

Ny metod för läcksökning

*Maria Rothman
Staffan Abrahamsson
Nils Karlsson
Lars-Gunnar Huss
Tommy Johansson
Jan-Olof Ousbäck
Jonas Rahm
Carl Samuelsson
Anders Örbom
Dan Axelsson*



Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten
Ledningsnät
Avloppsvatten
Management

SVU styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

Agneta Granberg, ordförande	Göteborgs Stad
Daniel Hellström, sekreterare	Svenskt Vatten
Henrik Aspegren	VA SYD
Per Ericsson	Norrvatten
Stefan Johansson	Skellefteå kommun
Henrik Kant	Göteborg Vatten
Lena Ludvigsson-Olafsen	Smedjebackens kommun
Lisa Osterman	Örebro kommun
Kenneth M. Persson	Sydvatten AB
Lars-Gunnar Reinius	Stockholm Vatten AB
Bo Rutberg	Sveriges Kommuner och Landsting
Lena Söderberg	Svenskt Vatten

Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan återopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 47607
117 94 Stockholm
Tfn 08-506 002 00
Fax 08-506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se

Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Ny metod för läcksökning
Title of the report:	A new method to detect leakage of water
Rapportnummer:	2013-02
Författare:	Maria Rothman, Norrköping Vatten. Staffan Abrahamson, Nils Karlsson, Lars-Gunnar Huss, Tommy Johansson, Jan-Olof Ousbäck, Jonas Rahm, Carl Samuelsson, Anders Örbom, FOI. Dan Axelsson, Cinside.
Projektnummer:	10-133
Projektets namn:	Ny metod och teknik för läcksökning från rör under mark
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling, Energimyndigheten
Rapportens omfattning	
Sidantal:	60
Format:	A4
Sökord:	Vattenläckage, radar, doppler, läcka
Keywords:	Waterleakage, radar, doppler, leakage
Sammandrag:	Två funktionsmodeller har utvecklats som kan detektera vattenläckor under mark genom dopplerradar. Denna teknik kan användas för att detektera läckor i alla trycksatta vattenledningar oavsett diameter och oavsett material. Resultat visar att principen fungerar, men fortsatt arbete behövs så att optimal teknik och metodik för ett framtida mätsystem säkerställs.
Abstract:	Two functional models has been developed to detect leakage of water by Doppler radar. The results show that the principle works. More work is necessary that optimal technology and methodology for a future measurement system is ensured.
Målgrupper:	VA-verksamhet
Omslagsbild:	Bild av läcksökningsutrustning, (Staffan Abrahamson, FOI)
Rapport:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2013
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Förord

Projektet har letts av Norrköping Vatten AB med Maria Rothman som projektledare. Övriga deltagare var Lars Svensson från Norrköping Vatten AB, Jörgen Lönnbring från Tekniska Verken i Linköping AB, Tommy Ekblad från Göteborg Vatten, Staffan Abrahamson, Johan Allguren och Nils Karlsson från FOI och Dan Axelsson från Cinside AB.

Projektet finansieras i huvudsak med medel från Svenskt Vatten (963 000 kr) och Energimyndigheten via Svenskt Vattens Energiprojekt för VA-branschen (1 487 500 kr). Projektdeltagarna Norrköping Vatten AB, Göteborg Vatten och Tekniska Verken i Linköping AB, FOI och Cinside AB bidrar även finansiellt till projektet.

Författarna

Innehåll

Förord.....	3
Sammanfattning.....	6
Summary.....	7
1. Bakgrund	8
2. Syfte och mål	9
3. Teori.....	10
3.1 Grundläggande radarteknik	10
3.2 Ny teknik för att spåra läckor.....	11
3.3 Teknisk beskrivning.....	13
4. Material och metoder	14
4.1 Frekvensval	14
4.2 Framtagning av funktionsmodell	16
4.3 Mätningar med funktionsmodell	17
5. Resultat	19
5.1 Resultat av behovsanalys.....	19
5.2 Funktionsmodell	20
5.3 Mätresultat för transmissionsmätningar genom asfalt	25
5.4 Transmissionsberäkningar för täck- och fyllningsmaterial	26
5.5 Slutsatser och rekommendationer baserat på radarsignalens transmission	27
5.6 Analys och resultat av läckmätningar med mobilt mätsystem i Borås	27
5.7 Vattenläcka i testbädd med funktionsmodell 5 GHz	30
5.8 Kontrollerade läckor på testväg i Linköping	31
5.9 Verklig läcka i asfalterad gata.....	31
5.10 Dagvattenledning under asfalt, gatsten och gräsytor	33
5.11 Spillvatten	34
5.12 Systemverifierande mätning.....	34
5.13 Energibesparing	34

6. Slutsatser Projektresultat Fortsatt arbete	36
6.1 Slutsatser under projekttiden	36
6.2 Fortsatt arbete	36
7. Referenser.....	37
Bilaga 1 Behovsanalys.....	38
Bilaga 2 Transmissions- och frekvensstudie	44
Bilaga 3 Antennndesign	59

Sammanfattning

Att snabbt kunna hitta en vattenläcka är en framgångsfaktor för att minska kundpåverkan och resursslöseri. Läckor medför risk för erosion i ledningsgravar och tillskottsvatten till spillvattennätet. Med ny teknik finns förhoppningar om att kunna upptäcka små vattenläckor innan de blivit stora. I Sverige läcker 15–20 % av det vatten som produceras och distribueras ut ur nätet, vilket motsvarar en energikostnad av 150–200 GWh som går till spillo. Den största delen av läckaget är dolt, vilket betyder att vattnet dräneras bort och inte kommer upp till ytan. Det finns en potential att upptäcka 1 000 läckor med metoden vilket innebär en årlig energibesparing med 26 GWh. Globalt sett är dessa problem ännu större än i Sverige då dricksvatten är en begränsad resurs. I dagsläget används företrädesvis akustik för att leta läckor i rörledningar. Den metoden är dock inte applicerbar på alla typer av rör.

Syftet med projektet har varit att utvärdera om radartechniken kan detektera läckor för olika typer av rör samt att ta fram en funktionsmodell och med denna utföra och redovisa mätningar för att upptäcka vattenläckor på olika djup, marksammansättningar och ledningsslag.

Det är allmänt känt att ytan i ett vattenflöde kontinuerligt ändrar karaktär. Dess fluktuationer öppnar möjligheten för en helt ny radarbaserad detektionsmetod för läckage. Fluktuationerna ger upphov till varierande dopplerfrekvenser som indikerar vattenläcka. Alla trycksatta vattenledningar, även de med diameter över 300 mm, oavsett material, d.v.s. även PE-material, stål, gjutjärn och betongrör av större dimensioner, kan hantearas. Markdopplerradar är alltså en teknik vilken, till skillnad från den akustiska metoden, är oberoende av läckljudets förmåga till utbredning och kan således användas för att detektera läckor i alla trycksatta vattenledningar oavsett diameter och oavsett material.

Tester gjordes först med ett mobilt mätsystem i en autentisk miljö med kontrollerade läckor. Resultaten var lovande och visade på att principen fungerade. Därefter konstruerades och byggdes två funktionsmodeller på 2 och 5 GHz. Slutligen utfördes mätningar på flera olika typer av läckor och flöden med funktionsmodellerna.

Resultaten visar på att principen fungerar. Resultaten kan dock vara tvektiga i vissa fall. Fortsatt arbete behövs för att undersöka läckors karaktäristik så att optimal teknik och metodik för ett framtida mätsystem säkerställs.

Summary

Being able to quickly find a water leak is vital in order to reduce both customer impact and waste of resources. With new technology, our hope is now to detect small leaks before they become major. In Sweden about 15–20 % of the water produced and distributed leaks out of the distribution network. The energy needed to produce this amount of drinking water corresponds to 150–200 GWh. This method has a potential to locate 1 000 leaks and reduce the energy consumption by 26 GWh. Globally, these problems are even greater than in Sweden, since drinking water is a limited resource. Currently acoustic methods are primarily used to locate leaks in pipelines. However, these methods are limited, as they are not applicable to all types of pipes.

The aim of this project has been to evaluate whether radar technology can detect water leaks and also to develop a functional model with which it is possible to measure water fluctuations and hence detect leaks at different depths, in different soil compositions and in pipes of various sizes and materials.

It is commonly known that a water flow is constantly changing character. The water's surface fluctuations open the possibility of a new radar-based method for detection of leaks. The method's point of departure is the varying Doppler frequencies created by the fluctuations, which indicate water leakage. The method works for all pressurized water pipes with a diameter over 300 mm, whatever material, i.e. including PE material, steel, cast iron and concrete pipes of larger dimensions. Ground Doppler Radar is thus a technique which, unlike acoustic detection methods, is applicable when locating leaks in all pressurized water pipes regardless of location, diameter and material.

First, tests were made with mobile measuring equipment in an authentic environment with controlled leaks. The results were promising and showed that the principle worked. Thereafter, a functional radar leak equipment model was designed and built.

Finally, the construction of the functional model was presented. Furthermore, measurements on various leaks were done with two different functional models based on 2 and 5 GHz respectively.

The results show that the principle works. However, the results are in some cases ambiguous. More work is necessary to further examine the characteristics of different types of water leaks so that optimal technology and methodology for a future measurement system is ensured.

1. Bakgrund

I dagsläget finns det ingen heltäckande metod att detektera vattenläckor på rör av olika material och dimensioner samt rör som är lagade med plastinfällningar. Den vanligaste förekommande metoden, ”korrelatorn”, har begränsningar gällande plastledningar och rör av grövre diameter.

Energikostnaden för att producera och distribuera dricksvatten uppskattas till 500 GWh/år [1]. Ledningsnätet är av olika status och 15–20 % av det vattnet som produceras och distribueras läcker ut ur nätet vilket motsvarar en energikostnad av 150–200 GWh [2]. Detta innebär att en påtaglig besparing, både energi- och pengamässig är möjlig. Dagens huvudledningsnät är ca 62 000 km långt i Sverige och ca 25 % av materialet är av plast. Under 2011 hittades det i Sverige ca 5 000 läckor på huvudvattenvattennätet och 2 000 läckor på servisledningar. Servisledningar är ledningar som går mellan fastigheter och huvudvattennätet. Statistiken är hämtad från VASS, Svenskt Vattens driftstatistikssystem.

FOI har Sveriges största forskningsverksamhet inom radar och dess tillämpningar. Omsättningen uppgår till ca 75 miljoner kronor. Efter en intern förfråga om det är möjligt att detektera vattenrörelser under mark började funderingarna starta hur detta skulle kunna göras. Genom att använda radar på ett helt nytt sätt för markpenetration samt nyttja avancerad signalbehandling ansågs detta fullt möjligt. Att detektera vattenläckor från rör under mark kom snabbt upp som ett tillämpningsområde.

Fördelen med markradar är att den ger en exakt lokalisering vid läckage. Den kan även användas till att härleda orsaken till vattenflöde då vatten tränger upp eller in i fastigheter. Dessutom kan man även komma att kunna söka efter ev. läckage på plastledningar som kan vara svåra att felsöka. Även alla trycksatta vattenledningar med diameter över 300 mm, oavsett material, d.v.s. även PE-material, stål, gjutjärn och kanske framförallt betongrör av större dimensioner som är svåra att läcksöka går metoden att användas på.

I en inom projektet utförd behovsanalys har kunskap om läckor och var behovet av ny läcksökningsutrustning är störst sammanställts. De vanligaste läckorna vilka är föremål för lokalisering ligger på mellan 100–200 l/minut. Det är viktigast att utrustningen klarar mindre till medelstora läckor mellan 10–100 l/minut då större läckor kan detekteras med andra metoder. Det är även viktigt att metoden fungerar på ledningar av plastmaterial som polyeten och polyvinylklorid samt på ledningar med större dimensioner där andra metoder fungerar dåligt. Utrustningen ska ha en säkerställd funktion under skiftande markförhållanden, djup och fyllningsmaterial.

2. Syfte och mål

Syftet med projektet var att utvärdera om radartekniken kan detektera läckor för olika typer av rör samt att ta fram en funktionsmodell och med denna utföra och redovisa mätningar för att upptäcka vattenläckor på olika djup, marksammansättningar och ledningsslag. En funktionsmodell är en mätutrustning som inte är anpassad för operativ verksamhet utan enbart skall verifiera och säkerställa att efterfrågade effekter förekommer eller uppstår. I detta fall dopplerfrekvenser vid vattenläcka.

Då metoden fungerar, kan nästa steg vara att ta fram demonstrator. En demonstrator är en enhet som har alla efterfrågade funktioner och kan användas operativt i fält men är ej produktionsanpassad. Att ta fram en demonstrator ingår inte i detta projekt.

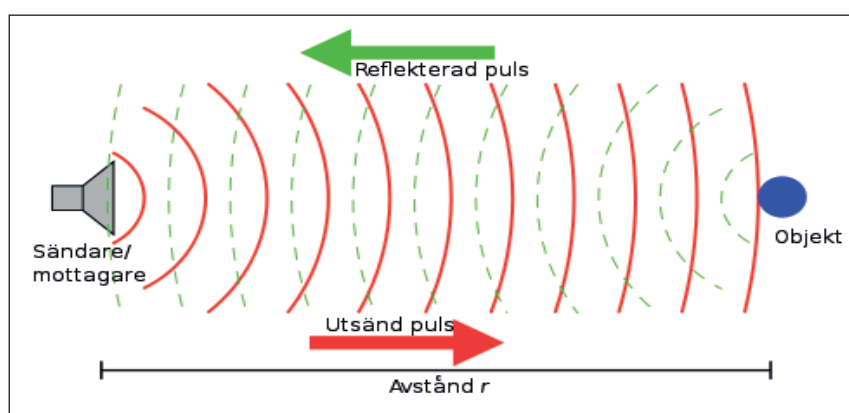
3. Teori

3.1 Grundläggande radarteknik

Detta avsnitt beskriver översiktligt grundläggande radarteknik. Radar (RAdio Detction And Ranging) som vi idag uppfattar den utvecklades under 1930-talet. Under andra världskriget fick radarn sitt stora genombrott.

3.1.1. Radar allmänt

Principen för en radar är relativt enkel. En sändare skickar ut en puls på en viss frekvens. När denna puls träffar ett mål reflekteras en viss del av signalen och strålar tillbaka till radarns mottagare. Se figur 3.1.1.



Figur 3.1.1 Allmän princip för radar

Styrkan på den mottagna signalen beror på:

- Utsänd effekt
- Radarns antenner
- Avståndet till målet
- Målets reflekterande egenskaper
- Dämpningen i mediet mellan radarn och målet

En radar har oftast speciella antenner som koncentrerar den utsända signalen i en liten väldefinierad rymdvinkel. På så sätt får man en väl bestämd riktning till målet.

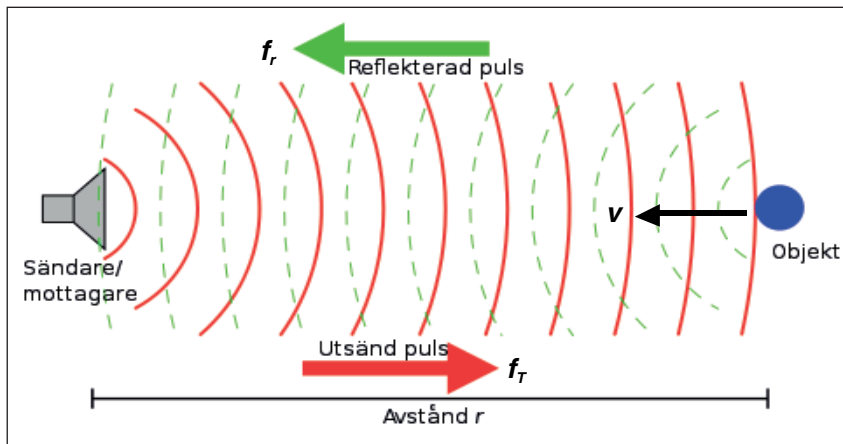
Dessutom skickar radarn oftast ut en kort väldefinierad puls. Om man vet tidsskillnaden mellan utsänd och mottagen puls kan avståndet till målet beräknas enligt ekvation 3.1.

$$s = 2 \cdot v \cdot t \quad (\text{ekv. 3.1})$$

där s är avståndet, v pulsens hastighet (i luft $\approx 3 \cdot 10^8$ m/s) och t tiden mellan sändning och mottagning. Om det exempelvis tar 0,00001 s från sändning till mottagning i luft är avståndet till målet ca 6 km.

3.1.2 Dopplerradar

Dopplerradar är en effektiv detekteringsmetod mot rörliga mål eftersom man kan filtrera bort fasta ekon och därmed höja dynamiken i systemet. Effekten blir att det går att detektera mindre mål relativt den stillastående bakgrunden. När den utsända radarpulsen träffar ett mål som rör sig mot eller från radarn så får den reflekterade signalen en annan frekvens än den utsända. Om målet rör sig mot radarn blir den reflekterade signalens frekvens högre och om målet rör sig från radarn blir den reflekterade signalens frekvens lägre. Det är samma effekt som man kan höra om ett signalerande tåg närmar sig, passerar och fjärrar sig. Se figur 3.1.2.



Figur 3.1.2 Princip för dopplerradar

Den frekvensskillnad man får beror på hastighetsskillnaden mellan radarn och det rörliga målet. Om den av radarn utsända frekvensen är f_T och målets hastighet v_r blir frekvensskillnaden f_d enligt ekvation 3.2.

$$f_d = 2 f_T (v_r / c) \quad (\text{ekv. 3.2})$$

Om exempelvis ett mål rör sig med en hastighet på 10 m/s mot en radar som har en arbetsfrekvens på 2 GHz, blir frekvensskillnaden ca 13 Hz.

3.2 Ny teknik för att spåra läckor

Föreliggande teknik avser att detektera läckor och flöden med hjälp av dopplerradar. Främst avser metoden att spåra läckor och dess avrinning. I dagsläget används spårgas och akustik för att leta läckor i rörledningar. Dessa metoder är dock inte applicerbara till alla typer av rör.

3.2.1 Egenskaper som möjliggör idén

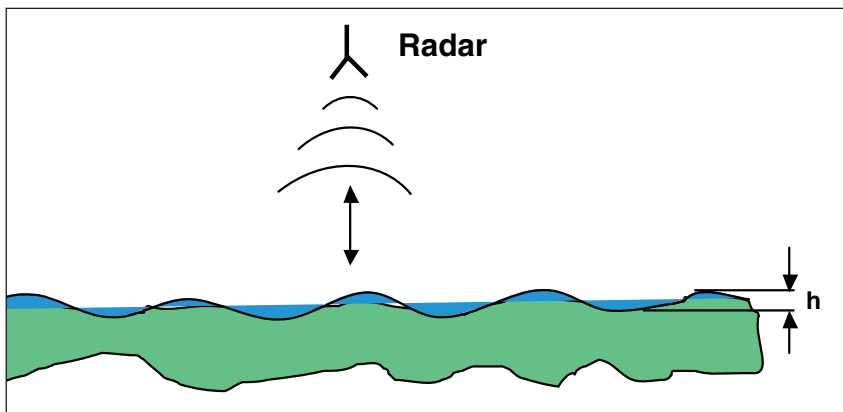
Det är allmänt känt att ytan i vattenflöden kontinuerligt ändrar karaktär. Dessa fluktuationer i vertikalled öppnar möjligheten för detektion av flöde. Figur 3.2 1. ger exempel på vattenytans förmåga att ändra karaktär.

För att erhålla ett dopplerskift (förändring) krävs en rörelse i vertikalled, d.v.s. att vattenytan (reflektorn) rör sig relativt radarn. Tanken är att varierande höjdförändringar i vattenytan ger samma effekt som ett objekt



Figur 3.2.1 Vattenytans karaktär ändras kontinuerligt

som rör sig fram och tillbaka gentemot radarn och således ger upphov till varierande dopplereffrekvenser, som motsvarar hastighetsvariationer. Se figur 3.2.2.



Figur 3.2.2 Vattenytans fluktuation ger upphov till en frekvensvariation som motsvarar en hastighet i vertikalled.

3.2.2 Olika doppler-baserade metoder för detektion av vattenflöden

Det finns två sätt att detektera vatten med hjälp av dopplerradar nämligen mängd eller flöde. Principen för detektion av vatten med hjälp av mängd baseras på att vattennivån inte är konstant utan under en längre tid (ett antal minuter) kommer att ändras beroende på storleken på tillflödet och avrinningen från vattensamlingen.

Den andra metoden, som uppfinningen baseras på, bygger i huvudsak på att vattenflödet i kombination med bottenstrukturen ger upphov till fluktuationer i vattenytan. Vattenflödet är i sin tur en kombination av bl.a. vattenmängd, djup, flödeshastighet. Sammantaget ger dessa parametrar upphov till hastighetsfluktuationer i vertikalplanet från långsamma rörelser i storleksordning 0,01 m/s till mycket snabba förändringar i storleksordning 5–10 m/s.

3.2.3 Lokalisering av läcka, dess utbredning och avrinning

Genom att följa rörledningar och mäta vid konstanta avståndsintervall och att radarfrekvensen är anpassad för att uppnå erforderligt nedträngningsdjup kan man spåra läckage från alla typer av rör.

Vidare kan man med tekniken lokalisera avrinning från området om sådan förekommer.

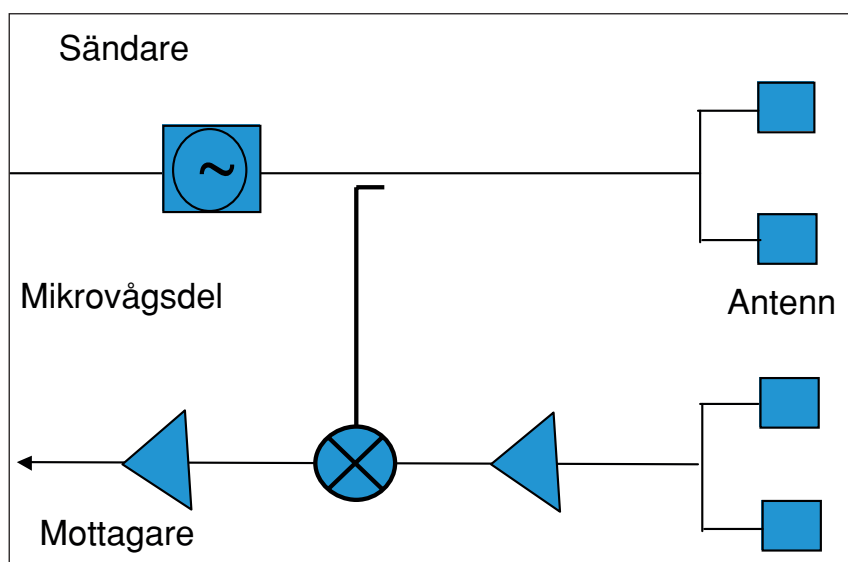
Det vill säga att utan att gräva i marken kan man få en klar bild av läckan och dess avrinning vilket minimerar kostnaderna för att åtgärda felet.

3.3 Teknisk beskrivning

Detektionen baseras på förändring av dopplersignalen men kan kombineras med frekvensdetektion för att förfinas mätmetoden. Därmed möjliggörs detektion av för ögat knappt märkbara flöden upp till kraftiga flöden.

3.3.1 Antenn och mikrovågsdel

Utrustningen är enkel och avviker inte från konventionella standardlösningar. Se figur 3.3.1.



Figur 3.3.1 Antenn och mikrovågsdel.

Den parameter som har en central betydelse i mikrovågsdelen är radarfrekvensen. Denna måste anpassas för att uppnå tillräckligt nedträngningsdjup för att kunna spåra läckage och flöde. Generellt ligger frekvensen mellan 800 MHz till 10 GHz. Frekvensen anpassas till hur djupt läckaget ligger i kombination med markförhållanden i området.

3.3.2 Bearbetning av data

För att både klara långsamma och snabba förlopp sker signalbehandlingen i tidsplanet. För mycket snabba förlopp går det även att utnyttja frekvensplanet för att förfinas signalbehandlingen.

4. Material och metoder

4.1 Frekvensval

En avgörande designparameter för ett radarsystem är dess arbetsfrekvens. Som stöd i detta val har kunskap från tidigare utförda transmissionsmätningar inhämtats och transmissionsberäkningar utförts. Dessutom har radarmätningar på vattenläckor utförts med olika radarfrekvenser.

4.1.1 Markens radaregenskaper

Hur mycket en radarvåg dämpas i materialet beror främst på dess dielektriska egenskaper (materials elektriska egenskaper som oönskade förluster och i vissa fall ändrade frekvensegenskaper) och beskrivs av dess permittivitet. Permittivitet (även tidigare benämnt kapacitivitet eller dielektricitetskonstant) betecknas ϵ . Generellt är permittiviteten ett komplext tal ($\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$) där imaginärdelen ϵ'' beskriver materialets elektriska förluster. Permittiviteten för vakuum är $\epsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$. Vanligen anges för ett material dess relativa permittivitet ϵ_r , som är förhållandet mellan materialets permittivitet och permittiviteten för vakuum.

Materialegenskaperna hos täck- och fyllnadsmaterialen bestämmer vilken transmission man får för en viss frekvens. I de fall fyllnadsmaterialet och djup inte är känt anpassas utrustningen för det svåraste scenariot, vilket innebär att möjligheten att upptäcka små läckor minskar. Generellt gäller att ju högre vatteninnehåll, desto högre förluster och därmed sämre transmission. För asfalt finns mätdata tillgängligt. För fyllnadsmaterial har transmissionen beräknats utifrån parametervärden på materialegenskaper. För mer utförlig beskrivning se bilaga 2.

I en tidigare studie (se Bilaga 2) har mätningar på asfalt genomförts av FOI. Asfalt är intressant eftersom det i stor utsträckning används som beläggning av gator och vägar. I många fall läggs lager på lager. Hur detta påverkar transmissionen är nödvändigt att förstå för att kunna dimensionera en funktionsmodell. Reflektionsmätningar på två olika asfaltbitar (ca 50 · 50 cm) har gjorts med och utan metallbackning. Metallbackning innebär att en metall-



Figur 4.1.1
Foto på
provbitarna

platta placeras under asfalten. Detta görs för att få svar på vid vilken frekvens, utsänd effekt reflekteras tillbaka, utan att nämnvärt dämpas. Mätningen ger alltså svar på viken frekvens som maximalt bör användas vid mätningar på asfalterade vägar och gator. I figur 4.1.1 visas ett foto på provbitarna.

Transmissionsmätningar för fyllnadsmaterial och täckmaterial saknas, men med data på ingående material kan transmissionen beräknas. Beräkningar har gjorts för frekvenser mellan 1–3 GHz.

4.1.2 Läckmätningar med mobilt mätsystem

För att kartlägga dopplerkaraktistik för en vattenläcka gjordes mätningar med ett mobilt radarsystem. Försöken utfördes på en försöksplats i Borås med kända och styrbara vattenläckor. Läckorna befann sig dels under ett parkområde med gräsyta och under en asfalterad plan yta. Ledningarna var trycksatta metalledningar på 1,6 m djup. Läckans storlek under asfaltsytan var 60 l/min och under gräsytan var läckaget 40 l/min. Fotografier från försöksområdet visas i figur 4.1.2. Det radarsystem som användes är normalt placerat på FOI:s radarmätplats Lilla Gåra. Med detta system kan man inte direkt avläsa resultat utan dessa tas fram i en efterföljande analys.



Figur 4.1.2 Asfaltplan respektive gräsyta med mätpunkter markerade.

Radarn var ett flexibelt försökssystem som normalt är stationerat på FOI:s radarmätplats Lilla Gåra. Mätningarna genomfördes i ett brett frekvensband som i stort täckte in 1–5 GHz. Stegad frekvens användes i steg om 2,0 MHz och antalet steg var 2001. Mättiden var 3 sek. Som antenn användes hornantennerna med en bandbredd på 2–18 GHz. Polariseringen var parallell. Mätsystemet kalibreras med ett känt referensmål, s.k. kalibreringsreflektor som i detta fall varen trihedral med sidan 47 cm. Mätningar utfördes på ett stort antal mätpunkter. I figur 4.1.3 ses antennerna utplacerade på en mätpunkt.



Figur 4.1.3
Hornantennerna placerade på mätpunkt.

Radarsystemet var placerat i en mätbuss (se figur 4.1.4) ca 7 m från närmaste mätpunkt. Metallplattor var uppställda framför fordonet för att ha en ”dopplerskyddad” plats för ”fältoperatören”. Mätningar utfördes på både asfaltplan och gräsplan med respektive utan läcka.



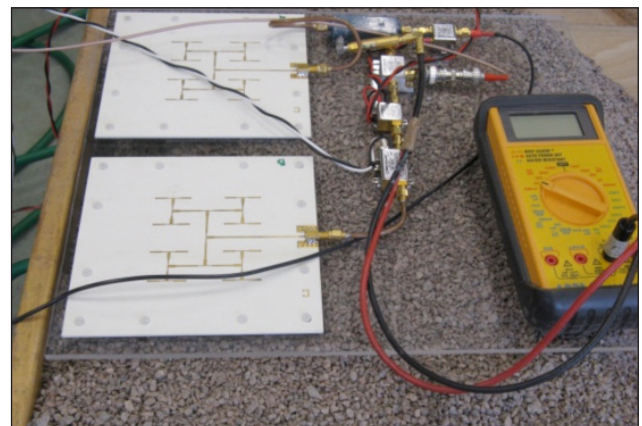
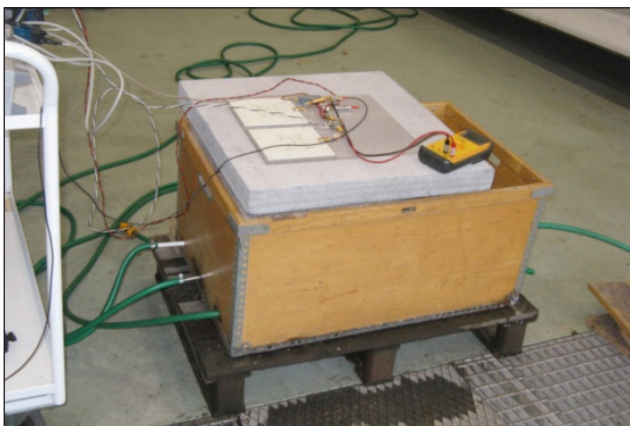
Figur 4.1.4 Vy från mätbuss respektive skyddad plats för fältoperatör.

4.2 Framtagning av funktionsmodell

En funktionsmodell är en mätutrustning som inte är anpassad för operativ verksamhet utan enbart skall verifiera och säkerställa att efterfrågade effekter förekommer eller uppstår. I detta fall dopplerfrekvenser vid vattenläcka. Som underlag till framtagandet av funktionsmodellen har det utförts en studie av radarsignalens genomträngning i mark samt inledande doppler-radarmätningar på ett försöksområde i Borås på kända läckor.

4.2.1 Vattenläcka i testbädd

För att verifiera funktionsmodellerna i ett initialt skede i uppbyggnadsfasen, gjordes tester i provbädd. Se bild figur 4.2.1. Bädden var uppbyggd i en dränerad träbox med genomgående rör för olika scenarier. Det röret som användes vid försöken hade ett hål med diametern 3 mm varigenom läckaget simulerades. Fyllningen bestod av stenkross. För att efterlikna djupt liggande läckor användes radarabsorberande material. Då dess absorberande egenskap är känt ges en uppfattning om mätsystemets dynamik som i sin tur indikerar möjligt detektionsdjup.



Figur 4.2.1 Läckage i testbädd fylld med stenkross, läckdiametern var 3 mm, frekvens 5 GHz. Med och utan radarabsorberande material.

4.2.2 Verkliga kontrollerade läckor

I och med att testfältet i Borås lades ner beslutade Tekniska Verken i Linköping att bygga en lokalt belägen testväg med två kontrollerbara läckor. Läckornas djup var på 1,1 m respektive 1,6 m. Beläggningen på vägen var grus respektive asfalt. Vattenröret var nu avsågat och hade en läckdiameter på 40 mm. Marktypen utanför ledningsgraven var kompakt lera. Se figur 4.2.2.



Figur 4.2.2 Läckor i grus respektive asfalterad väg, djup 1,1 m och 1,6 m, läckdiameter 40 mm.

Ett stort antal mätningar vid olika väderleksförhållanden har genomförts på platsen. Från torr och blöt till frusen mark.

4.3 Mätningar med funktionsmodell

4.3.1 Verklig vattenläcka i asfalterad gata

Mätningen avsåg att dokumentera och analysera olika faser av en vattenläckas dopplerkaraktäristik. Ledningen låg på ett djup av 1,7 m. Mätningen pågick under 4 minuter och 40 sekunder. Vattenläckan initierades efter 25 sekunder och avbröts efter 2 minuter och 20 sekunder. Figur 4.3.1 visar mätutrustningen, en dopplerradar med en centerfrekvens på 2 GHz.



Figur 4.3.1
Dopplerradar för registrering av vattenrörelser i asfalterad gata.

4.3.2 Dagvattenledning under asfalt respektive gatsten

Mätningen avsåg att dokumentera och analysera dagvattens dopplerkaraktäristik vid olika markbeläggningar. Se figur 4.3.2. Rörledningen låg relativt grunt cirka 0,5 m under markytan. Mätningarna på dagvattnet genomfördes på mark ytbelagd med asfalt respektive gatsten.



Bild 4.3.2 Olika markbeläggningar vid registrering av dagvatten.

4.3.3 Mätning mot spillvattenledning

Mätningen avsåg att dokumentera och analysera spillvattnets dopplerkaraktäristik. Mätningar genomfördes genom kulvert på RV-verket i Norrköping och djupt liggande ledningar i Norrköping respektive Linköping.

5. Resultat

5.1 Resultat av behovsanalys

Här redovisas resultat från behovsanalysen [3]. Rapporten kan i sin helhet ses i bilaga 1.

5.1.1 Sökområde för läcksökningsutrustning

Följande kriterier är viktigast att beakta vid utveckling av en ny läcksökningsutrustning;

- Läckutrustningen ska i första hand fungera för vattenläckor och i andra hand för läckor på trycksatta spilledningar. För läckor i självfallssystem kan annan teknik som filmning användas.
- Det viktigaste är att den fungerar på plastledningar, PE och PVC. På järnledningar av mindre dimensioner finns annan teknik som fungerar.
- Den nya utrustningen bör även fungera på större dimensioner, > 300 mm, oavsett rörmateriel. För dessa ledningar är läckljudets spridning begränsad i ledningen och därmed möjligheten att upptäcka eller lokalisera med korrelator.
- Ett annat användningsområde för utrustningen är värmeslingor på golv och i gator. I gatorna ligger ledningarna på mellan 15-30 cm djup och är inbäddade i sand eller grus.
- Ytterligare ett användningsområde är ledningar i LTA-områden. Här kan det dock finnas samma begränsningar som med fjärrvärme eftersom ledningarna är isolerade och läckan sprids i isoleringen.
- Ett område på mellan 100–300 m ska kunna sökas av. Det är sträckan som oftast är mellan två ventiler. Ledningens exakta position är svår att bestämma men ofta går det att inom 1 m när gå ovanför ledningen vid en läcksökning.
- När läckan pekats ut ska det vara med max 2–3 m felmarginal. Då är det lätt att gräva fram ledningen och hitta var ledningen är trasig.
- Utrustningen ska fungera även när tjälen går ner i marken. Under vinterperioden går tjälen i gatumiljö ofta ner till mellan 0,8–1,4 m.

5.1.2 Övriga kriterier

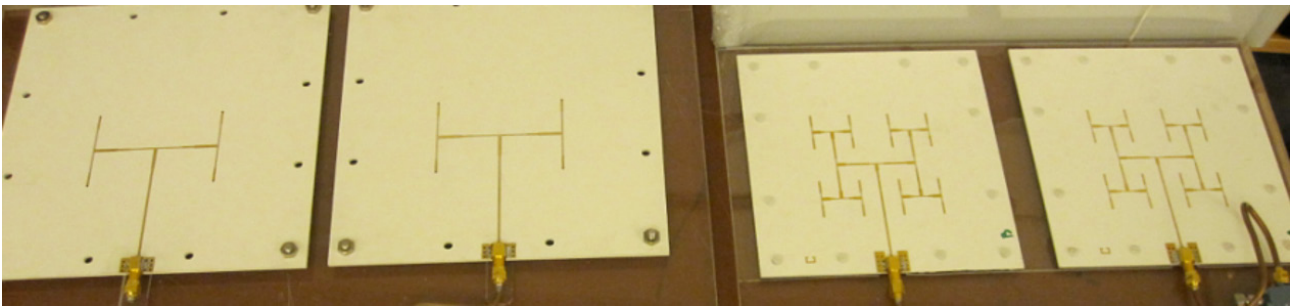
- Utrustningen bör inte väga mer än 10 kg.
- Den bör inte vara känslig eftersom den ska kunna förvaras och transporteras i en bil med mycket annan utrustning. Den ska även vara tålig för fukt och kyla. Även ev. känslighet för andra förekommande störkällor för funktionen bör utvärderas.
- När en läcka inträffat på en ledning som ligger i gatan så skulle det kunna vara bra att utrustningen går att rulla fram på marken.
- Inom vissa områden kan det även finnas fjärrvärmeledningar och gasrör som kan påverka läcksökningen. Fjärrvärmerören ligger ofta en meter under marknivå. Gamla ledningar är av järn och är ingjutna i betongkultvertar. Nya ledningar består av isolerade järnrör med ett ytterhölje

av PE. Fjärrvärmeledningarnas läge finns inte i vår karta men går att ta reda på. Gasledningarna ligger på mellan 1–1,5 m djup. Dess placering är inte känd.

- Det är viktigt att fastställa funktionen under skiftande markförhållanden, t.ex. i vilken omfattning prestanda påverkas av fyllning som lera resp. sand eller tjäle.
- Batterier för strömförsörjning bör klara minst åtta timmars kontinuerlig drift.

5.2 Funktionsmodell

Två funktionsmodeller är framtagna. Detta gjordes för att kunna undersöka vilken frekvens som är mest lämpad för att hitta små vattenrörelser på flera meters djup i marken. Lägre frekvenser ger bättre penetration men samtidigt minskad känsligheten för små rörelser. Önskemålet är att hitta en så hög frekvens som möjligt som ger tillräcklig nedträngning i marken. Ytterligare en nackdel med att använda lägre frekvenser är att antennerna och därmed hela systemet blir större, se figur 5.2.1. För utförligare information om antenner och antenntdesign, se bilaga 3.

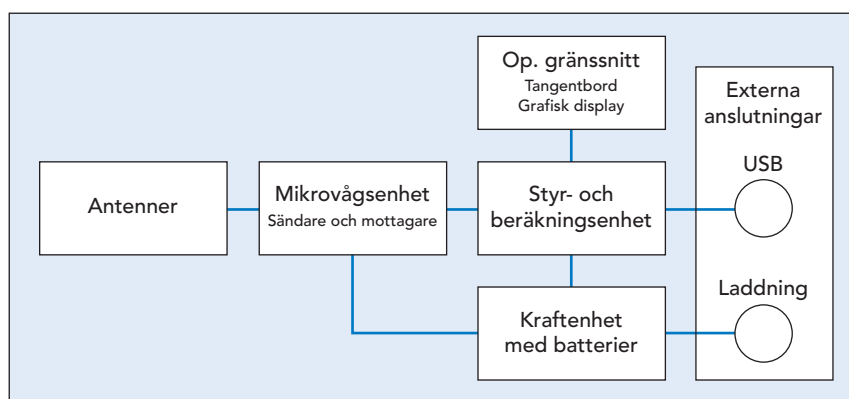


Figur 5.2.1 De två antennen bredvid varandra. 2GHz antennen till vänster och 5 GHz antennen till höger.

Systemen är uppbyggda på liknande sätt med följande systemkomponenter. Se blockschema figur 5.2.2.

- Mikrovågsenhet
- Antenner
- Styr- och beräkningsenhet
- Operatörsgränssnitt med tangentbord och grafisk display
- Kraftenhet med batteri
- Kapsling och övrig mekanik
- Externa anslutningar för USB och kraft

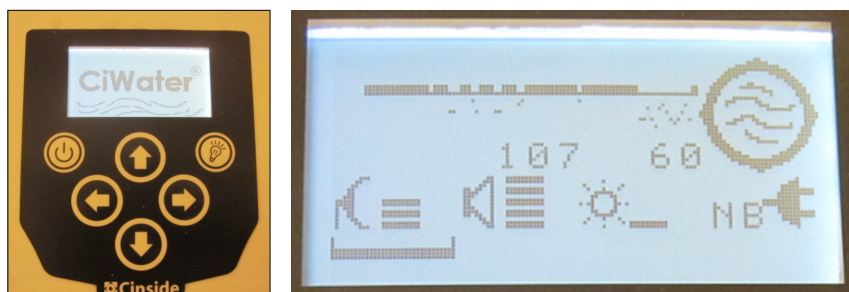
Båda funktionsmodellerna har flera gemensamma systemkomponenter i grunden. De stora skillnaderna ligger i mikrovågsenheten, antennerna och den mekaniska uppbyggnaden.



Figur 5.2.2 Blockdiagram för en funktionsmodell.

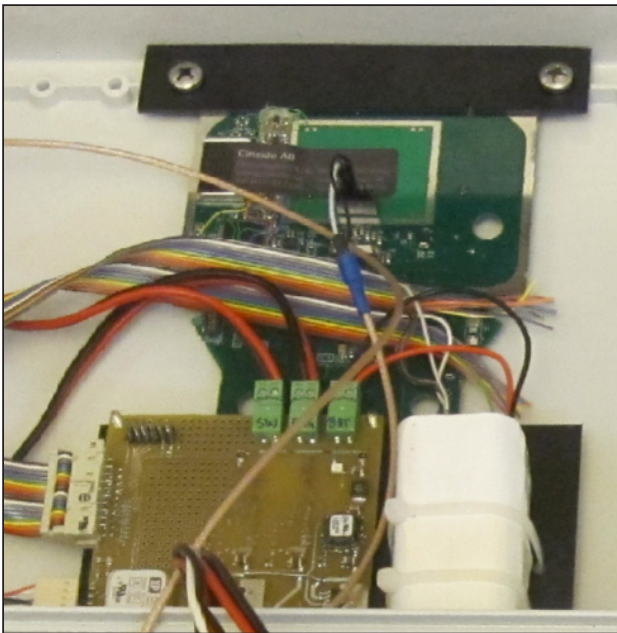
5.2.1 Hårdvara

Funktionsmodellerna har flera gemensamma systemkomponenter i grunden. Alla systemdelar är handgjorda och inte tillverkade vid samma tillfälle men stora likheter finns för Styr- och beräkningsenhet, Operatörsgränssnitt med tangentbord och grafisk display samt Kraftenhet med batteri. I Figur 5.2.6 Antennerna för 2 GHz monterade i låda. 5.2.3 kan vi se tangentbord och display. Menysystemet är enkelt med tre olika menyer som man navigerar mellan med vänster- och högerpil. Operatören flyttar markören till önskad parameter och kan därefter ändra värdet med upp- och nerpil. Displayen i vänstra bilden visar startskärmen och den högra visar meny 1 med parametern känslighet vald med värde 3 (av 5). Cirkeln med vågor indikerar att rörelse är detekterad, annars visas ett OK. Grafen upptill visar rörelseaktivitet den senaste minuten.

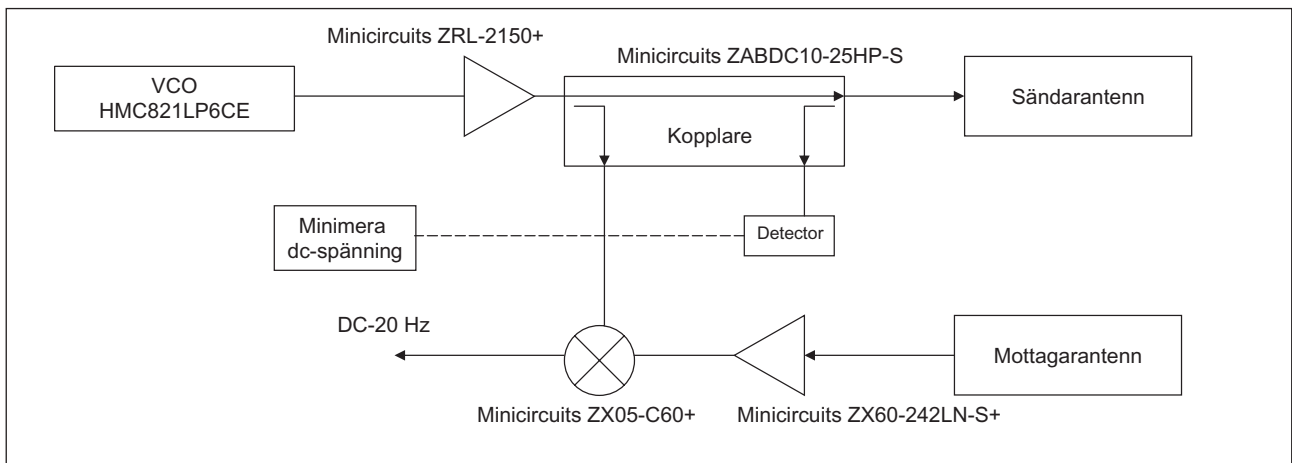


Figur 5.2.3 Operatörsgränssnitt, grafisk display och tangentbord.
Display visar inställningar och utslag.

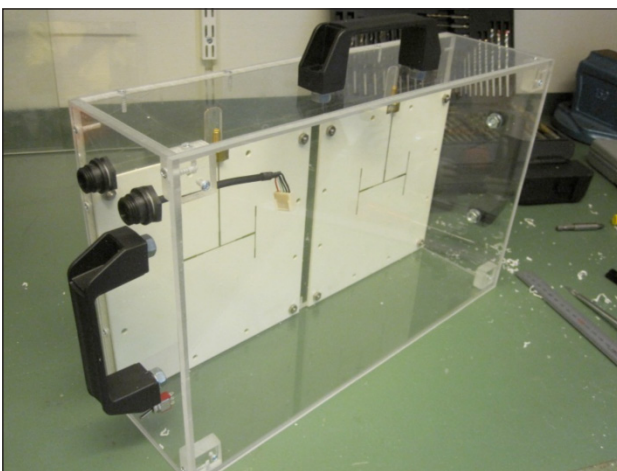
I figur 5.2.4 ser vi de gemensamma delarna i CiWater, upptill styrenhet (grönt kort), nedtill kraftenhet (brunt kort) med laddningsbart batteri (vit). Kraftenheten skapar de olika spänningar som behövs i systemet från den varierande batterispänningen. Totalt genereras 4 noggrant stabiliserade spänningar. I figurerna 5.2.5 till 5.2.10 presenteras mikrovågsenheterna för de bägge systemen.



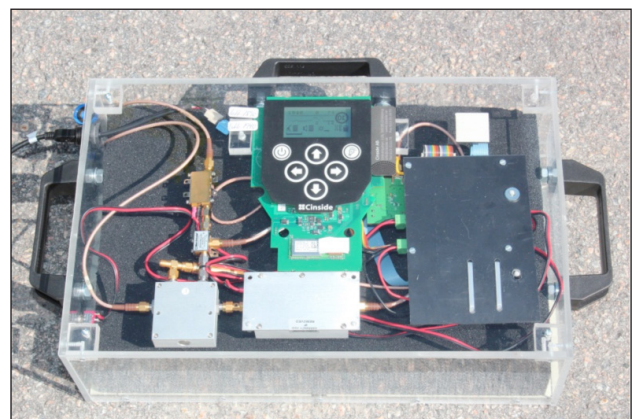
Figur 5.2.4 Styrenehet upptill och kraftenhet nertill.



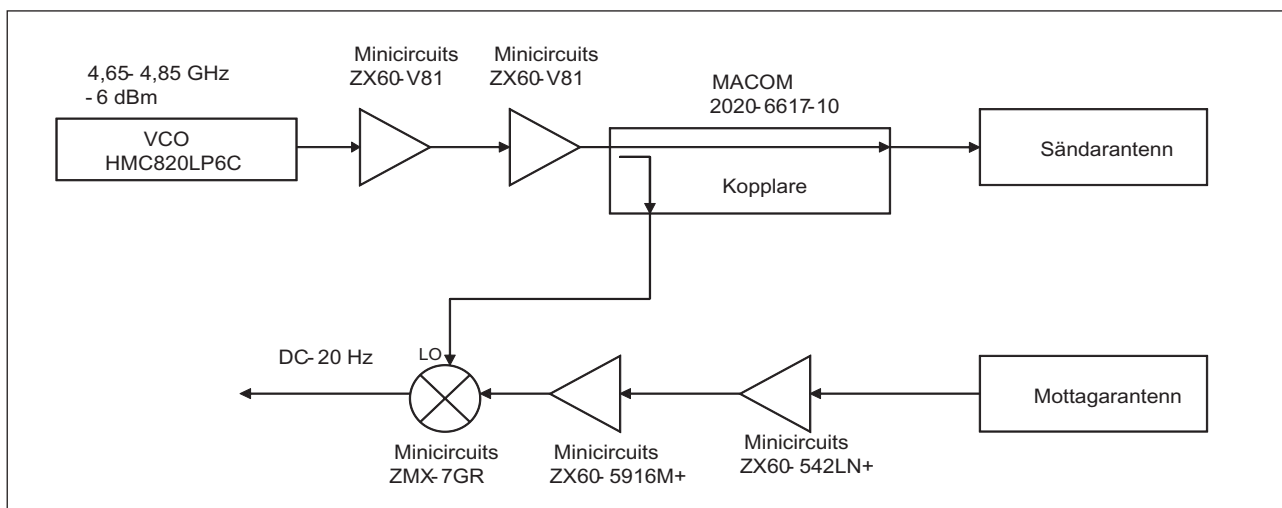
Figur 5.2.5 Blockdiagram för 2 GHz mikrovågsenhet.



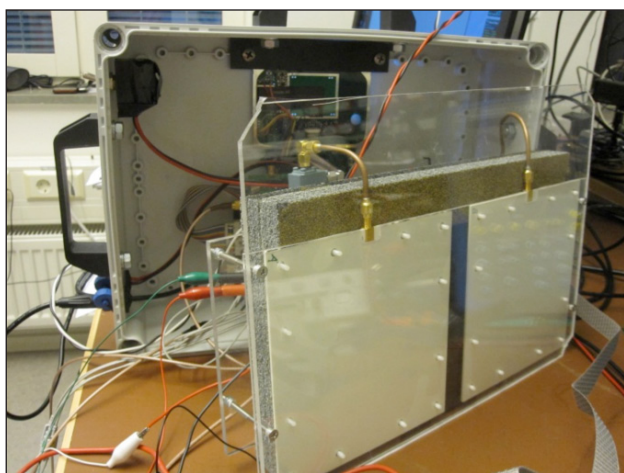
Figur 5.2.6 Antennerna för 2 GHz monterade i låda.



Figur 5.2.7 CiWater 2 GHz liggande på marken i en mätsituation.



Figur 5.2.8 Blockdiagram för 5 GHz version.



Figur 5.2.9 Antenner och innanmäte i CiWater 5 GHz.



Figur 5.2.10 CiWater 5 GHz.

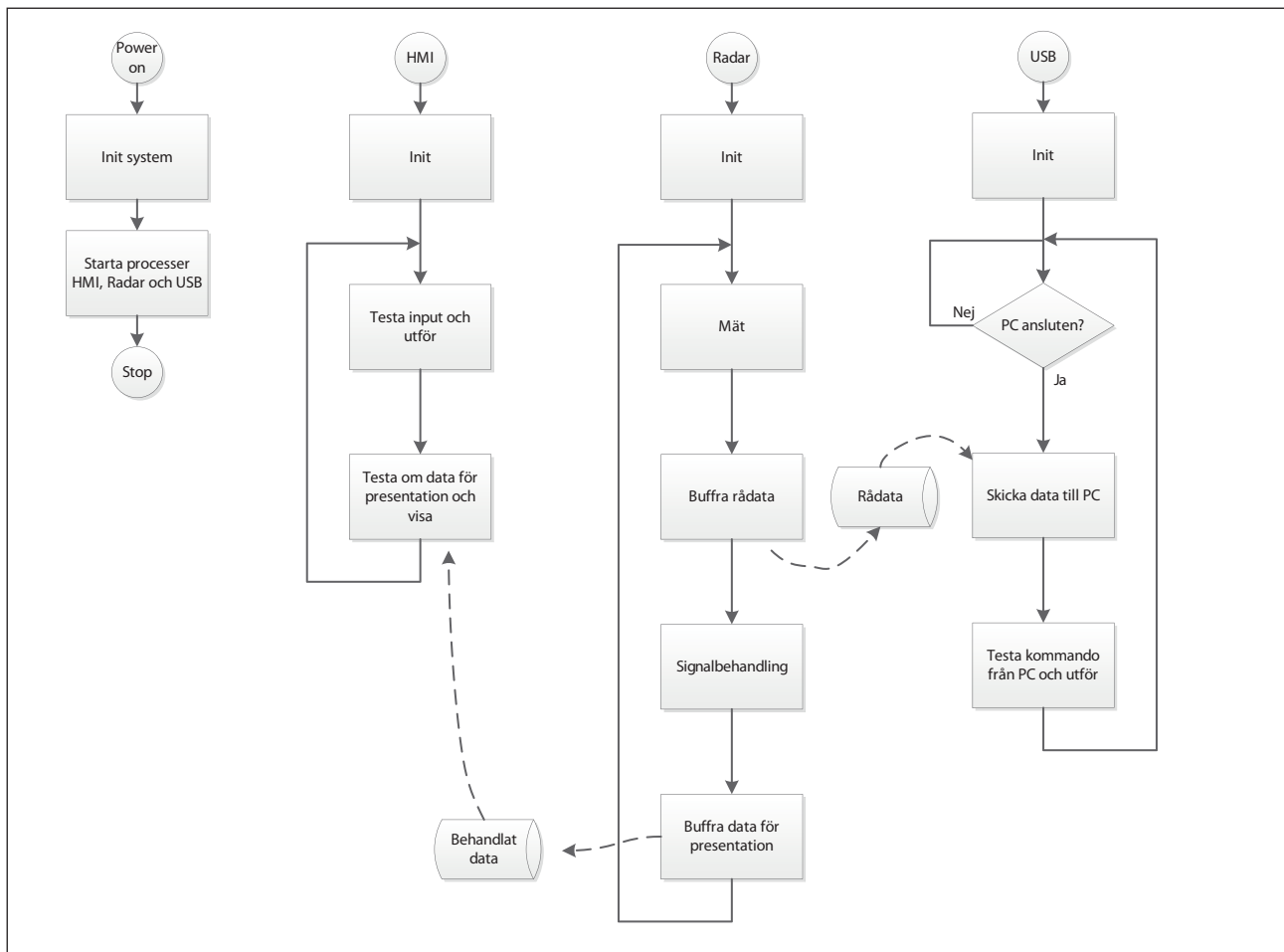
5.2.2 Mjukvara

Två programpaket är framtagna i projektet. Det ena är programmet i CiWater-funktionsmodellen och ett Windowsprogram för att lagra och presentera data vid mätningar.

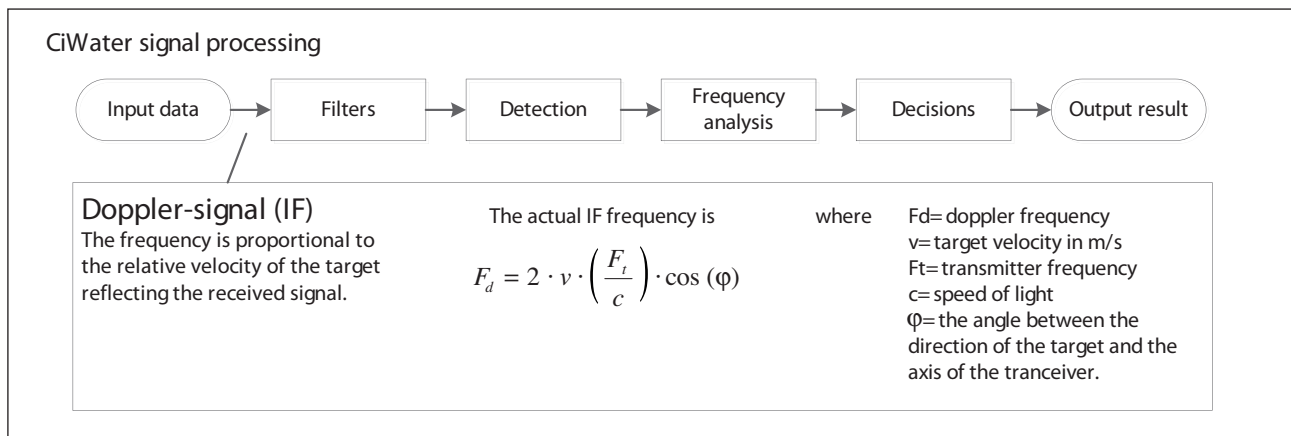
Programmet i CiWater (firmware, som program i inbyggda system kallas) sköter om tre huvudsysslor (processer). Programmet börjar med att ställa in alla parametrar och därefter starta de tre processerna. HMI sköter operatörskommunikationen, Radar läser in data från radarn, sparar rådata för behandling och ev. vidareändring till PC, behandlar data, USB sköter kommunikationen med PC. Hur processerna interagerar visas i figur 5.2.11.

Signalbehandlingen beskrivs principiellt då utveckling pågår och förbättringar införs kontinuerligt. En översikt fås i figur 5.2.12.

Data behandlas flera gånger per sekund. Då bearbetas ett datablock som kan sträcka sig en eller flera sekunder bakåt i tiden. Datat vi får in representerar hastighet på det eller de objekt som befunnit sig inom radarns "synfält".



Figur 5.2.11 Systemprogram i CiWater.



Figur 5.2.12 Signalbehandling i CiWater.

Stegen beskrivs kortfattat nedan

1. Filter, ska ta bort oönskade signaler. Detta kan vara lättare sagt än gjort men rörelser som är snabbare eller långsammare än de vi är intresserade av kan undertryckas.
2. Detektion, vi vill först avgöra om någonting rör sig överhuvudtaget.
3. Frekvensanalys, här börjar detektivarbetet. Med erfarenhet från olika mätningar kan vi lära upp systemet att leta efter signifikanta signaturer.

4. Beslut, beroende på hur bra och exakt frekvensanalysen blir så blir också besluten enklare att ta och minimera felaktiga slutledningar till operatören.

Med en PC ansluten kan man lagra data från en mätning för senare analys. Detta är ovärderligt under utvecklingsarbetet. En ytterligare faktor är att operatören kan observera mätresultaten flera meter ifrån mätutrustningen och minska risken att påverka mätningen. En bild på extern PC ansluten till CiWater visas i figur 5.2.13.



Figur 5.2.13 PC med presentations- och datalagringsprogram.

5.3 Mätresultat för transmissionsmätningar genom asfalt

Ur mätningarna på asfaltproven som har gjorts inom frekvensområdet 2–20 GHz, kan man urskilja tre olika områden.

- 2–5 GHz
- 5–12 GHz
- 12–20 GHz

I frekvensområde 2–5 GHz visar mätningar att asfaltproven verkar vara relativt transparenta och man kan då anta att man har en relativt låg transmissionsförlust genom asfaltslagret.

I frekvensområde 5–12 GHz har metallbackningen mindre inverkan och mätningar visar en oscillerande karaktär. Ur detta kan antas att man har en reflektion från ytan som tillsammans med den transmitterade och reflekterade signalen från undersidan interfererar och ger upphov till den oscillerande signalen. Frekvensen på oscilleringen motsvarar två lager av material med en permittivitet mellan 4–5 och en tjocklek på mellan 40–50 mm. Visserligen får man en viss transmission, men samtidigt en reflektion från ytan, som innebär att mindre signal tar sig igenom ytskiktet.

I frekvensområde 12–20 GHz har metallbackningen ännu mindre inverkan än för lägre frekvenser och den oscillerande karaktären är långsammare.

Frekvensen på oscilleringen motsvarar ett lager av material med en permittivitet runt 4 och en tjocklek på ca 40 mm. Ur detta kan antas att man har en reflektion från ytan som tillsammans med den transmitterade och reflekterade signalen från undersidan av det översta skiktet interfererar och ger upphov till den oscillerande signalen. Visserligen får man en viss transmission, men samtidigt en så hög reflektion från ytan, som innebär att endast signalen kan ta sig igenom det översta ytskiktet.

5.4 Transmissionsberäkningar för täck- och fyllningsmaterial

Transmissionsmätningar för fyllnadsmaterial och täckmaterial saknas, men med data på ingående material kan transmissionen beräknas. Beräkningar har gjorts för frekvenser mellan 1-3 GHz. Beräkningarna har gjorts med några olika fyllnadsmaterial med antagna materialegenskaper. Se tabell 5.4.1.

Tabell 5.4.1 Beräkningsfall för transmissionsberäkningar

Beräkningsfall	Skikt/fyllnadsmaterial	Antagen permittivitet
1	Enbart asfaltsskikt	$4,4 + 0,1i$
2	Torrt grus	$8 + 0,2i$
3	Blött grus	$8 + 0,5i$
4	Blött grus med täckskikt av asfalt	$8 + 0,5i$ $4,4 + 0,1i$
5	Blöt lera	$33 + 5i$

För beräkningsfall 1 med enbart ett asfaltsskikt fås relativt låg transmissionsdämpning beroende på låga förluster samt en tjocklek som är av samma storleksordning som våglängden. Detta stämmer väl med mätdata.

För beräkningsfall 2 med en 1,5 m djup ledningsgrav bestående av torrt grus fås en transmissionsdämpning på ca 20 dB (envägs) vid 2 GHz. Man får dessutom ökande dämpning med en ökande frekvens.

För beräkningsfall 3 med en 1,5 m djup ledningsgrav bestående av fuktigt grus fås en transmissionsdämpning på ca 50 dB (envägs) vid 2 GHz. Fuktighet/vatteninnehåll har en stor betydelse för transmissionsegenskaperna. Man får dessutom ökande dämpning med en ökande frekvens.

För Beräkningsfall 4 med en 1,5 m djup ledningsgrav bestående av fuktigt grus med ett 15 cm tjockt täckskikt av asfalt fås en dämpning som är marginellt större än fallet 3 utan asfalt.

För Beräkningsfall 5 med ett 50 cm tjockt fuktigt lerskikt blir transmissionsdämpningen mycket stor. Lera består av nanopartiklar och kan hålla kvar fuktighet väldigt bra. Vattenhalten blir hög och lera innehåller dessutom delvis ledande material. En ledningsgrav bestående av fuktig lera är i princip ogenomtränglig för mikrovågor. Dessa ledningsgravar är geografiskt betingade men inte övervägande.

5.5 Slutsatser och rekommendationer baserat på radarsignalens transmission

En frekvens på 2 GHz kan vara en lämplig med hänsyn till antennstorlek och transmissionsegenskaperna i mark. Generellt blir transmissionsegenskaperna bättre ju lägre frekvens man använder. Nackdelar med lägre frekvens är större antenner och sämre upplösning i sida, samt att skillnaden i dopplerfrekvens blir mindre och därmed svårare att detektera. Beroende på täckskiktets och fyllnadsmaterialets materialegenskaper kan dock även högre frekvenser vara gynnsamma. Detta kräver dock god kännedom om materialegenskaperna.

Fyllnadsmaterialet i ledningsgroparna och framförallt dess vatteninnehåll har stor betydelse på transmissionsdämpningen. Grus är fördelaktigt medan blöt lera omöjliggör mikrovågstransmission. Beträffande siltig morän och moränlera finns inga uppgifter på dess transmissionsdämpning. Mätningar i ett eventuellt kommande projekt får utröna dess egenskaper.

Ett täckskikt av asfalt är också fördelaktigt beroende på relativt låga förluster och en tjocklek i samma storleksordning som våglängden vid 2 GHz (15 cm).

Beroende på de relativt stora djupen och därmed stora transmissionsförluster hos ledningsgravarna krävs en hög systemdynamik. Uppskattningsvis bör systemdynamiken vara ca 100 dB.

Den stora osäkerheten vid en bedömning av transmissionsdämpningen är vatteninnehållet i fyllningsmaterialet. Detta kommer att vara den gränsättande faktorn för ett radarbaserat system. För att nå ner till läckor i blöt mark eller djupt liggande rör (2–4 m) krävs en lägre frekvens än för givet djup i behovsanalysen (1,7–2 m) [3]. Tekniskt sett är det möjligt att realisera men till priset av sämre känslighet vilket innebär att mycket små läcker kan bli svåra att upptäcka. För att få en bättre kunskap om detta bör ett eventuellt vidare arbete innefatta materialmätningar på olika typer av fyllningsmaterial med varierande vatteninnehåll. Dagens huvudledningsnät är ca 62 000 km långt i Sverige och ca 25 % av materialet är av plast. Av detta är ca 90 % lagda i gator [2]. Till övervägande del har dessa en fyllning som är lämplig för metoden.

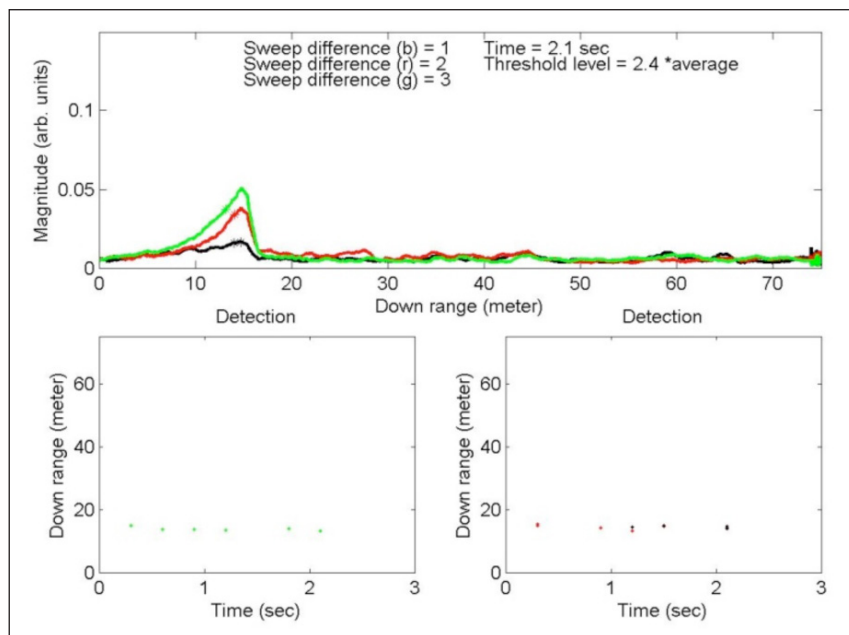
5.6 Analys och resultat av läckmätningar med mobilt mätsystem i Borås

Signalbehandling har tidigare använts i andra dopplerradar tillämpningar [4]. Mätdata samlas i en matris, varje frekvenssvep svara mot en kolumn i matrisen. Koherent subtraktion utförs mellan två frekvenssvep. Olika tidsavstånd mellan frekvenssvepen kan användas. Efter subtraktionen fås en avståndsprofil genom att använda Invers Fouriertransform, (IFFT). En tröskelnivå för detektion bestäms med medelvärdet på varje avståndsprofil, multiplicerat med en viss faktor. Ett antal frekvenssvep (15) integreras före subtraktionen.

Resultaten kan sammanfattas enligt följande:

- detektioner registreras
- fler detektioner för VV polarisation jämfört med VH
- fler detektioner för gräs jämfört med asfalt
- frekvensintervallet 4–5 GHz: detektioner ungefär som för 1–5 GHz men med större magnitud
- frekvensintervallet 1–2 GHz: detektioner men lägre magnitud och av annan ”karaktär” än för 1–5 GHz

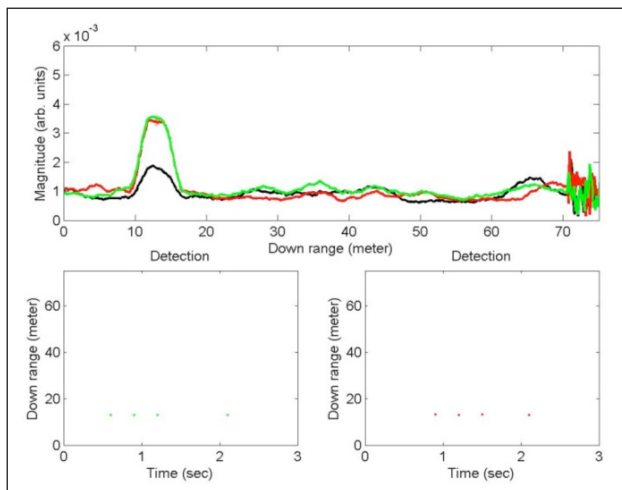
Exempel på mätresultat visas i figur 5.6.1 för en mätpunkt strax intill läckan. Frekvensområdet var 1–5 GHz. De olika kurvorna blå, röd och grön visar signalen beroende på olika tidsintervall för signalbehandlingen. Kurvorna uppvisar en ”puckel” över bakgrundsnyvån. Avståndet är ca 15 m vilket ska divideras med 2 och korrigeras med aktuella materialparametervärden relativt vakuum för att motsvara verkligt djup till läckan. De bägge nedre delarna av figur 5.6.1 visar på läckage indikationer för olika fall av signalbehandling och olika tidpunkter. Den övre delen av figuren motsvarar enbart ett tidsögonblick.



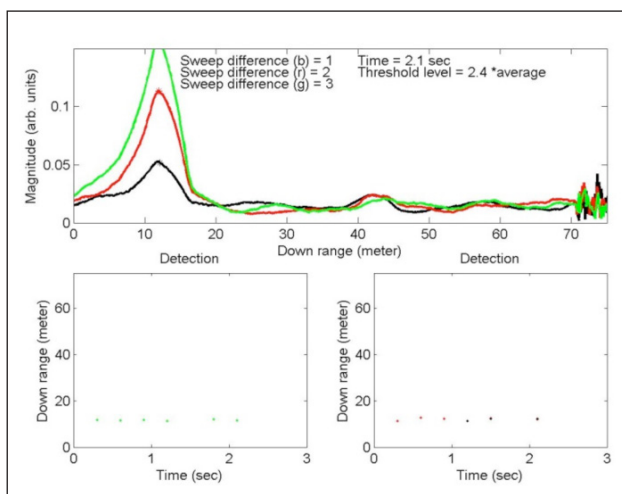
Figur 5.6.1 Exempel på mätresultat.

I de två nedanstående figurerna (figur 5.6.2 och 5.6.3) jämförs resultat för frekvensintervallen 1–2 GHz och 4–5 GHz. OBS olika skalor på y-axeln. I bilderna ses en avsevärt bättre känslighet då systemet arbetar i 4–5 GHz än för 1–2 GHz.

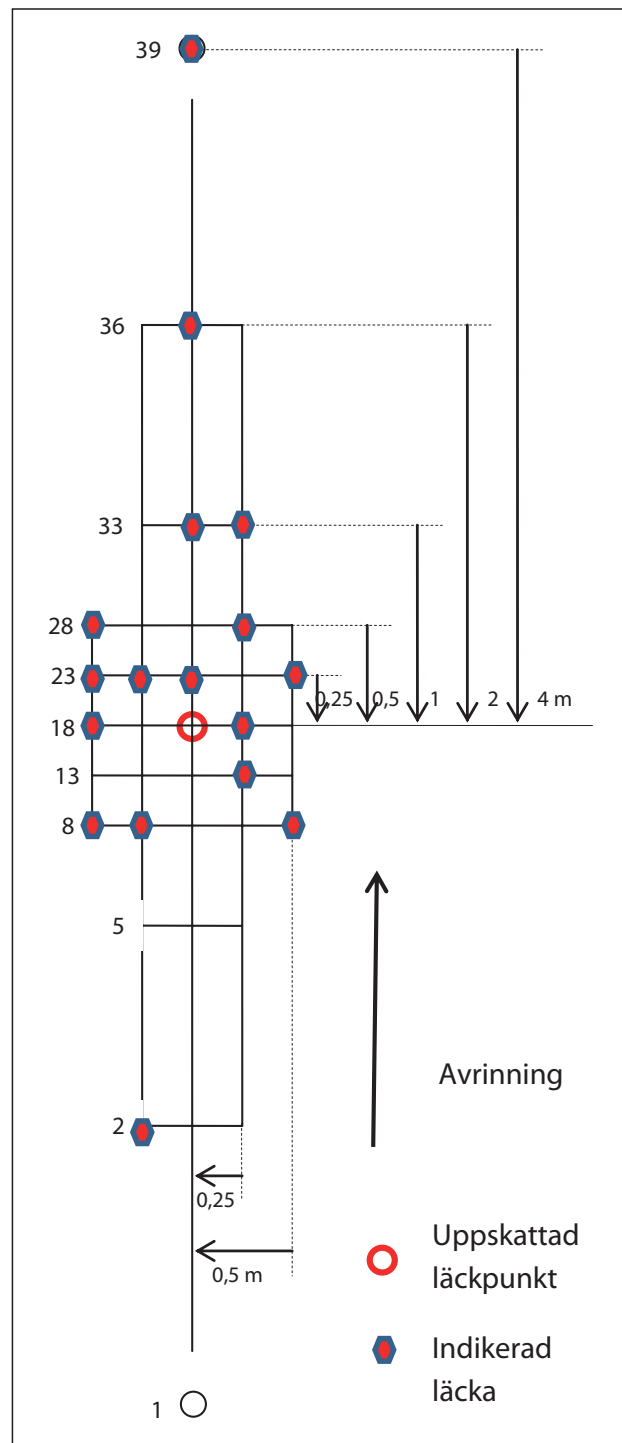
Man uppskattade läckans läge genom att lyssna och den är markerad med en röd ring i figur. 5.6.4. Varje korsning i rutmönstret utgör en mätpunkt där antennerna placerades. I figur 5.6.4 visas på i vilka mätpunkter runt läckan som radarn indikerar läckage. Mätningarna är utförda på gräsyten.



Figur 5.6.2 Resultat för fallet med 1–2 GHz



Figur 5.6.3 Resultat för fallet med 4–5 GHz.

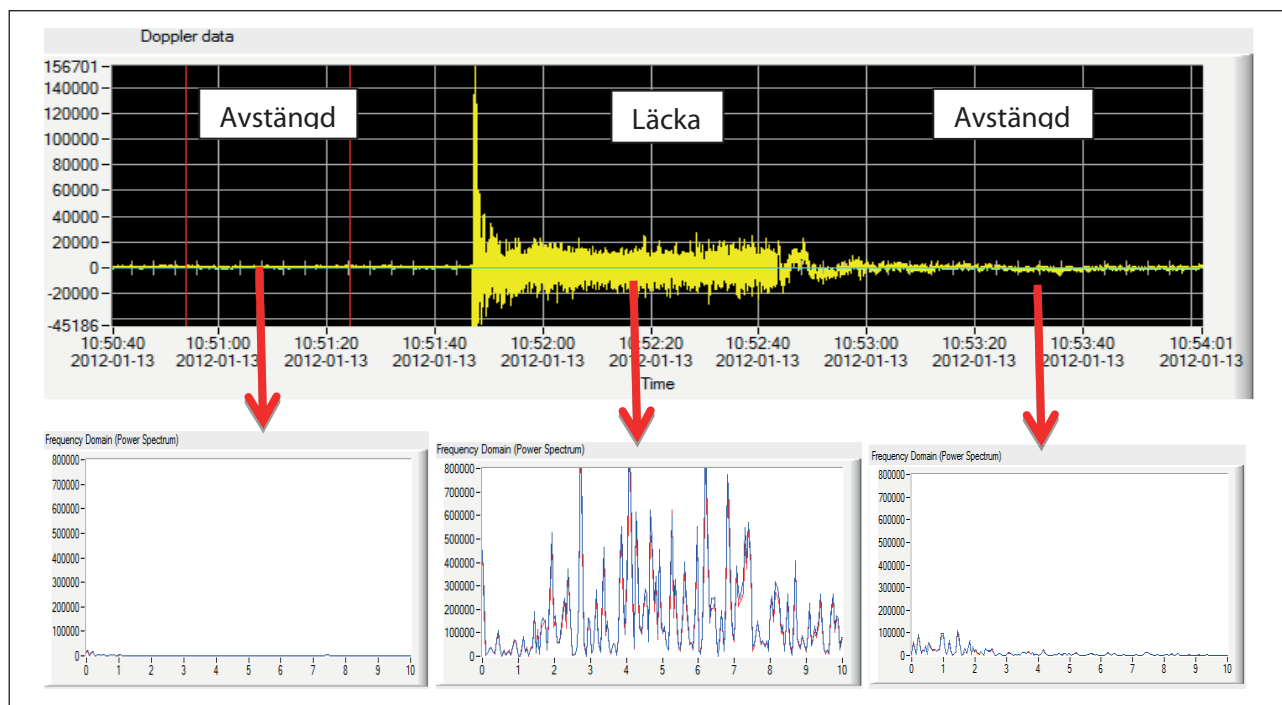


Figur 5.6.4 Mätupställning och resultat

Mätningar på verkliga läckor visar på en betydligt bättre känslighet då man mäter på 5 GHz än vid 2 GHz. Det är alltså inte entydigt vilken frekvens som är att föredra. Man beslutade därför att gå vidare med två funktionsmodeller som arbetar på 2 respektive 5 GHz.

5.7 Vattenläcka i testbädd med funktionsmodell 5 GHz

I följande exempel genomfördes en mätning under 3 minuter och 20 sekunder rakt över läckpunkten. Tiden fördelades mellan 3 faser: avstängd, läcka och avstängd.



Figur 5.7.1 Dopplerregistrering och dopplerfrekvenser av vattenläckans olika faser.

I övre delen på figur 5.7.1 visas dopplerdata från hela mätningen. Med ögat syns en markant skillnad på dopplerdata när läckan är aktiv. Det är vattnets rörelse i stenkrossmaterialet som ger upphov till denna effekt. Rörelsen kan ses som en hastighet i höjddled. För att få en bättre uppfattning analyseras dopplerdata i frekvensplanet (se figur 5.7.1, undre delen). Frekvensanalysen ger svar på hur ofta vattnet ändrar sin ytstruktur per tidsenhet. Långsamma förändringar ger låga frekvenser och snabba förändringar ger i sin tur höga frekvenser.

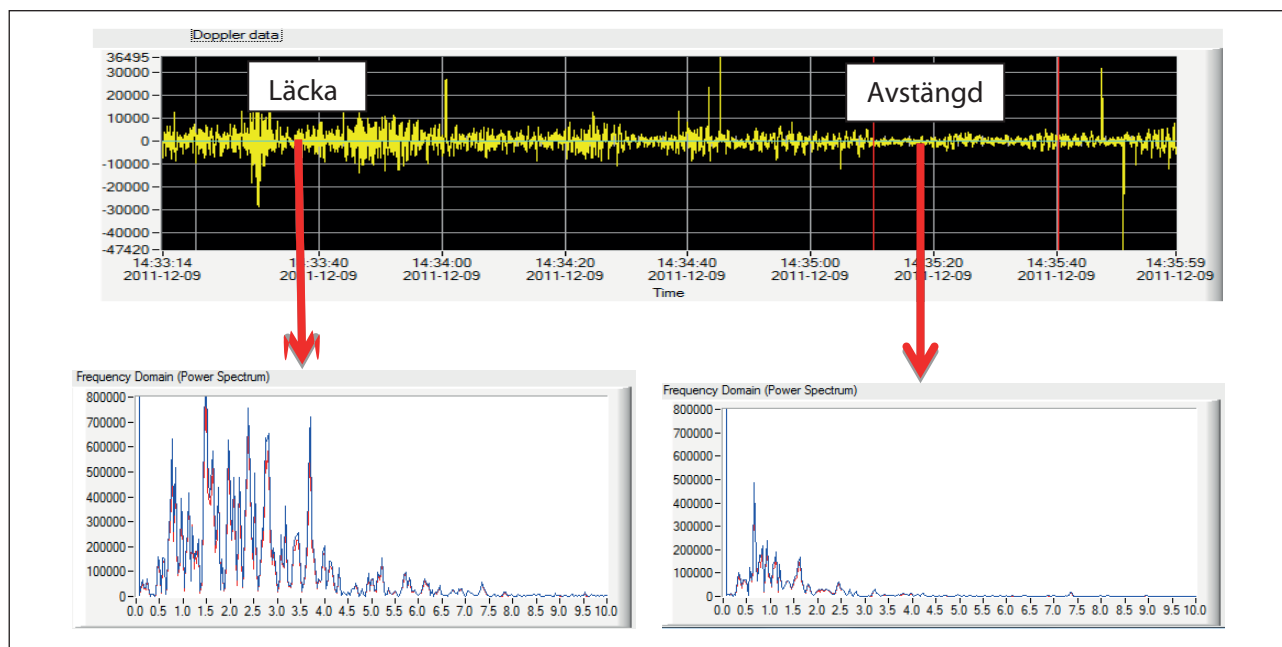
När vattnet är avstängt ger frekvensanalysen ingen som helst frekvensrespons vilket påvisar att det inte finns någon läcka. Under själva läckan registreras frekvenser från strax över 0 Hz till över 10 Hz. Detta motsvarar ytförändringar med varaktighet från några sekunder till mindre än 1/10 sekund. Efter avstängningen syns ett svagt frekvenssvar på några Hz som med tiden avtar beroende på att boxen dräneras på vatten. Se figur 5.7.1, undre delen.

Slutsatser:

- Tekniken fungerar i testmiljö
- Demonstratorn kan vidareutvecklas

5.8 Kontrollerade läckor på testväg i Linköping

Resultaten för mätningar av riktiga men kontrollerade läckor har varit skiftande och inte så entydiga som vi hade förväntat oss oavsett val av frekvens. Figur 5.8.1 visar på ett typexempel från mätningarna med funktionsmodell 2 GHz.



Figur 5.8.1 Dopplerregistrering och dopplerfrekvenser av vattenläckans olika faser i grusväg. Läckdjup 1,1 m.

I exemplet ovan genomfördes mätningen på den grundare läckan i grusvägen. Mätningen pågick i 2 minuter och 45 sekunder. Läckan initierades innan inledningen av registreringen och pågick ca 1 minut innan den stängdes av.

Av dopplerdata går det inte att dra några slutsatser. Det är först när frekvensspektra jämförs som skillnader kan iaktas. Varför skillnaderna inte blir större i sagd testmiljö är oklart. En av förklaringarna är att vattnet i ledningsgatan uppnår ett jämviktsläge med mycket långsamma höjdvariationer. En annan förklaring är att frekvensvalet i mätsystemet är för högt vilket innebär att nedträngningen i marken inte är tillräcklig.

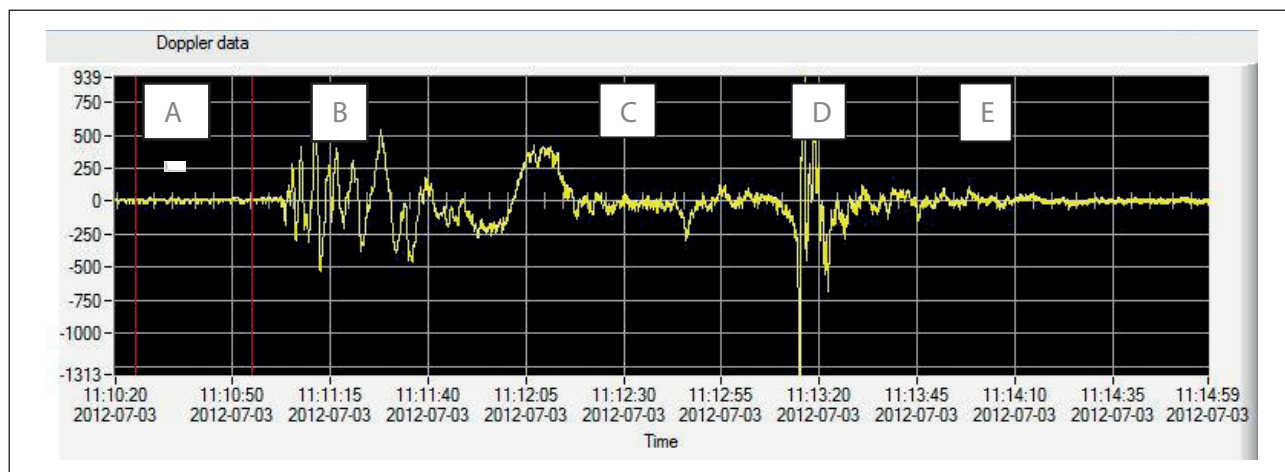
Kommentar:

- Inga slutsatser bör dras. Möjliga hypoteser är att vattnet har uppnått ett jämviktsläge eller att frekvensvalet medför att nedträngningen i marken inte är tillräcklig.

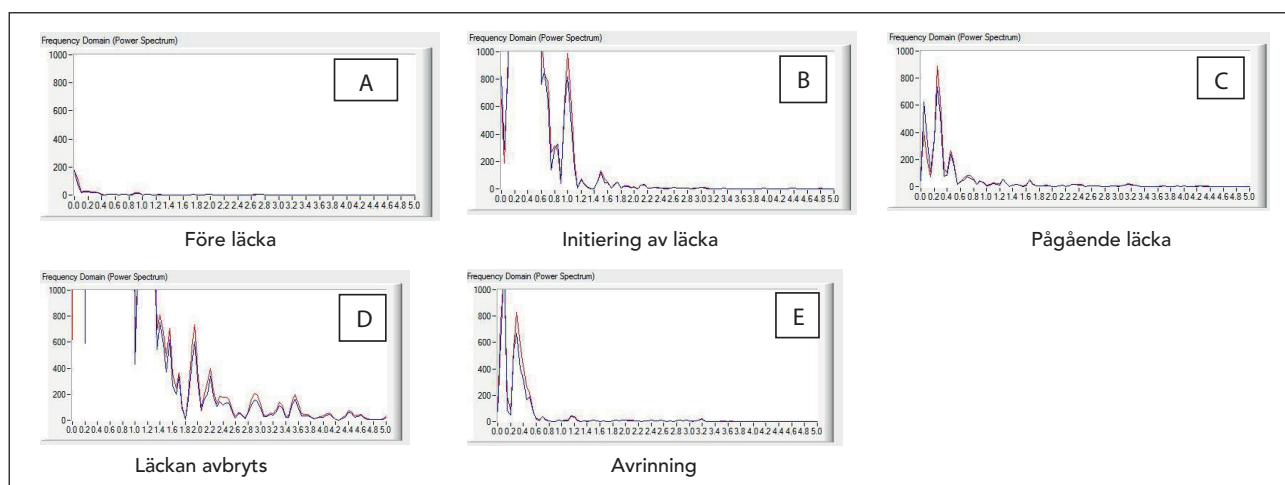
5.9 Verklig läcka i asfalterad gata

Mätningarna genomfördes med funktionsmodell 2 GHz. Figur 5.9.1 visar dopplerspektrumet under läckans olika faser.

A representerar doppler före initiering av läckan. B visar spektrumet under initieringen av läckan. C representerar doppler under pågående läcka. D ger dopplerspektrumet när läckan avbryts och slutligen E som representerar vattenläckans avklingning.



Figur 5.9.1 Dopplerregistrering av vattenläckans olika faser.



Figur 5.9.2 Dopplerfrekvenserna för vattenläckans olika faser.

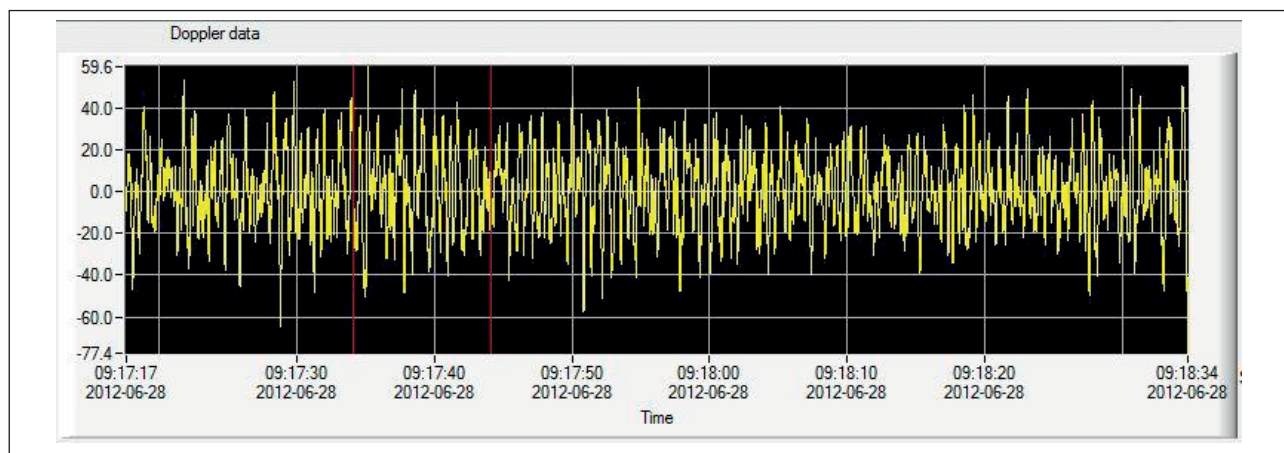
I figur 5.9.2 presenteras dopplerfrekvenserna för vattenläckans olika faser. Ju högre frekvens desto snabbare vattenfluktuationer. Avsaknad av frekvensrespons påvisar avsaknad av rörelse. Inledningsvis (A) är vattnet avstängt och som förväntat påvisas inga frekvenser dvs. ingen rörelse i marken. När vattnet sätts på och når fram till mätpunkten (B) uppstår kraftiga frekvensvariationer. Dessa klingar successivt av och vattenläckan går in i ett jämviktsläge (C) som uppvisar en stabil rörelseindikering i frekvensdata. Det är av stor betydelse att fas A och C skiljer sig åt för det gör det möjligt att detektera pågående läckor. Läckan stängs därefter av (D) vilket ger upphov till kraftiga fluktuationer. Dessa klingar av efter hand (E) och går successivt mot fas A.

Slutsatser och iakttagelser:

- Tekniken fungerar i verklig miljö
- Även om en pågående vattenläcka intar ett "jämviktsläge" med små förändringar går det att urskilja att ett läckage förekommer.

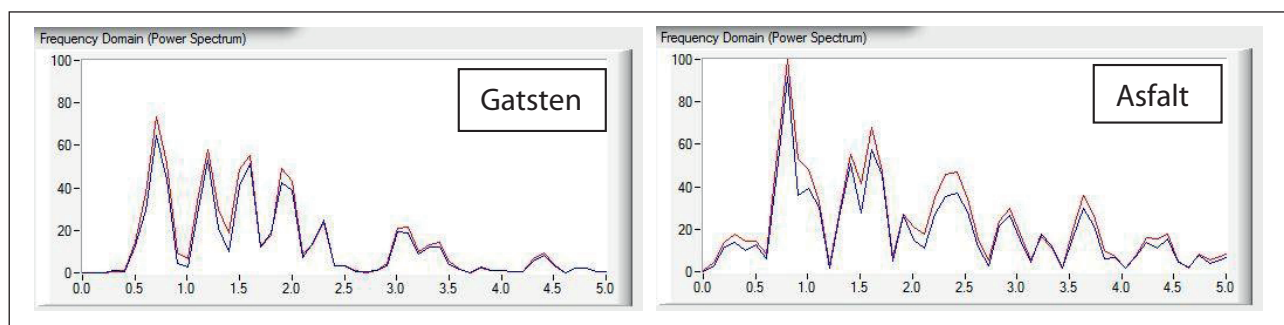
5.10 Dagvattenledning under asfalt, gatsten och gräsytor

Mätningarna genomfördes med funktionsmodell 2 GHz. Exempel på dopplerregistrering av dagvatten under gatsten ses i figur 5.10.1.



Figur 5.10.1 Exempel på dopplerregistrering av dagvatten under gatstensbeläggning.

I figur 5.10.2 visas det frekvensspektrum som dagvattnet genererar. Som förväntat är frekvensstrukturen den samma för bägge markbeläggningarna



Figur 5.10.2 Dopplerfrekvenserna för dagvatten vid olika markbeläggningar.

5.10.1 Blöt mark under gräsyta

Mätningar gjordes även på blöt gräsmark och resultatet tyder på för dålig nerträngning. Detta medför att frekvensen behöver sänkas och funktionsmodellerna behöver kompletteras med en enhet på lägre frekvens

Slutsatser:

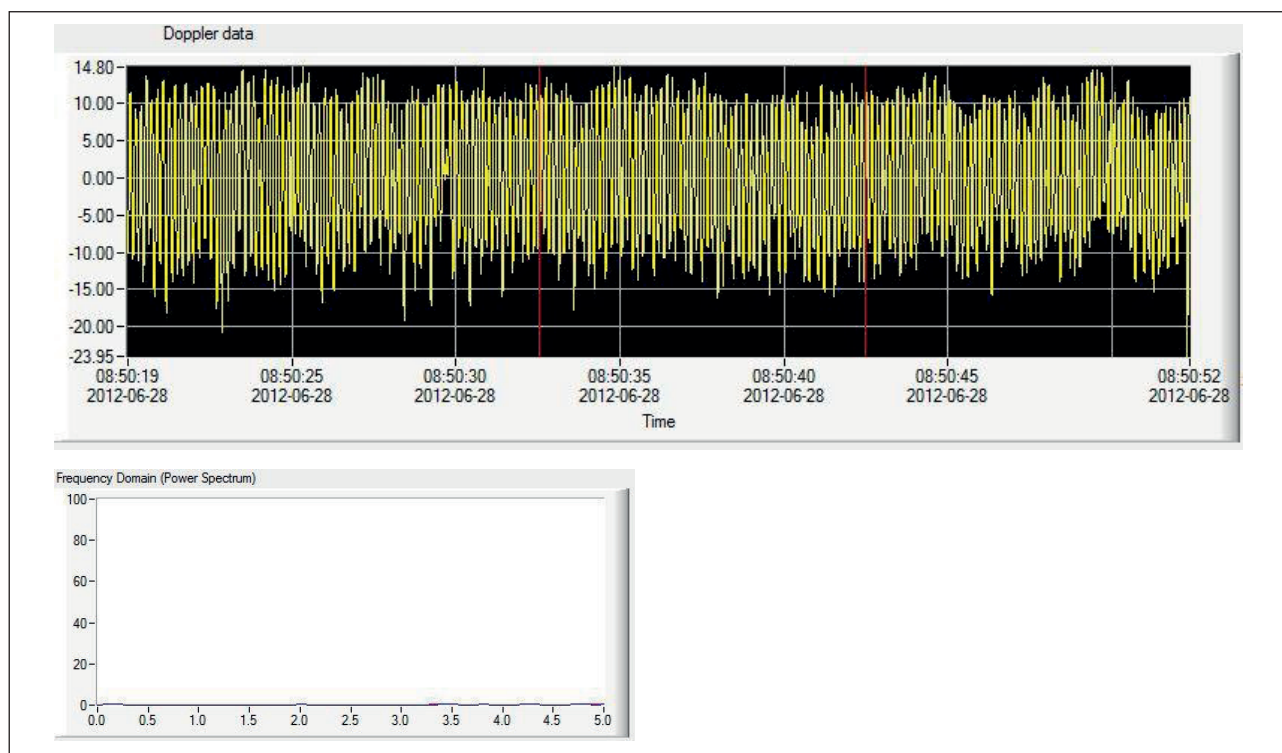
- Oberoende av markbeläggningen blir frekvensstrukturen den samma.
- Mätningarna gjorda på blöt mark tyder på för dålig nerträngning. Detta medför att funktionsmodellerna behöver kompletteras med en enhet på lägre frekvens.

5.11 Spillvatten

Mätningarna genomfördes med funktionsmodell på 2 GHz. Endast vid spillvattenmätning mot kulvert kunde resultat uppmätas. Övriga spillvattenledningar låg för djupt. Frekvensspektrumet från spillvatten uppvisade samma karakteristik som från dagvatten.

5.12 Systemverifierande mätning

För att verifiera att funktionsmodellen 2 GHz inte genererade egenfrekvenser gjordes mätningar på mark utanför ledningsnätet. Känsligheten var i nivå med det känsligaste mätområdet som användes vid utvärderingarna. Exempel på detta kan ses i figur 5.12.1.



Figur 5.12.1 Doppler och frekvenskaraktistik utanför ledningsnätet.

Frekvensanalysen bekräftade att ingen rörelse förekom.

Slutsats:

- Inga "falska rörelser" genererades internt av funktionsmodellen

5.13 Energibesparing

En normalläcka uppskattas till ca 100 l/min. Enligt driftstatiken från Svenskt Vatten för 2011 var energikostnaden för att producera och tryckstegra dricksvatten 0,997 kWh/m³. En normal vattenläcka på 100 l/min som inte hittas under en månad motsvarar en energiförbrukning för dricksvattenhanteringen på 4 300 kWh. Om dricksvattnet dessutom rinner ner

i spillvattennätet tillkommer energikostnaden för att pumpa vattnet till reningsverket samt att rena det.

Om den läcksökningsmetodik som undersökts i detta projekt kan tillämpas skulle sökande efter läckor i områden med plast påskyndas och möjliggöras. Om ytterligare 1 000 läckor till hittas i Sverige per år och läckorna annars står utan åtgärd i minst sex månader motsvarar detta en sänkt energikostnad på 26 GWh/år. Det finns alltså en stor potential att sänka energikostnaderna i samband med vattenproduktionen om fler vattenläckor hittas. Idag producera 1000 Mm³ dricksvatten årligen i Sverige och ca 15–20 % av detta läcker ut vilket motsvarar en energikostnad på 150–200 GWh.

6. Slutsatser Projektresultat

Fortsatt arbete

6.1 Slutsatser under projekttiden

- Konceptet ”dopplerdetektering” fungerar.
- Är vattenytan vid ett läckage helt i jämnvikt krävs att denna rubbas för att erhålla detektion. Dock med små förändringar går det att urskilja om ett vattenläckage förekommer.
- Initiala mätningar på flöden från vattenläckage kontra dag/spillvatten uppvisar olika karakteristiska drag, vilket ökar möjligheten att särskilja dessa flöden.
- Mätningarna gjorda i blöt mark tyder på för dålig nerträngning. Detta medför att frekvensen behöver sänkas och funktionsmodellerna behöver kompletteras med en enhet på lägre frekvens. Generellt betyder detta föga för tillämpbarheten utom att mycket små läckor kan bli svåra att detektera.
- Alla marktyper är mer eller mindre transparenta vid rätt frekvens, utom fuktig lera som är i princip ogenomtränglig för mikrovågor.
- Det finns en potential att upptäcka 1 000 läckor med metoden och därmed en årlig energibesparing med 26 GWh.

6.2 Fortsatt arbete

Vi bedömer att det föreligger cirka två års fortsatt forskning för att säkerställa teknikens funktionalitet och möjligheter. Följande punkter behöver belysas.

- Resultaten visar på att principen fungerar men prestandan varierar. Fortsatt arbete behövs för att undersöka läckors karaktäristik så optimal teknik och metodik för ett framtida mätsystem säkerställs.
- Ytterligare en funktionsmodell på lägre frekvens bör utvecklas så även läckor från djupt liggande rör och läckor vid blöta markförhållanden kan detekteras. Funktionsmodellen skall användas för kartläggningen av läckornas karaktärer.
- Signalbehandlingsmetoder bör utvecklas så att vattenläckage gentemot spill- och dagvatten flöden kan särskiljas.
- Efter att läckors karaktäristik är kartlagd bör en demonstrator utvecklas för fältmätningar.

7. Referenser

- [1] Anders Lingsten, Mats Lundkvist, Daniel Hellström, Peter Balmér, "VA-verkens energianvändning 2008", Svenskt Vatten Utveckling 2011-04.
- [2] Svenskt Vattens statistikprogram VASS
- [3] Maria Rothman "Rapport behovsanalys", i projekt: Ny teknik och metod för läcksökning, PM Norrköping Vatten 2011-03-15.
- [4] Rahm et al, Detection of human activity behind the wall, FOI-R--2996--SE

Bilaga 1 Behovsanalys

Rapport behovsanalys

Bakgrund

För att kunna utveckla en ny läcksökningsutrustning behöver marken runt ledningarna beskrivas samt ledningarnas läge, dimension och material. Detta är beskrivet i denna rapport. I denna rapport beskrivs även önskemål runt funktion och utformning av en ny läcksökningsutrustning.

Material- och läckbeskrivningar

Ledningsnätet består av en mängd olika material och dimensioner. Olika material har olika egenskaper och går också sönder av olika anledningar. I tabell 1 beskrivs olika typer av ledningsmaterial och hur de läcker.

Tabell 1 Beskrivning av ledningsmaterial och läckutseende.

Material	Beskrivning	Vanligast typ av läcka
PE	Plastmaterial av polyeten. En mjuk plast som började användas på 70-talet. De första rören hårdnar när de bli äldre och blir spröda.	Kopplingar, svetsar eller sprickor
PVC	Plaströr av polyvinylklorid. En hård plast.	Sprickor eller kopplingar. Läckor kan vara både stora och små.
PP	Plastmaterial bestående av polypropylen, en hård plast.	
Gjutjärn	Tjocka järnrör, hårdare än segjärn.	Skarvläckor, rakt av upp till 200 mm sen sprickor.
Segjärn	Järn i en sammansättning som skapar ett mjukt och flexibelt rör. Rören relativt tunna, kan börja rosta. Röret är sprutat med betong invändigt.	Korrosionshål, ofta mindre läckor.
Galv	Järnrör	Korrosionshål, ofta mindre läckor.
Betong	Finns två olika typer. Bonnarör har en stålkärna av mjukt stål i mitten. Sentabrör har ett armeringsnät i mitten.	Skarvläckor
Asbest	Hela röret består av asbest.	Sällan läckor om röret inte skadas.

Ledningsmaterial och dimension dricksvatten

Fördelningen av ledningsmaterial i vattennätet i Norrköping, Linköping och Göteborg redovisas i bilaga 1. Mer än 50 % av ledningarna består av olika former av järnrör och runt 25 % av ledningarna består av PE. De vanligaste dimensionerna för huvudledningar är 150 mm men storlekarna varierar mellan 100–700 mm. För servisledningar är dimensionerna vanligast 32 mm. I bilaga 1 finns en tabell som beskriver dimensioner för olika typer av rörmaterial.

Vid nyläggning läggs i Norrköping uteslutande PE. I Göteborg läggs övervägande PE, undantaget för större dimensioner > 500 där man även lägger stål och vid förorenad mark läggs segjärn.

Ledningsmaterial och dimension spillvatten och dagvatten

De flesta av spill- och dagvattenledningarna är självfall. Utifrån kartan går det alltid att ta reda på om ledningen är en tryckledning eller självfall. Ca 10 % av ledningarna är tryckledningar.

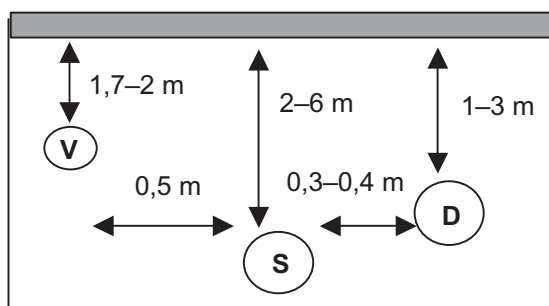
De vanligaste dimensionerna för spill- och dagvattenledningar är mellan 225–300 mm, men de varierar mellan 100–1 600 mm.

Materialfördelningen beskrivs i bilaga 2. I självfallsystem så är mellan 50–75 % av ledningarna av betong. Tryckavloppssystemen består till mer än 50 % av PE.

Plastledningarna började läggas på mitten av 60-talet. Sedan mitten av nittionio-talet läggs i Norrköping främst PE-rör men för mindre dimensioner, < 200 mm, även PP. I Göteborg läggs övervägande PE/PP i dimensioner upp till 450 mm, däröver läggs betong.

Fyllning ledningsgrav, ledning i gata

Minst 90 % av vatten- och spillledningarna är förlagda i gator. I bebyggda områden är nästan 100 % av ledningarna förlagda i gatorna. Schakterna är uppbyggda för att skydda ledningarna och för att minimera sättningar i vägen. I figur 4 och 5 beskrivs på vilka djup ledningarna ligger samt vilka typer av schaktmassor som finns i ledningsgraven. Figuren beskriver ett område med självfall för spill- och dagvattenledningarna. I områden med tryckledningar för spill- och dagvatten ligger ledningarna grundare, oftast på samma nivå som dricksvattenledningen. Fyllnadsmaterialet som beskrivs i Figur 1 och tabell 2 stämmer även för nyare ledningar i Göteborg. För äldre ledningar kan fyllningen även bestå av lera.



Figur 1
Ledningsdjup i
ledningsgrav med
självfall spill- och
dagvatten.

Tabell 2 Beskrivning av ledningsgrav för ledningar i gatan

Material	Djup (noll där asfalt slut)	Dimension	Kommentar
Asfalt	0,1–0,2 m	–	Kan vara upp till 0,5 m
Kross	0–0,1 m	0–18 mm	Del av gatuuppbyggnad
Kross	0,1–0,5 m	0–100 mm	Del av gatuuppbyggnad
Grus	0,4–1,5	Befintligt grus eller 0–18 mm	Om det finns grus i gropen används detta annars används kross (0–18 mm) i detta område också. Vid nyläggning i Linköping fylls detta lager oftast med det material som finns i marken, vanligtvis lera.
Kross	1,5–botten	0–18 mm	Skyddsfyllnad runt rören, så att ledningarna täcks.

Fyllning ledningsgrav för ledningar i grönområden och skog

I grönområden och skog så fylls ledningsgravarna oftast med den mark som ledningarna ligger i. Vissa ledningar borrar dessutom och då sker uppgrävning endast en gång per 500 m. De flesta ledningar ligger i lermark.

LTA-system

I Norrköping har vi idag ca 10 000 kunder som har system som kallas LTA-system. Här ligger både vatten och avlopp på ca 80–90 cm djup. Ledningarna består av PE i dimensionerna 40–63 mm för avlopp och 32–60 mm

för vatten. Ledningarna ligger i isolerade styroformlådor. I lådorna finns värmekabel och lådorna är fyllda med sand eller kross. Dessa system är relativt nya så läckfrekvensen i dessa system är låg men på sikt kan behov finnas av att leta läckor i dessa system också.

Markvatten

I de flesta ledningsgravar står grundvatten runt ledningen. När fyllnadsmaterialet består av grus så kan grundvatten lätt transporteras runt ledningarna.

Skyddsrör

Under vägar ligger ibland vattenledningarna i skyddsrör. På en sida om skyddsröret finns en brunn så om en läcka uppstår i skyddsröret går det att bekräfta att läckan är på ledningen genom att inspektera brunnen. Vid lagning dras röret ut och byts mot ett nytt vilket gör att en lokalisering av läckans exakta läge inte är aktuell.

Fjärrvärme

Gamla fjärrvärmeledningar är av järn och är ingjutna i betongkulvertar. Nya ledningar består av isolerade järnrör med ett ytterhölje av PE. Eftersom rören ligger i ett skyddsrör blir det vid en läcka ett tydligt utflöde utan istället fylls isoleringen. I de nyare fjärrvärmerören finns det koppartrådar som ska larva vid läckor genom att det blir en spänning mellan röret och koppartråden om isoleringen blir fuktig.

Beskrivning av läcka

De vanligaste läckorna enligt uppgifter från Göteborg ligger på mellan 100–200 l/minut. För utrustningen är det viktigast att hitta mindre till mellanstora läckor, mellan 10–100 l/min. Större läckor går ofta att hitta genom marklyssning eller genom att de kommer upp ur marken.

Sökområde för läcksökningsutrustning

Följande kriterier är viktigast att beakta vid utveckling av en ny läcksökningsutrustning;

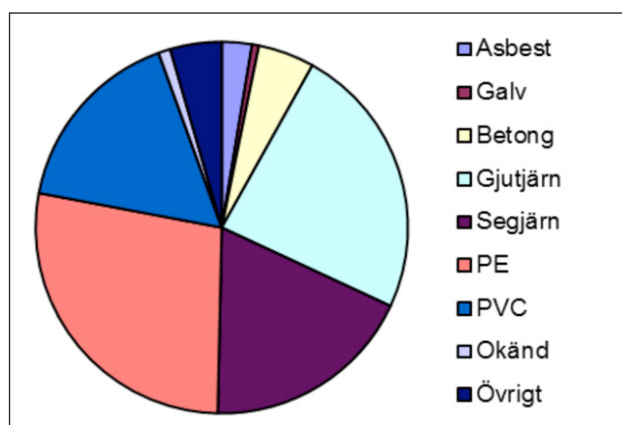
- Läckutrustningen ska i första hand fungera för vattenläckor och i andra hand för läckor på trycksatta spilledningar. För läckor i självfallssystem kan annan teknik som filmning användas.
- Det viktigaste är att den fungerar på plastledningar, PE och PVC. På järnledningar av mindre dimensioner finns annan teknik som fungerar.
- Den nya utrustningen bör även fungera på större dimensioner, > 300 mm, oavsett rörmateriel. För dessa ledningar är läckljudets spridning begränsad i ledningen och därmed möjligheten att upptäcka eller lokalisera med korrelator.
- Ett annat användningsområde för utrustningen är värmeslingor på golv och i gator. I gatorna ligger ledningarna på mellan 15–30 cm djup och är inbäddade i sand eller grus.
- Ytterligare ett användningsområden är ledningar i LTA-områden. Här kan det dock finnas samma begränsningar som med fjärrvärme eftersom ledningarna är isolerade och läckan sprids i isoleringen.

- Ett område på mellan 100–300 m ska kunna sökas av. Det är sträckan som oftast är mellan två ventiler. Ledningens exakta position är svår att bestämma men ofta går det att inom 1 m när gå ovanför ledningen vid en läcksökning.
- När läckan pekats ut ska det vara med max 2-3 m marginal. Då är det lätt att gräva fram ledningen och hitta var ledningen är trasig.
- Utrustningen ska fungera även när tjälen går ner i marken. Under vinterperioden går tjälen i gatumiljö ofta ner till mellan 0,8-1,4 m.

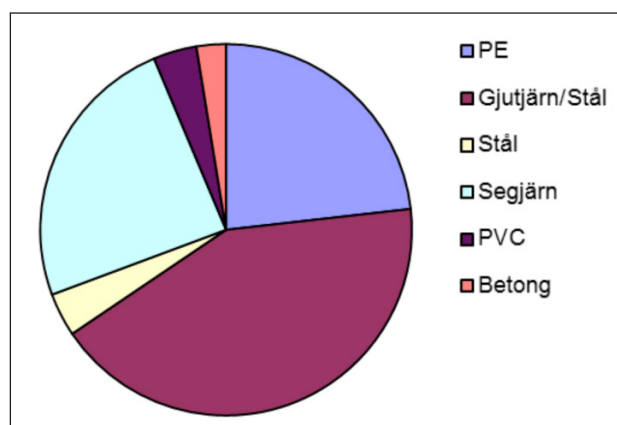
Övriga kriterier

- Utrustningen bör inte väga mer än 10 kg
- Den bör inte vara känslig eftersom den ska kunna förvaras och transporteras i en bil med mycket annan utrustning. Den ska även vara tålighet för fukt och kyla. Även ev. känslighet för andra förekommande störkällor för funktionen bör utvärderas.
- När en läcka inträffat på en ledning som ligger i gatan så skulle det kunna vara bra att utrustningen går att rulla fram på marken.
- Inom vissa områden kan det även finnas fjärrvärmeledningar och gasrör som kan påverka läcksökningen. Fjärrvärmerören ligger ofta en meter under marknivå. Gamla ledningar är av järn och är ingjutna i betongkulkvertar. Nya ledningar består av isolerade järnrör med ett ytterhölje av PE. Fjärrvärmeledningarnas läge finns inte i vår karta men går att ta reda på. Gasledningarna ligger på mellan 1–1,5 m djup. Dess placering är inte känd.
- Det är viktigt att fastställa funktionen under skiftande markförhållanden, t.ex. i vilken omfattning prestanda påverkas av fyllning som lera resp. sand eller tjäle.
- Batterier för strömförsörjning bör klara minst åtta timmars kontinuerlig drift.

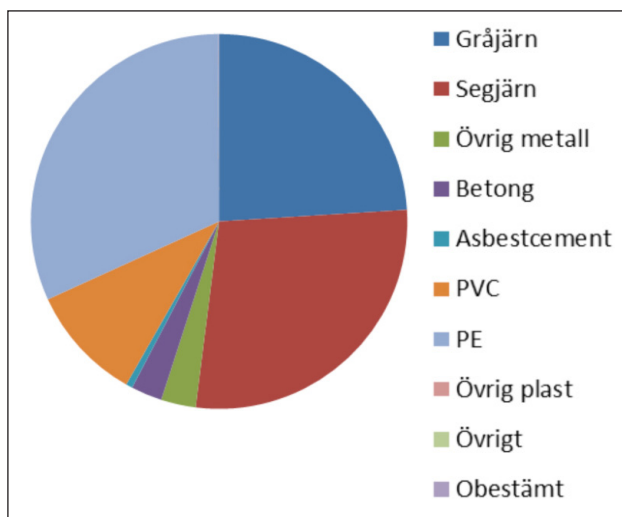
Ledningsmaterial och dimensioner vattennät



Figur 2 Norrköping, ledningsmaterial vattennät



Figur 3 Göteborg, ledningsmaterial vattennät

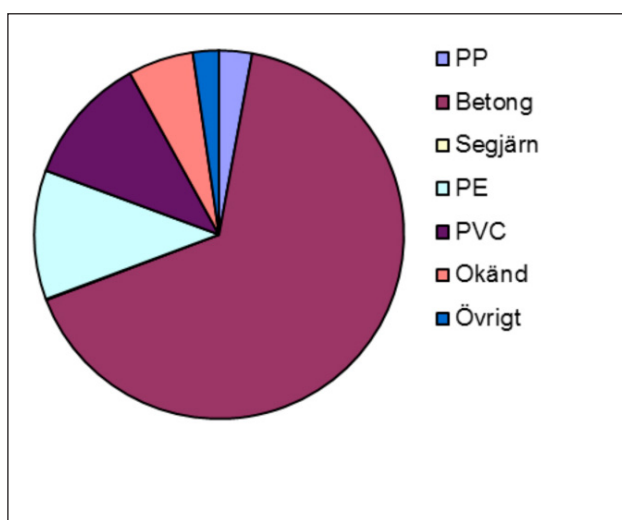


Figur 4 Linköping, ledningsmaterial vattennät

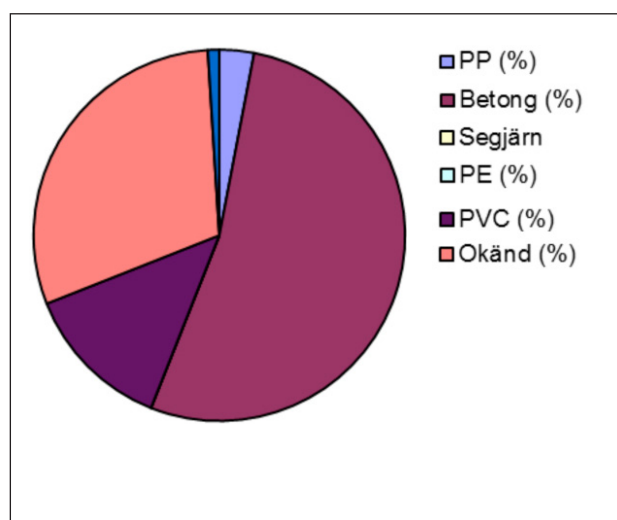
Tabell 1 Andel och storleksfördelning för olika material

Material	Andel	Dimension	Material	Andel	Dimension
PE	28 %	50–710	PE	22,7 %	25–560
Gjutjärn	24 %	100–600	Gjutjärn/Stål	41,4 / 3,7 %	32–1200
Segjärn	18 %	100–600	Segjärn	23,8 %	50–800
PVC	16 %	63–315	PVC	3,7 %	40–400
Betong	5 %	300–700	Betong	2,5 %	100–620

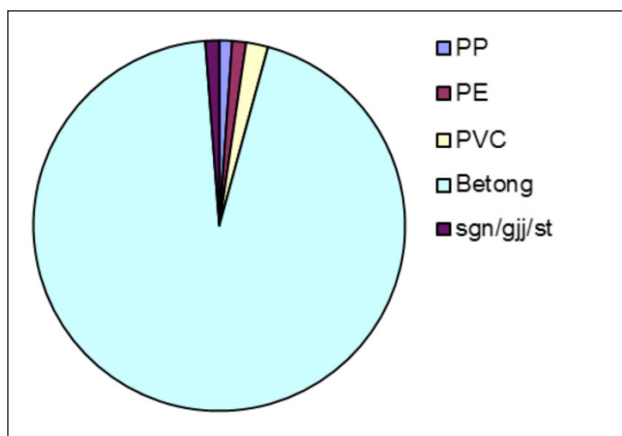
Ledningsmaterial och dimensioner spillvattennät och dagvatten



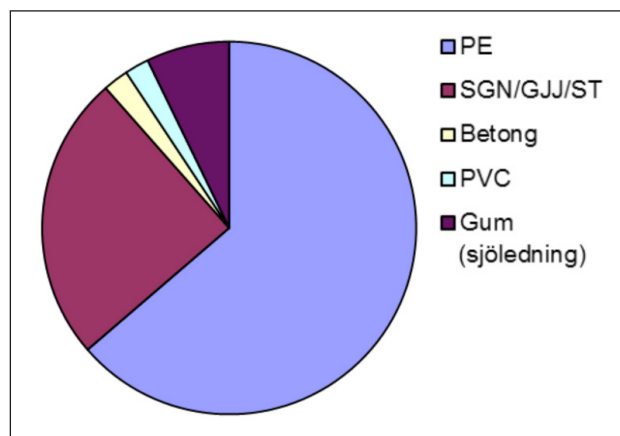
Figur 5 Norrköping, spillnät



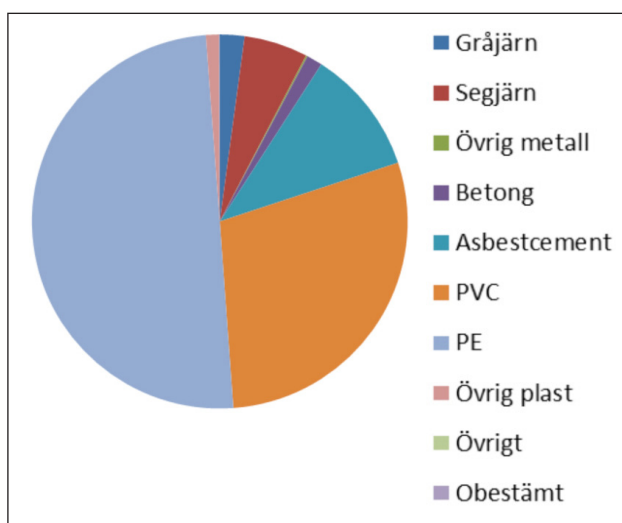
Figur 6 Norrköping, dagvatten



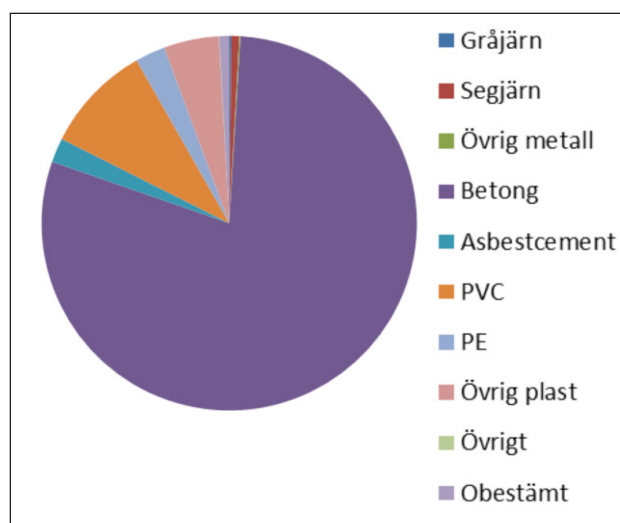
Figur 7 Göteborg Självfall dagvatten och spill



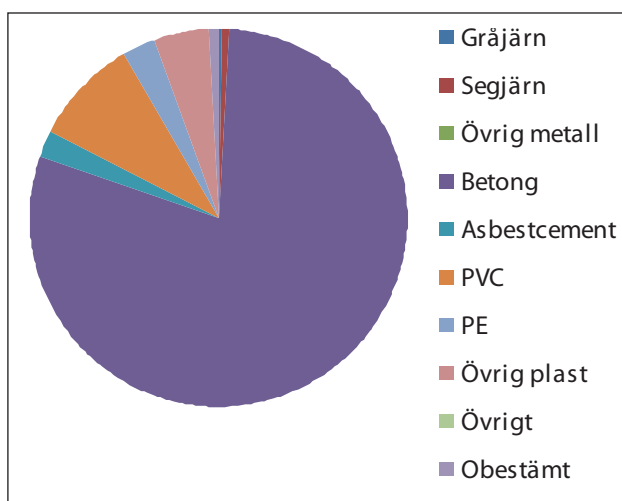
Figur 8 Göteborg, tryckavlopp spill



Figur 9 Linköping, tryckavlopp spill



Figur 10 Linköping, spill självfall



Figur 11 Linköping, dagvatten

Bilaga 2

Transmissions- och frekvensstudie

Inledning

Det är allmänt känt att vattenytan i flöden kontinuerligt ändrar karaktär. Dess fluktrationer öppnar möjligheten för en helt ny detektionsmetod för läckage. Genom att använda dopplerradar kan man spåra en läcka och dess utbredning från alla typer av rör. Tekniken har prövats i småskalighet och visat sig mycket lovande. Syftet med detta projektförslag är att under en projekttid på 18 månader utvärdera metoden i större skala för olika ledningsmaterial, marksammansättningar och djup. I detta projekt kommer behovet att definieras och därefter kommer lämpliga frekvenser för detta att testas.

I denna första rapport presenteras några grundläggande begrepp och definitioner. Dessutom redovisas några mätresultat på transmission genom asfalt och transmissionsberäkningar på fyllnadsmaterial. Beräkningarna baseras på antagna materialegenskaper och vatteninnehåll. Framförallt vatteninnehållet i fyllnadsmaterialet har stor betydelse för transmissionsegenskaperna.

Bakgrund

I dagsläget finns det ingen heltäckande metod att detektera vattenläckor på rör av olika material och dimensioner samt rör som är lagade med plastinfällningar. Den vanligaste förekommande metoden, "korrelatorn", har begränsningar gällande plastledningar och rör av grövre diameter.

Energikostnaden för att producera och distribuera dricksvatten uppskattas till 500 GWh/år. Ledningsnätet är av olika status och 10–20 % av det vattnet som produceras och distribueras läcker ut ur nätet vilket motsvarar en energikostnad av 50–100 GWh. Detta innebär att en påtaglig besparing, både energi- och pengamässig är möjlig.

FOI har Sveriges största forskningsverksamhet inom radar och dess tillämpningar. Efter en intern förfråga om det är möjligt att detektera vattenrörelser under mark började funderingarna starta hur detta skulle kunna göras. Genom att använda radar på ett helt nytt sätt för markpenetration samt nyttja avancerad signalbehandling ansågs detta fullt möjligt. Att detektera vattenläckor från rör under mark kom snabbt upp som ett tillämpningsområde.

Fördelen med markradar är förutom att vara en viktig kompletterande metod för exakt lokalisering vid läckage även funktionen att kunna härleda orsaken till vattenflöde vid felsökning då vatten tränger upp eller in i fastighet. Dessutom kan man även komma att kunna söka efter ev. läckage på plastledningar som annars är mycket svåra att avlyssna. Ovanstående problematik omfattar även alla trycksatta vattenledningar med diameter över 300 mm, oavsett material, d.v.s. även stål, gjutjärn och kanske framförallt betongrör av större dimensioner.

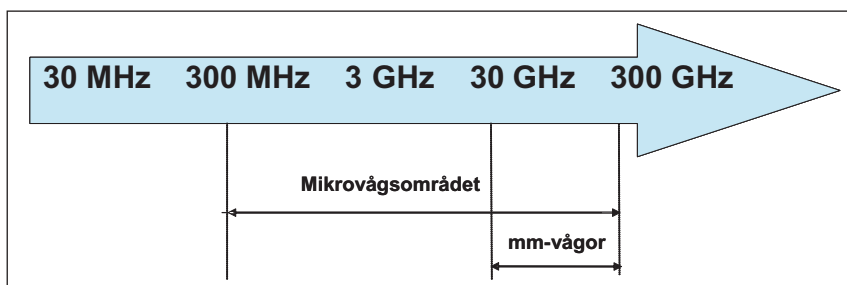
Definitioner och kriterier

I detta kapitel ges några grundläggande definitioner och kriterier rörande mikrovågor, radar och material.

Mikrovågsegenskaper

Frekvenser/våglängder

Mikrovågsområdet definieras som frekvensområdet 0,3–300 GHz vilket motsvarar våglängdsområdet 1 m – 1 mm. Se figur 1.



Figur 1 Definition av mikrovågsområdet

Som jämförelse kan nämnas att det synliga ljuset ligger inom våglängdsområdet ca 0,77 μm – 0,39 μm .

Permittivitet

Permittivitet (tidigare benämnt kapacitivitet eller dielektricitetskonstant) betecknas ϵ och anger ett materials förmåga att polariseras under inverkan av ett elektriskt fält.

Generellt är permittiviteten ett komplext tal ($\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$) där imaginärdelen ϵ'' beskriver materialets elektriska förluster, d.v.s. hur mycket en radarvåg dämpas i materialet.

Permittiviteten för vakuum är $\epsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$. Vanligen anges för ett material dess relativa permittivitet ϵ_r , som är förhållandet mellan materialets permittivitet och permittiviteten för vakuum:

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (\text{ekv. 1})$$

Permeabilitet

Permeabilitet (tidigare benämnt mobilitet) betecknas μ och anger ett materials magnetiska egenskaper. Generellt är permeabiliteten också ett komplext tal ($\mu = \mu' + i\mu''$) där imaginärdelen μ'' beskriver materialets magnetiska förluster. Permeabiliteten för vakuum är $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$. Vanligen anges för ett material dess relativa permeabilitet μ_r , som är förhållandet mellan materialets permeabilitet dividerad med permeabiliteten för vakuum.

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (\text{ekv. 2})$$

Våglängd i ett material

I vakuum gäller följande samband mellan våglängd (λ_0), frekvens (f) och utbredningshastighet (c_0):

$$\lambda_0 \cdot f = c_0 \quad (\text{ekv. 3})$$

I vakuum är den relativa permittiviteten, $\epsilon_r = 1$. I "vanliga" material är $\epsilon_r > 1$ och utbredningshastigheten $c < c_0$. Frekvensen är konstant, vilket innebär att våglängden i materialet är kortare än i vakuum för att ekv 3 skall gälla. Våglängden i materialet (λ_m) blir:

$$\lambda_m = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r} \quad (\text{ekv. 4})$$

Om exempelvis våglängden i luft är 10 cm och materialet har en relativ permittivitet på $\epsilon_r = 4$ blir våglängden i materialet 5 cm.

Radarsignalens hastighet i ett material

I vakuum är radarsignalens utbredningshastighet lika med ljushastigheten $c_0 \approx 3 \cdot 10^8$ m/s. Utbredningshastigheten i "vanliga" material är oftast lägre och beror främst på materialens dielektriska egenskaper. Utbredningshastigheten v_r blir:

$$v_r = c_0 / \sqrt{\epsilon_r} \quad (\text{ekv. 5})$$

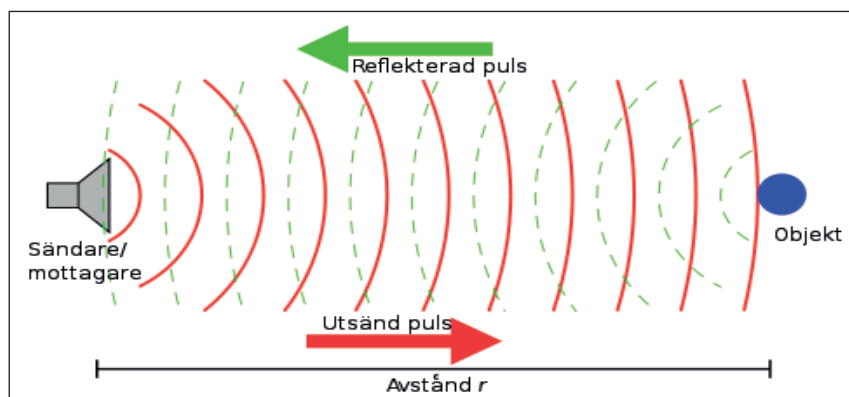
Om exempelvis den relativa permittiviteten $\epsilon_r = 4$ blir utbredningshastigheten $v_r = 1,5 \cdot 10^8$ m/s.

Grundläggande radarteknik

Detta avsnitt beskriver översiktligt grundläggande radarteknik. Radar (RADio Detcetion And Ranging) som vi idag uppfattar den utvecklades under 1930-talet. Under andra världskriget fick radarn sitt stora genombrott.

Radar allmänt

Principen för en radar är relativt enkel. En sändare skickar ut en puls på en viss frekvens. När denna puls träffar ett mål reflekteras en viss del av signalen och strålar tillbaka till radarns mottagare. Se figur 2.



Figur 2 Allmän princip för radar

Styrkan på den mottagna signalen beror på:

- Utsänd effekt
- Radarns antenner
- Avståndet till målet
- Målets reflekterande egenskaper
- Dämpningen i mediet mellan radarn och målet

En radar har oftast speciella antenner som koncentrerar den utsända signalen i en liten väldefinierad rymdvinkel. På så sätt får man en väl riktning där målet befinner sig.

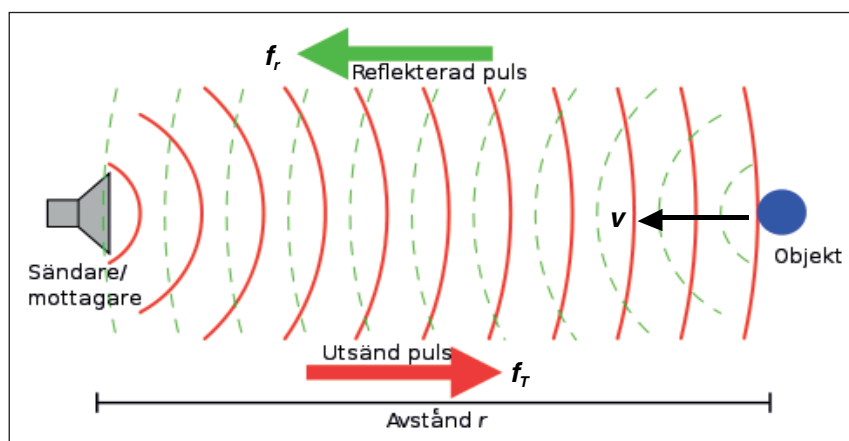
Dessutom skickar radarn oftast ut en kort väldefinierad puls. Om man vet tidsskillnaden mellan utsänd och mottagen puls kan avståndet till målet beräknas som:

$$s = 2 \cdot v \cdot t \quad (\text{ekv. 6})$$

där s är avståndet, v pulsens hastighet (i luft $\approx 3 \cdot 10^8$ m/s) och t tiden mellan sändning och mottagning. Om det exempelvis tar 0,00001 s från sändning till mottagning i luft är avståndet till målet ca 6 km.

Dopplerradar

Dopplerradar är en effektiv detekteringsmetod mot rörliga mål eftersom man kan filtrera bort fasta ekon och därmed höja dynamiken i systemet. Man kan alltså detektera mindre mål. När den utsända radarpulsen träffar ett mål som rör sig mot eller från radarn så får den reflekterade signalen en annan frekvens än den utsända. Om målet rör sig mot radarn blir den reflekterade signalens frekvens högre och om målet rör sig från radarn blir den reflekterade signalens frekvens lägre. Det är samma effekt som man kan höra om ett signalerande tåg närmar sig, passerar och fjärmar sig. Se figur 3.



Figur 3 Princip för dopplerradar

Den frekvensskillnad man får beror på hastighetsskillnaden mellan radarn och det rörliga målet. Om den av radarn utsända frekvensen är f_T och målets hastighet v_r blir frekvensskillnaden f_d :

$$f_d = f_T \left[\frac{1 + \frac{v_r}{c}}{1 - \frac{v_r}{c}} \right] - 1 \quad (\text{ekv. 7})$$

där c är ljushastigheten i vacuum ($3 \cdot 10^8$ m/s).

Oftast är målets hastighet mycket mindre än ljushastigheten och frekvensskillnaden kan då approximeras som:

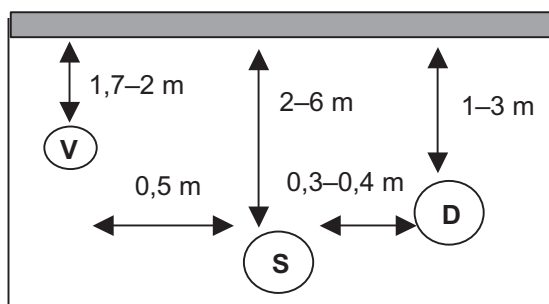
$$f_d \approx 2 f_T (v_r / c) \quad (\text{ekv. 8})$$

Om exempelvis ett mål rör sig med en hastighet på 10 m/s mot en radar som har en arbetsfrekvens på 2 GHz, blir frekvensskillnaden ca 13 Hz.

Materialegenskaper

Materialegenskaperna hos täck- och fyllnadsmaterialen bestämmer vilken transmission man får för en viss frekvens. Det är framförallt de dielektriska förlusterna (ϵ'') som bestämmer transmissionen. Generellt gäller att ju högre vatteninnehåll, desto högre förluster och därmed sämre transmission.

En typisk ledningsgrav (underlag från [1]) visas i figur 4.



Figur 4
Ledningsdjup i ledningsgrav med självfall spill- och dagvatten.

Typiska exempel på täck- och fyllnadsmaterial (underlag från [1]) visas i tabell 1.

Tabell 1 Beskrivning av ledningsgrav för ledningar i gatan

Material	Djup (noll där asfalt slut) m	Dimension mm	Kommentar
Asfalt	0,1–0,2	–	Kan vara upp till 0,5 m
Kross	0–0,1	0–18	Del av gatuuppgbyggnad
Kross	0,1–0,5	0–100	Del av gatuuppgbyggnad
Grus	0,4–1,5	Befintligt grus eller 0–18	Om det finns grus i gropen används detta annars används kross (0–18 mm) i detta område också. Vid nyläggning i Linköping fylls detta lager oftast med det material som finns i marken, vanligtvis lera.
Kross	1,5– botten	0–18	Så att ledningarna täcks

Ledningsmaterial och dimensioner

För ett system för att detektera vattenläckor är ledningsmaterial kanske av mindre betydelse. En fördel är om ledningarna består av ledande material (metall) då man i så fall inte kan detektera strömmande vatten inuti rören. Mer än 50 % av ledningarna [1] består av olika former av järnrör och runt 25 % av ledningarna består av PE.

De vanligaste dimensionerna för huvudledningar är 150 mm men storlekarna varierar mellan 100–700 mm. I tabell 2 visas typiska rörledningsmaterial.

Tabell 2 Sammanställning av ledningsmaterial i Norrköping.

Material	Andel
PE	28 %
Gjutjärn	24 %
Segjärn	18 %
PVC	16 %

Fyllningsmaterial

Minst 90 % av vatten- och spilledningarna är förlagda i gator [1]. I bebyggda områden är nästan 100 % av ledningarna förlagda i gatorna. Shakterna är uppbyggda för att skydda ledningarna och för att minimera sättningar i vägen. För äldre ledningar kan fyllningen även bestå av lera. I tabell 3 visas typisk permittivitet för några fyllningsmaterial [2].

Tabell 3 Typisk permittivitet för olika fyllnadsmaterial

Material	Typisk permittivitet (realdel)
Sten (allmän)	4–12
Torr sand	4–6
Blöt sand	30
Torr lera	8
Blöt lera	33
Torr jord	3–8
Blöt jord	4–40

I grönområden och skog fylls ledningsgravarna oftast med den mark som ledningarna ligger i. Vissa ledningar borrar dessutom och då sker uppgrävning endast en gång per 500 m. De flesta ledningar ligger i lermark.

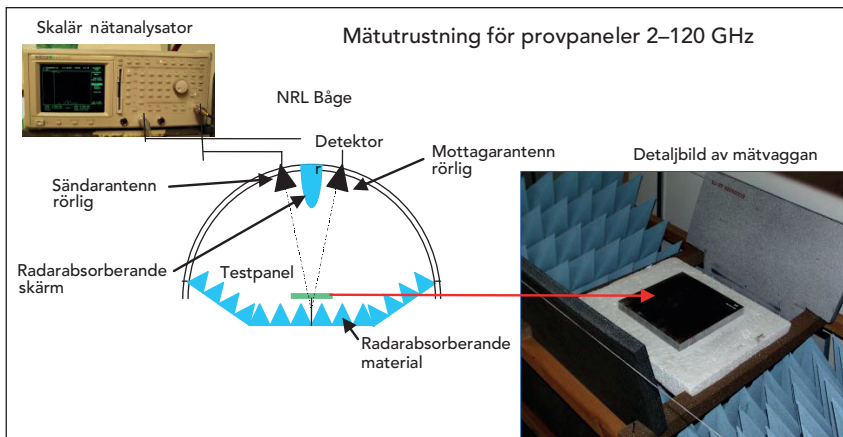
Täckmaterial

I städer består täckmaterialet huvudsakligen av asfalt, då rörledningarna ligger i gatnätet. I tabell 4 visas typisk permittivitet för några olika täckmaterial [2].

Tabell 4 Typisk permittivitet för olika täckmaterial

Material	Typisk permittivitet (realdel)
Granit	9
Kalksten	6
Sandsten	4
Asfalt	3–6
Betong	9–12

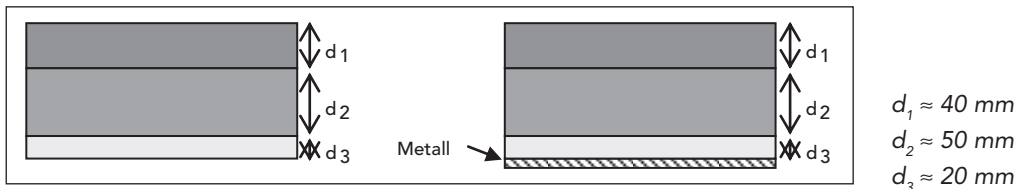
I en tidigare studie [3] har mätningar på asfalt genomförts i FOI:s mätvagga, som visas i figur 5. Mätningar har gjorts inom frekvensområdet 2–20 GHz.



Figur 5 Schematisk skiss och foto över FOI:s mätvagga.

Eftersom dessa mätningar är de enda mätningar på relevanta material som finns tillgängliga, ges en lite mer detaljerad genomgång av dessa.

Reflektionsmätningar på två olika asfaltbitar (ca 50·50 cm) har gjorts med och utan metallbackning. I figur 6 visas en skiss på provbitarna. Även ett tredje prov (cirkulärt med en diameter på ca $\phi \approx 38$ cm) mättes, men detta prov bedöms ha en för liten yta i förhållande till höjden för att med god noggrannhet kunna mätas i FOI:s mätvagga.



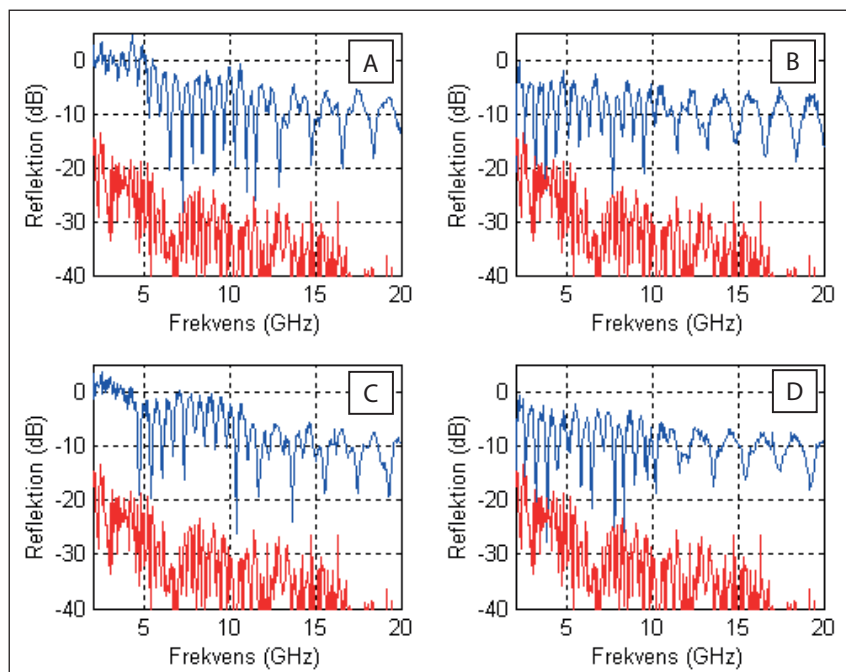
Figur 6 Skiss på en av de rektangulära provbitarna, med och utan metallbackning

I figur 7 visas ett foto på provbitarna. Resultat från reflektionsmätningarna visas i diagram 1. Diagrammen visar reflektionen som funktion av frekvensen från provbitarna, samt reflektionen från bakgrunden, d.v.s. då inga provbitar fanns i mätvagga. Bakgrunds-nivån, som bestämmer noggrann-



Figur 7
Foto på
provbitarna

heten i mätresultaten på provbitarna, bör vara minst 20 dB lägre, jämfört med reflektionen från provbitarna.



Blå kurva reflektion från provbitarna, röd kurva reflektion från bakgrunden (störsignal).

A: prov nr:22 med metallbackning

B: prov nr:22 utan metallbackning

C: prov nr:31 med metallbackning

D: prov nr:31 utan metallbackning

Diagram 1 Resultat från reflektionsmätningar på kvadratiska (ca 50 · 50 cm) provbitar av asfalt.

Ur de preliminära mätningarna på asfaltproven som har gjorts inom frekvensområdet 2–20 GHz, kan man urskilja tre olika områden.

- 2–5 GHz
- 5–12 GHz
- 12–20 GHz

Frekvensområde 2–5 GHz

Skillnaden mellan mätningar med och utan metallbackning visar att asfaltproven verkar vara relativt transparenta inom detta frekvensområde. Se diagram 2.

Som framgår av diagrammet får man med metallbackning en relativt konstant nivå runt 0 dB. Detta motsvarar reflektionen från en plan metallplåt och troligen är det plåten under provbiten som exponeras. Utan metallbackning får man en oscillerande reflektionsnivå, som från ett dielektriskt materialskikt med luft bakom.

Ur detta kan antas att man har en relativt låg transmissionsförlust genom asfaltskiktet.

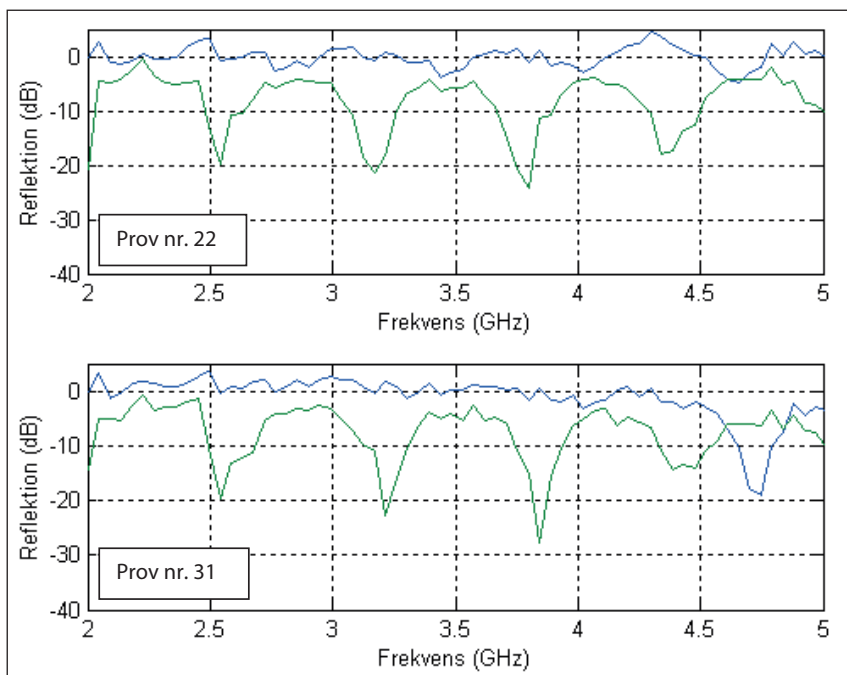
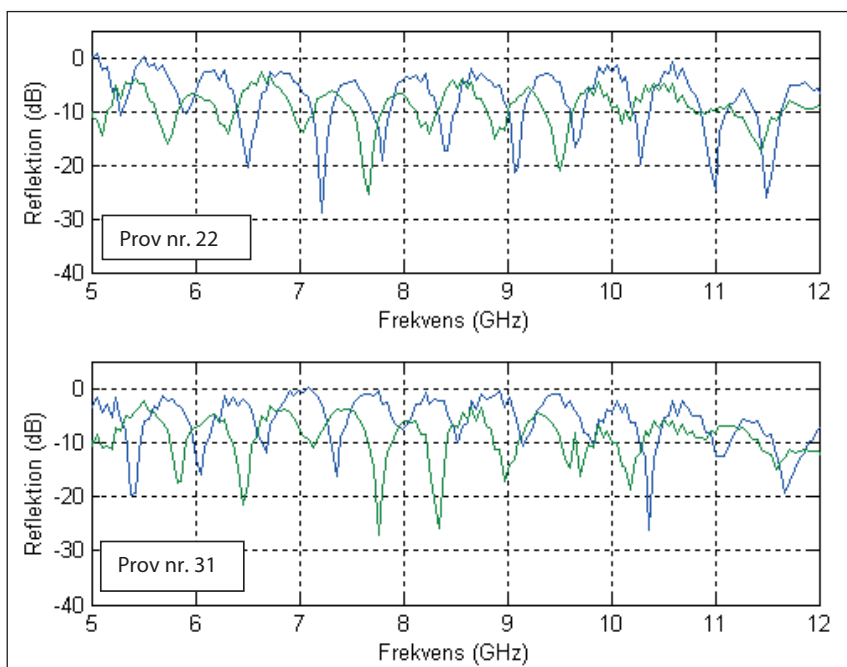


Diagram 2 Reflektion som funktion av frekvens för de två rektangulära asfaltproverna.

Blå kurva: med metallbackning och
grön kurva utan metallbackning.

Frekvensområde 5–12 GHz

Inom detta frekvensområde har metallbackningen mindre inverkan och en oscillerande karaktär ses i diagrammen (se diagram 3). Frekvensen på oscilleringen motsvarar två lager av material med en permittivitet mellan 4–5 och en tjocklek på 40–50 mm.



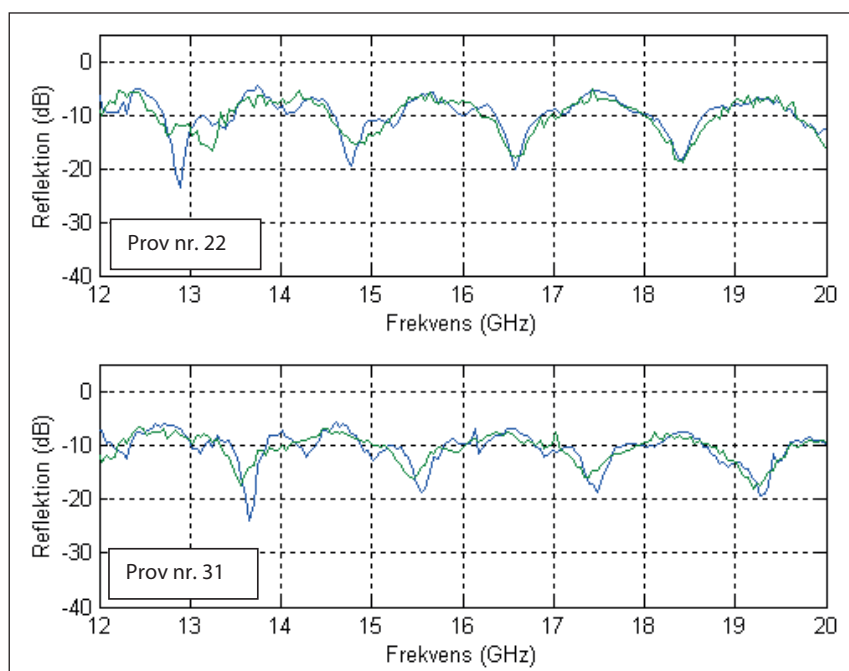
Blå kurva: med metallbackning och
grön kurva utan metallbackning.

Diagram 3 Reflektion som funktion av frekvens för de två rektangulära asfaltproverna.

Ur detta kan antas att man har en reflektion från ytan som tillsammans med den transmitterade och reflekterade signalen från undersidan interfererar och ger upphov till den oscillerande signalen. Visserligen får man en viss transmission, men samtidigt en reflektion från ytan, som innebär att mindre signal tar sig igenom ytskiktet.

Frekvensområde 12–20 GHz

Inom detta frekvensområde har metallbackningen ännu mindre inverkan och en långsammare oscillerande karaktär ses i diagrammen (se diagram 4). Frekvensen på oscilleringen motsvarar ett lager av material med en permittivitet runt 4 och en tjocklek på ca 40 mm.



Blå kurva: med metallbackning och
grön kurva utan metallbackning.

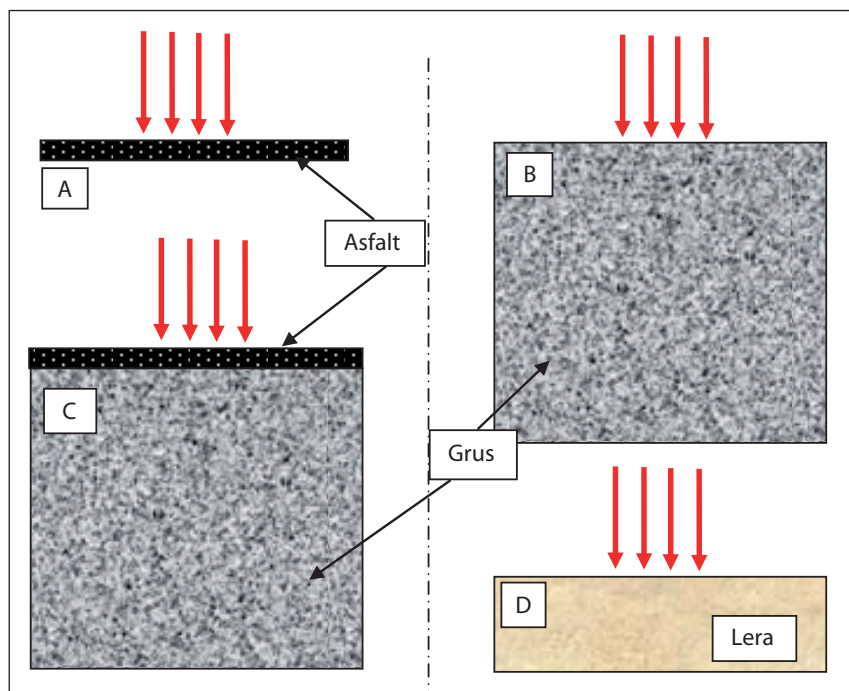
Diagram 4 Reflektion som funktion av frekvens för de två rektangulära asfaltproverna.

Ur detta kan antas att man har en reflektion från ytan som tillsammans med den transmitterade och reflekterade signalen från undersidan av det översta skiktet interfererar och ger upphov till den oscillerande signalen. Visserligen får man en viss transmission, men samtidigt en så hög reflektion från ytan, som innebär att endast signalen kan ta sig igenom det översta ytskiktet.

Transmissionsberäkningar

För att få en uppfattning av transmissionsdämpningen i fyllnadsskiktet (eftersom denna kommer att vara störst) har några beräkningar gjorts med antagna materialdata. Transmissionen genom skikten har beräknats (envägstransmission). I radarfallet blir transmissionsförlusterna dubbelt så stora (tvåvägstransmission).

Beräkningarna har gjorts på ett 15 cm tjockt täcksikt av asfalt (A), på en 1,5 m djup ledningsgrav (B), på en 1,5 m djup ledningsgrav med ett 15 cm tjockt asfaltsikt (C), samt på ett 50 cm tjockt blött lersikt (D). Se figur 8.



Figur 8 Fyra olika beräkningsfall. Asfaltsikt (A), ledningsgrav (B), ledningsgrav med asfaltsikt (C) och ett blött lersikt (D).

Beräkningarna har gjorts med några olika fyllnadsmaterial med antagna materialegenskaper. Se tabell 5.

Tabell 5 Beräkningsfall för transmissionsberäkningar.

Beräkningsfall	Skikt/fyllnadsmaterial	Antagen permittivitet
1	Enbart ett asfaltsikt	$4,4 + i \cdot 0,1$
2	Torrt grus	$8 + i \cdot 0,2$
3	Blött grus	$8 + i \cdot 0,5$
4	Blött grus med täcksikt av asfalt	$4,4 + i \cdot 0,1/8 + i \cdot 0,5$
5	Blöt lera	$33 + i \cdot 5$

Beräkningsfall 1

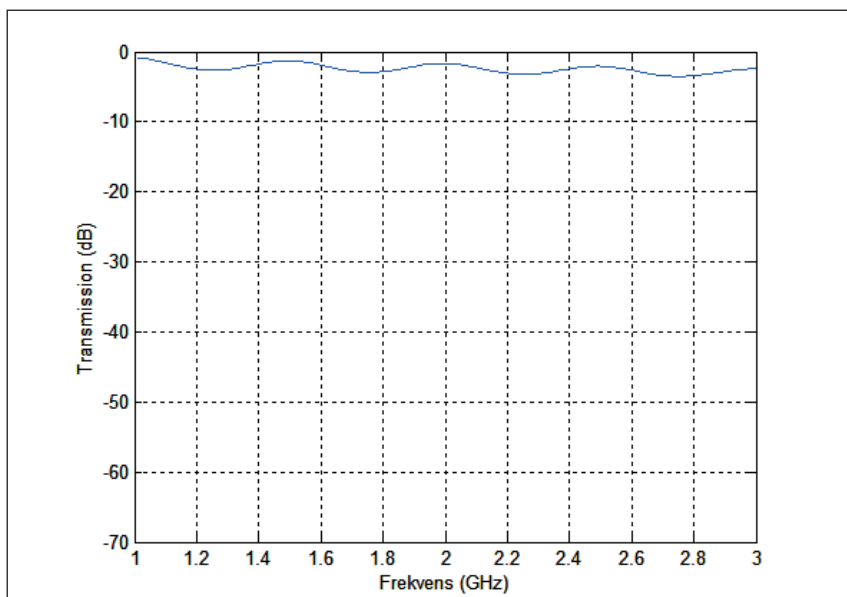
I diagram 5 visas transmissionen genom ett 15 cm tjockt asfaltsikt.

Som framgår fås relativt låg transmissionsdämpning beroende på låga förluster samt en tjocklek som är av samma storleksordning som våglängden.

Beräkningsfall 2

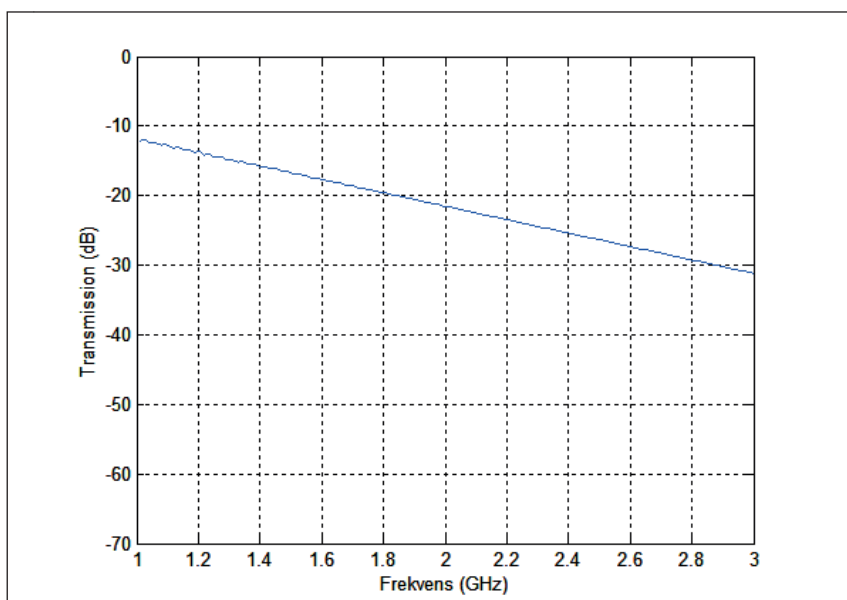
I diagram 6 visas transmissionen genom en 1,5 m djup ledningsgrav bestående av torrt grus.

Som framgår fås en transmissionsdämpning på ca 20 dB (envägs) vid 2 GHz.



Permittivitet $4 + i \cdot 0,1$
och tjocklek 15 cm

Diagram 5 Transmission genom ett 15 cm tjockt asfaltskikt.



Permittivitet $8 + i \cdot 0,1$
och tjocklek 1,5 m

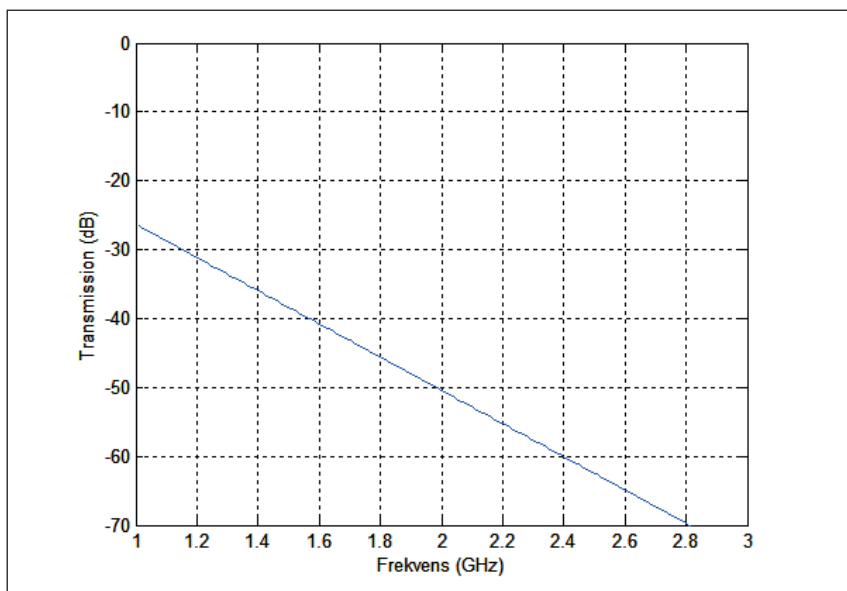
Diagram 6 Transmission genom en 1,5 m djup ledningsgrav.

Beräkningsfall 3

I diagram 7 visas transmissionsdämpningen genom en 1,5 m djup ledningsgrav bestående av fuktigt grus.

Som framgår fås en transmissionsdämpning på ca 50 dB (envägs) vid 2 GHz.

Fuktighet/vatteninnehåll har en stor betydelse för transmissionsegenskaperna.

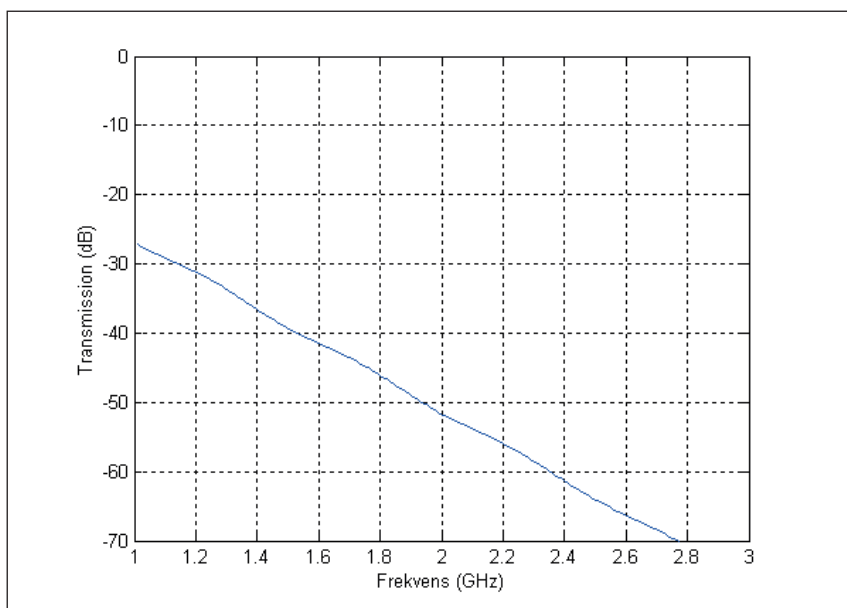


Permittivitet $8 + i \cdot 0,5$
och tjocklek 1,5 m

Diagram 7 Transmission genom en 1,5 m djup ledningsgrav bestående av fuktigt grus.

Beräkningsfall 4

I diagram 8 visas transmissionen genom en 1,5 m djup ledningsgrav bestående av fuktigt grus med ett 15 cm tjockt täcksikt av asfalt.



Permittivitet $4 + i \cdot 0,1$ för asfalt
och $8 + i \cdot 0,5$ för grus.

Tjocklek 15 cm för asfalt
och 1,5 m för grus

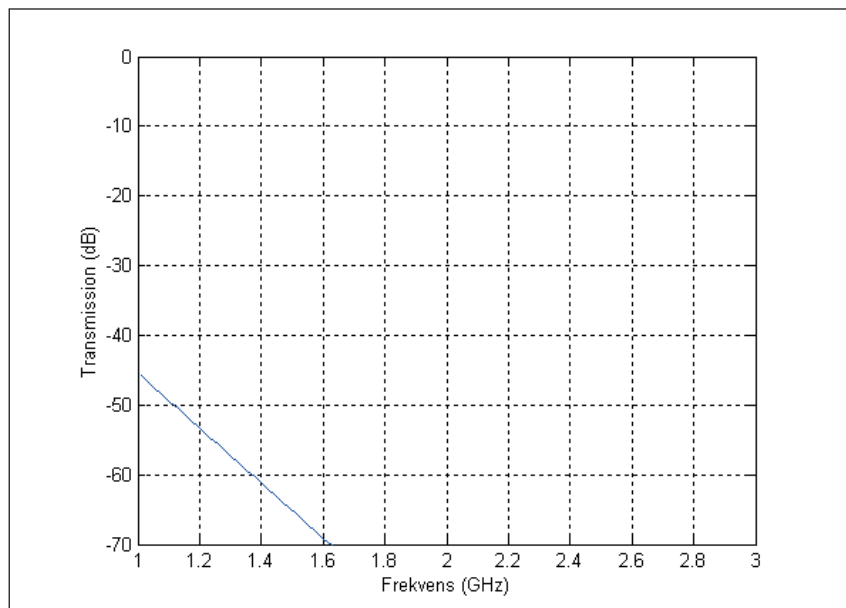
Diagram 8 Transmission genom en 1,5 m djup ledningsgrav med ett 15 cm tjockt täcksikt av asfalt.

Som framgår inverkar asfaltskiktet bara marginellt i detta fall, vilket överensstämmer med de mätningar som presenterades i avsnittet om täckmaterial.

Beräkningsfall 5

Slutligen visas i diagram 9 transmissionsdämpningen genom ett 50 cm tjockt fuktigt lersikt. Lera består av nanopartiklar och kan hålla kvar fuk-

tighet väldigt bra. Vattenhalten blir hög och lera innehåller dessutom delvis ledande material.



Permittivitet $33 + i \cdot 5$

Diagram 9 Transmission genom ett 50 cm tjockt fuktigt lerskikt

Som framgår blir transmissionsdämpningen mycket stor. En ledningsgrav bestående av fuktig lera är i princip ogenomtränglig för mikrovågor.

Detta stämmer också bra överens med ref. [2].

Clay minerals

When clay minerals are present in the rocks and soils, dissolution will create ionic solutes. These ions become mobilized in saturated pore space, and conductivity increases. The presence of clay minerals will tend to increase conductivity and thus increase the amount of conductive attenuation. It is hard for radar to "see through" clayey soils.

Slutsatser och rekommendationer

2 GHz kan vara en lämplig frekvens med hänsyn till antennstorlek och transmissionsegenskaperna i mark. Generellt blir transmissionsegenskaperna bättre ju lägre frekvens man använder. Detta medför dock också större antenner och sämre möjlighet att få bra direktivitet, samt att skillnaden i dopplerfrekvens blir mindre och därmed svårare att detektera. Beroende på täckskiktets och fyllnadsmaterialets materialegenskaper kan dock även högre frekvenser vara gynnsamma. Detta kräver dock god kännedom om materialegenskaperna.

Fyllnadsmaterialet i ledningsgroparna och framförallt dess vatteninnehåll har stor betydelse på transmissionsdämpningen. Grus är fördelaktigt medan blöt lera omöjliggör mikrovågstransmission.

Ett täckskikt av asfalt är också fördelaktigt beroende på relativt låga förluster och en tjocklek i samma storleksordning som våglängden vid 2 GHz (15 cm).

Beroende på de relativt stora djupen och därmed stora transmissionsförluster hos ledningsgravarna krävs en hög systemdynamik. Uppskattningsvis bör systemdynamiken vara ca 100 dB.

Den stora osäkerheten vid en bedömning av transmissionsdämpningen är vatteninnehållet i fyllningsmaterialet. Detta kommer att vara den begränsade faktorn för ett radarbaserat system. För att få en bättre kunskap om detta bör ett eventuellt vidare arbete innefatta materialmätningar på olika typer av fyllningsmaterial med varierande vatteninnehåll.

Vidare bör materialmodellering (homogenisering) på fyllnadsmaterial göras.

Utifrån sådan ökad kunskap kan en eventuell justering av mätfrekvens, systemdynamik et.c. göras.

Referenser

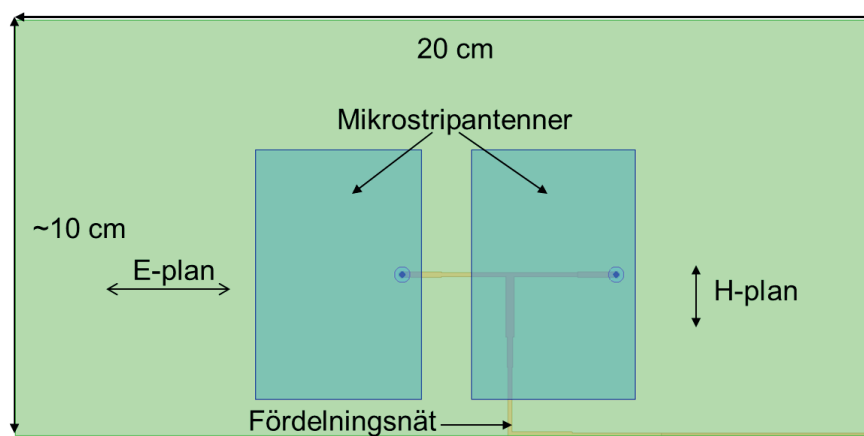
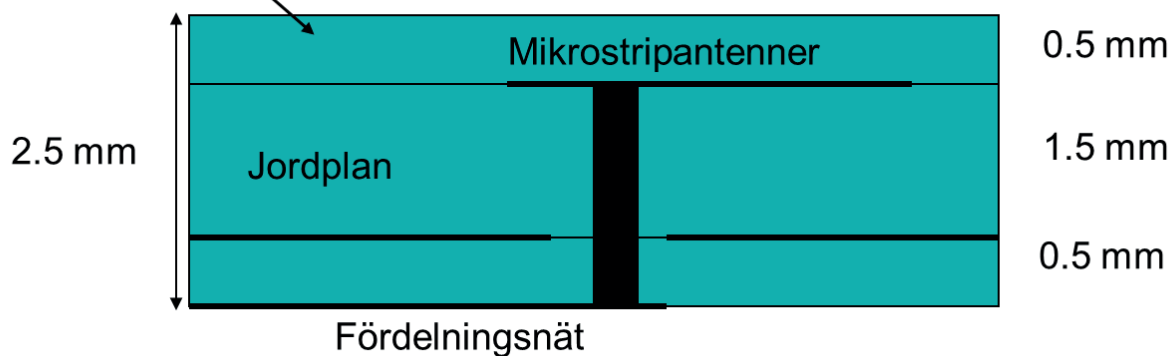
- [1] Rothman, M, "Rapport behovsanalys", PM, Norrköpings vatten, 2011-03-07.
- [2] Cardimona, et al. "Ground Penetrating Radar"
- [3] Ousbäck J-O, Abrahamson S., "Förstudie avseende tjockleksbestämning av asfalt", FOI Dnr: 06-2201, 2006-12-19

Bilaga 3 Antenndesign

Gruppantenn 2x2 element

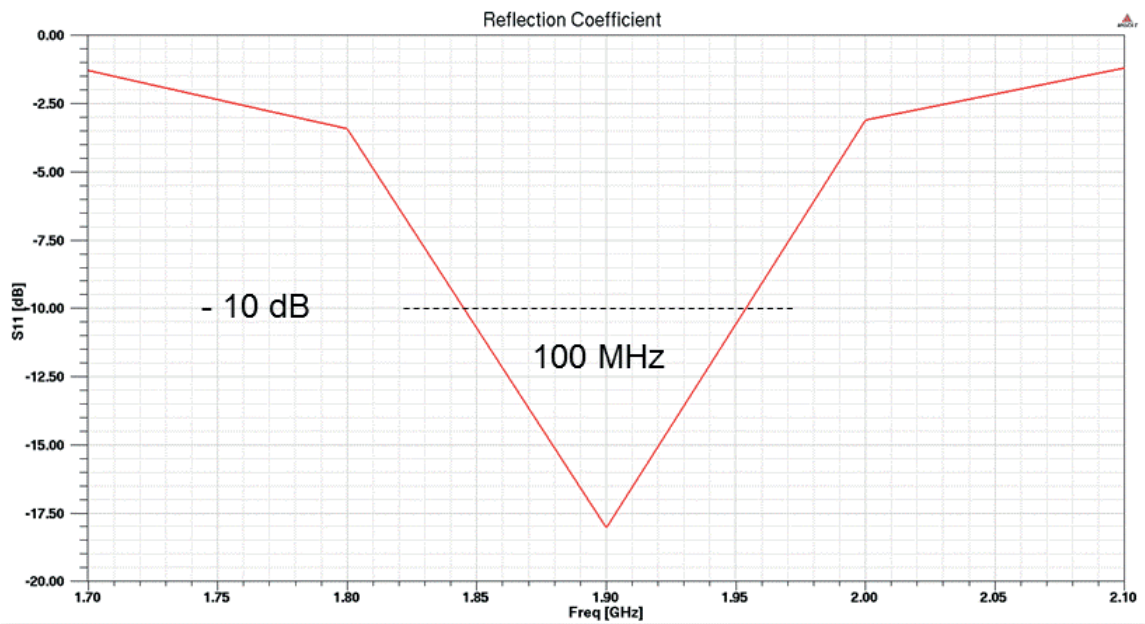
Antennen tillverkas med standard mönsterkortsteknik

Skydd/radom. Ju tjockare denna är desto mindre frekvenskänslig blir antennen för omgivande medium

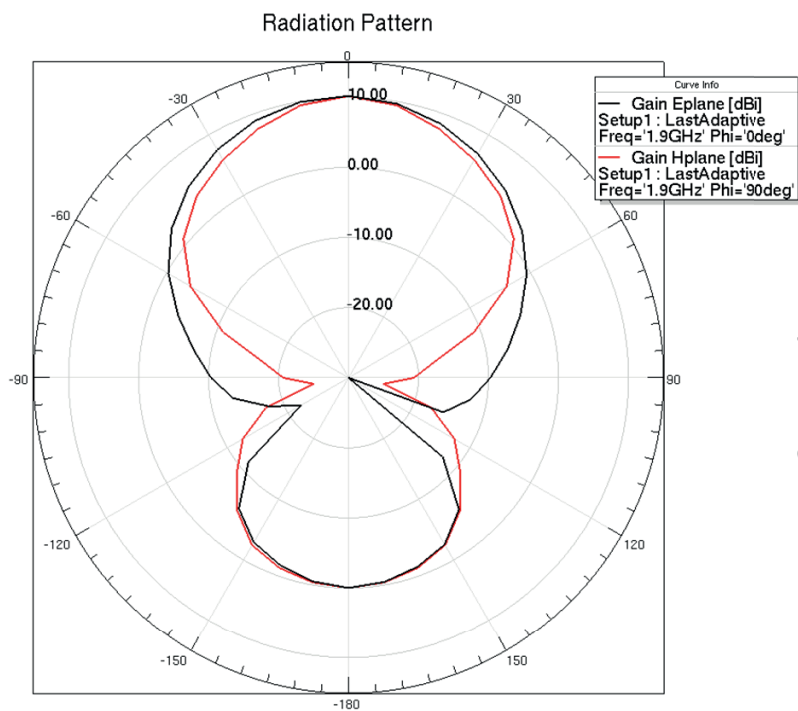


Endast halva antennen visas pga symmetri

Simuleringar



- 10 dB typiskt krav inom antenndesign = 90% strålar ut



Lobredd omkring $50^\circ \times 60^\circ$

Antennvinst ungefär 10 dBi

Fram/back förhållande
-10 dB. Beror på litet jordplan.

Backloben dämpas ut med
omslutande låda + absorbenter



Box 47607, 117 94 Stockholm
Tfn 08 506 002 00
Fax 08 506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se