



Bild: Illustration av byggnadsavfall efter rivning [1]

Datakollektion av byggnadsmaterial

Datainsamling med hjälp av spektrometer för att identifiera byggnadsmaterial

Kandidatarbete inom institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Gustaf Sommeled, Emma Kjellander, Ali El Hage

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2025

www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2025

Datainsamling av byggnadsmaterial

ACEX11-VT25-11



INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH
SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2025

Datainsamling av byggnadsmaterial
Datainsamling med hjälp av spektrometer för att identifiera byggnadsmaterial
Ali El Hage, Gustaf Sommehed, Emma Kjellander

© ALI EL HAGE, GUSTAF SOMMEHED, EMMA KJELLANDER 2025.

Handledare: Josie Harrison
Examinator: Alexander Hollberg
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg

Skrivet i L^AT_EX
Göteborg 2025

Förord

Det här kandidatarbete markerar avslutningen på författarnas kandidatutbildning vid Chalmers Tekniska Högskola inom civilingenjörsprogrammen i elektroteknik och samhällsbyggnadsteknik. Projektet har utförts under vårterminen 2025 vid institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik.

Arbetsuppgifterna fördelades enligt följande. Samtliga gruppmedlemmar medverkade vid samtliga fältmätningar, vid utformningen av dokumenteringsmallen och vid framtagandet av rapportens inledande kapitel. Ali ansvarade för bearbetningen av den spektrala rådatan och genereringen av samtliga grafer. Gustaf och Emma ansvarade för litteraturstudien samt för den skriftliga utformningen av teori-, metod- och diskussionskapitlen.

Författarna framför sitt uppriktiga tack till Dr. Josie Harrison för engagerad handledning, konstruktiv återkoppling och värdefulla synpunkter som stärkt rapportens kvalitet samt till Dr. Alexander Hollberg för sitt stöd som examinator.

Gustaf Sommehed, Emma Kjellander, Ali El Hage, Göteborg, maj 2025

Sammandrag

Byggsektorn står inför utmaningen att öka återvinningen av byggnadsmaterial för att nå uppsatta hållbarhetsmål. En förutsättning för effektivt återbruk vid rivning av byggnader är förmågan att snabbt identifiera och sortera material utifrån deras återvinningsbarhet.

I det här arbetet har spektrala mätdata samlats in med hjälp av nära-infraröd (NIR) spektroskopi för materialen, trä, tegel och betong, med målet att öka möjligheterna till materialens återvinningsbarhet. En central del av arbetet har därför varit att undersöka hur faktorer som färg, ytskikt, ålder och placering (inomhus eller utomhus) har påverkat materialens reflektans inom det nära infraröda spektrumet.

Mätningarna har genomförts med det handhållna spektroskopiska instrumentet LinkSquare NIR, som icke-destruktivt registrerar reflektionsspektra från ytor. Ett brett urval av provmaterial med varierande egenskaper har analyserats, och mätresultaten har därefter visualiserats i form av spektralkurvor för att möjliggöra jämförelse av reflektansdata mellan olika material under olika förhållanden. Arbetet ger ökad förståelse för det spektrala databeteendet hos vanliga byggnadsmaterial samt hur varierande yttre faktorer kan påverka dessa.

Förståelsen av de spektrala databeteendets variation utgör en grund för utveckling av framtida metoder och verktyg som kan användas för att snabbt identifiera materialtyp och bedöma återvinningspotential direkt på plats i samband med rivningsprojekt.

Ordlista och förkortningar

Spektrometer	Instrument som mäter ljusets spektrum
Intensitet	Mängd ljus som reflekteras tillbaka från ytan vid en viss våglängd
Reflektans	Andel av det infallande ljuset som reflekteras från en yta
NIR	"Near Infrared Spectroscopy" – en teknik som använder nära infrarött ljus (ca 750-2050 nm) för materialanalys
A.U	"Arbitrary Units" - Godtycklig enhet vilket innebär att mätvärdet är relativt och beror på hur stark signalen är jämfört med andra våglängder och tester
Nm	"Nanometer" - en nanometer (nm) är en enhet för längd som motsvarar 10^{-9} m

Innehållsförteckning

Lista över figurer	xiii
Lista över tabeller	xv
1 Inledning	1
1.1 Syfte	2
1.1.1 Huvudsaklig målgrupp	2
1.1.2 Samhälleliga och etiska aspekter	3
1.2 Frågeställning	4
1.2.1 Mål	4
1.2.2 Avgränsningar	4
1.3 Tidigare forskning	5
2 Teori	7
2.1 Vanligt förekommande byggnadsmaterial	7
2.1.1 Byggnadsmaterialens funktion i en byggnad	9
2.2 Materialflöde i byggsektorn	9
2.3 Återanvändning av byggnadsdelar	9
2.3.1 Återanvändning av bärverk och stomkomplettering	10
2.4 Återvinning och återanvändning av material	11
2.4.1 Återanvändning och återvinning av tegel	11
2.4.2 Återanvändning och återvinning av betong	12
2.4.3 Återanvändning och återvinning av trä och virke	13
2.5 Dokumentation av byggmaterial	14
2.6 Mätverktyg	15
2.6.1 Hur mätdata redogörs	16
2.6.2 Potentiellt påverkande faktorer på mätverktyget	17
3 Metod	19

3.1	Översikt av genomförandet	19
3.2	Utförande av mätningar	20
3.2.1	Mall för mätning	20
3.3	Utförande av analys	22
3.4	Val av material	23
3.5	Val av skannade byggnadsdelar	23
3.6	Val av mätplatser för att belysa variation i spektral respons	24
4	Resultat	26
4.1	Mätresultat av materialtyper	26
4.1.1	Mätresultat för olika sorters trämaterial	27
4.1.2	Mätresultat för olika sorters tegelmaterial	31
4.1.3	Mätresultat för olika sorters betongmaterial	34
4.2	Mätresultat från specifika jämförelser	38
4.2.1	Resultat av jämförelse av materialtyper	38
4.2.2	Resultats jämförelse av varje materialtyp enskilt	39
4.2.3	Resultat av återkommande mätningar	41
4.2.4	Resultat av jämförelse av ytfukt	45
4.2.5	Resultat av olika belysningsförhållanden	49
4.2.6	Resultat av jämförelse mellan färgvariationer	50
4.2.7	Resultat av jämförelse av ytskikt	52
5	Diskussion	55
5.1	Analys av resultat från mätningar	55
5.1.1	Analys av olika träslag	56
5.1.2	Analys av olika tegeltyper	57
5.1.3	Analys av olika betongtyper	57
5.2	Analys av specifika jämförelser	59
5.2.1	Analys av jämförelse mellan återkommande mätningar	59
5.2.2	Analys av jämförelse av ytfukt	60
5.2.3	Analys av olika belysningsförhållanden	62
5.2.4	Analys av jämförelse mellan färgvariationer	63
5.2.5	Analys av jämförelse av ytskikt	65
5.2.6	Analys av byggtrender över tid	66
5.3	Analys av felkällor och förbättringsmöjligheter	69
6	Slutsats	71
6.1	Bedömning av datainsamlingsmetoden	71
6.2	Bedömning av mätresultat och analys	72
6.3	Bedömning av datapaketets användningsförmåga	73

Lista över figurer

2.1	Exempel på återanvändning av tegelsten [2]	11
2.2	Exempel på återanvändning av betong [3]	12
2.3	Exempel på återvinning av trä [4]	13
2.4	Bild på Linksquare NIR med dess dimensioner och våglängdsområde som instrumentet arbetar inom [5].	16
2.5	Exempel på en spektralkurva från resultat, spektraldata insamlad med LinkSquare NIR-spektrometer [6].	16
4.1	Spektralkurva för furu	27
4.2	Spektralkurva för ek	28
4.3	Spektralkurva för gran	29
4.4	Spektralkurva för övriga trämaterial	30
4.5	Spektralkurva för ljust tegel	31
4.6	Spektralkurva för mörkt tegel	32
4.7	Spektralkurva för rött tegel	33
4.8	Spektralkurva för grå betongvägg	34
4.9	Spektralkurva för helsten	35
4.10	Spektralkurvor för mursten	36
4.11	Spektralkurva för betonggrund	37
4.12	Initial spektral jämförelse mellan de tre materialtyperna: trä (brun), tegel (orange) och betong (grå)	38
4.13	Spektralkurva för trä	39
4.14	Spektralkurva för tegel	40
4.15	Spektralkurva för betong	41
4.16	Spektral jämförelse på samma betongmaterial vid olika tillfällen	42
4.17	Spektral jämförelse på samma tegelmaterial vid olika tillfällen	43
4.18	Spektral jämförelse på samma trämaterial vid olika tillfällen	44
4.19	Spektraljämförelse mellan torr och blöt träyta	45
4.20	Spektraljämförelse mellan torr och blöt betongyta	46

4.21	Spektraljämförelse mellan torr och blöt betongvägg	47
4.22	Spektraljämförelse mellan torr och blöt tegelyta	48
4.23	Spektraljämförelse i tre belysningsförhållanden	49
4.24	Spektraljämförelse av färgvariation på tegel	50
4.25	Spektraljämförelse av färgvariation på betong	51
4.26	Spektraljämförelse av ytskikten på olika typer av betong	52
4.27	Spektraljämförelse av ytskikten på olika typer av tegel	53
5.1	Visuellt underlag i samband med återkommande mätning av be- tonggrund	59
5.2	Visuellt underlag i samband med återkommande mätning av tegelvägg	59
5.3	Visuellt underlag i samband med återkommande mätning av träbänk	59
5.4	Visuellt underlag i samband med mätning av torr träyta	61
5.5	Visuellt underlag i samband med mätning av blöt träyta	61
5.6	Visuellt underlag i samband med mätning av torr betongyta	61
5.7	Visuellt underlag i samband med mätning av blöt betongyta	61
5.8	Visuellt underlag i samband med mätning av torr tegelyta	62
5.9	Visuellt underlag i samband med mätning av blöt tegelyta	62
5.10	Visuellt underlag i samband med mätning av vitmålad tegelvägg med tjockt lager färg.	64
5.11	Visuellt underlag i samband med mätning av gulmålad tegelvägg med tjockt lager färg.	64
5.12	Visuellt underlag i samband med mätning av ljusblåmålad tegelvägg med tunt lager färg.	64
5.13	Visuellt underlag i samband med mätning av ljusgul/beigemålad tegelvägg med tunt lager färg.	64
5.14	Visuellt underlag i samband med mätning av nytt tegel	67
5.15	Visuellt underlag i samband med mätning av äldre tegel	67

Lista över tabeller

2.1	Byggnadsmaterialets sammansättning i flerbostadshus [7]	8
3.1	Dokumenteringsmall för mätning	21
3.2	Exempel på namngivning av material	21
4.1	Externa faktorer för furu tillhörande figur 4.1.	27
4.2	Externa faktorer för ek tillhörande figur 4.2.	28
4.3	Externa faktorer för gran tillhörande figur 4.3.	29
4.4	Externa faktorer för övriga trämaterial tillhörande figur 4.4.	30
4.5	Externa faktorer för ljust tegel tillhörande figur 4.5.	31
4.6	Externa faktorer för mörkt tegel tillhörande figur 4.6.	32
4.7	Externa faktorer för rött tegel tillhörande figur 4.7.	33
4.8	Externa faktorer för betongvägg tillhörande figur 4.8.	34
4.9	Externa faktorer för helsten tillhörande figur 4.9.	35
4.10	Externa faktorer för mursten tillhörande figur 4.10.	36
4.11	Externa faktorer för betonggrund tillhörande figur 4.11.	37
4.12	Betong spektral jämförelse med dess yttre faktorer.	42
4.13	Tegel spektral jämförelse med dess yttre faktorer.	43
4.14	Trä spektral jämförelse med dess yttre faktorer.	44
4.15	Externa faktorer för torrt och blött trä tillhörande figur 4.19	45
4.16	Externa faktorer för torr och blöt betong tillhörande figur 4.20	46
4.17	Externa faktorer för torr och blöt betongvägg tillhörande figur 4.21	47
4.18	Externa faktorer för torrt och blött tegel tillhörande figur 4.22	48
4.19	Externa faktorer för olika belyningsförhållanden på betongvägg tillhörande figur 4.23	49
4.20	Externa faktorer för färgvariationer på tegel tillhörande figur 4.24	50
4.21	Externa faktorer för färgvariationer på betong tillhörande figur 4.25	51

1

Inledning

Bygg- och fastighetssektorn står för en stor del av resursförbrukningen och avfallsproduktionen i samhället, vilket orsakar stora miljö- och klimatpåverkningar, särskilt genom det linjära materialflödet där byggnadsmaterial ofta slutar som avfall istället för att återanvändas eller återvinnas. Istället för ett linjärt materialflöde eftersträvas ett cirkulärt materialflöde där hållbarhetsfrågor får ökad prioritet. Däremot är det inte bara viktigt för byggsektorn att återanvända byggnadsmaterial för att uppnå de hållbarhetskrav som ställs, utan även att utveckla effektiva metoder för att kartlägga och förstå vilka material som finns i byggnader.

Ett av de stora hindren för byggsektorn är bristen på tillförlitlig information om vilka material som ingår i byggnader. I många bostäder saknas detaljerad dokumentation över byggnadsmaterialens sammansättning, vilket i sin tur försvårar möjligheten att bedöma vilka resurser som finns tillgängliga och hur de kan hanteras. Visuellt inspektion räcker ofta inte för att exakt fastställa materialens egenskaper, särskilt när det gäller material som betong, tegel och trä där olika varianter kan vara svåra att skilja åt utan avancerad analys. Bristen på information begränsar inte bara återvinningen utan även möjligheten att effektivisera användningen av befintliga resurser.

Med digitaliseringens framgång finns det nya möjligheter att effektivisera insamlingen och analysen av materialdata även för byggnader. Genom att använda teknologier som exempelvis spektrometer, kan byggnadsmaterial identifieras mer noggrant. Ett sådant identifieringsverktyg möjliggör inte bara en djupare förståelse för byggnadsmaterialens egenskaper utan skapar även förutsättningar för en bättre materialhantering och resurseffektivitet inom byggsektorn.

1.1 Syfte

I samhället finns det en bristfällig dokumentation av bostäders ingående byggnadsmaterial, vilket skapar problem vid rivning av byggnader, då sortering av byggnadsmaterial kan bli felaktig samt tidskrävande. Utöver det problemet finns det även bostäder vars byggnadsmaterial påminner om eller visuellt liknar andra material, vilket skapar en ovisshet kring dess återvinningsbarhet.

För att göra identifieringen av återvinningsbart byggnadsmaterial mer effektiv och omfattande ska data samlas in för material i skiftande förhållanden och miljöer. Den insamlade datan bidrar med skapandet till ett datapaket som i en framtid kan användas till maskininlärning för en mer effektiv materialigenkänning i byggnader.

I projektet kommer datainsamlingen att utföras med hjälp av mätverktyget spektrometer, med syftet att samla in samt analysera data för olika byggnadsmaterial med varierande yttre samt inre faktorer, för att vidare kunna identifiera mönster samt skillnader i olika mätresultat. Analysen av hur olika faktorer påverkar mätresultatet skapar förutsättningar för ett mer tillförlitligt mätverktyg som i en framtid kan bidra till en effektiviserad och trovärdig identifieringsprocess.

1.1.1 Huvudsaklig målgrupp

Den huvudsakliga målgruppen för projektet utgörs av forskare, byggnadsföretag, arkitekter och myndigheter med intresse för hållbart byggande och materialåteranvändning. Genom att bidra med en systematisk kartläggning av byggnadsmaterial i svenska byggnader syftar projektet till att ge forskare ett underlag som kan användas för att vidareutveckla identifieringsverktyg. Ett mer effektivt och pålitligt identifieringsverktyg möjliggör i förlängningen ett förbättrat återvinnings- och återanvändningsarbete inom byggbranschen.

För byggföretag har ett sådant verktyg praktisk betydelse, särskilt vid rivning eller ombyggnation där kunskap om materialens sammansättning kan avgöra om och hur material kan återanvändas. En ökad återanvändning av byggnadsmaterial bidrar både till minskade kostnader och till miljömässiga vinster.

Myndigheter utgör en tredje viktig målgrupp. Ett identifieringsverktyg kan här användas i samband med insamling av data kring materialflöden, miljörapporter och inventering av den byggda miljön i städer. Det kan även vara ett stöd vid implementering av styrmedel och policyarbete inom hållbar stadsutveckling.

1.1.2 Samhälleliga och etiska aspekter

En central samhällelig aspekt av att effektivisera identifieringen av byggnadsmaterial med hjälp av spektrala mätverktyg är möjligheten att främja en mer cirkulär byggindustri. Genom att underlätta sortering och klassificering av befintliga byggnadsmaterial kan fler byggaktörer på ett tillförlitligt sätt återanvända eller återvinna material vid nybyggnation eller renovering. Det bidrar till en mer hållbar stadsutveckling, där resurser används mer effektivt och klimatpåverkan från nyproduktion minskar. Samtidigt reduceras mängden bygg- och rivningsavfall, vilket i förlängningen avlastar avfallssystemet och minskar belastningen på deponier.

Ur ett etiskt perspektiv innebär ett ökat nyttjande av återvunnet byggnadsmaterial även att behovet av råmaterial minskar, vilket kan motverka exploatering av känsliga naturmiljöer för exempelvis gruv- och stenbrytning. En sådan utveckling kan ha positiva effekter för både miljön och människors hälsa, då markförstöring, utsläpp och ingrepp i biologiskt viktiga områden minimeras. Det bidrar också till en mer rättvis global resursfördelning, särskilt om utvinning av byggnadsmaterial annars sker i länder med bristande miljöskydd eller arbetsvillkor.

1.2 Frågeställning

Hur kan man med hjälp av mätverktyget spektrometer undersöka olika byggnads-material för dess spektrala egenskaper genom att samla in data för olika material i byggnader? Vilka faktorer påverkar mätinstrumentet och hur identifieras avvikelser i resultatet?

1.2.1 Mål

Målsättningen med projektet för att kunna besvara frågeställningen var enligt följande:

- Sammanställa information och data om byggnadsmaterial med hjälp av mätverktyg samt visuell analys.
- Analysera och identifiera avvikelser och variationer på mätresultat från inre och yttre faktorer som kan ha påverkat materialets reflektans.
- Utföra tillräckligt många mätningar för att bidra med skapandet av ett datapaket, för att i en framtida utveckling effektivisera materialigenkänning baserat på maskininlärning.

Målen är framtagna i syfte att tydliggöra frågeställningen.

1.2.2 Avgränsningar

En viktig notering är att utvecklingen av ett effektivare materialigenkänningsverktyg ej utförs i det här projektet. Projektet utgör enbart en insamling av mätresultat som jämförs för att få fram yttre samt inte faktorer som påverkar resultatet, vilket vidare kommer kunna användas för maskininlärning i vidare utveckling.

För att göra projektet mer konkret genom att belysa det faktiska problemet kommer enbart material från bostäder att analyseras. Byggnadsdelarna som kommer att analyseras är enbart ytterväggar, samt material som är relevanta för projektet, exempelvis olika varianter av betong, tegel och trä.

1.3 Tidigare forskning

Användning av maskininlärning eller artificiell intelligens blir allt vanligare för att jämföra och hitta mönster av insamlad data för att kunna utveckla smartare lösningar för nutida problem. Att effektivt samla in data för att utveckla ett materialigenkänningsverktyg är ett aktuellt ämne där utvecklingen drivs framåt. I artikeln "AI-skanning ska förenkla återbruk av byggnader" [8] från tidningen ByggMaterial, undersöker en forskningsgrupp möjligheten att använda 3D-skanningsverktyg för att modellera byggnader för att sedan använda artificiell intelligens för att identifiera element och material. Målet med deras projekt är att minimera risker och öka effektiviteten inom återbruk.

I artikeln "KLUM: An Urban VNIR and SWIR Spectral Library Consisting of Building Materials" [9] har ett liknande projekt utförts med insamling av data från spektrometer för att sedan träna en AI- eller maskininlärningsmodell för att effektivt identifiera byggnadskomponenter och byggnadsmaterial. Datan de samlar in kalibreras för att få mer säkra värden. Exempelvis togs effekter från ljuskällor, vattenabsorption och andra brusreduceringar bort från mätdatan. Mätningarna gjordes inomhus med stabila temperaturnivåer samt med kontrollerade ljusförhållanden. Två stycken mätverktyg användes för att få detaljerade spektralkurvor. Ena mätverktyget (VNIR) mätte våglängder mellan 350-1000 nm och det andra verktyget (SWIR) mätte mellan 1000-2500 nm.

2

Teori

Kapitlet "teori" fungerar som en förstudie och syftar till att ge en övergripande förståelse för de teoretiska grunder som projektet vilar på. Genom att sammanställa relevant bakgrundsinformation skapas en kunskapsbas som underlättar tolkningen av metoder, resultat och diskussion av materialet som presenteras i senare delar av rapporten. Kapitlet behandlar bland annat tidigare forskning, tekniska begrepp samt centrala faktorer som påverkar datainsamling och analys i studien.

2.1 Vanligt förekommande byggnadsmaterial

För att skapa en grundläggande förståelse för vilka material som ett identifieringsverktyg bör kunna särskilja, är det relevant att undersöka vilka byggnadsmaterial som är vanligt förekommande. Det gäller både i nyproduktion och i det material som blir rivningsavfall.

Det rivningsavfall som dokumenteras skapar information om andelen mest förbrukat byggnadsmaterial. År 2022 revs 13 miljoner ton ofarligt avfall där jordmassor, muddermassor, mineralavfall inklusive betong och tegel, träavfall och olika metallavfall utgjorde den största mängden [10]. De byggnadsmaterial som ingår i byggnader som rivs mest frekvent är alltså betong, tegel, trä och metall [10]. En viktig aspekt att belysa är även vilka byggnadsmaterial som förekommer mest frekvent i byggnader genom olika tidsperioder. Information om materialen fås från de byggnader som rivs idag och även för de byggnader som kommer att rivas i framtiden. Nedan presenteras följande tabell som visar andelen mest använda byggnadsmaterial i Sverige baserat på olika byggnadstrender från år 1901 till år 1990.

Tabell 2.1: Byggnadsmaterialets sammansättning i flerbostadshus [7]

Material	Vikt [%] 1901-1920	Vikt [%] 1981-1990
Betongmaterial	9	79
Trämateriel	13	2
Keramiskt material	33	5
Natursten	20	-
Lättbetong	-	7
Puts	9	1
Grus, sand, kalkgrus	2	1
Gipsskivor	-	2
Stål	-	-
Kokaska	-	-
Övrigt	12	3

För att få en ökad förståelse samt informationen av vanligt förekommande byggnadsmaterial i byggnader behöver även dagens byggtrender tas till hänsyn. I dagens byggindustri, baserat på nya byggnadstrender, har materialanvändningen från tabell 2.1 ändrats. Betong fortsätter som det mest dominerande byggnadsmaterialet, där dess användning ökat kraftigt på grund av de fördelaktiga egenskaper som materialet har [11]. Byggnadsmaterialet trä har under de senaste 30 åren även ökat i användning där nya tekniker som korslimmat trä möjliggjort produktion av bland annat flervåningshus i trä [12]. Det keramiska materialet tegel har minskat i användning vilket grundar sig i en minskad tegelkonsumtion och produktion i landet [13]. Stål har de senaste 30 åren ökat i produktion och därmed användningen i landet, särskilt inom industriellt byggande samt för att reducera pris, tid, vikt och energi [14].

Dåtidens mest frekventa byggnadsmaterial i flerbostadshus som presenterats i tabell 2.1 kan jämföras med dagens materialanvändning, där det går att urskilja att de mest använda byggnadsmaterialen från 1901 till nu är betong, trä och tegel. De byggnadsmaterial som däremot är mest relevanta att framhäva ur ett återvinningsperspektiv, är de material som rivs i störst skala idag, vilket framförallt är bostäder från 1950-tal till 90-tal. Tabell 2.1 lyfter därmed majoriteten av de material som med störst sannolikhet kommer att demonteras.

2.1.1 Byggnadsmaterialens funktion i en byggnad

En byggnad utgörs av olika byggnadsdelar sammansatta av varierande material, där varje material valts baserat på dess specifika egenskaper och funktion, vilket gör dem lämpade för specifika användningsområden i konstruktionen. De byggnadsdelar som utgör majoriteten av vad som produceras idag är bärverksdelar, som är uppbyggda av olika stomkomponenter [15]. Ett bärverk är den delen av en byggnad eller konstruktion som överför laster till grunden och säkerställer byggnadens stabilitet samt bärförmåga [16]. Ett bärverk kan bestå av olika stomkomponenter såsom pelare, balkar, bjälklag, takstolar och fackverk vilket främst produceras av betong, stål och trä [15]. Ytterväggar och tak ska fungera som ett klimatskal och kan därmed produceras av trä, betong och tegel som yttre skikt där materialen gips, glas, tegel, isoleringsmaterial och plast befinner sig inuti väggen [17].

2.2 Materialflöde i byggsektorn

Byggsektorn hanterar varje år varierande materialflöden där byggkonjunkturen styr antalet byggnader som rivs, vilket innebär att mängden rivningsavfall ökar när nya byggnationer uppförs [7]. År 2022 återvanns ungefär 55 procent av de 13,6 miljoner ton avfall som byggsektorn genererat, där vissa material visades uppge högre återvinningsgrad än andra [10]. Det bygg- och rivningsavfall som ingick i totalen har inte mätts utifrån ett livscykelperspektiv, vilket dels beror på en otillräcklig detaljeringsgrad inom avfallsstatistiken samt att det saknas metoder för beräkning av det avfall som sker utomlands [10].

Medvetenheten om att skapa ett kretsloppssamhälle där material cirkulerar har växt sig starkare, men kontrollen över resursutnyttjandet måste bli mer effektiv och reglerad, för att återvinning och återanvändning ska bli en betydande del av materialflödet i byggsektorn [7].

2.3 Återanvändning av byggnadsdelar

Bärverk är de byggnadsdelar som bär på stora klimatavtryck i form av utsläpp av växthusgaser samt utvinning av naturresurser, men trots det kommer bärverk sällan till återbruk [15]. Byggnadsdelar som producerats av olika material får med dagens byggnadsindustri en varierande möjlighet till återbruk, där en majoritet av vad som återbrukas enbart är byggnadsdelar med hög beständighet över tid [15]. För att bryta det här mönstret försöker många aktörer stärka kopplingen mellan cirkulärt byggande och praktisk återbrukbarhet genom att inte bara återvinna

byggnadsdelar på grund av sin beständighet, utan även genom genomtänkta konstruktioner [18]. Många företag försöker bland annat integrera principer för enkel demontering redan i designfasen genom att förhålla sig till konceptet "design for disassembly" vilket möjliggör demontering som bevarar byggnadsdelar oförstörda [18]. Trots ett växande intresse av cirkulära system väljer de flesta byggprojekt att ändå förhålla sig till traditionella metoder, då produktionen av mer hållbara lösningar står i relation till de miljökrav som ställs från myndigheter [15].

Låga nivåer av återbrukade byggnadsdelar orsakas även av att det ej finns en nationell heltäckande bild av vad som återbrukas och i vilken utsträckning det sker. Återbruk av byggnadsdelar följs i dagsläget inte upp på nationell nivå eller bolagsnivå, utan främst i enskilda projekt [15]. Boverket har därför tagit fram förslag på hur data kan samlas in för att följa återbrukets utveckling, och det har gett en översiktlig bild av vad som återbrukas idag [19].

Bärverk av betong, stål och trä återbrukas mycket sällan idag medan stomkomplettering av tegel har stor potential [19]. För alla byggnadsdelars återanvändning råder det brist på teknikutveckling som främjar kvalitetssäkringar samt granskning av andra avvikelser i materialen, men byggnadsdelarna måste ändå genomgå liknande processer för att uppnå återanvändning vilket presenteras i nedanstående underrubrik.

2.3.1 Återanvändning av bärverk och stomkomplettering

Återbruk finns i huvuddrag av fem olika variationer där den första och vanligaste handlar om att ändra och renovera befintliga byggnader. Resterande variationer förekommer då hela eller delar av bärverk och stomkompletteringar flyttas från sin ursprungliga plats för att få en ny användning, vilket inte är lika vanligt förekommande [20].

För att öka återbruket måste bärverk och stomkompletteringars egenskaper bedömas, och vanligtvis utgår man efter två frågor som besvarar ifall byggnadsdelarna är säkra nu och i framtiden, samt om de uppfyller sitt avsedda ändamål idag och kommer att fortsätta göra det i framtiden [20].

När frågorna är besvarade kan återbruksprocessen starta, och för bärverk som ska flyttas innebär det en planering för demontering, kvalitetssäkring och återmontering [21]. För att kunna genomföra processen behöver en noggrann inventering av byggnaden göras för att identifiera de element som är lämpade för återanvändning, där elementens skick, dimensioner samt sammanfogning spelar en stor roll [22]. För att säkerställa att de återanvända byggnadselementen förblir oskadade samt användbara måste elementen demonteras försiktigt med specialutrustning

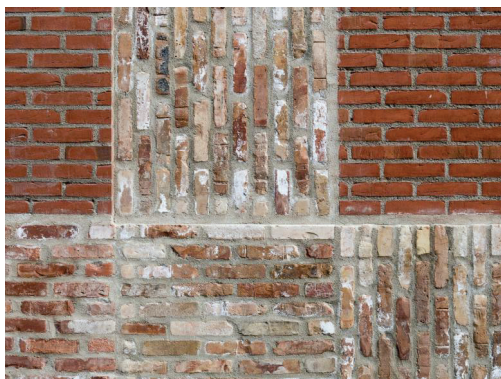
och expertis [22]. För att konstatera att byggnadsdelen kommer att hålla samma kvalitet i de nya byggnaderna behöver kvalitetssäkringar av elementen göras för att bedöma hållfasthet och beständighet [22].

2.4 Återvinning och återanvändning av material

Från kapitel 2.1 ges information om att tegel, betong och virke är de byggnads-material som rivs i störst grad samt även är de vanligaste byggnadsmaterialen i flerbostadshus. Följande underrubriker till delkapitlet beskriver potentialen till återvinning samt återanvändning för materialen tegel, betong och virke.

2.4.1 Återanvändning och återvinning av tegel

De tegelstenar som idag kan användas till återbruk är massiva tegelstenar från äldre bebyggelse vilket visas i figur 2.1 [7]. Massiva tegelstenar är mer robusta och tål rensning av gammalt murbruk, medan andra sorters tegel, som exempelvis håltegel som är ömtåligt och kan lättare gå sönder vid demontering [23]. Vid demontering av tegelbyggnation ska fasadtegel och murtegel i den bärande stommen skiljas åt, då de har olika kvaliteter [7].



Figur 2.1: Exempel på återanvändning av tegelsten [2]

Användningen av tegel som en bärande komponent är inte lika vanligt idag, men det är viktigt att ta till hänsyn vid rivning av äldre bebyggelse. Mursten har i tidigare byggnader varit skyddade från yttre belastning och måste därför testas för frostresistens för att kunna avgöra om tegelstenens egenskaper är goda för återanvändning i en mer utsatt miljö [7]. För att undersöka om tegelstenar är lämpade att återanvändas ska dess mekaniska skador undersökas, såsom kalksprängning, föroreningar samt hur stenarna har förvarats efter demontering [7].

Andra effekter som kan påverka en tegelstens återvinningsbarhet är dess dimension [7]. Äldre tegelstenar kan ha andra dimensioner som inte stämmer överens med dagens mått. Vid återbruk av tegelsten måste därför tidigare dimensioner användas vid projektering eller murning [7]. Tegelstenar som inte demonteras för återbruk kan istället användas som återvunnet material i krossad form [7]. Det krossade teglet har fraktioner i olika storlekar, vilket skapar olika användningsområden [7]. De mindre fraktionerna används som sättgrus under gångvägar och de större används som filtermaterial runt dräneringssystem samt som kapillärbrytande lager för att skydda konstruktioner från fuktskador i grunden.

2.4.2 Återanvändning och återvinning av betong

Balkar, pelare eller hela väggelement av betong i ursprungligt skick kan demonteras för återbruk, men här är det viktigt att undersöka betongelementens skick och bärförmåga, särskilt sprickor som möjligtvis uppstått i betongen, enligt betonghandboken och svensk standard vilket förklarats i avsnitt 2.3 [7].

För att kunna göra en bedömning av betongelementens skick kan ursprungliga ritningar underlätta beräkningar av hållfastheten för betongens nya belastningar och användning [7]. Information om betongen från den tiden som den är gjord är även väsentlig i den form att betong från äldre byggnationer kan innehålla material och tillsatser som inte uppfyller dagens krav inom miljö- och hälsostandarder, vilket begränsar den äldre betongens möjlighet till återbruk [24]. För att undersöka ifall ett betongelement kan användas för återbruk ska även armeringen undersökas för korrosion. I avsnitt 2.3 nämns konceptet "design for disassembly" vilket möjliggör demontering som bevarar byggnadsdelar oförstörda vilket visas i figur 2.2, där betongelement har fått ett nytt användningsområde.



Figur 2.2: Exempel på återanvändning av betong [3]

När betong istället ska återvinnas kan betongelement krossas. Krossad betong jämförs fördelaktigt med vanligt grus då betong har en hög elasticitetsmodul [7].

Krossad betong kan användas som bär- och förstärkningslager vid vägbyggnad och parkeringsändamål vilket även gäller för tungt belastade vägar [7].

Användningen av krossad betong har fler användningsområden för återbruk. Återvinning av krossad betong som ballast är möjlig under vissa förutsättningar med hänsyn till ballastens kvalitet samt den avsedda exponeringsklassen vilket förmedlas i den svenska standarden, SS 137003:2021+T1:2024 [25]. I standarden står det även att ballast av krossad betong ska uppfylla samma krav som för ny betong, och kraven ställs främst på ballasten av återvunnen betong vilket berör dess densitet, absorption samt fuktinnehåll.

2.4.3 Återanvändning och återvinning av trä och virke

Det finns goda möjligheter att återanvända virke till byggnadsändamål, vilket visas i figur 2.3. Gammalt konstruktionsvirke har nämligen en hög kvalitet och bra egenskaper för just återbruk [7]. Det är däremot viktigt att notera att användningen av återbrukat virke i bärande konstruktioner måste kontrolleras väl då det finns säkerhetskrav för dess avsedda användning [26].



Figur 2.3: Exempel på återvinning av trä [4]

Vid återbruk av konstruktionsvirke behöver en bedömning ske av dess hållfasthet och kvalitet för att säkerställa att det uppfyller dagens byggnormer och säkerhetskrav [26]. Bedömningen av hållfastheten hos nytt konstruktionsvirke görs genom visuell sortering, vilket undersöker virkets egenskaper där kvistar, sprickor och fiberlutning ingår [26]. Maskinell sortering används även vid bedömning av virkets hållfasthet, där maskiner icke-destruktivt mäter träets fysikaliska egenskaper och klassificerar även trämaterialiet i dess kvalitet [26]. De utmaningar som är kopplade till återbruk av gammalt konstruktionsvirke är bedömningen av dess hållfasthet. Det kan vara svårt att avgöra virkets ursprung, ålder och tidigare belastning samt om virket tidigare utsatts för skador och defekter, men med noggranna visuella

inspektioner samt mekaniska tester kan virke återanvändas som bärande element [26]. Konstruktionsvirket kan även få nya funktioner såsom golvplankor eller reglar [7].

2.5 Dokumentation av byggmaterial

Flera aktörer i byggsektorn deltar vid byggnation, men ansvaret för att dokumentera material blir ofta bristfälligt hanterat. När dokumentationen uteblir blir återvinning samt återanvändning svårt att genomföra i senare skeden.

En förutsättning för all form av återvinning är att materialet i någon form separeras och sorteras. När bostäder rivs vill man uppnå selektiv rivning vilket innebär att man separerar alla byggnadsmaterial för att kunna öka mängden återvunnet material [7]. Vid rivning av bostäder påbörjas i tidigt skede en noggrann inventering av byggnaden för att kartlägga vilka material som ingår, men här stöter byggindustrin på problem. Svenska kommuner som har bostäder med beviljat rivningslov, sökt rivningslov eller bostäder som anses aktuella för rivning, saknar nämligen kontroll över materialflöden, alltså information om ingående material och dess respektive mängd [7]. Det finns alltså en bristfällig dokumentering av ingående material i byggnader, och problemet grundar sig i sektorns bristfälliga erfarenhet och kunskap om dokumentation av byggnadsmaterial [7].

Processen att selektivt riva en byggnad för att medföra en mer cirkulär hantering av byggnadens material ses idag som tidskrävande och ej tillräckligt välutvecklad [7]. På grund av en bristfällig dokumentering av byggnadsmaterial kan inte byggnadsindustrin nå det kretsloppssamhälle som vill eftersträvas, då resurshanteringen av byggnadsmaterial oftast avslutas i deponering [7].

För att få en ökad förståelse om vilka material som ingår i en byggnad ska material dokumenteras i loggböcker, men på grund av bristfällig information och kunskap om vad dokumenteringen ska innehålla samt tidskrävande arbete av byggherren, har loggboken nedprioriterats [27]. Byggherren har ett huvudansvar att loggboken används och kompletteras vid behov, medan entreprenören och fastighetsägaren uppdaterar loggboken över tid [27].

Enligt rapporten "Dokumentationssystem för byggprodukter" har Boverket [27] fått i uppdrag att komplettera förslag på hur dokumentering hanteras av byggprodukter. Uppdraget utfärdades av regeringen av anledningen att tidigare hantering har varit bristfällig. Målet är att skapa en förbättrad loggbok för vilken typ och mängd av material som används i byggnationer i syfte att kunna spåra materialen under hela byggnadsverkets livslängd.

Några av fördelarna som Boverket nämnde med att förbättra dokumentationen på material i byggnader var att [27]:

- Möjliggöra effektivare återanvändning och återvinning av byggdelar vid rivning och ombyggnation. Ökad återanvändning och återvinning bidrar bland annat med mindre resursanvändning samt en bättre cirkulation av materialanvändning i byggnadsbranschen vilket minskar utsläpp av växthusgaser och andra miljöfarliga ämnen.
- Öka spårbarhet och transparens. Bättre dokumentationen om material som har använts i byggnationen skulle underlätta hantering av underhåll, renovering och om materialets ursprung och kvalitet.
- Spåra potentiella negativa miljö- och hälsofarliga ämnen. Genom att dokumentera material kan förekomsten att upptäcka giftiga ämnen underlättas för öka säkerheten och minimera hälsorisker.
- Säkerhet vid rivning. Lättare identifiering av bärande delar i konstruktionen skulle innebära att rivningsprocessen blir både effektivare och säkrare.

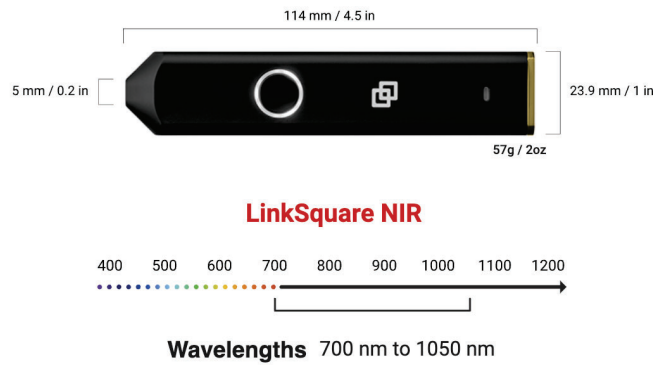
Viktigt att poängtera är att loggboken enbart omfattar nya byggnationer, vilket innebär att information om alla befintliga byggnaders materialanvändning är bristfällig eller existerar ej.

2.6 Mätverktyg

För att identifiera och kartlägga byggnadsmaterial i projektet kommer ett mätverktyg att användas i form av en spektrometer. Verktöget gör det möjligt att undersöka material på ett icke-destruktivt sätt och samla in data som kan bidra till en mer effektiv datainsamling av byggnadsmaterial.

Verktöget LinkSquare NIR som ses i figur 2.4, är en handhållen spektrometer som använder nära-infraröd (NIR) spektroskopi för att analysera materialens sammansättning. Tekniken bygger på att olika material reflekterar ljus vid specifika våglängder, vilket gör det möjligt att identifiera material genom deras unika spektrala signaturer. LinkSquare NIR täcker ett våglängdsområde mellan 700 och 1050 nm (nära-infraröda spektrum) och har en optisk upplösning som varierar från cirka 3 nm vid 700 nm till 10 nm vid 1000 nm [28].

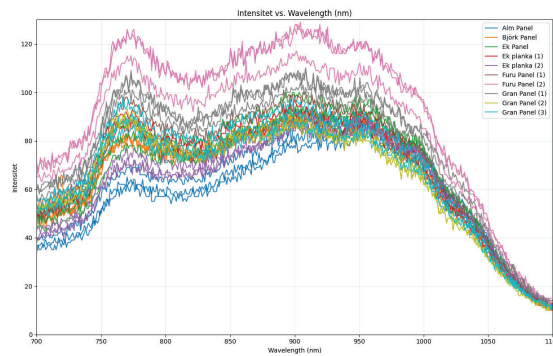
Genom spektroskopisk analys med LinkSquare NIR, kan vi därmed samla in omfattande data om byggnadsmaterialens egenskaper. Det möjliggör en mer noggrann identifiering av material och skapar bättre förutsättningar för återvinning och återanvändning av byggnadsmaterial.



Figur 2.4: Bild på Linksquare NIR med dess dimensioner och våglängdsområde som instrumentet arbetar inom [5].

2.6.1 Hur mätdata redogörs

Mättningsresultatet redogörs i form av en graf där ljusintensitet visas på den vertikala axeln och våglängd inom det nära infraröda spektrumet (700-1050 nm) visas på den horisontella axeln, se figur 2.5 [28]. Intensitet är ett mått på hur mycket ljus eller elektromagnetisk strålning som detekteras vid varje våglängd och beror på bland annat hur stark ljuskällan är, hur mycket ljus som reflekteras/absorberas och hur känsligt mätinstrumentet är [29]. Eftersom mätningar görs med en LinkSquare NIR-spektrometer är det enbart reflektion mot ytan av mätobjektet som resultatet visar [28]. Enheten som anges för intensiteten i mätresultaten benämns med "A.U" som står för "arbitrary units" (översättning till svenska: godtyckliga enheter), vilket betyder att mätvärdet är relativt, alltså endast ett mått på hur stark signalen är i jämförelse med andra våglängder eller tester [5].



Figur 2.5: Exempel på en spektralkurva från resultat, spektraldata insamlad med LinkSquare NIR-spektrometer [6].

2.6.2 Potentiellt påverkande faktorer på mätverktyget

Vid användning av spektrometer är det viktigt att ta hänsyn till flera miljöfaktorer, då spektrometrar vanligtvis är känsliga och kan ge avvikande resultat på mätdatan [30]. Alltså att faktorer som temperatur, luftfuktighet, exponering för solljus och fukt kan påverka kvaliteten och till och med ge ett felaktigt resultat. Det är också viktigt att notera att materialegenskaper och ytförhållanden även har en stor påverkan [9]. Ytegenskaper såsom textur, färg samt skick är avgörande och för att säkerställa mätningen dokumenteras därför dessa faktorer noggrant för att ge en korrekt tolkning av spektralkurvorna [9].

3

Metod

I kapitlet "Metod" presenteras utförandet av arbetsgången till projektet. Kapitlet innefattar de väsentliga delarna om vilka beslut och tillvägagångssätt som har gjorts för att kunna utföra arbetet. Metoden för projektet kan kortfattat beskrivas i två huvudsakliga tillvägagångssätt.

Projektet inleddes med att undersöka och analysera liknande tidigare projekt för att få en översikt och förståelse av hur datainsamling och materialbedömning har genomförts i andra sammanhang. Det kan beskrivas som en **komparativ studie** [31], där metoden syftar till att identifiera relevanta parametrar och tillvägagångssätt för egen datainsamling.

Andra delen av projektet genomfördes med upprepande mätningar av byggmaterial vid olika tillfällen för att sedan jämföra resultaten av mätvärden för att identifiera likheter och variationer. Processen kan liknas med metoden **Test-Retest** [32] inom kvantitativ forskning, som används för att kontrollera reliabiliteten hos mätinstrument och mätmetoder.

Genom att kombinera en komparativ studie med en Test-Retest-baserad datainsamling kunde ett effektivt tillvägagångssätt tillämpas som stärker både validiteten och reliabiliteten i projektet.

3.1 Översikt av genomförandet

Projektet inleddes med en förstudie för hur mätningarna skulle gå tillväga och innefattade val av plats och material som mätningarna skulle utföras på. Förstudien gjordes för att få en bättre förståelse av vilka byggnadsmaterial som är relevanta och hur de skiljer sig från varandra. Efter att förstudien var gjord kunde mätningar av olika material påbörjas.

Mätningarna gjordes med hjälp av en spektrometer där yttre faktorer dokumenterades på plats vid mätningen. Först utfördes testerna på material med känd sammansättning för att få en utgångspunkt på hur materialen var i ett idealt tillstånd.

Efter att tillräckligt många försök hade utförts på kända material kunde mätningarna utföras på byggnader, vilket möjliggjorde jämförelser med tidigare ideala resultat för att kunna identifiera avvikande parametrar samt mönster i resultatet.

Resultaten analyserades för att identifiera variationer och avvikelser av olika påverkande faktorer mellan resultaten. Med den sammanställda datan skapades ett datapaket som skulle kunna gå att använda till maskininlärning för att skapa ett effektivt materialigenkänningsverktyg.

3.2 Utförande av mätningar

För att säkerställa noggrann och tillförlitlig identifiering av byggnadsmaterial utfördes mätningarna systematiskt med hjälp av det valda mätverktyget, LinkSquare NIR. Mätningarna genomfördes på utvalda material för att analysera hur olika faktorer påverkar resultatet. När utförandet av spektroskopisk analys av materialets sammansättning gjordes med LinkSquare NIR, i kombination med dokumentering av inre och yttre faktorer, gavs tillförlitliga förutsättningar för vidare analys.

3.2.1 Mall för mätning

Under varje mätning fylldes en mall i av olika faktorer som kan ha påverkat mätningen. Dessa faktorer är viktiga för maskininlärningen för att identifiera skillnader i hur samma material beter sig i olika förhållanden. Mallen framtog genom att jämföra med liknande projekt [9] där spektrometer användes och omfattade relevanta faktorer som påverkar mätningarna och som är viktiga för identifieringen. Relevanta faktorer och anmärkningar presenteras i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Dokumenteringsmall för mätning

Faktor	Beskrivning
Namn på material	Materialets namn eller beteckning.
Typ av komponent	Typ av byggkomponent materialet ingår i.
Egen kommentar	Eventuella ytterligare observationer eller kommentarer.
Bild på material	Bilddokumentation av materialet.
Mätvärden från spektrometer	Grafiska värden.
Datum och tid för mätning	När mätningen av materialet genomfördes.
Adress för mätning	Platsen där materialet dokumenterades.
Materialets skick	Beskrivning av materialets aktuella skick.
Uppskattad ålder på materialet	Bedömning av hur gammalt materialet är inom ett visst tidsintervall.
Färg på materialet	Visuell beskrivning av materialets färg.
Luftfuktighet	Luftfuktighet vid dokumentationstillfället.
Typ av väder	Beskrivning av väderförhållanden vid mätning (soligt, regnigt, etc.).
Inomhus/utomhus	Om materialet mätes inomhus eller utomhus.

Eftersom att vissa material kan vara svårare att identifiera visuellt namngavs materialet i tre nivåer i dokumenteringsmallen, exempelvis:

Tabell 3.2: Exempel på namngivning av material

Benämning	Beskrivning
Trä	Generell term på materialet.
Furu	Specifik träsort.
Konstruktionsvirke C24	Specifik klassificering.

Med systemet ovan anges det tydligt för maskininlärning och vidare analys hur säker informationen är tillsammans med spektraldata på materialet. Nivåerna två och tre lämnas tomma vid mätningar där materialet var okänt eller var svårare att urskilja. För att tydliggöra angavs även en egen kommentar om faktorer som kan ha gett ett avvikande resultat.

En eller flera bilder tas på materialet för att få en helhet om dess tillstånd och minst tre skanningsresultat görs från spektrometer per mätningstillfälle för att minimera felfaktorer. Tid och adress vid mätningen antecknas för att enkelt sortera mätningarna från varandra och för att kunna göra återkommande tester för vidare analyser.

Faktorer som materialets skick, såsom sprickor och ytstruktur, anges tillsammans med materialets färg och uppskattad ålder. Eftersom information om ålder kan vara svår att identifiera, uppskattas åldern inom ett femtioårsintervall (exempelvis årsintervallet 1950-2000) då byggnaden är byggd. För att minimera externa faktorer som påverkar resultatet kommer vi att dokumentera väderförhållandena vid varje mättillfälle. Det görs genom att kontrollera väderapplikationen på telefonen för att registrera temperatur, luftfuktighet och andra relevanta klimatförhållanden. Dessa faktorer kan påverka mätresultaten, särskilt vid analys av material såsom trä och betong, som kan förändras beroende på fuktighet och temperatur.

Genom att arbeta systematiskt och tillämpa samma arbetsmetod vid varje mätning skapar vi en konsekvent datainsamling som möjliggör korrekta jämförelser mellan olika mätningar och bidrar till en mer pålitlig analys av byggnadsmaterialens egenskaper. Flera av mätningarna görs vid upprepade tillfällen för att få en bättre helhet om materialet. Fördelen med ett flertal mätningar på samma plats och av samma material gör att exempelvis identifiering av hur vädret påverkar materialet kan gå att urskilja vid analys.

3.3 Utförande av analys

Utförandet av analysen gjordes med hjälp av Test-Retest-metoden [32] för att kunna identifiera avvikelser och variationer i mätresultaten. Analysen baserades på att jämföra olika inre och yttre faktorer för att se om de hade någon påverkan på mätinstrumentet och hur stor den påverkan var. Frågorna som skulle analyseras och besvaras var:

- Vad skiljer materialen ifrån varandra i spektralkurvorna?
- Vilka intensitetsspann befinner sig materialen i?
- Vilka inre och yttre faktorer påverkar spektralkurvan?
- I vilken utsträckning går det att identifiera avvikelser samt mönster från spektralkurvan, baserat från mätdata?

Jämförelser mellan mätresultatens spektralkurvor skapar identifiering av mönster vilket ger en tillförlitlighet hos mätverktyget, samt visar på vilka yttre faktorer som påverkar resultatet. Genom att fastställa hur olika faktorer påverkar mätinstrumentets resultat kan insamlad data bearbetas mer effektivt, exempelvis genom att justera eller reducera värden för att närma sig ett mer idealiserat värde inför vidare analys [9].

3.4 Val av material

För att minimera mängden hanterad data kommer inte alla byggnadsmaterial att skannas av mätverktyget. För att besluta vilka byggnadsmaterial som skulle väljas till projektet för mätning gjordes en utredning.

Från avsnitt 2.1 "vanligt förekommande byggnadsmaterial", framgår det att betong, virke och tegel står för majoriteten av det dokumenterade rivningsavfallet för flerbostadshus vilket motsvarar de tre mest dominerande byggnadsmaterialen över en lång period. Byggnader som med störst sannolikhet kommer att rivas är från 1900-talet, och ur ett återvinningsperspektiv är de mest frekvent använda byggnadsmaterialen under den tiden vad som skulle anses vara mest intressant att undersöka i arbetet. Samtidigt som betong, virke och tegel är de mest vanliga byggnadsmaterialen varierar dess återvinnings- eller återanvändningspotential med hur materialen producerats genom olika tider, då krav från förr inte stämmer överens med de krav som gäller för dagens standarder [7].

Vid val av material som mätverktyget ska skanna kommer därför betong, virke och tegel väljas då dessa material har en betydande roll för att öka byggsektorns återvinning eller återanvändning av byggnadsmaterial. De underrubriker som ingår i kapitel 2.4 beskriver materialens potential till återvinning samt återanvändning för att förtydliga valet av material.

3.5 Val av skannade byggnadsdelar

Från avsnitt 2.3 beskrivs det hur bärverk är de byggnadsdelar som bär på störst klimatavtryck. Trots det har undersökningen i huvudsak begränsats till material som varit direkt åtkomliga via byggnaders yttre samt inre väggar, vilket innebär att bärverk, trots stor klimatpåverkan, inte har kunnat ingå i analysen. Arbetets starka koppling till återbruk blir därför i det här fallet begränsad, då ett fokus på ytter- samt innerväggar ger en mer yttlig bild av återbruksmöjligheterna i en byggnad. Däremot har byggnadsdelar på plats skannats för att undersöka hur yttre faktorer påverkar reflektansen hos olika materials ytskikt.

Skanningar som utförts med spektrometern har främst genomförts på det yttre skiktet av ytterväggar samt i viss mån på innerväggar i befintliga byggnader, där möjligheten att analysera materials reflektans på plats varit stor. Det här har resulterat i att skanningar av befintliga byggnadsdelar inte sätter fokus på just återvinningsbarheten utan snarare på de yttre faktorer som påverkar NIR-spektrometern. Istället för att undersöka bärverkens spektrala egenskaper, för ökad återvinning, har skanningar istället utförts på byggnadsmaterial i byggvaruhus, där olika typer

av standardiserade byggprodukter fanns tillgängliga. Genom att kombinera mätningar i fält med mätningar i varuhus har slutsatser därefter kunnat dras gällande spektrometers känslighet för omgivande miljö, samt om dess förmåga att särskilja olika materialtyper.

3.6 Val av mätplatser för att belysa variation i spektral respons

Till en början gjordes mätningarna för trä och betong i bygghandelsbutiker eftersom det var lättillgängligt och hade stort utbud på olika sorters byggnadskomponenter. Utöver det gjordes de flesta mätningarna på Chalmers Tekniska Högskola samt i andra områden som var lättillgängliga. Materialen från bygghandelsbutikerna skapade bra referenser till jämförelser med materialen skannade på befintliga byggnader, vilket skapade förutsättningar för en bra analys där avvikande faktorer samt mönster kunde studeras. Många av mätningarna utfördes även flera gånger på samma plats för att undersöka hur yttre faktorer som, väderförhållandena, påverkar resultaten, vilket beskrivs i avsnitt 2.6.2.

4

Resultat

I avsnittet "resultat" presenteras den spektrala datan som erhöles från mätningarna som utfördes med LinkSquare NIR-spektrometern. Under mätningarna dokumenterades faktorer som potentiellt hade påverkat resultatet för att identifiera avvikelser och variationer.

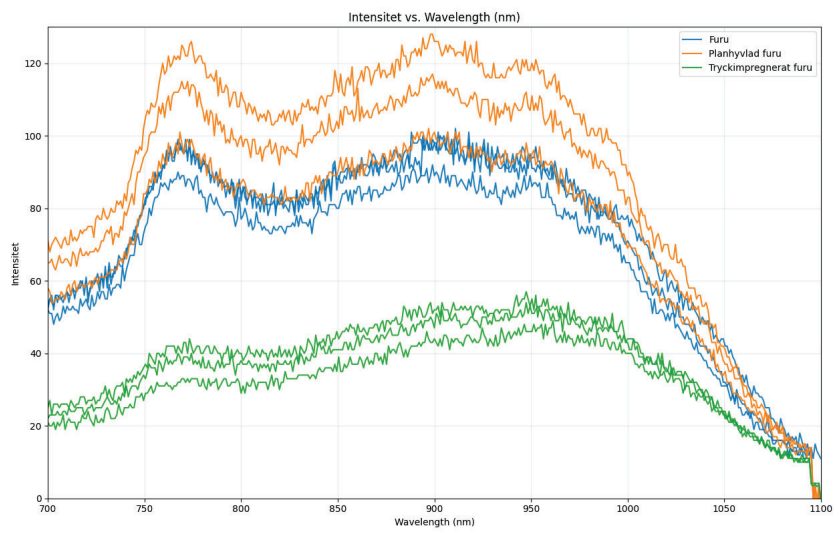
Mätningarna genomfördes inom våglängdsområdet 700-1050 nm, där resultatet redovisas grafiskt för att tydliggöra variationer i reflekterad intensitet mellan olika våglängder. Eventuella avvikelser och mönster kommenteras kortfattat, medan djupare tolkning analyseras och återfinns i diskussionsdelen.

Datapaketet av mätningarna utfördes på byggnader samt byggnadskomponenter och består av totalt 61 stycken olika prover, med minst tre mätningar på varje material. Mätningarna utfördes på material i olika tillstånd för att identifiera hur mätinstrumentet reagerade på faktorer som luftfuktighet, väder, färg, ålder och ytskikt.

4.1 Mätresultat av materialtyper

I avsnittet presenteras de spektrala mätresultaten för olika byggnadsmaterial. Resultaten är indelade efter materialtyp trä, tegel och betong. Avsnitt 4.1.1, 4.1.2 respektive 4.1.3 redogör för de karakteristiska spektrala egenskaperna hos var och en av dessa materialtyper. Varje materialtyp representeras av utvalda provexemplar, och i avsnitten belyses typiska reflektansmönster över det studerade våglängdsområdet för respektive materialtyp. Upplägget ger en tydlig bild av respektive materialtypernas reflektans, vilket i sin tur utgör en grund för de jämförande analyser som följer i avsnitt 4.2.

4.1.1 Mätresultat för olika sorters trämaterial

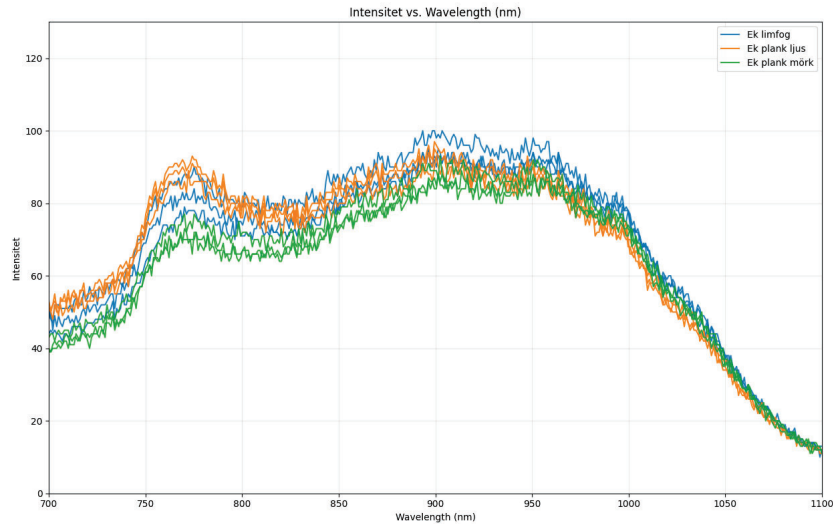


Figur 4.1: Spektralkurva för furu

Parameter	Furu	Planhyvlad furu	Tryckimpregnerat furu
Materialets skick	Slät yta	Slät yta	Slät yta
Materialets ålder	Nytt	Nytt	Nytt
Materialets färg	-	-	Impregnerat
Luftfuktighet	49%	49%	49%
Väderförhållande	Soligt	Soligt	Soligt
Plats	Inomhus	Inomhus	Inomhus

Tabell 4.1: Externa faktorer för furu tillhörande figur 4.1.

Mätningen av furu uppvisade en hög spektral intensitet genom hela det uppmätta våglängdsområdet. Kurvan ligger generellt på en högre nivå än övriga träprov och når över 100 A.U. vid cirka 750–800 nm. Intensiteten ökar påtagligt mot det nära infraröda området och planar ut på en hög nivå. Den höga reflektansen tyder på att furu, särskilt med ljus, obehandlad yta, reflekterar en stor andel av det infallande ljuset jämfört med många andra material och träslag.



Figur 4.2: Spektralkurva för ek

Parameter	Ek plank mörk	Ek plank ljus	Ek limfog
Materialets skick	Slät yta	Slät yta	Slät yta
Materialets ålder	Nytt	Nytt	Nytt
Materialets färg	Mörkt pigment	-	-
Luftfuktighet	49%	49%	49%
Väderförhållande	Soligt	Soligt	Soligt
Plats	Inomhus	Inomhus	Inomhus

Tabell 4.2: Externa faktorer för ek tillhörande figur 4.2.

Spektralkurvan för ek visar en något lägre intensitet jämfört med furu 4.1. Mätningssytan reflekterar inte lika mycket ljus och kurvans topp ligger under 100 A.U. i det nära infraröda området. Spektralkurvan hos eken har en liknande form som furu 4.1, men genomgående lägre amplitud. Detta antyder att ek, särskilt om ytan är mörkare, ger lägre reflektionsvärden. Eken uppvisar dock fortfarande relativt höga intensitetsnivåer jämfört med icke-organiska material.



Figur 4.3: Spektralkurva för gran

Parameter	Gran panel 1	Gran panel 2	Gran panel 3
Materialets skick	Slät-grov yta	Slät yta	Slät yta
Materialets ålder	Nytt	Nytt	Nytt
Materialets färg	Grundmålad vit	-	-
Luftfuktighet	49%	49%	49%
Väderförhållande	Soligt	Soligt	Soligt
Plats	Inomhus	Inomhus	Inomhus

Tabell 4.3: Externa faktorer för gran tillhörande figur 4.3.

Granens spektralkurva 4.3 ligger i den övre delen av träintervallet, näst efter furu 4.1. Intensiteten når strax över 100 A.U. vid de högre våglängderna, vilket indikerar att gran reflekterar nästan lika mycket NIR-ljus som furu. Granens kurva liknar övriga träslag med stigande intensitet mot 750–950 nm. Granens kurva är generellt något högre än ekens 4.2.



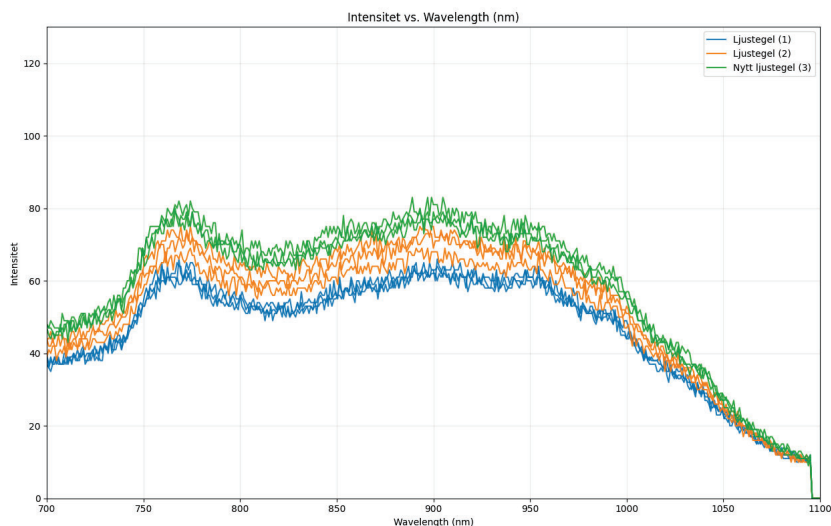
Figur 4.4: Spektralkurva för övriga trämaterial

Parameter	Alm panel	Björk panel	Bok panel
Materialets skick	Slät yta	Slät yta	Slät yta
Materialets ålder	Nytt	Nytt	Nytt
Materialets färg	-	-	-
Luftfuktighet	49%	49%	49%
Väderförhållande	Soligt	Soligt	Soligt
Plats	Inomhus	Inomhus	Inomhus

Tabell 4.4: Externa faktorer för övriga trämaterial tillhörande figur 4.4.

Mätningen för övrigt material bestod av alm, björk och bok. Mätningen för alm och björk har en spektralkurva med måttlig intensitet i jämförelse med övriga träslag. Kurvorna når upp mot omkring 80–90 A.U. som högst. Almen och björkens reflektans hamnar oväntat nära ekens 4.2 och under granens 4.3. Kurvorna är annars typiska för trä med en ökning mot längre våglängder. Mätningen för bok uppmättes med en högsta intensitetsnivå på cirka 120 A.U. och gav alltså en generellt högre spektralkurva än övriga träslag.

4.1.2 Mätresultat för olika sorters tegelmaterial

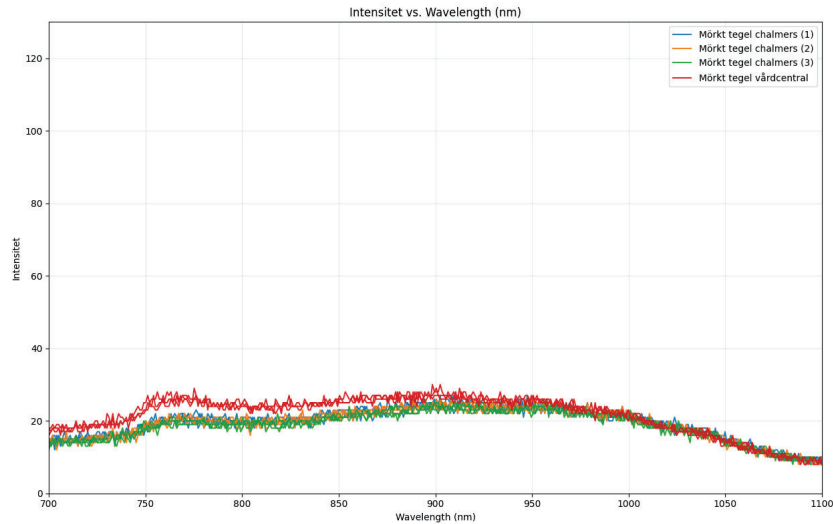


Figur 4.5: Spektralkurva för ljust tegel

Parameter	Ljustegel 1	Ljustegel 2	Ljustegel 3
Materialets skick	Slät yta	Slät yta	Slät yta
Materialets ålder	+50 år	+50 år	3 år
Materialets färg	-	-	-
Luftfuktighet	83%	83%	83%
Väderförhållande	Molnigt	Molnigt	Molnigt
Plats	Utomhus	Utomhus	Utomhus

Tabell 4.5: Externa faktorer för ljust tegel tillhörande figur 4.5.

Den ljusa tegelytan uppvisar den högsta reflektansen bland teglen. Spektralkurvan når toppar runt cirka 80 A.U., vilket är betydligt högre än för mörkare tegelvarianter. Kurvan för ljust tegel ligger generellt på en hög nivå genom hela spektrumet och har ett intensitetsintervall på ungefär 20 A.U. mellan sin högsta och lägsta punkt.

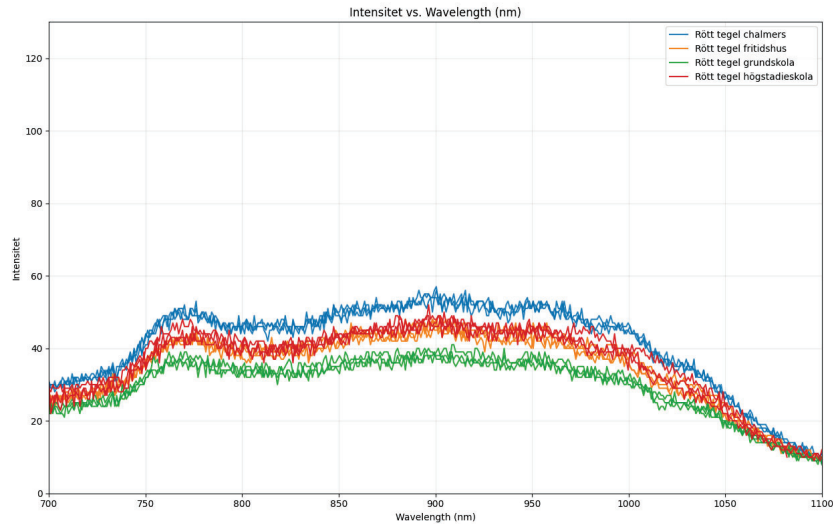


Figur 4.6: Spektralkurva för mörkt tegel

Parameter	Mö.tegel vå.	Mö.tegel 1	Mö.tegel 2	Mö.tegel 3
Materialets skick	Grov yta	Slät yta	Slät yta	Slät yta
Materialets ålder	+50 år	+50 år	+50 år	+50 år
Materialets färg	-	-	-	-
Luftfuktighet	83%	64%	66%	54%
Väderförhållande	Molnigt	Molnigt	Halvklart	Soligt, skugga
Plats	Utomhus	Utomhus	Utomhus	Utomhus

Tabell 4.6: Externa faktorer för mörkt tegel tillhörande figur 4.6.

Mörkbrunt tegel uppvisar lägst intensitet av de uppmätta tegelmätningarna. Spektralkurvans toppar når endast upp till runt 30 A.U., och kurvan ligger genomgående i det nedre intensitetsintervallet. Spridningen är liten för det mörka teglets intensitetsvariation, mellan högsta och lägsta kurva är den endast omkring 10 A.U. Det betyder att oavsett små variationer i mätningarna framstår det mörka teglet konsekvent som mycket lågreflekterande.



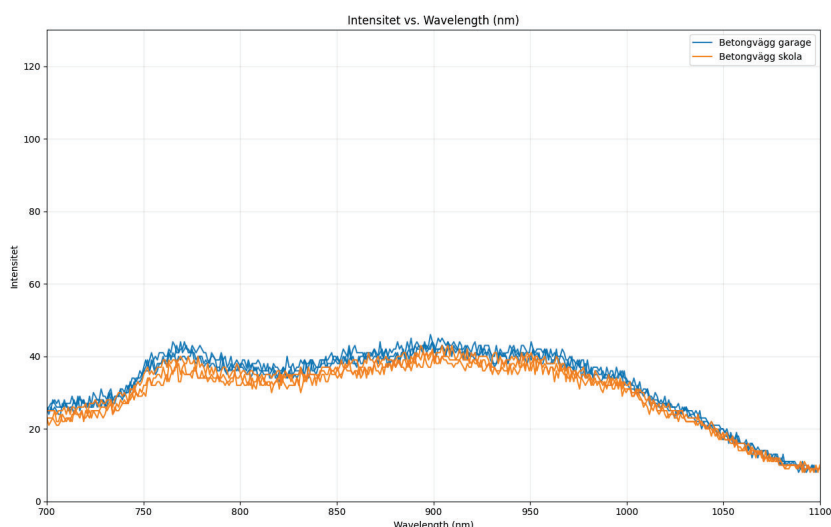
Figur 4.7: Spektralkurva för rött tegel

Parameter	Tegel Chal.	Tegel Fritids.	Tegel Grund.	Tegel Hög.
Materialets skick	Slät yta	Slät-grov yta	Slät-grov yta	Slät yta
Materialets ålder	+50 år	+50 år	+50 år	+50 år
Materialets färg	-	-	-	-
Luftfuktighet	67%	83%	83%	83%
Väderförhållande	Halvklart	Molnigt	Molnigt	Molnigt
Plats	Utomhus	Utomhus	Utomhus	Utomhus

Tabell 4.7: Externa faktorer för rött tegel tillhörande figur 4.7.

Det rödfärgade teglet har en spektralkurva på en intensitetsnivå mellan mörkt och ljust tegel. Intensitetsintervallet för de röda tegelkurvorna är ungefär 15 A.U. från de svagaste till de starkaste reflektionerna. Kurvan indikerar att rött tegel, med sin klassiska röda/bruna ton, reflekterar en måttlig mängd NIR-ljus mer än mörkbrunt tegel men till viss del mindre än den ljusa tegeltypen.

4.1.3 Mätresultat för olika sorters betongmaterial

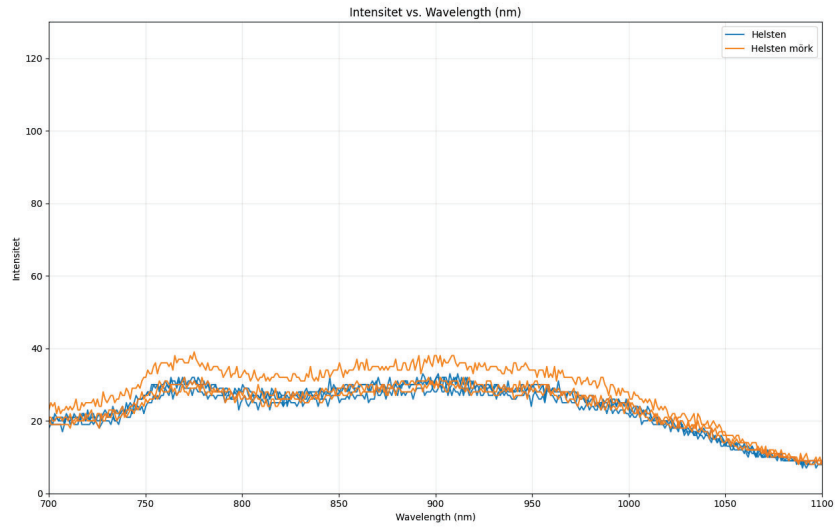


Figur 4.8: Spektralkurva för grå betongvägg

Parameter	Betongvägg garage	Betongvägg skola
Materialets skick	Slät-grov yta	Grov yta
Materialets ålder	+50 år	+50 år
Materialets färg	-	-
Luftfuktighet	73%	67%
Väderförhållande	Molnigt	Halvklart
Plats	Inomhus	Utomhus

Tabell 4.8: Externa faktorer för betongvägg tillhörande figur 4.8.

Betongprovet representerar en genomsnittlig betongyta med mellangrå ton. Spektralkurvan för den medelgrå betongen ligger på en låg till måttlig intensitetsnivå, vilket är typiskt under 50 A.U. Kurvan är relativt platt och koncentrerad mellan 40–45 A.U. över stora delar av spektrumet, vilket indikerar en jämn låg reflektans. Variationen inom kurvan är liten, vilket tyder på stabila mätvärden utan extrema toppar eller dalar. Sammantaget visar figuren att en vanlig grå betong reflekterar begränsat med ljus och placerar sig mellan de ljusaste och mörkaste betongytorna i intensitet.

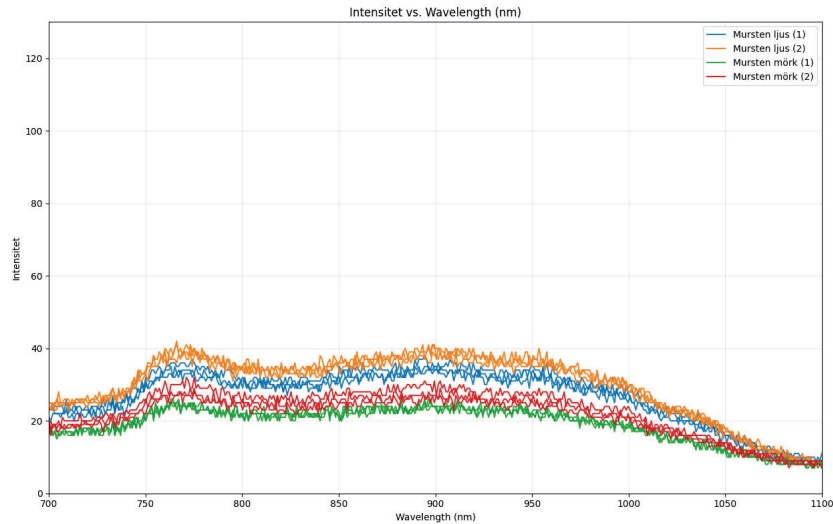


Figur 4.9: Spektralkurva för helsten

Parameter	Helsten	Helsten mörk
Materialets skick	Slät yta	Slät yta
Materialets ålder	Nytt	Nytt
Materialets färg	-	Mörkt pigment
Luftfuktighet	49%	49%
Väderförhållande	Soligt	Soligt
Plats	Inomhus	Inomhus

Tabell 4.9: Externa faktorer för helsten tillhörande figur 4.9.

Denna kurva avser en mörkare betongyta, exempelvis väderexponerad betong, och den uppvisar de lägsta intensitetsnivåerna bland betongproverna. Spektralkurvan ligger huvudsakligen under 30–40 A.U., utan några starka toppar. Jämfört med den ljusare betongen är intensiteten reducerad. Spridningen mellan olika mät-punkter är minimal och kurvan är konsekvent låg över hela våglängdsbandet.



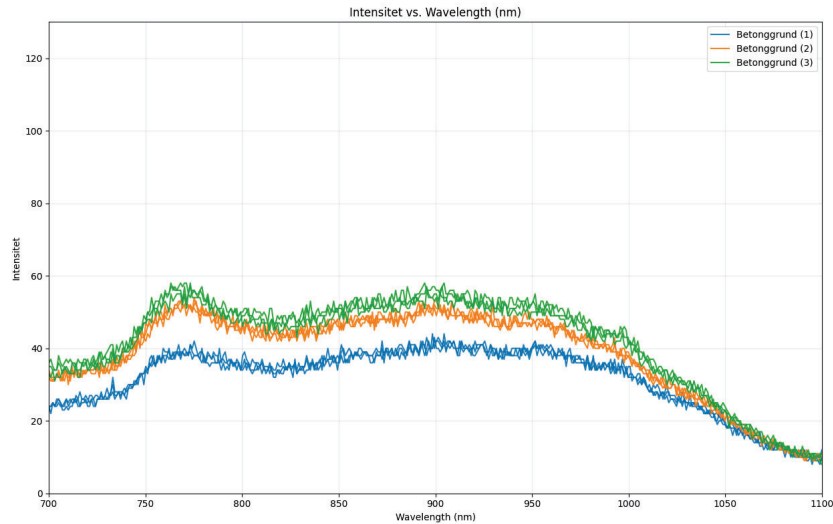
Figur 4.10: Spektralkurvor för mursten

Parameter	Mur. ljus 1	Mur. ljus 2	Mur. mörk 1	Mur. mörk 2
Materialets skick	Slät yta	Slät yta	Grov yta	Grov yta
Materialets ålder	Nytt	Nytt	Nytt	Nytt
Materialets färg	Ljust pigment	Mörkt pigment	Ljust pigment	Mörkt pigment
Luftfuktighet	49%	49%	49%	49%
Väderförhållande	Soligt	Soligt	Soligt	Soligt
Plats	Inomhus	Inomhus	Inomhus	Inomhus

Tabell 4.10: Externa faktorer för mursten tillhörande figur 4.10.

De ljusa murstens mätningarna uppvisar generellt högre reflektansnivåer, den toppar strax över 40 A.U. runt 750 nm, medan de mörka exemplaren aldrig överstiger cirka 30 A.U. Skillnaden är störst i intervallet 750-950 nm, där både ljusa och mörka kurvor divergerar omkring 10 A.U. Mot spektrumets slut vid våglängden 1100 nm konvergerar samtliga kurvor mot en gemensam låg nivå.

Figuren visar därmed tydligt hur teglets pigmentering påverkar NIR-reflektansen på följande sätt: ljusare sten reflekterar mer ljus, medan mörkare mursten absorberar en större andel av det infallande ljuset.



Figur 4.11: Spektralkurva för betonggrund

Parameter	Betonggrund 1	Betonggrund 2	Betonggrund 3
Materialets skick	Slät-grov yta	Slät-grov yta	Slät-grov yta
Materialets ålder	+50 år	+50 år	+50 år
Materialets färg	-	-	-
Luftfuktighet	64%	66%	54%
Väderförhållande	Molnigt	Halvklart	Soligt, skugga
Plats	Utomhus	Utomhus	Utomhus

Tabell 4.11: Externa faktorer för betonggrund tillhörande figur 4.11.

Mätningen på betonggrunden har den högsta reflektansen bland betongmätningarna. Spektralkurvan ligger visserligen under nivåerna för tegel och trä, men når upp mot ca 50-60 A.U. i sina toppar. Jämfört med andra betongtyper reflekterar mätningen på denna betong mer ljus och dess kurva ligger över de övriga betongkurvorna från resterande figurer genom hela spektrumet. Betonggrund (1) mätningen ligger något under resterande två mätningar men i princip har alla 3 samma typ av grafmönster.

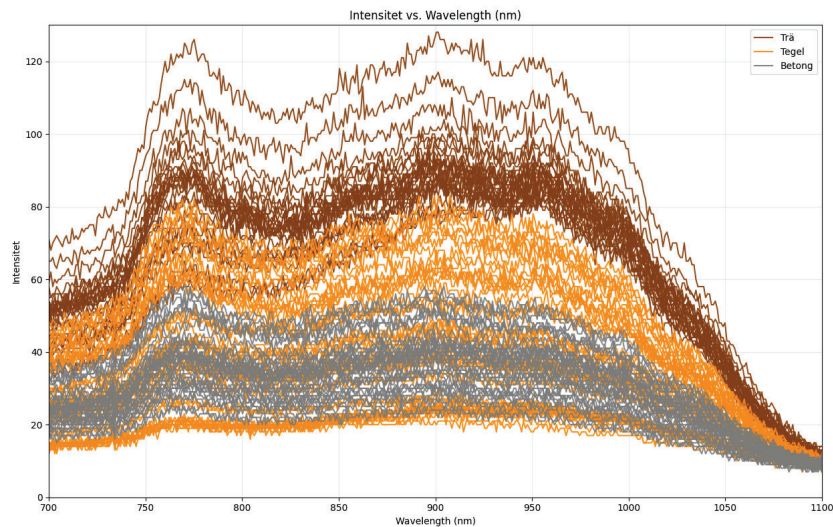
4.2 Mätresultat från specifika jämförelser

I det här avsnittet jämförs de spektrala mätningarna ur flera perspektiv för att belysa hur materialens optiska egenskaper varierar under olika förutsättningar. Först redovisas en samlad graf 4.12 som ställer trä, tegel och betong mot varandra för att tydliggöra grundläggande skillnader i reflektans mellan materialtyperna. Därefter följer mer detaljerade jämförelser som fokuserar på upprepade mätningar på samma yta, inverkan av ytfukt respektive väderexponering, påverkan av varierande belysningsförhållanden, effekter av färgvariationer såsom pigmentering och färgad material och skillnader mellan olika ytstrukturer och behandlingar.

Tillsammans ger dessa analyser en helhetsbild av hur yttre faktorer och materialegenskaper påverkar den uppmätta reflektansen och visar vilka parametrar som är mest avgörande för att skilja material och ytskikt åt i det infraröda spektrumet.

4.2.1 Resultat av jämförelse av materialtyper

För att ge en initial spektral jämförelse mellan de olika materialen har samtliga uppmätta värden sammanställts i en gemensam figur 4.12.

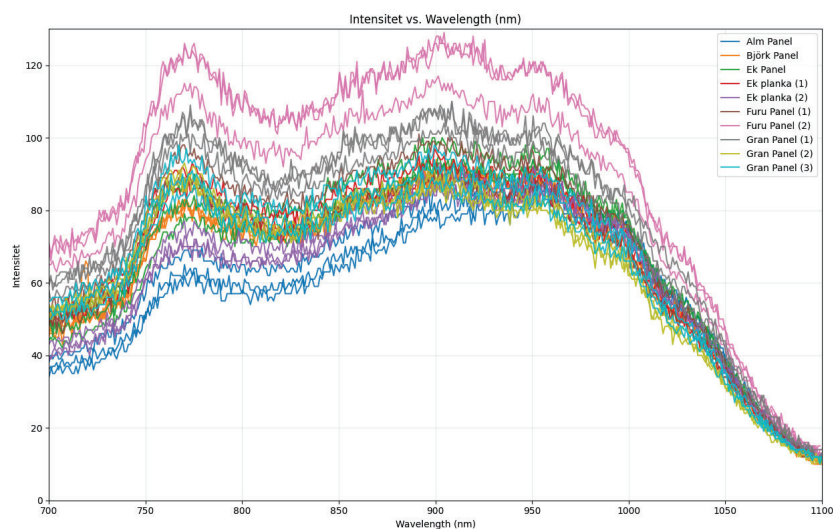


Figur 4.12: Initial spektral jämförelse mellan de tre materialtyperna: trä (brun), tegel (orange) och betong (grå)

Figuren ger en översikt av spektralmätningarna för samtliga prover, grupperade efter materialkategori. Här framgår tydligt att träkurvorna (bruna) överlag ligger på högre intensitetsnivåer än både tegel (orange) och betong (grå). Tegelkurvorna

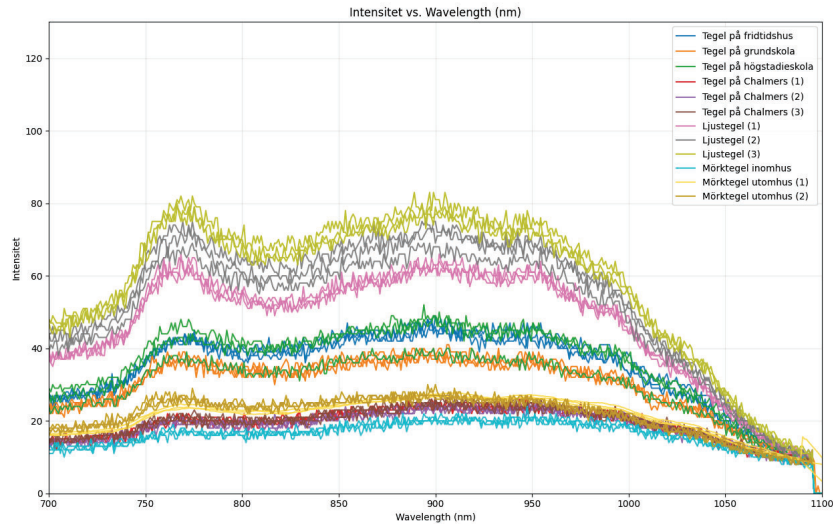
befinner sig mellan trä och betong – de når inte upp till träs högst värden, men vissa tegelvärden överlappar mot de lägre träintensiteterna och ner mot betongens nivå. Betongkurvorna utgör det nedersta bandet i figuren och ligger konstant lägst i intensitet. Översikten illustrerar de distinkta reflektansintervallen för respektive materialtyp: trä har generellt högst reflektans, tegel medelhög och betong lägst. Viss överlapp ses dock mellan kategorierna, vilket kan tillskrivas variationer inom materialen (olika ytkvalitet, fukt och färg hos enskilda prover). Sammantaget fungerar figuren som en initial jämförelse som bekräftar att materialvalet i stor utsträckning avgör spektralintensiteten i det uppmätta NIR-området.

4.2.2 Resultats jämförelse av varje materialtyp enskilt



Figur 4.13: Spektralkurva för trä

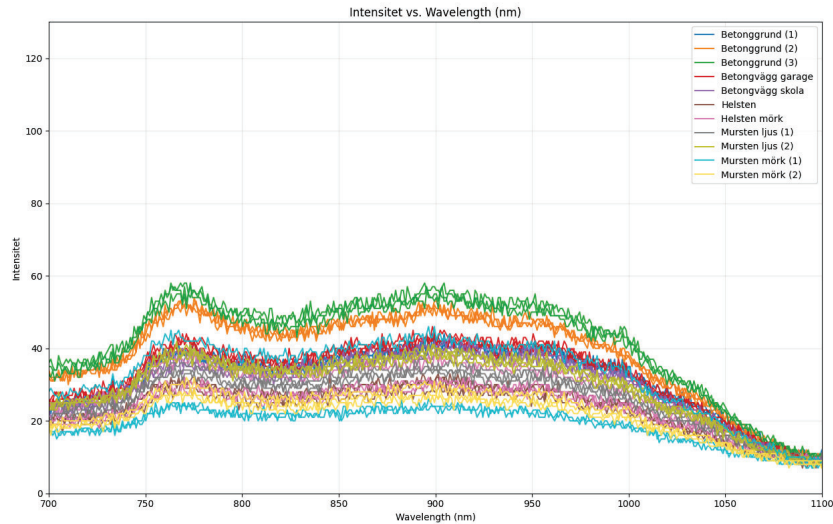
Här presenteras alla uppmätta spektralkurvor för trämaterialen samlade i en graf. Träprovernas kurvor ligger genomgående på högre intensitet än de övriga materialen och flera av träkurvorna överstiger 100 A.U. i intervallet 750–950 nm. Detta indikerar att trä i allmänhet reflekterar mycket starkt i det infraröda området. Det går också att urskilja en spridning mellan de olika trävarianternas kurvor. Exempelvis ligger spektralkurvan för furu i topp med de högsta värdena (över 100 A.U. kring 750 nm), medan kurvan för alm har en betydligt lägre intensitet (runt 40 A.U. vid samma våglängd). De övriga träslagen, som gran, ek och björk, fördelar sig däremellan. Skillnaden mellan den högst och lägst reflekterande träkurvan är omkring 60 A.U. Trots dessa inbördes variationer är alla träkurvor markant högre än motsvarande för tegel 4.14 och betong 4.15.



Figur 4.14: Spektralkurva för tegel

Grafen sammanställer spektralkurvorna för samtliga tegelmätningar. Tegeln placeras mellan trä och betong i intensitet. Man kan observera att den ljusaste tegelytan ger de högsta värdena upp mot 80 A.U., medan den mörkaste tegelytan ligger runt 30 A.U. i topp. De röda/orange tegelmätningarna har mellanhöga kurvor med maximala intensiteter omkring 50 A.U.

Intensitetsbandet för teglen är följande: Variationerna inom tegelmaterialet speglar främst färgpigment och ytegenskaper, såsom att ljust tegel reflekterar mer infrarött ljus, medan mörkare tegel absorberar mer och därmed producerar lägre kurvor.



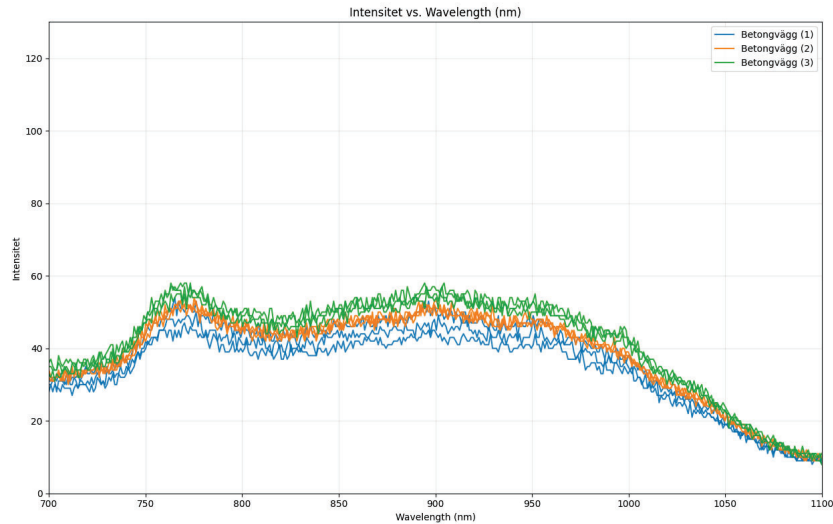
Figur 4.15: Spektralkurva för betong

Grafen visar spektralkurvorna för de olika betongmätningarna. Betongkurvorna ligger som förväntat längst ner intensitetsmässigt av de tre materialtyperna. De flesta betongytorna reflekterar under 60 A.U. som mest, ofta betydligt lägre. Det går att observera hur den ljusare betongen knappt når 50–60 A.U. i intensitet, medan den mörkaste betongen ligger runt 30 A.U. eller under det.

Spridningen mellan betongkurvorna är liten, alla följer samma låga nivå utan stora skillnader i kurvformationen. Detta indikerar att oavsett om betongen är något ljusare eller mörkare, förblir reflektansen låg jämfört med resterande material. Därmed bekräftar figuren att betong generellt har en låg spektral reflektans, med endast mindre variationer beroende på ytstrukturen, föroreningar eller betongtyp.

4.2.3 Resultat av återkommande mätningar

För att undersöka hur skiftande väderförhållanden påverkades på mätverktyget utfördes ett test med upprepande mätningar under en längre period på trä, tegel och betong för att öka tillförlitligheten hos mätverktyget. Mätningarna genomfördes på exakt samma punkt på varje material för att utvärdera hur stabilt och konsekvent spektrometern registrerar spektraldata vid upprepade tester, samt att identifiera eventuella avvikelser orsakade av yttre faktorer eller mätosäkerhet.



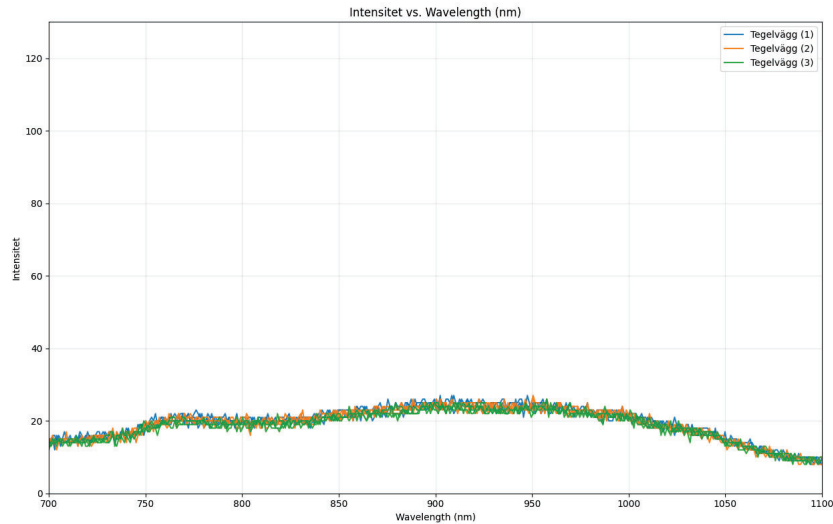
Figur 4.16: Spektral jämförelse på samma betongmaterial vid olika tillfällen

Parameter	Betong (1)	Betong (2)	Betong (3)
Luftfuktighet	64%	66%	54%
Väderförhållande	Molnigt	Halvklart	Soligt
Plats	Utomhus	Utomhus	Utomhus
Materialets skick	Torrt	Torrt	Torrt

Tabell 4.12: Betong spektral jämförelse med dess yttre faktorer.

Figuren visar tre spektralkurvor uppmätta på samma betongyta under tre separata tillfällen med olika väderförhållanden. De tre mätserierna, genomförda vid (1) molnigt väder, (2) halvklart väder och (3) soligt väder, följer nästan exakt samma förlopp. Kurvorna överlappar varandra så väl att inga tydliga skillnader i intensitet eller spektral form kan urskiljas mellan de olika mättillfällena. Detta resultat visar att mätningarna ger ungefär samma värden varje gång, vilket betyder att betongens spektrala mönster är stabilt över tid och inte påverkas nämnvärt av vanliga ändringar i ljus eller luftfuktighet.

Sammantaget visar figuren att betongens spektralkurvor blir i stort sett samma varje gång, både när väderförhållandena är liknande och när de skiljer sig mellan mättillfällena.



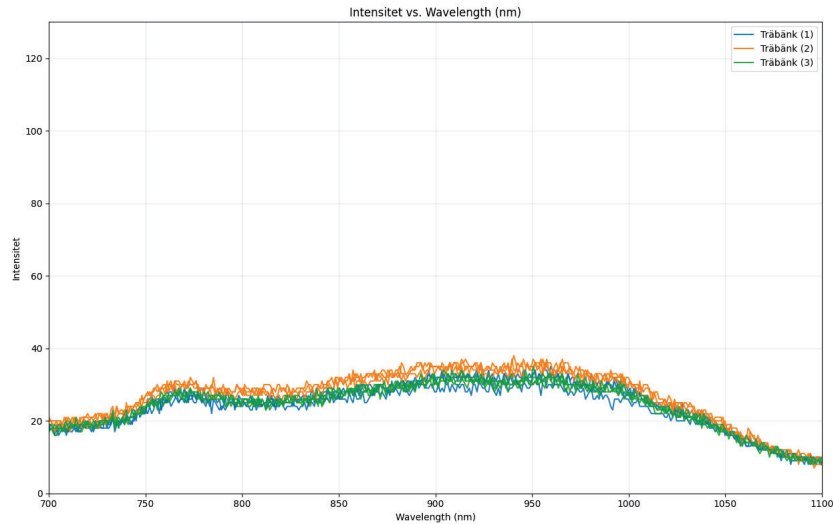
Figur 4.17: Spektral jämförelse på samma tegelmaterial vid olika tillfällen

Parameter	Tegel (1)	Tegel (2)	Tegel (3)
Luftfuktighet	64%	66%	54%
Väderförhållande	Molnigt	Halvklart	Soligt
Plats	Utomhus	Utomhus	Utomhus
Materialets skick	Torrt	Torrt	Torrt

Tabell 4.13: Tegel spektral jämförelse med dess yttre faktorer.

Denna figur illustrerar hur spektralkurvan för en och samma tegelyta förblir nästintill oförändrad över tre mättillfällen trots skiftande väder. Tre kurvor, tagna under tre olika förhållanden – molnigt, halvklart respektive soligt – ligger nästan helt ovanpå varandra. Intensiteten och kurvformationen är konsistent genom de olika mätningarna. Ingen av kurvorna visar någon systematisk höjning eller sänkning jämfört med de andra, vilket innebär att omgivningsfaktorerna som varierade dagsljusintensitet och luftfuktighet inte hade någon märkbar effekt på teglets spektrala reflektans.

Sammanfattningsvis visar figuren att teglets spektralkurva i stort sett är oförändrad över tid, även när vädret skiftar inom normala gränser.



Figur 4.18: Spektral jämförelse på samma trämaterial vid olika tillfällen

Parameter	Trä (1)	Trä (2)	Trä (3)
Luftfuktighet	64%	66%	54%
Väderförhållande	Molnigt	Halvklart	Soligt
Plats	Utomhus	Utomhus	Utomhus
Materialets skick	Torrt	Torrt	Torrt

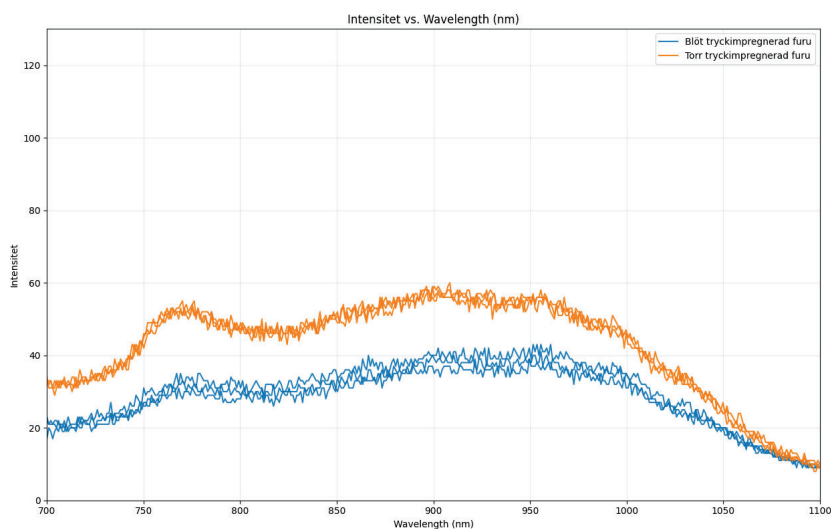
Tabell 4.14: Trä spektral jämförelse med dess yttre faktorer.

I denna graf jämförs spektralkurvan från upprepade mätningar på en träyta, i detta fall en träbänk, under varierande förhållanden över tid. Kurvorna från de olika mättillfällena är praktiskt taget väldigt lika. Trots att bänken utsattes för olika grad av solljus och att luftfuktigheten mellan de olika mätningarna, förändrades inte den uppmätta spektralkurvan i någon större utsträckning. Alla tre kurvor följer varandra nära, utan betydande skiftningar i intensitet. Detta demonstrerar att även för trä, som annars kan påverkas av t.ex. fukt, väder och belysning, har ingen direkt större inverkan på mätresultatet, så länge träets eget tillstånd är detsamma.

Spektralmätningen över tid visar alltså på hög noggrannhet och likhet även för organiska material som trä.

4.2.4 Resultat av jämförelse av ytfukt

För att identifiera hur mätinstrumentet reagerade på torra jämfört med blöta ytor, utfördes först en mätning på ett torrt trä-, tegel- och betongmaterial. Ytorna blöttes sedan ned med vatten för att sedan skannas på nytt. Resultatet ses i figurerna 4.19, 4.20, 4.21 och 4.22.



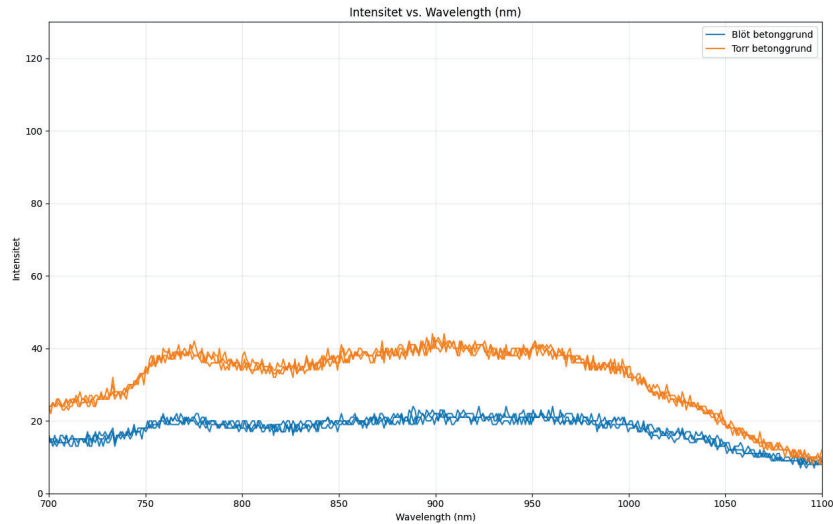
Figur 4.19: Spektraljämförelse mellan torr och blöt träyta

Parameter	Blöt furu	Torr furu
Luftfuktighet	83%	83%
Väderförhållande	Molnigt	Molnigt
Plats	Utomhus	Utomhus
Materialets skick	Blött	Torrt

Tabell 4.15: Externa faktorer för torrt och blött trä tillhörande figur 4.19

Figuren jämför en träytas reflektans i både torrt och blött tillstånd. Den torra träytans spektralkurva ligger betydligt högre i intensitet än kurvan för samma yta när den är blöt. Över hela det undersökta våglängdsområdet ses en tydlig sänkning av intensitetsnivån efter att vatten applicerats. Exempelvis sjunker toppvärdet runt 900 nm tydligt för den blöta ytan jämfört med den torra. Kurvans form i sig förändras inte drastiskt, båda spektra följer en liknande trend, men den blöta ytan ger konsekvent lägre värden.

Detta resultat indikerar att vatten på träets yta absorberar en del av ljuset och minskar reflektansen, en blöt träyta framstår därför ”mörkare” för spektrometern.



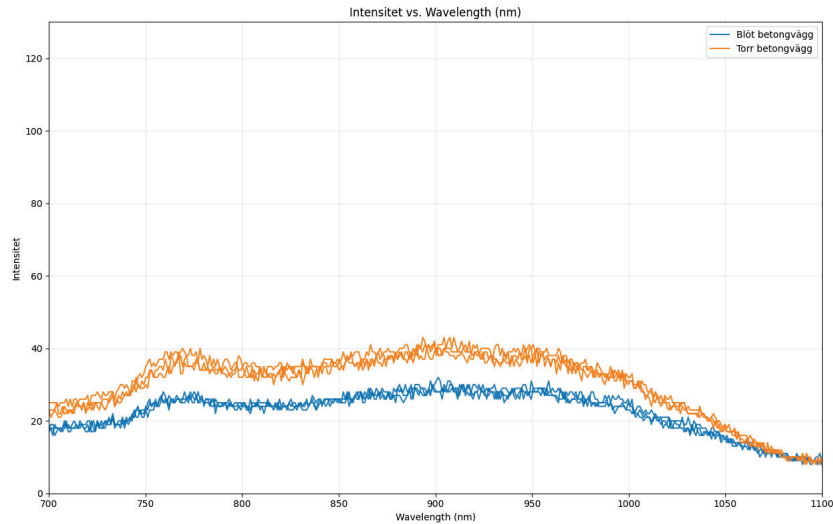
Figur 4.20: Spektraljämförelse mellan torr och blöt betongyta

Parameter	Blöt betong	Torr betong
Luftfuktighet	83%	83%
Väderförhållande	Molnigt	Molnigt
Plats	Utomhus	Utomhus
Materialets skick	Blött	Torrt

Tabell 4.16: Externa faktorer för torr och blöt betong tillhörande figur 4.20

Här visas spektrala mätningar av en betongyta i torrt respektive blött tillstånd. Den torra betongytans kurva ligger högre över hela spektrumet, medan den blöta betongytans kurva sjunker avsevärt. Särskilt kring våglängderna 750–900 nm syns att intensiteten för blöt betong är påtagligt lägre än för torr betong.

När betongen är blöt reflekteras mindre ljus tillbaka till sensorn, vilket gör att dess spektralkurva i figuren ligger under den torra ytan. Därför framgår det av figuren att en blöt betongyta har lägre spektralintensitet än samma yta när den är torr.

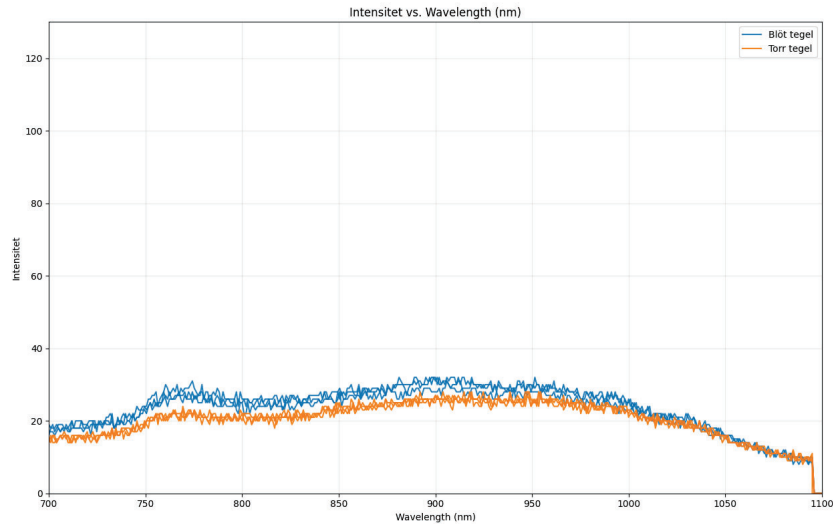


Figur 4.21: Spektraljämförelse mellan torr och blöt betongvägg

Parameter	Blöt betongvägg	Torr betongvägg
Luftfuktighet	67%	67%
Väderförhållande	Halvklart	Halvklart
Plats	Utomhus	Utomhus
Materialets skick	Blött	Torrt

Tabell 4.17: Externa faktorer för torr och blöt betongvägg tillhörande figur 4.21

Figuren visar hur den blöta ytan på en betongvägg påverkar dess spektrala reflektans. Resultatet liknar det föregående resultatet med betonggrunden 4.20, den torra betongväggen reflekterar mer ljus och har en högre kurva, medan den blöta väggen ger en lägre intensitet över hela det mätta spektrumet. Efter att ytan blöts ner sjunker reflektansen tydligt och därmed ligger den blöta kurvan konsekvent under den torra. Inga oväntade avvikelser kan observeras, samtliga våglängder uppvisar reducerad intensitet för den våta ytan. Därmed bekräftar figuren att vatten på en betongväggs yta minskar dess spektrala reflektans på samma sätt som för plana betongytor och trä.



Figur 4.22: Spektraljämförelse mellan torr och blöt tegelyta

Parameter	Blöt tegel	Torr tegel
Luftfuktighet	67%	67%
Väderförhållande	Halvklart	Halvklart
Plats	Utomhus	Utomhus
Materialets skick	Blött	Torrt

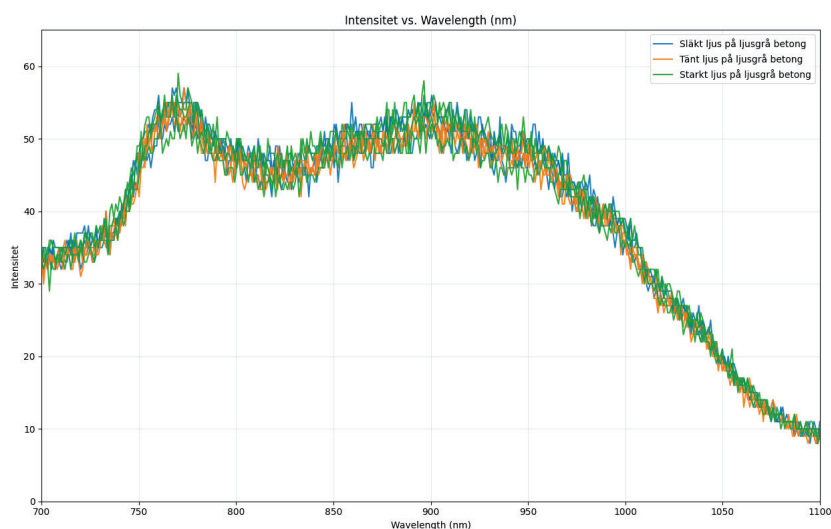
Tabell 4.18: Externa faktorer för torrt och blött tegel tillhörande figur 4.22

Till skillnad från de tidigare materialen uppvisar tegelytan ett omvänt beteende vid blötning. I figuren syns att den blöta tegelytans spektralkurva faktiskt ligger högre än kurvan för torr tegel nästan över hela spektrumet. Mätningen visar att intensiteten ökar efter vattningen, och det här överraskande resultatet antyder att vattnet i tegelns porer förändrar ljusets spridning på ett sätt som ökar den utåtriktade reflektansen.

Följaktligen framstår den blöta tegelytan ljusare i NIR jämfört med när den är torr. Figurens kurvor bekräftar denna effekt genom att observera hur vatten på teglet höjer spektralintensiteten.

4.2.5 Resultat av olika belysningsförhållanden

För att avgöra om ljusexponering på materialytan påverkade mätinstrumentet, utfördes ett test genom att jämföra proven i tre olika belysningsförhållanden. I ett mörkt rum, ett normalt belyst rum och ett rum med extra stark belysning. Testet utfördes inomhus på en ljusgråmålad betongvägg. Resultatet ges i figur 4.23.



Figur 4.23: Spektraljämförelse i tre belysningsförhållanden

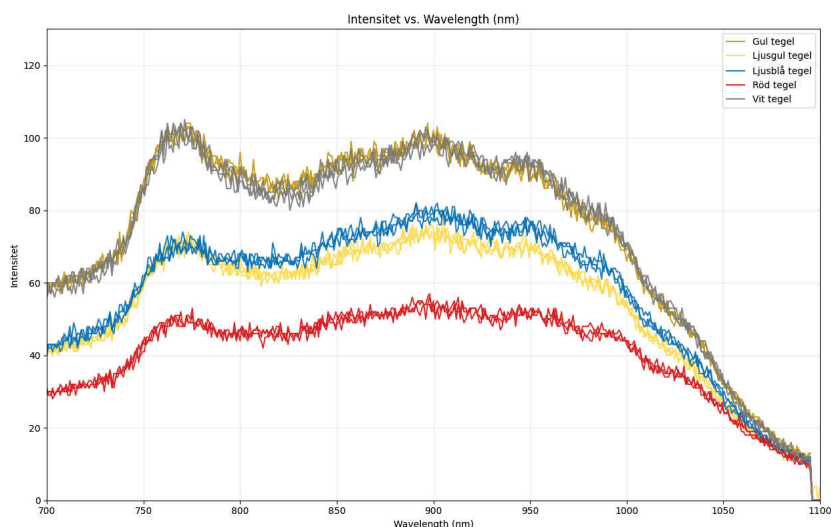
Parameter	Släkt ljus	Tänt ljus	Starkt ljus
Luftfuktighet	83%	83%	83%
Väderförhållande	Molnigt	Molnigt	Molnigt
Plats	Inomhus	Inomhus	Inomhus
Ljusnivå	Mörkt	Normal	Extrem

Tabell 4.19: Externa faktorer för olika belysningsförhållanden på betongvägg tillhörande figur 4.23

Denna figur illustrerar hur spektralkurvan för en ljusgråmålad betongvägg påverkas av omgivande belysning. De tre resulterande spektralkurvorna är nästan helt överlappande. Ingen av kurvorna visar någon markant avvikelse i intensitet trots de stora skillnaderna i omgivningsljus. I det mörka rummet erhöles i princip samma spektrala kurva som under normal belysning, och inte heller den starka belysningen förändrade kurvan något märkvärdigt.

4.2.6 Resultat av jämförelse mellan färgvariationer

De följande två graferna 4.24 och 4.25 sammanställer mätningar på färgat tegel respektive färgad betong. Figurerna gör det möjligt att observera om färgsättningen visar skillnader i de uppmätta spektralkurvorna och om det bidrar till eventuella skillnader i intensitetsnivåer.



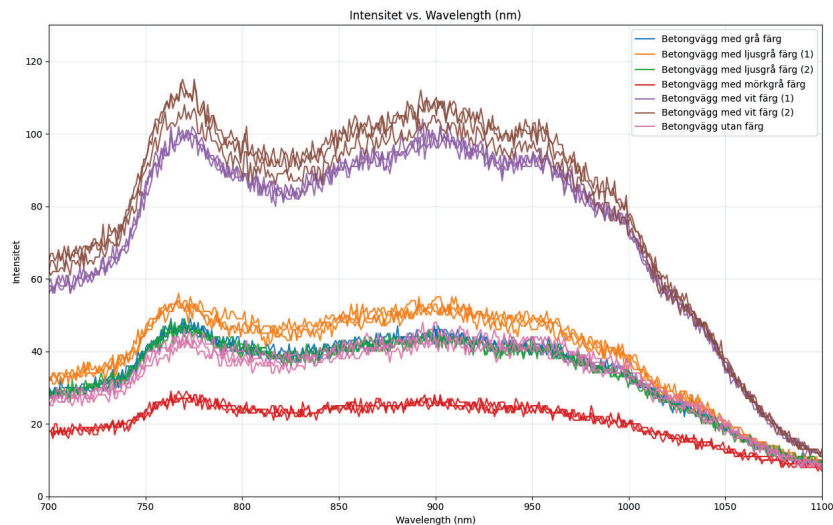
Figur 4.24: Spektraljämförelse av färgvariation på tegel

Parameter	Gul	Ljusgul	Ljusblå	Röd/utan	Vit
Skick	Slät	Halvt slät	Halvt slät	Halvt slät	Slät
Ålder	+50 år	+50 år	+50 år	+50 år	+50 år
Färg	Gul	Ljusgul/beige	Ljusblå	Ingen färg	Vit
Tjocklek färg	Tjockt	Tunt	Tunt	-	Tjockt
Luftfuktighet	67%	67%	67%	67%	67%
Väderförhållande	Halvklart	Halvklart	Halvklart	Halvklart	Halvklart
Plats	Inomhus	Utomhus	Utomhus	Utomhus	Inomhus

Tabell 4.20: Externa faktorer för färgvariationer på tegel tillhörande figur 4.24

Figuren presenterar spektralkurvor för tegelväggar målade i olika färger. Det framgår tydligt att målningens egenskaper påverkar reflektansen. De översta kurvorna tillhör en vitmålad respektive gulfärgad tegelyta, vilket visar att dessa har de högsta intensitetsvärdena över spektrumet med toppar över 100 A.U. Längre ner syns kurvor för en ljusgul och en ljusblåmålad tegelyta, och dessa når en medelhög intensitet. Lägst intensitet från mätningen var rödfärgad tegel.

Sammantaget visar figuren att material som var målade generellt gav högre spektralintensitet på tegel, medan det röda teglet, med ingen målad färg, resulterade i lägsta intensitetsnivå.



Figur 4.25: Spektraljämförelse av färgvariation på betong

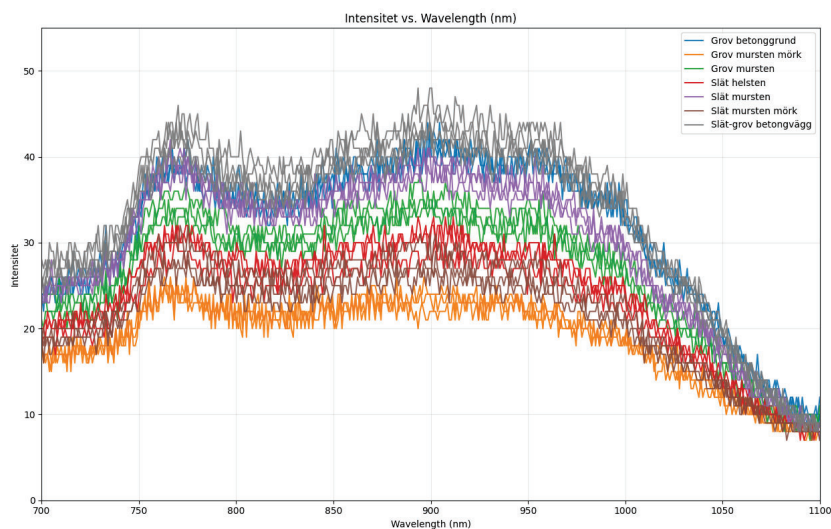
Paramet.	Grå	Lj.grå 1	Lj.grå 2	Mö.grå	Vit 1	Vit 2	Utan
Skick	Slät	Slät	Slät	Slät	Slät	Slät	Slät
Ålder	+50 år	+50 år	+50 år	+50 år	+50 år	+50 år	+50 år
Färg	Grå	Ljusgrå	Ljusgrå	Mörkgrå	Vit	Vit	Ingen
Tjockl. f.	Tjockt	Tjockt	Tunt	Tjockt	Tjockt	Tunt	-
Luftfukt.	67%	67%	79%	67%	67%	79%	79%
Väder	Halvkl.	Halvkl.	Moln.	Halvkl.	Halvkl.	Moln.	Moln.
Plats	Inomh.	Inomh.	Inomh.	Inomh.	Inomh.	Inomh.	Inomh.

Tabell 4.21: Externa faktorer för färgvariationer på betong tillhörande figur 4.25

Denna figur visar hur olika målningsfärger påverkar reflektansen hos betongytor. Liknande mönster som för tegel (figur 4.24) kan följande observeras: generellt ger ljusare färger högre reflektans. En betongyta målade med en ljus färg, som exempelvis vit eller ljusgrå, uppvisar högre intensitet i spektralkurvan än samma typ av betong målade med en mörkare färg, som exempelvis mörkgrå eller brun, vilket uppvisar lägre intensitet.

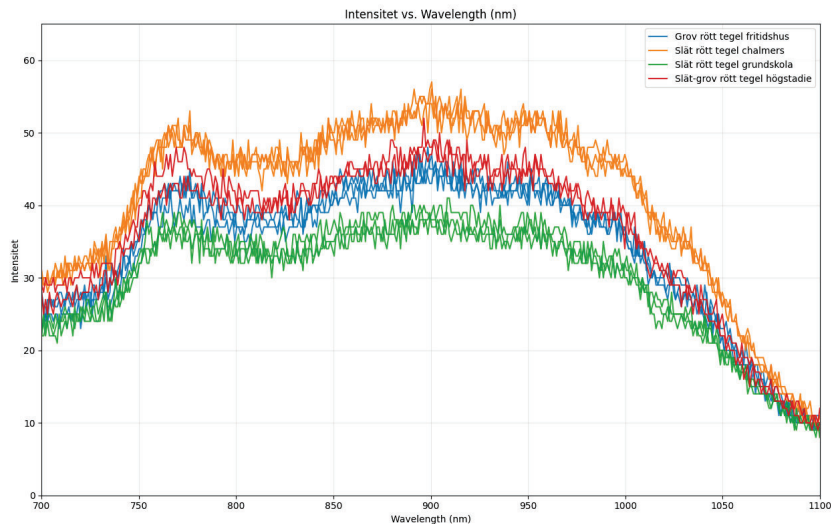
4.2.7 Resultat av jämförelse av ytskikt

Figur 4.26 presenterar spektralmätningar av betongprover med tre olika ytstrukturer – slät, grov respektive slät-grov – för att klarlägga hur variationen i ytskiktet påverkar den uppmätta intensitetsnivån.



Figur 4.26: Spektraljämförelse av ytskikten på olika typer av betong

I figuren jämförs spektralkurvor för flera olika betongytor som varierar i fråga om ytstruktur. Varje kurva representerar en särskild typ av betongyta, exempelvis släta- eller grövre betongytor. Resultatet visar inget tydligt mönster på om ytstrukturen skulle ge högre intensitet vid slät eller grov yta. Spektralkurvor för grov yta kan ses både högt och lågt i figur 4.26. Generellt resulterar grövre ytor i högre intensitet men ger också ett mer spritt resultat då "grov mursten mörk" har lägst intensitetsvärde jämfört med de andra proverna. Släta ytor resulterar generellt i lägre intensitetsvärde med mycket mer samlade värden.



Figur 4.27: Spektraljämförelse av ytskikten på olika typer av tegel

Figuren jämför spektralreflektansen hos olika typer av tegelytor med olika egenskaper. Kurvorna visar att tegelmaterialets ytstruktur och tillstånd påverkar dess reflektans i hög grad. Den t.ex. släta röda tegelytan ligger starkt högre än de andra, den reflekterar mer ljus och ger därmed högre intensitetsvärden genom spektrumet. I spektralgrafan kan däremot kurvan för ett råare tegel ses som betydligt lägre i intensitetsnivån.

Även skillnader mellan nytt och väderskadat tegel kan urskiljas, en ren och slät tegelyta reflekterar mer än en som täckts av smuts eller påväxt. De olika kurvorna sprider ut sig från hög till låg intensitet, vilket tydligt demonstrerar att ”olika typer” av tegel beroende av ytbehandling, densitet och ytstruktur ger olika spektrala resultat. Figuren understryker att två tegelmaterier kan bete sig olika optiskt trots liknande grundmaterial, om deras ytor skiljer sig i fråga om tillstånd och struktur.

5

Diskussion

I det här avsnittet diskuteras de resultat som har framkommit i studien. Fokuset är inriktat på att tolka de spektrala mätningarna i relation till materialets egenskaper och yttre påverkan. Resultatet jämförs för att belysa möjliga orsaker till observerade variationer och mönster samt för att identifiera felkällor. Vidare diskuteras huruvida tillvägagångssättet för mätningarna gick till och förbättringspunkter lyfts fram för att uppnå ett bättre resultat.

5.1 Analys av resultat från mätningar

Nedan diskuteras och analyseras resultatet givet i resultatdelen. Analysen har utförts genom att jämföra de spektrala resultaten för att identifiera avvikelser och variationer.

Vid analys av spektraldata för de olika materialen går det i de flesta fallen att urskilja inom vilket intensitetsintervall som materialet tillhör. För att förstå hur olika byggnadsmaterial påverkar det spektrala resultatet analyserades och jämfördes reflekterade intensitetsvärden för betong, tegel och trä. Syftet var att identifiera hur olika typer av träslag, tegelsorter och betong skiljer sig från varandra.

Vid jämförelse mellan materialen visar trä ett övergripande högre intensitetsintervall jämfört med de andra materialen, se figur 4.12. Tegel befinner sig mellan trä och betong, men tenderar även till lägre nivåer där betongen befinner sig. Det är viktigt att notera att det insamlade materialet är av översiktlig karaktär och inkluderar flera varianter av samma materialtyp. De observerade spektrala skillnaderna kan därför delvis förklaras av variationer i exempelvis ytkvalitet, fukthalt eller färg. Dessa faktorer kan ha påverkat reflektansen och därmed orsakat avvikelser i intensitetsnivåerna mellan proverna.

5.1.1 Analys av olika träslag

Vid närmare jämförelse av trämaterialen framgår det tydligt att trä generellt uppvisar de högsta intensitetsnivåerna, särskilt i intervallet 750–950 nm, där flertalet träkurvor når över 100 A.U., se figur 4.13. Det tyder på en högre reflektans hos trä jämfört med de andra materialen inom våglängdsområdet. Den största intensitetsskillnaden uppmättes till ungefär 60 A.U. vid våglängden 750 nm vilket är det spann materialet i normala förhållanden förhåller sig inom. Efter att ha sammanställt alla prover listades vilka träslag som gav höga respektive låga intensitetsvärden på spektraldatan. Listan nedan rangordnar vilka träslag som har högst respektive lägst intensitetsvärde från mätresultatet i figur 4.13, med högst intensitetsvärde överst i listan:

- Furu
- Gran
- Ek
- Björk
- Alm

Ett mönster försökte identifieras från listan som hade koppling till intensitetsnivåer. Första antagandet var att det berodde på hur ljus materialet var. Jämförelse med respektive materials ljusreflektansvärde (LRV) gjordes för att få en djupare förståelse, se listan nedan. LRV är ett universellt värde för kontrast som mäter andelen användbart ljus som reflekteras av ett objekt på en skala från 0 till 100, där 0 är mörkast och 100 är ljusast [33]. Listan redogör träslagens ljusreflektansvärde (LRV) från ljusast till mörkast enligt följande [33]:

- Björk - LRV 71,1
- Furu - LRV 47,8
- Gran - (Ej angivet men generellt ljusare än ek och alm)
- Ek - LRV 41,9
- Alm - LRV 30,5

Vid jämförelse av listorna ovan kan tydliga likheter ses med ett undantag. Björk som resulterade i låga värden från mätningarna ska enligt LRV ge högst intensitet. Trots att björken var obehandlad avvek mätresultatet märkbart. Slutsatsen blev att avvikelserna troligtvis berodde på andra faktorer som analyseras i senare avsnitt. En annan slutsats blev att det var för få mätningar som gjordes för att få en konkret bild av hur björkens spektralkurva är i jämförelse med de andra träslagen.

5.1.2 Analys av olika tegeltyper

Analysen av olika tegeltyper skilde sig från jämförelsen mellan träslag, eftersom det inte finns en lika tydlig uppdelning mellan tegelsorter. Uppdelning av tegel kan ske på olika sätt, vissa uppdelningar är beroende av dess användningsområde medan andra av hur de producerades. Uppdelningen som valdes för analysen var beroende av teglets färg och pigment. Teglets färg påverkas av de mineraler och pigment som används vid tillverkning [34]. Vid förbränning av kalkfattig lera ges den klassiska röda färgen på teglet, medan kalkrik lera ger en gulare färg som också är vanligt förekommande på byggnader. Mörkbrun färg ges vid tillägg av mangandioxid i lerans sammansättning.

Mätningarna utfördes på röda, ljusa och mörka tegelväggar. Spektraldata gav följande resultat, vilket kan ses i figur 4.14. Ljust tegel hade högst intensitetsvärde, med högsta toppar på 80 A.U. och befann sig inom ett intensitetsintervall på 20 A.U. mellan högsta och lägsta spektralkurvorna. Under det ljusa teglet i grafen uppvisades spektralkurvor från det röda teglet. De högsta topparna för det röda teglet var på 50 A.U. med ett intensitetsintervall på 15 A.U. Längst ner i grafen med lägsta intensitetsvärden var mörkt tegel med intensitetstoppar på 30 A.U. och ett intensitetsintervall på 10 A.U.

Generellt uppmärksammades att ljusa tegelväggar varierade mest i färg och i ytstruktur jämfört med de andra tegelsorterna, vilket är faktorer som analyseras i senare avsnitt. Alla röda tegelväggar hade liknande färg och ytstruktur, vilket förklarar det lägre intensitetsintervallet mellan proverna. Det mörka teglet hade lägst intensitetsintervall eftersom färg och ytstruktur var också väldigt lika mellan proverna enligt visuell granskning.

Slutsatsen blev att tegel, uppdelat i kategorierna "ljus", "röd" och "mörkt" i ett idealt förhållande gick att identifiera med hjälp av spektrometern inom varje spektralt intervall. Störst spektralintervall hade ljust tegel, eftersom färg och ytstruktur varierade mest i förhållande till de andra tegeltyperna.

5.1.3 Analys av olika betongtyper

Svårast av de tre materialen att kategorisera var betong. Betong, likt tegel, kan uppdelas på flera olika sätt beroende av till exempel användningsområde eller tillverkningsprocess [35]. Den mest uppenbara uppdelningen skulle vara att utgå efter betongens hållfasthetsklass, men trots att två betongprover har samma hållfasthet betyder det inte att sammansättningen är likadan. Ett annat problem är svårigheten att avgöra vilken hållfasthetsklass materialet har om det sitter på en befintlig byggnad, då materialinformation till byggnader är i de flesta fall

svåråtkomlig. Under projektets gång blev det tydligt att information om material på byggnader var bristfällig, vilket någonstans stödjer syftet med projektet. Uppdelningen blev slutligen kategoriserad i form av användningsområde, exempelvis yttervägg, innervägg, grund och mursten, vilket sedan jämfördes.

Vid analys av mätningarna försöktes ett mönster identifieras, men eftersom testerna av betongen varierade både inom färg och ytstruktur blev det svårt att avgöra, se figur 4.15. Sammanställning av alla mätningar gav högsta intensitetstoppar på 50 A.U. med ett intensitetsintervall på 30 A.U. som var ganska genomgående mellan våglängderna 725 nm till 925 nm. Generellt gav betongväggar (både inre och yttre) samt betonggrund högre intensitetsvärden än mursten. Bedömningen var att det berodde på att mursten varierade mer i färg och var mer släta, medan väggar och grund var mer "enfärgade" och hade en grövre yta.

En närmare inblick undersöktes på vad betong innehåller och hur innehållet påverkat betongens utseende. Trots att det inte finns ett universellt betongrecept så finns det standarder på innehåll som anpassas efter användningsområde och krav. De flesta betongrecept innehåller cement, ballast, vatten och eventuellt något tillsatsmedel som varierar lite mellan olika recept [35]. Det som påverkar ytstrukturen är främst storlek på ballasten men även hur gjutningen utförs, exempelvis typ av form och utförandet av vibrering och kompaktering. Materialets färg beror främst på vilken typ av cement eller vilken typ av sten som har använts som ballast [36].

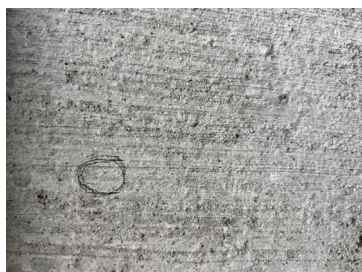
Trots att det är flera faktorer som påverkar betongens utseende och därmed spektraldata befinner sig betongen inom ett tydligt intensitetsintervall. Slutsatsen blev att betongen är svår att identifiera jämfört med de andra materialen, då olika betongtyper är svåra att kategorisera, men att intensitetsnivåerna är ett tydligt intervall som går att identifiera.

5.2 Analys av specifika jämförelser

För att undersöka hur olika faktorer påverkar mätinstrumentet genomfördes ett antal riktade mätningar. Resultatet från dessa tester jämfördes och analyserades för att identifiera eventuella skillnader och mönster.

5.2.1 Analys av jämförelse mellan återkommande mätningar

För att undersöka hur naturliga faktorer som exempelvis väderförhållanden påverkar de tre olika materialen genomfördes en repetitiv fältstudie som utfördes vid slumpmässiga tillfällen. Mätningarna utfördes på en betonggrund, en tegelvägg och en träbänk, vilket ses i respektive figur 5.1, 5.2 och 5.3. Exakt punkt för mätning inringades för att kunna göra en noggrann bedömning mellan de olika mätningarna.



Figur 5.1: Visuellt underlag i samband med återkommande mätning av betonggrund



Figur 5.2: Visuellt underlag i samband med återkommande mätning av tegelvägg



Figur 5.3: Visuellt underlag i samband med återkommande mätning av träbänk

Olika väderförhållanden antecknades tillsammans med luftfuktighet för att identifiera avvikelser mellan proven. Tyvärr varierade inte vädret särskilt mycket, då fuktigheten enbart skiftade från 64 % till 66 % mellan de två första mätningstillfällena då det var molnigt väder. Spektraldatan för teglet var nästintill identiska, medan trä och betong hade små skillnader mellan första och andra proverna, se avsnitt 4.2.3. Konstaterandet blev att dessa skillnader inte berodde på yttre faktorer utan snarare av var på ytan mätningen genomfördes. Trots att varje mätning skulle ske på samma ställe var det svårt att mäta på exakt samma punkt varje gång, då små förflyttningar i sidled på enbart några millimeter gav växlande värden. De varierande värdena kan ha berott på att mätning skedde i sprickor eller att mätverktyget inte låg rakt på, vilket kan ha medfört att ljus påverkade mätinstrumentet och gav små ändringar i mätresultatet.

Den tredje mätningen för träbänken genomfördes i solljus med 54 % luftfuktighet. Tyvärr var platserna för mätning av betong och tegel placerade i ett område som till största delen bestod av skugga, vilket medförde att solljusets påverkan ej kunde tas med i analysen för de två materialen. Vid jämförelse av träbänkens mätvärde gavs en identisk spektralkurva likt de första proven, trots att bänken hade varit utsatt för solljus under en halv dag och luftfuktigheten var lägre. Inga större skillnader gavs för tredje mätningen av betong och tegel. De små ändringarna i resultatet bedömdes likt tidigare ha berott på små förflyttningar i sidled från mätpunkten.

Slutsatsen blev att väderförhållanden inom "normala" förhållanden inte påverkar mätresultatet. Om materialet inte ändras mellan mätningarna av exempelvis blöta ytor, smuts eller fysisk nedbrytning kommer spektralvärdena förbli konstanta [37]. Trots varierande luftfuktighet kan ytfuktigheten förbli konstant om materialet inte absorberar vatten från luften, eller om variationen var för liten för att ge mätbara effekter. Mer om påverkan av ytfukt och belysning redovisas i respektive avsnitt 5.2.2 och 5.2.3.

5.2.2 Analys av jämförelse av ytfukt

För att undersöka hur fukt påverkar materialens spektrala egenskaper genomfördes mätningar på både torra och blöta ytor. "Fukt" i det här sammanhanget syftar på ytfuktighet, vilket innebär att vatten appliceras direkt på materialets yta utan att nödvändigtvis tränga in i dess struktur. Syftet med analysen var att identifiera hur vatten påverkar reflektans inom det nära infraröda spektralområdet (NIR).

Genom att jämföra resultatet mellan blöta och torra ytor kan förändringar mellan intensitet och våglängd identifieras, se avsnitt 4.2.4. Mätningar för trä och betong visade att blöta ytor gav upphov till reducerade intensitetsnivåer jämfört med motsvarande torryta. Fenomenet kan tyda på flera olika faktorer, menar Clevers i en artikel från ScienceDirect [38]. De skriver att vatten har starka absorptionsband i det nära infraröda området. När en yta är blöt absorberar vattnet en betydande del av det infallande ljuset och det är därför ett blött material uppfattas som "mörkare" rent visuellt vid blötläggning (se figur 5.4, 5.5, 5.6 och 5.7). Därför resulterar ett blött material i lägre intensitetsnivå vid mätning för spektrometern jämfört med ett torrt material. Vatten som är applicerat på en yta kan även minska reflektansen genom att ändra ljusets brytning, då ljuset passerar ett annat medium, alltså vatten, med ett annat brytningsindex, vilket kan leda till lägre intensitet i de spektrala mätningarna [38].



Figur 5.4: Visuellt underlag i samband med mätning av torr träyta



Figur 5.5: Visuellt underlag i samband med mätning av blöt träyta



Figur 5.6: Visuellt underlag i samband med mätning av torr betongyta



Figur 5.7: Visuellt underlag i samband med mätning av blöt betongyta

Bedömningen av hur ytfuktighet påverkar material framstod som pålitlig, eftersom de blöta ytorna genomgående visade lägre spektralintensitet än de torra ytorna. Men vid jämförelse av ytfuktighet som genomfördes på mörkt tegel uppvisades motsatt effekt, se figur 4.22. Mätningen resulterade i att blött tegel hade högre intensitet än det torra, vilket inte stämde med de tidigare materialen. En vidare analys utfördes för att identifiera vad som kunde vara orsaken. För att undersöka varför teglets resultat skiljer sig studerades teglets egenskaper. Teglets porositet kan vara avgörande eftersom torrt tegel sprider ljuset genom sina luftfyllda porer [37]. Det innebär att vid ökad ytfuktighet fylls därför porerna med vatten, vilket kan medföra minskad inre spridning av det spektrala ljuset. Eftersom den inre spridningen minskar, ökar därför det reflekterade ljuset och bidrar med högre intensitetsnivåer som tas upp av spektrometern.

Vid analys av det visuella underlaget för tegel (se figurerna 5.8 och 5.9) kan den blöta ytan ses som mer slät och inte lika skrovlig som den torra ytan, vilket antyder ökade intensitetsnivåer från spektraldata.



Figur 5.8: Visuellt underlag i samband med mätning av torr tegelyta



Figur 5.9: Visuellt underlag i samband med mätning av blöt tegelyta

En annan påverkande aspekt kan ha varit att den torra tegelytan var täckt med mycket smuts och damm [39]. Smuts och damm tenderar att absorbera mer ljus än rena ytor, vilket också minskar den reflekterade intensiteten.

Slutsatsen blev att ytfuktighet är en viktig faktor att ta med i beräkningen, då resultaten varierar kraftigt i jämförelse mellan torr och blöt yta. Vatten på ytan påverkar reflektansen, vilket ledde till märkbar minskning av uppmätt intensitet på både trä och betong, medan vatten gav en ökad intensitet från teglet. Det understryker vikten av kontrollering och dokumentering av materialets skikt och dess fuktförhållanden vid spektralanalys.

5.2.3 Analys av olika belysningsförhållanden

Vid analys huruvida olika belysningsförhållanden påverkar mätresultatet och mätinstrumentet genomfördes ett test i tre olika ljusmiljöer, se avsnitt 4.2.5. De spektrala mätningarna resulterade i tre liknande spektralkurvor, där endast marginella skillnader kunde observeras mellan testomgångarna.

Antagandet innan mätningen var att ett mörklagt rum skulle resultera i en spektralkurva med mindre intensitet på grund av en mörkare yta, likt en "mörkare färg" på materialet då de absorberar mer ljus och reflekterar mindre jämfört med ljusare färger [40] och att ett upplyst rum skulle ge högre intensitet av samma anledning. Istället resulterade det i tre liknande spektralkurvor med inga märkbara avvikelser. Slutsatsen blev att mätverktygets utformning vid sensorn täcker/skyd-

dar till största del all ljusexponering, vilket medför att faktorer som solljus och ljus från andra ljuskällor kunde uteslutas som påverkande faktor, så länge materialets yta inte är för grov för mätverktyget att blockera inkommande ljus.

5.2.4 Analys av jämförelse mellan färgvariationer

För att undersöka hur färg påverkar spektraldata genomfördes flera jämförelser på olika material målade i olika färger. För att möjliggöra en mer exakt bedömning jämfördes spektraldata på olika färger på samma material i den mån det var möjligt, alltså var mätningarna tvungna att ske på samma byggnadskomponent som bestod av flera olika färger. Antagandet inför jämförelsen var att ljusa färger skulle ge höga intensitetsvärden jämfört med materialets ursprungliga spektralkurva och att mörka färger skulle ge lägre intensitetsvärden [40].

Analys av spektraldata på framför allt tegel medförde att det inte enbart var vilken typ av färg som påverkade resultatet, utan hur tjockt lager färg som var applicerat på ytan. I figur 4.24 redovisas spektrala värden för tegel målat i olika färger. Spektralkurvorna med högst intensitet var en guldfärgad och en vitfärgad tegelvägg med tjockt lager färg, medan lägre intensitet uppmättes för ljusgul/beige och ljusblå färgad tegel med tunt lager färg, se figurerna 5.10, 5.11, 5.12 och 5.13.

Enligt tidigare teori borde alltså den ljusblå och den ljusgul/beige färgade väggen ge ett resultat med högre intensitet då den rent visuellt är närmare vit färg än gul färg [40], men ett tjockt lager färg kan tydligen fungera som en optisk barriär [41]. Det tjocka lagret av färg reflekterar en större andel av det infallande ljuset redan vid ytan, istället för att ljuset tränger ner och absorberas i det porösa, ojämna tegelmaterialet. Det förklarar tydligt varför resultatet varierar på de släta jämfört med de grövre ytorna.



Figur 5.10: Visuellt underlag i samband med mätning av vitmålad tegelvägg med tjockt lager färg.



Figur 5.11: Visuellt underlag i samband med mätning av gulmålad tegelvägg med tjockt lager färg.



Figur 5.12: Visuellt underlag i samband med mätning av ljusblåmålad tegelvägg med tunt lager färg.



Figur 5.13: Visuellt underlag i samband med mätning av ljusgul/beigemålad tegelvägg med tunt lager färg.

Liknande resultat gavs från färgjämförelsen av målade betongytor, se figur 4.25. Tydligt framgår det att betongväggen med tjock vit färg uppmättes med hög intensitet, vilket på ett sätt kan beskrivas som idealt för att få höga intensitetsvärden. Det intressanta var att ett av de andra proven skedde på en betongvägg med vit färg men med lite tunnare lager färg. Resultatet visar en betydligt lägre intensitetsgrad i jämförelse mellan de båda proverna. Lägst intensitet uppmättes på en mörkgrå yta trots att den bestod av ett tjockt lager färg. Det berodde troligtvis på att den mörka färgens påverkan var större än ytskiktets påverkan.

Slutsatsen från färganalysen blev att färg har en betydande påverkan på mätresultatet, då det inte bara beror på vilken typ av färg det är på materialet utan också på tjockleken på färgen som bland annat avgör hur slät ytan känns. Generellt ger ljusare färger ett högre intensitetsvärde, medan mörkare färg ger ett lägre intensitetsvärde. För att identifiera materialet är det därför viktigt att reducera påverkan av färg för att ge rätt resultat från spektrometern.

5.2.5 Analys av jämförelse av ytskikt

Byggnadsmaterials ytstrukturer varierar i både struktur och sammansättning, beroende på tillgänglig teknik, bearbetningsmetoder och funktionella krav. Grova, släta eller behandlade ytor uppstår genom olika produktionssätt som har varierat genom tiden, från manuellt hantverk till industriell precision med ytbehandling, vilket visas i variationer i intensitet vid spektrala mätningar.

I figur 4.26 antar de grövre mörkare betongytorna generellt lägre intensitetsvärden och de ljusa släta betongytorna högre intensitet. I jämförelser av samma slags betong med enbart varierande ytstruktur som även visas i figur 4.26, har den grova murstenen högre intensitet än den släta helstenen. I figur 4.27 jämförs istället tegel där slätt rött tegel har lägre intensitet än det grova röda teglet. Vid analys av hur olika ytstrukturer påverkar spektralinstrumentet kan man i stora drag därför antyda att släta ytor hos de jämförda materialen ger lägre intensitetsnivåer medan grova ytor ger en högre registrerad intensitet, med förekommande oregelbundna resultat med spridda värden. Resultatet kan förklaras med materialens reflektion, absorption och spridning.

Den fysikaliska förklaringen bakom de olika intensitetskurvorna handlar om att de olika ytskikten har varierande reflektionstyper som bygger på att ytorna reflekterar ljus på sätt som skiljer sig åt [42]. En slät yta hos betong, tegel och trä reflekterar ljus mer spekulärt som en spegel, vilket innebär att ljuset reflekteras i en viss riktning och medför att enbart en del ut av ljuset når sensorn i spektrometern [42]. Att inte allt ljus träffar instrumentet visas i resultatet där de släta ytorna visades uppnå lägre intensitetsnivåer. Vid tester av grövre ytor var resultatet mer oregelbundet, då ytan reflekterade ljus mer diffust. Det innebär att ljuset reflekterades i fler riktningar, vilket kan ha lett till att mer av det spridda ljuset träffade sensorn och resultatet gav en högre intensitet med stor spridning [42]. När en yta är ojämn i mikroskala, alltså är skrovlig eller grov, skapas det fler mikroskopiska vinklar som påverkar spridningen av ljuset [43]. Ytan som ljuset reflekteras i kan öka, vilket även skapar fler oregelbundna reflektanser och sensorn kan därmed registrera mer spritt ljus vilket kan ge en högre spektral intensitet [43].

Analysen gjordes mellan slät betong och grov betong, samt slätt tegel och grovt tegel, alltså sker enbart analyser inom samma material vilket innebär att resultatet inte beror av variationer i materialets kemiska sammansättning [44]. De våglängder som absorberas i materialet förändras inte av ytråheten då den kemiska absorptionsförmågan är konstant då slät betong och grov betong fortfarande är samma material [44]. Det som påverkar de varierande intensitetskurvorna är därmed ytråheten som skapar ljusreflektionens karaktär vilket påverkar hur mycket reflekterat ljus som NIR-spektrometern mäter.

Figurerna 4.26 samt 4.27, visar att spektralkurvorna för betong och tegel skiljer sig åt beroende på ytans egenskaper. Skillnader i ytbehandling så som ren eller smutsig, ljus eller mörk, påverkar utöver ytstruktur reflektansen markant. Även om samtliga prover består av betong och tegel kan alltså spektralresponsen variera beroende på ytskiktets struktur och färg, vilket framgår av spridningen mellan kurvorna. Vid mätningar av olika material är därför ytråheten en viktig aspekt som har stor betydelse för resultatet, då olika materials ytor kan ge högre och lägre intensitet, där även andra faktorer kan göra resultatet osäkert, men är viktigt att ta till hänsyn då material ofta har varierande ytor som mätverktyget behöver för att skapa en större tillförlitlighet.

5.2.6 Analys av byggtrender över tid

Genom historien har materialen betong, trä och tegel använts i byggnader, men deras utformning och ytstruktur har i takt med byggteknikens och arkitekturens utveckling ändrats. De historiska materiella skillnaderna påverkar hur ljus reflekteras från materialens ytor, vilket i sin tur skapar varierande mätresultat vid spektralanalys. Intensitetsnivåer som uppmätts av olika byggnadsmaterial påverkas därmed även av skillnader i historiska ytegenskaper samt designpreferenser.

För att analysera hur material påverkas under längre tid av yttre faktorer skulle det krävas flera år av dokumentering, vilket inte var möjligt för projektet. Istället jämfördes spektraldata på gamla och nya byggnader, där inget tydligt mönster gick att urskilja, men en sak som var tydlig var att materialets utseende skiljde sig åt. I figur 4.5 gjordes det mätningar på två äldre ljusa tegelmaterial och ett nytt ljust tegel. Det nya teglet gav ett högre intensitetsvärde och vid jämförelse av bilderna på respektive material, syns det tydligt att det nya teglet är både slätare och har ett annat ytskikt, se figur 5.14 och 5.15.



Figur 5.14: Visuellt underlag i samband med mätning av nytt tegel



Figur 5.15: Visuellt underlag i samband med mätning av äldre tegel

Uppenbarligen skiljer sig materialen åt, men det är tydligt att olika byggtrender samt ålder har haft en stor påverkan på hur byggnadsmaterial ser ut idag, vilket är en viktig aspekt att ta med i beräkning och analysering av spektraldata.

Äldre byggnadsmaterial har ofta varit lokalt producerat vilket medfört stora variationer i struktur, densitet samt ytfinish [45]. Tegel tillverkades främst genom handformning som sedan brändes i lokala ugnar vilket resulterade i varierade färgnyanser, porositet och ojämnheter [45]. Betong blandades även på plats med ballast från området vilket i kombination med gjutningsmetoden skapade grova och porösa ytor. Trä användes i massiv form från lokala träslag utan industriell sortering eller bearbetning [45].

I moderna byggnader produceras byggnadsmaterial industriellt med en hög grad av standardisering för att uppnå jämn kvalitet, färg, hållbarhet och estetik [46]. Tegel pressas och bränns maskinellt under kontrollerande förhållanden vilket ger jämna former och färg samt släta ytor [46]. Betong tillverkas ofta som prefabricerade element, med tillsatser som ger en jämn och tät yta [46]. Materialet trä används ofta som limträ eller kompositmaterial med jämn fuktkvot och ytbehandling för en jämn finish [46].

Produktionen har ändrats med tiden vilket skapat varierande ytskikt som går att urskilja i resultatet, eftersom att äldre byggnadsmaterial ofta är grövre samt har små sprickor som ökar ljusspridningen vilket ger en diffus reflektion, vilket även stämmer överens med det som beskrivs i avsnitt 5.2.5. Rent generellt borde det

därmed gå att konstatera att äldre byggnadsmaterial på grund av dess ytstruktur bör ge högre intensitetskurvor jämfört med nyare material som är mer släta på grund av teknisk utveckling. I figur 4.5 visar däremot resultatet det motsatta, men vad som visas av figur 5.14 och 5.15 domineras ytstrukturen istället av mossa och smuts vilket skapar större absorption hos vissa våglängder och resultatet visar därmed istället på en lägre reflektans.

Att äldre material får fler defekter i ytskiktet beror även på att det sällan är ytbehandlat. Ytbehandling med äldre material kan ha gjorts med linolja, kalkfärg, tjära vilket har givit en naturlig åldring hos materialet som bidragit med grövre yta på grund av yttre faktorer såsom väder, UV-ljus samt biologisk tillväxt [47]. I moderna industriellt producerade material har ytbehandlingar såsom lasyr, lack, akrylfärg, impregnering eller vattenavvisande behandling använts för att skydda ytan från yttre belastningar och för att ge en estetisk jämnhet [44]. Då ytbehandlingar varierat genom tiden blir därför de spektrala resultaten varierande, då äldre material på samma sätt som det beskrivs i avsnitt 5.2.5, kan ge upphov till både en diffus reflektion genom ojämnheter men även ett oförutsägbart spektralt resultat på grund av smuts samt biologisk tillväxt [47]. I moderna industriellt producerade material blir istället ytan slät vilket ger spektralreflektion och en låg intensitet, men på samma sätt som diskussionen beskriver i avsnitt 5.2.4, absorberas specifika våglängder i det nära infraröda området vid användning av färg, men också av lack eller olja, vilket förändrar spektralkurvans utseende. Sensorn mäter därför inte det rena materialet utan en kombination av ytskiktets och underlagets spektrala egenskaper [44].

Olika arkitektoniska stilar har genom alla tider skapat varierande ytstrukturer hos material [48]. Från handgjorda material med oregelbunden, porös och texturrik karaktär [45] till modernismens exponerande obehandlade råa material [49] blev materialen mer homogena och ytbehandlade med varierande färger och mönster, för att i vår samtid eftersträva släta, rena ytor i prefabricerade element.

Estetikens roll i mätningen är en viktig aspekt då resultatet presenterar hur gammalt materialet är, hur materialet därmed har producerats och om materialet har någon ytbehandling. I analysen av resultatet är det däremot svårt att avgöra de här aspekterna då det finns ett flertal andra faktorer som även har stor påverkan på intensiteten. Några enstaka jämförelser har gjorts mellan äldre och nyare byggnadsmaterial där det bland annat går att urskilja skrovliga ytor hos äldre bebyggelse från släta ytor i nyare, då intensitetskurvorna ser olika ut. Det här baseras enbart på att materialen som jämförs mätts under liknande förhållanden för att skillnader ska kunna uppstå mellan varierande ytskikt, dels genom yttre faktorer men även genom materialens visuella utseende. I analysen har det däremot varit utmanande att kunna avgöra från vilken tid olika byggnadsmaterial är

konstruerade och därmed om slitage beror av just ålder eller produktion, då en viss estetik kan skapa material som ser äldre ut än vad det är. Det som är intressant i undersökningen har därför inget att göra med ålder utan snarare hur olika ytskikt påverkar resultatet, såsom grovhet, ytfukt och färg. Det är viktigt att ha i åtanke vilken tid byggnadsmaterialet är från då dess återvinningsbarhet kan variera stort, vilket förklaras i avsnitt 3.4 där potentialen förändras till återvinning- eller återanvändningen av produktion genom tiden, dels på grund av de krav som ställts gällande ytbehandling men även innehållet i materialen.

5.3 Analys av felkällor och förbättringsmöjligheter

Vid skanning av material med hjälp av spektrometer identifierades flera potentiella felkällor som kan ha påverkat resultatets tillförlitlighet. Dessa faktorer beror både på begränsningar i själva tekniken och hur mätningarna genomfördes i praktiken. I det här avsnittet beskrivs de främsta felkällor samt möjliga förbättringar som kan bidra till mer noggranna och konsekventa mätresultat till framtida projekt.

- En felkälla som uppkom tidigt i projektet var bristen på material i ideella förhållanden. Företag kontaktades för att mätningar skulle kunna göras på material som var nya och inte hade påverkats av några faktorer. Dessa mätningar skulle användas som en grund att utgå efter vid jämförelse med andra mätningar, men att hitta ett företag som ville hjälpa till var svårt. Istället gjordes mätningarna på byggnader som ansågs vara i ett "normalt tillstånd", vilket inte skapade de optimala utgångspunkterna att genomföra jämförelser med, vilket i sin tur kan ha begränsat analysens tillförlitlighet.
- En annan felkälla är att allt för få mätningar utfördes. Eftersom att det var svårt att hitta ett material i ideellt förhållande, kunde fler mätningar ha utföras för att säkerställa en standardkurva att utgå efter. Fler mätningar skulle ha ökat säkerheten i datan och det hade blivit tydligare vilka faktorer som påverkat mätinstrumentet.
- En förbättringsmöjlighet skulle kunna vara att använda sig av fler mätverktyg och inte enbart en spektrometer som mäter reflektans på ytan av materialet. Eftersom flera material har målats, ytbehandlats eller påverkats av yttre slitage och mätverktyget enbart mäter reflektion av ytan, speglar resultatet därför inte alltid en helhet av materialet. En annan förbättringspotential kan var att använda mätverktyget till att mäta strålning genom materialet, vilket ger en bättre helhet om själva materialet och inte enbart ytan.

6

Slutsats

Det här kapitlet sammanfattar projektets viktigaste insikter baserat på det genomförda resultaten, analyser och besvarar frågeställningen med tillhörande delmål.

6.1 Bedömning av datainsamlingsmetoden

Datainsamlingsmetoden genomfördes i två studier, den komparativa studien och Test-Retest, som båda baserades på tidigare forskning för att få en översikt och förståelse av hur datainsamling och materialbedömning genomförts i liknande sammanhang. I den komparativa studien togs en mall fram för mätningar utifrån tidigare studier för att identifiera relevanta parametrar och tillvägagångssätt för egen datainsamling. Den effektiva mallen tydliggjorde vad som skulle undersökas hos varje material och samlade även in alla relevanta faktorer på samma plats. Mallen är även viktig för framtida maskininlärning då den sammanställde hur samma material beter sig under olika förhållanden samt med varierande ytstrukturer.

Datainsamlingsmetoden fördes vidare med Test-Retest, där själva mätningarna gjordes för att kunna genomföra jämförelser mellan olika resultat. Metoden var ett effektivt tillvägagångssätt som baserades på struktur där skanningar utfördes för att få fram olika resultat där tydliga jämförelser mellan olika sorters ytstrukturer samt yttre faktorer kunde genomföras. Datainsamlingsmetoden medförde även ett datapaket vilket gjorde analysen effektiv då all data samlats på ett ställe. Det är dock viktigt att poängtera att antalet skanningar i vissa fall var begränsat, vilket kan ha påverkat resultatens säkerhet och variation. En större och mer varierad datamängd hade kunnat stärka jämförelserna ytterligare och basera resultaten på en bredare material-databas.

6.2 Bedömning av mätresultat och analys

Datainsamlingsmetoden gav en tydlig grund för att kunna utföra jämförelser på ett systematiskt sätt mellan de olika byggnadsmaterialen, tegel, betong och trä, samt jämförelser inom materialen. Metoden möjliggjorde att relevanta faktorer dokumenterades i mallen, vilket i sin tur skapade förutsättningar för att kunna identifiera mönster och avvikelser i den spektrala datan som samlades in med NIR-spektrometern. Studien tyder på att flera faktorer påverkar mätresultaten där materialens ljusreflektansvärde (LRV), nyanser, ytfukt, färg, ytstrukturer samt ålder har en påverkan på mätresultatet.

De mönster och samband som går att antyda är att material med ett högre ljusreflektansvärde får generellt en högre intensitet från mätresultaten, olika nyanser skapar även varierande intensitetskurvor, där ljusa nyanser ger högre intensitetsvärden och mörkare nyanser ger lägre. På grund av de spektrala egenskaper vatten orsakar på olika ytor ingår även ytfukt som en faktor som påverkar mätresultaten, där fuktiga ytor genomgående visar på lägre spektralintensitet än torra ytor. Vid testet om ytfukt framgår det även hur materialens porositet påverkar resultaten där bland annat torrt tegel med luftfyllda porer visade sig skapa en diffus spridning av ljuset vilket höjer intensiteten.

Andra avvikande resultat visade även att smutsiga ytor minskar intensiteten på grund av ökat absorberat ljus, medan den yttre faktorn belysningsförhållanden inte visade ändra intensiteten hos ett material. Bland de material som undersöktes hade många ett ytskikt med färg som målats tunt samt tjockt, vilket visades ha en stor påverkan på NIR-spektrometern. Den tjocka färgen visade sig fungera som optisk barriär som redan vid ytan reflekterade stora delar av det infallande ljuset vilket gav en ökad intensitet. Hos framför allt tegel och betong gav porositeten upphov till att ljuset enklare absorberades vilket tydligt utmärkte sig i jämförelser mellan tunn och tjock färg av olika nyanser, då det underliggande teglet hos den tunna färgen av ljusare nyans förväntades ge högre intensitet, men på grund av den tunna färgen absorberades mer ljus av materialet, vilket istället gav motsatt resultat.

Andra ytstrukturer som hade stor påverkan på resultatet var hur slät och grov ytan kändes. Resultaten visade på en viss spridning där det enbart i stora drag gick att urskilja grova ytor från släta då andra faktorer som nämnts ovan skapat en ovisshet i resultatet. Det som däremot kunde avläsas var hur de grövre ytorna uppgav högre intensitet medan de släta i stora drag visades något lägre. De mönster och samband som analyserats skapar förutsättningar för att studera byggnadsmaterialens spektrala egenskaper för att vidare kunna särskilja olika materialtyper från varandra samt variationer av samma material.

6.3 Bedömning av datapaketets användningsförmåga

Trots att resultat som givits i vissa fall har varit svårtolkade där intensitetskurvor visat på andra resultat än vad som var väntat, har datainsamlingsmetoden visat sig tillräcklig för att hantera variationerna och ge viktiga jämförelser för att bidra med insamlingen av ett datapaket vilket gör mätverktyget användbart samt tillförlitligt för att vidare kunna identifiera material i framtiden. Fler mätningar skulle självklart ha bidragit till mer tillförlitliga värden, men med de mätningarna som gjordes är det möjligt att använda NIR-spektrometer som ett tillförlitligt verktyg för att sortera återbrukbart byggnadsmaterial, vilket är ett viktigt och stort steg mot mer effektiva och hållbara materialflöden inom byggsektorn.

Genom att kunna identifiera materialens sammansättning och skick, kan byggnadselement enklare sorteras och möjligtvis återvinnas som en ny funktion, eller återanvändas i nya byggprojekt som bärverk eller stomkomponent. Det här är mycket relevant i arbetet mot en mer cirkulär byggnadsindustri, där en ökad materialåtervinning och återanvändning är centralt för att minska både resursutvinning, resursanvändning och klimatpåverkan. Studien som genomförts visar att spektroskopiska metoder, tillsammans med en genomtänkt datainsamlingsmetod, kan vara till stor nytta i omställningen mot en hållbar utveckling.

Källförteckning

- [1] Go Smart Bricks. (2019) Construction waste: Sources, types its impact on the environment. Hämtad: 11 maj 2025. [Online]. Available: <https://gosmartbricks.com/construction-waste/>
- [2] World-Architects. (2022) Reusing brick modules. Hämtad: 2025-05-13. [Online]. Available: <https://www.world-architects.com/en/architecture-news/products/reusing-brick-modules>
- [3] Ramboll. (2023) The case for re-using concrete. Hämtad: 13 maj 2025. [Online]. Available: <https://www.ramboll.com/insights/decarbonise-for-net-zero/the-case-for-re-using-concrete>
- [4] Syddansk Universitet. (2023) Sustainability in practice: Direct reuse of structural timber. Hämtad: 2025-05-13. [Online]. Available: <https://www.sdu.dk/en/forskning/sducivilengineering/researchprojects/sustainability-in-practice-direct-reuse-of-structural-timber>
- [5] I. Stratio, “Linksquare products,” 2025, hämtad: 16 april 2025. [Online]. Available: <https://linksquare.io/products.html>
- [6] —, “Linksquare nir spectrometer,” <https://www.stratiotechnology.com/linksquare>, hämtad: 16 april 2025.
- [7] P. Fröst, P. Härle, N. Strufe, C. Thormark, and M. Topping, “Handbok för återvinnare,” *Institutionen för byggnadskonstruktionslära*, vol. 1, no. 1, pp. 40–44, 1995, hämtad: 20 mars 2025.
- [8] J. Jansson, “Ai-skanning ska förenkla återbruk av byggnader,” Online, 2024, hämtad: 14 april 2025. [Online]. Available: <https://www.tidningenbyggmaterial.se/teknik/e/3241/ai-skanning-ska-forenkla-aterbruk-av-byggnader>
- [9] R. Ilehag, A. Schenk, Y. Huang, and S. Hinz, “Klum: An urban vnir and swir spectral library consisting of building materials,” Online, 2019, hämtad: 15 april 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/18/2149>
- [10] Boverket, “Avfall,” 2025, hämtad: 2025-04-27. [Online]. Available: <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/avfall/>

- [11] Svensk Betong, “Vägledning klimatförbättrad betong – utgåva 2022,” 2022, trafikverket, Publikation 2022:0740. [Online]. Available: https://fudinfo.trafikverket.se/fudinfoexternwebb/Publikationer/Publikationer_007301_007400/Publikation_007400/svensk-betong-vagledning-klimatforbattrad-betong-utgava-2022-webb.pdf
- [12] S. Trä, “Träbyggsystemen i byggprocessen,” 2025, hämtad: 27 april 2025. [Online]. Available: <https://www.svenskttra.se/bygg-med-tra/byggande/bygga-i-tra/trabyggsystemen-i-byggprocessen/>
- [13] F. Karlsson, “Industriellt framställt tegel – om en försvunnen industri och dess antikvariska konsekvenser,” 2023, handledare: Sven Olof Ahlberg. [Online]. Available: <https://gupea.ub.gu.se/bitstream/handle/2077/79119/2023-15%20Frida%20Karlsson.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [14] J.-O. Sperle, L. Hallberg, M. Almemark, L.-G. Lindfors, G. Andersson, Ekdahl, J. Larsson, B. Johansson, H. Johansson, C. Kaplin, and E. Schedin, “Miljövärdering av stål och stålkonstruktioner,” 2013, utgiven med stöd av Mistra. [Online]. Available: https://www.jernkontoret.se/globalassets/publicerat/handbocker/stalkretsloppet_slutrapport_miljohandbok_svensk_web.pdf
- [15] Boverket, “Uppdrag att främja en cirkulär ekonomi i bygg- och fastighetssektorn,” Boverket, Karlskrona, Tech. Rep. 2024:26, 2024, slutrapport, Diarienummer: 1143/2022. [Online]. Available: <https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2024/uppdrag-att-framja-en-cirkular-ekonomi-i-bygg--och-fastighetssektorn.pdf>
- [16] Svenskt Trä, “Stomme,” 2025, hämtad: 2025-04-27. [Online]. Available: <https://www.traguiden.se/konstruktion/konstruktiv-utformning/stomme/>
- [17] TräGuiden, “Väggar,” 2025, hämtad: 11 maj 2025. [Online]. Available: <https://www.traguiden.se/konstruktion/konstruktionsexempel/vaggar/>
- [18] J. Morton, B. MacDonald, P. Astle, K. Bajars, and S. Brookes, “Design för demontering: framtidssäkra byggnadsbeståndet,” 2023, hämtad: 2025-04-27. [Online]. Available: <https://www.ramboll.com/sv-se/insikter/avkarbonisera-for-nettonollutslapp/design-for-demontering-framtidsakra-byggnadsbestandet>
- [19] Boverket, “Återbruk av byggprodukter,” 2024, hämtad: 27 april 2025. [Online]. Available: <https://www.boverket.se/sv/byggande/cirkular-ekonomi/cirkulara-byggnader/aterbruk/byggprodukter/>
- [20] —, “Återbruk av bärverksdelar,” 2024, hämtad 2025-04-30. [Online]. Available: <https://www.boverket.se/sv/byggande/cirkular-ekonomi/vagledning/barverksdelar/>
- [21] RISE, “Återbrukad betong bygger framtidens städer,” 2024, hämtad 2025-04-27. [Online]. Available: <https://www.ri.se/sv/aterbrukad-betong->

- bygger-framtidens-stader
- [22] Boverket, “Återbruksprocessen,” 2023, hämtad 2025-04-29. [Online]. Available: <https://www.boverket.se/sv/byggande/cirkular-ekonomi/vagledning/barverksdelar/aterbruksprocessen/>
 - [23] L. Lundin and W. Persson, “Återbruk av tegel,” Karlstads universitet, Tech. Rep. 1, 2023, intern rapport.
 - [24] J. N. Pacheco, J. de Brito, and M. L. Tornaghi, “Use of recycled aggregates in concrete: opportunities for upscaling in europe,” European Union, Tech. Rep. 1, 2023, hämtad: 26 mars 2025.
 - [25] “Betong – användning av ss-en 206:2013+a2:2021 i sverige,” Svenska Institutet för Standarder, Tech. Rep. SS-EN 206:2013+A2:2021, 2024, tillgänglig via SIS.
 - [26] “Virkeskvalitet,” Svenskt Trä, Tech. Rep., 2025, hämtad: 25 mars 2025. [Online]. Available: <https://www.svenskttra.se/trafakta/allmant-om-tra/kvalitet-och-sortiment/>
 - [27] Boverket, “Dokumentationssystem för byggprodukter,” Online, 2018, hämtad: 1 mars 2025. [Online]. Available: <https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2018/dokumentationssystem-for-byggprodukter.pdf>
 - [28] LinkSquare, “LinkSquare NIR Spectrometer Specifications,” Online, 2024, hämtad: 28 februari 2025. [Online]. Available: <https://linksquare.io/assets/linksquare-nir-specs.pdf>
 - [29] D. A. Skoog, F. J. Holler, and S. R. Crouch, *Principles of Instrumental Analysis*, 7th ed. Cengage Learning, 2017, hämtad: 16 april 2025.
 - [30] Datacolor, “Factors affecting spectrometer accuracy,” 2024, hämtad: 16 april 2025. [Online]. Available: <https://www.datacolor.com/resources/factors-affecting-spectrometer-accuracy>
 - [31] R. Patel and B. Davidson, *Forskningsmetodikens grunder: att planera, genomföra och rapportera en undersökning*, 5th ed. Lund: Studentlitteratur, 2019, hämtad: 15 april 2025.
 - [32] S. McLeod, “Reliability in psychology research: Definitions & examples,” 2023, hämtad: 15 april 2025. [Online]. Available: <https://www.simplypsychology.org/reliability.html>
 - [33] Gustafs Scandinavia AB, “Light reflectance values (lrv) of wood veneers,” 2023, hämtad: 30 april 2025. [Online]. Available: <https://gustafs.com/knowledge-hub/surfaces/ligt-reflection-values/>
 - [34] L. Hultberg, “Tegeldetaljer med teglets materialitet som utgångspunkt,” Examensarbete, Lunds Tekniska Högskola, Lunds universitet, 2015, hämtad: 29 april 2025. [Online]. Available: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=7443905&fileId=7443957>

- [35] S. Betong, “Betongkvalitet och exponeringsklass – bjälklag i flerbostadshus,” 2024, hämtad: 30 april 2025. [Online]. Available: <https://www.svenskbetong.se/om-betong/platsgjutet/statik/flerbostadshus/bjalklag/betongkvalitet-och-exponeringsklass>
- [36] A. Hellström. Fråga experten: Infärgning av betong? Hämtad: 5 maj 2025. [Online]. Available: https://betongforeningen.se/fraga_experten/fraga-experten-infargning-av-betong-2/
- [37] C. Nolet, A. Poortinga, P. Roosjen, H. Bartholomeus, and G. Ruessink, “Measuring and modeling the effect of surface moisture on the spectral reflectance of coastal beach sand,” *PLOS ONE*, 2014, hämtad: 28 april 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112151>
- [38] J. Clevers and L. Kooistra, “Using hyperspectral remote sensing data for retrieving canopy water content,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 10, no. 3, 2008, hämtad: 18 april 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0303243408000317>
- [39] P. J. Curran, “Remote sensing of foliar chemistry,” *Remote Sensing of Environment*, pp. 271–278, 1989, hämtad: 28 april 2025.
- [40] PhysicsOpenLab. (2021) Reflectance spectroscopy – colorimetry. Hämtad: 16 april 2025. [Online]. Available: <https://physicsopenlab.org/2021/07/03/reflectance-spectroscopy-colorimetry/>
- [41] R. F. Kokaly and R. N. Clark, “Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis,” 1999, hämtad: 27 april 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425798000790?via%3Dihub>
- [42] E. Hecht, *Optics*, 5th ed. Pearson, 2017, hämtad: 30 april 2025.
- [43] F. E. Nicodemus, J. C. Richmond, J. J. Hsia, I. W. Ginsberg, and T. Limperis, *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*, ser. NIST Monograph. Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1977, vol. 160, hämtad: 30 april 2025.
- [44] J. Workman and L. Weyer, *Practical Guide and Spectral Atlas for Interpretive Near-Infrared Spectroscopy*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012, hämtad: 30 april 2025.
- [45] I. Werner, *Byggmateriallära*. Lund, Sverige: Studentlitteratur, 2014, hämtad: 3 maj 2025.
- [46] Boverket, “Bygg för framtiden – trender inom byggmaterial,” Boverket, Karlskrona, Sverige, Rapport 2020:5, 2020, hämtad: 5 maj 2025.
- [47] B. Fitzner, K. Heinrichs, and D. La Bouchardiere, “Weathering damage on stone monuments,” *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, 1997, hämtad: 9 maj 2025.

- [48] W. J. R. Curtis, *Modern Architecture Since 1900*, 3rd ed. London: Phaidon Press, 1996, hämtad: 9 maj 2025.
- [49] K. Frampton, *Modern Architecture: A Critical History*, 3rd ed. London: Thames & Hudson, 1992, hämtad: 11 maj 2025.

