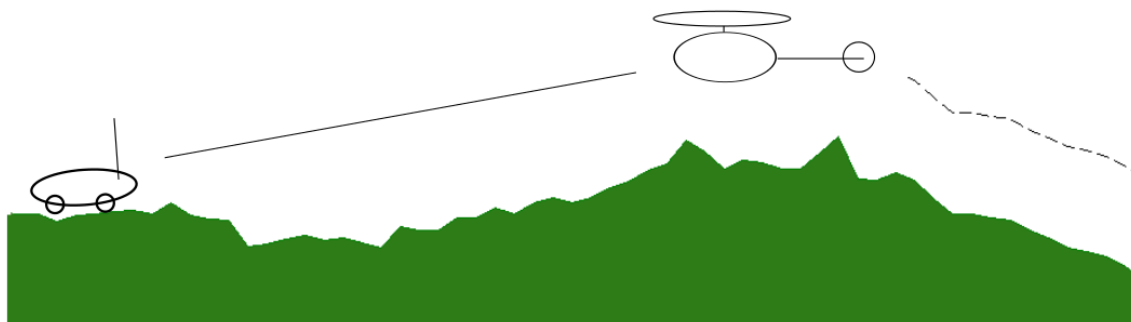


Luftburna kommunikations- noder i marknät

Analys av helikopterscenario

SARA ÖRN TENGSTRAND



Sara Örn Tengstrand

Luftburna kommunikationsnoder i marknät

Analys av helikopterscenario

Titel	Luftburna kommunikationsnoder i marknät Ana- lys av helikopterscenario
Title	Airborne communication nodes in ground networks Analysis of helicopter scenario
Rapportnr / Report No.	FOI-R--3820--SE
Månad / Month	September / September
Utgivningsår / Year	2013
Antal sidor / Pages	41
ISSN	1650-1942
Kund / Customer	FM
FoT område	Ledning och MSI
Projektnr / Project No.	E36046
Godkänd av / Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Informations- och aerosystem

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

Helikoptrar har idag i vissa fall dålig kommunikation med basen och närbelägna markförband när de lämnat basen. Det leder bland annat till att helikoptern väljer att inte flyga nära egna markförband, av risk för vådabeskjutning. Man kan inte heller få uppdaterad lägesinformation, eller överföra information innan man landat. Önskvärt vore att kunna upprätta radiokommunikation med förband på marken innan man har visuell kontakt. I denna rapport har vi beräknat räckvidder mellan en helikopter och noder på marken. Marknoderna är enheter som använder en modern taktisk radio. Radiosystemet använder frekvensen 50 MHz eller 300 MHz, och har för dessa frekvenser bandbredden 25 kHz respektive 1 MHz och uteffekten 50 W respektive 44 W. Vi diskuterar även krav på anslutningstider mellan helikopters radio och noderna på marken.

Beräkningarna visar att räckvidden är terrängberoende för alla kombinationer av flyg- och antennhöjder. På låga flyghöjder blir räckvidden kort för frekvensen 300 MHz. Exempelvis fås räckvidder mellan 1,25 och 10 km för en flyghöjd på 20 m även om marknoden har en mast på 25 m. Med 1000 m flyghöjd blir räckvidden betydligt större, 7-55 km för 3 m antennhöjd för marknoden och 9-103 km för 25 m mast. Med 64 noder på marken, där helikoptern kan välja att kommunicera med den som är bäst, fås upp till fördubblad räckvidd jämfört med att ha en enda marknod med 3 m mast. Det är dock bättre med en 25 m hög mast än med 64 noder med 3 m höga antenner. På frekvensen 50 MHz blir räckvidderna längre. Med 20 m flyghöjd och 25 m antenn fås en räckvidd på 4-32 km, och på 1000 m höjd med tremetersantennen 24-117 km.

Om länken ska användas för att identifiera helikoptern behöver länken hinna kopplas upp och informationen överförs innan helikoptern upptäcks av förbandet på marken. I detta fall blir räckvidderna i de flesta fallen bara tillräckligt långa om helikoptern flyger på den högsta studerade flyghöjden, 1000 m.

Nyckelord: ad hoc-nät, helikopter, räckvidd

Abstract

Today, helicopters may be without communication with the base and close ground units after leaving the base. This may cause the helicopter to avoid flying close to own units, due to the risk of friendly fire. It also makes it hard to get updated information, and to send back information before landing. It is desirable to have radio communication before the helicopter is in visual range. We have calculated ranges of communication between the helicopter and nodes on the ground. The ground nodes in our case are units using a modern tactical radio. The radio system uses the frequency 50 MHz or 300 MHz, and for these frequencies has a bandwidth of 25 kHz or 1 MHz, respectively, and a transmit power of 50 W or 44 W. We also discuss demands put on the time it takes to establish a link.

The calculations show that the range varies depending on the terrain, for all combinations of flight and antenna heights. At lower flight heights, the range is short. At a flight height of 20 m, the range is between 1,25 and 10 km, even if a 25 m mast is used. At 1000 m flight height, the range is larger, 7-55 km at 3 m antenna height and 9-103 km with a 25 m mast. If 64 ground nodes are used, and the helicopter may connect to the best one, the range is up to doubled. However, it is not as good as using one 25 m mast. At the frequency 50 MHz, range is larger. At 20 m flight height and a 25 m mast, the range is 4-32 km, and at 1000 m with a three meter antenna 24-117 km.

If the link is used by the helicopter to identify itself to the ground nodes, the link needs to be established and the information sent before the helicopter is seen. In this case, the range is in most cases only long enough when using the highest studied flight height, 1000 m.

Keywords: ad hoc networks, helicopter, communication range

Innehållsförteckning

1	Introduktion	7
2	Scenario	9
2.1	Taktiskt beteende för flygning under insats	9
2.2	Överflygnings/anflygnings-scenario	9
2.2.1	Frågeställningar	10
2.2.2	Specifika kommunikationsbehov för scenariot	11
2.3	Studerade fall	11
3	Beräkningar	13
3.1	Länkbudget	13
3.2	Terrängval och nodplacering	14
3.3	Definitioner	16
3.3.1	Radioförbindelse	16
3.3.2	Räckvidd	16
4	Resultat av räckviddsberäkningar	19
4.1	En marknod	19
4.2	Flera marknoder	23
4.3	Flygkorridorer	24
5	Diskussion	27
6	Fortsatt arbete	29
7	Sammanfattning	31
A	Grafer över sannolikhet att ha länk	33
	Referenser	41

FOI-R--3820--SE

1 Introduktion

Den här rapporten beskriver ett delmoment som utförts i projektet *Luftburna noder i marknät, Lunar*. Projektets syfte är att utvärdera metoder för effektiv kommunikation i ett taktiskt kommunikationsnät med mobila marknoder och upphöjda noder. Den här delen av projektet studerar kommunikation mellan helikoptrar och markförband. Helikoptrar har idag i vissa fall dålig kommunikation med basen och markförband i närheten, när de lämnat basen. Det leder bland annat till att piloten väljer att inte flyga nära egna markförband, av risk för vådabeskjutning. Eftersom fungerande kommunikationslösning till stor del saknas kan man inte heller få uppdaterad lägesinformation, eller överföra information innan man landat. Önskvärt vore därför att kunna upprätta radiokommunikation med förband på marken redan under flygning, gärna innan man får visuell kontakt.

Det finns flera tekniska utmaningar med att ansluta en högmobil nod som en helikopter till ett taktiskt marknät. Vi har här fokuserat på att beräkna räckvidder och krav på anslutningstider mellan en helikopter och noder på marken. Andra viktiga frågor, som inte studerats här, är till exempel hur den upphöjda noden påverkar förbundenheten i nätet, och hur kapaciteten påverkas.

Vi har studerat tre olika fall inom ramen för ett scenario där helikoptrar ska ge understöd till en snabbinsatsstyrka vid internationell insats. I det första fallet flyger helikoptern rakt in mot en enda nod på marken. Noden har då en mast som kan vara upp till 40 m hög. I det andra fallet flyger helikoptern in mot en grupp av stillastående fordon, som alla har tre meter höga antenner. I det tredje fallet passerar helikoptern noderna på marken på ett visst avstånd och flyger sedan vidare. Marknoderna i det här fallet är enheter som använder en modern taktisk radio. Det som utvärderas är i samtliga fall vilken räckvidd kommunikationen mellan helikoptern och noderna på marken har. Detta görs genom beräkningar av länkdämpningen mellan noder på olika höjd och i olika typer av terräng. Ur länkdämpningen beräknas sedan räckvidder via länkbudgeten. Vi diskuterar även vilka krav som ställs på radions anslutningstid till nätet, för att kommunikationen ska vara användbar.

FOI-R--3820--SE

2 Scenario

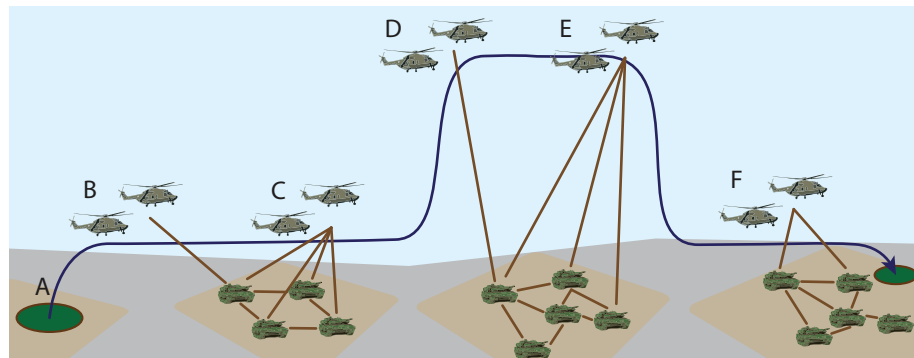
Inom projektet har ett antal scenarion tagits fram, för att kunna inrikta arbetet mot relevanta frågeställningar. Det scenario som vi utgått från i denna studie handlar om en helikopterenhet som ska ge understöd till en snabbinsatsstyrka vid internationell insats. Scenariot finns beskrivet i mer detalj i [1]. Arbetet med att ta fram kommunikations-scenarier, där helikoptrar med kommunikationsutrustning agerar som upphöjd nod, har skett i samarbete med Helikopterflottiljen i Malmslätt, Linköping. I denna studie har vi valt ut tre delar med anknytning till scenariot.

2.1 Taktiskt beteende för flygning under insats

Helikopterns hastighet är ganska konstant, mellan 120 och 140 knop (220 - 260 km/h). Flygkorridorer kan upprättas för att flyga över ett markförband och dessa planeras före insatsen där bataljonschefen sprider informationen till berörda inom förbandet. Korridoreernas placeringar är fasta och gäller över en längre tid. Flygkorridoren är typiskt 3 kilometer bred. Man flyger ofta så lågt som möjligt, på 5 till 20 meters höjd och försöker utnyttja terrängen för att inte bli upptäckt. Därför väljs ofta dalgångar före höjder vid flygning i kuperad terräng. Vid flygning på högre höjd över okänd terräng så undviker man normalt att flyga under 1000 meter för att undvika beskjutning. Det horisontella avståndet till ett känt hot måste vara minst 1000 meter. Flygräckvidden, det vill säga avstånd mellan helikoter och bas, kan vara upp till 300 kilometer. För att utöka flygräckvidden för helikoptrar upprättas tillfälliga ledningsplatser, FARP (Forward Arming and Refueling Point), på egenkontrollerat område. En FARP är grupperad med fordon och skyddas av egen markpersonal.

2.2 Överflygnings/anflygnings-scenario

Syftet med den här studien är att undersöka om helikoptrar kan kommunicera med mobila markenheters radionät vid överflygning och landning. De viktigaste kommunikationsbehoven är i dessa fall tal och lägesinformation. Detta är intressant eftersom man idag ofta flyger runt egna markenheter för att undvika vådabeskjutning. Scenariot innebär att två helikoptrar lyfter från en bas eller FARP för transport till ett mobilt markförband 300 kilometer från startplatsen. På vägen dit flyger de rakt över två andra mobila förband, det första på låg höjd, 5-20 meter över marken, det andra på 1000 meters höjd. Inför landning går helikoptern ner på låg höjd ett par kilometer före landningsområdet och gör en rak inflygning för att inte röja förbandets position, se figur 2.1.



Figur 2.1: Överflygning och anflygning med helikopter.

2.2.1 Frågeställningar

Ur kommunikationssynpunkt innehåller scenariot sex intressanta tidpunkter:

- A** Helikoptrarna lämnar huvudbas/FARP.
- B** Helikoptrarna närmar sig ett markförband på låg höjd.
- C** Helikoptrarna flyger över ett markförband på låg höjd.
- D** Helikoptrarna närmar sig ett markförband på hög höjd.
- E** Helikoptrarna flyger över ett markförband på hög höjd.
- F** Helikoptrarna närmar sig målet och landar.

Vi antar här att varje helikopter är utrustad med en radio av samma typ som markförbanden och kan ansluta direkt till markförbandens radionät. I punkt A och F är räckvidd över långa avstånd intressant att analysera. Vilken räckvidd är rimlig att uppnå mellan helikopter och markförband/bas (med och utan mast)? De räckvidder vi beräknar presenteras i kapitel 4. I punkt B, D och F är den viktigaste frågeställningen vilken anslutningstid som krävs för att helikopters radio ska hinna komma in i markförbandets nät och uppdatera lägesbilden innan risk för vådabeskjutning uppstår. Här är terrängen samt helikopters flyghöjd och hastighet viktiga parametrar att ta hänsyn till. Kraven på anslutningstid diskuterar vi i kapitel 5. Vid överflygning i punkt C och E är kommunikationsförmågan hos helikopter och markfordon intressant att utvärdera med avseende på hur nätet kan hantera en snabb nod, och hur kapaciteten påverkas. Detta studeras dock inte i denna rapport.

2.2.2 Specifika kommunikationsbehov för scenariot

Det finns ett antal informationsöverföringsbehov är särskilt intressanta ur kommunikationssynpunkt:

- A** Uppföljning av färdväg.
- B** Oförutsedda händelser som leder till att planen inte kan följas behöver kommuniceras mellan berörda parter.
- C** Information om krav på ny färdväg behöver skickas till helikoptern.
- D** Lägesinformation till de som transporteras kan vara önskvärt
- E** Chef för transporterat förband kan ha behov av data från ledningssystem under transporten.
- F** Basen behöver kontaktas när uppgiften är löst och man åker tillbaka igen.

Uppföljningen av färdväg, punkt A, är central för säkerheten under uppdraget; helikoptern behöver rapportera till bas eller mål när vissa punkter på vägen har passerats. Lägesinformation till de som transporteras, punkt D, kan vara önskvärt. Det är dock inte säkert att miljön under flygning för passagerare medger utrustning med grafiskt användargränssnitt.

2.3 Studerade fall

Inom ramen för scenariot har vi valt ut tre fall att studera. I det första fallet flyger helikoptern rakt in mot ett förband, där den kan kommunicera med en nod. Den noden har då en mast som kan vara upp till 40 m hög. I det andra fallet flyger helikoptern in mot, och har möjlighet att kommunicera med, en grupp av stillastående fordon. Fordonen har alla tre meter höga antenner. I det tredje fallet passerar helikoptern noderna på marken på ett visst avstånd och flyger sedan vidare. I detta fall kan det finnas en eller flera noder på marken. I samtliga tre fall studerar vi räckvidden för radioförbindelsen mellan helikoptern och noderna på marken.

FOI-R--3820--SE

3 Beräkningar

Analysen i det här arbetet grundar sig på möjliga räckvidder och anslutningstider mellan radio i helikopter och på marken. För att få fram dessa har vi beräknat länkdämpningen mellan helikopter och marknader för de tre fallen beskrivna i kapitel 2.3. När länkdämpningen har beräknats har länkbudgeten använts för att avgöra vilken räckvidd kommunikationen har.

3.1 Länkbudget

För att avgöra om två noder har kontakt används länkdämpningen. Noderna har ansetts ha kontakt om länkdämpningen inte överskrider ett tröskelvärde. Det tröskelvärdet ges av länkbudgeten, och beror bland annat på uteffekt och mottagarens känslighet. Mottagen effekt P_r beräknas som

$$P_r = P_t G_t G_r / L_b$$

där P_t är sändareffekt, L_b är länkdämpningen, och G_t och G_r är antennvinster för sändare respektive mottagare. Länkdämpningen beräknas i detta fall med vågutbredningsprogrammet DETVAG-90 [2]. Vi har använt metoden *Geometric Theory of Diffraction* (GTD), som approximerar terrängprofilen med ett antal kilar. Detta innebär att metoden räknar med storskalig fädning, men att småskalig fädning inte ingår. För att ha kontakt ska den mottagna effekten vara större än mottagarens känslighet S . Detta ger ett krav på maximal tillåten länkdämpning för att ha radioförbindelse. Räknat i dB blir detta krav

$$L_b \leq P_t + G_t + G_r - S$$

Beräkningarna har gjorts för ett radiosystem som använder 300 MHz, samt för jämförelsens skull även för ett system på 50 MHz. Tabell 3.1 ger parametrar som använts för de båda radiosystemen.

Uteffekt sändare	50 W	44 W
Antennvinst	0 dB	0 dB
Frekvens	50 MHz	300 MHz
Bandbredd	25 kHz	1 MHz
Mottagarens interna brus	-204 dBW/Hz	-204 dBW/Hz

Tabell 3.1: Parametrar för radiosystemen

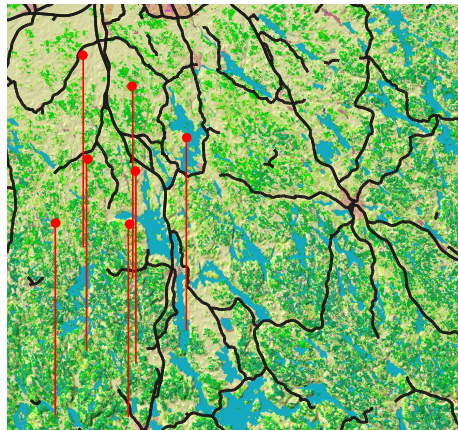
	En nod	Flera noder
Antennhöjder för marknoder	3, 10, 25 och 40 m	3 m
Antal marknoder	1	1, 16 och 64
Antal beräkningar per fall	350	200
Helikopterns hastighet	60 m/s (ca 116 knop)	
Helikopterns flyghöjd	5, 20 och 1000 m	
Samplavstånd länkdämpning	100, 250 resp. 1000 m	
Terräng	Plan (Vadstena)	
	Småkuperad (Söder om Linköping)	
	Starkt kuperad (Lomben)	
	Fjäll (Abisko)	

Tabell 3.2: Parametrar för beräkningarna

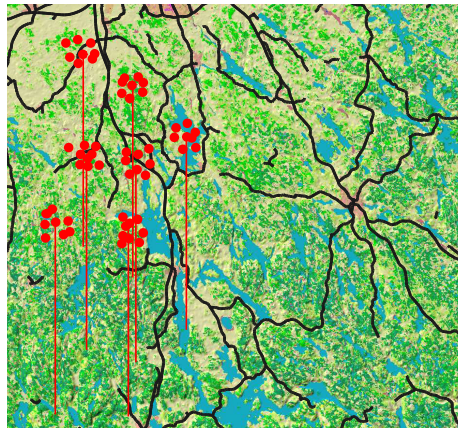
3.2 Terrängval och nodplacering

Helikoptern har antagits flyga med en konstant hastighet på 116 knop, vilket motsvarar 60 m/s. Noderna slumpas ut i terrängen och kan därför även hamna över sjöar. I fallet med flera noder är noderna utslumpade över en cirkel med tätheten en nod per 100*100 m. Ytan som noderna är spridda över är alltså större om fler noder används. En mycket förenklad flygrutt har använts för helikoptern: den flyger längs en rak linje i riktning mot noderna, på konstant höjd över marken. Länkdämpningen beräknas på jämna avstånd längs flygrutten. Hur ofta länkdämpningen beräknas beror på helikopterns flyghöjd och därmed förväntad räckvidd. Exempelvis har länkdämpningen beräknats med 100 m mellanrum på 5 m flyghöjd, men med 1000 m mellanrum på 1000 m flyghöjd. Räckvidderna är i vissa fall långa. Detta har begränsat antalet möjliga inflygningsrutter, eftersom det så långt som möjligt ska vara samma typ av terräng längs hela rutten. De måste också ligga helt innanför Sveriges gränser, för att finnas med i den terrängdatabas vi använder.

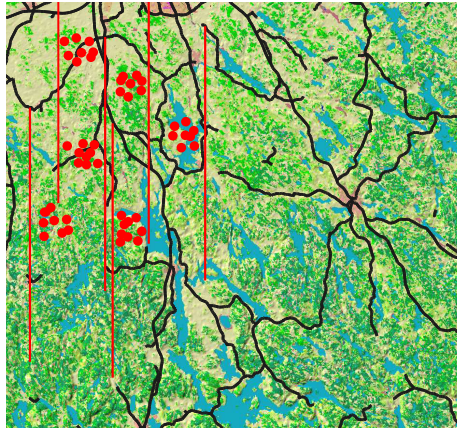
Fyra olika terrängtyper har använts: fjällterräng vid Abisko, kuperad terräng med skog och sjöar vid Lomben, småkuperad skogsbeklädd terräng söder om Linköping, och plan terräng utan skog vid Vadstena. För varje terrängtyp, och för varje kombination av flyghöjder och antennhöjder, har ett antal beräkningar gjorts med olika placeringar av noden/noderna. Figur 3.1 visar ett exempel på hur marknoden placerats ut i några av beräkningarna i det första fallet, då det endast fanns en nod för helikoptern att kommunicera med. Helikopterns flygrutt in mot noderna visas även med linjer. Figur 3.2 visar schematiskt hur noder skulle kunna placeras i fallet då helikoptern kommunicerar med någon av flera marknoder. Figur 3.3 visar schematiskt hur noder skulle kunna placeras i fallet då helikoptern flyger förbi noderna i en flygkorridor. Tabell 3.1 ger parametrar som använts för beräkningarna.



Figur 3.1: Exempel på placering av marknoder i fallet då helikoptern kommunicerar med en enda nod på marken. Linjerna visar helikopterns flygrutter.



Figur 3.2: Schematisk illustration av placering av marknoder i fallet då helikoptern kommunicerar med någon av flera noder på marken. Linjerna visar helikopterns flygrutter.



Figur 3.3: Schematisk illustration av placering av marknoder i fallet då helikoptern flyger i en flygkorridor förbi noderna. Linjerna visar helikopterns flygrutter.

3.3 Definitioner

I det här avsnittet följer ett resonemang kring de definitioner av radioförbindelse och räckvidd som vi valt att använda.

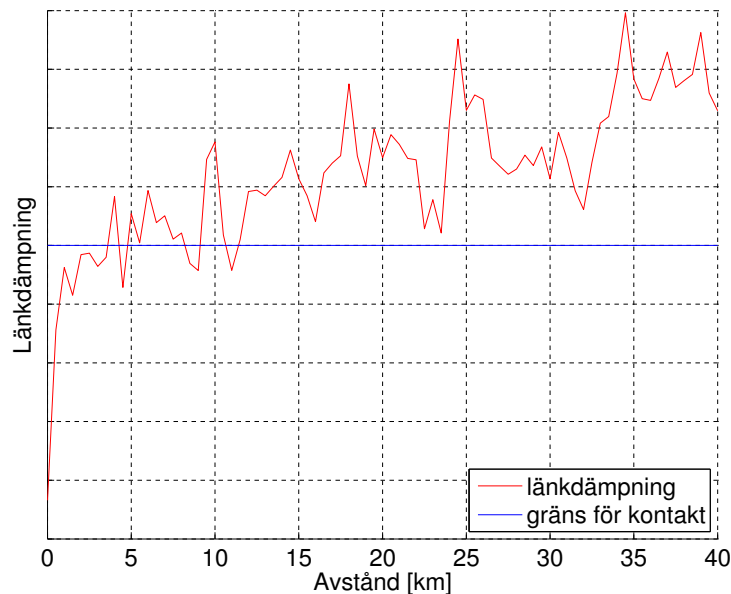
3.3.1 Radioförbindelse

För att ha radioförbindelse på ett visst avstånd vid en given inflygning kräver vi att länkdämpningen på det avståndet ligger under den tröskel som ges av länkbudgeten.

I fallet med flera noder har vi ansett att det finns en radioförbindelse om helikoptern har kontakt med minst en av noderna. Om den noden är förbunden med någon av de övriga marknoderna har inte studerats. Helikopterns radio väljer att försöka kommunicera med den marknod den först får kontakt med. Om kontakten med den noden bryts väljs den nod som har lägst länkdämpning.

3.3.2 Räckvidd

En möjlig definition av räckvidd är det avstånd där helikoptern med en viss sannolikhet kan koppla upp sig mot marknätet och sedan behålla länken uppkopplad så länge att information hinner utbytas. När detta är gjort skulle det inte spela någon roll om länken tillfälligt bryts, eftersom den redan hunnit överföra den viktigaste informationen. Hur länge länken behöver vara upprättad för att hinna komma in i nätet och skicka information beror på vilken typ av radiosystem som används. Ett rimligt krav kan dock vara i storleksordningen en halv minut. Detta motsvarar en sträcka på två km, om helikoptern flyger med den antagna hastigheten 60 m/s. Beräkningar visar dock att denna defini-



Figur 3.4: Exempel på hur länkdämpningen mellan en nod och helikoptern kan se ut.

tion inte ger någon större skillnad i resultat jämfört med att kräva att länken ska vara obruten hela vägen fram till marknoderna. Eftersom helikoptern flyger mot marknoderna kommer avståndet, och därmed den genomsnittliga länkdämpningen, att minska. Om helikoptern har haft kontakt ett tag har den under tiden kommit så mycket närmare marknoden att det blir osannolikt att länken skulle brytas. Vi har därför valt att definiera räckvidden som det största avstånd där vi i minst 90% av de beräknade anflygningarna har en radioförbindelse som inte bryts under hela inflygningen mot noden/noderna. Vi har valt att sätta sannolikhetskravet högt, eftersom vi i det givna scenariot tror att det är viktigt med en etablerad kontakt.

I fallet med flera noder är räckvidden även då definierad som det största avstånd där helikoptern har oavbruten länk med en bestämd nod hela vägen in till noderna. Om helikoptern haft radioförbindelse med någon nod tidigare anses denna ha brutits innan någon data hann överföras. Endast den sista noden bidrar till räckvidden.

Figur 3.4 visar ett exempel på hur länkdämpningen mellan en nod och helikoptern kan se ut. I detta exempel för en enskild inflygning är räckvidden ca 4 km, eftersom det är på det avståndet som noden får kontakt med helikoptern och behåller kontakten utan avbrott.

FOI-R--3820--SE

4 Resultat av räckviddsberäkningar

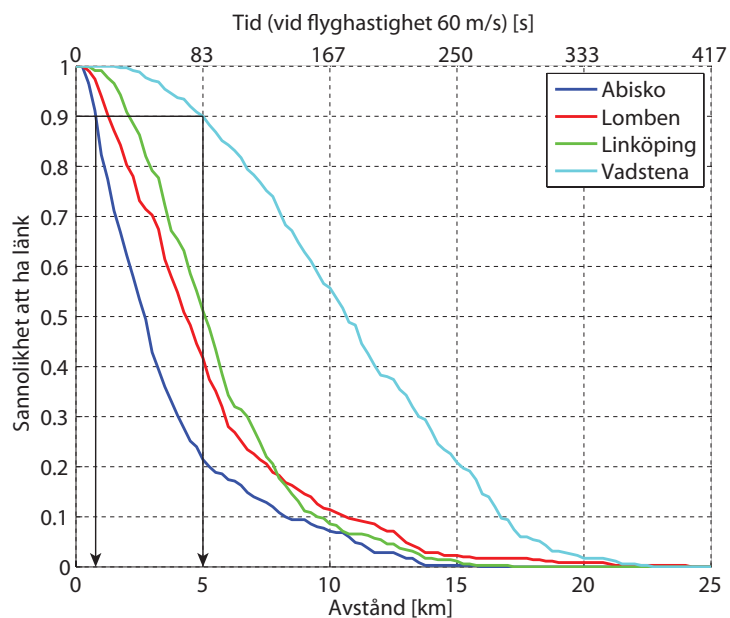
I detta kapitel redovisas resultaten av beräkningarna för de tre olika fallen: med en marknod, med flera marknoder, och då en flygkorridor används.

4.1 En marknod

I det första fallet gjordes beräkningarna för en ensam nod på marken, för olika antenn- och flyghöjder. Som exempel visas i figur 4.1 sannolikheten att helikoptern har radioförbindelse med noden på marken på ett visst avstånd, då radiosystemet använder frekvensen 300 MHz. I grafen visas både avståndet och hur lång tid det skulle ta att flyga in till målet från det avståndet om helikoptern flyger med hastigheten 60 m/s (ca 116 knop). Pilarna i grafen visar räckvidden med 90 % sannolikhet att ha en länk, som vi beskriver i avsnitt 3.3.2. För jämförelsens skull har vi även gjort beräkningar för ett radiosystem som använder frekvensen 50 MHz. Grafer över sannolikheten att ha radioförbindelse för alla beräknade höjder och valda terrängområden och för de båda frekvenserna finns i Appendix A. Med den valda modellen för att beräkna länkdämpningar tas hänsyn till terrängen, men vi har inte räknat med någon småskalig fäddning.

I tabellerna 4.1 och 4.2 ges räckvidden för olika kombinationer av antenn- och flyghöjder för de båda frekvenserna. Skillnaderna mellan de olika terrängtyperna är stora. Inte överraskande är räckvidden betydligt bättre i öppen och plan terräng än i mer kuperad skogsterräng. På 5 m flyghöjd och med 3 m antennhöjd på marknoden blir räckvidden mycket kort på den högre frekvensen, 0,5 - 2,7 km beroende på terräng. Detta motsvarar att helikoptern får kontakt cirka 8-45 s innan den når noden, med den antagna hastigheten. Med en 25 m hög mast kan tiden med radioförbindelse ökas till ca 15-90 s. Ju högre antenner och flyghöjder som används, desto längre avstånd kan man rimligt nog få kontakt på. När helikoptern flyger på 1000 m höjd kan den till exempel få kontakt på 31 km avstånd med tremetersantennen, i Linköpingsområdet. Detta motsvarar drygt 8,5 minuters radioförbindelse. På den lägre frekvensen, tabellen 4.2, blir räckvidderna längre. Med 5 m flyghöjd och 25 m antenn fås en räckvidd på 45-335 s, och på 1000 m höjd med tremetersantennen 6,5-32 minuter.

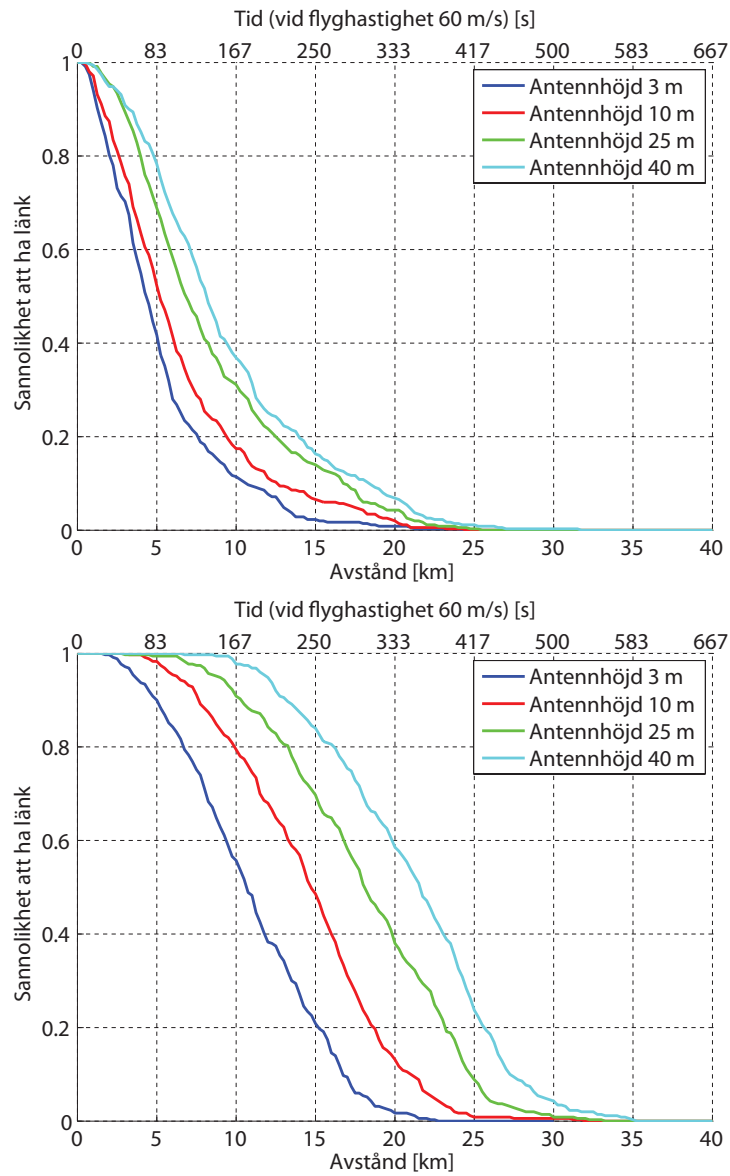
Då den högre frekvensen används beror räckvidden mycket på masternas höjd i förhållande till terrängprofilen. Högre master ger längre räckvidd. Detta gör att valet av antennplacering på marken bör ske med omsorg. I plan terräng kommer även en mast placerad nedanför en höjd att sticka upp över närbelägna höjdparter. En mast i starkt kuperad terräng blir beroende av att placeras på höjderna för att ge effekt. Eftersom noderna i vårt scenario placerats ut slumpmässigt och därmed ofta hamnat på sämre positioner syns endast större förbättringar av ökande antennhöjd för de plattare områdena. Detta kan ses i figur 4.2, som visar effekterna av att ha olika antennhöjder i Lomben respektive Vadstena på 300 MHz. Exempelvis är det inte ovanligt med höjdskillnader på över 150 m i Lomben-terrängen. I Vadstenatrakten däremot är en 25 m hög mast högre än det mesta i terrängen. På den lägre frekvensen är terrängens påverkan på masthöjden annorlunda, se figur 4.3. Här vinner man lika mycket på högre



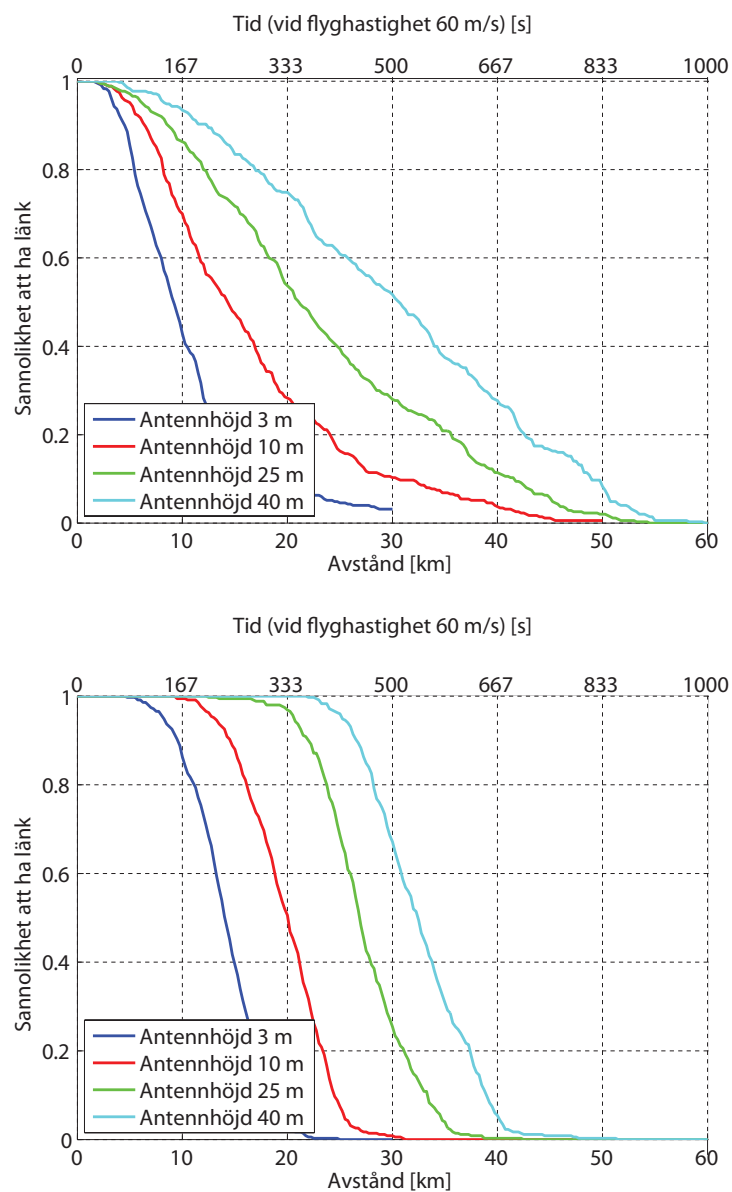
Figur 4.1: Sannolikheten att helikoptern har kontakt med noden på marken. I grafen syns även hur lång tid det skulle ta för helikoptern att flyga in till noden från det avståndet. Flyghöjd 20 m och antennhöjd 3 m.

Flyghöjd	Område	Antennhöjd [m]			
		3	10	25	40
5 m	Abisko	0.5	0.7	0.9	1
	Lomben	0.8	0.8	1.2	1.8
	Linköping	0.9	1.4	2.5	3.2
	Vadstena	2.7	3.1	5.4	6.3
20 m	Abisko	0.75	1	1.25	1.25
	Lomben	1.25	1.5	2.75	3.25
	Linköping	2	3.5	6	7.75
	Vadstena	5	7.5	10.25	13
1000 m	Abisko	7	8	9	10
	Lomben	23	31	55	68
	Linköping	31	54	85	99
	Vadstena	55	82	103	111

Tabell 4.1: Möjlig räckvidd i km för frekvensen 300 MHz.



Figur 4.2: Sannolikheten att helikoptern har kontakt med noden på marken, om frekvensen 300 MHz används. I övre grafen visas effekterna av olika antennhöjder i Lombén, och i den undre grafen Vadstenatrakten. Flyghöjden är 20 m.



Figur 4.3: Sannolikheten att helikoptern har kontakt med noden på marken, om frekvensen 50 MHz används. I övre grafen visas effekterna av olika antennhöjder i Lomben, och i den undre grafen Vadstenatrakten. Flyghöjden är 20 m.

Flyghöjd	Område	Antennhöjd [m]			
		3	10	25	40
5 m	Abisko	1.5	2.4	2.6	2.7
	Lomben	3.9	7	8.8	10.9
	Linköping	6.2	9.1	13.5	16.2
	Vadstena	9.3	14.6	20.2	25
20 m	Abisko	2.5	3.5	4	3.75
	Lomben	7.75	12.5	21	34.25
	Linköping	10.25	14.75	20.25	22
	Vadstena	16.25	24.75	31.75	35
1000 m	Abisko	24	38	43	59
	Lomben	103	>160	>160	>160
	Linköping	96	>160	>160	>160
	Vadstena	117	>160	>160	>160

Tabell 4.2: Möjlig räckvidd i km för frekvensen 50 MHz.

antennerna i Lomben som i Vadstenaterrängen.

4.2 Flera marknoder

Om det finns flera noder på marken som alla är utrustade med någon form av radioutrustning är det troligt att helikoptern kan få kontakt på längre avstånd, eftersom den då kan välja att kommunicera med den nod som har bäst signal. Beräkningarna visar också att så är fallet. Tabell 4.3 visar räckvidden för olika flyghöjder, områden och antal noder, alla med 3 m höga antenner.

Förbättringen av att ha 64 noder på marken i stället för en är tydlig. Räckvidden fördubblas i flera av fallen, och detta gäller för alla flyghöjder. Även med 16 noder fås en viss förbättring jämfört med en-nodsfallet, men då tydligast vid 1000 m flyghöjd. Något av förbättringen i räckvidd med fler noder kan bero på att de då täcker en större yta. Då exempelvis 64 noder används är de utspridda över en cirkel med radien 450 m. Helikoptern når därför den närmaste noden lite tidigare. Även om räckvidderna ökar då det tillkommer fler noder på marken är förbättringen inte lika stor som då vi ersätter en marknod med en mast: räckvidden är större då en 25 eller 40 m hög mast används, än då 64 marknoder används.

Resultaten för fallet med en enda nod så som de visas i det här avsnittet är inte exakt samma som de resultat vi fått fram i beräkningarna för en enda nod i avsnitt 4.1, trots att samma parametrar använts. Det beror på att noderna slumpats ut, och de därmed hamnat på mer eller mindre lämpliga platser i terrängen. Att det för Abisko ser ut att bli 0,7 km räckvidd på flyghöjden 5 m men bara 0,5 km räckvidd på flyghöjden 20 m

Flyghöjd	Område	Antal noder		
		1	16	64
5 m	Abisko	0.7	0.9	1
	Lomben	0.7	1.2	1.3
	Linköping	1	1.4	2
	Vadstena	2.5	2.7	3.6
20 m	Abisko	0.5	1	1
	Lomben	1.25	2	2.75
	Linköping	2	4.25	5
	Vadstena	6.25	6.75	8.25
1000 m	Abisko	7	10	16
	Lomben	26	42	58
	Linköping	38	59	73
	Vadstena	58	77	88

Tabell 4.3: Räckvidd i km med flera noder på marken, för 300 MHz. Givet för olika flyghöjder. Alla marknoder har 3 m höga antenner.

är troligen en effekt av att sampelavstånden är större på den högre flyghöjden, och upplösningen därmed är sämre.

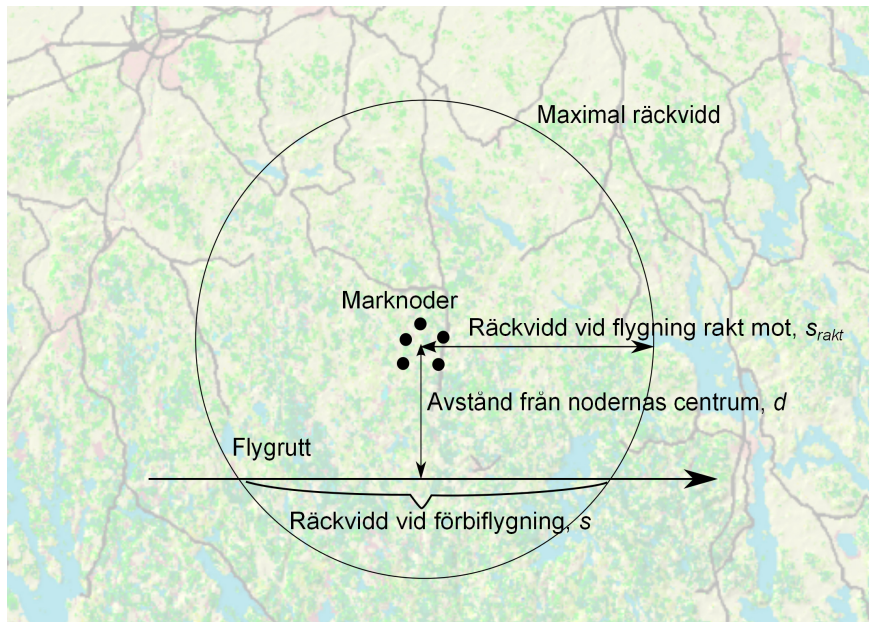
4.3 Flygkorridorer

När helikoptrar används på uppdrag ute i fält och de ska flyga i närheten av egna markförband används speciella förplanerade flygkorridorer. Detta kan innebära att helikoptern passerar en bit ifrån ett markförband, jämför figurerna 3.2- 3.3. Detta ger kortare räckvidder än om helikoptern flyger rakt över marknoderna (figur 4.4). Utgående från de länkdämpningar som beräknats till resultaten i avsnitt 4.1 och 4.2, där helikoptern alltid flugit rakt mot noderna, har vi beräknat några exempel på räckvidder då helikoptern passerar markförbanden.

Sträckan, s , kan fås fram enligt formeln

$$s = 2 * \sqrt{s_{rakt}^2 - d^2}$$

där s_{rakt} är den sträcka helikoptern hade haft kontakt med någon av noderna om den flugit rakt in mot dem, och d är på vilket avstånd från nodgruppens centrum den passerar. I tabell 4.4 visas exempel på under hur lång sträcka helikoptern kan ha radioförbindelse, om det på marken finns en nod med en 25 m hög mast, eller 64 noder utrustade med 3 m antenner. Notera att räckvidden nu inkluderar den tid helikoptern flyger bort från noden efter att ha passerat som närmast. I inflygningsfallet räknades räckvidden bara fram tills helikoptern flugit fram till noden eller noderna på marken. Detta medför att räckvidderna i vissa fall kan bli upp till dubbelt så långa som de som



Figur 4.4: Schematisk bild över räckvidden s när helikoptern passerar förbi marknoderna på ett visst avstånd d .

redovisas i tabellerna 4.1 och 4.3. I de fall som visas i tabell 4.4 passerar helikoptern på en respektive tre kilometers avstånd från nodernas centrum.

Terrängens påverkan, som visas i tabell 4.4, blir för de lägre flyghöjderna ännu tydligare än då helikoptern flyger rakt in mot noderna. I Abiskoterrängen är räckvidderna så korta att helikoptern ofta förlorar möjligheten att ha radioförbindelse. För Lomben- och Linköpingsterrängerna varierar möjligheterna att ha radioförbindelse mycket mellan exempelfallen. I Vadstenaterrängen har vi minst 4 km eller en minuts radioförbindelse även om helikoptern flyger tre kilometer bredvid. Med flyghöjden 1000 m ger det ingen större skillnad att flyga några km bredvid, eftersom detta är så lite jämfört med räckvidden. På denna flyghöjd finns radioförbindelse under minst 17 km eller nästan fem minuter, även i den svåraste terrängen.

		Flygavstånd d	
		1 km	3 km
En nod med 25 m hög mast			
5 m	Abisko	–	–
	Lomben	1.3	–
	Linköping	4.6	–
	Vadstena	11	9.0
20 m	Abisko	1.5	–
	Lomben	5.1	–
	Linköping	12	10
	Vadstena	20	20
1000 m	Abisko	18	17
	Lomben	110	110
	Linköping	170	170
	Vadstena	206	206
64 noder med 3 m höga antenner			
5 m	Abisko	–	–
	Lomben	1.7	–
	Linköping	3.5	–
	Vadstena	6.9	4.0
20 m	Abisko	–	–
	Lomben	5.1	–
	Linköping	9.8	8.0
	Vadstena	16	15
1000 m	Abisko	32	31
	Lomben	116	116
	Linköping	146	146
	Vadstena	176	176

Tabell 4.4: Räckvidd i km, beroende på vilket avstånd d som helikoptern passerar marknoderna på. Då bara ett streck visas är räckvidden så kort att helikoptern inte kan få kontakt alls.

5 Diskussion

I avsnitt 2.2.1 nämndes två frågor som särskilt intressanta. Frågan om räckvidder har redan tagits upp i kapitel 4. Den andra frågan som nämndes var den om vilken anslutningstid som krävs för att helikopterns radio ska hinna komma in i nätet. Anslutningstidens påverkan diskuteras här, tillsammans med andra aspekter.

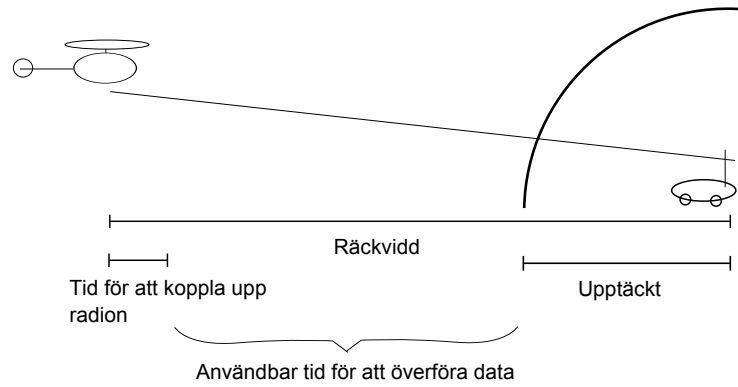
Både anslutningstiden och syftet med kommunikationen påverkar hur stor del av räckvidden som är till nytta. I kapitel 4 har räckvidder angetts i både km och omräknat till hur lång tid det motsvarar. Hela den tiden är inte nödvändigtvis användbar för kommunikation. Om radioförbindelsen ska användas för att identifiera sig behöver helikoptern till exempel hinna göra detta innan den blir upptäckt visuellt. En del av tiden går dessutom åt för att komma in i nätet. Det gör att det tar ett tag från det att länkdämpningen blir så låg att helikoptern har kontakt tills länken kan användas till informationsutbyte. Den användbara tiden för att överföra data är således tiden efter att helikoptern kommit inom räckvidd och etablerat länken, och innan den upptäcks. Se Figur 5.1. Upptäcktavståndet kan grovt sättas till 3 km. Med en snabb länketablering skulle vi få längre tid för att överföra data.

Med detta upptäcktsavstånd och om frekvensen 300 MHz används blir det oavsett uppkopplingstid svårt att hinna kommunicera innan upptäckt om helikoptern flyger på de lägre höjderna. Räckvidden är i de flesta fall mindre än eller ungefär lika stor som det antagna upptäcktsavståndet. Med den lägre frekvensen är räckvidderna längre vilket ger mer tid till uppkoppling. Här räcker det i de flesta fall om vi på två minuter hinner koppla upp en länk och utbyta data. På 1000 m höjd fungerar det i samtliga fall. Även i Abiskoterrängen räcker det på denna flyghöjd om det inte tar mer än två minuter att koppla upp länken och utbyta data. I de andra terrängerna har vi ca 6-30 minuter för uppkoppling och kommunikation innan upptäckt, beroende på terräng och antennhöjd.

Anslutningstiden kan variera beroende på vilket radiosystem som används. Hittills har vi antagit att radion är inställd för ett givet marknät. Om helikoptern flyger förbi flera markförband kan radion i stället behöva ställas om mellan de olika näten. Den tid detta tar kan vara påtaglig jämfört med tiden det tar att flyga mellan de två näten, och bör därför beaktas. På de högre flyghöjderna kan helikoptern till och med tänkas vara inom räckvidden för flera olika marknät samtidigt.

Vi har valt ett hårt krav för vad som anses vara en radioförbindelse när vi kräver 90 % sannolikhet att ha länk. Anledningen är att vi har antagit att scenariot är sådant att helikoptern måste ha radioförbindelse innan den flyger in mot marknoderna. I annat fall skulle den bli tvungen att avbryta inflygningen eller välja en annan väg. Om vi istället har ett scenario där helikoptern kan ha nytta av kommunikationen men inte är beroende av den kan sannolikheten sättas lägre. Räckvidderna för ett sådant fall, för den valda sannolikheten, kan läsas ut ur graferna i Appendix A. Räckvidderna blir ofta betydligt längre med ett lägre krav, speciellt för de lägre flyghöjderna.

De räckvidder vi beräknar i fallet med flera noder blir ibland inte särskilt mycket bättre än om bara en nod hade använts. Detta beror på att helikoptern visserligen har flera noder att välja mellan, men alla ligger i ungefär samma riktning eftersom avståndet mellan noderna typiskt är litet jämfört med avståndet till helikoptern. Detta gör att deras länkdämpningar blir ganska korrelerade. Om en nod är skymd skymms ofta även



Figur 5.1: Den tid som är användbar för att överföra data innan helikoptern upptäcks

de andra, till skillnad från en nod som har ett nät av andra noder runt omkring sig.

6 Fortsatt arbete

Under arbetets gång har vi identifierat några olika områden som skulle kunna vara intressanta att arbeta vidare med:

- Att studera hur nätstrukturen påverkas av att en snabb nod som helikoptern kommer in i nätet, flyger igenom och sedan lämnar nätet igen.
- Att använda information om terrängen och helikopterns flygrutt till att göra en skattning av vilket avstånd helikoptern skulle upptäckas på. Detta skulle kunna förbättra noggrannheten i resultaten.
- Skapa mer realistiska scenarion, där helikoptern utnyttjar terrängen för att undvika hot. Detta skulle troligen påverka både radioräckvidd och upptäcktsavstånd.

FOI-R--3820--SE

7 Sammanfattning

Vi har beräknat räckvidden för kommunikation mellan en helikopter, som flyger på konstant höjd över marken, och en eller flera noder på marken. Radiosystemet använder frekvensen 50 MHz eller 300 MHz, och har för dessa frekvenser bandbredden 25 kHz respektive 1 MHz och uteffekten 50 W respektive 44 W. Räckvidden är tydligt terrängberoende för alla kombinationer av flyg- och antennhöjder. På frekvensen 300 MHz blir räckvidden mycket kort för låga flyghöjder, om inte höga master används. Exempelvis fås räckvidder mellan 0,75 och 5 km för en flyghöjd på 20 m och en antennhöjd på 3 m. Då antennhöjden är 25 m varierar räckvidden i stället mellan 1,25 och 10 km. Med 1000 m flyghöjd blir räckvidden betydligt större, 7-55 km för 3 m antennhöjd och 9-103 km för 25 m antennhöjd. Med 64 noder på marken, så att helikoptern kan välja att kommunicera med den som är bäst, fås upp till fördubblad räckvidd jämfört med att ha en enda nod med 3 m mast. Det är dock inte bättre än att ha en 25 m hög mast. På frekvensen 50 MHz blir räckvidderna längre. Med 20 m flyghöjd och 25 m antenn fås en räckvidd på 4-32 km, och på 1000 m höjd med tremetersantennen 24-117 km.

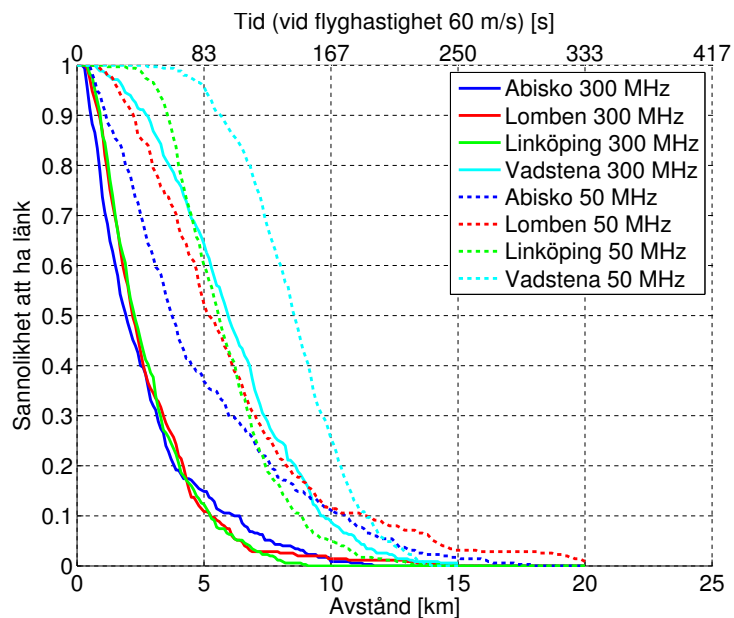
Vi har även beräknat räckvidden då helikoptern flyger förbi marknoden i en flygkorridor på 1 eller 3 km avstånd från marknoden. Om helikoptern flyger på 1000 m höjd är räckvidderna så långa att räckvidden inte påverkas av avståndet i sidled från marknoderna. På de lägre flyghöjderna och de mer kuperade terrängerna är räckvidderna ibland så korta att helikoptern inte kan få kontakt alls.

Om länken ska användas för att helikoptern ska identifiera sig behöver den hinna koppla upp länken och överföra informationen innan den upptäcks av förbandet på marken. Med det upptäcktsavstånd vi antagit blir räckvidden i de flesta fallen bara tillräckligt lång om helikoptern flyger på den högsta flyghöjden vi studerat, 1000 m.

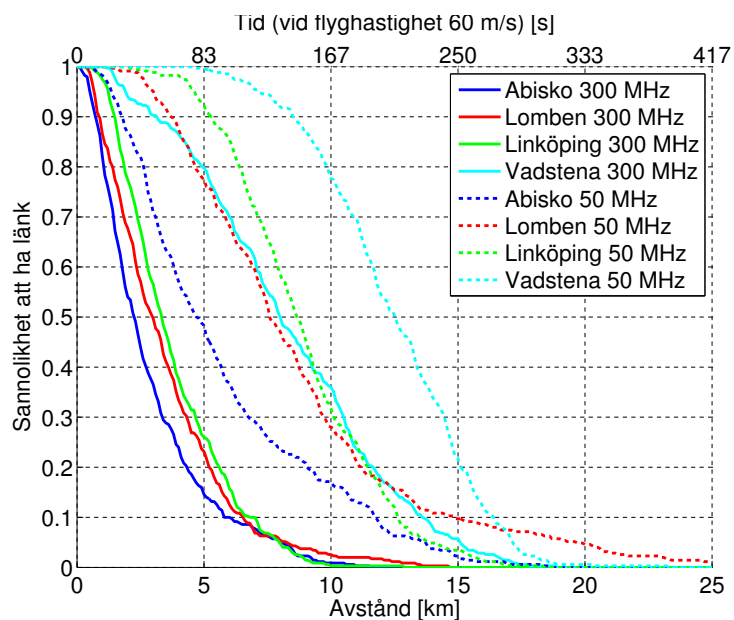
FOI-R--3820--SE

A Grafer över sannolikhet att ha länk

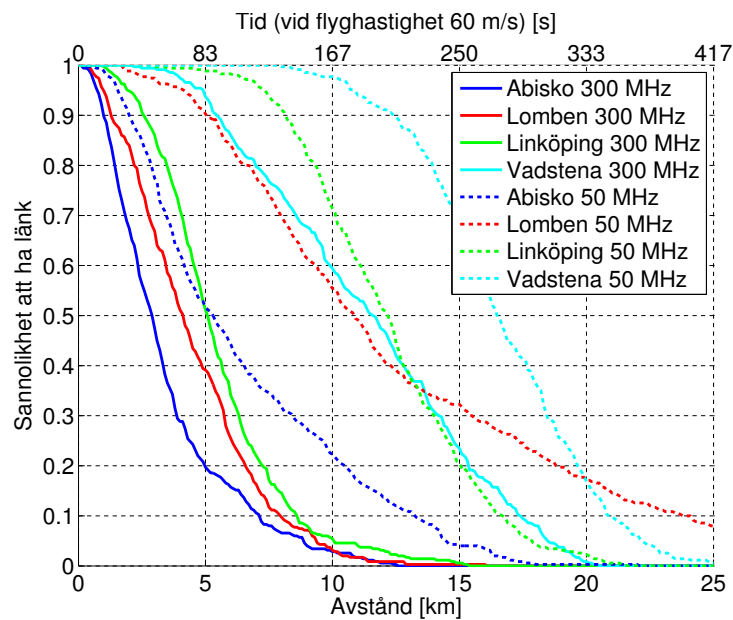
Här visas alla grafer över sannolikhet att ha länk för fallet med en nod på marken, för frekvenserna 50 MHz och 300 MHz. En flyg- och antennhöjd per graf. Graferna A.1-A.4 visar sannolikheten på flyghöjden 5 m, A.5-A.8 på flyghöjden 20 m och A.9-A.12 på flyghöjden 1000 m. Ur graferna kan den möjliga räckvidden utläsas för alla beräknade kombinationer av flyg- och antennhöjder, terränger och frekvenser, och för valfri sannolikhet att ha länk.



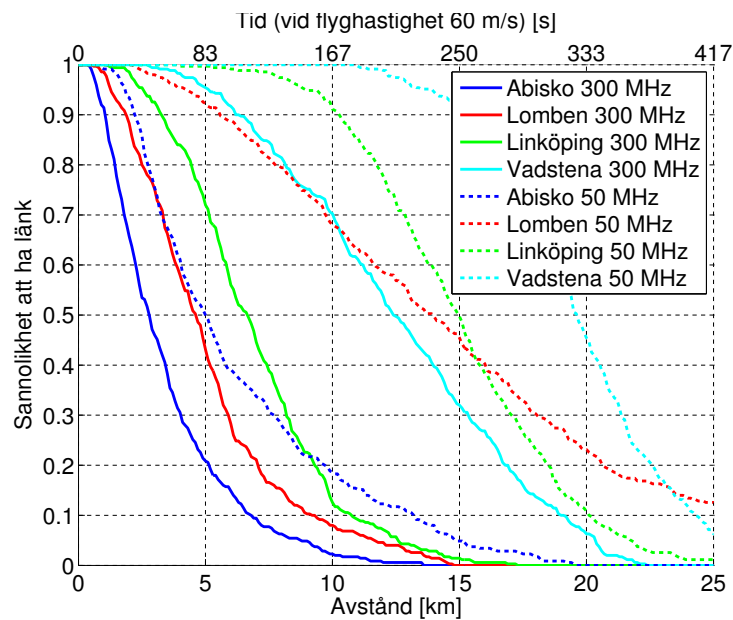
Figur A.1: Sannolikheten att helikoptern har kontakt med noden på marken. Flyghöjd 5 m, antennhöjd 3 m.



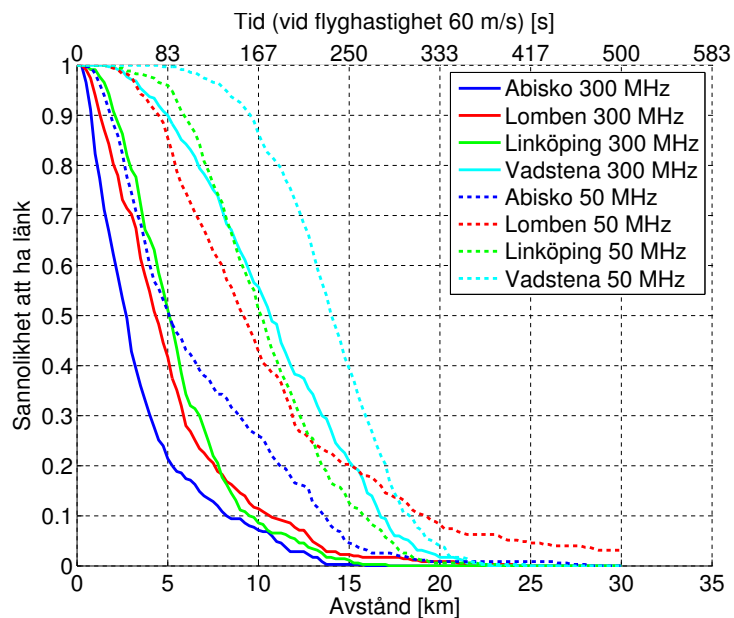
Figur A.2: Sannolikheten att helikoptern har kontakt med noden på marken. Flyghöjd 5 m, antennhöjd 10 m.



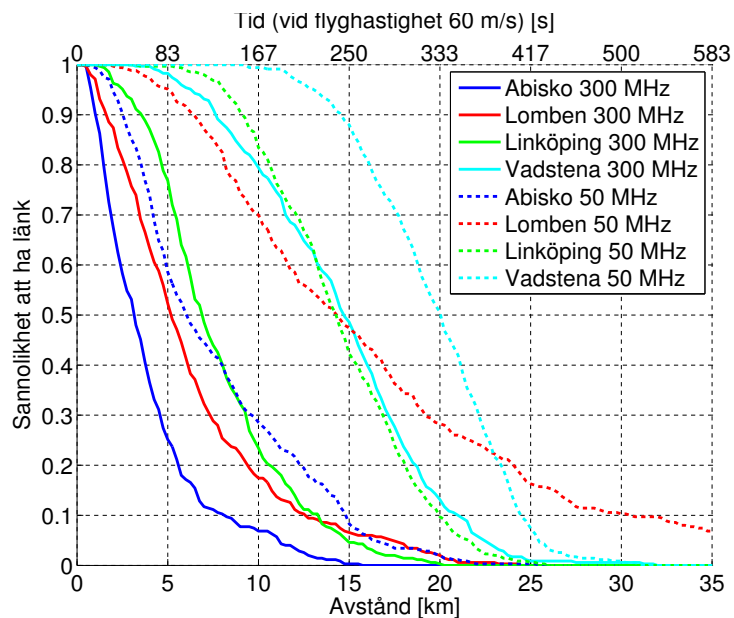
Figur A.3: Sannolikheten att helikoptern har kontakt med noden på marken. Flyghöjd 5 m, antennhöjd 25 m.



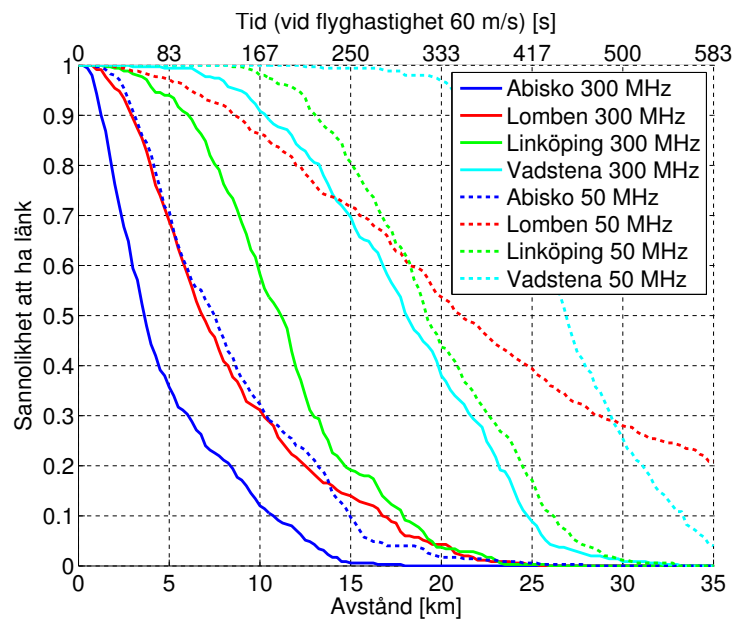
Figur A.4: Sannolikheten att helikoptern har kontakt med noden på marken. Flyghöjd 5 m, antennhöjd 40 m.



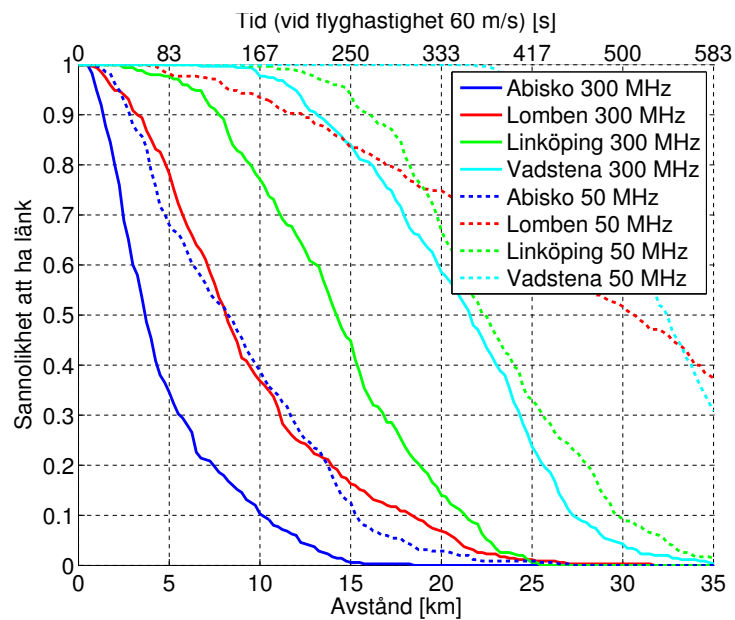
Figur A.5: Sannolikheten att helikoptern har kontakt med noden på marken. Flyghöjd 20 m, antennhöjd 3 m.



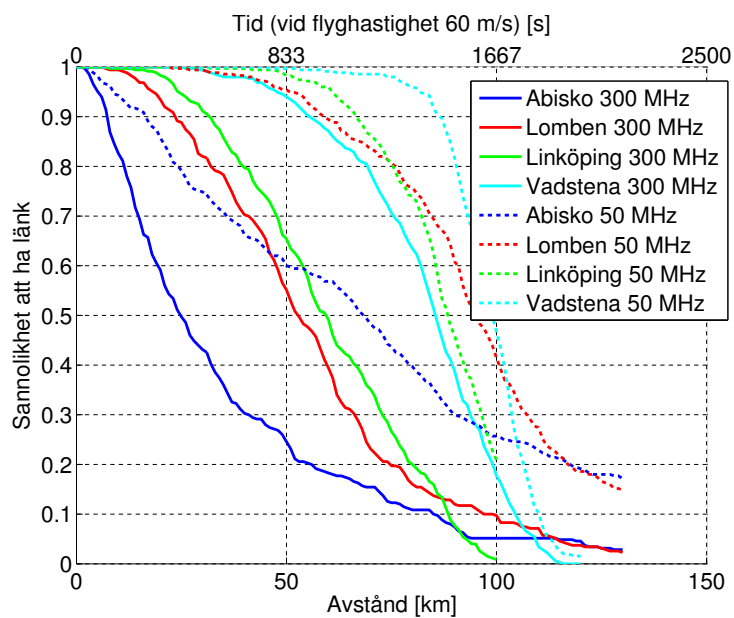
Figur A.6: Sannolikheten att helikoptern har kontakt med noden på marken. Flyghöjd 20 m, antennhöjd 10 m.



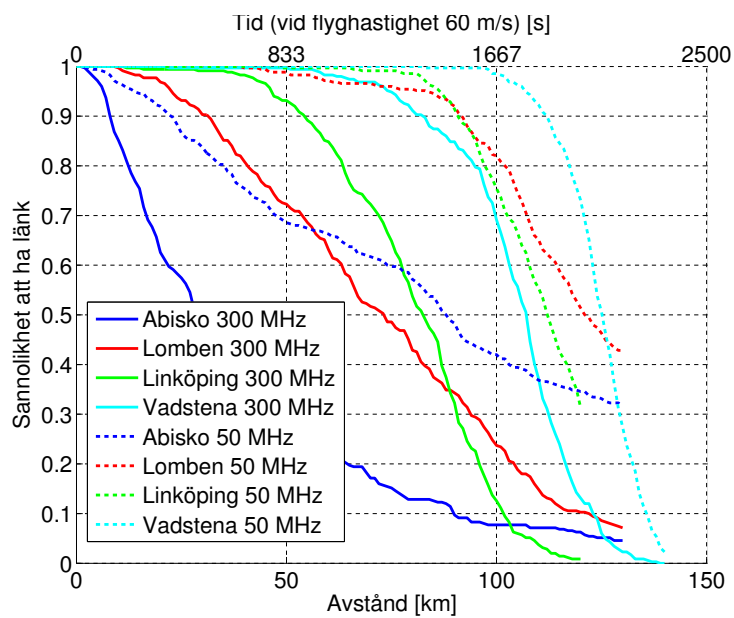
Figur A.7: Sannolikheten att helikoptern har kontakt med noden på marken. Flyghöjd 20 m, antennhöjd 25 m.



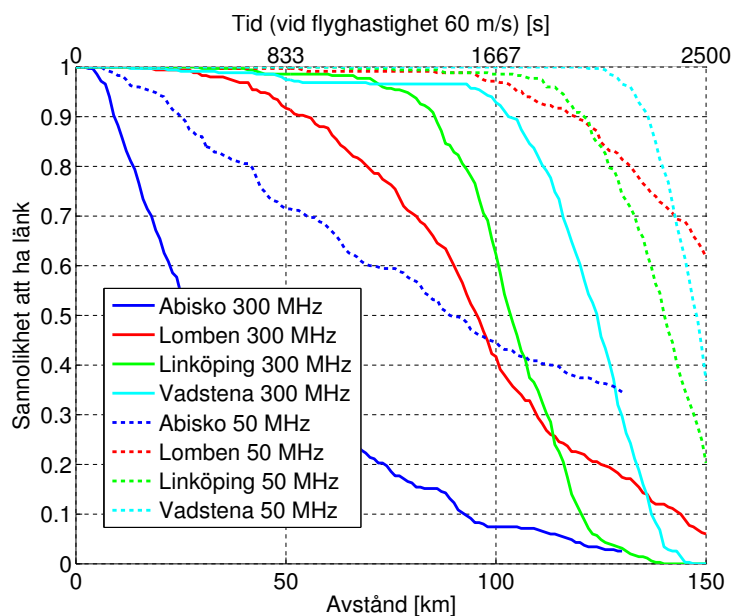
Figur A.8: Sannolikheten att helikoptern har kontakt med noden på marken. Flyghöjd 20 m, antennhöjd 40 m.



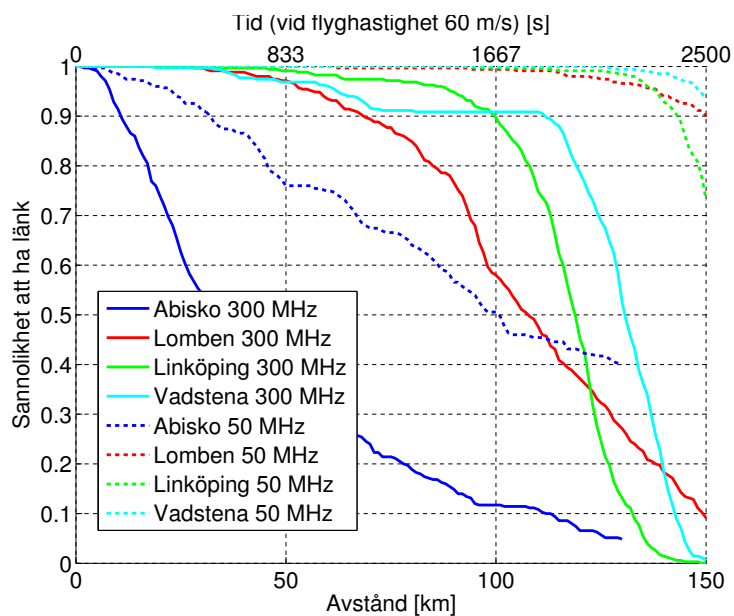
Figur A.9: Sannolikheten att helikoptern har kontakt med noden på marken. Flyghöjd 1000 m, antennhöjd 3 m.



Figur A.10: Sannolikheten att helikoptern har kontakt med noden på marken. Flyghöjd 1000 m, antennhöjd 10 m.



Figur A.11: Sannolikheten att helikoptern har kontakt med noden på marken. Flyghöjd 1000 m, antennhöjd 25 m.



Figur A.12: Sannolikheten att helikoptern har kontakt med noden på marken. Flyghöjd 1000 m, antennhöjd 40 m.

FOI-R--3820--SE

Referenser

- [1] U. Uppman, K.. Fors, S. Linder, A. Hansson och U. Sterner. Luftburna kommunikationsnoder i marknät. Teknisk rapport, FOI, 2012.
- [2] B. Asp, G. Eriksson och P. Holm. Detvag-90 final report. Teknisk rapport FOA-R-97-00566-504-SE, Försvarets Forskningsanstalt, september 1997.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se