



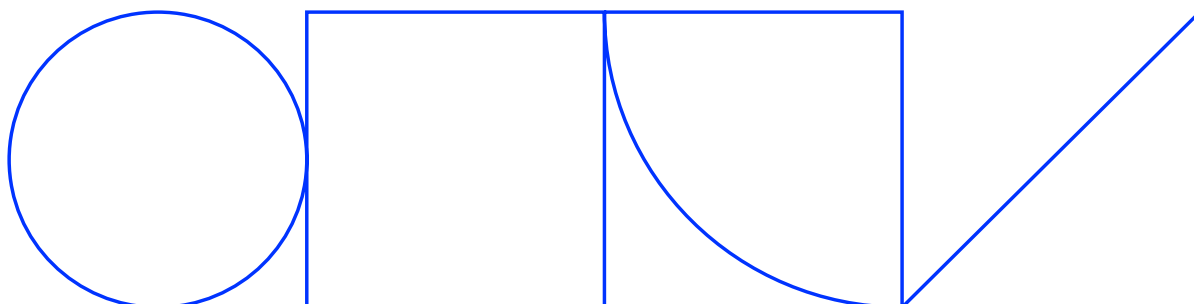
PROJEKTNR. 13962

Bestämning av stenmaterials ljushet

Paulina Johansson
Skanska Sverige AB

2024-02-28

SKANSKA



Förord

Detta branschgemensamma projekt har finansierats av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF). Projektet har varit en del i öka branschens kunskapsnivå om stenmaterials ljushet samt för att ta fram numeriska underlag för stenmateriallets ljushet.

Paulina Johansson, Skanska, har varit projektledare och textförfattare för denna rapport. Lars Stenlid, Skanska, har under projektets gång ansvarat för urval av material samt bearbetning av dessa material i laboratoriemiljö.

Ett varmast tack till Björka Mineral AB, numer Nordkalk, för engagemang och givande diskussioner. Utan er hjälp hade projektet aldrig blivit realitet.

Ett tack riktas även till projektets referensgrupp:

Berne Nielsen, Ramboll
Carina Fors, VTI
Henrik Arnerdal, Trafikverket
Kenneth Vikström, NCC
Kenneth Olsson, Skanska
Lars Jansson, Peab
Åsa Wahlberg, Peab

Paulina Johansson

Stockholm, februari 2024

Sammanfattning

Vid upphandlingar av asfaltbeläggning finns ett antal kravspecifikationer som måste tas hänsyn till och i vissa fall förekommer krav på ballastens ljushet. När krav avseende beläggningsens ljushet finns är ofta enda kravet att det ska vara en ljus sten av typen kvartsit, detta då vanligtvis kombinerat med krav på mekaniska egenskaper på asfaltballasten (nötningsmotstånd och motstånd mot fragmentering). För att verifiera vinnande anbudsgivares ljusa sten i vägbeläggningar görs oftast bara en okulärbesiktning av stenmaterialets ljushet. Numeriska gränsvärden finns ibland i form av QD-krav på färdig beläggning. Numeriska gränsvärden för ingående materials ljushet saknas däremot i dagsläget.

Syftet med detta projekt har därför varit att öka branschens kunskapsnivå om stenmaterials ljushet samt ta fram numeriska underlag för stenmaterialets ljushet. Genom att precisera gränsvärden skapas tydligare spelregler för såväl entreprenörer som beställare vid upphandling.

För att öka kunskapsnivån om stenmaterials ljushet genomfördes en kortare litteraturstudie samt ett flertal experimentella försök på stenmaterial från såväl täkter som från befintliga beläggningar.

De experimentella försöken har baserats på material från åtta täkter samt från sex mätpunkter på befintliga beläggningar från Norra och Södra länken, i Stockholms tunnelnät. Slutligen genomfördes tre mixförsök för att utreda ljushetsvärdets och färgnyansens påverkan vid olika blandningsförfaranden.

Resultatet av de experimentella försöken visade på att ett bergmaterials ljushetsvärde förändras logaritmiskt, med höga ljushetsvärden för finkornigt material och en utplaning vid en fraktionsstorlek på 1–2 mm. Stenmaterialets färgnyans var däremot konstant oberoende av fraktionsstorlek. Resultatet visade även på att materialets ljushetsvärde ej beror av dess färgnyans, vilket medför att en kravställning för ljusa vägbeläggningar inte bör innehålla kravspecifikationer för både ljushet och färgnyans.

Vidare visade resultatet på att fler bergarter än kvartsit uppnår goda ljushetsvärden och även mörka material kan användas för att uppnå ljusa vägbeläggningar. Det bör därmed inte finnas något hinder för att blanda bergmaterial med olika bergarter till beläggningar med ljushetskrav, förutsatt att de möter det numeriska gränsvärdet för ljushet. Det skulle gagna hela branschen att öppna upp för användning av andra bergarter än kvartsit, vilket också skulle bidra till positiva effekter för klimat och miljö genom kortare transporter och en bättre resurshushållning.

Slutsats

Ljushet och vithet är inte samma sak. Det är viktigt att rätta och rimliga krav ställs på ballast och bergmaterial.


Innehållsförteckning

1	Bakgrund	4
2	Syfte	6
3	Litteraturstudie	7
3.1	Begrepp och mätsystem	7
3.2	Materialets omgivande förhållanden.....	9
3.3	Solinstrålning och vägbeläggnings reflektionsförmåga.....	11
4	Metod	16
4.1	Arbetsgång	16
4.2	Analysmetod.....	22
5	Utförda undersökningar	24
5.1	Delsteg 1 – Påverkan vid olika fraktioner.....	24
5.2	Delsteg 2 – Material från täkter.....	30
5.3	Delsteg 3 - Befintliga beläggningar	39
5.4	Delsteg 4. Numeriska riktvärden för ljushet	44
5.5	Delsteg 5. Blandningar med kvartsit som bas.....	49
5.6	Delsteg 6. Blandningar ej innehållande kvartsit	54
5.7	Delsteg 7. Blandning med kvartsdiorit som bas.....	59
6	Summering och slutsatser	65
7	Litteraturförteckning	68
8	Bilagor	69
8.1	Borrtagningsplan Norra och Södra länken.....	69

1 Bakgrund

Vid upphandlingar av asfaltbeläggning finns ett antal kravspecifikationer som måste tas hänsyn till och i vissa fall förekommer krav på ballastens ljushet. När krav avseende beläggningsens ljushet finns är ofta enda kravet att det ska vara en ljus sten av typen kvartsit, se Figur 1.1, detta då vanligtvis kombinerat med krav på mekaniska egenskaper på asfaltballasten (nötningssmotstånd och motstånd mot fragmentering).

För att verifiera vinnande anbudsgivares ljusa sten i vägbeläggningar görs oftast bara en okulärbesiktning av stenmaterialets ljushet. Numeriska gränsvärden finns ibland i form av QD-krav på färdig beläggning. Numeriska gränsvärden för ingående materials ljushet saknas däremot i dagsläget.

 TRAFIKVERKET	
DCC.1412	Slitlager kategori A av stenrik asfaltbetong
	ABS16 PMB 45/80-55, kkv \leq 6, ljus sten typ Kvartsit
	LA-värde \leq 20,

Figur 1.1. Utdrag från ett förfrågningsunderlag från Trafikverket där ett ljushetskrav ingår.

Trafikverket uppger att det finns ljushetskrav för beläggningar i tunnlar som del i att skapa en visuell upplevelse av en ljus och trygg miljö för trafikanter. Trafikverket uppger även att ljusa beläggningar medför att mindre belysning behövs i tunnlarna tack vare dess reflekterande förmåga. Det saknas dock undersökningar av vägbeläggningars ljushet i svensk kontext och de studier som finns fokuserar ofta på belysningsförhållanden. Nielsen (2020), som undersökte vägbeläggningars reflektionsförmåga, fann att gränsen mellan ljus och mörk beläggning inte är klart definierad samtidigt som stenmaterialet ofta innehåller en mix av flera bergarter med skiftande ljushet och kulör.

Andra branscher, som exempelvis kalkindustrin, arbetar redan med strikta krav på ljushet. Under ett studiebesök hos en kalkproducent uppgavs att ljusheten mättes genom att analysera packat finkornigt material i en spektrometer, se Figur 1.2. Genom att analysera malet stenmaterial menade företaget att stenmaterialets hela färgskiftningar och kulörer kunde tas i beaktande vid verifiering.



Figur 1.2. Instampningsform för stenmaterial som används vid ljushetsmätningar i laborationsmiljö.

Eftersom numeriska gränsvärden på ingående material saknas är det svårt att på förhand veta om ett material är tillräckligt ljusst. Att få kunskap om stenmaterialets ljushet möjliggör för entreprenörer och beställare att redan innan utläggning erhålla information om beläggningens kommande ljushet. På så sätt minskar risken för viten, merarbete och eventuella omläggningar som kan bli realitet om färdig beläggning uppvisar för låga ljushetsvärden vid kontroll.

Ur ett större perspektiv medför ljushetskunskapen att onödiga långväga transporter av ballastmaterial och utvinning av specifika ändliga resurser kan minska, vilket bidrar till lägre klimatbelastning och bättre resurshushållning.

2 Syfte

Projektet syftar till att öka branschens kunskapsnivå, samt ta fram numeriska underlag för stenmaterialets ljushet för att säkerställa att upphandling med ljushetskrav baseras på rättvisande underlag.

Projektet innefattar ej vägytemätningar utan avgränsas till att endast granska stenmaterialet från borrhärnor och stenmaterial från olika täkter.

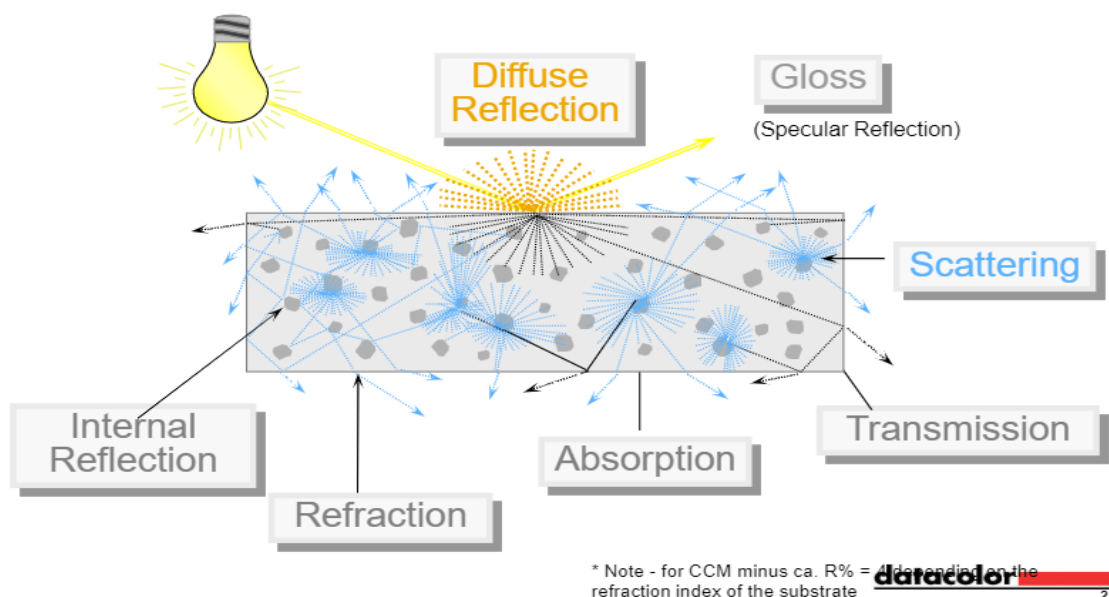
3 Litteraturstudie

Nedanstående litteraturstudie behandlar ljushet baserat på tre områden. Först definieras viktiga begrepp och mätsystem. Därefter behandlas påverkansfaktorer utifrån materialets omgivande förhållanden. Slutligen behandlas ljushet i en större kontext, där solinstrålning och vägens reflektionsförmåga granskas.

3.1 Begrepp och mätsystem

Ett materials utseende beror på dess färg och dess textur. **Ljushet** avser den reflekterande förmågan i ett material medan **vithet** avser den mänskliga uppfattningen av "vithet", det vill säga de optiska egenskaperna och den färgnyans materialet har. **Färg** är summan av alla reflektioner. (Datacolor, 2014)

Luminans är ett objektivt, fysikaliskt begrepp för hur ljus en yta är och avser en ytas ljusstyrka per ytenhet i en specifik riktning. Luminans är därmed en samverkan mellan den infallande ljusstrålningen, ytans färegenskaper och reflektionsegenskaper, se Figur 3.1, och kan kallas "det studsande ljuset". Det är det mänskliga ögats upplevda uppfattning om hur ljus en yta är och är det enda ljustekniska begrepp människan ser. Luminansfaktorn påverkas av illuminanter, illuminansens riktning och den riktning människan ser från (Wright, 1964). Luminansskillnader går att mäta, men luminansmätaren är färgblind och tar inte hänsyn till ytans färegenskaper.

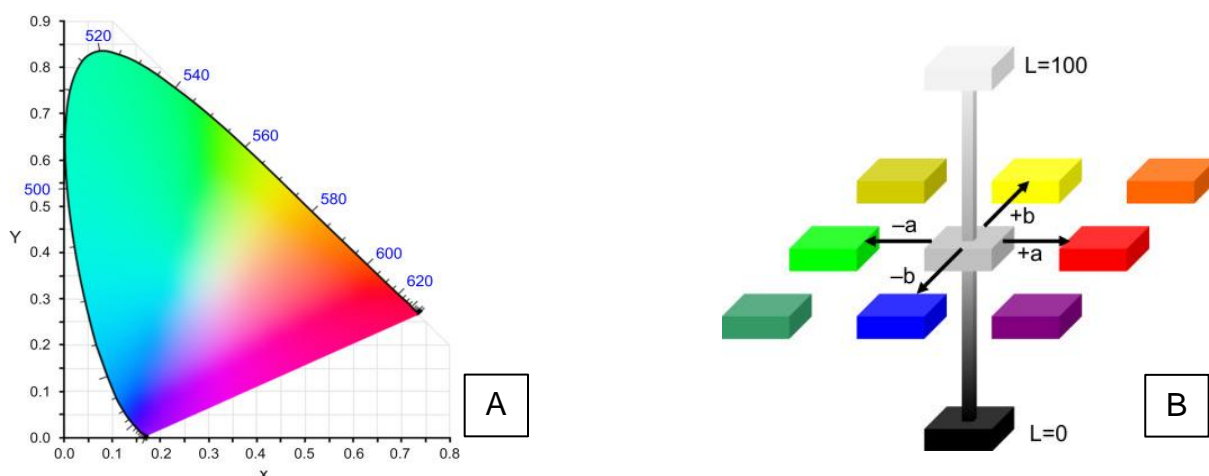


Figur 3.1. Materialets utseende beror på flera inneboende faktorer (källa: Datacolor, 2014).

Luminans kan delas in i **relativ luminans** respektive **absolut luminans**. Absolut luminans mäts i enheten cd/m², medan relativ luminans representerar värden som är normaliserade mot en perfekt vit yta (100). Användningen av relativa värden är användbar vid beräkning av färg- och utseendemodeller som beskriver den mänskliga uppfattningen av ljushet och vithet.

Luminansen, eller det studsande ljuset, beror även på materialets egenskaper. För att göra en asfaltbeläggning mer reflekterande ändras framför allt två parametrar: ljusheten på beläggningen respektive dess yttextur (Santamouris, 2013). Demir (2020) menar exempelvis att strukturen och den geometriska formen på ballasten är avgörande för materialets diffusa egenskaper, och därmed den totala asfaltbeläggningens reflektionsförmåga. Vidare menade Demir (2020) att det fanns större sannolikhet att en vitare ballast kan blända trafikanter än ett mörkare stenmaterial samt att det finns ett samband mellan diffus reflektion och ljushet i huruvida en asfaltbeläggning kan uppfylla anti-reflektionskriterier. För att uppfylla dessa kriterier förordades att materialet skulle ha en låg speglade effekt, där ljuset reflekteras i flera riktningar. Detta till skillnad mot en hög speglade effekt där ljuset fokuseras i en punkt och riskerar att bli bländande. Genom att kombinera de diffusa egenskaperna med luminansfaktorn, och försöka maximera båda parametrarna, ansågs bästa möjliga förutsättningar för vägens trafikanter uppnås.

Det finns flera system att använda sig av för att beräkna ett materials utseende. CIE (Commission Internationale de l'Éclairage, sv. Internationella kommissionen för belysning eller Internationella belysningskommissionen) utvecklade år 1931 ett system för hur färger utifrån reflekterat ljus ska specificeras. Detta kallas CIE XYZ och är föregångaren till det system som numera oftast används (CIE Lab). I Figur 3.2A och 3.2B visualiseras materialets utseende baserat på CIE XYZ och CIE Lab.



Figur 3.2. Specifikation enligt CIE XYZ till vänster (A) och enligt CIE Lab till höger (B).

I CIE:s XYZ-färgsystem delas konceptet "färg" in i två delar; ljushet och kromaticitet. Kromaticitet specificerar färgen oberoende av dess ljushet med hjälp av två oberoende parametrar där den ena är kulörtonen och den andra ett mått på färgens kulörta intensitet. Ljusheten och kromaticitet bildar tillsammans ett tredimensionellt rum som ska representera alla färgsensationer som är synliga för det mänskliga ögat. Det mänskliga ögat kan urskilja våglängder mellan 380 – 700 nm.

CIE Lab är en utveckling av föregångaren CIE XYZ och förbättrar enhetligheten av mätvärdena från den tidigare metoden. Detta system involverar en icke-linjär kubisk transformering av tristimulusvärdena X, Y och Z (Dieste, 2002). I CIE Lab mäts färgnyans och ljushet i nedanstående parametrar:

- L*: Mätning ljus/mörk. Anger luminans (%)
- a*: Mätning grön (-) /röd (+)
- b*: Mätning blå (-) /gul (+)

Luminansfaktorn (L*) baseras på en skala mellan 0 till 100, där absolut svart uppnår värdet 0 och absolut vit motsvarar 100.

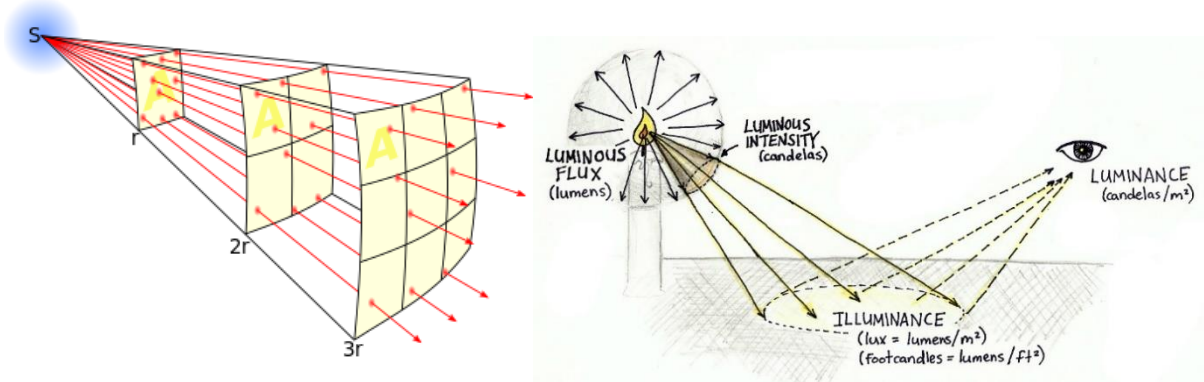
ISO-standard för mätning av ljushet sker däremot i R457, vilket indikerar hur mycket ljus som reflekteras vid en våglängd på $457 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$ vid en perfekt reflekterad och diffus yta. (Bl.a. Dieste, 2002)

Den **diffusa reflektionen** mäts med hjälp av **tristimulusfiltrena** Rx, Ry och Rz, vilka motsvarar röd, grön och blåa våglängder. Tristimulusvärdena går även att använda för att ta reda på kromatisk information i dimensionerna x,y,z (Stimson, 1974).

3.2 Materialets omgivande förhållanden

Stenmaterialets utseende, och i sin tur vägbeläggningens utseende, påverkas av dess omgivning. Exempelvis spelar fuktnärvaro, belysningsförhållanden, skuggförekomst och närliggande bebyggelse en avgörande roll.

Ljus följer den inversa kvadratlagen, Figur 3.3A, i vilken den fysikaliska kvantiteten är omvänt proportionell mot kvadraten på avståndet från källan. Matematiskt kan den inversa kvadratlagen skrivas som: $I \propto \frac{1}{A^2}$, där I är intensiteten och A är avståndet från källan. Detta innebär att ju mindre ljus som faller på en yta och ju mörkare ytan är, desto mindre ljus reflekteras, Figur 3.3B.



Figur 3.3A. Ljus följer den inversa kvadratlagen. Figur 3.3B. Flera parametrar spelar in i hur ljus ett material anses. Ju längre bort från ljuskällan reflektionen sker, desto mindre ljus reflekteras.

Ljusflöde (enhet lumen): Det totala ljuset som avges av en ljuskälla i alla riktningar. Lumen är en bra enhet för att jämföra hur ljus en ljuskälla är.

Ljusstyrka (enhet Candela): Mängden ljus som sänds ut i en viss riktning.

Illuminans/belysningsstyrka (enhet lux=lumen/m²): Mängden ljus som faller på en yta. Mätning av detta görs ofta vid reglering av belysning samt optimering av visuell komfort. Detta värde är inte beroende av materialegenskaperna hos den yta som belyses. Dock beror mängden ljus som ytan kan uppfatta på hur mycket som reflekterats från omgivande ytor. Därmed beror uppmätta värden på analyserat material även på omgivande ytors materials färger, textur och reflekterande förmåga.

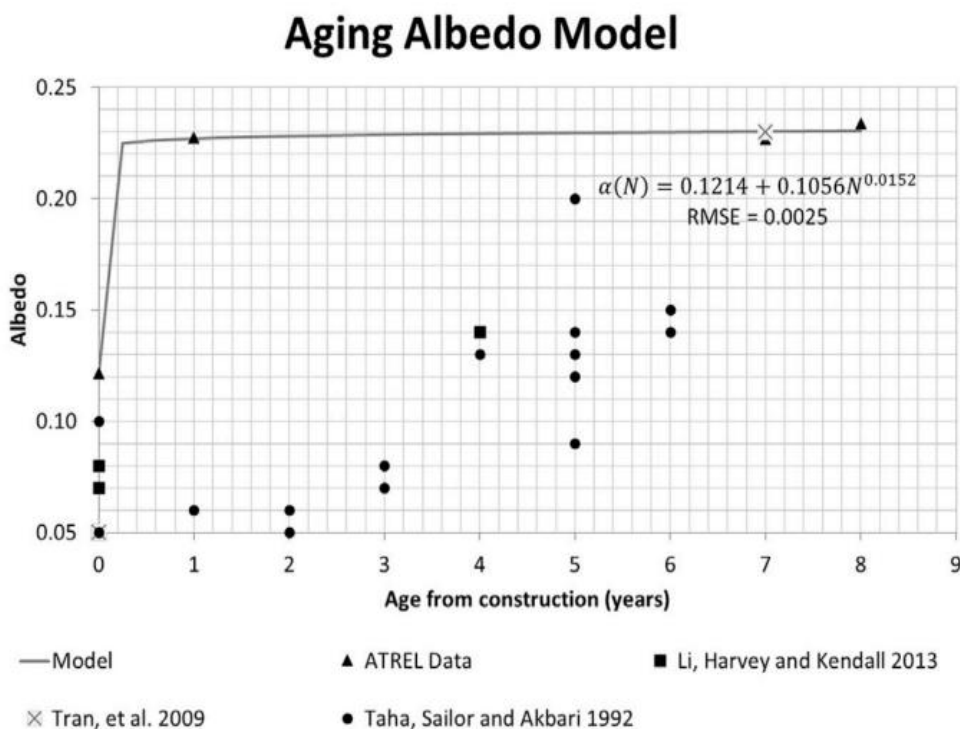
En av eventuella fördelar med en reflekterande vägbeläggning är den potentiella energibesparingen som kan göras för vägbelysning (Santamouris, 2013). Ter Huerne et al. (2014) från Demir (2020) menar på att energibehovet kan minskas med upp till 40 % för vägbelysningen. Den precisa relationen mellan ballastens egenskaper och den potentiell energibesparingen är dock inte helt klarlagt. Litteraturen påvisar inget entydigt svar, dock indikeras att ballastens luminansfaktor och materialets diffusa egenskaper spelar en potentiellt stor roll för energibesparingar avseende vägbelysning (Demir, 2020). Demir (2020) förordar därmed ballast med en så hög luminansfaktor och så hög diffushet som möjligt för att nå högsta potentiella energibesparing samtidigt som vägens synlighet bibehålls.

3.3 Solinstrålning och vägbelägningars reflektionsförmåga

I ett större perspektiv hänger materials reflektionsförmåga och vår uppfattning av färg ihop med strålningsbalans. Solen sänder ut strålning med hög frekvens i olika våglängder. Det mesta av denna strålning ligger inom ett begränsat intervall kortvågig strålning, som vi uppfattar som synligt ljus. En viss våglängd ger upphov till en viss färg och i vitt ljus hittar vi en skala av alla färger. Beroende på vilken del av det vita ljuset som absorberas eller reflekteras ser det mänskliga ögat olika färger.

Solen skickar också ut strålning med både högre frekvens och lägre frekvens än synligt ljus. Det kallas även kortvågig strålning och långvågig strålning. När de kortvågiga ljusstrålarna landar på ett fast föremål som en sten eller en väg värms föremålet upp. När det värms upp utstrålar föremålet långvågig strålning i form av värme. Stor del av den långvågiga strålning som jordytan utstrålar absorberas av atmosfären och sänds åter mot jordytan som långvågig tillbakastrålning. Det gör markytan varmare, ny strålning sänds ut i atmosfären och ny tillbakastrålning sker. Detta kallas i vardagligt tal för växthuseffekten.

All instrålning från solen omvandlas dock inte till värmande strålning, utan en del kommer att reflekteras direkt. Huruvida detta sker beror på underlagets ljushet. Ett vitt underlag kommer att reflektera strålarna utan att värma jordytan. I takt med att ytan blir mörkare absorberas mer och mer av instrålningen. Ljushet kopplas här till olika ytors **albedo**. Albedo är ett mått på reflektionsförmåga eller den andel av en kortvågig strålning som reflekteras från en belyst yta. Ett albedo på 1,00 betyder att allt ljus reflekteras och ett albedovärde på 0,00 betyder att inget ljus reflekteras. En nyasfalterad väg har vanligtvis ett albedo på mellan 0,04–0,06, vilket är överförbart med att 4–6% av solinstrålningen reflekteras (Li & Kendall, 2013; Taha et al., 1992) och ökar sedan till 0,09–0,18 i takt med att beläggningen åldras (Santamouris et al., 2011). Under beläggningens första år sker den absolut största förändringen av albedo, se Figur 3.4.



Figur 3.4. Belägningens albedo under en flerårsperiod. (Sushobhan & Roesler, 2016)

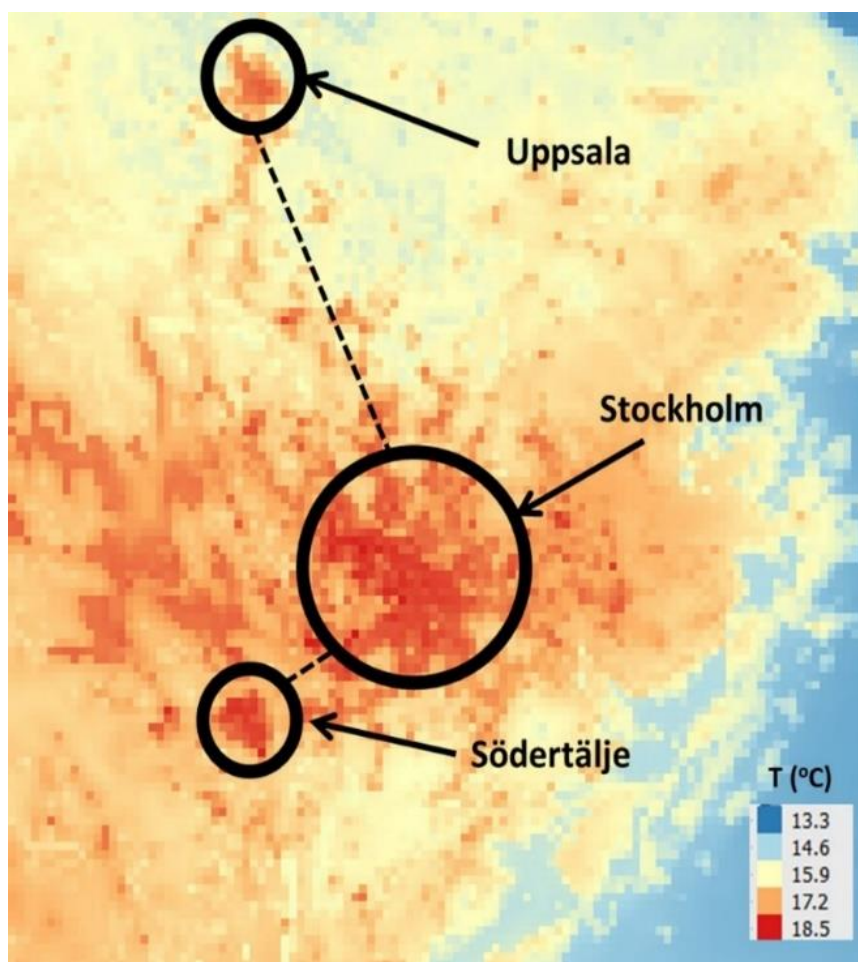
Bilder av infraröda och termiska aktiviteter från satelliter har visat att asfaltbeläggningar är en starkt bidragande källa till värmestrålning. Enligt Mohajerani et al. (2018) absorberar nylagd asfaltbeläggning cirka 95% av solinstrålningen, vilket ger ett albedo på 5%. Dock består solinstrålningen generellt av 43% solenergi, 52% nära infrarött ljus och 5% ultraviolett ljus och en signifikant andel av detta absorberas av asfaltens yta.

Yang et al. (2015) har samtidigt visat på att beläggningar med ett högre albedo, och högre reflektionsförmåga, kan ändra förutsättningarna i den omgivande miljön när instrålningen reflekteras mot närliggande objekt. Beroende på det närliggande objektets egna albedo kommer asfaltbelägningens reflektion antingen värma eller kyla objekt nära marknivå. Reflekterande beläggningar kommer dock endast att kyla det närliggande objektet om objektets egna albedo överstiger en kritisk gräns. Varje objekt har olika kritiska gränser, vilka måste ses över i varje specifika fall.

Material med ett högt albedo reflekterar mer av solinstrålningen och ändrar därmed jordens strålningsbalans. Exempelvis visar Yang et al. (2015) på att ökat albedo kan ha ett flertal oönskade effekter på bland annat det regionala hydroklimatet, människans termiska komfort och luftens kvalitet. Xu et al. (2020) menar därför att denna effekt bör medräknas i livscykelanalyser för varje platsspecifika objekt.

Vidare menar Yang et al. (2015) att temperaturen på en husvägg kan öka med mellan 2–5 °C vid lunchtid genom reflekterande energi från vägbeläggningar. Dessutom såg Yang et al. (2015) att betongvägar, som har ett högre albedo än asfaltbeläggningar, leder till högre husväggstemperaturer samt att husets våningsplan placerade närmast marknivå hade högre temperaturer än våningsplan högre upp. Vita hustak sågs även medföra högre inomhustemperaturer än mörka takbeläggningar utifrån liknande principer som vägbeläggningar. Baserat på detta föreslår Yang et al. (2015) att reflekterande material bör placeras på lodräta ytor och ej på horisontella ytor, såsom vägbeläggningar. Det bör dock beaktas att en ökning av albedot på vertikala ytor, som kan skapa en lokal temperatursänkning, kan orsaka en mer global uppvärmning.

Vägbeläggningars albedo och användningen av ljusa material kopplas även till **Urban heat island effect** (UHI-effekten, sv. Urban värmeö). UHI-effekten karakteriseras av högre urbana temperaturer i relation till temperaturer i närliggande mindre urbana miljöer samt temperaturer på landsbygd (Sushobhan & Roesler, 2016). Figur 3.5 redovisas en bild från SMHI över UHI-effekten i Stockholmsregionen.

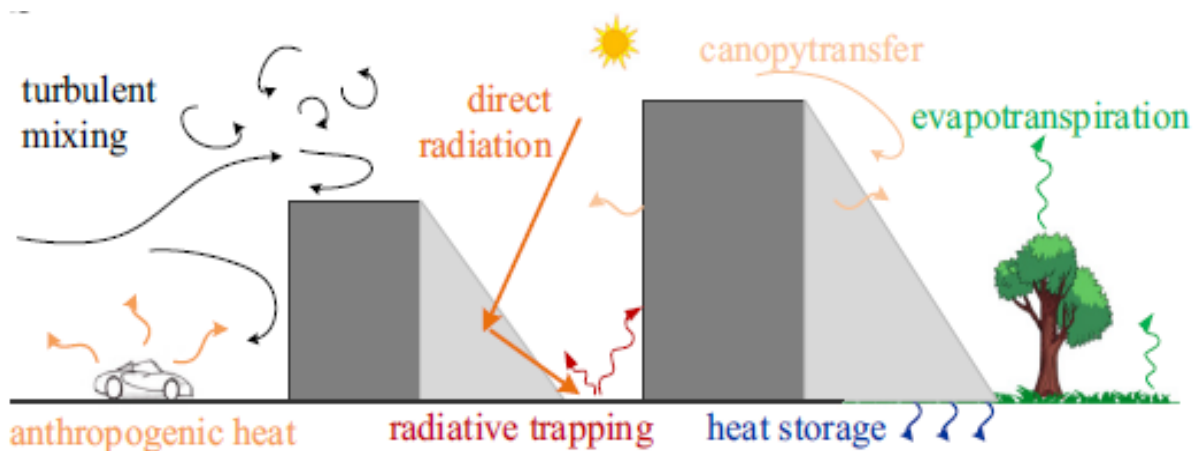


Figur 3.5. UHI-effektens utbredning i Stockholms-området. Bilden visualiserar medellufttemperaturen mellan 15 juni-15 juli 2014. (Källa: SMHI)

UHI-effekten kan höja lufttemperaturen i urbana miljöer mellan 5–15 °C (Mohajerani et al., 2018), där användningen av mänskligt skapade material samt ökade antropogena processer och produktioner anses vara huvudanledningen till värmeeffekten. Med antropogena processer eller effekter menas sådana som kan härledas från mänskliga aktiviteter, i motsats till fenomen som ägt eller äger rum i ett naturligt, av människan icke påverkat, tillstånd.

Generellt sett har ljusare material med en slätare yta ett högre albedo och reflekterar därmed mer av solens instrålning (Santamouris, 2013). Historiskt sett har den huvudsakliga åtgärden för att åtgärda UHI-effekten för asfaltbeläggningar varit att ersätta mörka material, med låga albedon, med ljusare material för att öka reflektionen från solens instrålning (Mohajerani et al., 2018). Den urbana miljöns utformning kan dock påverka hur väl reflekterande vägbeläggningar fungerar för att lindra UHI-effekten. Vägbeläggningens albedo bör därmed utvärderas för varje enskild stads och områdes förutsättningar. Dessutom har olika områden i en och samma stad olika förutsättningar och bör därmed ha olika vägbeläggningalbedon.

I stadsmiljöer förekommer även fenomenet **Urban Canyon**, se Figur 3.6, vilket är en beskrivande term för en vägmiljö som flankeras av byggnader, väggar och tak i en urban omgivning (Mohajerani et al., 2018). Detta får till följd att solinstrålningen kan fångas i stadsmiljön och att fler reflektioner kan skapas. Att öka vägbeläggningens albedo i en *Urban Canyon* kommer därför medföra att mer solinstrålning reflekteras i omgivande väggar, vilket kan få en negativ effekt med ökade lufttemperaturer. Vägbeläggningar med högre albedon kan alltså medföra ökade energikostnader på grund av ett ökat behov av nedkyllning. Akbari et al. (2001) från Mohajerani et al. (2018) visar att elförbrukningen ökade med 2–4 % för varje grads temperaturökning.



Figur 3.6. Urban Canyons har en tendens att absorbera mer solinstrålning samtidigt som den agerar som en reflektor. (Mohajerani et al., 2018)

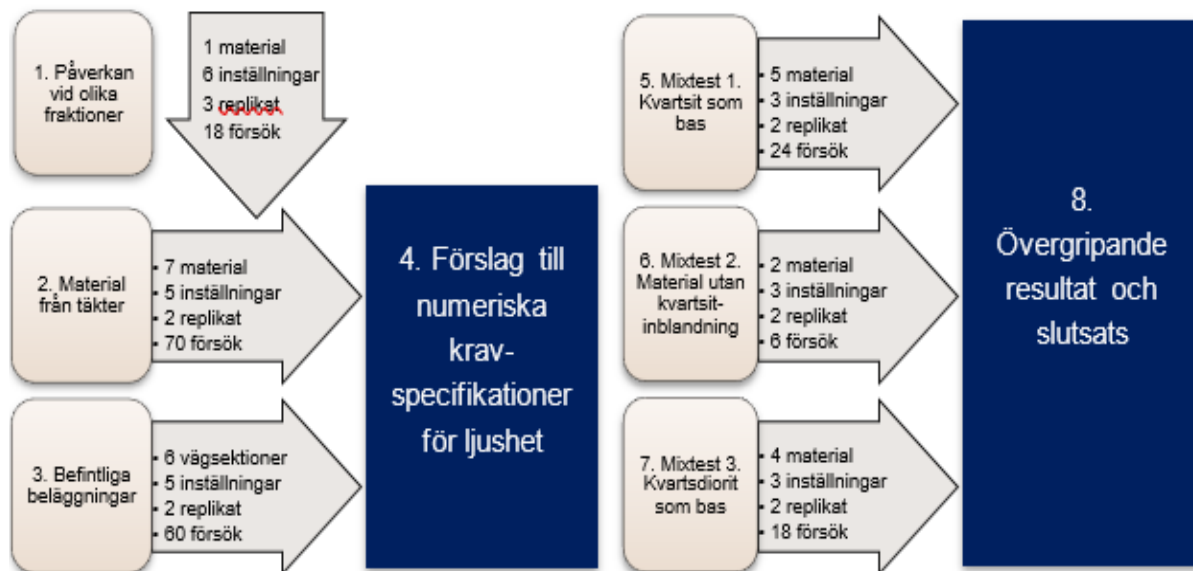
För att inte suboptimera behöver användningen av vägbeläggningar med ett högre albedo ske tillsammans med andra alternativ för att mildra värmeöarna. Vegetation på marknivå kombinerat med vägbeläggningar med högre reflektionsförmåga är ett effektivt sätt att mildra temperaturökningen (Yang et al., 2015). Gröna tak och väggar på närliggande infrastruktur kan också minimera återreflektion från ljusa vägbeläggningar, vilket även skulle förhindra ökad energikonsumtion i en urban canyon när reflektiva vägbeläggningar används.

4 Metod

I detta avsnitt redovisas arbetsgången i projektet samt vald analysmetod.

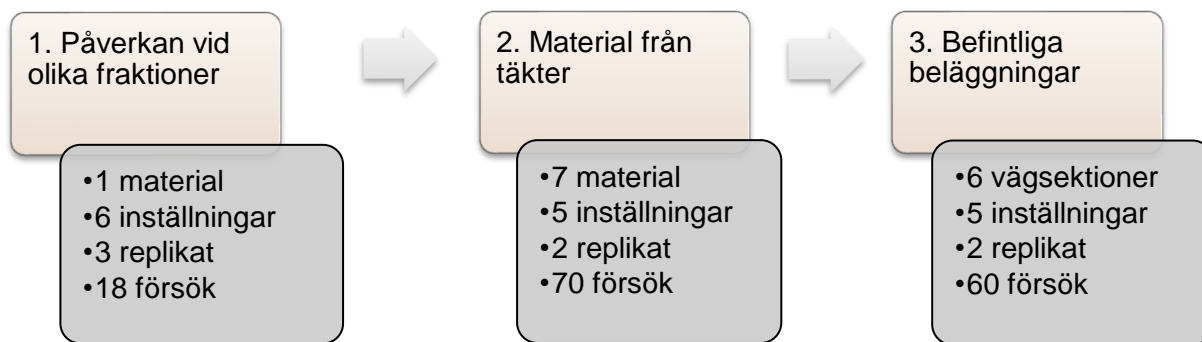
4.1 Arbetsgång

Projektet har genomförts i totalt åtta delsteg, se Figur 4.1, som tillsammans givit en kraftigt utökad kunskap om stenmaterials ljushet. Under respektive delsteg återfinns ett stycke med iakttagelser och slutsatser som ligger till grund för projektets efterföljande delsteg. Delsteg 4 behandlar förslag till numeriska ljushetsvärden och i delsteg 8 redovisas projektets övergripande resultat.



Figur 4.1. Arbetsgången i projektet skedde i åtta delsteg.

Under projektets inledande tre delsteg, se Figur 4.2, testades stenmaterial mellan fraktionerna $<0,063$ mm till 1–2 mm. Totalt genomfördes 148 försök i delsteg 1–3.



Figur 4.2. Projektets tre inledande delsteg undersökte ljushetsvärden och färgpåverkan för olika stenmaterial från täkter samt för stenmaterial i befintliga beläggningar. Totalt genomfördes 148 försök i den inledande fasen.

Delsteg 1 gjordes i syfte att identifiera hur stenmaterialets ljushet och färgnyans påverkas vid olika fraktionsstorlek samt för att undersöka mätmetodens repeterbarhet och reproducerbarhet.

Till delsteg 2 valdes ytterligare sju material ut för testning, se Figur 4.3 och Tabell 4.1. Valet av täkter gjordes utifrån att dels få ett så brett färgspektra representerat, dels att materialet skulle uppfylla kvalitetskraven för mer vältrafikerade vägar enligt TDOK 2013:0529.



Figur 4.3. Valda stenmaterial från täkt 1–8 under projektets inledande försök.

I detta test analyserades även bergmaterialen i fuktiga förhållanden i syfte att undersöka skillnaderna i färgnyans och ljushet mellan torrt och fuktigt stenmaterial. Materialet fuktades med hjälp av en blomspruta och analyserades efteråt under samma förfarande som övrig testning.

Tabell 4.1. Valda stenmaterial under projektets inledande försök. Färgnyans för valda material har bedömts okulärt av projektets arbetsgrupp.

	Täkt	Bergart	Färg
Försök 1	Täkt 1	Granit	Rosa
Försök 2	Täkt 2	Kvartsit	Vit/ljusgul
	Täkt 3	Metavulkanit	Grå
	Täkt 4	Porfyr	Klarröd
	Täkt 5	Porfyr	Mörkgrå
	Täkt 6	Ryolit (Metavulkanit)	Ljusrosa
	Täkt 7	Metavulkanit	Mörkgrå
	Täkt 8	Kvartsdiorit	Grön/grå/gul

Delsteg 3 syftade till att undersöka ljusheten i befintliga vägbeläggningar i Stockholms tunnelnät. För detta togs borrkärnor upp från totalt sex sektioner i Norra och Södra länken, se bilagd borrtagningsplan i Bilaga 1 samt Figur 4.4.

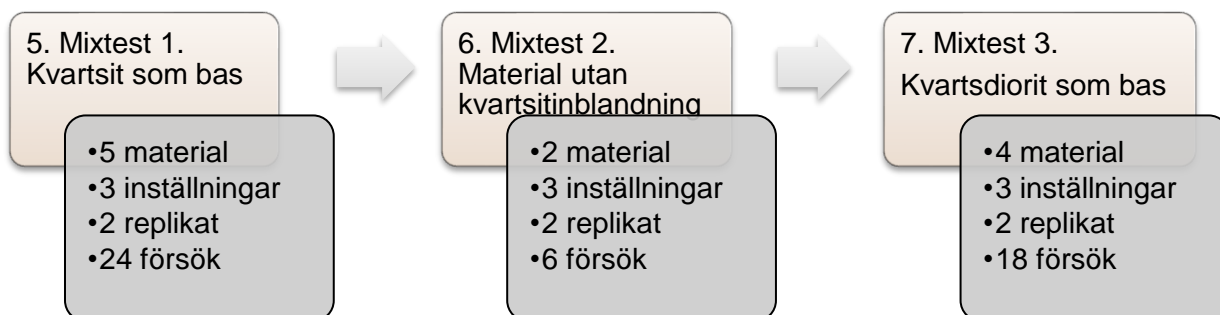
För analysen extraherades bitumenet från respektive prov, fraktionerna 11–16 mm siktades fram och krossades därefter. Från detta siktades fraktionerna mellan <0,063 mm till 1–2 mm fram. Dessa fraktioner analyserades därefter i spektrometern Datacolor Elrepho. Analysmetod finns beskrivet i kapitel 4.2.



Figur 4.4. Material från Norra och södra länken (NL1-3 och SL1-3).

I **delsteg 4** togs ett förslag till numeriska ljushetsvärden fram. Detta steg baserades på resultaten av de tre inledande delstegen. För att undersöka mänsklig uppfattning av ljushet gjordes även en okulär testning av samtliga material från delsteg 1–3.

Med delsteg 4 som referens genomfördes delsteg 5–7 på blandat material med fraktion 1–2 mm, se Figur 4.5.



Figur 4.5. Projektets tre blandningsförsök undersökte ljushetsvärden och färgpåverkan för blandningar med olika bergarter som kan vara aktuella för användning i vägbeläggningar. Totalt genomfördes 48 försök.

I **delsteg 5** undersöktes ljushet och färgnyans vid blandning med kvartsit. Detta eftersom kvartsit i dagsläget är normerande för krav på ljusa beläggningar, till trots att kvartsit per definition inte är ljus. I detta projekt användes en kvartsit som ofta används i beläggningar med ljushetskrav.

I majoriteten av dagens vägbeläggningar förekommer även returafalt, vilken kan innehålla andra färgnyanser och ljushet. För projektets första blandningsförsök valdes därför att blanda kvartsit med bergmaterial innehållandes röda och gråa nyanser samt varierande ljushetsvärden, se Figur 4.6 samt Tabell 4.2.



Figur 4.6. Material från täkt 1–5 testades i projektets första blandningsförsök.

Tabell 4.2. Försöksschema för inblandning i kvartsit (Täkt 2).

A- Färgnyans	B – Vikt-%	C - Ljushet	Valda täkter
Röd	25	Ljus	Täkt 1 – ljusröd
Grå	50	Mörk	Täkt 4 - mörkröd
	75		Täkt 3 - ljusgrå
			Täkt 5 - mörkgrå

I delsteg 6 blandades två andra ljusa bergmaterial än kvartsit med varandra, se Figur 4.7. Inställningar för försöket redovisas nedan i Tabell 4.3.



Figur 4.7. Material från täkt 7 och täkt 1 testades i projektets andra blandningsförsök.

Tabell 4.3. Försöksschema för blandning av två bergmaterial med olika färgnyans.

A - Färgnyans	B – Vikt-%	C - Ljushet	Valda täkter
Röd	25	Ljus	Täkt 1 - ljusröd
Grå	50		Täkt 7 - ljusgrå
	75		

I **delsteg 7** undersöktes om mörka material med låg respektive hög färginverkan kan klara föreslagna ljushetskrav vid blandning med kvartsdiorit. I Figur 4.8 visas valda material. Inställningar för analysen redovisas nedan i Tabell 4.4.



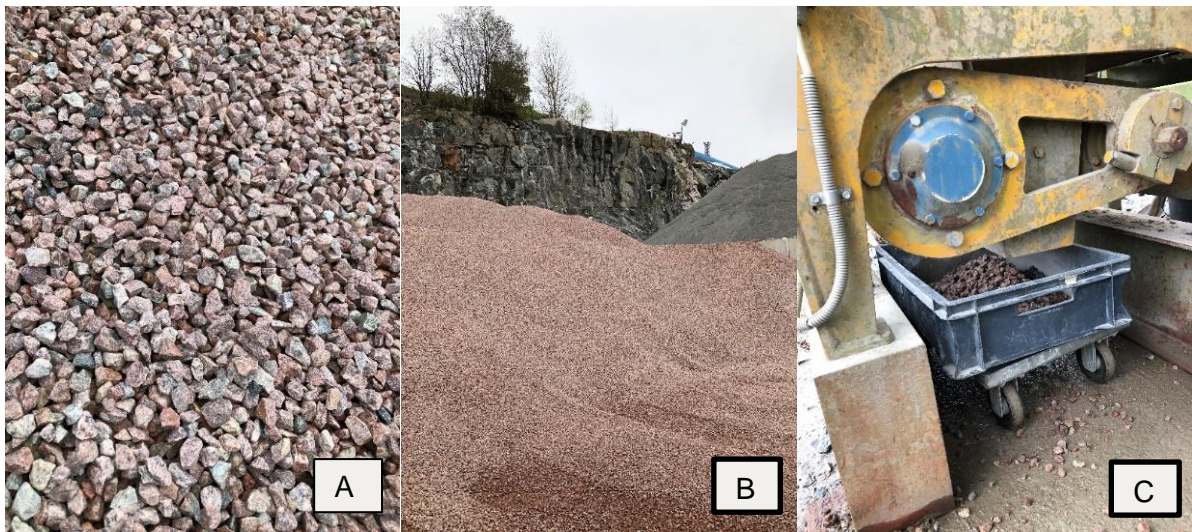
Figur 4.8. Material från täkt 4,5,6 och 8 analyserades under projektets tredje mixanalys.

Tabell 4.4. Försöksschema för inblandning i kvartsdiorit (Täkt 8).

A - Färgnyans	B – vikt-%	C - Ljushet	Valda täkter
Röd	25	Mörk	Täkt 4 – mörkröd
Grå	50		Täkt 5 – mörkgrå
	75		Täkt 6 – mörkröd

4.2 Analysmetod

Bergmaterial är ett heterogent material, i vilket det finns inneboende variationer på varje yta. För att bättre ta hänsyn till variationen valdes material med fraktionsstorlek 8–11 mm ut till analys. Materialet krossades därefter ned till fraktionsstorlek $<0,063$ -2mm, se Figur 4.9A-C, och blandades i respektive fraktionsstorlek. Detta med antagandet att en större stens ljusa och mörka fragment lättare kunde urskiljas och tillgodogöras om det krossas till mindre fraktioner och därefter blandas – i likhet med färglära vid färgbrytning, Figur 4.10.



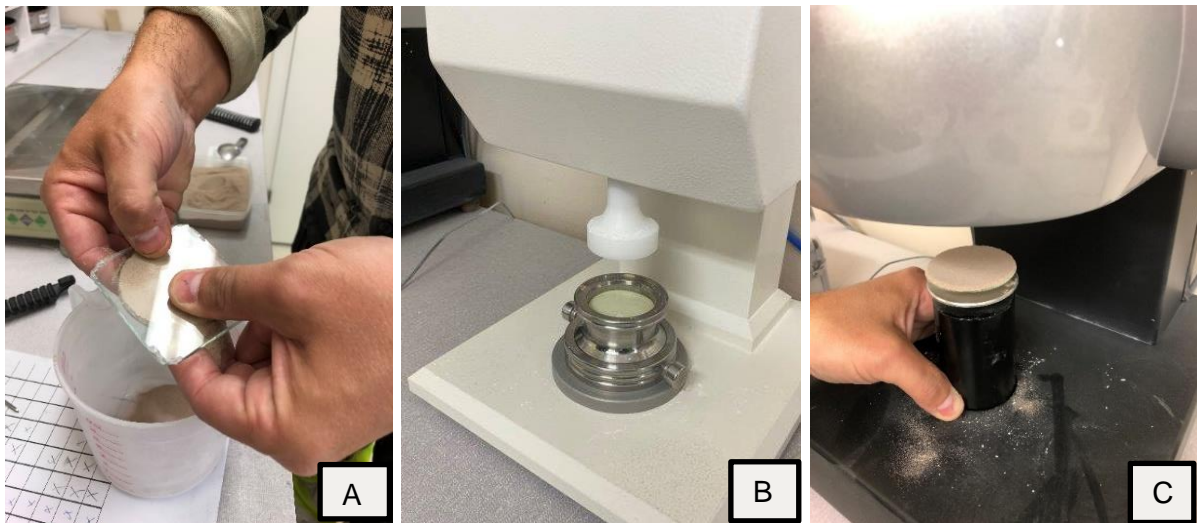
Figur 4.9A-C. Bergmaterial med fraktion 11–16 mm insamlades och krossades ned vid Skanskas laboratorium.



Figur 4.10. När målarfärg bryts blandas vit färg med färg av en annan kulör för att få en annan färgnyans.

Vid analysen av respektive material mättes parametrarna: L^* , a^* , b^* samt R_{457} , R_x , R_y och R_z med hjälp av spektrometern Datacolor Elrepho. Materialet placerades inledningsvis i en testbehållare, Figur 4.11A, för att sedan pressas i en pressmaskin, Figur 4.11B, och slutligen analyseras i spektrometern, Figur 4.11C.

För att minimera eventuell utomstående påverkan på testresultatet gjordes analysen av samma person, i samma miljö och med samma instrument. Samma testnings- och städförfarande följdes vid samtliga analyser.



Figur 4.11. Analysförfarande i laborationsmiljö. Materialet placerades i en testbehållare, pressades i en pressmaskin och slutligen mättes det i spektrometern.

5 Utförda undersökningar

Projektet har genomförts i totalt åtta delsteg, vilka finns beskrivna under kapitel 4 i projektets metodavsnitt.

Begreppsförklaring

Försöken i denna resultatdel analyseras enligt parametrarna nedan.

L*: Mätning ljus/mörk. Anger luminans (%). Absolut svart uppnår värdet 0 och absolut vit motsvarar 100.

a*: Mätning av färgnyans. Grön (-) /röd (+)

b*: Mätning av färgnyans. Blå (-) /gul (+)

R457: ISO-standard för mätning av ljushet. Indikerar hur mycket ljus som reflekteras vid en våglängd på $457 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$ vid en perfekt reflekterad och diffus yta.

Rx, Ry och Rz: Tristimulusfilter som mäter diffus reflektion. Parametrarna motsvarar röda, gröna och blåa våglängder.

5.1 Delsteg 1 – Påverkan vid olika fraktioner

Delsteg 1 genomfördes i syfte att identifiera hur stenmaterialets ljushet och färgnyans påverkas vid olika fraktionsstorlek. Analysen syftade även till att undersöka spektrometerens repeterbarhet och reproducerbarhet. I den inledande analysen analyserades ett material vid sex fraktionsstorlekar. Tre replikat gjordes och totalt genomfördes 18 mätningar.

1. Påverkan vid olika fraktioner

- 1 material
- 6 inställningar
- 3 replikat
- 18 försök

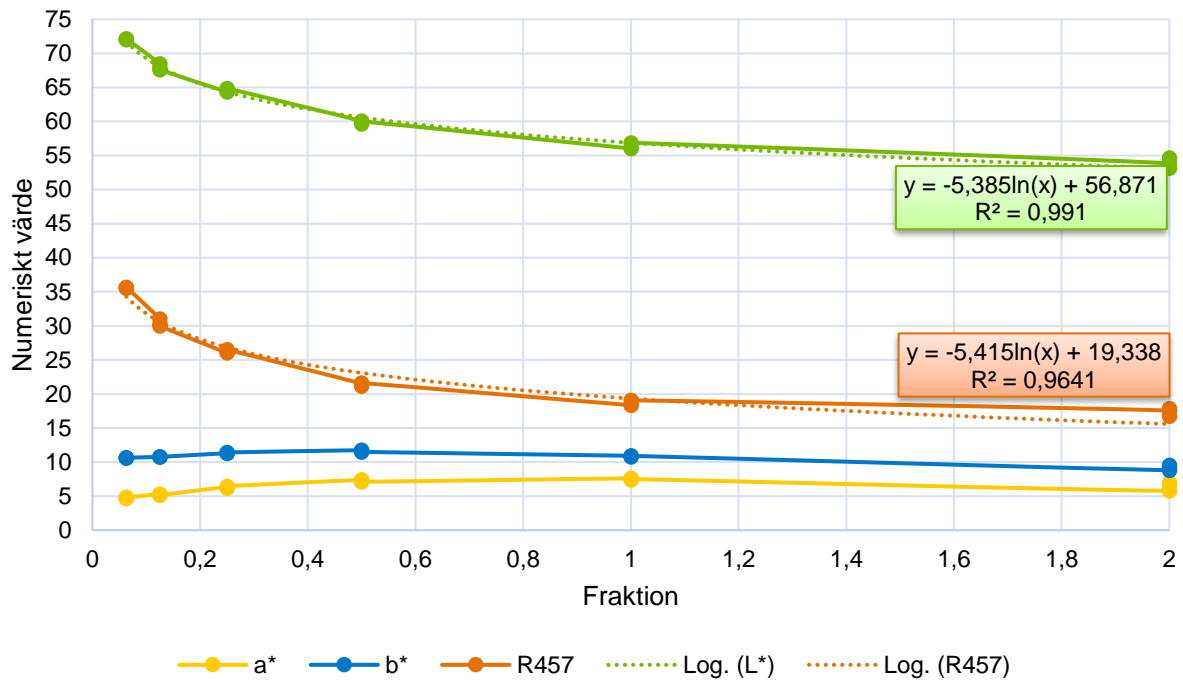
Vid uppdelning av det siktade materialet genomfördes en okulär analys av materialets ljushet, i vilken stor variation mellan olika fraktioner konstaterades, se Figur 5.1. Ju större fraktion, desto mörkare uppfattades materialet. Ljusast uppfattades det mest finkorniga materialet.



Figur 5.1. Stor ljushetvariation vid olika fraktioner. På denna bild återges samma stenmaterial i olika fraktioner. Fraktionen 1–2 mm närmast i bild följt av 0,25–0,5 mm, 0,063–0,125 mm och <0,063 mm längst bak.

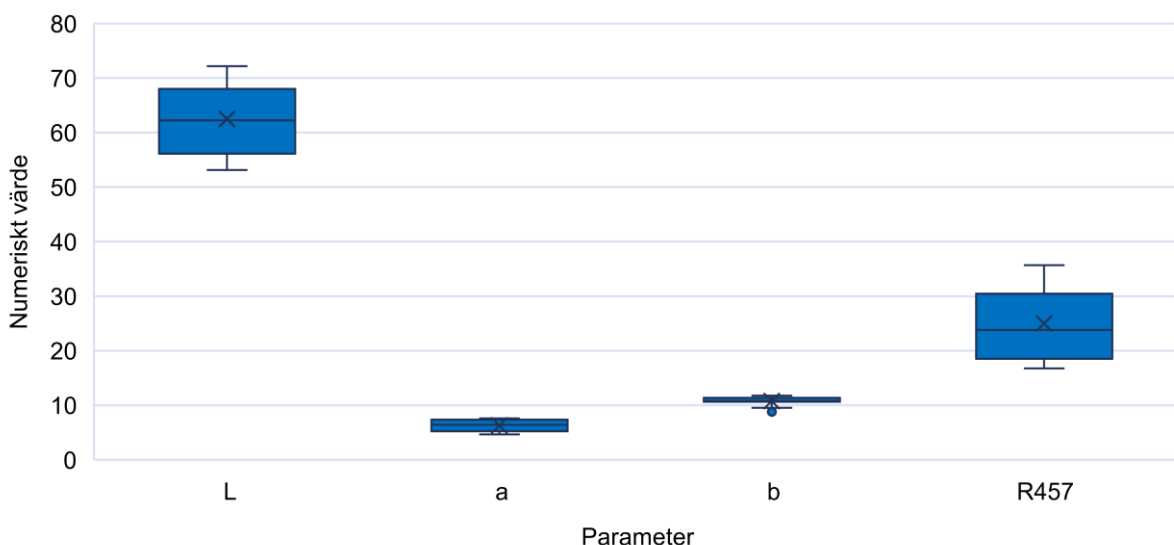
Resultaten från analys i spektrometer, redovisas i Figur 5.2, bekräftar resultaten från okulär bedömning. Genom en medelvärdesanalys för respektive fraktion kan utläsas att stenmaterialets färgnyans, a^* och b^* , bibehålls relativt konstant oberoende av fraktionsstorlek. Ljushetsvärdena, L^* och R_{457} , förändrades däremot logaritmiskt med en god förklaringsgrad ($R^2= 0,991$ respektive $R^2=0,9641$). Vid en fraktionsstorlek om 1–2 mm uppvisas en utplaning av ljushetsvärdet, vilket indikerar att ett ljushetsvärde för materialet vid större fraktioner kan fastställas vid en fraktionsstorlek om 1–2 mm.

Täkt 1 - Försök 1



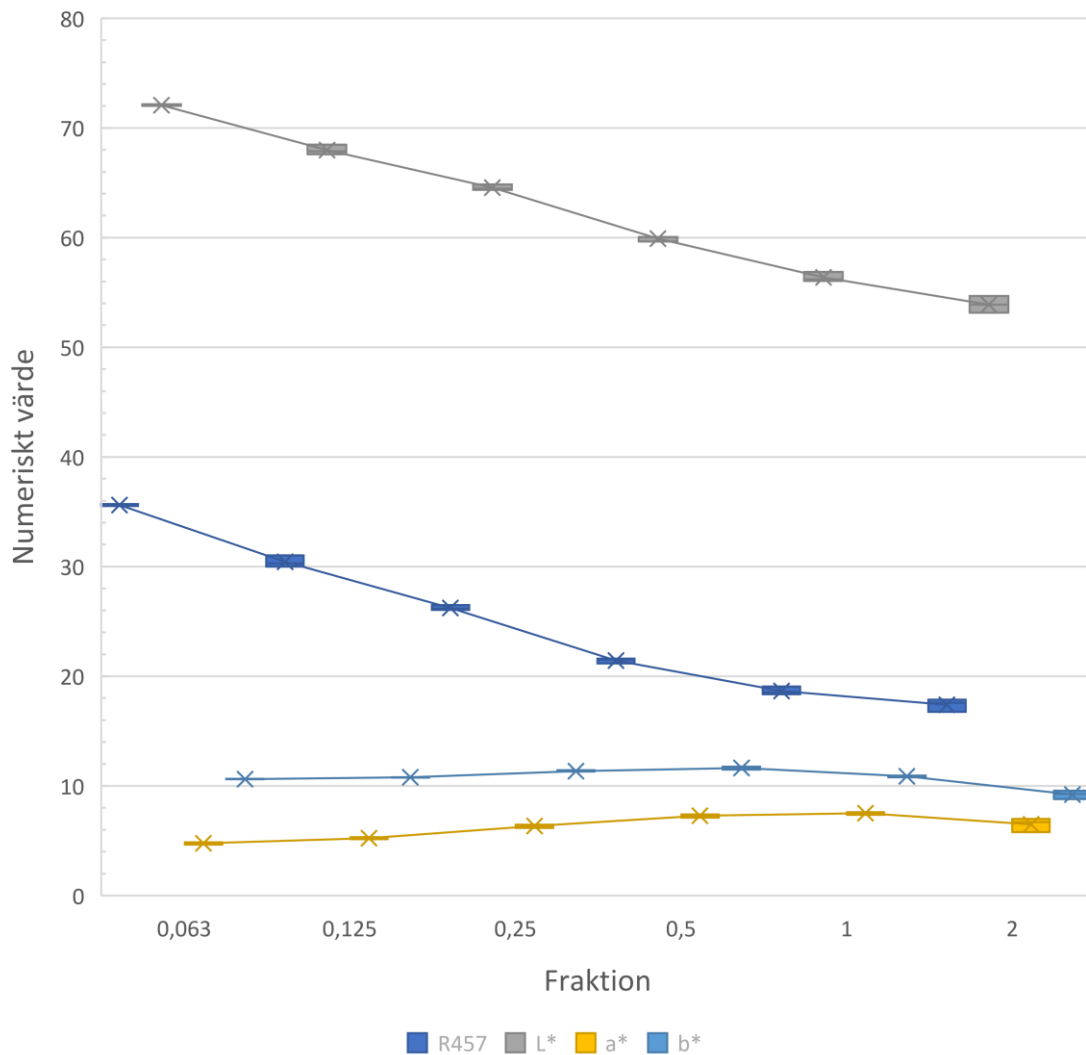
Figur 5.2. Analys av stenmaterialalets ljushets- och vithetsvariationer vid olika fraktioner. L* och R457 följer en logaritmisk fördelning med en god förklaringsgrad.

Spridningen av mätvärden mellan olika fraktioner, se Figur 5.3, indikerar ett liknande resultat som i ovannämnda graf, där a* och b* har en låg spridning mellan fraktionerna medan standardavvikelsen för L* och R457 är desto högre. Detta tyder på att L* och R457, beror på materialets fraktionsstorlek medan färgnyansen, a* och b*, förblir densamma oberoende av fraktionsstorlek.



Figur 5.3. Generell ljushets- och färgvariation mellan olika fraktioner. Ljushets-parametrarna L* och R457 varierar vid olika fraktioner medan färgnyansen, a* och b*, förblir konstanta vid olika fraktionsstorlek.

Inbördes spridning mellan replikat inom respektive fraktion för L^* och R457 är lägre jämfört med resultatet mellan fraktioner. Vidare är det en fortsatt låg spridning mellan mätvärdena för a^* och b^* . Resultatet för a^* och b^* skiljer sig däremot åt vid högre fraktioner, där en relativt stor spridning för a^* och b^* uppvisas, se Figur 5.4.

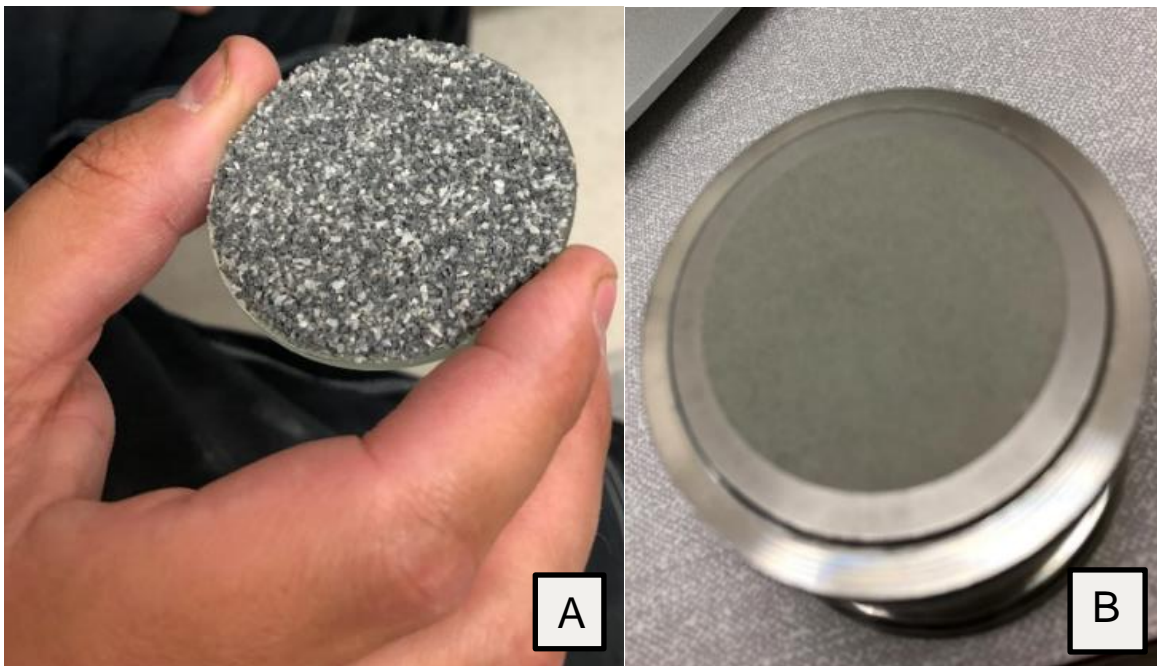


Figur 5.4. Spridning mellan försökets replikat inom respektive fraktion. Mellan replikaten inom respektive fraktion påvisas en låg spridning för ljushetsparametrarna L^* och R457. Färgnyansparametrarna a^* och b^* har en låg spridning vid fina fraktioner men får en relativt stor spridning vid 1–2 mm.

Som även beskrivits i rapportens litteraturdelen beror ljushetsresultatet på materialets inneboende förmåga att reflektera inkommande strålar, hur mycket av inkommande strålar materialet absorberar samt den riktning som strålarna reflekterar tillbaka. Dessa faktorer beror i sin tur på materialets textur. Ju fler skärningar det finns i en yta, ju fler vägar (möjligheter) finns det för materialet att reflektera inkommande strålar.

Kopplat till projektets resultat överensstämmer teoretisk beskrivning med faktisk spridning mellan mätvärden inom respektive fraktion för ljushetsvärdena L^* och $R457$. Inom respektive fraktion har stenmaterialet en likartad geometrisk form och specifik yta, vilket bör resultera i liknande ljushetsvärden. Den geometriska formen hos materialet medför samtidigt att det finns ett visst mått av osäkerhet i mätningens precision. Detta eftersom resultatet baseras på stenmaterialets textur vid den exakta position som maskinens laser mäter. Den stora spridningen mellan olika fraktioner förklaras å andra sidan av att mindre fraktioner har en större specifik yta och därmed en ökad möjlighet att reflektera inkommande ljus.

Den inbördes spridning som fanns vid större fraktioner för färgnyans, a^* och b^* , kan förklaras med att enskilda mineralkorn inte blandats fullständigt. Beroende på var spektrometerns laser träffade materialet gav mätningen varierande resultat, se Figur 5.5. Detta resultat anses även ha givit projektets metodval avseende blandningsförfarande en ökad legitimitet. För att motverka eventuell påverkan av laserns träffpunkt beräknades stenmaterialets färgnyans genom ett medelvärde på respektive fraktion.



Figur 5.5. Både mörka och ljusa kulörer återfinns i stenmaterial. Detta syns tydligare ju större fraktioner som mäts, vilket kan medföra variationer vid testning. I Figur 5.5A mäts valt stenmaterial vid en större fraktion jämfört med i Figur 5.5B. Stenmaterialet på bilden kommer från ett av materialen i delsteg 2.

Den låga spridning som fanns mellan mätvärdenas replikat för ljushetsparametrarna L^* och $R457$ respektive färgnyansparametrarna a^* och b^* anses styrka analysmetodens repeterbarhet och reproducerbarhet. Baserat på detta resultat antogs att ett rättvisande mätvärde för parametrarna kunde uppnås också med två replikat i stället för tre. Med antagandet att även andra stenarter följer samma logaritmiska fördelning som i det inledande försöket valdes fyra av sex mätpunkter från det inledande delsteget ut för vidare testning med andra stenmaterial.

Slutsats – Delsteg 1

1. Stenmaterialets färgnyans, a^* och b^* , var förhållandevis konstant oberoende av fraktionsstorlek. Stenmaterialets ljushetsvärden, L^* och $R457$, förändrades däremot logaritmiskt mellan fraktionsstorlek. Vid finkorniga fraktioner uppnåddes höga ljushetsvärden och vid en fraktionsstorlek om 1–2 mm planade kurvan ut.
 - Baserat på resultatet valdes stenmaterial med fraktionsstorlek 1–2 mm som utgångspunkt för projektets efterföljande försök.
2. Den låga spridningen mellan mätvärdenas replikat för ljushetsparametrarna L^* och $R457$ respektive färgnyansparametrarna a^* och b^* anses styrka analysens repeterbarhet och reproducerbarhet.
 - Baserat på resultatet antogs att ett rättvisande mätvärde för parametrarna kunde uppnås med två replikat i stället för tre.
 - Fyra av sex mätpunkter från det inledande försöket valdes ut för vidare testning med andra stenmaterial. Detta baserat på antagandet att andra material följer liknande logaritmiska fördelning.

5.2 Delsteg 2 – Material från täkter

I delsteg 2 valdes ytterligare sju täkters material ut för testning, se Tabell 5.1 nedan. Valet av täkter gjordes dels utifrån att få ett så brett färgspektra som möjligt representerat, dels att materialet skulle uppfylla kvalitetskraven för mer vältrafikerade vägar enligt TDOK 2013:0529.

2. Material från täkter

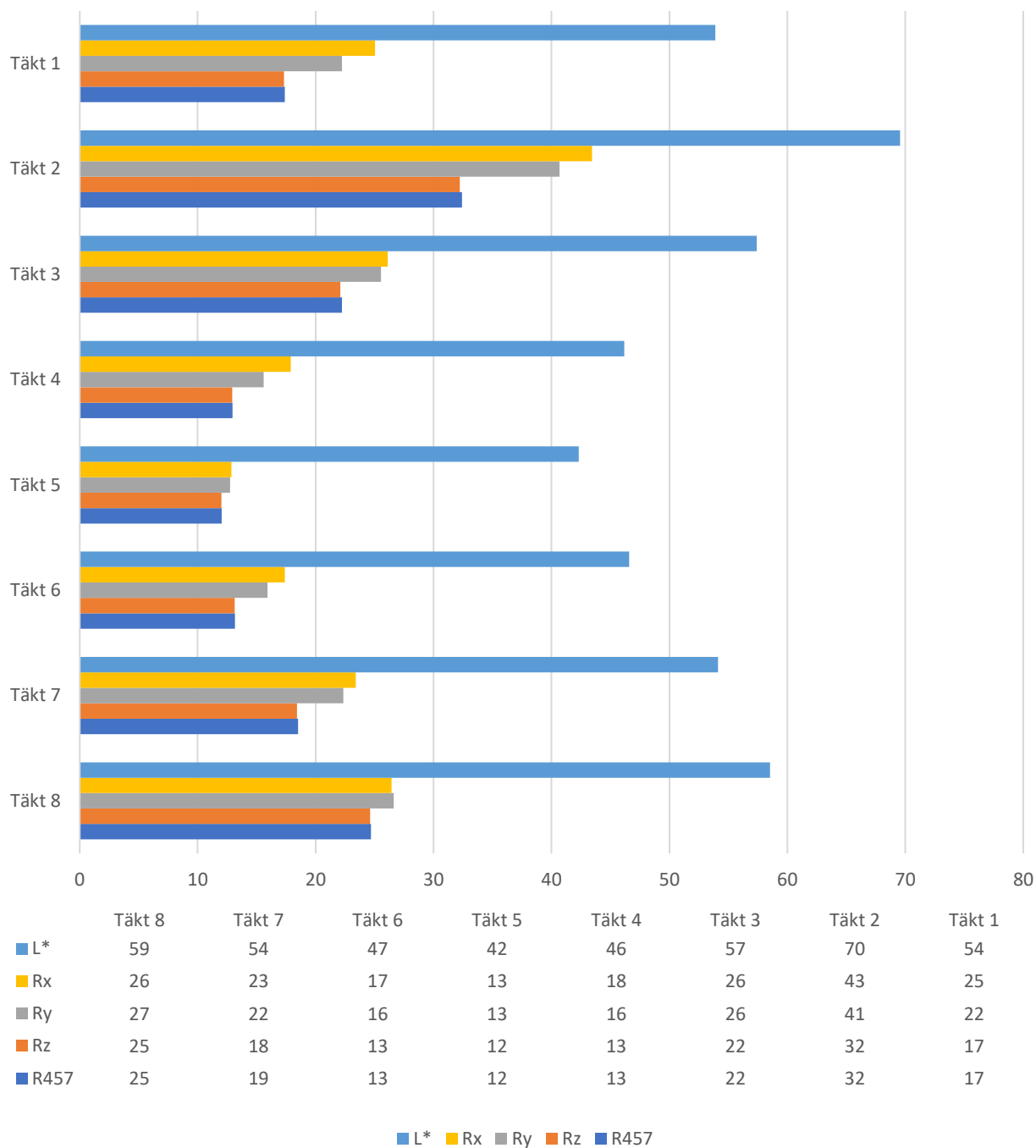
- 7 material
- 5 inställningar
- 2 replikat
- 70 försök

Tabell 5.1. Valda stenmaterial under projektets inledande försök. Färgnyans för valda material har ansatts okulärt av projektets arbetsgrupp.

	Täkt	Bergart	Färg
Försök 1	Täkt 1	Granit	Ljusröd
Försök 2	Täkt 2	Kvartsit	Vit/ljusgul
	Täkt 3	Metavulkanit	Grå
	Täkt 4	Porfyr	Mörkröd
	Täkt 5	Porfyr	Mörkgrå
	Täkt 6	Ryolit (Metavulkanit)	Ljusröd
	Täkt 7	Metavulkanit	Mörkgrå
	Täkt 8	Kvartsdiorit	Grön/grå/gul

I likhet med resultatet från försök 1 uppvisade materialen i delsteg 2 liknande logaritmiska fördelning av ljushetsparametrarna L^* och R_{457} . Färgnyansen, a^* och b^* , uppvisade däremot fortsatta konstanta värden oberoende av fraktionsstorlek. Visserligen är antalet mätpunkter få och en djupanalys skulle med fördel kunna göras för ett säkrare resultat. För att kunna dra vidare slutsatser validerades ändå antagandet till en logaritmisk fördelning för L^* och R_{457} samt en konstant färgnyans. I Figur 5.6 nedan redovisas en sammanslagning av samtliga täkters ljushetsvärden vid en fraktionsstorlek om 1–2 mm. I detta försök analyserades även ljushetsparametrarna R_x , R_y och R_z .

Ljushet - Material från täkter (1-2 mm)

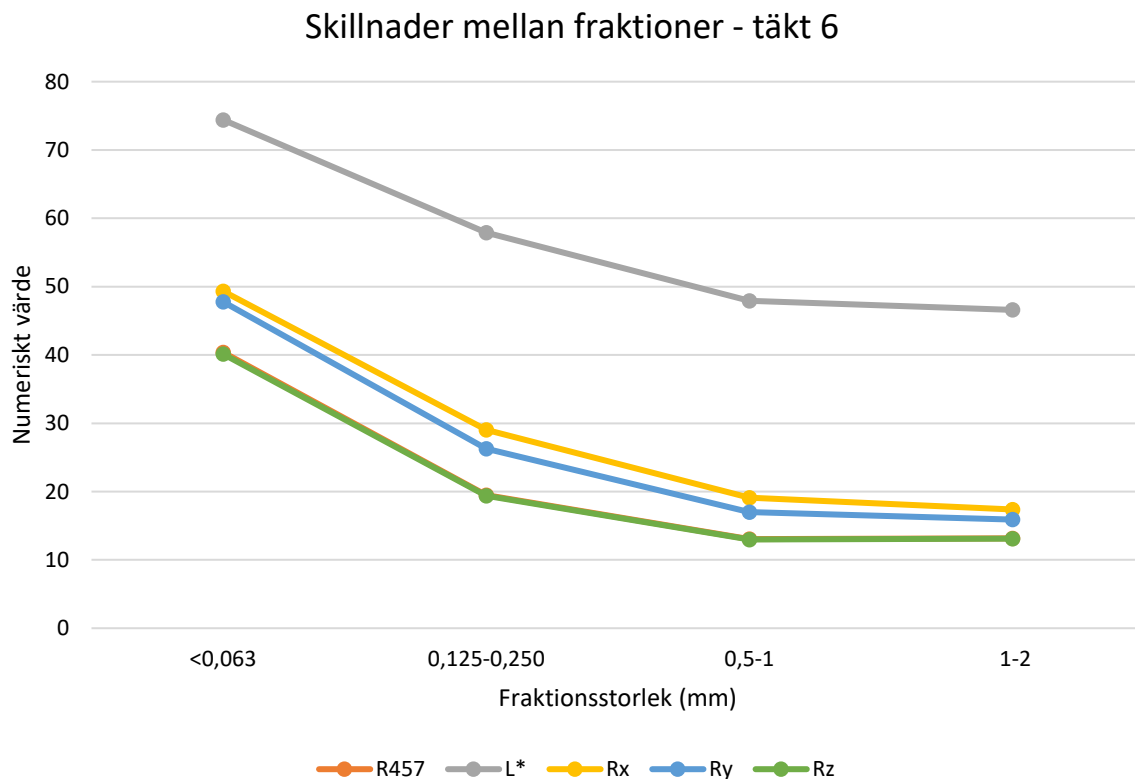


Figur 5.6. För varje täkt redovisas ljushetsparametrarna L*, R457, Rx, Ry, Rz vid en fraktionsstorlek om 1–2 mm.

Diagrammet ovan visar på att kvartsit (täkt 2) uppvisar högst ljushetsvärden följt av kvartsdiorit (täkt 8), metavulkanit (täkt 3 och 7) och granit (täkt 1). Lägst ljushetsvärden har porfyren (täkt 4 och 5) samt metavulkaniten (täkt 6). Rangordningen mellan bergarter är dock inte bergartsspecifik utan skillnaden inom en bergart mellan täkter är relativt stor. Varierande ljushetsvärden redovisas bland annat i analyserad

metavulkanit (täkt 3, 6 och 7). En bestämning av ljushetsvärde bör därmed ej uteslutande bestämmas baserat på bergart. Huruvida detta resultat är överensstämmande för material från andra täkter är ej heller undersökt.

Vid genomgång av samtliga data identifierades även en korrelation mellan valda ljushetsparametrars kurvor för samtliga täkter. För en visualisering finns täkt 6 plottad nedan i Figur 5.7. Korrelationen tyder på att ett numeriskt ljushetsvärde kan bestämmas oberoende av parameter.

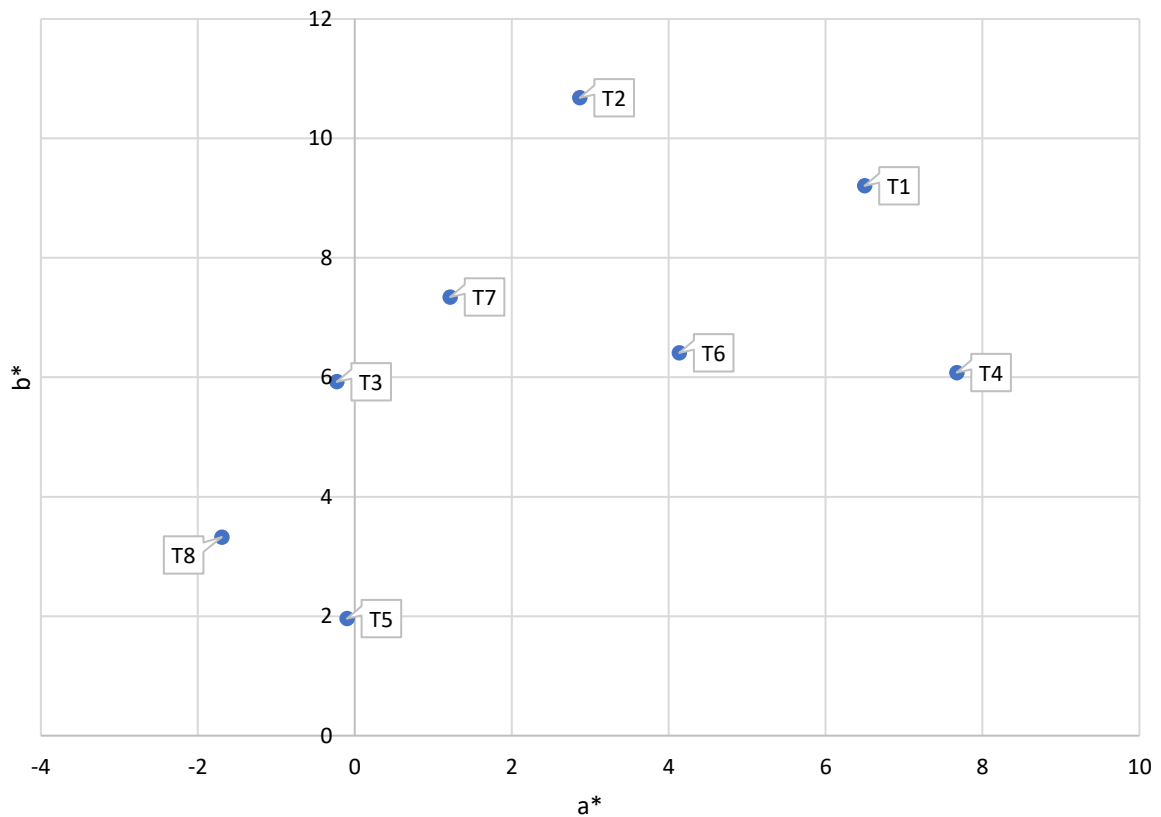


Figur 5.7. Plottning av ljushetsvärden vid olika fraktioner för täkt 6. Korrelationen mellan dessa parametrar tyder på att ett numeriskt värde för ljushet skulle kunna bestämmas oberoende av vald parameter. Observera att den orangea linjen (R457) ligger rakt under den gröna linjen (Rz) och därför inte syns.

För att utvärdera stenmaterialens färgnyans granskades täkternas a*- och b*-värden i ett koordinatdiagram, se Figur 5.8. I diagrammet bestämmer avståndet från origo andel färgpåverkan i respektive material. Avståndet från origo bestäms enligt ekvation 1 nedan och täkternas avstånd finns redovisat i Tabell 5.2.

$$d = \sqrt{(b_2 - b_1)^2 + (a_2 - a_1)^2} \quad \text{Ekv. 1}$$

Färgnyans - Täkter - Fraktion 1-2 mm



Figur 5.8. Visualisering av ballastens färgnyanser från täkt 1–8. X-axeln, a^* , beaktar inblandning av (-) grön/ (+) röd och y-axeln, b^* , beaktar färgnyansens inblandning av: (-) blå/ (+) gul.

Tabell 5.2. Ljushetsvärde (L^* och R457) samt färgpåverkan (avstånd från origo) för täkt 1–8.

Täktnummer	Bergart	Avstånd origo	L^* (%)	R457
Täkt 1	Granit	11	54	17
Täkt 2	Kvartsit	11	70	32
Täkt 3	Metavulkanit	6	57	22
Täkt 4	Porfyr	10	46	13
Täkt 5	Porfyr	2	42	12
Täkt 6	Metavulkanit	8	47	13
Täkt 7	Metavulkanit	7	54	18
Täkt 8	Kvartsdiorit	4	59	25

Samtliga material uppvisar positiva b^* -värden och har därmed en färgnyans med gula inslag. Täkt 1–7 har även positiva a^* -värden, vilket betyder att färgnyansen för dessa går mot gul/röd. Täkt 8 har däremot ett negativt a^* -värde, vilket innebär att det i stället har en gul/grön färgnyans. Baserat på avstånd till origo, materialets inslag av färg, har täkt 5 minst färginslag. Detta innebär att materialet från täkt 5 har en mycket svag nyans av rött ($b^* \approx 0$, $a^* \approx 2$), medan täkt 1 har störst avstånd till origo ($a^* \approx 6$, $b^* \approx 9$) och har ett klart inslag av röd/gul.

Analyseras ljushet (L^*) i relation till färgnyans (a^* och b^*), Figur 5.9, ses att graniten från täkt 1, som hade störst avstånd till origo, är 12 % ljusare än det mörkaste materialet. Porfyren från täkt 5, som hade minsta avstånd till origo, är klart mörkast ($L^* = 42$ %) och kvartsiten från täkt 2, som hade näst störst avstånd till origo, var klart ljusast (70 %).

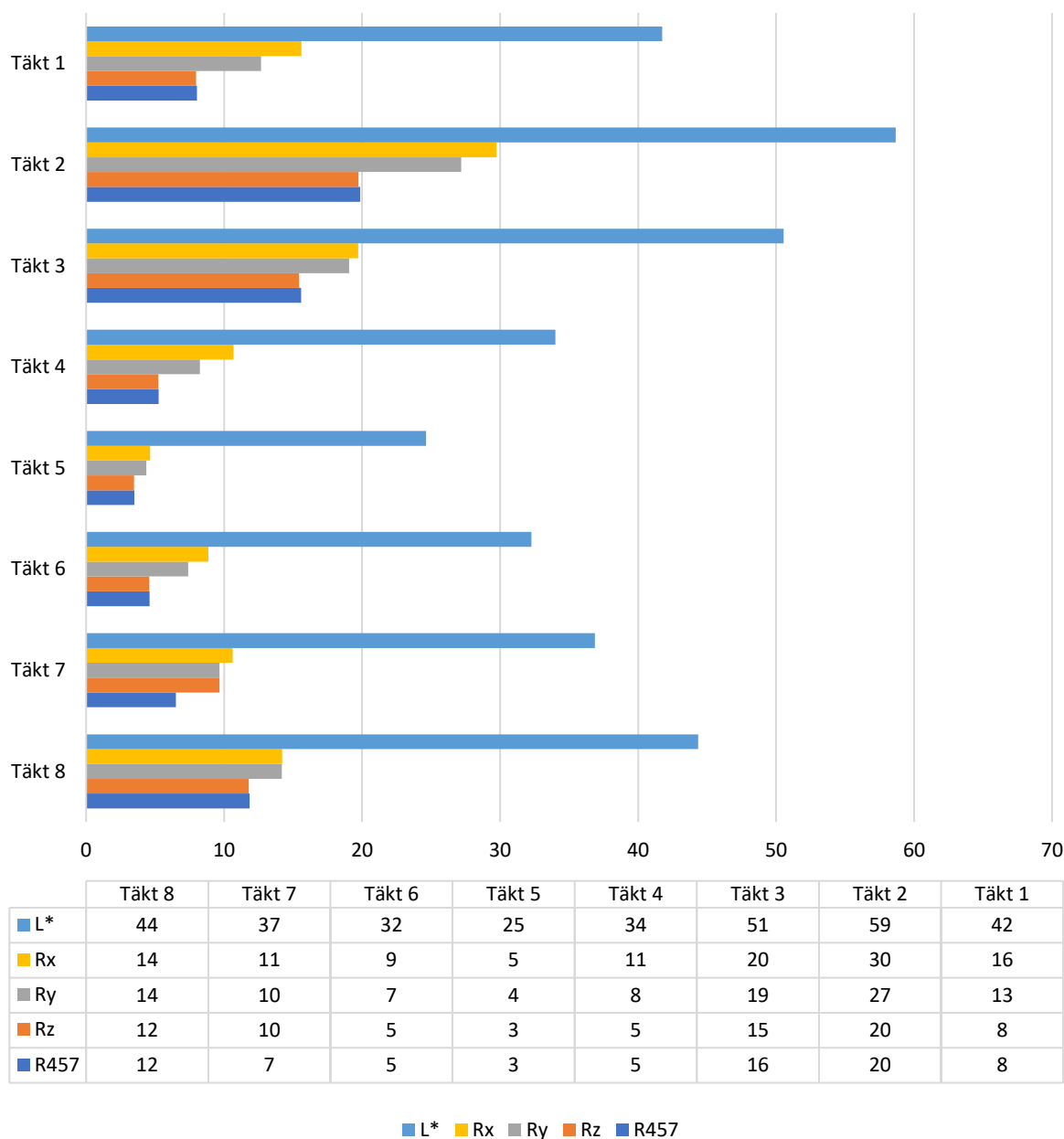


Figur 5.9. Graniten från täkt 1, vänster, hade störst färgpåverkan (längst från origo) och var i mittenspannet avseende ljushet (L^*) av analyserade material. Porfyren från täkt 5, mitten, hade minst färgpåverkan (närmast origo) men var samtidigt mörkast (lågt L^* -värde). Kvartsiten från täkt 2, höger, hade bäst L^* -värde och är ljusast men har samtidigt stort färginslag (långt från origo).

Fuktigt material

Vidare analyserades materialen från täkt 1–8 med fraktionsstorlek 1–2 mm under fuktiga förhållanden. I likhet med vad som påvisats i rapportens litteraturredel, visar resultatet på att ballastens ljushet påverkas av fukt. Fortsatta studier vid fuktiga förhållanden är fördelaktigt i det fall att ljushet krävs baserat på fuktiga förhållanden. I Figur 5.10 nedan redogörs för materialens ljushetsvärden enligt parametrarna L^* , R_x , R_y , R_z och R_{457} vid fuktiga förhållanden.

Ljushet - fuktigt material - täkt 1-8 (1-2 mm)



Figur 5.10. De åtta täkternas ljushetsvärden enligt parametrarna L*, Rx, Ry, Rz och R457 vid fuktiga förhållanden mätt på fraktionsstorlek 1–2 mm.

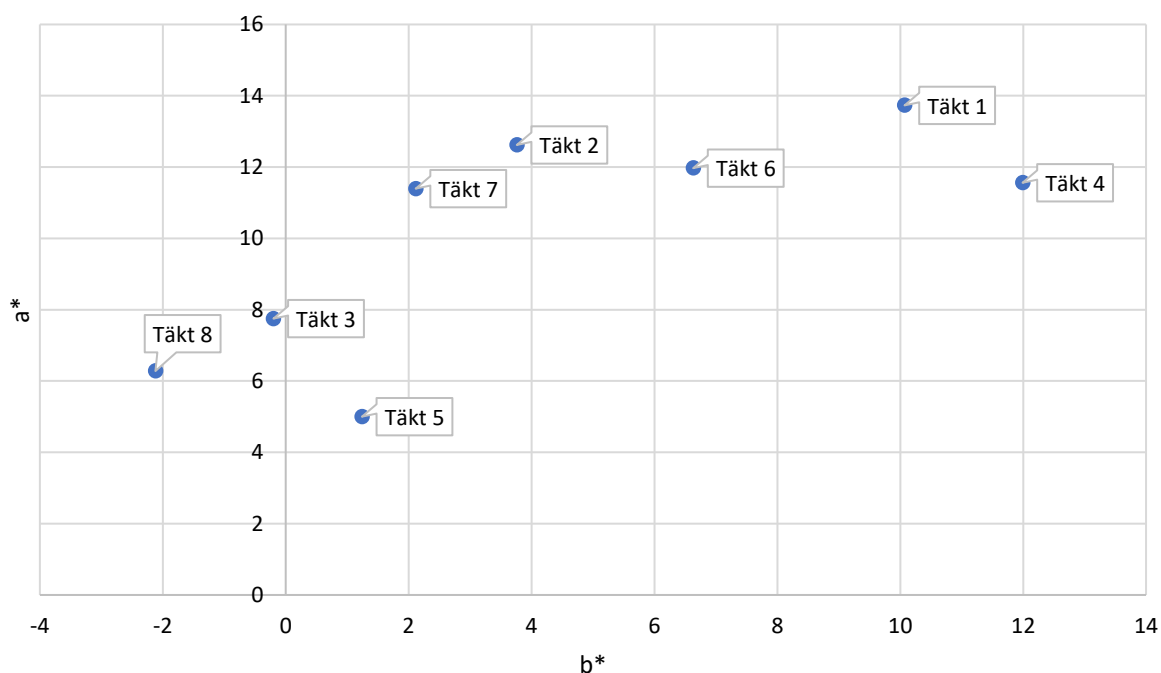
Skillnaden mellan fuktiga och torra förhållanden redovisas i Tabell 5.3. I jämförelsen granskades medelvärdet vid 1–2 mm mellan ljushetsparametern L* och ljushetsparametrarna R457, Rx, Ry och Rz vid torra respektive fuktiga förhållanden. Ljushetsförändringen vid fuktiga förhållanden kan vara relevant att beakta när ljushet ska optimeras i ett större sammanhang (ex. förhållandet mellan lodräta och vågräta ytor och material i en större miljö).

Tabell 5.3. Skillnader i ljushet mellan fuktiga och torra förhållanden.

	Fuktigt				Torrt			
	L-R457	L-Rx	L-Ry	L-Rz	L-R457	L-Rx	L-Ry	L-Rz
Täkt 1	34	26	29	34	37	27	30	37
Täkt 2	39	29	31	39	34	21	24	34
Täkt 3	35	31	31	35	33	28	29	33
Täkt 4	29	23	26	29	35	27	30	35
Täkt 5	21	20	20	21	33	29	30	33
Täkt 6	28	23	25	28	35	28	30	35
Täkt 7	30	26	27	30	34	27	28	35
Täkt 8	33	30	30	33	32	28	28	32
NL1	32	30	30	32	32	28	29	33
NL2	32	29	29	32	33	28	29	33
NL3	31	27	28	31	35	30	31	36
SL1	24	22	23	24	33	29	30	33
SL2	34	30	31	34	34	29	30	35
SL3	28	24	25	28	35	28	30	35
Medelvärde samtliga stenmaterial	31	26	28	31	34	28	29	34

Materialens färgnyans i fuktigt tillstånd återges i Figur 5.11 samt analyseras i relation till torra förhållanden i Tabell 5.4.

Färgnyans - fuktigt (1-2 mm)



Figur 5.11. Visualisering av de olika stenmaterialens färgnyanser. X-axeln, a*, beaktar inblandning av (-) grön/ (+) röd och y-axeln, b*, beaktar färgnyansens inblandning av: (-) blå/ (+) gul.

Samtliga täkters bergmaterial har positiva b*-värden i såväl torrt som fuktigt tillstånd, vilket innebär en nyans som går mot gult. Täkt 1–7 har även positiva a*-värden, vilket betyder att färgnyansen för täkternas bergmaterial går mot gul/röd. Täkt 8 har ett negativt a*-värde, vilket innebär att detta stenmaterial i stället går mot en gul/grön färgnyans. Samtliga material får dock en förändrad färgnyans i fuktiga förhållanden jämfört med torra förhållanden. Det finns ej heller någon korrelation gällande variationen i materialens ljushet och färgnyans mellan torra och fuktiga förhållanden med om materialet i torrt tillstånd varit ljust eller mörkt, se Tabell 5.4.

Tabell 5.4. Färgnyans och ljushet för respektive täkts material vid torra och fuktiga förhållanden.

Täktnummer	Bergart	Avstånd origo			L* (%)		
		Torrt	Fuktigt	Skillnad avstånd	Torrt	Fuktigt	Skillnad L* (%)
Täkt 1	Granit	11	17	6	54	42	12
Täkt 2	Kvartsit	11	13	2	70	59	11
Täkt 3	Meta-vulkanit	6	8	2	57	51	6
Täkt 4	Porfyr	10	17	7	46	34	12
Täkt 5	Porfyr	2	5	3	42	25	18
Täkt 6	Meta-vulkanit	8	14	6	47	32	15
Täkt 7	Meta-vulkanit	7	12	4	54	37	17
Täkt 8	Kvartsdiorit	4	7	3	59	44	15

Ur tabellen kan utläsas att den ljusa metavulkaniten (täkt 3) har ett avvikande beteende än övriga material. Täkt 3 förändras minst i färg och har även minst skillnad (6%) gällande skillnaden i L* mellan torra och fuktiga förhållanden. Övriga material har en betydligt större spridning. Kvartsiten (täkt 2) och kvartsdioriten (täkt 8), som också är ljusa material, förändras å andra sidan lite i färg mellan fuktigt och torrt (ca 2 enheter) men har en relativt stor skillnad i ljushet.

Vidare har Metavulkaniten som bergart (täkt 3, 6,7) en stor spridning i hur mycket den förändras både färgmässigt och ljushetsmässigt. Porfyren (täkt 4,5) är generellt en mörk sten (lågt L^* -värde) men har en stor spridning avseende färgpåverkan och avstånd från origo. Täkt 5 har absolut minst färgpåverkan vid både torra och fuktiga förhållanden medan täkt 4 är i det nedre spannet avseende dess färgpåverkan. Slutligen har analyserad granit (täkt 1) både vid torra och fuktiga förhållanden störst avstånd från origo och därmed mest färgpåverkan samtidigt som materialet ligger i mittenspannet av materialen avseende ljushet.

Slutsats – Delsteg 2

1. Stenmaterialets färgnyans, a^* och b^* , var relativt konstant oberoende av fraktionsstorlek. Stenmaterialets ljushetsvärden, L^* och $R457$, förändrades däremot logaritmiskt mellan fraktionsstorlek. Vid finkorniga fraktioner uppnåddes höga ljushetsvärden och vid en fraktionsstorlek om 1–2 mm planade kurvan ut.
 - Antagandet om konstant färgnyans och en logaritmiskt föränderlig ljushet, som konstaterats i delsteg 1, stärks.
2. En korrelation finns mellan valda ljushetsparametrar för samtliga täkter.
 - Ett numeriskt värde för ljushet kan bestämmas oberoende av parameter ($R457$, L^* , R_x , R_y , R_z).
3. Materialens ljushet och färgnyans förändras vid fuktiga förhållanden. Detta är relevant att ha i åtanke när ljushet ska optimeras i ett större sammanhang (ex. förhållandet mellan lodräta och vågräta ytor och material i en större miljö).
 - Detta projekt kommer ej att vidare analysera material i fuktiga förhållanden. Fortsatta studier vid fuktiga förhållanden är fördelaktigt i det fall att ljushet krävställes baserat på fuktiga förhållanden.

5.3 Delsteg 3 - Befintliga beläggningar

Det tredje delsteget syftade till att analysera materialets ljushet och färgnyans i befintliga vägbeläggningar i Stockholms tunnelnät. Till analysen togs borrhärdar upp från totalt sex sektioner i Norra och Södra länken, se bilagd borrhäringsplan i Bilaga 1.

Inför analys extraherades bitumenet från respektive prov och stenmaterial med fraktionerna 11–16 mm krossades ner till fraktionerna <0,063–2 mm. Bergartsinnehåll på material med fraktionsstorlek 8–16 mm redovisas i Tabell 5.5. Bild på respektive material i fraktionsstorlek 11–16 mm återfinns i Figur 5.12.

3. Befintliga beläggningar

- 6 vägsektioner
- 5 inställningar
- 2 replikat
- 60 försök

Tabell 5.5. Okulärt bedömt bergartsinnehåll av arbetsgruppens geolog av borrhärdar från befintliga vägbeläggningar i Stockholms tunnelnät.

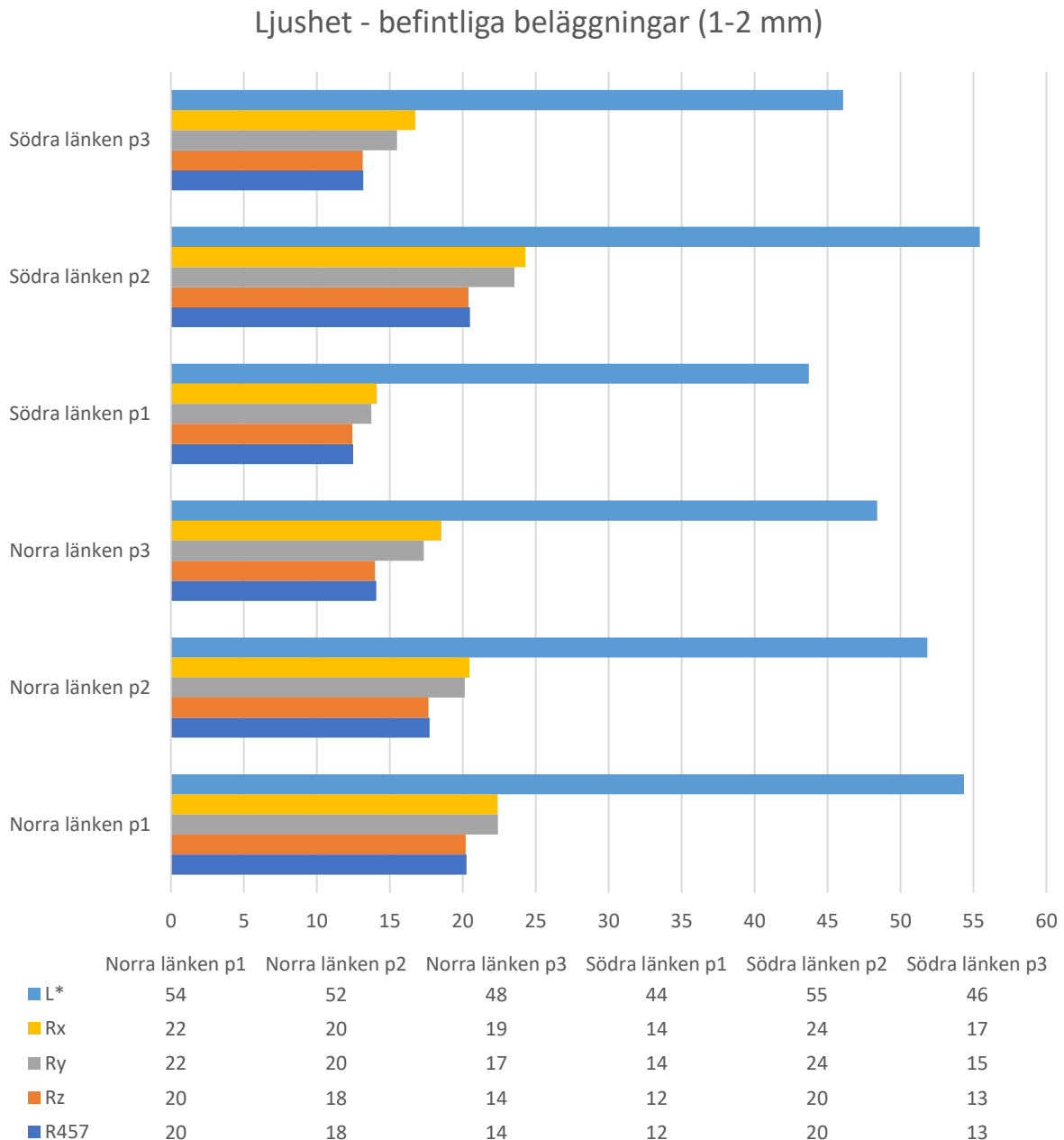
Prov	Porfyr	Ljus metavulkanit Ljus kvartsit	Övrigt
Norra länken 1		100 %	
Norra länken 2		80 %	20 % mörkt granitiskt
Norra länken 3			100 % mörkt granitiskt
Södra länken 1	100% olika färger		
Södra länken 2		85 %	15 ortens granit
Södra länken 3	Brunröd 90 %, 10 % mörk		



Figur 5.12. Stenmaterial med fraktion 11–16 mm från befintliga vägbeläggningar i Stockholms tunnelnät.

En okulär bedömning av materialet genomfördes även av projektets arbetsgrupp tillsammans med representanter från Trafikverket på extraherat och krossat material. Materialet från Norra länken 1 (NL1), Norra länken 2 (NL2) och Södra länken 2 (SL2) ansågs där klara Trafikverkets nuvarande ljushetskrav medan stenmaterialet från NL3, SL1 och SL3 bedömdes vara för mörka.

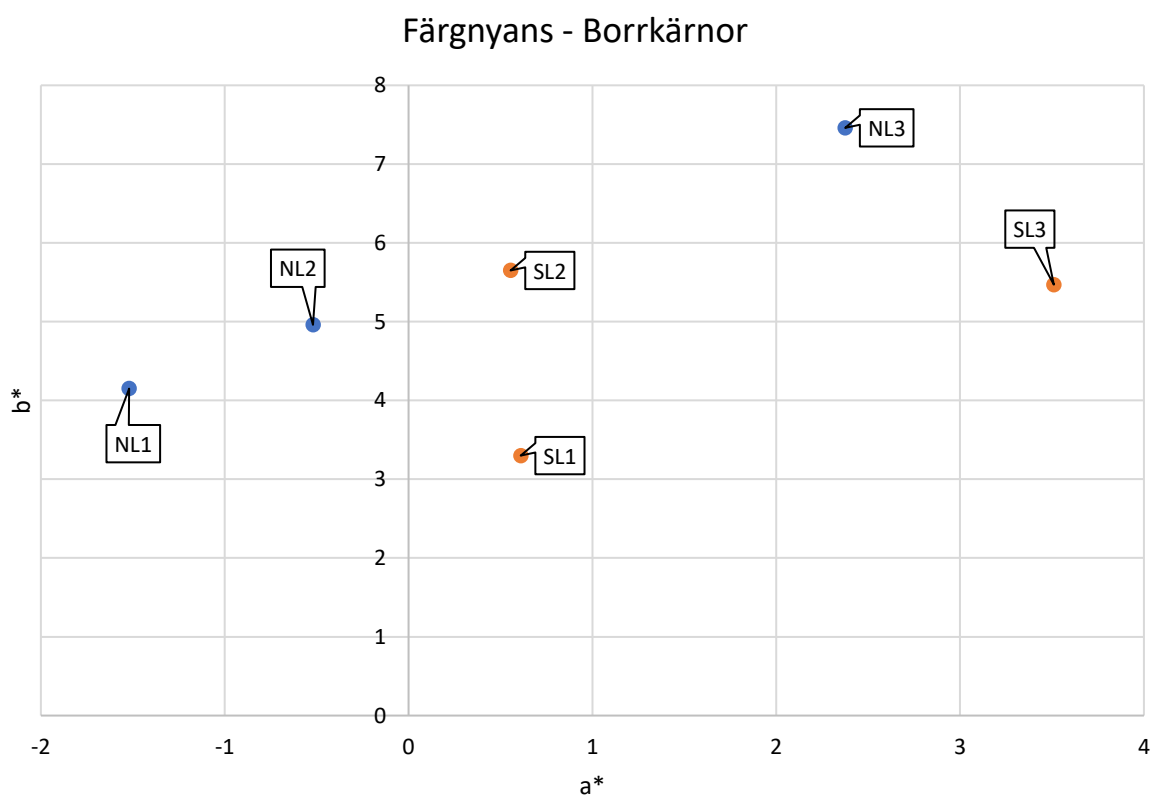
I numerisk undersökning under delsteg 3 analyserades ljushetsparametrarna L*, R457, Rx, Ry och Rz. Resultatet visar på att materialet från Södra länkens prov 2 har högst ljushetsvärden följt av, i fallande ordning, NL1, NL2, NL3, SL3 och sist SL1, se Figur 5.13. Sett till bergartsinnehåll gav de tre proverna innehållandes ljus metavulkanit samt ljus kvartsit höga ljushetsvärden medan prover innehållande porfyr och granit resulterade i lägre ljushetsvärden.



Figur 5.13. Ljushetsvärden enligt parametrarna L*, R457, Rx, Ry samt Rz för prover taget i Norra och Södra länken i Stockholms tunnelnät.

Som referens till ovan redovisade ljushetsresultat genomfördes även en okulär bedömning av materialens ljushet tillsammans med representanter på Trafikverket. Dessa personer arbetar i dagsläget med bedömning av stenmaterials ljushet i befintliga och kommande vägbeläggningar. Stenmaterialet från NL1, NL2 och SL2 klassades i den okulära bedömningen som ljusa medan stenmaterialet från NL3, SL1 och SL3 bedömdes vara mörka.

Vidare utvärderades bergmaterialens färgnyans (a^* - och b^* -värden) i ett koordinatdiagram, se Figur 5.14, samt dess färginverkan baserat på avståndet från origo, Tabell 5.6.



Figur 5.14. Visualisering av beläggningarnas färgnyanser. X-axeln, a^* , beaktar inblandning av (-) grön/ (+) röd och y-axeln, b^* , beaktar färgnyansens inblandning av: (-) blå/ (+) gul.

Samtliga material har positiva b^* -värden och har därmed en gul ton. Materialet från fyra av borrkärnorna (SL1, SL2, SL3 och NL2) har även positiva a^* -värden, vilket innebär att de även har ett rött inslag. Dessa provers färgnyans är därmed gul/röd. NL1 och NL2 har negativa a^* -värden och har i stället en gul/grön färgnyans. Sett utifrån avstånd till origo, och därmed stenmaterialets inslag av färg, har NL1 minst färginslag ($b^* \approx -1,5$, $a^* \approx 4$) medan NL3 har störst avstånd till origo.

Tabell 5.6. Färginverkan (avstånd från origo) samt ljushetsvärde (L^* och R457) för borrproverna från Norra och Södra länken.

Borrkärna	Avstånd origo	L^* (%)	R457
Norra länken 1	4	54	20
Norra länken 2	5	52	18
Norra länken 3	8	48	14
Södra länken 1	3	44	12
Södra länken 2	6	55	21
Södra länken 3	7	46	13

Slutsats – Delsteg 3

- De numeriska resultaten från delsteg 3 visar att Norra länken 1 (NL1), NL2 och Södra länken 2 (SL2) har ljushetsvärden överstigande $L^*=50\%$, medan NL3, SL1 och SL3 har värden understigande $L^*=50\%$.
 - Baserat på resultatet i delsteg 2 och 3 fastslogs tillsammans med representanter från Trafikverket $L^*\geq 50\%$ som ett numeriskt riktvärde för att bedöma stenmaterials ljushet.
- Materialet från Norra länken 1 (NL1), Norra länken 2 (NL2) och Södra länken 2 (SL2) ansågs i den okulära bedömningen klara Trafikverkets nuvarande ljushetskrav medan stenmaterialet från NL3, SL1 och SL3 bedömdes vara för mörka.
 - Informationen från Trafikverkets okulära bedömning och de numeriska data som tagits fram i föreliggande studie visar på stor samstämmighet. Detta medför att numeriska riktvärden för ljushet kan tas fram och användas som underlag till kravställning.

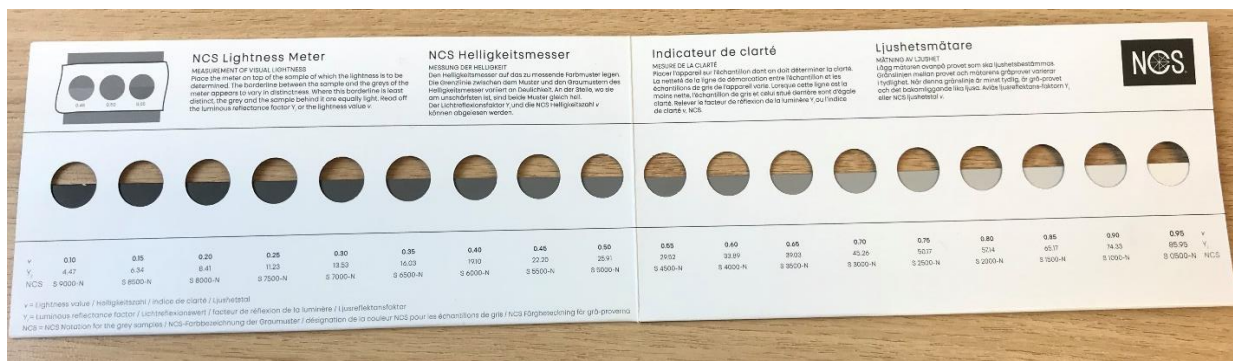
5.4 Delsteg 4. Numeriska riktvärden för ljushet

Inför framtagning av numeriskt värde genomfördes en andra okulär bedömning av samtliga material med fraktionsstorlek 1–2 mm, se Figur 5.15. Inför bedömningen lades materialen bredvid varandra i syfte att möjliggöra för jämförelser.



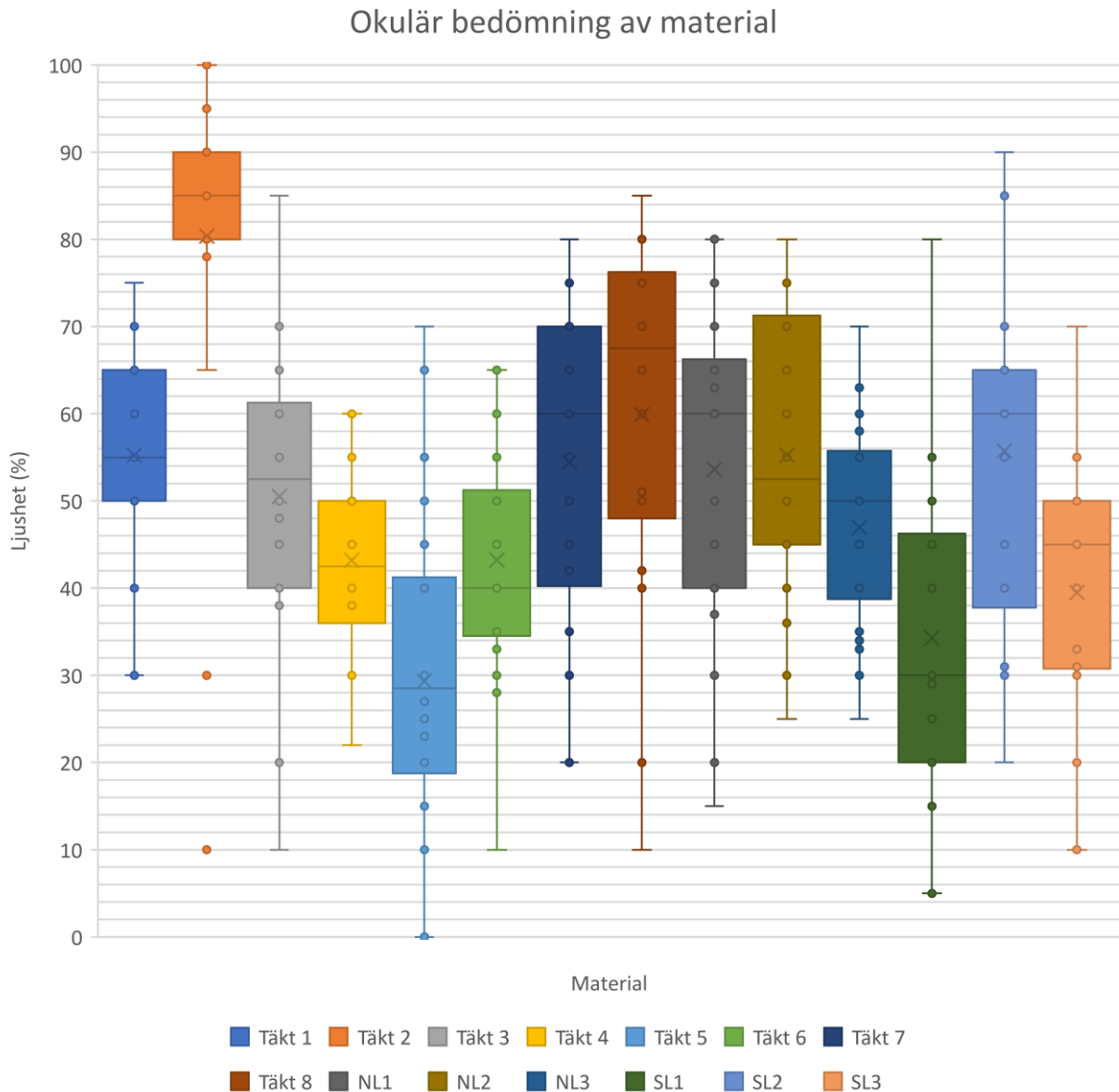
Figur 5.15. Samtliga material som användes under projektets gång. 1–8 representerar material från olika täkter, NL1-3 är material från Norra länken och SL1-3 är taget från Södra länken.

I bedömningen fick respondenterna rangordna materialens ljushet mellan 0–100, där 100 motsvarar en perfekt vit yta och 0 en helt svart yta. Totalt genomförde 22 personer den okulära bedömningen. Till hjälp fanns verktyget "lightness meter", se Figur 5.16.



Figur 5.16. Ljushetsmätare som kan användas för okulär bedömning.

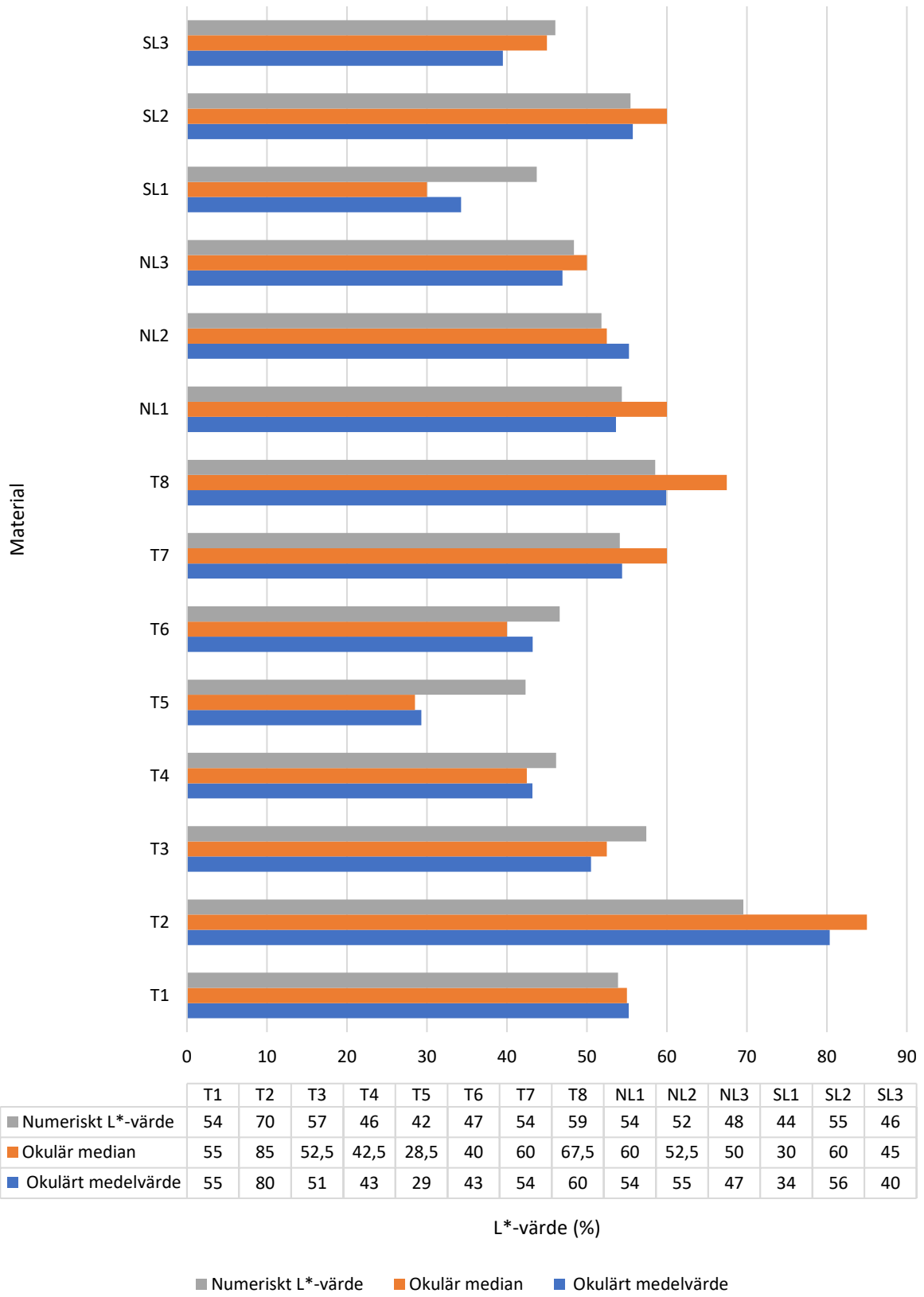
Resultatet av den okulära bedömningen visar på en relativt stor spridning mellan materialens bedömda ljushet, se Figur 5.17.



Figur 5.17. Okulär bedömning av materialet från täkt 1–8 samt från Norra länken (NL1-3) och Södra länken (SL1-3). Analysen visar på en relativt stor spridning mellan respondenternas bedömning på materialens ljushet.

I okulär bedömning uppvisades låg skillnad mellan medelvärde och median, se Figur 5.18. Eftersom antalet respondenter är relativt få visar detta på en övergripande samstämmighet mellan respondenterna. Låg variation uppvisas även vid jämförelse med uppmätta numeriska L*-värden från delsteg 1–3, och störst samstämmighet finns mellan numeriskt L*-värde och det okulärt bedömda medelvärdet. För T2 och T5 skiljer sig det okulära resultatet mest. Detta antas bero på att materialen från T2 och T5 representerade ytterligheterna under testningen och kan ha använts som referens mot övriga material. Generella kommentarer från respondenterna tyder på att röda och blandade material är svåra att bedöma ljushetsmässigt.

Ljushetsvärden - okulärt och numeriskt



Figur 5.18. Ljushetsvärden från okulär bedömning samt uppmätta numeriska värden från delsteg 1–3.

Baserat på numeriska analyser i delsteg 1–3 samt okulär bedömning av materialet har numeriska riktvärden för ljushetsparametrar räknats fram. Denna slutsats bör ses som en rekommendation utifrån den information som framkommit i projektet.

Förslag till numeriska värden baseras på följande antaganden:

- Stenmaterialens ljushetsvärden förändras logaritmiskt mellan fraktionsstorlek. Vid finkorniga fraktioner uppnås höga ljushetsvärden och vid en fraktionsstorlek om 1–2 mm planar ljushetsvärdena ut. De numeriska värden som presenteras baseras på en fraktionsstorlek om 1–2 mm.
- Ljushetsparametrarna R_{457} , L^* , R_x , R_y och R_z korrelerar med varandra och ett numeriskt värde kan ansättas oberoende av parameter som utgångspunkt.
- Korrelation mellan ljushet och färgnyans kan inte fastställas och ett numeriskt värde ansätts därmed ej baserat på materialens färgnyans.
- Stenmaterialens ljushet och färgnyans förändras vid fuktiga förhållanden. Numeriska värden baseras på torra förhållanden i laborationsmiljö.
- God samstämmighet med resultatet från okulär bedömning stärker numerisk analys.

Ett numeriskt värde för ljushetsparametrarna L^* , R_{457} , R_x , R_y samt R_z beräknades baserat på samtliga stenmaterials samtliga fraktioner, se Figur 5.19. Beräkningen skedde i tre steg; först togs medelvärdet fram för samtliga materials respektive fraktioner. Därefter beräknades medelvärdet per stenmaterial och slutligen beräknades medelvärdet för samtliga stenmaterials totala medelvärde.



Figur 5.19. Modell för framtagning av ljushetsvärden.

Baserat på resultatet i delsteg 2 och 3 fastslogs tillsammans med representanter från Trafikverket $L^* \geq 50$ som ett numeriskt riktvärde för att bedöma stenmaterials ljushet.

För att fastslå övriga parametrars miniminivå för ett stenmaterials ljushet vid krav om ljusa vägbeläggningar användes $L^*=50$ som referens tillsammans med antagandet om korrelationen mellan ljushetsparametrar. I Tabell 5.7 redovisas föreslagna ljushetsvärden för respektive parameter.

Tabell 5.5. Föreslagna värden för respektive ljushetsparameter.

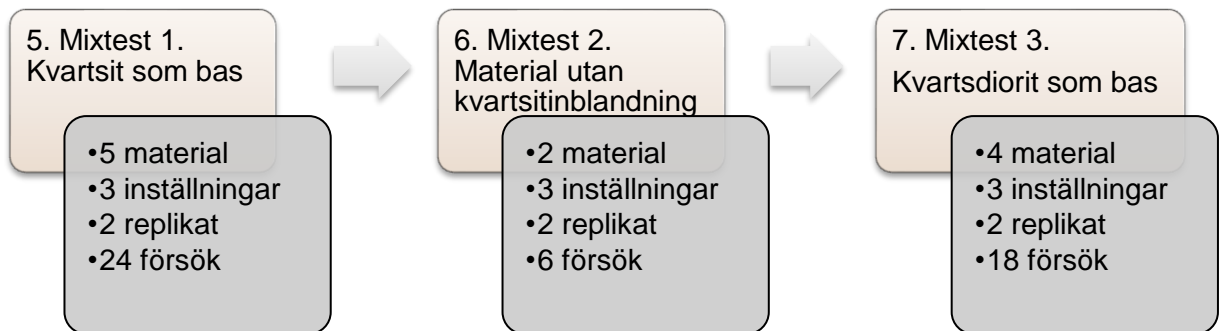
OM L=	50
R457	16
Rx	22
Ry	21
Rz	16

I Tabell 5.8 återges parametrarnas riktvärden i relation till täktmaterialet respektive proverna från befintliga beläggningar. Rödmarkerade värden avser material som ej uppnår föreslagna ljushetsnivåer.

Tabell 5.8. Visualisering av ljushetsvärden från delsteg 2 och 3. Rödmarkerade värden avser material som ej uppnår föreslagna ljushetsvärden enligt Tabell 5.7.

	Bergart	R457	Rz	Ry	Rx	L*
Täkt 1	Granit	17	17	22	25	54
Täkt 2	Kvartsit	32	32	41	43	70
Täkt 3	Metavulkanit	22	22	26	26	57
Täkt 4	Porfyr	13	13	16	18	46
Täkt 5	Porfyr	12	12	13	13	42
Täkt 6	Metavulkanit	13	13	16	17	47
Täkt 7	Metavulkanit	19	18	22	23	54
Täkt 8	Kvartsdiorit	25	25	27	26	59
NL 1	Kvartsit/ Metavulkanit	20	20	22	22	54
NL 2	Kvartsit/ Metavulkanit/ Granit	18	18	20	20	52
NL 3	Granit	14	14	17	19	48
SL 1	Porfyr	12	12	14	14	44
SL 2	Kvartsit/ Metavulkanit/ Granit	20	20	24	24	55
SL 3	Porfyr	13	13	15	17	46

Föreslagna ljushetsvärden användes i projektets senare delsteg, Figur 5.20, som referens för att bedöma vilka materialblandningar som teoretiskt sett skulle kunna bedömas vara tillräckligt ljusa för att använda i vägbeläggningar med ljushetskrav.



Figur 5.20. Projektets efterföljande delsteg som analyserats med hjälp av föreslagna ljushetsvärden.

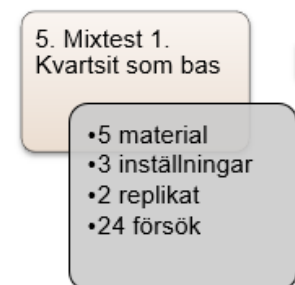
5.5 Delsteg 5. Blandningar med kvartsit som bas

I det första blandningsförsöket blandades bergmaterial med fraktionsstorlek 1–2 mm från täkt 1, 3, 4 och 5 med en viktprocenthalt om 25 %, 50 % respektive 75 % med bergmaterialet från täkt 2.

Ljushetsmässigt klassas materialen från täkt 1 och 3 som ljusa medan materialen från täkt 4 och 5 klassas som mörka. Gällande färgnyans, eller vithet, är materialen från täkt 1 och 4 röda medan materialen från täkt 3 och 5 är gråa. Även kvartsiten från täkt 2 har en röd/gul färgnyans.

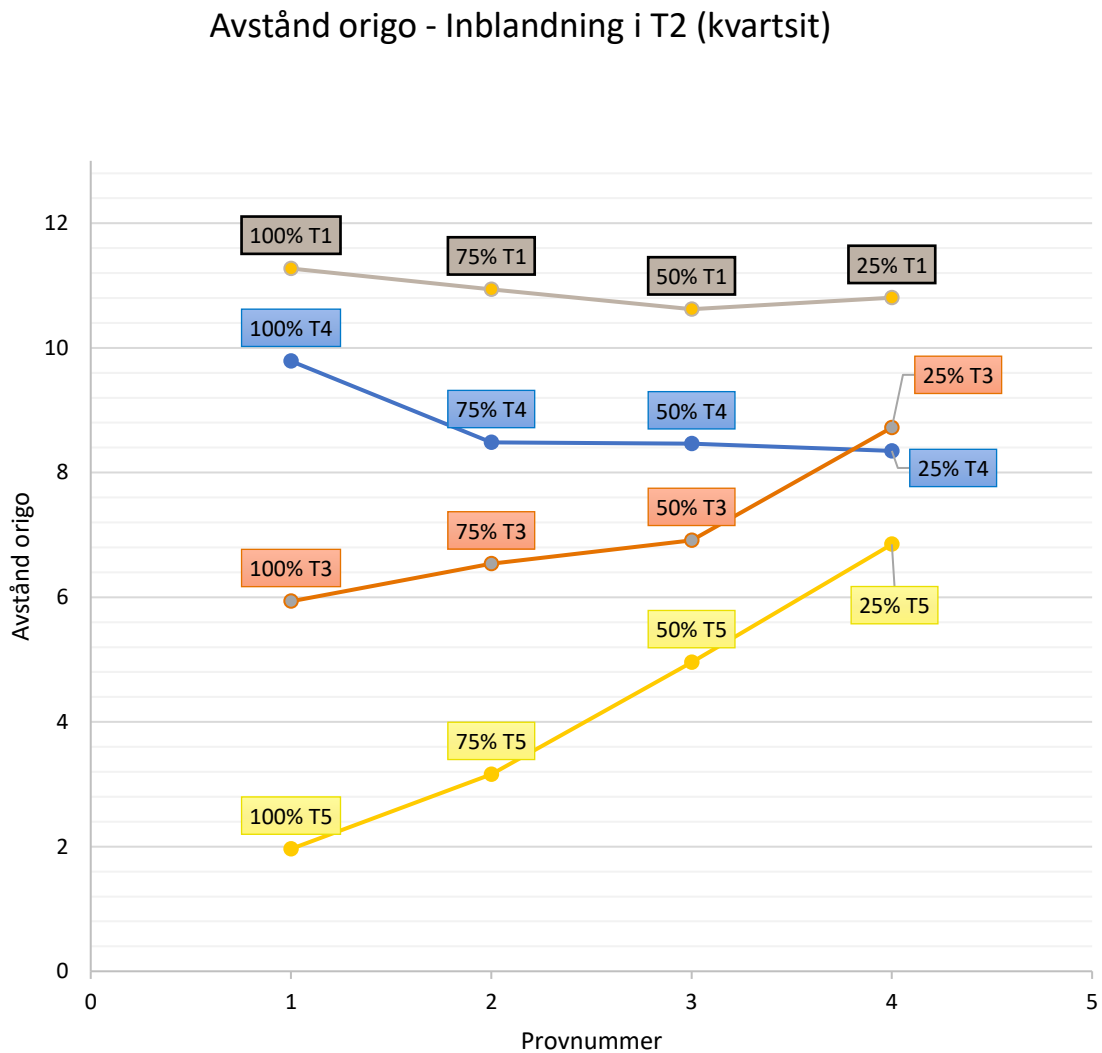
Inför försöket fanns följande frågeställningar:

- Hur påverkar materialens färgnyans blandningens ljushet?
- Hur påverkas ljusheten vid olika vikt-% inblandning av andra bergmaterial?
- Vilken vikt-% av andra material kan blandas i kvartsiten och fortfarande klara uppsatta ljushetsvärden?



Resultatet visar på att ljushet och färgnyans förändras för varje material ju mer kvartsit som tillsätts i blandningen. Beroende på respektive enskilda materials inneboende egenskaper förändras ljushet och färgnyans i olika utsträckning för varje blandning.

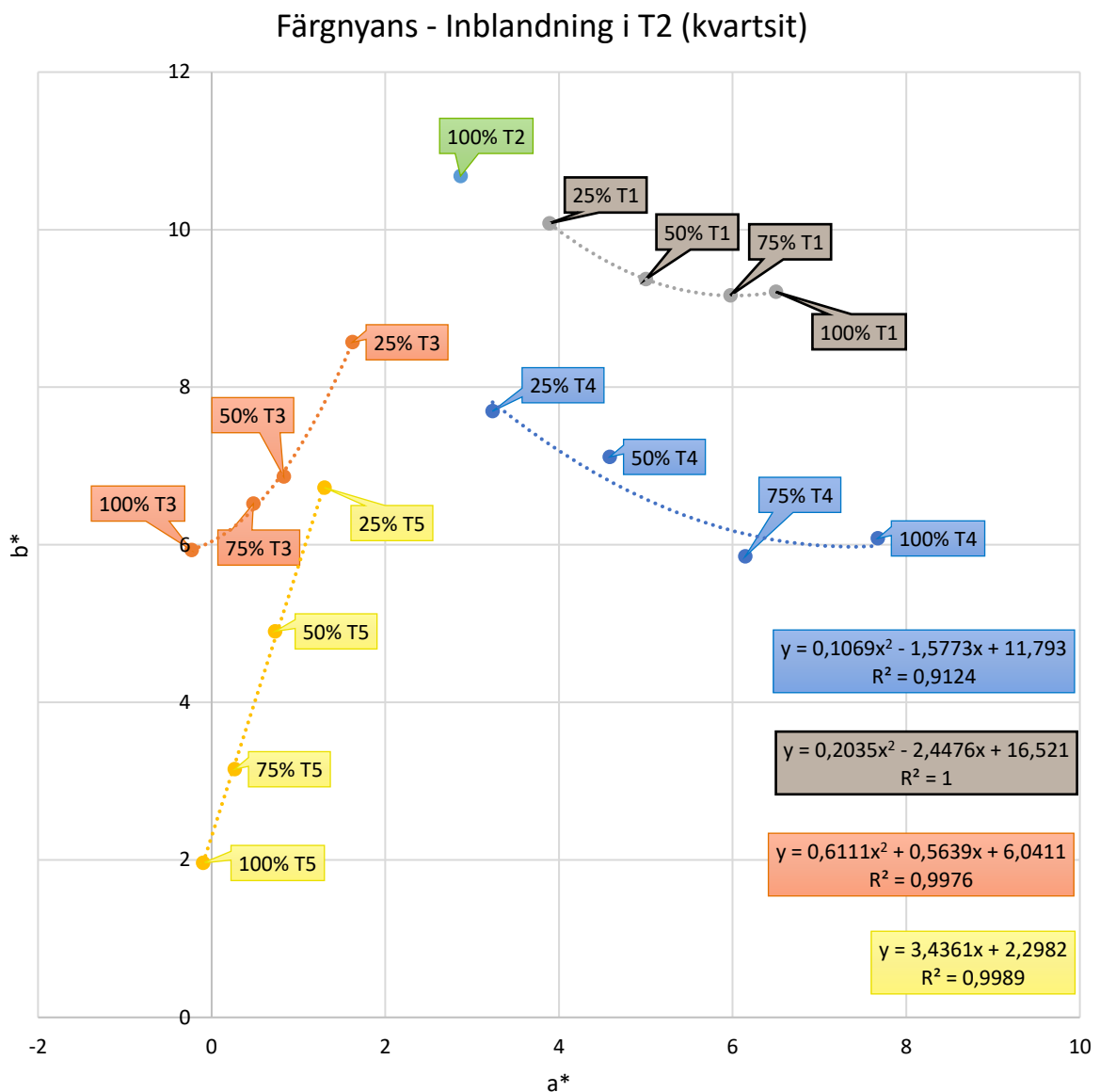
Färgpåverkan mäts enligt avstånd från origo. Ju närmre origo materialet befinner sig, desto mindre påverkan uppmätts i materialet. Färgpåverkan för blandförsöket i delsteg 5 visualiseras i Figur 5.21.



Figur 5.21. Blandningarnas avstånd från origo förändras vid olika viktprocents inblandning i kvartsit.

Blandningarnas avstånd från origo förändras vid olika viktprocents inblandning i kvartsit. Materialet från tåkt 1 och tåkt 4 får lägre färgpåverkan ju mer kvartsit som blandas i medan tåkt 3 och 5 får ett större inslag av färg. Detta kan bero på att tåkt 1 och 4 hade större färgpåverkan i oblandat tillstånd än tåkt 2 medan tåkt 3 och 5 hade lägre färgpåverkan än tåkt 2 som oblandade material.

Blandningarnas färgnyans, a^* och b^* , redovisas i Figur 5.22. Beroende på ingående mängd kvartsit i blandningarna förändrades materialets färgnyans i varierande storleksgrad. När kvartsit blandades med porfyr från täkt 5 förklarades förändringen bäst genom en linjär funktion medan blandning med material från täkt 1, 3 och 4 uppnådde bäst förklaringsgrad med en polynomfunktion av andra grad.



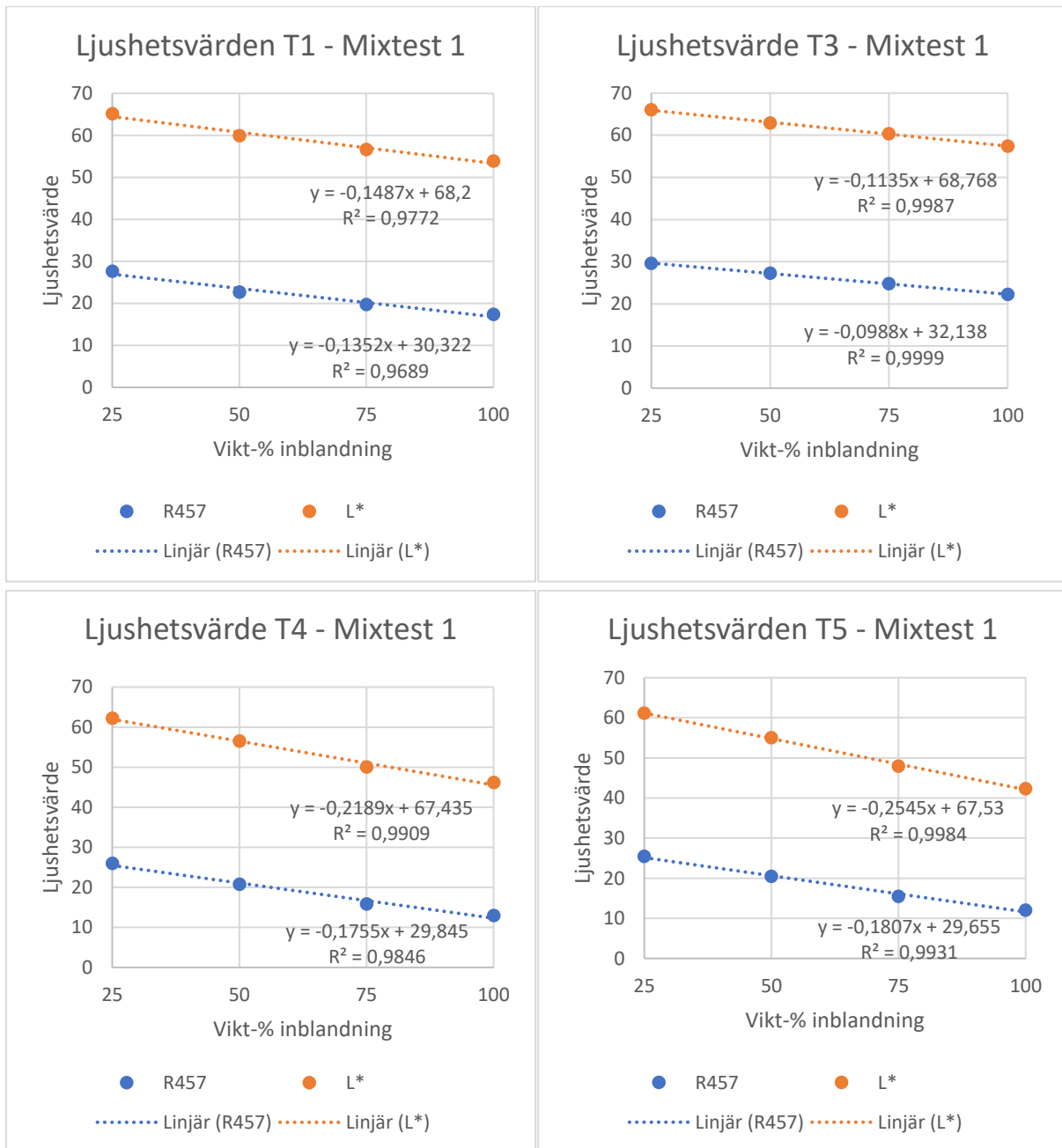
Figur 5.22. Visualisering av blandningarnas färgnyanser. X-axeln, a^* , beaktar inblandning av (-) grön/(+) röd och y-axeln, b^* , beaktar färgnyansens inblandning av: (-) blå/ (+) gul. Materialet från täkt 1 återfinns under grå markering, Täkt 3 under orange markering, Täkt 4 är blåmarkerat och täkt 5 visas i gul markering. Samtliga material återfår en god förklaringsgrad (R^2).

Vidare blev samtliga blandningar ljusare i takt med att mer kvartsit blandades in, se Tabell 5.9 samt Figur 5.23. Varje blandnings ljushet uttrycks väl genom en linjär funktion oberoende av om färgnyans och avstånd från origo ökade, vilket tyder på att materialets färgnyans ej påverkar dess ljushet.

De ljusa bergmaterialen från täkt 1 och 3 uppnår även fortsättningsvis höga ljushetsvärden och klarar föreslagna kravspecifikationer för ljushetsvärden ($R457 \geq 16$ och $L^* \geq 50$) vid samtliga inblandningshalter. Det mörka materialet från täkt 4 klarar föreslagna kravspecifikationer vid cirka 80 % inblandning. För täkt 5 uppnås föreslagna kravspecifikationer vid cirka 69 % inblandning.

Tabell 5.9. Ljushetsvärden (L^* och $R457$) samt färginverkan (avstånd från origo) för täkt 1,3,4,5 vid inblandning i kvartsit, täkt 2. Rödmarkerade data avser resultat som ej uppnår föreslagna kravspecifikationer för ljushet. Ljushetsvärden för materialet från täkt 2 redovisas nedanför övriga material som referensvärde.

Blandningsförsök 1 – Inblandning i T2 (kvartsit)												
Täkt	Enskilt			75%			50%			25%		
	L^*	$R457$	avstånd origo	L^*	$R457$	avstånd origo	L^*	$R457$	avstånd origo	L^*	$R457$	avstånd origo
1	54	17	11	57	20	11	60	23	11	65	28	11
3	57	22	6	60	25	7	63	27	7	66	30	9
4	46	13	10	50	16	8	57	21	8	62	26	8
5	42	12	2	48	15	3	55	20	5	61	25	7
2	70	32	11									



Figur 5.23. Ljushetsvärden enligt R457 och L* för material från täkt 1,3,4,5 blandat med material från täkt 2 i blandningsförsök 1.

Riktningkoefficienterna för de linjära funktionerna för R457 och L* överensstämmer däremot inte helt, se Figur 5.23. Detta betyder att om ljushet ska krävas med ett numeriskt värde bör det framgå vilken parameter som avses.

Slutsats – Blandningsförsök 1

1. Samtliga blandningar uppnådde högre ljushetsvärden som funktion av högre andel inblandad kvartsit. Varje blandnings ljushet beskrivs väl av en linjär funktion.
2. Materialet från täkt 1 och täkt 3 uppnådde föreslagna ljushetsspecifikationer både som oblandat material såväl som vid uppblandning med kvartsit. Materialet från täkt 4 och täkt 5 uppnår föreslagna gränsvärden för ljushet vid 80% respektive 69% uppblandning med kvartsit.
 - Att blanda material med olika bergartsinnehåll bör vara godkänt i beläggningar med ljushetskrav förutsatt att de möter det numeriska gränsvärdet för ljushet.
3. Varje blandning uppnådde högre ljushetsvärden oberoende av om färgnyans och avstånd från origo ökade.
 - Detta tyder på att materialets färgnyans ej påverkar dess ljushet.

5.6 Delsteg 6. Blandningar ej innehållande kvartsit

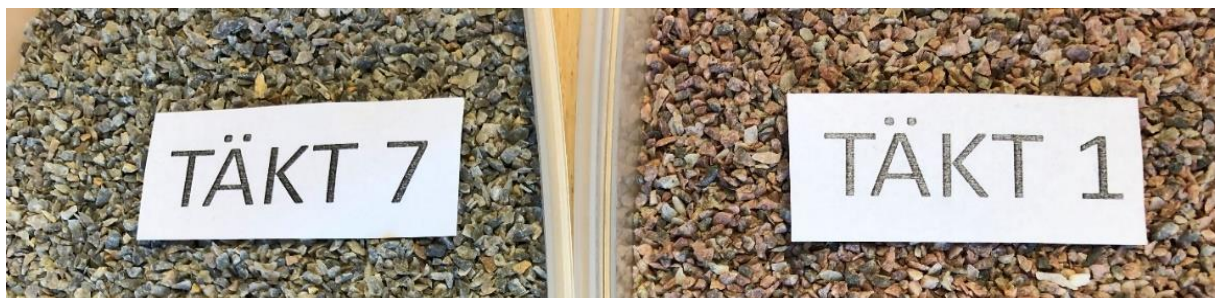
I delsteg 6 blandades två andra ljusa bergmaterial än kvartsit med varandra. Inför försöket valdes en röd granit (täkt 1) samt en grå metavulkanit (täkt 7), se Figur 5.24. Metavulkaniten blandades i graniten i tre inställningar baserat på viktprocenthalterna 25%, 50% respektive 75%. För båda materialen användes enbart fraktionsstorlek 1–2 mm.

6. Mixtest 2.
Material utan
kvartsitinblandning

- 2 material
- 3 inställningar
- 2 replikat
- 6 försök

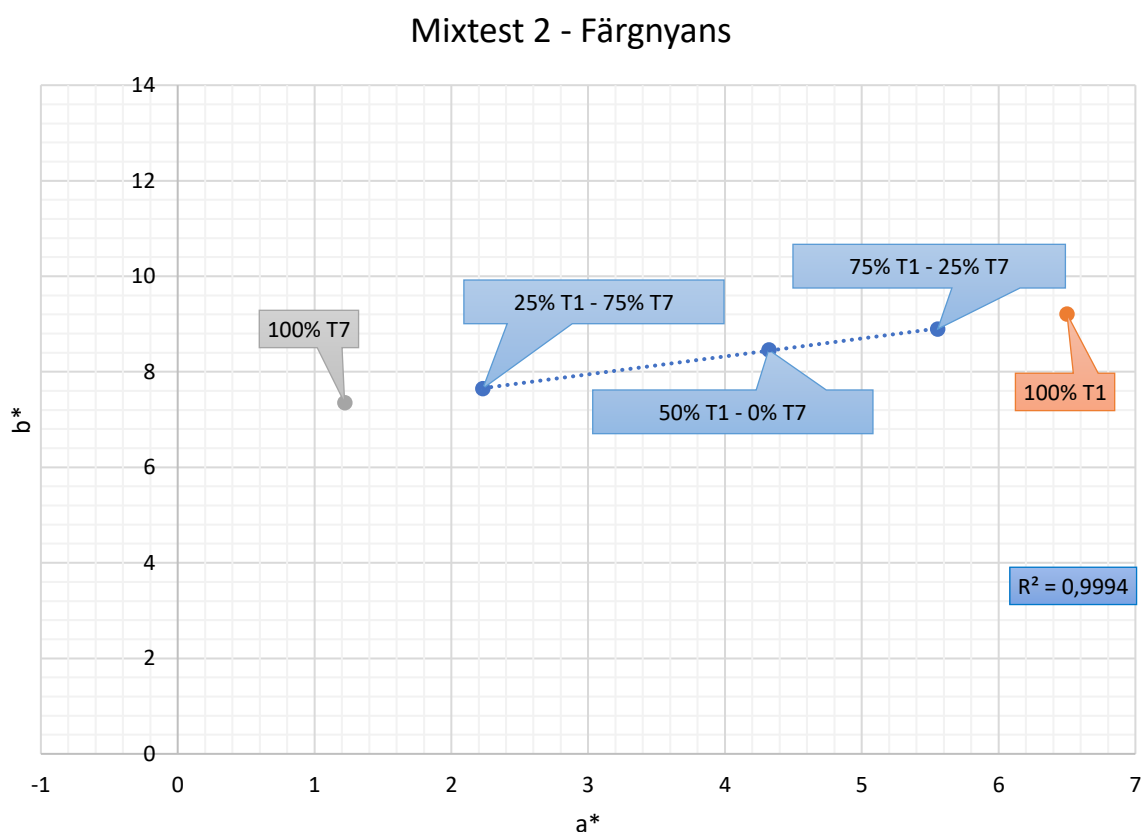
Frågeställning för det andra blandningsförsöket:

- Utredda om ljushetsvärdena påverkas om två ljusa bergmaterial med olika färgnyans blandas. Dessa material skall inte innehålla kvartsit.



Figur 5.24. Material från täkt 7 och täkt 1 testades i projektets andra mixförsök.

Resultatet gällande färgnyans visar på att båda materialens färgnyans i oblandat tillstånd går mot gul/röd om än i olika styrka. Blandningarnas färgnyans får därefter ett linjärt mindre inslag av såväl gult som rött ju mer bergmaterial från täkt 7 som blandas med materialet från täkt 1, se Figur 5.25.



Figur 5.25. Visualisering av blandningarnas färgnyanser. a*, beaktar inblandning av (-) grön/ (+) röd och b*, beaktar färgnyansens inblandning av: (-) blå/ (+) gul. Blandningen förändras linjärt med en god förklaringsgrad.

Färginverkan mäts enligt avstånd från origo. Ju längre från origo desto mer färgpåverkan har materialet. Resultatet av blandningarnas färginverkan samt dess ljushet redovisas Tabell 5.10.

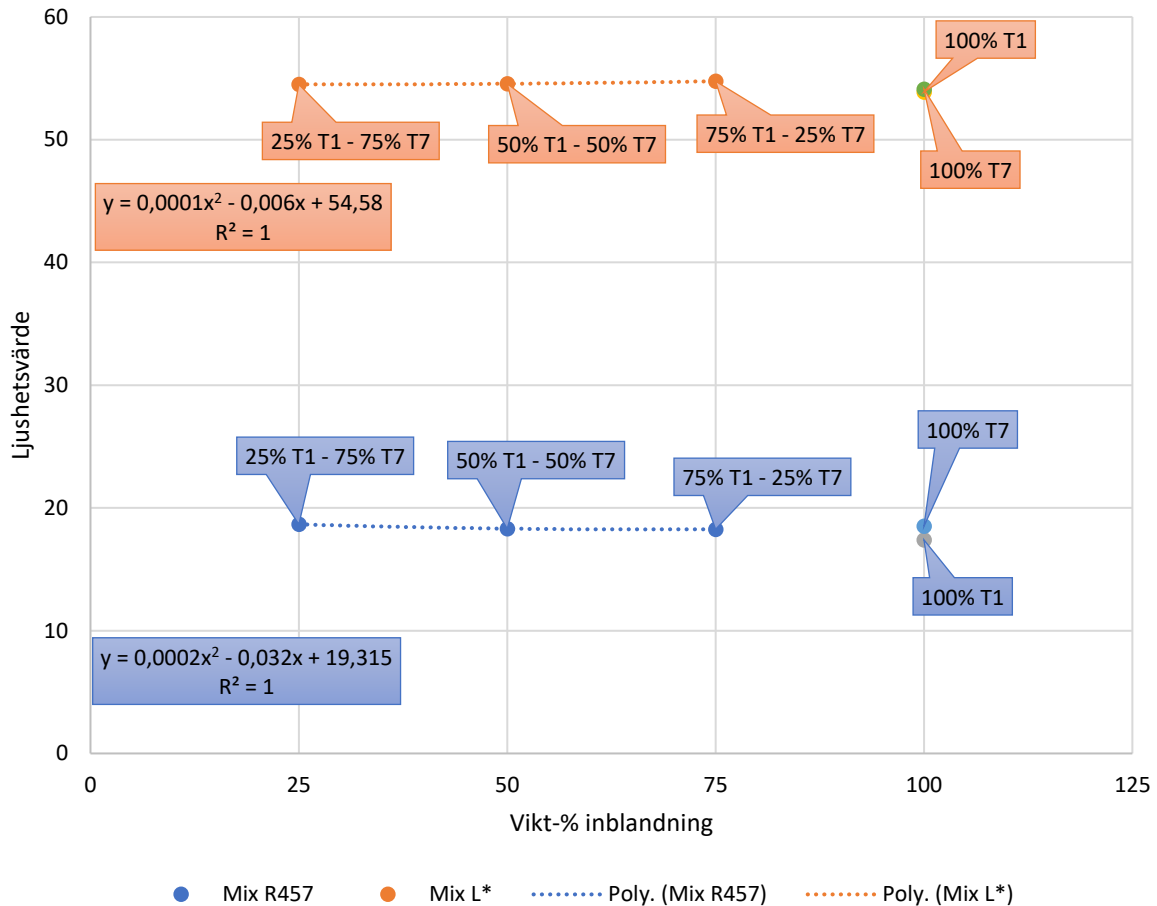
Tabell 5.10. Redovisning av färgpåverkan och ljushet för använda material under blandningstest 2. Färgpåverkan beräknas enligt avstånd från origo och ljusheten mäts i L* och R457.

	Avstånd origo	L*	R457
100% T1 0% T7	11	54	17
75% T1 25% T7	9	55	19
50% T1 50% T7	8	55	19
25% T1 75% T7	8	55	19
0% T1 100% T7	7	54	18

Resultatet visar att oblandat material från täkt 7 har lägst färgpåverkan medan oblandat material från täkt 1 har störst färgpåverkan. Avståndet till origo sjunker därefter i takt med att mer material från täkt 7 används. Gällande ljushet, L* och R457, uppnår samtliga blandningar och oblandade material föreslagna kravspecifikationer för ljushet.

Som kan ses i Figur 5.26 förblir blandningarnas ljushet i detta försök dessutom i det närmaste konstanta oberoende av inblandningshalt. Ett marginellt högre ljushetsvärde uppnås när materialen blandas än i oblandat tillstånd. Detta kan bero på att de mineralologiska förutsättningarna förändrar blandningarnas struktur. Skillnaderna i ljushetsvärde är dock så pass låga att detta är inom ramen för felmarginal. Antalet mätpunkter anses även för få för att dra tydliga slutsatser. Vidare studier på bergmaterials struktur vore att rekommendera för att undersöka hur olika mineralologiska egenskaper påverkar.

Ljushetsvärden - Blandningstest 2



Figur 5.26. Ljushetsvärden enligt R457 och L* för blandningarna i blandningstest 2 samt för oblandade material från täkt 1 och 7. Resultatet visar på en marginell påvisan till polynomfunktion med en god förklaringsgrad.

Ovanstående resultat indikerar att ljusheten inte påverkas av materialets färgnyans. Detta baserat på att ljushetsvärdena förblir relativt konstanta trots att färgnyans och avstånd till origo förändras.

Vid jämförelse av resultaten mellan blandningstest 1 och blandningstest 2 för täkt 1, se Tabell 5.11 nedan, ses att materialet uppnår goda ljushetsvärden i båda testen. I blandningstest 1 blandades materialet från täkt 1 med det färgmässigt liknande materialet med högre ljushetsvärde från täkt 2. I detta test förändrades ljusheten till det bättre medan avståndet till origo var fortsatt högt. När materialet från täkt 1 i stället blandades med ett ljushetsmässigt likvärdigt grått bergmaterial i blandningstest 2 förändrades enbart färgnyans medan ljushetsvärdena förblev konstanta. Även detta indikerar att ljushetsvärdet inte påverkas av materialets färgnyans.

Tabell 5.11. Jämförelse mellan blandningstest 1 och blandningstest 2 avseende ljushet och färginverkan för material från täkt 1.

Jämförelse – Täkt 1 (röd) + Täkt 2 (kvartsit) - Mixtest 1												
Täkt	Enskilt			75%			50%			25%		
	L*	R457	avstånd origo	L*	R457	avstånd origo	L*	R457	avstånd origo	L*	R457	avstånd origo
1	54	17	11	57	20	11	60	23	11	65	28	11
Jämförelse – Täkt 1 (röd) + Täkt 7 (grå) - Mixtest 2												
1	54	17	11	55	19	9	55	19	8	55	19	8

Slutsats – Blandningsförsök 2

- Marginellt högre ljushetsvärde uppvisas för samtliga blandningar än för båda materialen i oblandat tillstånd. Detta kan bero på att de mineralogiska förutsättningarna förändrar blandningarnas struktur.
 - Vidare studier på bergmaterials struktur vore att rekommenderas för att undersöka hur olika mineralogiska egenskaper påverkar ljusheten.
- Färginverkan, som framgår av avstånd från origo, samt färgnyans, a^* och b^* , minskar ju mer material från täkt 7 som blandas i materialet från täkt 1.
 - Ett materials ljushetsvärde påverkas inte av materialets färgnyans.
- Det är möjligt att uteslutande använda lokal sten för beläggningar med ljushetskrav förutsatt att dessa klarar föreslagna ljushetsvärden.
 - Användning av kvartsit är ej nödvändig för att uppnå ljusa vägbeläggningar.

5.7 Delsteg 7. Blandning med kvartsdiorit som bas

I det tredje blandningsförsöket blandades bergmaterial från täkt 4 (porfyr), täkt 5 (porfyr) och täkt 6 (metavulkanit) med kvartsdiorit från täkt 8, se Figur 5.27. Inblandningen av kvartsdiorit skedde enligt viktprocentsfördelningen 25%, 50% samt 75%. Samtliga blandningar baserades på material med fraktionsstorlek 1–2 mm.

7. Mixtest 3.
Kvartsdiorit som bas

- 4 material
- 3 inställningar
- 2 replikat
- 18 försök

Ljushetsmässigt klassas materialet från täkt 4, 5 och 6 som mörka och uppnår ej föreslagna ljushetsvärden. Gällande färgnyans räknas materialet från täkt 4 och täkt 6 som röda medan täkt 5 är grått. Kvartsdioriten från täkt 8 är både ljus och med ett minimalt inslag av färgpåverkan.

Frågeställning inför försöket:

- Kan mörka material med låg respektive hög färginverkan klara föreslagna ljushetskrav vid en blandning med ett ljust, färglöst material.

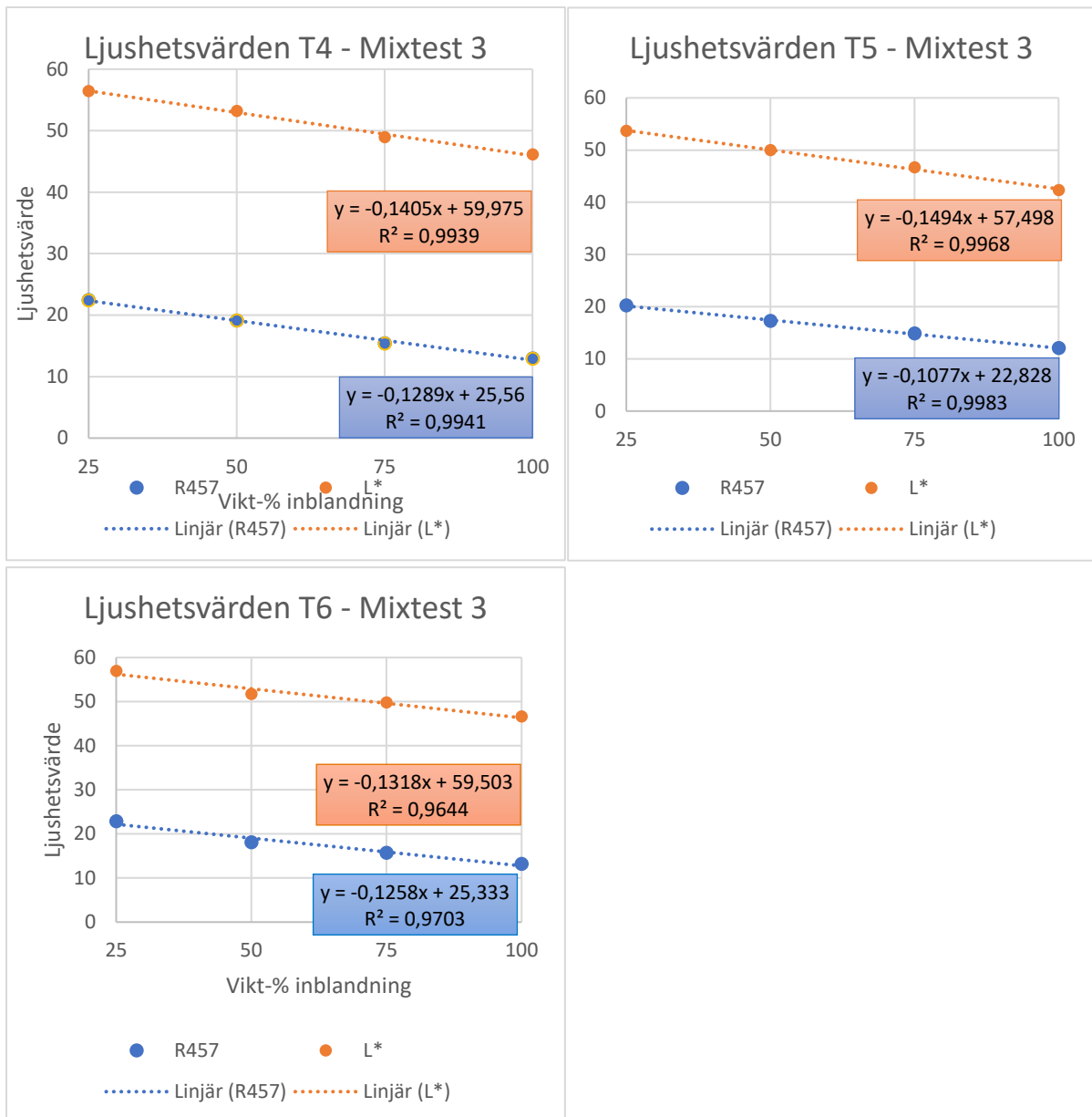


Figur 5.27. Material från täkt 4,5,6 och 8 analyserades under projektets tredje blandningsförsök.

Resultatet visar på att samtliga material uppnådde högre ljushetsvärden vid inblandning av kvartsdiorit än i oblandat tillstånd, se Tabell 5.12 samt Figur 5.28. Detta oberoende av materialens färginverkan och färgnyans.

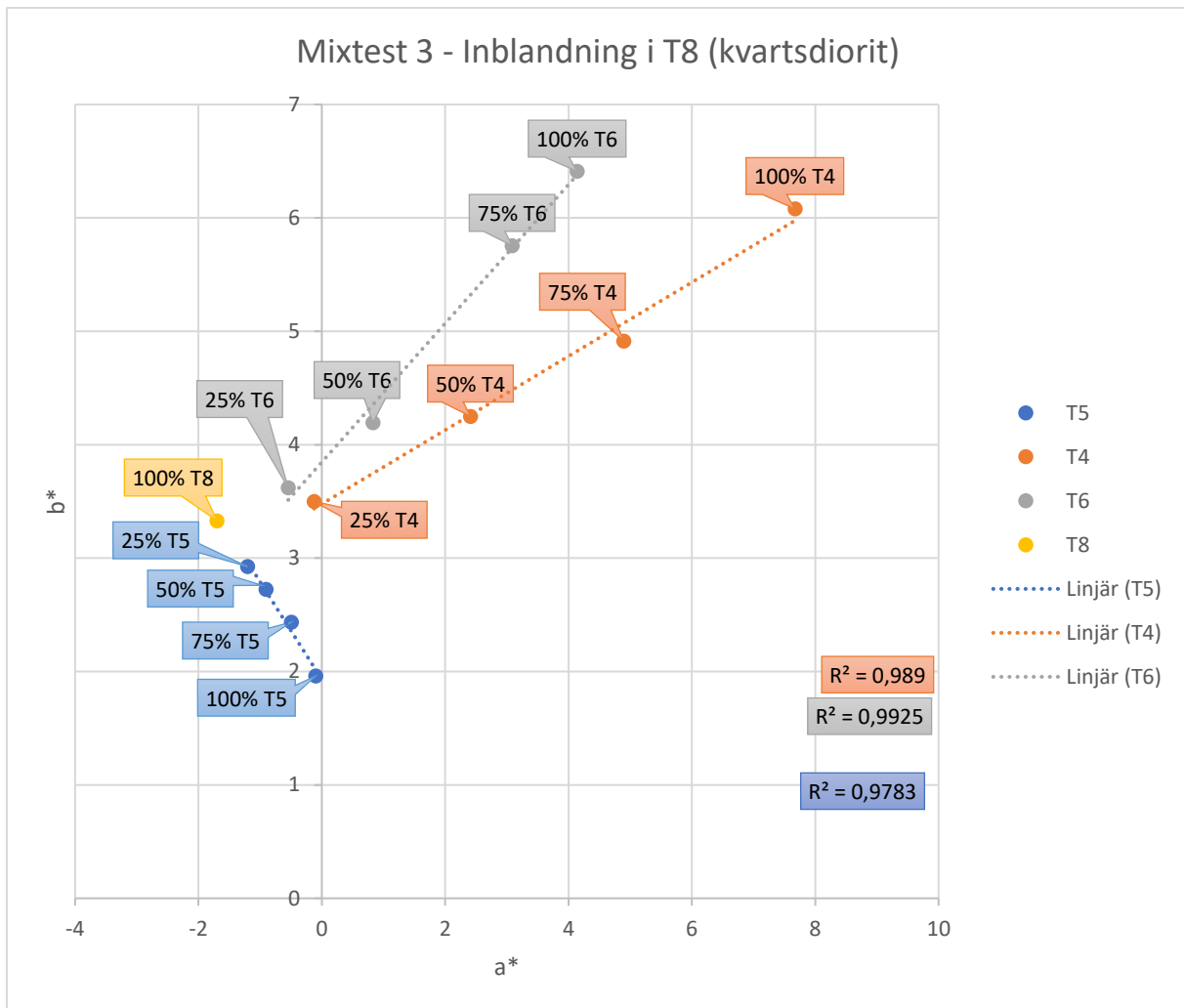
Tabell 5.12. Redovisning av färgpåverkan och ljushet för använda material under blandningstest 3. Färgpåverkan beräknas enligt avstånd från origo och ljusheten mäts i L* och R457. Materialets från täkt 8 redovisas separat i nedkant som referens.

Blandningstest 3 – Inblandning i T8 (kvartsdiorit)												
	Enskilt			75%			50%			25%		
Täkt	L*	R457	avstånd origo	L*	R457	avstånd origo	L*	R457	avstånd origo	L*	R457	avstånd origo
4	46	13	10	49	15	7	53	19	5	56	22	4
5	42	12	2	47	15	2	50	17	3	54	20	3
6	47	13	8	50	16	7	52	18	4	57	23	4
8	59	25	4									



Figur 5.28. Ljushetsvärden enligt R457 och L* för blandningarna i blandtest 3. Resultatet visar på en linjär funktion för respektive material med en god förklaringsgrad.

Färginverkan, avstånd från origo, förändras linjärt ju mer kvartsdiorit som inblandas. Detsamma gäller för blandningarnas färgnyans, a^* och b^* , se Figur 5.29. Samtliga blandningar uppnår negativa a^* -värden vid blandning av 25% täktmaterial och 75% kvartsdiorit. Ett negativt a^* -värde visar på att blandningen går mot grön/gul i stället för mot röd/gul.



Figur 5.29. Visualisering av blandningarnas färgnyans, där a^* beaktar inblandning av (-) grön/ (+) röd och b^* , beaktar färgnyansens inblandning av: (-) blå/ (+) gul. Material från täkt 4 visualiseras under orange markering, täkt 5 är blåmarkerat och täkt 6 är grått. Oblandat material från täkt 8 finns även som referenspunkt och är gulmarkerat.

En jämförelse mellan blandningarna i blandningstest 1 och blandningstest 3, se Tabell 5.13, ger att täkt 4 och 5 uppnår föreslagna ljushetsvärden vid 70% respektive 50% vid inblandning i kvartsdiorit. Vid inblandning i kvartsit uppnår materialet från täkt 4 föreslagna ljushetsvärden vid en inblandningshalt om cirka 80 % och täkt 5 vid cirka 69 %.

Gällande färgnyans och färginverkan har kvartsit (täkt 2) större inslag av färg än kvartsdiorit (täkt 8). Avståndet till origo är betydligt större vid blandning med kvartsit, ändå uppnås bättre ljushetsvärden i blandningstest 1. Därför kan slutsatsen dras även från detta försök att ljushet inte beror av materialets färgnyans eller färginverkan.

Tabell 5.13. Jämförelse mellan blandningsförsök 1 och 3 avseende ljushet och färgpåverkan. Rödmärkade värden visualiserar material som ej uppnår föreslagna ljushetsvärden.

Jämförelse - Kvartsdiorit (blandningstest 3)												
	Enskilt			75%			50%			25%		
Täkt	L*	R457	avstånd origo	L*	R457	avstånd origo	L*	R457	avstånd origo	L*	R457	avstånd origo
4	46	13	10	49	15	7	53	19	5	56	22	4
5	42	12	2	47	15	2	50	17	3	54	20	3
8	59	25	4									
Jämförelse - Kvartsit (blandningstest 1)												
4	46	13	10	50	16	8	57	21	8	62	26	8
5	42	12	2	48	15	3	55	20	5	61	25	7
2	70	32	11									

Det är tydligt att mörka material kan användas i beläggningar med ljushetskrav. Eftersom bergmaterial är heterogent beträffande både ljushet och färg behöver andelen mörka material analyseras vid varje tillfälle.

I detta projekt har störst ökning av ljushet uppnåtts vid inblandning i kvartsit. Projektet visar också att även andra bergmaterial än kvartsit kan användas för att uppnå ljusare vägbeläggningar och att en kravställning inte bör göras utifrån enbart användning av kvartsit. Att öppna upp kravställningen för andra bergmaterial än kvartsit skulle gagna hela branschen samtidigt som potentiellt kortare transporter skulle ha en positiv inverkan på både klimat och miljö. I den här studien har enbart kvartsit och kvartsdiorit från en täkt vardera analyserats. Andra varianter av kvartsit och kvartsdiorit har inte undersökts och variationer av dess ljushetsvärden är högst trolig.

Slutsats – Blandningstest 3

1. Inblandning av det ljusa, färglösa materialet kvartsdiorit från täkt 8 resulterar i blandningar med betydligt mindre färginverkan än vid uppblandning med kvartsit från täkt 2. Ändå uppnås högre ljushetsvärden vid uppblandning med kvartsit från täkt 2.
 - Ljushet beror inte av materialets färgnyans eller färginverkan.
 - Andra bergmaterial än kvartsit kan användas för att uppnå ljusa vägbeläggningar.
2. Samtliga bergmaterial i blandningsförsök 3 uppnådde högre ljushetsvärden vid uppblandning med kvartsdiorit än i oblandat tillstånd. Detta oberoende av materialens färginverkan och färgnyans.
 - Mörka material kan användas i beläggningar med ljushetskrav.
3. En kravställning på ljushet bör göras utifrån fler bergarter än enbart kvartsit.
4. Att öppna upp för användning av andra bergarter än kvartsit skulle gagna hela branschen samtidigt som det värnar om både klimat och miljö.

6 Summering och slutsatser

I detta projekt har slutsatserna sammanfattats i punktform indelat i områdena:

- Litteraturstudie
- Faktorer – påverkan på ljushet och färgnyans
- Bergarter – påverkan på ljushet
- Numeriskt ljushetsvärde

6.1 Litteraturstudie

- Albedo är ett mått på reflektionsförmåga, eller den andel av en kortvågig strålning som reflekteras från en belyst yta. Ett albedo på 1,00 betyder att allt ljus reflekteras och ett albedovärde på 0,00 betyder att inget ljus reflekteras. En nyasfalterad väg har vanligtvis ett albedo på mellan 0,04–0,06, vilket är överförbart med att 4–6% av solinstrålningen reflekteras (Li & Kendall, 2013; Taha et al., 1992) och ökar sedan till 0,09–0,18 i takt med att beläggningen åldras (Santamouris et al., 2011).
- Beläggningar med ett högre albedo, och högre reflektionsförmåga, kan ändra förutsättningarna i den omgivande miljön när instrålningen reflekteras mot närliggande objekt. Grad av påverkan beror på det närliggande objektets egna albedo. (Yang et al., 2015)
- *I Urban Canyons* (en vägmiljö som flankeras av byggnader, väggar och tak i en urban omgivning) kan solinstrålningen fångas i stadsmiljön och skapa ytterligare reflektioner. Att öka vägbeläggningens albedo i en *Urban Canyon* kommer därför medföra att mer solinstrålning reflekteras i omgivande väggar, vilket kan ha en negativ effekt. (Mohajerani et al., 2018)
- För att motverka suboptimering bör vägbeläggningens ljushetsvärde optimeras ur ett helhetsperspektiv. Varje enskild miljö har olika förutsättningar och därför bör omgivande förutsättningar beaktas då ljushetsvärden ska bestämmas. (Xu et al., 2020; Yang et al., 2015; Mohajerani et al., 2018)

6.2 Faktorer – påverkan på ljushet och färgnyans

- Ett bergmaterials färgnyans betraktas som konstant oberoende av fraktionsstorlek.
- 3. Ett bergmaterials ljushetsvärde förändras logaritmiskt mellan fraktionsstorlek. Vid finkorniga fraktioner uppnås höga ljushetsvärden och vid en fraktionsstorlek om 1–2 mm planar ljushetsvärdena ut.

4. Det finns en korrelation mellan ljushetsparametrarna L^* , R_{457} , R_x , R_y och R_z . Ett numeriskt värde för ljushet kan därmed bestämmas oberoende av parameter.
5. Bergmaterialens ljushet och färgnyans förändras vid fuktiga förhållanden. Detta är relevant att ha i åtanke när ljushet ska optimeras i ett större sammanhang (ex. förhållandet mellan lodräta och vågräta ytor och material i en större miljö). Kravställning görs därför lämpligast på torrt material för att undvika de variationer fukten introducerar.
6. Ett bergmaterials ljushetsvärde beror ej av dess färgnyans. En kravställning för ljusa vägbeläggningar bör därför endast baseras på ljushet.

6.3 Bergarter – påverkan på ljushet

7. Efter bedömning av bergartsinnehåll i prover från Stockholms tunnelnät visade prover innehållandes ljus metavulkanit samt ljus kvartsit höga ljushetsvärden. Prover innehållande porfyr och granit resulterade i lägre ljushetsvärden.
8. Att blanda material med olika bergartsinnehåll bör vara godkänt i beläggningar med ljushetskrav förutsatt att de möter det numeriska gränsvärdet för ljushet.
9. Användning av kvartsit är ej nödvändig för att uppnå ljusa vägbeläggningar.
10. Lokal sten kan uteslutande användas för beläggningar med ljushetskrav såtillvida att dessa klarar uppsatta numeriska värden för ljushet.
11. Mörka bergmaterial kan användas för beläggningar med ljushetskrav. Då ljushetsvärdet beror av samtliga ingående materials egenskaper bör enskilda blandningar undersökas individuellt.
12. Vidare studier på bergmaterials mineralologiska egenskaper och dess påverkan på ljushetsvärdet rekommenderas.
13. Att öppna upp för användning av andra bergarter än kvartsit skulle gagna hela branschen samtidigt som potentiellt kortare transporter skulle ha en positiv effekt för både klimat och miljö.

6.4 Numeriskt ljushetsvärde

Numeriska ljushetsvärden kan baseras på de data som tagits fram i detta projekt.

Förslag på numeriska ljushetsvärden:

- $L^* \geq 50$
- $R_{457} \geq 16$
- $R_x \geq 22$
- $R_y \geq 21$
- $R_z \geq 16$

Förslagsvis kan en kravställning baseras på ljushetsparametern R_{457} . Denna enhet används av flera andra branscher. Ska färgnyans kravställas i relation till ljushet vore däremot mätsystemet CIELab en bra lösning, i vilket ljushet beräknas med parametern L^* och färgnyans via a^* och b^* . Som framkommit i detta projekt beror inte materialets ljushet på dess färgnyans.

Huruvida en kravställning ska innefatta parametrarna R_x , R_y och R_z är oklart. Att analysera reflektion ur flera perspektiv kan vara av vikt för att skapa en helhetsbild av en miljö. Vidare studier på dess påverkan i olika miljöer vore fördelaktigt.

7 Litteraturförteckning

- Autodesk. (2018). Hämtat från <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/tsarticles/ts/3n8yXE1yR46uqsmlGrBpBe.html>
- Datacolor. (oktober 2014). . Hämtat från : <https://studylib.net/doc/5523974/cs--color-measurements oktober 2023>
- Demir, A. (2020). *Implementation Potential of Light Reflective Asphalt in Oldenzaal: A Sustainable Supply Chain and Urban Perspective*.
- Dieste, A. (2002). *Colour development in Pinus radiata D. Don. under kiln-drying conditions*. University of Canterbury.
- Li, H., & Kendall, J. T. (2013). Field measurements of albedo for different land cover materials and effects on thermal performance. *Build. Environ.*(59), 536-546.
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jefferey-Bailey, T. (2018). The Urban Heat Island Effect, its Causes, and Mitigation, with Reference to the Thermal Properties of Asphalt Concrete. *Journal of Environmental Management*, 522-538.
- Nielsen, B. (2020). *Tillståndsmätning av vägbeläggningars reflektionsegenskaper*. Malmö: Trafikverket.
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - a review of the actual developments. 224-240.
- Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Sol. Energy*, 3085-3102.
- SMHI. (2022). Hämtat från <https://www.smhi.se/en/research/research-departments/air-quality/bright-1.181462>
- Stimson, A. (1974). *Photometry and Radiometry for Engineers*. New York: Wiley&Sons.
- Sushobhan, S., & Roesler, J. (2016). Aging albedo model for asphalt pavement surfaces. *Journal of cleaner production*, 169-175.
- Taha, H., Sailor, D., & Akbari, H. (1992). *High-albedo materials for reducing building cooling energy use*. Berkley, CA: Lawrence Berkley National Laboratory.
- Wright, P. J. (1964). *The measurment of colour*. (Tredje uppl.). London: Hilger&Watts Ltd.
- Xu, X., Swei, O., Xu, L., Schlosser, A., Gregory, J., & Kirchain, R. (2020). Quantifying location-specific impacts of pavement albedo on radiative forcing using an analytical approach. *Environmental science & technology*, 2411-2421.
- Yang, J., Wang, Z.-H., & Kaloush, K. E. (2015). Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a 'silver bullet' for mitigating urban heat island? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 830-843.

8 Bilagor

8.1 Borrtagningsplan Norra och Södra länken

Norra länken 15/6–21

TA2 västlig trafikriktning Norrtullstunneln från Lidingö- Eugenia

ARO 7 och 12–15

Insläppsplats Värtan

Väg E20 sekt. 2/800–5/940



P1- sekt. 3/640 K1
4*100mm



P2- sekt. 4/980 K1
4*100mm



P3- sekt. 5/940 K1
4*100mm

Södra länken Ons 16/6–21

TA1 östgående trafik Årsta- Nacka

ARO 1–5

Väg 75 sekt. 1/585–6/865



P1- sekt. 2/100 K1
4*100mm



P2- sekt. 4/700 K1+K2
3*100mm= 6 borrkärnor



P3- sekt. 6/350 (in på ny
beläggning) K1+K2
4*100mm= 8 borrkärnor