hög, 30 cm bred) fann man att dämpningen minskade med mellan 6 till 13 dB beroende på infallsvinkel. Detta var för frekvensen 2100 MHz och motsvarande siffror för frekvensen 900 MHz är 1 till 6 dB. Mätningarna på aperturer gjordes med två antenner, den ena kopplad till en signalgenerator och den andra till en spektrumanalysator.

I referens [L17] undersöks dämpningen i väggsektioner för frekvensen 890 MHz. Enkla teoretiska modeller som kräver vetskap om materialparametrar visar god överensstämmelse med dämpningsmätningar. Både tegelväggar och betongväggar studeras. Unikt för denna studie är att betongväggar med dubbla lager med armeringsjärn har uppmätts. För tegelvägg rapporteras dämpningsvärden mellan 5 och 10 dB och för betongvägg 15 till 25 dB. Variationen i dämpning beror på infallsvinkeln och en skillnad mellan parallell och vinkelrät polarisation konstateras.



Resultat av dämpningsmätningar för väggar i gamla byggnader i Rom presenteras i referens [L18]. Även dämpning i en 2000 år gammal mur presenteras. Mätningarna är gjorda för frekvensområdet 700 MHz till 5 GHz och dämpningsvärden på upp till 85-90 dB rapporteras.

Referens [L19] är en relativt omfattande rapport som undersöker dämpning i väggsektioner både ur ett teoretiskt och praktiskt perspektiv. För armerade betongväggar konstateras att armeringen står för dämpningen för lägre frekvenser, för det studerade fallet under 500 MHz, medan betongen står för dämpningen för högre frekvenser. Studien är gjord för frekvensområdet 500 MHz till 8 GHz (med ett avbrott för området 2 till 3 GHz) och för flera olika fall av väggjockelekar etc.

*Referens [L20] är en mycket omfattande (200 sidor) rapport som ingående beskriver mätmetod och resultat från mätningar av dämpning i olika material. Flera typer av väggar och material har studerats bl.a. tegel, betong med och utan armering, flytglas (vanligt fönsterglas utan metallisk beläggning), trä, och gipsskivor. Precis som i referens [L19] är frekvensområdet uppdelat i två områden, det ena från 500 MHz till 2 GHz och det andra från 3 GHz till 8 GHz. Anledningen till gapet i frekvens är de antenner som använts för mätningarna. Förutom mätresultat i form av kurvor anges också polynomkoefficienter så att man analytiskt kan beräkna dämpningen för valfri frekvens.

I referens [L21] presenteras dämpningsmätningar i ett hus byggt av betongblock för frekvensområdet 200 MHz till 3 GHz. Samma mätningar finns också presenterade i ett kondenserat format i referens [L19].

Dämpningen i vanligt glas för frekvensområdet 1 till 6 GHz studeras i referens [L22]. De värden på dämpning som presenteras är beräknade med ett generellt beräkningsprogram för elektromagnetiska problem. Flera olika fall med ett varierande antal glas, inbördes avstånd och tjocklek studeras. Slutsatser som dras är att dämpningen generellt sett är låg men ökande med frekvens. Man visar också att avståndet mellan glasen kan optimeras för låg dämpning i ett visst frekvensområde.

I referens [L23] och [L24] jämförs en enkel beräkningsmodell för dämpning i väggar bestående av flera materialskikt med mätningar. Resultat för enkel vägg, trädörr och metaldörr visar på en god överensstämmelse mellan beräkningar och mätningar. Jämförelsen är gjord för frekvenser från 2 GHz till 6 GHz.

Dämpningsegenskaper för armerade betongväggar studeras numeriskt i referens [L25]. Studien är gjord för tre mobilsystemfrekvenser; 948, 1865 och 2140 MHz. Enkla beräkningsmodeller baserade på transmissionsledningsteori har använts, inga jämförande mätningar är utförda.

5.4 Frekvensselektiva ytor

Referens [L26] undersöker möjligheten att montera frekvensselektiva ytor på inomhusväggar för att dämpa signalutbredning för vissa frekvenser. Tanken är att kunna placera sådana ytor på väggar i t.ex. en korridor för att dämpa en viss frekvens och därmed minska risken för att system i olika rum stör varandra. Utförda experiment visar att en signaldämpning på 15 dB kan uppnås i ett begränsat frekvensområde, i detta fall 5.4 till 6 GHz.

I referens [L27] presenteras en numerisk undersökning av ett frekvensselektivt mönster applicerat på en glasruta. Syftet är att åstadkomma en minskad dämpning i ett energieffektivt fönster för frekvensområdet 500 MHz till 2 GHz och samtidigt bevara den höga dämpningen för WLAN-frekvenser



(2.45 GHz) så att dessa signaler inte läcker ut ur byggnaden. De numeriska resultaten visar på bra prestanda, inga mätresultat redovisas.

Referens [L28] är en svensk rapport som undersökt möjligheten att göra periodiska slitsar (frekvensselektiv yta) i ett energiglas med syfte att minska dämpningen av mobilsignaler. De numeriska resultat som redovisas visar att tekniken fungerar och ger god prestanda i det avsedda frekvensområdet. Designen som presenteras i rapporten är optimerad för 900 MHz och 1800 MHz, inga mätresultat redovisas.

Referens [L29] och [L33] behandlar, precis som [L28], frekvensselektiva ytor i energifönster med syfte att minska dämpningen av mobilsignaler. Även i detta fall är det en numerisk studie, inga mätresultat redovisas. Beräknade resultat visar att man lyckas göra ett fönster i stort sätt transparent för frekvenserna 887 MHz och 2112 MHz.

Referens [L30] har vissa likheter med [L26] men här är syftet det omvända, dvs. att förbättra signalutbredningen inomhus genom att montera paneler med frekvensselektiva ytor på väggarna. Man har studerat en vinklad korridor där man har använt en sändande antenn i ena änden och en mottagande i andra. Genom att jämföra mottagen signalnivå för fallen med och utan paneler på väggarna kunde man konstatera en förbättring med mer än 10 dB tack vare de frekvensselektiva ytorna. Studien är gjord för frekvensområdet 850 MHz till 900 MHz.

Vid design av en frekvensselektiv yta för t.ex. energifönster behöver man veta de elektriska egenskaperna för själva glaset för det aktuella frekvensområdet. Hur man med god noggrannhet kan mäta de elektriska egenskaperna (permittivitet och ledningsförmåga) behandlas i referens [L31] och [L32]. Samma forskargrupp presenterar i referens [L35] uppmätta dämpningsvärden för glas som används för energifönster, dvs. glas belagda med metalloxid.

I referens [L34] presenteras en beräkningsmetod för signalutbredning genom en väggsektion utformad som en frekvensselektiv yta. Den föreslagna beräkningsmetoden jämförs med resultat beräknade med ett kommersiellt beräkningsprogram. Fördelen med den föreslagna metoden är att den är betydligt snabbare än den kommersiella programvara man jämfört med. Studien är gjord för frekvensen 3 GHz.

*I referens [L36] presenteras såväl beräknade som uppmätta värden för dämpning av radiosignaler i energifönster utan respektive med frekvensselektiv yta. Resultaten visar att glaset med frekvensselektiv yta har ungefär 10 dB lägre dämpning än originalglaset i frekvensområdet 900 MHz till 2 GHz.



6 Kvarstående frågeställningar

Projektet har varit en god start för att klargöra ett antal frågeställningar och för att skapa metodik att arbeta med. Som så ofta när man studerar en fråga dyker nya upp. Frågor som återstår listas nedan. Några av frågeställningarna kommer att belysas i det påbörjade Vinnova UDI-projektet "Inomhustäckning för mobil-kommunikation i moderna energieffektiva byggnader - Steg 2", men mycket återstår.

- Konstruktionsdetaljer. Det finns indicier på att ytterväggar dämpar mobilsignalerna mindre än man skulle kunna förvänta sig från bara materialvalen. Orsaken kan vara att detaljer som tar upp liten yta är viktiga för helhetsbilden. Ett sådant exempel skulle kunna vara fönsterkarmar.
- Innerväggar. Signalen påverkas också när den ska ta sig vidare genom innerväggar. Det finns exempel på hus där bärande innerväggar blockerar signalerna. Analyser av material och konstruktioner behöver alltså utvidgas till också den inre konstruktionen.
- Byggnader. När studierna på detaljnivå har kommit tillräckligt långt behöver ett angreppssätt för hela byggnader tas fram. Det är dels en fråga om vilken metodik som ska användas för att värdera inomhustäckning men också hur frågan ska hanteras i byggprocessen.
- Förbättrande åtgärder. Åtgärder som på ett enkelt sätt ger en bättre signalutbredning genom ytterväggar men också i hus ska studeras. Kostnad och energiegenskaper ska påverkas så lite som möjligt.
- Experimentmiljö. Det skulle vara en fördel om det fanns en testmiljö där olika både aktiva och passiva lösningar kan studeras.
- Höga frekvenser. Framtida kommunikationslösningar som 5G kommer använda betydligt högre frekvenser och arbetet behöver utvidgas för att hantera dem.
- Mätteknik. I projektet har mätningar av signalstyrka genomförts. Mätningar av den totala dämpningen i komponenter tas fram i UDI-projektet. En komplettering behöver göras för mätningar av detaljer i färdiga byggnader.
- Beräkningsverktyg. Ett avancerat beräkningsverktyg har testats i projektet. Det fungerar utmärkt för vetenskapliga ändamål men är inte praktiskt hanterbart i en vanlig byggprocess. En förenklad process behöver tas fram.
- Kravställning. Huvudsyftet är att åstadkomma en bra inomhustäckning och en bra miljö för trådlös kommunikation. Detta behöver formuleras i krav som kan brytas ner till specifikationer för konstruktion och utrustning. Hur dessa krav ska utformas är en komplex fråga som behöver bearbetas.



7 Referenser

7.1 Referenser för allmän text

- [A1] PTS åtgärder för ökad mobiltäckning, dnr: 14-7016.
- [A2] Tillgången till telefoni, PTS uppföljningsrapport 2014, PTS-ER-2014:25.
- [A3] Inomhustäckning – sammanställningar av lösningar PTS-ER-2015:12.
- [A4] Ministry of Transport and Communications, Mobile network reception problems in low energy buildings. Working group report. Publications 31/2013.
- [A5] TEMS Pocket by Ascom. [online] <http://www.ascom.com/nt/en/index-nt/tems-products-3/tems-pocket-5.htm#overview>.
- [A6] WinProp by AWE. [online] <http://www.awe-communications.com>.
- [A7] BIM Alliance Sweden. [online] <http://www.bimalliance.se/>.

7.2 Referenser för litteraturstudie

7.2.1 Inomhustäckning, kanalmodellering

- [L1] T. K. Sarkar, Z. Ji, K. Kim, A. Medouri, M. Salazar-Palma, "A survey of Various Propagation Models for Mobile Communication," IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 45, Issue 3, pp. 51-82, 2003.
- [L2] J. Wännström, "Inomhustäckning – sammanställning av lösningar," Post- och telestyrelsen, Rapport PTS-ER-2015:12.
- [L3] Olli-Pekka Rantala, "Mobile network reception problems in low energy buildings," Publications of the Ministry of Transport and Communications 31/2013.

7.2.2 Radioutbredning

- [L4] A. A. Glazunov, L. Hamberg, J. Medbo, J.-E. Berg, "Building Shielding Loss Measurements and Modelling at the 5 GHz Band in Office Building Areas," Vehicular Technology Conference, 2000. IEEE-VTS Fall VTC 2000. 52ndh.
- [L5] J D. M. Rose, T. Jansen, T. Kürner, "Indoor to Outdoor Propagation – Measuring and Modeling of Femto Cells in LTE Networks at 800 and 2600 MHz," Globecom Workshops (GC Wkshps), 2011 IEEE, 2011.
- [L6] H. Elgannas, I. Kostanic, "Outdoor-to-Indoor Propagation Characteristics of 850 MHz and 1900 MHz Bands in Macro Cellular Environments," Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2014 Vol II, WCECS 2014, 22-24 October, 2014, San Francisco, USA.
- [L7] Y. Hirota, H. Izumikawa, C. Ono, "Outdoor-to-Indoor Radio Propagation Characteristics with 800 MHz Band in an Urban Environment," Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2014 IEEE, pp. 697-698, 2014.
- [L8] I. Rodriguez, H.C. Nguyen, N.T.K. Jorgensen, T.B. Sorensen, P. Mogensen, "Radio Propagation into Modern Buildings Attenuation Measurements in the Range from 800 MHz to 18 GHz," Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2014 IEEE 80th.



- [L9] A. Asp, Y. Sydorov, M. Valkama, J. Niemela, "Radio Signal Propagation and Attenuation Measurements for Modern Residential Buildings," *Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2012 IEEE, pp. 580-584, 2012.
- [L10] R. Gahleitner, "Radio Wave Propagation in and into Urban Buildings," PhD dissertation, Technischen Universität Wien, Matr. Nr. 8326196, 1994.

7.2.3 *Materialegenskaper*

- [L11] R. Rudd, K. Craig, M. Ganley, R. Hartless, "Building Materials and Propagation," Final Report Ofcom, 2604/BMEM/R/3/2.0, Sept. 2014.
- [L12] A. A. Glazunov, J.-E. Berg, "Building-Shielding Loss Modelling," *Vehicular Technology Conference Proceedings*, 2000. VTC 2000-Spring Tokyo. 2000 IEEE 51st, pp. 1835-1939, 2000.
- [L13] K. F. Casey, "Electromagnetic Shielding Behavior of Wire-Mesh Screens," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, Volume: 30, Issue: 3, Part: 2, pp. 298-306, 1988.
- [L14] F. Kakar, K.A. Sani, F. Elahi, "Essential Factors Influencing Building Penetration Loss," *Communication Technology*, 2008. ICCT 2008. 11th IEEE International Conference on, pp. 1-4, 2008.
- [L15] S. Stavrou, S.R. Saunders, "Factors influencing outdoor to indoor radio wave propagation," *Antennas and Propagation*, 2003. (ICAP 2003). Twelfth International Conference on (Conf. Publ. No. 491) Volume: 2, pp. 581-585, 2003.
- [L16] A. Asp, Y. Sydorov, M. Keskkikastari, M. Valkama, J. Niemela, "Impact of Modern Construction Materials on Radio Signal Propagation Practical Measurements and Network Planning Aspects," *Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2014 IEEE 79th, pp. 1-7, 2014.
- [L17] D. Pena, R. Feick, H.D. Hristov, W. Grote, "Measurement and Modeling of Propagation Losses in Brick and Concrete Walls for the 900-MHz Band," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, Volume: 51, Issue: 1, pp. 31-39, 2003.
- [L18] D. Micheli, A. Delfini, F. Santoni, F. Volpini, M. Marchetti, "Measurement of Electromagnetic Field Attenuation by Building Walls in the Mobile Phone and Satellite Navigation Frequency Bands," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 14, pp. 698-702, 2015
- [L19] D. V. Giri, F. M. Tesche, "Modeling of Propagation Losses in Common Residential and Commercial Building Walls," *Interaction Notes*, Note 624, Aug. 2013.
- [L20] W. C. Stone, "Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials," NISTIR 6055, NIST Construction Automation Program, Report No. 3, 1997.
- [L21] C. D. Taylor, S. J. Gutierrez, S. L. Langdon, K. L. Murphy, "On the Propagation of RF into a Building Constructed of Cinder Block Over the Frequency Range 200 MHz to 3 GHz," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on* Volume: 41, Issue: 1, pp. 46-49, 1999.
- [L22] S.I. Sohail, G.I. Kiani, K.P. Esselle, "Parametric Analysis of RF and Microwave Transmission through Single and Multiple Layers of Float Glass," *Microwave Conference Proceedings (APMC)*, 2011 Asia-Pacific, pp. 1454-1457, 2011.
- [L23] T.B. Gibson, D.C. Jenn, "Prediction and Measurement of Wall Insertion Loss," *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1996. AP-S. Digest, Volume: 2, pp. 1486-1489, 1996.
- [L24] T.B. Gibson, D.C. Jenn, "Prediction and Measurement of Wall Insertion Loss," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, Volume: 47, Issue: 1, pp. 55-57, 1999.



- [L25] G. Antonini, A. Orlandi, S. D'elia, "Shielding Effects of Reinforced Concrete Structures to Electromagnetic Fields due to GSM and UMTS Systems," *Magnetics, IEEE Transaction on*, Vol. 39, Issue 3, pp. 1582-1585, 2003.

7.2.4 Frekvensselektiva ytor

- [L26] G.H.-H. Sung, K.W. Sowerby, M.J. Neve, A.G. Williamson, "A Frequency-Selective Wall for Interference Reduction in Wireless Indoor Environments," *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, Volume: 48, Issue: 5, pp. 29-37, 2006.
- [L27] S.I. Sohail, K.P. Esselle, G. Kiani, "Design of a Bandpass FSS on Dual Layer Energy Saving Glass for Improved RF Communication in Modern Buildings," *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2012 IEEE*, pp. 1-2, 2012.
- [L28] B. Widenberg, J.V.R. Rodríguez, "Design of Energy Saving Windows with High Transmission at 900 MHz and 1800 MHz," Lund, August 28, 2002.
- [L29] I. Ullah, D. Habibi, Xiaoli Zhao, G. Kiani, "Design of RF/Microwave Efficient Buildings Using Frequency Selective Surface," *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011 IEEE 22nd International Symposium on*, pp. 2070-2074, 2011.
- [L30] D.C. Kemp, C. Martel, M. Philippakis, M.W. Shelley, R.A. Pearson, I. Llewellyn, "Enhancing Radio Coverage Inside Buildings," *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE*, Volume: 1A, pp. 783-786, 2005.
- [L31] G.I. Kiani, A. Karlsson, L. Olsson, K.P. Esselle, "Glass Characterization for Designing Frequency Selective Surfaces to Improve Transmission through Energy Saving Glass Windows," *Microwave Conference, 2007, APMC 2007, Asia-Pacific*, pp. 1-4, 2007.
- [L32] G.I. Kiani, A. Karlsson, L. Olsson, "Glass Characterization for Designing Frequency Selective Surfaces to Improve Transmission through Energy Saving Glass Windows," Lund, April 9, 2008.
- [L33] I. Ullah, Xiaoli Zhao, D. Habibi, G. Kiani, "Transmission improvement of UMTS and Wi-Fi signals through energy saving glass using FSS," *Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), 2011 IEEE 12th Annual*, pp. 1-5, 2011.
- [L34] Ming Yang, A. Brown, "Simulation of Propagation through a Frequency Selective Wall at 3GHz," *Antennas and Propagation (EuCAP), 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on*, pp. 1-5, 2010.
- [L35] G.I. Kiani, L. Olsson, A. Karlsson, K. Esselle, "Transmission analysis of energy saving glass windows for the purpose of providing FSS solutions at microwave frequencies," *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2008 IEEE*, pp. 1-4, 2008.
- [L36] M. Gustafsson, A. Karlsson, A. P. P. Rebelo, B. Widenberg, "Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communication," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, Volume: 54, Issue: 6, pp. 1897-1900, 2006.



Runt 35 procent av all energi i Sverige används i bebyggelsen. I forskningsprogrammet E2B2 arbetar forskare och samhällsaktörer tillsammans för att ta fram kunskap och metoder för att effektivisera energianvändningen och utveckla byggandet och boendet i samhället. I den här rapporten kan du läsa om ett av projekten som ingår i programmet.

E2B2 genomförs i samverkan mellan IQ Samhällsbyggnad och Energimyndigheten åren 2013-2017. Läs mer på www.E2B2.se.