



# Ledningsdemonstrator - System i fokus: Silvus StreamCaster

GUNNAR BOLLMARK, ANDERS HANSSON, KRISTOFFER HÄGGLUND,  
JAN NILSSON OCH WILLIAM NORDSTRÖM

Gunnar Bollmark, Anders Hansson, Kristoffer Hägglund,  
Jan Nilsson och William Nordström

# Ledningsdemonstrator - System i fokus: Silvus StreamCaster

Titel	Ledningsdemonstrator - System i fokus: Silvus StreamCaster
Title	Ledningsdemonstrator - System in focus: Silvus StreamCaster
Rapportnr / Report No.	FOI-R--5863--SE
Månad / Month	Januari / January
Utgivningsår / Year	2026
Antal sidor / Pages	31
ISSN	1650-1942
Kund / Customer	FMV
Forskningsområde	Ledningsteknologi
FoT område	Ingen FoT
Projektnr / Project No.	E51125
Godkänd av / Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Telekrig
Exportkontroll	

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

## Sammanfattning

Baserat på underlag från ett dimensionerande brigadledningsscenario som beskriver hur brigaden och brigadens förband nyttjar sina stabs- och ledningsplatser utvärderas trådlösa kommunikationslösningar vid Härads skjutfält. Syftet är att undersöka radiosystemens lämplighet att användas som komplement till fiberkabel för att möjliggöra snabb grupperingsförmåga. Denna rapport beskriver mätresultat från ett av flera tester som utförs inom projektet och är riktad till deltagare inom projektgruppen. I varje test utvärderas en kommunikationslösning. Resultaten från samtliga tester utgör underlag till en sammanställande rapport där projektet beskrivs på en mer översiktlig nivå. Det radiosystem som har utvärderats i denna rapport är Silvus StreamCaster som används inom Försvarmakten, där radion benämns Radiolänk 39 (RL39). De parametrar som utvärderas är kapacitet i termer av uppnåbar dataakt samt upptäcktsavstånd.

Överföringskapacitet undersöktes för unicast (punkt-till-punkt) och multicast (en-till-flera), för olika antennhöjder. Två frekvensområden undersöktes, dels UHF-bandet (centerfrekvens 301,875 MHz med 1,25 MHz bandbredd) dels L-bandet (1375 MHz centerfrekvens med 10 MHz bandbredd). Resultaten visade att den maximala dataakten som resulterade i högst 1 % paketförlust för UHF var 2 Mbit/s, vilket erhöles för låga antennhöjder (< 15 meter). Dataakten begränsades på grund av att endast 1,25 MHz bandbredd fanns att tillgå på UHF under försöket. För L-band, med 10 MHz bandbredd behövdes höga antenner på minst 18 meter för att samtliga platser skulle kunna ha kontakt. Om antennen höjdes till 24 meter resulterade alla unicast-förbindelser i en dataakt på minst 8 Mbit/s och med 21 meter eller högre hade alla multicast-förbindelser minst 4 Mbit/s. Om MIMO-funktionaliteten hos radion utnyttjas borde dataakterna kunna höjas ytterligare, men detta undersöktes inte under försöket.

För att avgöra vilket upptäcktsavstånd som är möjligt att åstadkomma består analysen av tre delar. Den första delen består av prediktering av signal-brusförhållandet på olika spaningsplatser i fältet. Den andra delen utgörs av mätningar med hjälp av STEJL Etapp 7 (E7) under fältprovet. Den tredje delen sammanfogar ovanstående delar genom labbmätningar, som avgör vilka absoluta effektnivåer som krävs för lyckad detektion med den använda detektoralgoritmen. Därefter görs generaliserande simuleringar för att få ett statistiskt mått för upptäcktsavstånden. Resultatet utgörs av ett sannolikhetsintervall, där gränserna utgörs av den 25:e- respektive 75:e percentilen, det vill säga det avstånd där 25 %- respektive 75 % av kommunikationen kan upptäckas.

För UHF uppskattas detektionsintervallet till 1–5 km för låga antennhöjder, och 6–18 km för höga antennhöjder. För L-bandet är motsvarande upptäcktsavstånd 1–4 km för låga antennhöjder, och 3–6 km för höga antennhöjder.

Nyckelord: Radiokommunikation, överföringskapacitet, dataakt, signalspaning, upptäcktsavstånd

## Abstract

In order to facilitate regrouping ability of the command headquarters of a brigade, wireless communication systems are evaluated as complement to fiber-optic cable based on a scenario taking place at Härads firing range, highlighting how a brigade utilizes its command. This report shows the results of one of multiple tests conducted in the project and the target audience are people involved in the project. Each test evaluates a different communication system. The results from all tests constitutes a basis for a summarizing report at the end of the project. The wireless radio system used during the test is the Silvus StreamCaster, commonly known in the Swedish Armed Forces as radio link 39 (RL39). The evaluated parameters are capacity in terms of achievable data rate as well as distance of detection.

The communication performance was evaluated for unicast (point-to-point) and multicast (one-to-many) transmissions, using varying antenna heights. Two frequencies were examined, one in the UHF-band (center frequency of 301.875 MHz with 1.25 MHz bandwidth) and one in the L-band (1375 MHz center frequency with 10 MHz bandwidth). The results showed that the maximal achievable data rate that resulted in a packet error rate of at most 1% was 2 Mbit/s for UHF using antennas under 15 meters. The achievable data rate was limited due to the fact that only 1.25 MHz bandwidth was available during the test. For the L-band with 10 MHz bandwidth, the antennas had to be above 18 meters in order to establish contact between the nodes. At a height of 24 meters, the unicast-transmissions resulted in an achievable data rate of 8 Mbit/s. Multicast transmissions with antenna heights of 21 meters, resulted in a data rate of 4 Mbit/s. If the MIMO-functionality was used the resulting data rates could have increased, but this was not evaluated during the test.

The analysis to determine what distance the communication may be detected consisted of three parts. The first part consisted of a prediction of the signal-to-noise ratios at a few pre-determined locations in the area. The second part consisted of measurements of the signal-to-noise ratios performed during the test, using the detector STEJL Etapp 7 (E7). The third part ties the prior results together by examining the required received power for successful detection. Thereafter, generalized simulations are performed for a complete statistical view of the detection distance. The results are presented as a statistical interval, where the limits are based on the 25:th and 75:th percentiles, i.e., the distance where 25% and 75% of the communication is detected.

For the UHF-band the detection interval is estimated to be 1–5 km for lower antenna heights, and 6–18 km for higher antennas. For the L-band the detection interval is estimated at 1–4 km for lower antennas and 3–6 km for higher antennas.

Keywords: Radio communication, achievable data rate, signal reconnaissance, detection distance

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>7</b>
1.1	Syfte . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Silvus StreamCaster</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Förutsättningar</b>	<b>11</b>
3.1	Brigadledningsscenario . . . . .	11
3.2	Mätplats . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Mätmetod</b>	<b>15</b>
4.1	Överföringskapacitet . . . . .	15
4.2	Upptäcktsavstånd . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Resultat</b>	<b>19</b>
5.1	Radiomönster och associering . . . . .	19
5.2	Mätningar på UHF . . . . .	19
5.3	Mätningar på L-band . . . . .	22
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>29</b>
	<b>Referenser</b>	<b>31</b>



# 1 Inledning

Denna rapport beskriver mätresultat och målgruppen är främst projektgruppens deltagare inom FM och FMV. Resultaten som presenteras utgör underlag till en sammanställande rapport i slutet av projektet som samlar resultaten från samtliga tester som utförs inom projektet. Den sammanställande rapporten kommer beskriva hela projektet på en mer översiktlig nivå och är riktad till läsare utanför projektgruppen.

När Försvarsmaktens brigadledningskompani grupperar är normalfallet en distribuerad ledningsplats. Ledningsplatsen kan bestå av tre till fyra nästen där brigadledningens funktioner fördelas, samt två sändarplatser där radiolänk upprättas för kommunikation med övriga inom brigaden. Försvarsmaktens distribuerade brigadledning kommunicerar idag med tillfälligt utlagd fiberkabel. Användningen av fiberkabel medför hög bandbredd, låg fördröjning och är omöjligt att upptäcka ur ett signalspaningsperspektiv. Optisk fiberkabel är ömtåligt och kan gå sönder om den böjs för mycket eller utsätts för starka stötar. Tillgången på ny fiberkabel kan vara begränsande och den tid det tar att förlägga fiberkabel är stor, framförallt om terrängen eller vädet är besvärligt. Varje gång brigadledningskompaniet grupperar krävs att mer än 10 km fiberkabel förläggs tillfälligt i terrängen. Tidsåtgången för denna tillfälliga förläggning av fiberkabel försvårar snabb omgruppering av ledningsplatser, vilket i sin tur förhindrar fullgott skydd för brigadledningen. Inom projektet Ledningsdemonstrator undersöks alternativa sambandslösningar mellan nästen och sändarplats på en distribuerad stabsplats som komplement till den fiberbundna lösning som idag används.

Detta prov är det andra i en serie som genomförs på samma plats under liknande förhållanden. Syftet med denna provserie är att öka kunskapen om flera olika radiosystems lämplighet att användas som komplement till den fiberanslutning som idag finns i ett scenario kring distribuerad brigadledning. I detta prov användes radiosystemet Silvus StreamCaster som används inom Försvarsmakten, där det benämns Radiolänk 39 (RL39) [1].

## 1.1 Syfte

Syftet med rapporten är att redovisa radiosystemet Silvus StreamCasters lämplighet att fungera som ett komplement till den fiberkabelsbaserade lösning som idag används inom den distribuerade brigadledningen. De viktigaste begränsningar som ett trådlöst system medför jämfört med trådbunden fiberkabel gäller överföringskapacitet och risken att bli upptäckt av en signalspanare. Det är nära på omöjligt att få samma bandbredd med ett trådlöst system jämfört med fiberkabel, och prestandan begränsas bland annat av vilket frekvensområde radiosystemen opererar i, tillgänglig bandbredd samt vågutbredningsförhållandena på platserna. Frågan är om den möjliga överföringskapaciteten kan vara tillräcklig för att driva de ledningsstödssystem som används inom brigadledningen. Vad som bedöms vara tillräcklig prestanda beror på vilket ledningsstödssystem eller applikation som används. Inom projektet antas att en datatakt på runt 8 Mbit/s med paketförlust under 1 % bör vara tillräckligt för att driva de flesta applikationerna.

Till skillnad från fiberkabel medför ett trådlöst kommunikationssystem en sårbarhet i form av en elektromagnetisk signatur som kan upptäckas av signalspanare. Långa upptäcktsavstånd innebär att brigadledningen är lättare att lokalisera för fienden. Detta medför risker för personalen och kan förhindra möjligheten att fortsätta ledning från platsen.

De aspekter av radiosystemet som mäts vid provtillfället är dels prestanda i form av överföringskapacitet mellan fyra olika nästesplatser och en sändarplats, dels upptäcktsavstånd för att avgöra på vilka avstånd den trådlösa kommunikationen kan detekteras. Överföringsprestanda mäts dels för enskilda länkar mellan punkterna och för hela nätet i en-till-alla-sändningar. Dessa mäts enbart för förbundna nät, när samtliga nästen och sändarplats har kontakt. Detta sker för olika antennhöjder, där det är av intresse att identifiera den lägsta antennhöjd som ger ett förbundet nät där alla punkter kan nå varandra.

Analysen som gjorts för att avgöra upptäcktsavstånden består av tre delar. Den första delen utgörs av beräkningar av den elektromagnetiska vågutbredningen. Den andra delen består av detektionsmätningar som gjordes under fältprovet. Den tredje delen knyter samman prediktionsberäkningarna med mätningarna under fältprovet, specifikt genom att studera vilka absoluta effektinivåer den använda detektorn kräver för lyckad detektion. Resultatet presenteras i form av ett detektionsspann som utgörs av den 25:e samt 75:e percentilen av simulerade

upptäcktsavstånd, det vill säga det avstånd där 25-, respektive 75 % av kommunikationen kan upptäckas rent statistiskt.

## 2 Silvus StreamCaster

Radiosystemet som utvärderas detta försök är Silvus StreamCaster 4200 med vågformen *Mobile Networked MIMO* (MN-MIMO). Bandbredden kan varieras från 1,25 MHz upp till 20 MHz, och sändareffekten från 1 mW till 4 W, baserat på antalet antenntingångar på radion. Radion finns i två varianter: en två-antennversion samt en fyr-antennversion. Utöver antalet antenner och total uteffekt (cirka 2 W per antenntingång) är radioversionerna identiska. Radion tillåter inställbar uteffekt, från 1 mW upp till 8 W (för fyr-antennversionen). Därtill existerar effektläget *enable max power*, vilket låter radion automatiskt sätta uteffekten till den högsta möjliga, cirka 2 W per antenntingång. Formfaktorn är relativt liten, där två-antennversionen har måtten 102x67x38,4 millimeter och fyr-antennversionen 133,3x114,3x45,7 millimeter, i längd, bredd och höjd. Inom försöket användes två-antennversionen på nästena och fyr-antennversionen på sändarplatsen, där alla antenntingångar förutom en per radioenhet deaktiverades via radions konfigurationsgränssnitt. Vid mätningarna undersöktes därmed inte MIMO, endast en rundstrålande antenn per radioenhet användes.

Modulation och kodning kan variera, vilket styrs via parametern *modulation and coding scheme* (MCS). Antingen görs det adaptivt (Auto MCS), det vill säga att radion bestämmer MCS beroende på förhållande, eller så kan MCS förkonfigureras. MCS kan konfigureras från MCS0 med BPSK och kodtakt 1/2, upp till MCS15 med 64 QAM och kodtakt 5/6. Datatakten blir sedan beroende på bandbredden som används. Datatakt upp till 100 Mbit/s är möjliga med den högsta bandbredden 20 MHz.

Silvus StreamCaster heter System Radiolänk 39 (RL39) inom Försvarmakten. Två versioner av radion används (Radiolänk 391: StreamCaster 4210E, Radiolänk 392: StreamCaster 4480E). Den första är den handburna två-antennversionen och den andra är fyr-antennversionen avsedd att integreras i fordon eller ledningshytter. Systemet är beskrivet som lätt att handha med många taktiska fördelar, där följande egenskaper lyfts fram i instruktionsboken för RL39 [1]:

- Lättanvänt på soldatnivå,
- lätt att leda, kräver inte omfattande sambandsplanering och driftledningsorganisation,
- medger ett mycket rörligt uppträdande,
- medger datatrafik med hög bandbredd och låg fördröjning,
- har hög yttäckning inom operationsområde,
- kan anslutas till befintliga nät inom Försvarmakten,
- kan integreras i befintliga och kommande fordon,
- har någon motståndskraft mot fiendens telekrigföring (genom MIMO-funktionalitet).

Systemet driftleds via ett webbgränssnitt från en bärbar dator, där en mängd olika inställningar såsom frekvens, bandbredd, uteffekt och liknande kan konfigureras. Radiolänkenheterna kan fjärrstyras från en enhet, varifrån inställningar på samtliga anslutna enheter kan konfigureras från en plats. För mer information kring RL39 hänvisas instruktionsboken [1].



### 3 Förutsättningar

Följande avsnitt beskriver brigadledningsscenarioet skapat av Markstridsskolan och de förutsättningar som mätplatsen medför.

#### 3.1 Brigadledningsscenario

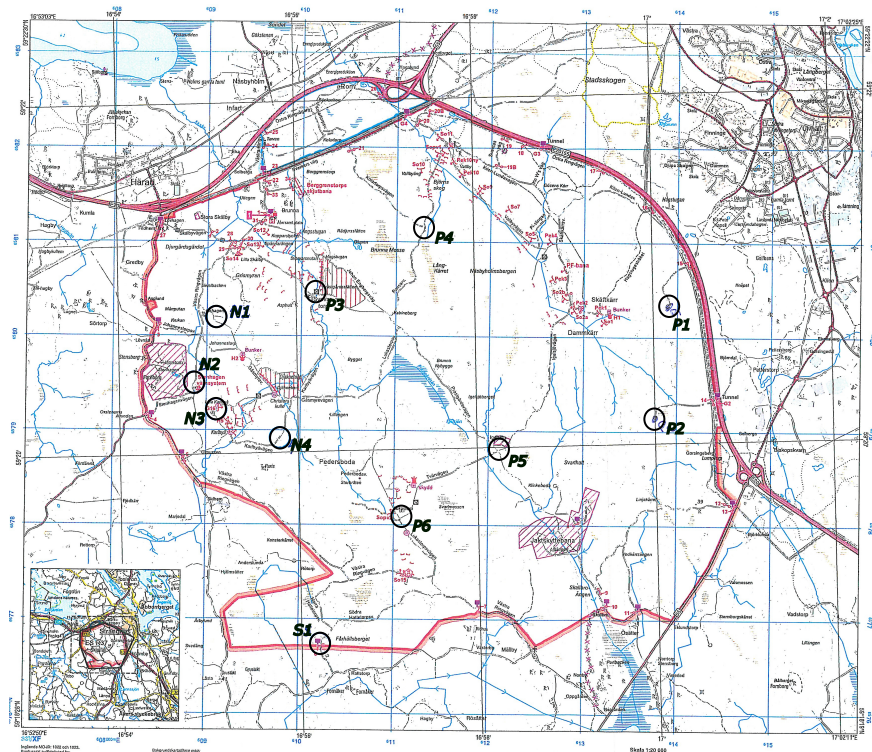
Aktuellt scenario har skapats av Markstridsskolan (MSS) för att säkerställa relevans för Försvarsmakten [2]. Scenariot visas i figur 3.1, där fyra nästen (N1, N2, N3, N4), en sändarplats (S1) och sex spaningsplatser (P1–P6) är markerade. Försöket begränsades till att undersöka sambandet mellan tre av nästena, N1, N3 och N4, samt den södra sändarplatsen S1. Näste 2 (N2) var endast utsedd som en reservplats och användes inte i försöket. Förbindelseavståndet mellan nästena är som längst 1,4 km för en enskild sträcka, och till sändarplats är den längsta länken 3,6 km fågelvägen, se tabell 3.1. De utvalda spaningsplatserna är mellan 1,0 km och 5,0 km från en sändare beroende på vilken nästesplats som är närmast. Under försöket användes främst P5 och P6 för signalspaning.

Tabell 3.1: Avstånd mellan nästen, sändarplats och spaningsplatser [km].

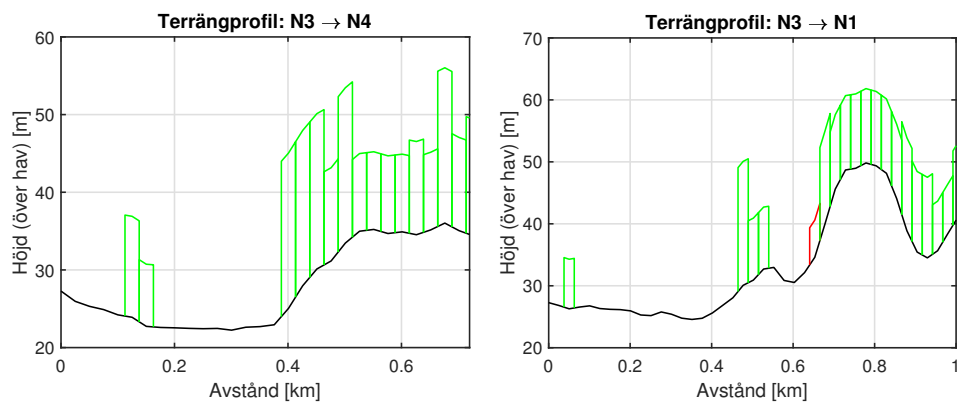
	N1	N2	N3	N4	S1	P1	P2	P3	P4	P5	P6
N1	-	0,8	1,0	1,4	3,6	4,9	4,8	1,0	2,4	3,3	2,9
N2	0,8	-	0,3	1,0	2,9	5,1	4,9	1,6	3,0	3,2	2,5
N3	1,0	0,3	-	0,7	2,7	4,9	4,6	1,6	2,9	3,0	2,2
N4	1,4	1,0	0,7	-	2,3	4,3	3,9	1,5	2,7	2,0	1,5
S1	3,6	2,9	2,7	2,3	-	5,2	4,2	3,7	4,5	2,7	1,5

#### 3.2 Mätplats

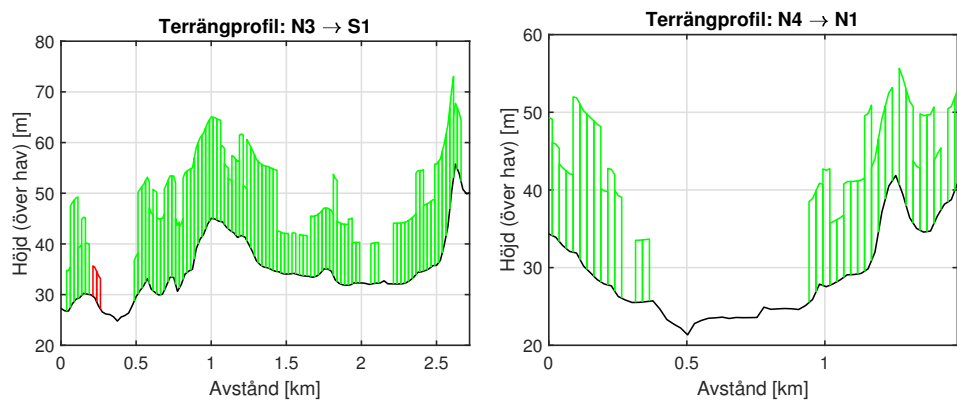
Sträckorna mellan de sex noderna har undersökts med vågutbredningsverktyget Detvag [3]. I figur 3.2, 3.3 och 3.4 visas terräng- och vegetationsprofilen mellan noderna. De gröna staplarna motsvarar olika typer av vegetation, associerat med terrängdatabasen i Detvag. Röda staplar motsvarar byggnader. Området är tämligen kuperat och ligger på mellan 20 och 50 meter över havet. I de flesta fallen är vegetationen det största hindret för vågutbredningen, vilket kan underlättas genom upphöjda antenner. Till exempel, med en antennhöjd på 24 meter fås en frisiktlinje mellan N1 och S1, se figur 3.4, däremot mellan N3 och S1 (figur 3.3) går fortfarande en del av förbindelsen genom vegetation. Beräknade länkdämpningar mellan noderna för olika antennhöjder visas i tabell 3.2, framtaget med Detvag. Länkarna antas vara symmetriska, det vill säga att länkdämpningen antas vara lika stor i båda riktningarna. I tabellen visas hur länkdämpningen ökar när antennhöjden minskar, eftersom en större del av förbindelsen går genom vegetationen vid lägre höjder. Överlag är dämpningen störst för förbindelser till och från sändarplatsen (S1) på grund av att medelavståndet från samtliga nästen är drygt tre gånger så långt som avståndet mellan nästena.



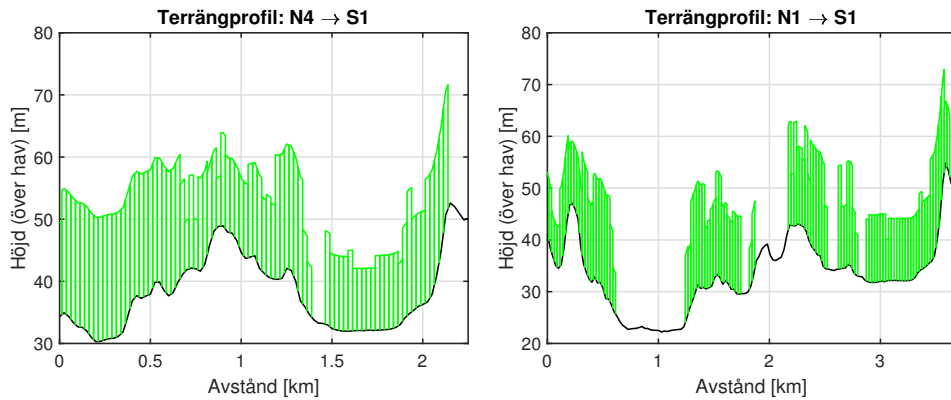
Figur 3.1: Karta över Härads skjutfält med nästen (N1–N4), sändarplats (S1) och spaningsplatser (P1–P6) markerade.



Figur 3.2: Terrängprofil för näste 3 (N3) sett mot näste 4 (N4) respektive näste 1 (N1).



Figur 3.3: Terrängprofil för näste 3 (N3) sett mot sändarplats 1 (S1) och näste 4 (N4) mot näste 1 (N1).



Figur 3.4: Terrängprofil för näste 4 (N4) sett mot sändarplats 1 (S1) samt näste 1 (N1) mot sändarplats 1 (S1).

Tabell 3.2: Beräknad länkdämpning [dB] för alla länkstråk mellan nästen och sändarplats för frekvensområden på L-bandet samt UHF. Raderna motsvarar antennerhöjder på nästen [26 24 21 18 15 12 9 6 3] meter. Antennerhöjden på sändarplatsen är alltid 24 meter och länkarna antas vara symmetriska.

		L-band				UHF			
		N1	N3	N4	S1	N1	N3	N4	S1
N1			99	99	106		85	82	95
			105	99	106		88	83	97
			112	99	109		89	85	99
			115	102	115		88	88	101
		-	128	109	120	-	92	91	103
			129	118	124		96	96	105
			125	129	130		99	103	107
			136	143	129		100	109	109
			155	158	131		105	116	112
N3		99		93	117	85		79	98
		105		95	118	88		80	100
		112		100	125	89		80	102
		115		105	129	88		84	104
		128	-	105	132	92	-	90	107
		129		120	134	96		92	110
		125		127	139	103		98	116
		136		128	161	100		101	117
		155		148	162	105		104	117
N4		99	93		108	82	79		95
		99	95		119	83	80		97
		99	100		116	85	80		101
		102	105		122	88	84		104
		109	105	-	135	91	90	-	107
		118	120		142	96	92		110
		129	127		148	103	98		115
		143	128		162	109	101		119
		158	148		171	116	104		122
S1		106	117	108		95	98	95	
		106	118	119		97	100	97	
		109	125	116		99	102	101	
		115	129	122		101	104	104	
		120	132	135	-	103	107	107	-
		124	134	142		105	110	110	
		130	139	148		107	116	115	
		129	161	162		109	117	119	
		131	162	171		112	117	122	



## 4 Mätmetod

Följande avsnitt beskriver mätstrategier för överföringskapacitet och upptäcktsavstånd, samt de mätverktyg, utrustning och mätprogram som användes i försöket.

### 4.1 Överföringskapacitet

Kapacitetsmätningar för unicast- (punkt-till-punkt) och multicast (en-till-flera)-trafik genomfördes för ett antal olika antennhöjder. För unicast-sändningarna konfigurerades radioinställningarna till Multi-Hop och Auto MCS, där radion själv väljer kodning och modulation utifrån rådande förhållanden. Då radion konfigurerades för multicast användes MANET Multicast/Broadcast Mode. För multicast testades och jämfördes några ytterligare konfigurationer såsom Multi-Hop och Single hop, samt Auto MCS eller Auto MCS Lower Bound. Under försöket mättes endast en riktning per förbindelse för unicast-sändningarna för att reducera antalet mätningar. En mätomgång bestod av totalt tio testfall: sex unicast-fall och fyra multicast-fall. Vid försöket användes följande metod:

1. Mät överföringskapaciteten vid högsta antennhöjd och maximal sändareffekt.
2. Sänk antennerna och kontrollera med hjälp av mätprogrammet Loggvakten (avsnitt 4.1.2) att nätet är förbundet.
3. Identifiera den lägsta antennhöjd som ger ett förbundet nät.
4. Mät överföringskapaciteten vid den lägsta antennhöjden.
5. Komplettera med mätningar på mellanliggande höjder.

Kapacitetsmätningen över en förbindelse gjordes med verktyget IPerf2, se avsnitt 4.1.3. På de tre nästesplatserna var antennen på samma höjd och på sändarplatsen var höjden alltid 24 meter för kapacitetsmätningarna.

Mätningar genomfördes för två olika frekvensområden: UHF och L-band. Frekvenstillstånd erhöles av Försvarsmaktens frekvensarbetsgrupp inför försöket vilket resulterade i 1,25 MHz bandbredd med centerfrekvens 301,875 MHz för UHF, samt 10 MHz bandbredd och centerfrekvens 1375 MHz för L-band.

#### 4.1.1 Mätuppställning

För varje testfall varierades antennhöjderna med hjälp av en skylift på varje mätplats. Med de fyra skyliftarna kunde antennhöjderna höjas upp till cirka 26 meter. Varje radio var monterad i fordon och förbunden via 30-meters antennkablar till två antenner upphöjda med en skylift. Kabeldämpningen uppmättes till mellan 4 och 7 dB.

För UHF-bandet användes en dubbelbandsantenn från Comrod med beteckningen VHF30450DB, som är rundstrålände i horisontalplanet och har en maximal antennvinst på 1,5 dBi i UHF-bandet. I L-bandet användes också en antenn från Comrod. L-bandsantennen hade beteckningen UHF720VM-HG och har en maximal antennvinst på drygt 5 dBi. Även denna antenn var rundstrålände i horisontalplanet.

#### 4.1.2 Loggvakten

Loggvakten, en programvara utvecklad av FOI, styr och övervakar loggning, radionätens förbundenhet samt radions inställningar. Varje radio i nätet har normalt en egen dator ansluten som kör programvaran. Huvudsyftet var ursprungligen att i fält kunna styra och övervaka transmissionen av mätdata när det inte är möjligt att ha försökspersonal vid varje radio. Programmet utnyttjar radions SNMP-gränssnitt för att lokalt eller via radionätet ändra en radios inställning, exempelvis uteffekt, konfiguration, radiotystnad och omstart. En annan grundfunktion i Loggvakten är att sända, ta emot och logga probtrafik i radionäten för att testa om nätet är förbundet. Trafiken skickas med multicast och trafikintensitet (tid mellan genererade paket) och paketstorlek kan väljas. Programmet presenterar överskådligt om och hur paketströmmar tas emot från avsändarna.

Under försöket användes Loggvakten till en första kontroll om nätet var förbundet eller fragmenterat. Detta gjordes med låg belastning, några få paket per sekund.

### 4.1.3 IPerf2

Verktöget IPerf2 användes för kapacitetsmätningarna. Det analyserar nätverkskapacitet mellan två datorer genom att generera och överföra data över TCP eller UDP. Programmet rapporterar statistik om överföringshastighet, latens, jitter (variation i fördröjning) och paketförluster. Fördröjningsstatistik kräver emellertid synkroniserad tid i server och klient, vilket inte var tillgängligt under fältförsöket.

Verktöget har en mängd parametrar som kan väljas där följande kommandon för mätningarna användes.

**Sändning unicast:** `iperf2 -c IP-adress till mottagare -u -b Xm -t 20 -e -f k`

**Mottagning unicast:** `iperf2 -s -u -i 1 -P 10 -e -f k`

**Sändning multicast:** `iperf2 -c IP-adress multicast -u -b Xm -t 20 -l 1400 -ttl 6 -e -f k`

**Mottagning multicast:** `iperf2 -s -u -B IP-adress multicast -i 1 -P 10 -e -f k`

Innebörden av de viktigaste parametrarna ges nedan, övriga parametrar styr hur resultaten presenteras och formateras. Endast UDP undersöktes eftersom det protokollet mer direkt avspeglar rådataaktiken på en radioförbindelse jämfört med TCP .

- c agera som klient (sänd mättrafik till *IP-adress*)
- s agera som server (ta emot mättrafik)
- B bind till *IP-adress multicast* (ta emot mättrafik via multicast)
- u mät över UDP
- b *Xm* klienten sänder med *X* Mbit/s (varierades under försöket)
- l bufferstorlek i bytes (högst 1470 för UDP)
- ttl time-to-live, antal vidareändringar (endast för multicast)

Den sändande radions dataakt sattes manuellt via IPerf2 och de dataakter som undersöktes L-band och unicast var 4 Mbit/s, 8 Mbit/s och 12 Mbit/s. För multicast undersöktes 2 Mbit/s samt 4 Mbit/s. För UHF sattes dataakterna till högst 4 Mbit/s på grund av den begränsade bandbredden.

## 4.2 Upptäcktsavstånd

Inspelningar av kommunikationen mellan nästena genomföres dels simultant med överföringskapacitetsmätningarna, men även genom specifika mätningar anpassade för signalspaning. Under de spanings-specifika mätningarna var endast två radioenheter aktiva i nätet, en för sändning och en för mottagning. Detta gjordes för att reducera associationsproblemet som uppstår när samtliga sändande stationer är aktiva. Den ena radioapparaten fungerar som informationskälla. Den andra är informationsmottagaren som sänder administrativa meddelanden såsom bekräftelser av mottagna datapaket. Inspelningarna gjordes med mätsystemet STEJL Etapp 7 (E7), se avsnitt 4.2.1, där endast en kanal användes. Till E7 var en rundstrålande antenn ansluten. Insamlad data sparades obehandlat som IQ-data. Mätningar gjordes från två positioner (spaningsplats P5 och P6, se figur 3.1). Avstånden mellan respektive näste- och spaningsplats redovisas i tabell 3.1. Mätningar utfördes på tre antennhöjder för både sändarplatser och spaningsplatser. Testfallen bestod av att de två kommunicerande enheterna inledde på högsta antennhöjd, varpå signalspaning utfördes från spaningsplatsen sekventiellt för tre olika antennhöjder. Därefter sänktes antennerna på kommunikationsplatserna till nästa höjd, och spaningsmätningarna upprepades för de tre antennhöjderna. Antennhöjden varierade mellan 15, 21 och 25 meter för mätningarna på L-band (1375 MHz). För UHF-bandet var antennhöjden 6, 15 och 25 meter. Mätningarna upprepades för varje parkombination av nästen och sändarplats.

### 4.2.1 Mätssystem

Mätssystemet som användes för signalspaning är STEJL Etapp 7, som även benämns E7. STEJL Etapp 7 är en demonstrationsplattform som används för tillämpad forskning inom telekrig, både inom signalspaning och störning men även som referenssystem vid mätningar eller utvärderingar.

Mottagaren i E7 är Sidekiq X4 från EPIQ Solutions, vilken har en samplingstakt på 204,8 MHz som resulterar i 160 MHz bandbredd efter fönstring. Mottagaren har en digital bandpassfilterbank från 390 MHz upp till 6 GHz. För signaler under 390 MHz finns endast ett bypass-läge, vilket är ett lågpasfilter med passband från 0 GHz upp till cirka 7 GHz. Detta gör att allt termiskt brus ifrån hela detta frekvensområde riskerar att vikas in för frekvenser under 390 MHz. Detta i kombination med en brusigare signalmiljö, till följd av att utbredningsdämpningen är mindre i förhållande till den på högre frekvenser, speciellt inom HF-området, gör att mottagarens prestanda för detektion är sämre under 390 MHz. Detta är viktigt att ha i åtanke innan ogrundade slutsatser som endast baserats på mätningar tas. Specialiserade system för frekvensområdet 0–390 MHz har hårdvaruanpassningar som förbättrar förmågan att detektera signaler.

### 4.2.2 Detektoralgoritm

Följande avsnitt beskriver detektoralgoritmen som användes vid utvärdering av upptäcktsavstånden. Valet av detektoralgoritm har stor påverkan på detektionsavståndet.

Detektorn är en energidetektor, där data från endast en mottagarkanal med rundstrålande antenn används för att detektera en eventuellt närvarande signal. I ett operativt system hade flera mottagarkanaler från flera antennelement använts för att möjliggöra pejling av signalkällan. I detta fältprov avgränsas detektionen endast till närvaron av signal, eftersom pejling antas kunna genomföras om signalen kan detekteras.

Under fältprovet utnyttjades kunskap om signalens bärfrekvens och bandbredd. Därmed behövdes inte en sökning eller filtrering av signalmiljön göras. Detta underlättar förfarandet något vid låga signal-brusförhållanden, vilket kan ses som ett "värsta fall" där motståndaren har kunskap om systemets egenskaper och användning.

Vid konstruktionen av detektorn antas att bruset är gaussiskt och additivt. Detta är i verkligheten inte fallet eftersom det finns brusklor i signalkedjan som är multiplikativa, exempelvis nedblandningen och icke-linjära operationsområden för förstärkare. Notera även att detektorn appliceras på insamlat IQ-data. Detektorn opererade alltså inte i realtid under fältprovet. Inledningsvis beräknas den närvarande energin för varje sampel, varpå en integrationstid på 1024 sampel används för att medelvärdesbilda energin samt reducera beräkningskomplexiteten. Detektorn är av typen *constant false alarm rate* (CFAR), vilket betyder att tröskeln för detektion kontinuerligt uppdateras för att hålla en konstant falsklarmssannolikhet. Detta betyder på samma sätt att brusgolvet kontinuerligt skattas, vilken tröskeln för detektion bestäms utifrån. En initial brusnivå sattes utifrån den mest signaltomma tiondelen av varje inspelning.

Detektorn består av två trösklar från två olika integrationslängder. Båda trösklarna måste överskridas för att signalen ska bedömas som en detektion. I den första jämförs varje individuellt medelvärdesbildat energifönster om 1024 sampel (en ram) mot detektionströskeln, som valts med en falsklarmssannolikhet på  $10^{-6}$ . Den andra detektorn använder en längre integrationstid om fem ramar, där falsklarmssannolikheten bestämts till  $10^{-8}$ . Den ena tröskeln kräver endast tillräckligt med energi i en ram. Den andra tröskeln är lägre, men har också lägre falsklarmssannolikhet. Detta medför att effekten måste dels vara hög nog och dels ihärdig över flera ramar.

### 4.2.3 Detektorns känslighet

En känslighetsundersökning av detektorn har utförts med syfte att kartlägga vilket signal-brusförhållande som en känd effektnivå ger upphov till i E7s mottagare. Därefter undersöktes vilket signal-brusförhållande som detektorn krävde för att få detektioner. Detta behövs eftersom beräkningarna endast ger mottagen effekt och inte avgör om signalen kan detekteras. Genom denna undersökning kan känsligheten för detektion knytas till en lägsta

effektnivå som krävs i mottagaren. Detta används sedan för att validera mätningarna mot beräkningarna. Notera att denna typ av känslighetsundersökning endast tar hänsyn till det interna bruset i mottagaren och inte externa brusällor som var närvarande under mätningarna vid fältprovet. Det kan därmed krävas mer signaleffekt vid mätning i fält än vad som fastställts med experimenten.

En signalgenerator kopplades via ett filter direkt in på antennporten på E7 med externa filter anpassade för UHF- och L-band. Signalgeneratoren genererade en 16-QAM-modulerad signal med en ungefärlig bandbredd på 1,25 MHz och 10 MHz för UHF respektive L-band. Ungefärlig syftar här på läckage från pulsformningsfiltret som skulle kunna ge en något större verklig bandbredd. Inspelningar gjordes med medeleffekter från -90 till -60 dBm i steg om 3 dB. Bandbredden i inspelningen var 2,56 respektive 12,8 MHz. Varje nivå av signalens effekt spelades in genom att starta med brus och sedan aktivera signalen. Innan inspelningen avbröts stoppades signalen för att förenkla estimeringen av signal-brusförhållandet.

#### 4.2.4 Prediktion av upptäcktsavstånd

Mätningarna från fältförsöket ger information om hur sambandskommunikation syns, men besvarar inte självständigt frågan om upptäcktsavståndet eftersom mätningarna endast utfördes från två punkter. Mätningarna som har gjorts jämförs med beräkningar av mottagarförhållanden för att validera estimerade detektionsavstånd.

Detektionsavståndet predikteras med programvaran Detvag [3], som utför beräkningar av vågutbredningen för ett givet länkstråk och använder sig av databasinformation om terrängprofil och vegetation för det specifika länkstråket. Antennhöjder och inneboende kabelförluster är andra parametrar som beaktas. Givet information om den sändande radions sändningseffekt, medräknat kabelförluster och antennvinster, beräknas utbredningsdämpningen i länkstråken till de tillämpade spaningsplatserna. Detta tillåter att signal-brusförhållandet jämförs mellan mätning och simulering med hjälp av detektorns känslighet. Skillnader kan uppstå till följd av mätosäkerheter, samt beräkningsprogramvarans egenskaper och funktion. När prediktionerna verifierats med mätningar görs storskaliga simuleringar av många länkar i området för att medelvärdesbilda inverkan från terrängen, och på så sätt göra en generalisering av upptäcktsavstånden givet detektorns uppmätta känslighet.

Ett "värsta fall"-perspektiv används för upptäcktsavstånden. Därmed har upptäcktsavståndet noterats som det längsta avstånd i varje beräknat länkstråk som uppfyller känslighetskriteriet. Detta innebär att det potentiellt finns punkter tidigare i länkstråket som inte uppfyller känslighetskriteriet och därmed gör att detektion på dessa positioner misslyckas. Exempelvis skulle detta fenomen kunna uppstå precis bakom en skarp höjd, men till följd av diffraktion är det möjligt att detektera signalen återigen en viss distans bakom höjden.

## 5 Resultat

I följande kapitel redovisas mätresultaten för kapaciteten samt detektionen av kommunikation från spaningsplatserna. Detektionsmätningarna kombineras med simuleringsunderlaget för att ge uppskattningar om ungefärligt upptäcktsavstånd.

### 5.1 Radiomönster och associering

För signalspaningsändamål gjordes två observationer vid analysen av mottagen energi över tid som gav insyn i hur radion fungerade. Den första berör mönster som kunde noteras och den andra berör förändringar av effekt över tid. Dessa förändringar var konsekventa och inte beroende av färdningsfenomen utan är en följd av radions funktion och konstruktion. Vid sändning observerades, på kort sikt, konsekventa effektnivåer hos den inkommande signalen. Förloppet inleddes med att sändaren skickade *Request to send* varpå mottagaren skickade *Clear to send* varpå nyttotrafiken skickas. Kommunikationsförloppet avslutades med *Acknowledge* från mottagaren om nyttotrafiken kommit fram korrekt, varpå processen upprepades. Den andra observationen var att den administrativa trafiken *Request to send*, *Clear to send*, och *Acknowledge*, tycktes sändas på högre uteffekt än nyttotrafiken.

Eftersom båda radioapparaterna sänder uppstår dessutom ett associeringsproblem där källan och mottagaren måste separeras för att korrekt kunna estimeras upptäcktsavstånden. Dessa måste alltså separeras för att skattningen av upptäcktsavstånden ska bli korrekt. Vid närmare granskning av förhållandena mellan den administrativa trafiken och nyttotrafiken är skillnaden i effektnivåer konstant under kortare förlopp där kanalen kan antas vara konstant (storleksordning millisekunder). Denna kan i sin tur användas för att separera den administrativa trafiken mellan sändare och mottagare. När separation och skattning av effektnivåerna, samt dess spridning, genomförts ges ett värde för vilket signal-brusförhållande som detektionen lyckades för. Detta jämförs sedan med beräkningar av utbredningsdämpningen, se avsnitt 4.2.4, och känsligheten för detektorn för att få ett ungefärligt värde på upptäcktsavståndet för den specifika terrängen och det specifika mätsystemet.

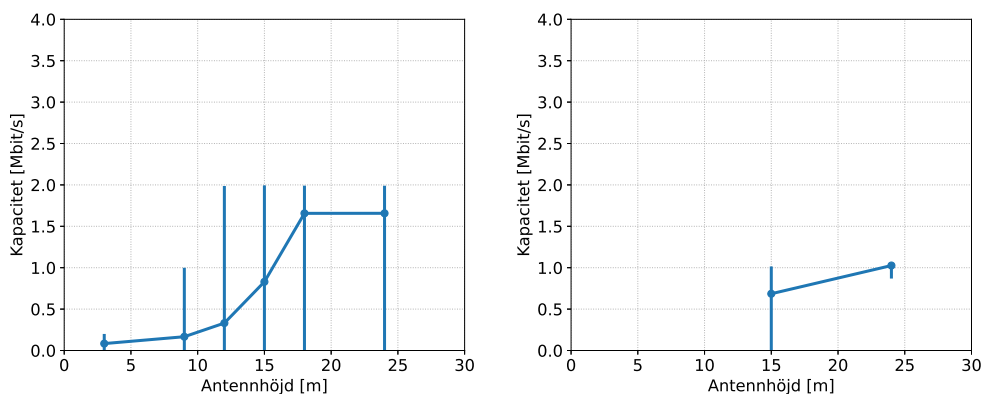
Upptäcktsavstånd betraktas ur ett "värsta fall"-perspektiv givet den använda utrustningen, det vill säga, hur långt sambandskommunikationen syns baserat på de starkaste signalerna i kommunikationsprotokollet. Eftersom effektnivåerna för den administrativa trafiken är högre än för nyttotrafiken kommer de ha det längsta upptäcktsavståndet, vilket betyder att det är dessa som bör skattas. Nyttotrafiken är dock mer informationsrik, vilket tillåter en mer precis skattning av effektvariationerna. Därmed skattas signal-brusförhållandet med nyttotrafiken, varpå en justering görs till motsvarande effekt för den administrativa trafiken. Den uppmätta effekten varierar kraftigt över längre tidsskalor (totalt sekunder), vilket ger ett stort spann för det uppmätta signal-brusförhållandet. Vid tolkning av resultatet bör det noteras att det finns mer känsliga och kompetenta system som har ännu längre upptäcktsavstånd.

### 5.2 Mätningar på UHF

Detta kapitel presenterar mätresultaten för överföringskapacitet och analysen av upptäcktsavstånd vid frekvensen 301,875 MHz i UHF-bandet, med bandbredden 1,25 MHz.

#### 5.2.1 Överföringskapacitet

I figur 5.1 visas överföringskapacitet för olika antennhöjder på UHF. För sändarplatsen S1 var antennhöjden cirka 24 meter för alla mätningar. Max- och min-värden illustreras med de vertikala linjerna. I den vänstra bilden i figur 5.1 visas resultaten för unicast. Datatakten i medel över de sex förbindelserna blev aldrig högre än 1,7 Mbit/s. Det fanns alltid någon förbindelse som inte fungerade med de testade datatakterna, vilket visas i figuren som att datatakten blev lika med noll. Det gick dock att kommunicera på en del förbindelser på lägsta antennhöjd, men då med en datatakt på ca 100–200 kbit/s. Högra bilden i figur 5.1 visar resultaten för multicast där datatakten i medel över de fyra multicastförbindelserna varierade mellan cirka 0,7 Mbit/s till 1,0 Mbit/s. Dock testades bara antennhöjderna 15 och 24 meter.



Figur 5.1: Uppmätt överföringskapacitet för unicast (till vänster) och för multicast (till höger) för UHF.

## 5.2.2 Upptäcktsavstånd

För upptäcktsavståndet består analysen av tre delar: prediktion, mätning och estimering av detektionsavståndet.

Det predikerade signal-brusförhållandet för UHF visas i tabell 5.1 för en mottagare belägen på spaningsplats P5 och P6, för olika antennerhöjder. Tabellen visar signal-brusförhållandet där lägre värde motsvarar lägre signalnivå (så länge bruseffekten är konstant) och därmed svårare att detektera, beroende på detektorns känslighet. Ju högre signal-brusförhållande, desto tydligare syns signalen i detektorn. Detta motsvarar vad som förväntas i mottagaren vid sändning från nästes- eller sändarplats. Tabellen visar att den mottagna signal-brusnivån ökar med högre antenner, både på nästen och sändarplats samt på spaningsplatserna. Spaningsplats P5 är drygt dubbelt så långt bort från nästena som P6, vilket illustreras genom genomgående lägre signal-brusnivåer för alla antennerhöjder.

Tabell 5.1: Predikerat signal-brusförhållande [dB] för frekvensen 301,875 MHz vid spaningsplats P5 och P6 för sändningar från nästen och sändarplats.

Antennhöjd	P5			P6			
	6 m	15 m	25 m	6 m	15 m	25 m	
N1	6 m	-1,59	3,32	6,21	4,67	5,19	9,34
	15 m	3,32	8,88	11,79	11,81	12,40	16,51
	26 m	10,13	15,02	17,85	17,09	17,73	21,59
N3	6 m	-11,35	-5,54	-0,15	-1,82	-0,35	4,85
	15 m	-5,25	0,60	6,02	6,07	7,58	12,81
	26 m	-1,45	4,48	9,90	11,18	12,88	18,16
N4	6 m	-20,39	-13,92	-7,42	4,82	3,40	8,88
	15 m	-9,63	-3,03	3,48	16,44	15,25	20,63
	26 m	-1,04	5,55	12,11	26,69	25,59	30,43
S1	6 m	3,11	6,94	11,45	9,62	13,52	18,44
	15 m	7,88	11,73	16,26	13,10	16,93	21,86
	26 m	11,66	15,57	20,07	17,18	20,79	25,53

Tabell 5.2 visar vilket signal-brusförhållande som uppmätts i mottagaren på spaningsplatserna under fältprovet. Signal-brusförhållandet redovisas som ett spann för att täcka variationerna av insamlad data. Vid jämförelse av beräkningarna och mätningarna syns att beräkningarna ofta har ett högre signal-brusförhållande än vad som uppmättes under fältprovet. Några av värdena är likvärdiga, men för en stor del av fallen är beräkningarna 2–10 dB större än motsvarande mätfall. Det finns några undantag där mätfallen överstiger beräkningarna, men dessa är få. Möjliga orsaker till skillnaderna mellan beräkningar och mätningar diskuteras i kapitel 6. För lägre antennerhöjderna förekommer det att inget signal-brusförhållande kunde uppmätas, eftersom signalen inte kunde detekteras. Detta har markerats med *Ingen signal* i tabellen. Ett fall där mätningen inte genomfördes är markerat med *Ingen data* i tabellen.

Det estimerade upptäcktsavståndet baserat på beräkningarna och mätningarna, för varje näste och sändarplats från spaningsplatserna visas i tabell 5.3. I tabell 5.4 redovisas detektionsspänn som motsvarar den 75:e och 25:e percentilen för upptäcktsavstånden där storskaliga simuleringar gjorts för många punkter i närområdet. För varje punkt noteras den beräknade signal-brusnivån vilket jämförs med de uppmätta och predikterade nivåerna tillsammans med detektorns känslighet. Detta görs upprepade gånger för att sammanställa en statistisk grund för detektionsspänn. Den 75:e percentilen för upptäcktsavståndet ska tolkas som avståndet där mätsystemet med 75 % sannolikhet upptäcker radiosändningarna. Den 25:e percentilen ska på motsvarande vis tolkas som avståndet där systemet detekterar sändningarna 25 % av gånger eller, motsvarande, att sändningarna går oupptäckta i 75 % av fallen. I enlighet med signal-brusförhållandet ökar upptäcktsavstånden med ökande antennerhöjder. Länken mellan nästen till P5 och P6 ges generellt för lägre antennerhöjder ett upptäcktsavstånd på 1–5 km, medan högre antennerhöjder ger 11–20 km. Om detta jämförs med spänn, som ger en normalbild över området, är dessa två länkar generellt i eller över spännets upptäcktsavstånd. Varför detta kan vara fallet diskuteras mer i kapitel 6. För spänn ges generellt för lägre antennerhöjd upptäcktsavstånd på 1–5 km, och för högre antennerhöjd 6–18 km. Spännets storlek beror på de variationer i terräng och vegetation som finns vid Härads skjutfält. Med lägre antennerhöjd menas här 6 meter eller kombinationer av 6 och 15 meter. På motsvarande sätt ska högre antennerhöjder tolkas som 25 meter eller kombinationer av 15 och 25 meter.

Tabell 5.2: Uppmätt signal-brusförhållande [dB] på spaningsplatserna P5 och P6, på frekvensen 301,875 MHz.

Antennerhöjd	P5			P6			
	6 m	15 m	25 m	6 m	15 m	25 m	
N1	6 m	Ingen signal	Ingen signal	Ingen signal	-3 ± 3	-2 ± 4	-1 ± 4
	15 m	Ingen signal	1 ± 2	1 ± 4	Ingen data	8 ± 3	9 ± 3
	26 m	5 ± 2	9 ± 2	13 ± 1	12 ± 2	18 ± 1	19 ± 1
N3	6 m	Ingen signal	-5 ± 3	-3 ± 3	Ingen signal	-3 ± 2	0 ± 3
	15 m	Ingen signal	0 ± 2	1 ± 2	-3 ± 3	0 ± 3	4 ± 3
	26 m	-4 ± 3	3 ± 2	7 ± 1	1 ± 4	8 ± 2	12 ± 2
N4	6 m	Ingen signal	Ingen signal	Ingen signal	-1 ± 3	2 ± 4	3 ± 3
	15 m	Ingen signal	-4 ± 3	-2 ± 2	10 ± 2	11 ± 2	12 ± 3
	26 m	-3 ± 3	2 ± 3	11 ± 1	17 ± 4	17 ± 2	23 ± 3
S1	6 m	-4 ± 3	-4 ± 3	2 ± 2	7 ± 3	6 ± 6	18 ± 1
	15 m	-2 ± 3	4 ± 3	7 ± 1	14 ± 3	15 ± 1	24 ± 2
	26 m	2 ± 3	7 ± 2	14 ± 2	18 ± 3	15 ± 3	28 ± 1

Tabell 5.3: Estimerat upptäcktsavstånd [km] vid frekvensen 301,875 MHz.

Antennerhöjd	P5			P6			
	6 m	15 m	25 m	6 m	15 m	25 m	
N1	6 m	3,8	4,3	10,3	5,3	5,3	9,8
	15 m	3,9	10,3	12,5	7,2	13,1	19,5
	26 m	10,3	12,4	18,8	7,2	19,5	19,5
N3	6 m	2,3	3,9	4,5	2,3	2,8	4,2
	15 m	3,2	4,5	11,2	4,1	4,2	6,3
	26 m	3,9	11,1	13,1	4,2	5,6	16,4
N4	6 m	1,1	1,6	3,4	1,7	2,1	2,9
	15 m	2,5	3,7	5,8	2,1	3,6	5,8
	26 m	3,3	5,5	11,0	12,3	17,9	19,6
S1	6 m	3,1	5,2	8,1	5,3	5,4	7,6
	15 m	4,5	11,3	17,8	5,3	7,4	12,2
	26 m	15,8	17,8	18,0	5,3	12,2	12,3

Tabell 5.4: Estimerat spann för 25:e - respektive 75:e percentilen för upptäcktsavståndet [km] från nästes- och sändarplats för frekvensen 301,875 MHz.

		Detektionsspann [km]		
		6 m	15 m	25 m
N1	6 m	1,8–2,8	2,3–4,1	2,9–6,9
	15 m	2,3–5,2	3,9–7,9	6,2–11,6
	26 m	3,0–9,7	5,9–13,2	10,9–17,8
N3	6 m	1,0–3,0	1,8–4,0	2,9–5,3
	15 m	1,6–3,3	2,7–4,8	4,3–6,8
	26 m	2,1–4,5	4,2–9,5	6,4–12,1
N4	6 m	0,8–1,8	1,4–2,6	2,3–3,8
	15 m	1,5–3,2	2,5–4,5	4,1–6,5
	26 m	2,4–6,5	4,5–10,2	9,1–15,2
S1	6 m	1,2–2,7	2,5–4,4	4,5–7,7
	15 m	1,8–4,1	4,0–7,4	7,4–13,2
	26 m	3,1–7,0	5,8–13,6	11,9–18,1

## 5.3 Mätningar på L-band

Detta kapitel presenterar mätresultaten för överföringskapacitet och analysen av upptäcktsavstånd vid frekvensen 1375 MHz i L-bandet med 10 MHz bandbredd.

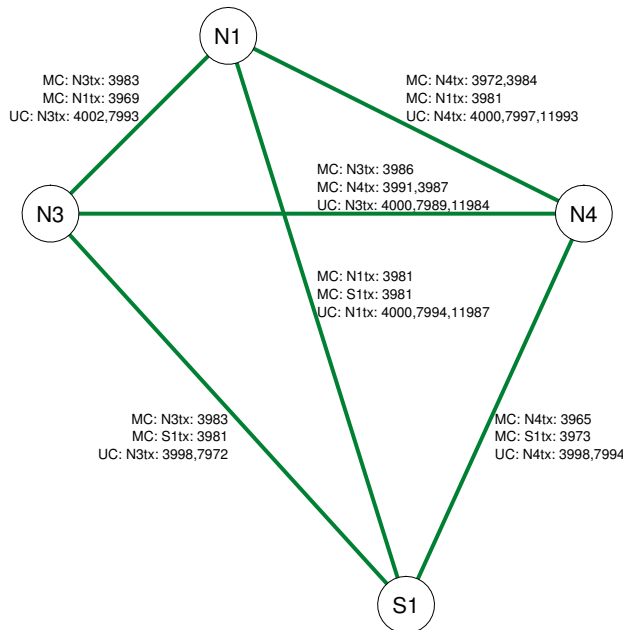
### 5.3.1 Överföringskapacitet

En mätomgång av överföringskapaciteten på L-band visas i figur 5.2. De gröna strecken motsvarar förbindelsen mellan de två sammanlänkade noderna. Texten MC/UC motsvarar om den sändande radion använde multicast (MC) eller unicast (UC). Följande text illustrerar vilken radio som var sändande, exempelvis N3tx innebär att N3 sänder. Den sista siffran motsvarar den resulterande datatakten för den länken, i kbit/s. Den sändande radions datatakt sattes manuellt via IPerf2 och de datatakt som undersöktes för unicast var 4 Mbit/s, 8 Mbit/s och 12 Mbit/s. En förbindelse ansågs vara acceptabel om högst 1 % paketförluster erhöles. Unicast (UC) förbindelserna undersöktes i bara en riktning. Till exempel visas att förbindelsen mellan N1 och N4 klarade alla tre datatakterna, men inte förbindelsen mellan N1 och N3 som inte klarade den högsta datatakten. Vid multicast (MC) sände de fyra noderna varsin gång och i det fallet provades sändardatatakten 4 Mbit/s. Vid multicast (MC) kan de mottagna datatakterna variera något mellan länkar, exempelvis blev datatakten något högre från N1 till N4 än från N1 till N3.

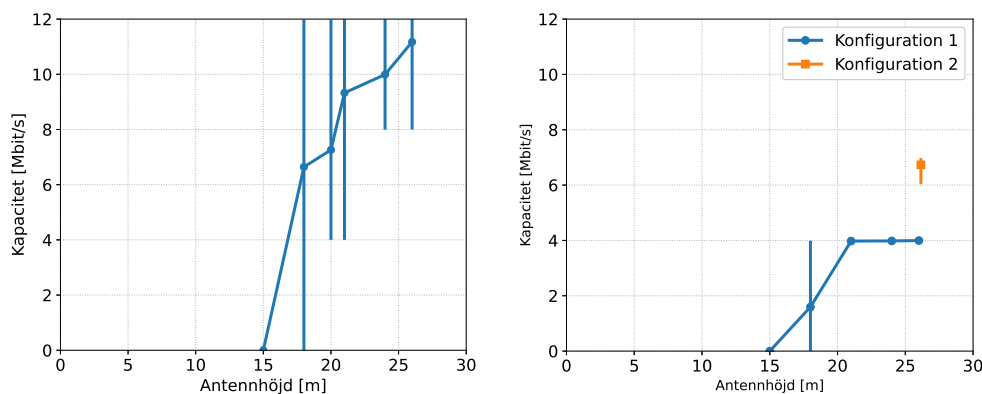
I figur 5.3 sammanfattas kapacitetsresultaten för olika antennerhöjder på L-band, där centerfrekvensen var 1375 MHz och bandbredden 10 MHz. För sändarplatsen S1 ändrades inte antennerhöjden utan var hela tiden cirka 24 meter. I vänstra bilden i figur 5.3 visas resultaten för unicast, det vill säga förbindelserna mellan alla fyra noder, vilket resulterade i sex dubbelriktade förbindelser. Resultaten är ett medelvärde för alla dessa sex förbindelser över samtliga mätningar för en given antennerhöjd, det vill säga att de inkluderar mätresultaten från alla sändardatatakt (4, 8, 12 Mbit/s). Max- och min-värden illustreras med de vertikala linjerna, exempelvis vid 18 meters antennerhöjd var den högsta datatakt som erhöles på någon av förbindelserna 12 Mbit/s, och den lägsta datatakt som erhöles 0 Mbit/s. Kommunikationen fungerade inte med en antennerhöjd lägre än 18 meter. Med 18 meters antennerhöjd blev datatakten i medel över de sex förbindelserna cirka 7 Mbit/s och med 26 meters antennerhöjd cirka 11 Mbit/s.

Högra bilden i figur 5.3 visar resultaten för multicast. Resultaten är ett medelvärde för alla fyra multicastsändningar över samtliga mätningar för en given antennerhöjd. För multicast användes två konfigurationer, Auto MCS (Konfiguration 1) eller Auto MCS Lower Bound MCS2 (Konfiguration 2), vilket innebär att radion som lägst använder MCS2. Konfiguration 2 testades bara vid den högsta antennerhöjden 26 meter. Även här krävdes en antennerhöjd på 18 meter för att erhålla en datatakt större än noll. Med konfiguration 1 och 18 meters antennerhöjd blev datatakten i medel över de fyra multicast förbindelserna cirka 1,8 Mbit/s och med 26 meters antennerhöjd 4 Mbit/s. När konfiguration 2 testades med 26 meters antennerhöjd blev

datatakten i medel över de fyra multicast förbindelserna cirka 7 Mbit/s.



Figur 5.2: Uppmätt datatakt på L-bandet för antennhöjden 24 m. Datatakterna 4, 8 och 12 Mbit/s testades för unicast samt 4 Mbit/s för multicast. För varje förbindelse visas sändande nod, multicast/unicast (MC/UC) samt mottagen datatakt (i kbit/s) under felhaltströskeln 1 %.



Figur 5.3: Uppmätt överföringskapacitet för unicast (till vänster) och för multicast (till höger) för L-band.

### 5.3.2 Upptäcktsavstånd

För L-band med frekvensen 1375 MHz visas det predikterade signal-brusförhållandet i tabell 5.6. Den högre frekvensen på L-band innebär att utbredningsavståndet inte är lika stort som för UHF, vilket ses av de lägre signalnivåerna i tabellen, framförallt för N3 och N4 sett från P5. Notera även att antennhöjder på samtliga platser är högre än för UHF, med 15, 21 respektive 25 meter. Dessa beräkningar bidrar till underlaget för att avgöra ungefärliga upptäcktsavstånd.

I tabell 5.5 redovisas det uppmätta signal-brusförhållandet på spaningsplatser vid frekvensen 1375 MHz. Detta jämförs med det beräknade signal-brusförhållandet i tabell 5.6 i avsnitt 4.2.4. Vid jämförelse av signal-brusförhållandet mellan beräkningarna och mätningarna noteras att för vissa länkar och antennhöjder är beräkningarna ett antal decibel högre, medan i andra fall är mätningarna högre. Här finns därmed en större variation jämfört med resultaten för UHF. Ett exempel på när mätningarna visar ett högre signal-brusförhållande är länken mellan N3 och P5, där beräkningarna ger ett väldigt lågt värde på mellan -19 och -13 dB. Trots detta

Tabell 5.5: Uppmätt signal-brusförhållande [dB] på spaningsplatserna P5 och P6, på frekvensen 1375 MHz.

Antennhöjd	P5			P6		
	15 m	21 m	25 m	15 m	21 m	25 m
N1	15 m	Ingen signal	Ingen signal	Ingen signal	Ingen signal	Ingen signal
	21 m	-5 ± 2	0 ± 3	1 ± 3	-3 ± 2	-4 ± 2
	26 m	3 ± 1	10 ± 2	16 ± 1	6 ± 3	13 ± 1
N3	15 m	Ingen signal	-3 ± 2	-2 ± 1	Ingen signal	Ingen signal
	21 m	-6 ± 2	1 ± 1	-3 ± 2	-4 ± 2	1 ± 1
	26 m	-6 ± 2	3 ± 2	-1 ± 2	1 ± 2	7 ± 1
N4	15 m	Ingen signal	Ingen signal	Ingen signal	-5 ± 2	-4 ± 2
	21 m	Ingen signal	-2 ± 2	2 ± 2	8 ± 1	14 ± 2
	26 m	Ingen signal	1 ± 2	4 ± 1	9 ± 1	17 ± 1
S1	15 m	-3 ± 3	4 ± 2	11 ± 1	6 ± 3	10 ± 3
	21 m	-2 ± 3	7 ± 1	12 ± 1	7 ± 4	12 ± 2
	26 m	3 ± 2	10 ± 2	16 ± 1	12 ± 3	13 ± 3

Tabell 5.6: Predikerat signal-brusförhållande [dB] för frekvensen 1375 MHz vid spaningsplats P5 och P6 för sändningar från nästen och sändarplats.

Antennhöjd	P5			P6			
	15 m	21 m	25 m	15 m	21 m	25 m	
N1	15 m	-2,14	-0,69	-0,17	-1,03	4,10	9,96
	21 m	0,47	1,96	2,63	-2,12	5,28	10,65
	26 m	1,21	2,77	3,65	-1,78	7,41	12,15
N3	15 m	-20,93	-18,58	-16,39	-16,41	-9,68	-6,62
	21 m	-19,01	-16,65	-14,40	-10,53	-3,71	-0,53
	26 m	-18,09	-15,67	-13,35	-4,62	2,32	5,58
N4	15 m	-19,69	-16,90	-15,84	4,82	9,64	9,63
	21 m	-11,47	-8,65	-7,57	14,55	18,95	19,75
	26 m	-9,64	-6,80	-5,65	15,96	19,75	19,71
S1	15 m	1,92	3,67	4,72	6,42	11,88	11,35
	21 m	5,04	6,84	7,92	6,30	10,06	10,28
	26 m	4,39	5,99	6,83	8,65	13,37	13,67

detekteras signalen med ett betydligt högre signal-brusförhållande. Generellt överstiger mätningarna de predikerade signal-brusnivåerna vid höga antennhöjder, men det finns undantag. Likt tidigare ökar signal-brusförhållandet med ökande antennhöjder.

Sist presenteras upptäcktsavstånden i tabell 5.7 som det estimerade detektionsavståndet i de specifika länkarna mellan nästen, sändarplats och spaningsplats P5 respektive P6. I enlighet med tidigare resultat syns trenden att högre antennhöjder ger större detektionsavstånd, men det finns en viss plåtå-effekt, där ytterligare ökning i antennhöjd ger liten eller ingen ökning i detektionsavstånd. Anledningar till varför detta uppstår diskuteras vidare i kapitel 6. Ur tabellen går det att urskilja att länken mellan N1 och P6 har fördelaktiga utbredningsförhållanden vilket ger betydligt längre upptäcktsavstånd än någon av de andra länkarna. Bortser vi från denna länk är upptäcktsavstånden relativt korta för de specifika länkarna till P5 och P6, där de varierar mellan 1–6 km, där endast ett fåtal är högre. I tabell 5.8 redovisas det generaliserade intervallet för detektionsavstånden som är baserat på statistisk från simulerade länkar i flera riktningar från respektive nästes- och sändarplats. Spannet ger för lägre antennhöjder generellt ett upptäcktsavstånd på 1–4 km, och 3–6 km för högre antennhöjder. Notera återigen att detta är percentiler, vilket innebär att detektioner kan göras utanför dessa intervall. Även för denna frekvens är de specifika länkarna till P5 och P6 generellt i eller ibland över spannet för upptäcktsavstånd.

Tabell 5.7: Estimerat upptäcktsavstånd [km] vid frekvensen 1375 MHz.

Antennhöjd	P5			P6			
	15 m	21 m	25 m	15 m	21 m	25 m	
N1	15 m	3,8	5,4	6,6	5,3	13,1	13,1
	21 m	3,8	6,5	12,4	13,1	13,1	13,2
	26 m	4,3	12,4	12,4	13,1	13,2	19,5
N3	15 m	2,3	2,3	2,4	1,1	2,8	2,9
	21 m	2,3	4,0	4,0	2,7	2,8	3,6
	26 m	2,3	4,0	4,0	2,8	4,2	4,2
N4	15 m	1,6	1,6	1,7	2,1	2,7	3,6
	21 m	1,6	3,4	3,8	2,6	5,4	5,5
	26 m	3,2	3,7	3,8	2,6	5,4	5,8
S1	15 m	5,0	5,3	5,6	5,3	5,4	5,4
	21 m	5,1	5,6	5,6	5,3	5,4	5,5
	26 m	8,1	8,0	11,3	5,3	5,4	5,5

Tabell 5.8: Estimerat spann för 25:e - respektive 75:e percentilen för upptäcktsavståndet [km] från nästes- och sändarplats för frekvensen 1375 MHz.

Antennhöjd	Detektionsspann [km]			
	15 m	21 m	25 m	
N1	15 m	1,8–2,9	2,2–4,1	2,6–4,5
	21 m	2,2–3,5	2,7–5,2	3,4–7,5
	26 m	2,6–4,5	3,9–6,3	4,6–11,2
N3	15 m	1,0–2,3	1,3–3,2	1,6–3,4
	21 m	1,1–3,0	1,6–3,4	2,1–4,4
	26 m	1,6–3,2	2,5–4,5	3,0–4,9
N4	15 m	0,7–1,9	1,4–2,8	1,7–3,0
	21 m	1,3–3,0	2,3–3,9	2,6–4,8
	26 m	1,8–3,4	2,7–5,4	3,0–5,7
S1	15 m	1,4–2,7	2,4–4,7	3,2–5,4
	21 m	1,6–3,7	3,1–6,4	4,2–9,5
	26 m	1,8–4,5	4,1–9,4	5,1–14,7



## 6 Diskussion

Syftet med detta avsnitt är att diskutera resultaten för överföringskapacitet och upptäcktsavstånd för att dra slutsatser ifrån den genomförda studien.

Vid analys av kommunikationsprestanda bör det noteras att resultaten gäller för fallet när endast en antennutgång per radio var aktiv. Radiosystemet Silvus StreamCaster har stöd för MIMO, vilket kan innebära en ökad prestanda. MIMO-tekniker som kan utnyttjas är spatial multiplexering, rum-tid-kodning och lobformning. Med fyra antenner och 2 W per antennutgång fås en 6 dB effektvinst jämfört med systemet som utvärderades, och dessutom erhålls cirka 6 dB antennvinst på sändar- och mottagarsidan om lobformning används, det vill säga totalt en vinst på 18 dB. Denna förbättring av länkbudgeten kan användas till att öka modulation och kodningsschemat (MCS) och därmed dataakten. Med fyra antenner fås ett 4x4 MIMO-system som vid användande av spatial multiplexering idealt ökar dataakten fyra gånger (då 4-antennsystem används både på sändar- och mottagarsidan), men i praktiken blir dataaktvinsten normalt lägre. Dessutom kan diversitet förbättras med rum-tid-kodning vilket gör överföringen mer robust och möjliggör användande av ett högre MCS vilket ger högre dataakt. MIMO-systemet kan också användas för att undertrycka en störsignal, men det kan påverka mottagarens antennvinst i riktning mot sändaren. Vilken av MIMO-teknikerna som är bäst att använda är beroende på radiokanalens egenskaper, men ett flexibelt system kan växla mellan teknikerna och använda den teknik som är mest gynnsam för den givna kanalen.

Även användandet av riktantenner kan påverka den möjliga överföringsprestandan och även minska risken för upptäckt, så länge signalspaning sker utanför antennens huvudriktning. Riktantenner på sändare och mottagare kan ge effektvinster på exempelvis 5 dB per position, för totalt 10 dB per länk om exempelvis stackade dipoler används. Däremot sker kommunikationen i flera olika riktningar i nästena som kan vara tidskrävande att manuellt rikta in med riktantenner. Därför bör nästenas antenner till stor del vara rundstrålande. Ur ett signalspaningssynpunkt är sändningar via riktantenner svårare att se. Spaningsplatserna bör vara i eller nära antennernas huvudriktning för att detektera trafiken. Utan kunskap om hur antennerna är riktade är det en svår uppgift att välja signalspaningsplatser.

En annan aspekt som påverkar prestanda är systemets tillgängliga bandbredd. Om en större bandbredd används kan dataakten höjas så länge radion inte använder den lägsta MCS-nivån. Radion kan använda en bandbredd upp till 20 MHz, vilket möjliggör högre dataakt på L-band och framförallt på UHF. Givet samma system, det vill säga samma bandbredd, hårdvara, vågform, sändareffekt, antennvinst, antennhöjd och så vidare bör minst samma dataakt kunna användas på UHF som på L-band. Detta på grund av att utbredningsdämpningen mellan noderna inte blir högre, utan snarare lägre, på UHF än på L-band. Det innebär att kommunikationsresultaten på L-band ger en indikation på ungefärliga dataakter som också kan fås på UHF om bandbredden 10 MHz används.

För analys av upptäcktsavstånd kan det observeras att vid jämförelse av de simulerade och uppmätta signal-brusförhållandena för UHF resulterar beräkningarna generellt i ett högre värde, 2-10 dB, än vad som uppmätts. Detta kan delvis förklaras av att det externa bruset inte har tagits i hänsyn vid simuleringarna, vilket gör att brusgolvet i mätningarna kommer vara högre som i sin tur ger ett lägre signal-brusförhållande. För L-band var inte trenden lika tydlig. Här fanns det stora variationer i om beräkningarna eller mätningarna gav högst signal-brusförhållande. Exempelvis var en specifik länk betydligt mer gynnsam under mätningar än vad beräkningarna predikerade. Det kan noteras att det externa bruset på denna frekvens borde ha mindre påverkan på resultatet i jämförelse med UHF. Mätningarna gav dessutom ofta högre estimat för högre antennhöjder.

Det finns två aspekter som troligen kan förklara delar av de noterande effekterna. För det första kan resultatet förklaras av att terrängdatabasen som nyttjas av beräkningsprogrammet inte överensstämmer med den faktiska terrängen på skjutfältet på grund av avverkningar som har skett sedan den senaste uppdateringen av terrängdatabasen. Därmed kan vissa länkar bli betydligt mer gynnsamma, eftersom dämpningen blir lägre och frisksiktlinje ges vid lägre höjder. Inga ingående analyser av specifika länkstråk har gjorts för att verifiera om detta är fallet för länkarna mellan N1 och spaningsplatserna. För det andra kan skillnaderna bero på hur Detvag fungerar. Detvag beräknar 2D-gränssnitt i länkens riktning. Därmed försvinner effekter såsom flervägsutbredning och reflektioner som gör att signalen studsar "bakåt" i

propageringsriktningen. Därmed kan utbredningsförhållandena utvärderas som betydligt sämre än vad de faktiskt är i verkligheten. Därmed finns det stora variationer i huruvida beräkningarna överensstämmer med mätningarna. Detta är viktigt att ha i åtanke då slutsatser tas från de generaliserande simuleringarna som har gjorts för att försöka ge en normalbild för upptäcktsavstånden i området vid Härads skjutfält.

För UHF ger generaliserande simuleringar ett upptäcktsavstånd på ca 1–5 km för lägre antennhöjder, medan högre antennhöjder ger 6–18 km, baserat på 25:e respektive 75:e percentilen. För L-band ger generaliserande simuleringar ett upptäcktsavstånd på 1–4 km för lägre antennhöjder och 3–6 km för högre antennhöjder, generellt kortare än för UHF. Detta är väntat på grund av den högre absorptionen från vegetationen för högre frekvenser. Det är värt att notera spridningen i spannet för generaliseringen av upptäcktsavstånden. Terrängen och vegetationen har stor påverkan på avstånden. Valet av positioner för nästen och sändarplats kan ha stor påverkan på sannolikheten att upptäckas. I denna studie var nästena medvetet placerade på platser för att få bra sambandslänkar, men detta leder också till ökad risk att bli uppräckt. Det är värt att notera att de specifika länkarna till spaningsplatserna generellt var i, eller över spannet för den 25:e och 75:e percentilen. Detta kan bero på att dessa mätplatser är handvalda och därmed är bättre än slumpmässigt valda positioner. Handvalda och logistiskt lämpliga platser för signalspaning kan därmed resultera i upptäcktsavstånd längre än det angivna intervallet.

Metodiken för generaliseringen av detektionsavstånden kan ifrågasättas. Simuleringar gjordes i ett antal godtyckliga riktningar från nästena. Detta betyder att underlaget för detektionsspannet inte utgörs av strategiskt valda positioner, utan några av platserna kan vara dåliga för spaning. På samma sätt finns det en chans att höga platser med bra utbredningsförhållanden väljs. Dessa kan istället vara opraktiska att signalspana ifrån, exempelvis av logistiska skäl. Därmed valdes den 25:e och 75:e percentilerna för att ge ett intervall som kan generalisera detektionsavståndet. För en annan typ av terräng eller plats är det viktigt att ha detta i åtanke, eftersom det kan både förbättra eller försämra risken att bli upptäckt av en fiende.

Även det använda signalspaningssystemet kan också ha påverkan på upptäcktsavståndet. Algoritmval, hårdvaruanpassningar, antenner, eller möjligheten till drönarburna system är bara några av de faktorer som kan ha påverkan. Se därför de uppskattade detektionsavstånden som en fingervisning för detta specifika mätsystem i denna specifika terräng och inte som en generell tumregel för samtliga system i alla olika terrängtyper.

## 7 Slutsatser

Ett försök på Härads skjutfält utfördes i juni 2025. Syftet var att undersöka trådlöst samband och upptäcktsavstånd med radiosystemet Silvus StreamCaster mellan tre nästen och en sändarplats på en distribuerad brigadledningsplats.

Sambandsförsöken visade att på L-band med 10 MHz bandbredd behövdes en antenn på minst 18 meter för att samtliga platser skulle kunna ha kontakt. Om antennen höjdes till 24 meter hade alla unicast-förbindelser en datatakt på minst 8 Mbit/s och med 21 meter eller högre antennhöjd hade alla multicast-förbindelserna en datatakt på 4 Mbit/s. Med dessa datatakt erhölls högst 1 % paketförluster. Om radion ska fungera tillfredsställande på L-band behövs en hög antenn. Om MIMO-funktionaliteten hos radion dessutom utnyttjas borde datatakterna kunna höjas ytterligare, men detta undersöktes inte under försöket. På UHF fick endast 1,25 MHz bandbredd användas under försöken vilket inte gjorde det möjligt att erhålla datatakt över 2 Mbit/s oavsett antennhöjd.

Beroende på vilket ledningsstödssystem som används är kraven på bandbredd olika. De uppmätta datatakterna på drygt 4–8 Mbit/s för L-band bör vara tillräckligt för att driva de flesta applikationerna. RL39 kan därmed fungera ett komplement till fiberkabel för kommunikation mellan nästen och sändarplats på en brigadstabsplats.

Ur ett signalspaningsperspektiv finns det stora variationer, åt båda håll, mellan beräkningar av predikterade signal-brusnivåer och mätningarna som har gjorts i området. Därav är det viktigt att se följande slutsatser kring den 25:e och 75:e percentilen för upptäcktsavstånd som fingervisningar. För UHF uppskattas generellt detektionsintervallet till 1–5 km för lägre antennhöjder, och för högre antennhöjder till 6–18 km. För L-bandet gavs kortare detektionsavstånd, med intervallen 1–4 km och 3–6 km för lägre respektive högre antennhöjder. Notera att det finns avvikande värden inom den angivna percentilen som ger betydligt längre detektionsavstånd. Sammanfattningsvis ger högre antennhöjder också längre detektionsavstånd. Terrängen och vegetationen påverkar också upptäcktsavstånden. Valet av näste- och sändarplatser påverkar risken för att upptäckas. I detta försök var nästena medvetet placerade på platser för att få bra sambandslänkar, men detta leder också till ökad risk för uppräckt.



## Referenser

- [1] P. Andersson, "Instruktionsbok RL 39 SYSOP," Försvarets Materielverk, Instruktionsbok 17FMV1487-57:1, 2020-06-15.
- [2] D. Thyni, "Dimensionerande scenario brigadledningskompani 25," Försvarmakten, Markstridsskolan, Rapport FM2024-659:4, 2024.
- [3] P. D. Holm, G. Eriksson och B. Asp, "Detvag-90. final report," Totalförsvarets Forskningsinstitut, Teknisk Rapport FOA-R-97-00566-504, 1998-02-05.



FOI  
Totalförsvarets forskningsinstitut  
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00  
Fax: 08-55 50 31 00

[www.foi.se](http://www.foi.se)