

Ilmakuvaukseen käytettävien filmien  
erotuskyvyn tutkimisesta.

Teknillisen korkeakoulun maanmittaus-  
osastolla tehty diplomityö.

Jyväskylä, joulukuu 1983.

Tekniikan ylioppilas

  
Mauri Laakso



Valvoja: Prof. Einari Kilpelä  
Ohjaajat: TkT Juhani Hakkarainen  
DI Seppo Haapamäki

# SISÄLLYSLUETTELO

## TIIVISTELMÄ

## ALKUSANAT

1. JOHDANTO	1
2. EROTUSKYKY	3
2.1 Yleistä teoriaa	3
2.2 Vaikuttavia tekijöitä	4
2.3 Määrittelyn tarkkuudesta	8
3. KOEJÄRJESTELYT JA TESTIKUVAUKSET	9
3.1 Testikuviot	9
3.2 Kamera	13
3.3 Filmit	14
3.3.1 Kodak Plus-X Aerographic Film 2402	14
3.3.2 Kodak Double-X Aerographic Film 2405	15
3.3.3 Kodak Tri-X Aerographic Film 2403	17
3.4 Suotimet	18
3.4.1 Keltasuodin	18
3.4.2 Interferenssisuotimet	19
3.5 Valotus	21
3.5.1 Valotuksen mittaus	21
3.5.2 Sensitometrinen valotus	21
3.5.3 Kuvan muodostava valotus	22
3.6 Hajavalon simulointi	23
3.7 Kehitys	24
3.7.1 Kehityskoje ja kehite	24
3.7.2 Aika ja lämpötila	25
3.8 Erotuskyvyn arviointi	25
3.8.1 Kriteeri	25
3.8.2 Havaintojen teko	26
4. TUTKITTAVIEN TEKIJÖIDEN VAIKUTUS KUVAUSTULOKSIIN	28
4.1 Yleistä	28
4.2 Kehitysaika ja -lämpötila	28

4.3	Hajavallo	34
4.4	Valotus	36
4.5	Suodin	38
4.5.1	Keltasuodin	38
4.5.2	Interferenssisuotimet	39
4.6	Filmi	40
4.7	Kohteen kontrasti	40
4.8	Muita kuvaustulokseen vaikuttaneita tekijöitä	41
5.	EHDOTUS ILMAKUVAFILMIEN TUTKIMISMENETELMÄKSI	42
5.1	Yleistä	42
5.1.1	Menetelmän periaate	42
5.1.2	Kuvausolosuhteet	42
5.1.3	Koetoistojen määrä	43
5.2	Testikuviot	43
5.2.1	Kontrasti	43
5.2.2	Taustan tummuus	44
5.2.3	Viivataajuus	45
5.3	Valotus	45
5.3.1	Sensitometrinen valotus	45
5.3.2	Kuvan muodostava valotus	46
5.4	Kehitys	47
5.4.1	Aika ja lämpötila	47
5.4.2	Kehitysolosuhteiden seuranta	47
5.5	Erotuskyvyn arviointimenetelmä	48
5.5.1	Erotuskykykriteeri	48
5.5.2	Havaintojen teko	48
5.6	Tutkimustulosten analysointi	49
5.6.1	Tilastolliset menetelmät	49
5.6.2	Muut menetelmät	49
6.	YHTEENVETO	51
	LÄHDELUETTELO	53

**Tekijä ja työn nimi :** Mauri Laakso

Ilmakuvaukseen käytettävien filmien  
erotuskyvyn tutkimisesta

**Päivämäärä :** 13.12.1983

**Sivumäärä :** 53

**Osasto :**

Maanmittausosasto

**Professuuri :** 8.57

Fotogrammetria

**Työn valvoja :** Professori Einari Kilpelä

**Työn ohjaajat :** TkT Juhani Hakkarainen  
DI Seppo Haapamäki

Työn tarkoituksena oli kehitellä menetelmää ilmakuvaukseen käytettävien filmien tutkimista varten. Työssä tutkittiin laboratorio-oloissa kehitysnopeuden ja -lämpötilan, valon hajavalon, käytetyn valon aallonpituuden ja kohteen kontrastin vaikutusta erotuskykyyn. Vertailussa oli mukana kolme Kodakin valmistamaa mustavalkoista filmiä Plus-X, Double-X ja Tri-X.

Tutkimus perustui kehitysnopeuden ja -lämpötilan osalta erotuskyvyn riippumattomuuden tutkimiseen näistä parametreista. Kuvauksista etsittiin erotuskyvyn optimia valotuksen suhteen. Hajavalon vallitessa ja eri suotimilla tehtyjä kuvauksia verrattiin niihin tapauksiin, joissa nämä tekijät eivät olleet mukana. Havaintotyön tarkkuus oli noin 15 %.

Maksimierotuskyky on ilmeisesti riippumaton kehitysnopeudesta ja -lämpötilasta alueilla 16-40 "/min ja 20-24 °C. Keskiharmaan kohteen optimimustuma on 0.7 D tarkasteltaessa keski- ja matalakontrastista kohdetta ja 0.3 D tarkasteltaessa korkeakontrastista kohdetta. Hajavalon vaikutus matalakontrastisiin kuvioihin on suurempi kuin korkeakontrastisiin. Valon aallonpituuden vaikutusta tutkittaessa todettiin, että spektrin punainen pää antoi parhaan ja sininen pää huonoimman tuloksen. On ilmeistä, että kameran sinisen pään värikorjaus on huono ja tulos johtuu siitä. Keskikontrastinen kuvio antoi noin 10 % ja matalakontrastinen noin 30 % huonomman tuloksen kuin korkeakontrastinen kuvio. Plus-X ja Double-X olivat erotuskyvyltään suunnilleen samanlaisia ja Tri-X oli 25-30 % näitä heikompi.

Työ oli lähinnä kokeilevaa, eikä tuloksia pidä sellaisinaan yleistää. Ne antavat käsityksen siitä, mihin tulevassa tutkimustyössä on syytä kiinnittää päähuomio.

## ALKUSANAT

Olen tehnyt tämän diplomityöni suurimmaksi osaksi Teknillisen korkeakoulun fotogrammetrian laboratoriossa. Lopulliseen muotoonsa olen sen saattanut Ilmavoimien Kuvakeskuksessa Tikkakoskella.

Fotogrammetrian laboratorion johtajaa ja työni valvojaa professori Einari Kilpelää kiitän myötämielisestä suhtautumisesta työhöni ja hyvien työskentelyedellytysten luomisesta. Työni ohjaajia TkT Juhani Hakkarasta ja DI Seppo Haapamäkeä kiitän lukuisista hyvistä neuvoista ja antoisista keskusteluista tämän työn aikana.

Fotogrammetrian laboratorion henkilökuntaa kiitän erittäin miellyttävästä työskentelyilmapiiristä. Ilmavoimien Kuvakeskuksen henkilökuntaa kiitän siitä työstä, jonka he ovat laboratorionkokeiden toteuttamisessa tehneet.

Työtoveriani tekn.yo Harri Turusta kiitän erinomaisesta yhteistyöstä ja niistä mielenkiintoisista keskusteluista, joita olemme tämän projektin tiimoilta käyneet. Kiitän myös kaikkia ystäviäni, joilta olen saanut arvokasta henkistä tukea työni aikana.

Jyväskylä, joulukuu 1983

Mauri Laakso

## 1. JOHDANTO

Tämä työ on osa laajaa tutkimusprojektia, jonka nimi on "ilmakuvan tulkittavuuden ja siihen vaikuttavien tekijöiden optimointi". Tutkimuksen päämääränä on löytää vastaus kysymykseen, miten filmiä on valotettava ja kehitettävä parhaan mahdollisen erotuskyvyn saavuttamiseksi. Lähtökohtana on erityisesti ilmakuvauksessa käytettävän filmin valotuksen ja kehityksen problematiikka.

Ilmakuvauksessa on useita tekijöitä, kuten hajavallo ja vibraatiot, joiden täsmällistä vaikutusta kuvan laatuun ei tunneta. Tämän vuoksi meneillään olevassa projektissa tutkimus on jaettu toisaalta testikentän ilmakuvauksiin ja toisaalta laboratoriokokeisiin. Viimeksimainituissa pääpaino on filmien ominaisuuksien ja eri kehitysmahdollisuuksien selvittämisellä. Tässä työssä käsitellään laboratoriokokeita ja niissä saavutettuja tuloksia.

Filmin herkkyys riippuu kehityksestä. Sen parametrien ajan ja lämpötilan muutoksilla on vaikutusta filmin muihinkin ominaisuuksiin kuin herkkyyteen. Tämän takia haluttiin tutkia useita kehitysaika/lämpötila-kombinaatioita ja selvittää, ovatko ne erotuskyvyn kannalta keskenään yhtä hyviä. Lisäksi haettiin sellaista mustumaa, joka filmillä tulisi olla, jotta erotuskyky olisi maksimissaan. Hajavalolla ja suotimilla tiedetään olevan vaikutusta kuvan laatuun. Tässä työssä selvitettiin hajavalon määrän ja käytetyn valon aallonpituuden vaikutusta erotuskykyyn.

Työn yhtenä tavoitteena oli luoda menetelmä ilmakuvauksessa käytettävien filmien tutkimista varten. Tällaisen menetelmän tulisi olla rutiiniluontoinen, jotta sitä voi-

taisiin aina käyttää uuden filmierän tai -tyypin tutkimiseen. Toisaalta menetelmän pitäisi olla niin joustava, että sitä voitaisiin käyttää myös vain osittain. Tämä tarkoittaa sitä, että menetelmä olisi modulaarinen, jossa tietyn peruspaketin ympärille voidaan lisätä muuttujia haluttu määrä. Tämän menetelmäkehittelyn lisäksi tavoitteena oli hankkia ja systematisoida tietoa ilmakuvaukseen käytettävistä filmeistä ja niiden ominaisuuksista.

Tutkimustyöhön liittyvät laboratoriokokeet tehtiin vuosina 1982 ja 1983. Työtä varten otettiin kaikkiaan noin 1800 kuvaa, joista arvioitiin erotuskyky ja mitattiin mustuma.

## 2. EROTUSKYKY

### 2.1 Yleistä teoriaa

Erotuskyvyllä pyritään esittämään optisen systeemin suorituskyvyn ääriraja. Tavanomainen, valokuvauksessa käytetty menetelmä, jossa objektiivin muodostama kuva tallennetaan valonherkälle materiaalille, sisältää kaksi suorituskykyä rajoittavaa tekijää objektiivin ja emulsion. Joskus on kysymys vain toisen tekijän tarkastelusta, mutta on tilanteita, joissa ei voida varmuudella sanoa, rajoittaako systeemin suorituskykyä enemmän objektiivin vai emulsio.

Jo edellä esitetystä syystä erotuskyvyn määrittely ei ole aivan yksinkertaista. Brock /1/ on esittänyt seuraavan määritelmän. Erotuskyky on pienin viivaleveys, jossa rakenteellinen hahmo on vielä havaittavissa, kun kuviota pienennetään. Frieser /2/ esittää kaksi määritelmää. Valokuvaamalla aikaansaadun kuvan erotuskyvyn raja-arvo on siinä, missä kontrasti on kuvioiden yhteensulautumisen vuoksi pienentynyt niin paljon, että silmä ei enää pysty havaitsemaan kuvion rakennetta. Tämä raja-arvo saavutetaan, kun yksityiskohtia, joiden kontrasti yhteensulautumisen vuoksi on pienentynyt ei enää rakeisuuden takia havaita. Brock'in määritelmä on tavallaan yleispätevä. Frieser'in ensimmäinen määritelmä viittaa tapaukseen, jossa objektiivin on rajoittava tekijä, ja toinen määritelmä tapaukseen, jossa emulsio rajoittaa systeemin suorituskykyä.

Erotuskyky on varsin havainnollinen kuvan laadun mitta. Se on jossain määrin subjektiivinen käsite, eikä sen määrittelyssä ole absoluuttisen oikeaa tai väärää.



## 2.2 Vaikuttavia tekijöitä

Erotuskykytestien tuloksiin vaikuttavat tekijät ovat kahdenlaisia. Toisaalta on tekijöitä, jotka vaikuttavat suoraan kuvan laatuun, toisaalta eräät tekijät vaikuttavat kuvaustuloksen tarkasteluun ja näin myös lopulliseen tulokseen.

Suoraan kuvan laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat ainakin kuvan muodostavan objektiivin laatu ja aukko, emulsio, valotus, kehitys, kuvan muodostavan valon aallonpituus, kohteen kontrasti ja kuvauksessa vallitseva hajavallo.

Objektiivin ja emulsion yhteisvaikutusta on pyritty esittämään kaavalla

$$\frac{1}{R^2} = \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_e^2} \quad (1)$$

missä  $R$  = systeemin erotuskyky

$R_1$  = objektiivin "

$R_e$  = emulsion " /1/.

Tämän kaavan mukaan täytyy joko objektiivin tai emulsion erotuskyvyn olla vähintään kolme kertaa parempi kuin sen komponentin erotuskyvyn, jota halutaan tutkia. Toinen komponentti pienentää tällöin kokonaiserotuskykyä noin 5 %. Objektiivin suorituskykyyn vaikuttavat ennenkaikkea aberraatiot, joita ei voida kaikkia yht' aikaa korjata. Nykyaikaisissa objektiiveissa jäännösaberraatiot saattavat olla varsin pieniä, mutta silti selvästi havaittavissa. Emulsion suorituskykyä rajoittaa rakeisuus, joka on merkittävä pienten, matalakonstrastisten yksityiskohtien tunnistamiseen vaikuttava tekijä. Emulsio on yleensä tarpeeksi paksu, jotta rakeiden voidaan katsoa jakaantuneen kolmiulotteiseen tilaan. Emulsion tyypistä, valotuksesta ja kehitysasteesta riippuu, kuinka suuren osan emulsion pak-

suudesta kehittyneet rakeet käyttävät. Kuvan muodostavien rakeiden kolmiulotteisella jakautumalla on merkitsevää vaikutusta kuvan laatuun. Valotus ja kehitys vaikuttavat rakeisuuteen ja tätä tietä myös kuvan laatuun.

Erotuskyky on kääntäen verrannollinen käytetyn valon aallonpituuteen. Tämä johtuu siitä, että emulsio absorboi sinistä valoa tehokkaammin kuin punaista. Ilmiön tutkiminen on vaikeaa, koska myös objektiivin suorituskyky on valon aallonpituudesta riippuvainen /2/.

Teorian mukaan erotuskyky on suoraan verrannollinen kohteen kontrastiin. Karkeana sääntönä voidaan pitää, että 10 % muutos kontrastissa saa aikaan 5 % muutoksen erotuskyvyssä. Empiirisesti on saatu seuraava yhtälö.

$$R/R_{\infty} = 1 - C^{\alpha} \quad (2)$$

missä R = erotuskyky

$R_{\infty}$  = " hyvin korkealla kontrastilla

C = testikuvion kontrasti

$\alpha$  = vakio, hyvin lähellä arvoa 1

Yhtälö ei kuitenkaan ole yleispätevä, vaan sen voimassaoloalue on rajoitettu /2/.

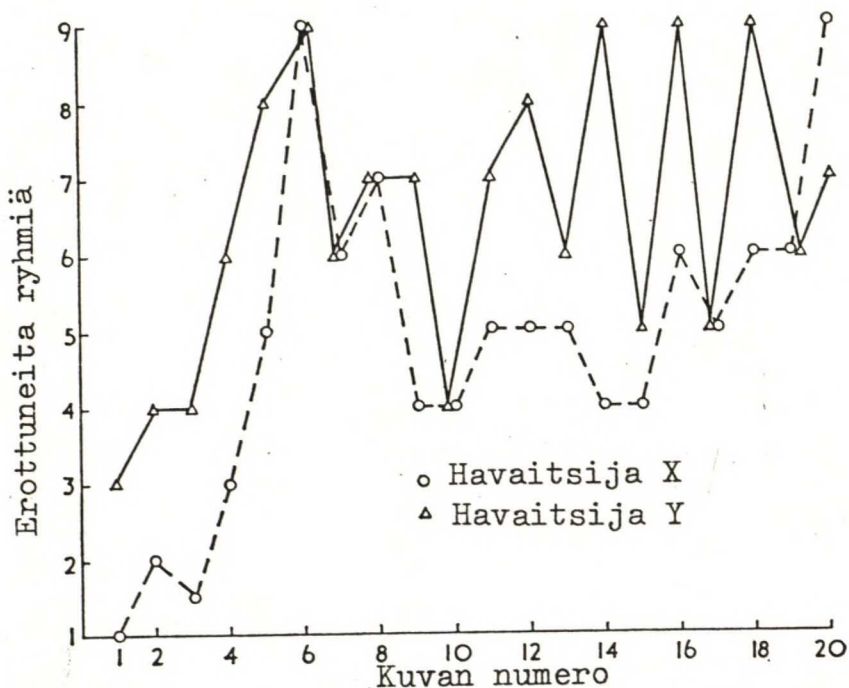
Kuvaustuloksen tarkasteluun vaikuttavia tekijöitä ovat mikroskoopin valaistus ja suurennus sekä havaitsija itse. Optimivalaistus on hyvin subjektiivinen käsite. Parhaana ratkaisuna voitaneen pitää valaistusta, joka mahdollisimman vähän rasittaa havaitsijaa. Yleensä suositellaan käytettäväksi diffuusia valaistusta, koska rakeisuus on tällöin vähiten silmiinpistävää.

Suositteltava suurennus on 0.3-0.5 kertaa odotettavissa oleva erotuskyky L/mm (viivaparia/mm). Liian suuri suu-

rennus tuo rakeet häiritsevästi esille, eikä varsinaista kuvaa pysty hahmottamaan. Liian pieni suurennus jättää kuvan niin pieneksi, että se on silmän erotuskyvyn ulkopuolella. Optimisuurennus on kompromissi mainittujen tekijöiden välillä. Kysymys optimisuurennuksesta ei ole lopputuloksen kannalta kuitenkaan kriittinen. Yleensä suurennuksen toleranssi on  $\pm 25\%$  optimiarvosta /1/.

Havaintsijalla itsellään on huomattava vaikutus lopullisiin tuloksiin. Eri havaintsijoiden välillä on systemaattista eroa. Osa näistä eroista voidaan selittää subjektiivisella erotuskykykriteerin ymmärtämisellä, mutta osa eroista johtunee erilaisesta hahmotuskyvystä. Havaintsijan kokemus vaikuttaa myös tuloksiin. Seuraavassa kappaleessa on esitetty esimerkki tästä /1/.

Kuva 1 esittää tilannetta, jossa kaksi havaintsijaa X ja Y arvioivat itsenäisesti 20 kovalta erottuneiden ryhmien lukumäärän. Testissä käytettiin USA:n ilmavoimien kolmi-viivaista, kontrastilla 2:1 valmistettua testikuviota. Kuvat oli otettu erään standarditestin yhteydessä useilla kuvakulmilla. Ne annettiin havaintsijoille satunnaisessa järjetyksessä, ja kumpikin arvosteli jokaista kuvaa yhden kerran. Havaintsijoilla ei ollut ennakkotietoa käytetystä kamerasta, emulsiosta, kuvakulmasta eikä muustakaan kuvaukseen liittyvästä seikasta. Kumpikin oli tottunut tekemään erotuskykyhavaintoja ja muutenkin perehtynyt valokuvien laadun arviointiin. Käytetty erotuskykykriteeri oli niinkään molemmille tuttu. Toinen havaintsija saa yleensä pienempiä arvoja kuin toinen, mutta hajonta on niin suuri, että havaintsijoiden keskinäinen 'kalibrointi' on mahdotonta /1/.

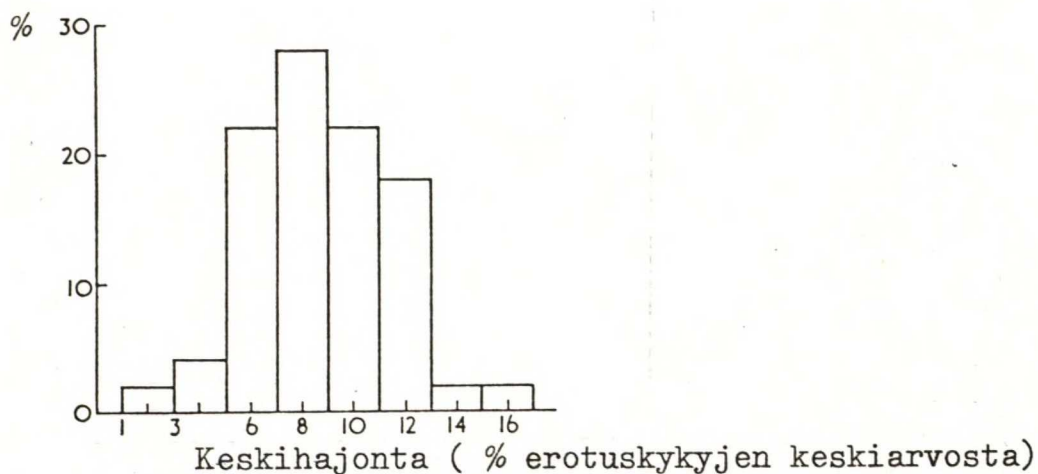


Kuva 1. Kahden havaitsijan saamien erotuskykyarvojen vertailu.

Merkittävä tuloksiin vaikuttava tekijä on erotuskykykriteeri. Vaikka kysymys siitä on luonteeltaan teoreettinen, sillä on huomattavaa käytännöllistä merkitystä. Kriteeriä määriteltäessä joudutaan käyttämään sellaisia subjektiivisia käsitteitä kuten selvästi erottuva, jonkinlainen densiteettiero tai kohtuullisella varmuudella. Jokaisella havaitsijalla on oma käsityksensä siitä, mitä nämä käsitteet tarkoittavat. Laajalti käytetty kriteeri on tarkastella viivojen lukumäärää ja suuntaa. Tiukempi vaatimus on viivojen erottuminen koko pituudeltaan toisistaan. Yksi periaate, josta vallitsee laaja yksimielisyys, on se, että mitään ryhmää ei pidetä erottuneena, ellei edellinen suurempi ryhmä ole erottunut. Hyvä menetelmä lienee esittää käytetty kriteeri mikroskooppikuvien avulla.

### 2.3 Määrityksen tarkkuudesta

Itek Corporation'in suorittamissa kokeissa /1/ vuonna 1962 todettiin, että yhden havaitsijan saamien erotuskykyarvojen keskihajonnaksi voitiin odottaa saatavan noin 10 %. Kuvassa 2 on esitetty keskihajontojen jakauma seuraavasta aineistosta: kolme havaitsijaa, seitsemän kontrastia välillä 1000:1 - 1.05:1 ja kolme emulsiota erotuskyvyiltään 800 L/mm - 25 L/mm.



Kuva 2. Erotuskykyhavaintojen keskihajontojen jakauma.

Havaitsijat sanoivat matalakonstrastisten kuvioiden olleen vaikeimpia lukea, mutta tuloksissa ei esiintynyt mitään tähän viittaavaa systematiikkaa. Kuvan 2 mukaan todennäköisin arvo keskihajonnalle on 8 %, mutta arvot 5 - 13 % ovat myös todennäköisiä.

Erotuskyky ei ole sisäiseltä eikä ulkoiselta tarkkuudeltaan korkea. Mitään täsmällisiä lukuja ei voida esittää, koska olosuhteet ja tekijät eri testeissä vaihtelevat. Erotuskyky on tilastollinen käsite, ja sitä on sen mukaisesti käytettävä /1/.

### 3. KOEJÄRJESTELYT JA TESTIKUVAUKSET

#### 3.1 Testikuviot

Tämän tutkimuksen aikana käytettiin kahta testitaulua. Toinen oli Kuvakeskuksen vanha, kiilakuviainen taulu, jota täydennettiin TkT Juhani Hakkaraisen testikuviolla. Toinen oli Hakkaraisen kuviosta modifioitu, yhdensuuntaiskuviainen taulu.

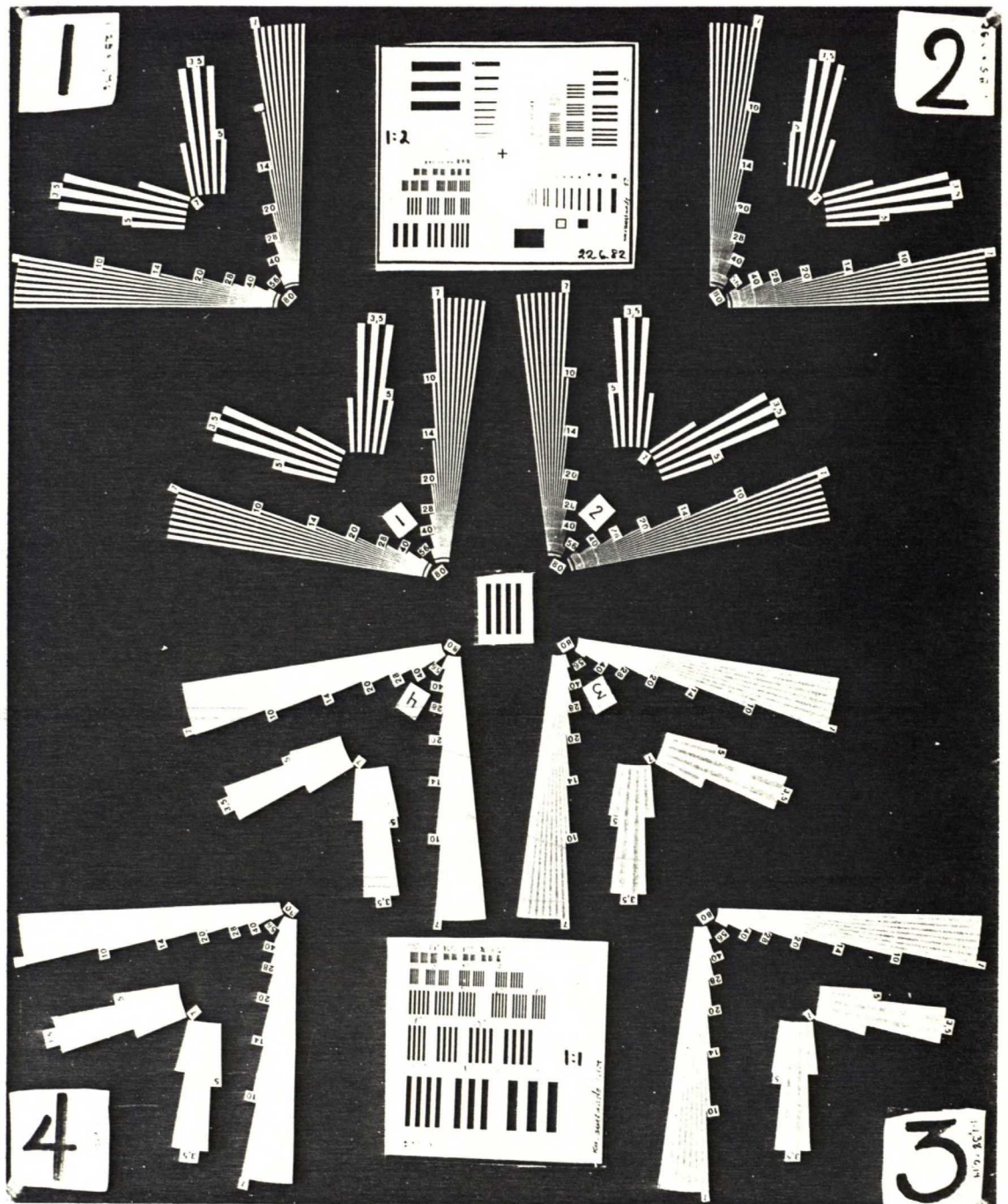
Vanhassa taulussa (kuva 3) on neljä kiilamaista ja kaksi yhdensuuntaista kuviota. Kiilakuvioiden kontrastit ovat 1:29, 1:10, 1:1.4 ja 1:1.8. Yhdensuuntaiskuvioissa kontrasti on 1:100. Kiilakuvioiden kuvaussuhde on 1:25, ylempään yhdensuuntaiskuvion 1:50 ja alemman 1:100. Koe-kuvausten aikana testitaulun vieressä oli kaksi harmaalevyä, joiden heijastusprosentti on 18 %. Testitaulu kuvattiin etäisyydeltä 51×polttoväli.

Työn kuluessa todettiin, että vanha testitaulu ei ollut enää tyydyttävä. Erotuskyvyn arvioiminen kiilamaisista kuvioista on epävarmempaa kuin yhdensuuntaiskuvioista arvioiminen. Kolme erilaista kuvaussuhdetta aiheutti helposti sekaannuksia havaintojen kirjaamisessa. Pitkät, kiilamaiset kuviot houkuttelevat silmän seuraamaan viivoja pitkälle erotuskykykynnyksen yli. Ilmiö lienee samankaltainen kuin rautateiden erottuminen korkealta otetuissa ilmakuvissa, joille ne kuvautuvat niin kapeina, että teoreettisesti niiden ei pitäisi näkyä.

Edellä mainitut syyt johtivat uuden testitaulun suunnitteluun. Vuonna 1982 suoritettujen kuvausten tuloksia tarkasteltaessa todettiin, että erotuskyvyt kontrasteilla 1:100 ja 1:29 sekä kontrasteilla 1:1.4 ja 1:1.8 olivat

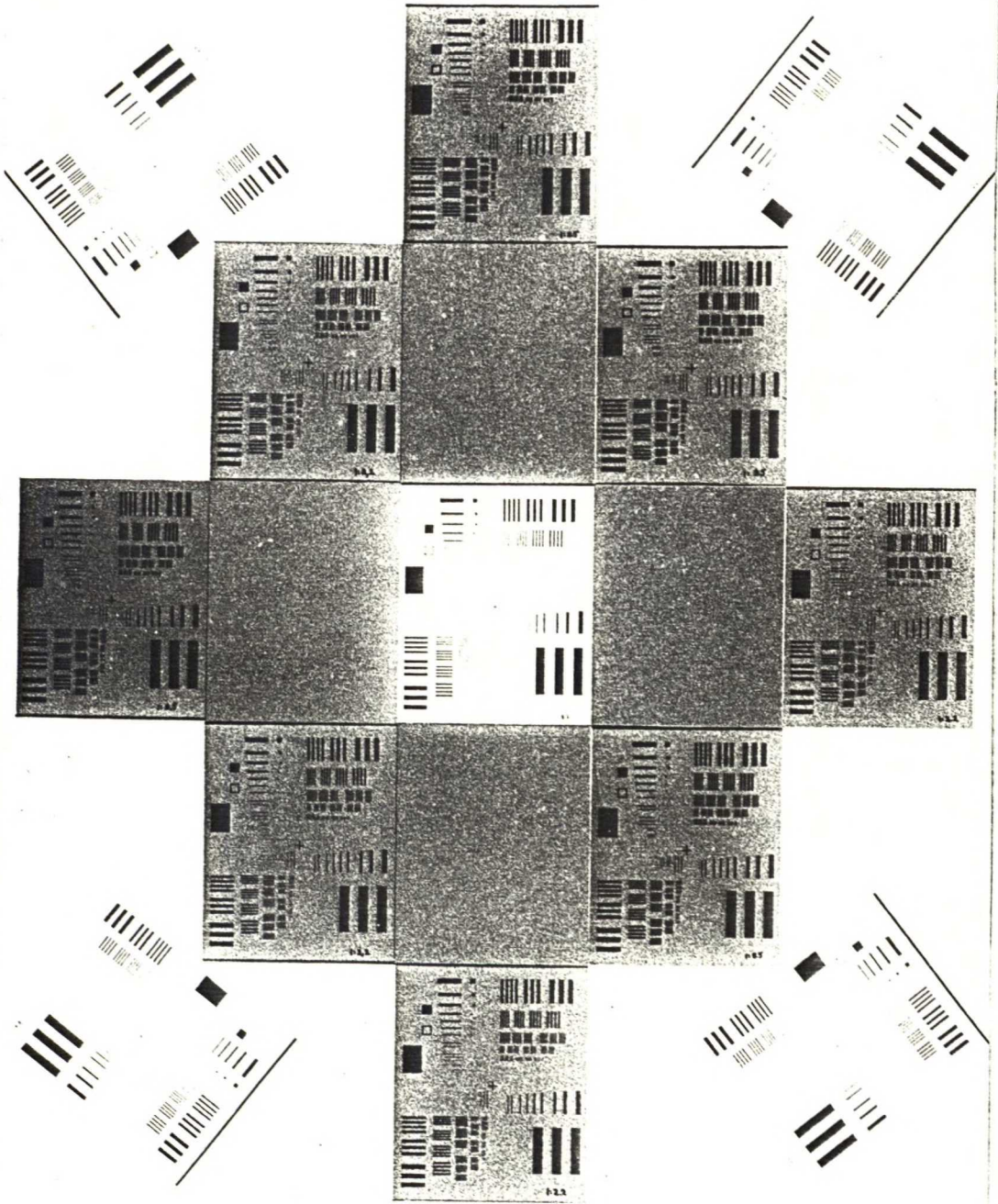
hyvin lähellä toisiaan. Tästä syystä päätettiin uudessa testitaulussa käyttää vain kolmea erilaista kontrastia, jotka ovat noin 1:2, 1:10 ja 1:100. Toisena periaatteena oli luopua kiillamaisista kuvioista.

Parhaaksi ratkaisuksi katsottiin valmistaa testitaulu Hakkaraisen testikuvioista siten, että käytössä olisi sama kuvio kolmella eri kontrastilla. Uusi testitaulu on esitetty kuvassa 4. Siinä on 13 kuviota, joista neljässä kontrasti on 1:2.2, neljässä 1:9.5 ja viidessä 1:87. Kuvasuhde on 1:50. Testitauluun on lisäksi sijoitettu neljä harmaalevyä, joiden heijastusprosentti on 18 %. Matalakontrastisten kuvioiden taustan tummuus on sama kuin harmaalevyjen.



Kuva 3. Kuvakeskuksen vanha, kiilakuviainen testitaulu, jota on täydennetty TkT Juhani Hakkaraisen testikuviolla.



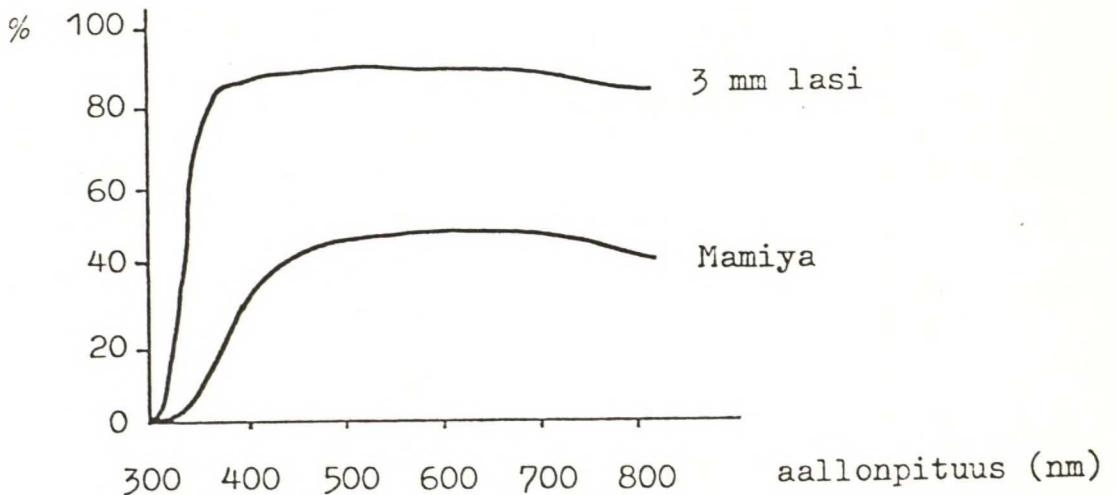


Kuva 4. Uusi, yhdensuuntaiskuviainen testitaulu, joka on valmistettu Hakkaraisen kuviosta modifioimalla.

### 3.2 Kamera

Kamerana oli Mamiya RB 67 Pro-S runko varustettuna saman tehtaan valmistamalla 90 mm objektiivilla. Valmistaja ei ole lukuisista tiedusteluista huolimatta suostunut ilmoittamaan minkäänlaisia arvoja objektiivin erotuskyvystä tai MTF:stä.

Joensuun korkeakoulussa mitattiin käytetyn objektiivin läpäisy. Objektiivin ja 3 mm lasin läpäisykäyrät on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Mamiyan objektiivin ja 3 mm lasin läpäisykäyrät.

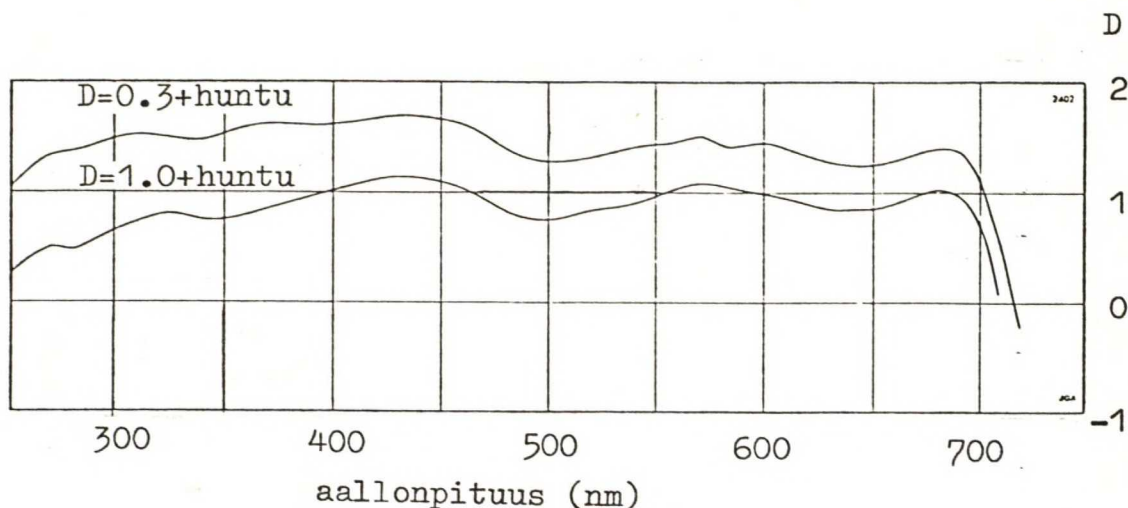
Kamera on tyypiltään yksisilmäinen, kuiluetsimellä varustettu peilikamera. Kuvattaessa peili oli aina lukittu ylä-asentoon valotuksen ajaksi. Objektiivin valovoima on 1:3.8, ja sitä voidaan himmentää puolen aukon välein. Suljinajat ovat yhdestä sekunnista tavanomaisin porrastuksin 1/400 sekuntiin.

### 3.3 Filmit

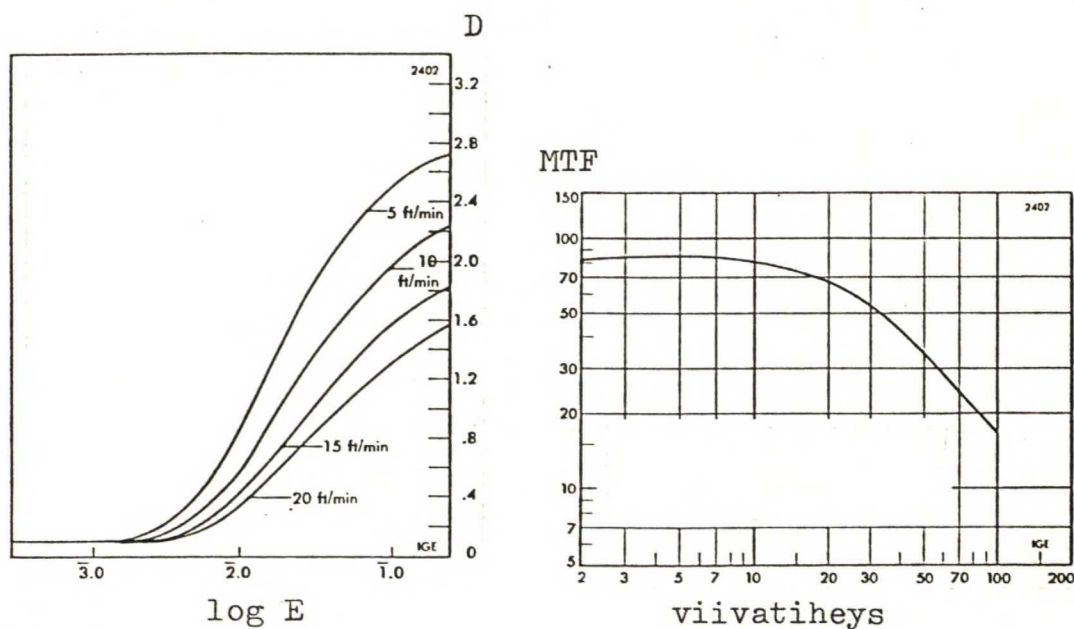
#### 3.3.1 Kodak Plus-X Aerographic Film 2402

Tekstissä käytetään tästä filmistä lyhyiden vuoksi nimitystä PX. Filmi on tarkoitettu tiedustelukuvaukseen suurista ja keskikorkeuksista, mutta filmipohjan mitanpitävyyden ansiosta sitä voidaan käyttää myös kartoitustarkoituksiin. Emulsio on pankromaattinen ja herkistetty varsin pitkälle spektrin punaiselle alueelle (kuva 6).

Kokonaispaksuus on noin 0.11 mm. Tästä emulsion osuus on 0.01 mm ja kuvapohjan 0.1 mm. Valmistajan ilmoittama herkkyys on 200 AFS, kun kehitetään standardin ANSI PH2.34-1969 mukaan. Erotuskyvyksi ilmoitetaan 160 L/mm kontrastilla 1000:1 ja 50 L/mm kontrastilla 1.6:1. Nämä arvot on saatu Kodak Versamat 885-kemikaaleilla ja Kodak Versamat 11-kehityskoneella kehitysnopeudella 15 ft/min lämpötilassa 29.5 °C.



Kuva 6. PX:n spektraalinen herkkyys.



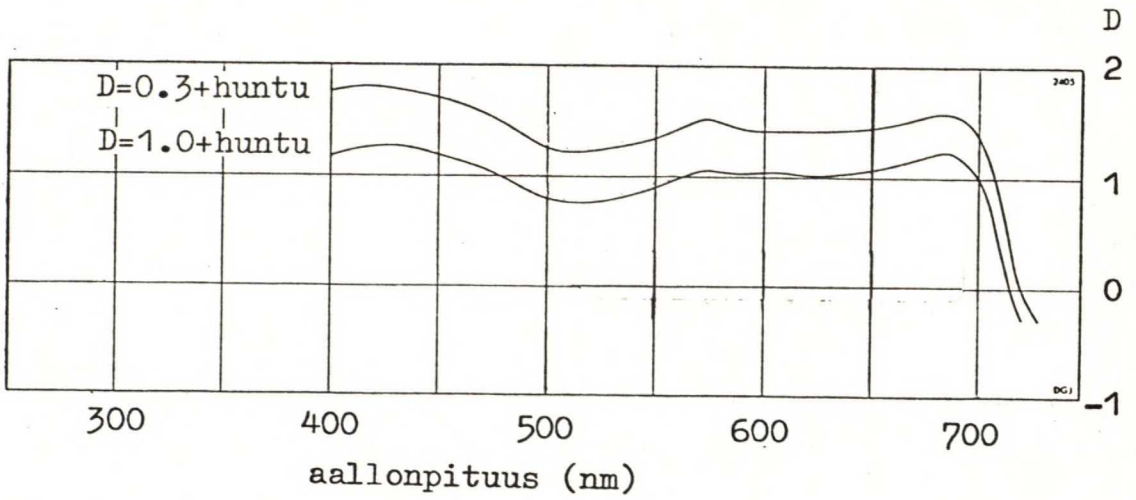
Kuva 7. PX:n mustumakäyriä ja MTF-käyrä

Kuvassa 7 on esitetty PX:n mustumakäyriä ja MTF-käyrä, jotka on määritetty vastaavissa olosuhteissa kuin edellisellä sivulla mainitut erotuskykyarvot.

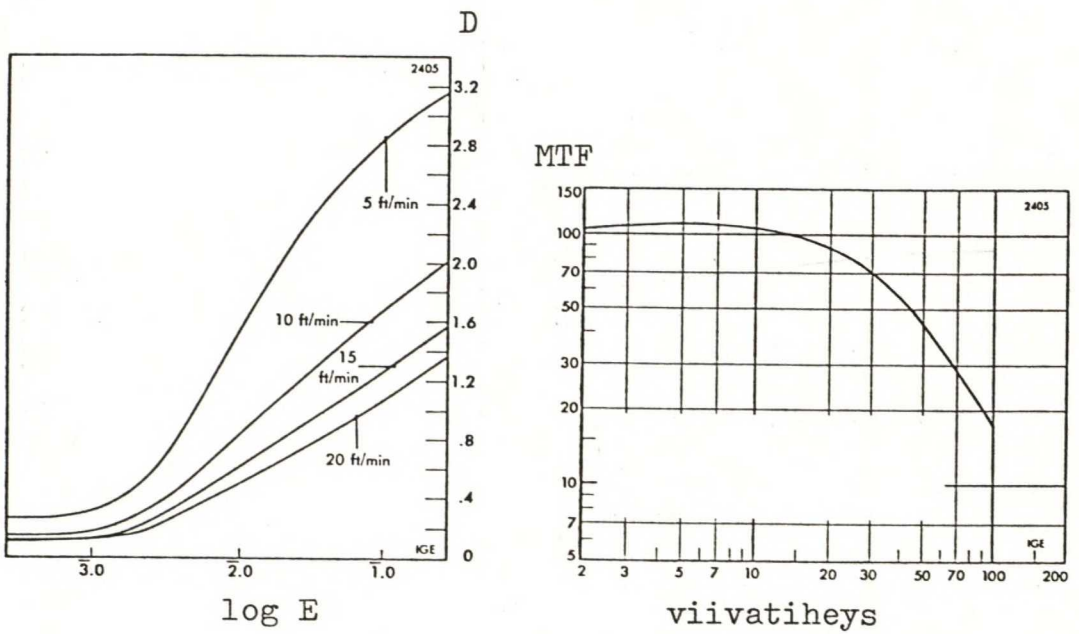
### 3.3.2 Kodak Double-X Aerographic Film 2405

Kuten edelläkin tästä filmistä käytetään nimitystä DX. Se on tarkoitettu kartoituskäyttöön ja yleiseen ilmakuvaukseen. Herkistys on samankaltainen kuin PX:llä (kuva 8).

Kokonaispaksuus on 0.11 mm, joka muodostuu 0.01 mm paksusta emulsiosta ja 0.1 mm paksusta kuvapohjasta. Valmistajan ilmoittama herkkyys on 500 AFS (ANSI PH2.34-1969). Erotuskyvyksi valmistaja ilmoittaa 125 L/mm kontrastilla 1000:1 ja 50 L/mm kontrastilla 1.6:1. Nämä arvot on saatu samoissa olosuhteissa kuin PX:n vastaavat arvot. Kuvissa 8 ja 9 esitetyt käyrät on niinkään määritetty samoissa olosuhteissa kuin vastaavat PX:n käyrät.



Kuva 8. DX:n spektraalinen herkkyys

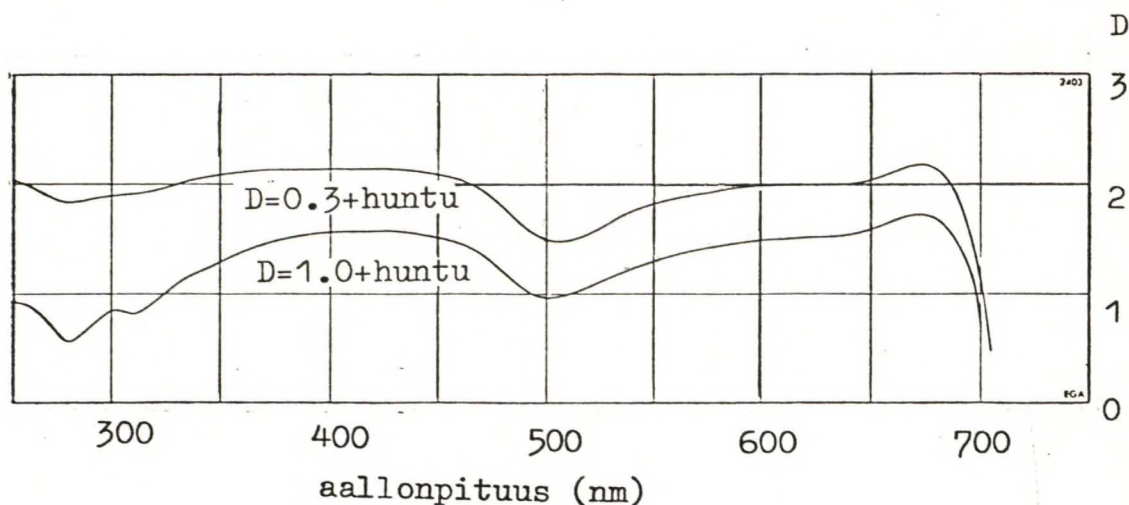


Kuva 9. DX:n mustumakäyriä ja MTF-käyrä

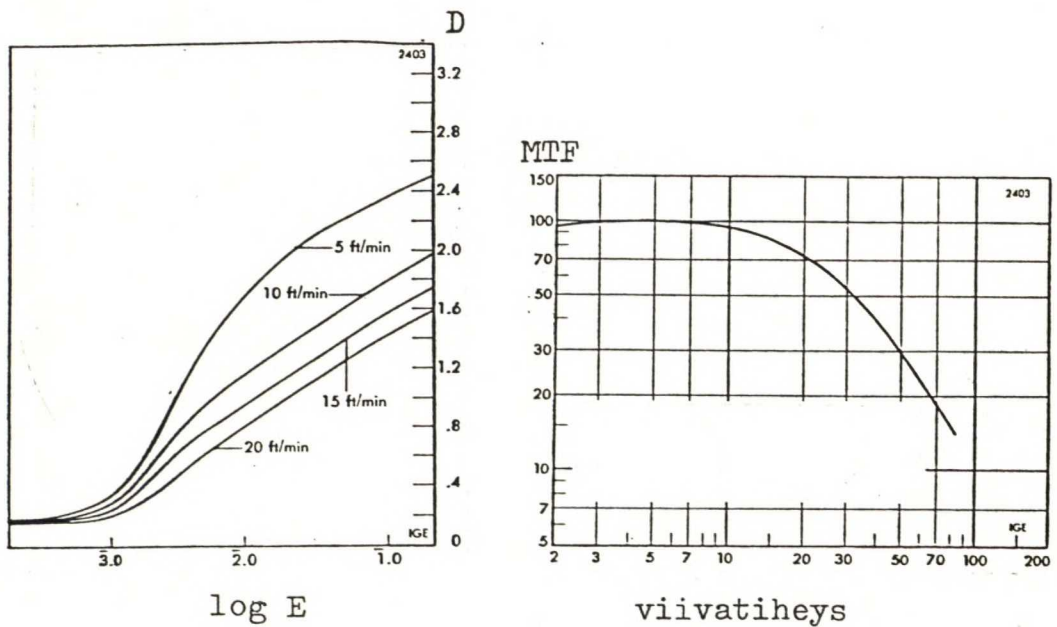
### 3.3.3 Kodak Tri-X Aerographic Film 2403

Tämä filmi, jota tekstissä nimitetään TX on tarkoitettu suurimittakaavaisen kartoitukseen pieniltä lentokorkeuksilta ja tiedustelukuvaukseen huonossa valaistuksessa. Tämänkin filmin spektraalinen herkistys ulottuu varsin pitkälle punaiselle alueelle (kuva 10).

Kokonaispaksuus on noin 0.11 mm (emulsio 0.01 mm ja pohja 0.10). Valmistajan ilmoittama herkkyys on 640 AFS kehitettynä standardin ANSI PH2.34-1969 mukaan. Erotuskyvyksi ilmoitetaan 100 L/mm kontrastilla 1000:1 ja 40 L/mm kontrastilla 1.6:1. Nämä arvot on saatu samoilla kemikaaleilla ja samalla kehityskoneella kuin edellisekin arvot, kehitysnopeus on ollut 10 ft/min ja -lämpötila 29.5 °C.



Kuva 10. TX:n spektraalinen herkkyys.



Kuva 11. TX:n mustumakäyriä ja MTF-käyrä.

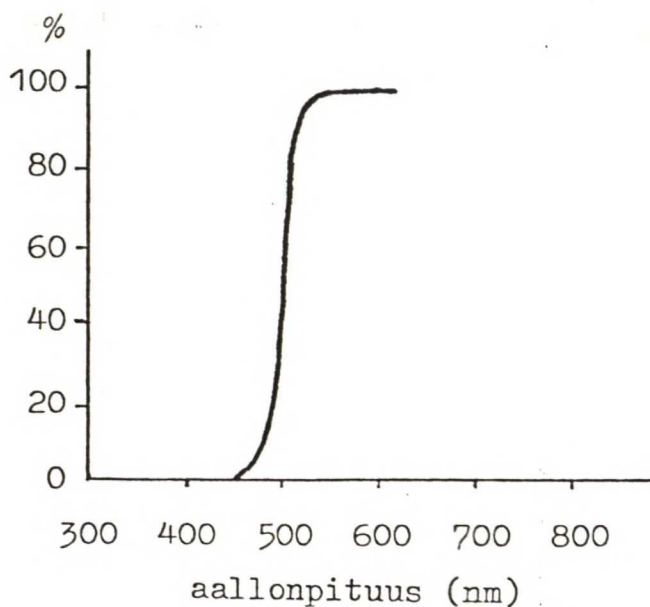
Kuvassa 11 esitetyt mustumakäyrät ja MTF-käyrä on määritetty samoissa olosuhteissa kuin TX:n erotuskykyarvot /3/.

### 3.4 Suotimet

#### 3.4.1 Keltasuodin

Käytetty keltasuodin on Vinten'in valmistama, tyypiltään GG 495. Valmistajan antamien tietojen mukaan suodin on hyvin samankaltainen kuin muiden tunnettujen valmistajien vastaavat tuotteet.

Suotimen paksuus on 3 mm, ja sen läpäisykäyrä on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Keltasuotimen läpäisykäyrä

### 3.4.2 Interferenssisuotimet

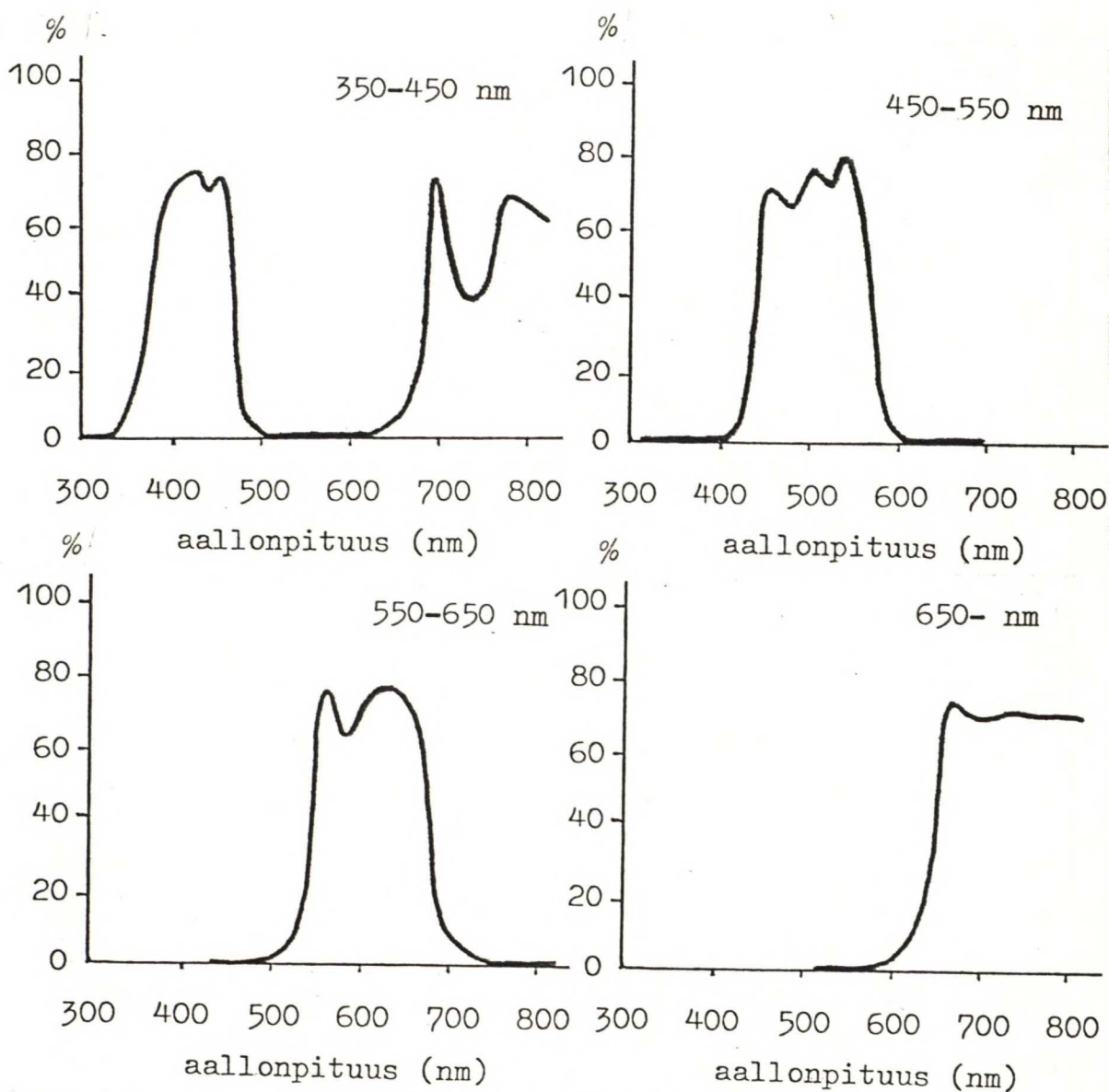
Interferenssisuotimia oli käytössä neljä, nimellisarvoiltaan 350-450 nm, 450-550 nm, 550-650 nm ja 650- nm. Joensuuun korkeakoulussa tehtyjen mittausten mukaan suotimien todellisen läpäisyn aallonpituudet poikkesivat näistä. Läpäisykäyrien jyrkkyys on ilmeisen tyydyttävä, koska se on samaa kertaluokkaa kuin yleensä ilmakuvaukseen käytetyillä suotimilla.

Taulukossa 1 on esitetty suotimien nimelliset läpäisy-aallonpituudet, todelliset läpäisy-aallonpituudet ja maksimiläpäisy. Todelliset läpäisy-aallonpituudet ovat kohtia, joissa läpäisy on 50 %. Kuvassa 13 on esitetty suotimien läpäisykäyrät. Huomiota herättää suotimen 350-450 nm käyrässä esiintyvä piikki 700 nm:n kohdalla. Vaikka filmien herkkyysalue alkaa tällä kohtaa jo loppua, saattaa tällä piikillä olla vaikutusta lopputulokseen.



350-450	380-470, 695-720, 775-	75
450-550	440-570	80
550-650	545-670	78
650-	650-	75
nimellis- aallon- pituudet	todelliset aallonpituudet	läpäisy- prosentti

Taulukko 1. Interferenssisuotimien läpäisy-aallonpituudet.



Kuva 13. Interferenssisuotimien läpäisykäyrät

### 3.5 Valotus

#### 3.5.1 Valotuksen mittaus

Valotuksen mittaukseen käytettiin Minolta Spotmeter M valotusmittaria. Herkkyysasetuksena oli PX:llä ja DX:llä 200 ASA ja TX:llä 800 ASA. Yleensä ilmakuvausyksessä PX:n ja TX:n herkkyysasetukset ovat edellä mainitut, mutta DX:n herkkyysasetus on 400 ASA. Valotus mitattiin Kodakin keskiharmaalevystä, jonka heijastusprosentti on valmistajan ilmoituksen mukaan 18 %.

Testitaulu valaistiin kahdella Turbo-lux Silent halogeenivalaisimella, joiden teho oli 1250 W. Valaisimet oli varustettu päivänvalosuotimilla, joiden takia valon värilämpötila oli noin 5600 °K. Valaistus säädettiin valaisimien etäisyyttä muuttamalla siten, että aukolla 8 saatiin valotusajaksi PX:lle ja DX:lle 1/15 s ja TX:lle 1/30 s. Valotusmittarin mittauskulma on 1°.

#### 3.5.2 Sensitometrinen valotus

Filmeille annettiin sensitometrinen valotus Joyce-Loebl 2L sensitometrillä. Filmille tulevan valon määrää säädeltiin harmaakiilalla valotusajan ollessa vakio. Käytössä oli porrasmainen harmaakiila, jonka jyrkkyys on 0.15 D/cm. Kiilassa on 21 kpl 1 cm levyisiä portaita. Mustumakäyrät konstruoitiin D/log E -koordinaatistoon siten, että kiilan tummin porras sai log E -arvon 0, seuraavat portaat aina 0.15 yksikköä pienemmät. Mustumat mitattiin Macbeth TR 524 densitometrillä.

Tällä menetelmällä saadut mustumakäyrät ovat vertailukelpoisia ainoastaan keskenään. Filmin saamaa absoluuttista

valotusta (luxs) ei nimittäin tunneta. Valmistaja ilmoittaa valaistuksen olevan valotustasolla ainakin 5000 lux vähintään  $\pm 1\%$  tarkkuudella ja jännitevaihtelujen korkeintaan  $\pm 0.25\%$ . Jännitevaihtelut vaikuttavat erityisesti valotusajan tarkkuuteen. Koska kojeen pitkäaikainen stabiliteetti on tuntematon, on oltava varovainen vertailtaessa mustumakäyriä tai niistä johdettuja arvoja.

### 3.5.3 Kuvan muodostava valotus

Jokaiselle filmirullalle valotettiin 26 kuvaa siten, että toinen pää oli reilusti ali- ja toinen ylivalotettu. Valotukset tehtiin puolen aukon välein taulukon 2 mukaan.

Kuvan numero	valotusaika	aukko
1	400	16
2	400	11-16
3	400	11
4	400	8-11
5	400	8
6	250	8-11
7	250	8
8	125	8-11
9	125	8
10	60	8-11
11	60	8
12	30	8-11
13	30	8
14	15	8-11
15	15	8
16	8	8-11
17	8	8
18	4	8-11
19	4	8
20	2	8-11
21	2	8
22	1	8-11
23	1	8
24	1	5.6- 8
25	1	5.6
26	1	3.8- 5.6

Taulukko 2. Filmeille annetut valotukset

Ajatuksena oli käyttää objektiivin keskiaukkoja mahdollisimman paljon, koska objektiivin erotuskyky on siten ilmeisesti parhain.

### 3.6 Hajavalon simulointi

Ilmakuvauksessa vaikuttavan hajavalon vaikutusta pyrittiin jäljittelemään seuraavalla menettelyllä. Filmille kuvattiin ennen varsinaista valotusta tasaisesti valaistu pahvi ja tämän jälkeen samalle ruudulle testitaulu. Käytössä oli kaksi haja- ja kohdevalon määrällistä suhdetta, 1:1 ja 3:1. Haluttaessa hajavaloa 50 % (haja- ja kohdevalon suhde 1:1) valotettiin sekä pahvi että testitaulu yhden aukon alivalotuksella. Vastaavasti, kun haluttiin hajavaloa 75 % (hajavallo:kohdevalo = 3:1), alivalotettiin pahvia 1/2 aukkoa ja testitaulua 1 1/2 aukkoa.

Käytetty menetelmä sisältää kuitenkin eräitä epävarmuustekijöitä. Diffuusi ennakkovalotus luo olosuhteet Weinland-efektin esiintymiselle. Weinland-efektiksi nimitetään ilmiötä, jossa ennen varsinaista valotusta valonherkälle materiaalille annetaan lyhytaikainen valotus korkeaintensiteettisellä diffuusilla valolla. Tämä herkistää filmiä varsinaiseen valotukseen, koska Gurney-Mott'in teorian mukaiset kypsymisalkiot ovat alkaneet muodostua jo ennakkovalotuksen ansiosta. Jaksottainen valotus saattaa myös aiheuttaa filmille erilaisen mustuman kuin vastaavan valoenergian sisältävä yhtäjaksoinen valotus. Tämä johtuu toisaalta valon kvanttimaisesta luonteesta ja toisaalta resiprookkivirheestä /5/.

Ilmakuvauksessa vaikuttavan hajavalon spektraalinen jakauma on yleensä erilainen kuin varsinaisen kuvan muodos-

tavan valon spektraalinen jakauma. Hajavalon sinisen pään osuus on suurempi kuin punaisen pään. Laboratorio-olosuhteissa kuitenkin sekä hajavaloa jäljittelevän että kuvan muodostavan valon spektrit ovat ilmeisesti samat, koska ne ovat peräisin samasta valonlähteestä, eikä mitään ilmakehässä tapahtuvaan sirontaan verrattavaa ilmiötä ilmeisesti ole olemassa.

Edellä esitetyistä koejärjestelyjen puutteellisuuksista huolimatta hajavalon simulointia on pidettävä perusteltuna, koska se on toistaiseksi ainoa tapa jäljitellä kontrastien pienenemistä kuvaushetkellä. Esitettyihin efekteihin on kuitenkin suhtauduttava vakavasti ja näin ollen hajavaloa jäljittelemällä saatavia tuloksia on tarkasteltava erityisen kriittisesti.

### 3.7 Kehitys

#### 3.7.1 Kehityskoje ja kehite

Tutkimuksessa käytettiin kehityskojetta Kodak Versamat 317 ja kehitettä Kodak Versamat 885. Kojeessa on yksi telasto kehitettä varten, jossa filmi kulkee noin metrin. Kojeessa on pumppu, joka kierrättää kehitettä kehityksen aikana. Kehitteet sekoitettiin varastoliuoksista ja niitä tuorestettiin päivittäin. Tuorestustulos testattiin Kodakin valmiiksi valottamalla testikiiloilla. Filmit kehitettiin yksi kerrallaan.

Huomiota ei kiinnitetty siihen, kehitetäänkö filmit vähemmän vai enemmän valoa saanut pää edellä. Walter'in /7/ mukaan gamma-arvoissa, filmin herkkyyksissä ja maksimumustumissa ei ole em. syistä johtuvia eroja. Walter esittää myös, että filmin herkkyys ja gamma-arvo voidaan määrittää noin 2 % tarkkuudella.

Erilaisia kehitteitä ei tutkittu, koska kehitteen tyyppi ilmeisesti ei vaikuta merkitsevästi maksimierotuskykyyn. Kehitteen kierrätyksen vaikutusta ei liioin tutkittu. Lewry'n ja Thomson'in mukaan kierrätyksellä lienee enemmän vaikutusta mustumakäyrään kuin esimerkiksi maksimierotuskykyyn /4/.

### 3.7.2 Aika ja lämpötila

Kehityskojeessa on portaaton filmin nopeuden säätö 0-40 "/min. Tässä työssä käytettiin nopeuksia 16, 23, 30 ja 40 "/min. Kehitteen lämpötiloina käytettiin 20, 22 ja 24 °C. Sitä tarkkailtiin mittaamalla se kehitteen pinnalta kehityksen alussa ja lopussa. Koska kehitettä kierrätetään kojeessa, on ilmeistä, että lämpötila on varsin tarkoin sama koko kehitteessä.

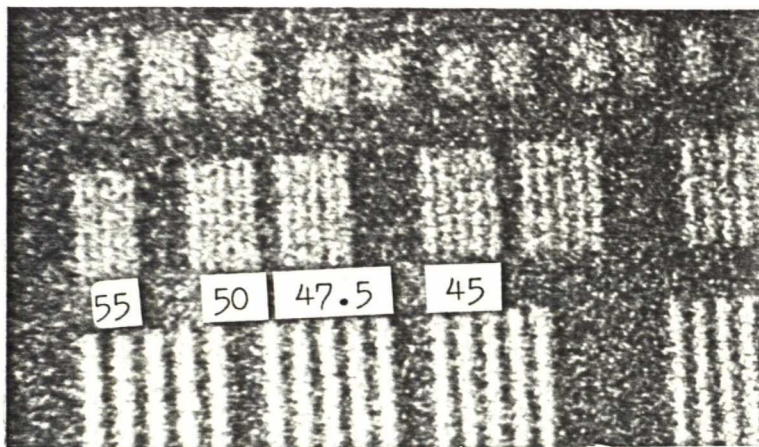
## 3.8 Erotuskyvyn arviointi

### 3.8.1 Kriteeri

Kriteerin kehittelyn lähtökohdaksi otettiin viivojen suunnan ja lukumäärän erottaminen. Samoin noudatettiin periaatetta, että mitään viivaryhmää ei pidetä erottuneena, ellei edellinen, suurempi elementti ole erottunut. Kriteeri oli siis hyvin paljon Brock'in /1/ esittämän kriteerin kaltainen.

Kun emulsion rakeisuus on erotuskykyä rajoittava tekijä, erottuneen ja erottumattoman viivaryhmän välinen raja on harvoin niin selkeä, että se olisi kiistatta määritettävissä. Rakeisuus puurouttaa viivakuvioita satunnaisesti siten, että osa viivoista erottuu toisistaan selvästi ja osa on sulautunut toisiinsa. Tämän takia otet-

tiin kriteeriin lisäehto, jonka mukaan viivojen pituus-suunnassa korkeintaan puolet viivasarjasta saa puuroutua, jolloin kuvion katsotaan vielä erottuvan. Esimerkkinä kriteeristä on kuva 14, jolta on katsottu erottuvan 50 L/mm.



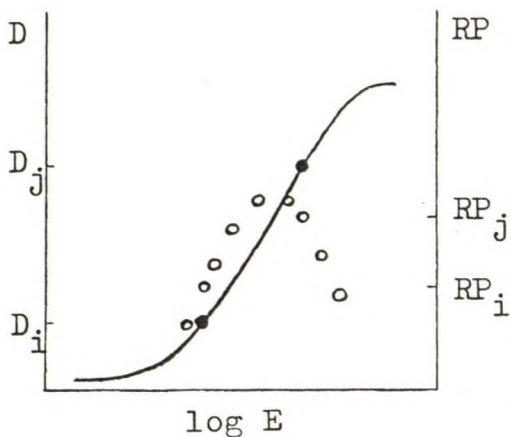
Kuva 14. Esimerkki erotuskyvyn arvioinnissa käytetystä kriteeristä.

### 3.8.2 Havaintojen teko

Erotuskyvyn arviointi perustui pääasiallisesti visuaalisiin havaintoihin Zeiss'in stereomikroskooppia käyttäen. Visuaalisten havaintojen tueksi otettiin mikroskooppikuvat jokaiselta filmirullalta yhdeksästä eri kohdasta. Periaatteena oli kuvata kolme kuvaa jokaisen kontrastin (1:87, 1:9.5, 1:2.2) erotuskyvyn optimikohdasta.

Erotuskykyhavaintoja teki yksi havaitsija ja kukin kuva arvioitiin vain kerran. Tulokset ovat siis erittäin subjektiivisia ja vain keskenään vertailukelpoisia. Jokaiselta kuvalta mitattiin harmaalevyn mustuma, jonka pe-

rusteella erotuskykyarvo on merkitty koordinaatistoon. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Erotuskykykäyrän konstruointi

Mikroskoopin valaistusta ja suurennusta on jouduttu säätelämään havaintoja tehtäessä huomattavasti, koska osa kuvista on reilusti ali- tai ylivalotettuja. Valaistus ja suurennus lienevät hakeutuneet havaintotyön kannalta optimiin.

Erotuskykykäyriä ei ole otettu tähän esitykseen mukaan, vaan niitä on käytetty pelkästään työn kestäessä apuneuvoina tulosten tarkasteluun.





## 4. TUTKITTAVIEN TEKIJÖIDEN VAIKUTUS KUVAUSTULOKSIIN

### 4.1 Yleistä

Käytetyillä tutkimusmenetelmillä ei ole mahdollista selvittää täsmällisesti kunkin tekijän vaikutusta lopulliseen tulokseen, vielä vähemmän niiden mahdollisia yhdysvaikutuksia. Tulokset antavat lähinnä käsityksen eri tekijöiden vaikutuksen laadusta ja suuruusluokasta.

Eri tekijöiden vaikutuksilla ei ollut mitään kiinteää vertailukohtaa. Joidenkin tekijöiden, kuten hajavalon ja suotimien vaikutusta verrattiin tapauksiin, joissa varmasti tiedettiin, että ne eivät vaikuta. Sellaisten tekijöiden kuten valotuksen tai kontrastin vaikutusta on tutkittu vertaamalla niitä itseensä eli hakemalla optimia erotuskyvyn suhteen.

Tarkkuuskysymykset ovat saaneet varsin vähän huomiota osakseen. Eri kuvauksista määritettyjen erotuskykyoptimien keskihajonnaksi voitaneen arvioida noin 15 %, mikä pitää yhtä esimerkiksi Brock'in /1/ esittämien tulosten kanssa. Merkitsevästi erilaisina voidaan näin ollen pitää niitä tapauksia, jotka poikkeavat vertailukohdasta yli 25-30 %.

### 4.2 Kehitysaika ja -lämpötila

Kehitysaika ja -lämpötila eivät periaatteessa vaikuta suoraan erotuskykyyn. Ne saattavat kuitenkin vaikuttaa muihin tekijöihin, jotka taas vaikuttavat erotuskykyyn. Tällaisia tekijöitä ovat ainakin raekoko, mustuma, gamma-arvo ja herkkyys.

Raekoosta ei voitu havaita aiheutuvan eroja tietyn emulsion eri kehitysaikojen ja -lämpötilojen välillä, kun tarkasteltiin samaa mustumaa. Gamma-arvo ja maksimimustuma luonnollisesti vaihtelivat ja niiden muutokset olivat odotusten mukaisia. Taulukkoon 3 on koottu eri emulsioiden gamma-arvot käytetyillä kehitysnopeuksilla ja -lämpötiloilla. Densitometrin sisäiseksi tarkkuudeksi arvioitiin  $\pm 0.05$  D.

"/min \ °C	PX			DX			TX		
	20	22	24	20	22	24	20	22	24
16	1.5	1.6	1.7	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1
23	1.3	1.5	1.8	0.7	0.8	0.7	0.8	1.1	0.9
30	1.0	1.3	1.6	0.7	0.8	0.8	0.9	0.8	0.9
40	0.8	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8

Taulukko 3. Gamma-arvojen riippuvuus kehitysnopeudesta ja -lämpötilasta eri emulsioita käytettäessä.

Taulukko 4 esittää parametrien vaikutusta mustumaan. Taulukossa on harmaakiilan maksimimustuma eri kehitysnopeuksilla ja -lämpötiloilla.

"/min \ °C	PX			DX			TX		
	20	22	24	20	22	24	20	22	24
16	2.14	2.24	2.43	2.13	2.30	2.49	2.36	2.55	2.61
23	1.91	2.07	2.24	1.60	1.97	2.09	2.09	2.32	2.36
30	1.78	1.91	1.99	1.49	1.77	1.91	1.95	2.08	2.22
40	1.68	1.67	1.66	1.24	1.46	1.62	1.50	1.85	1.89

Taulukko 4. Harmaakiilan maksimimustumat eri kehitysnopeuksilla ja -lämpötiloilla eri emulsioita käytettäessä.

Taulukkoon 5 on koottu eri emulsioiden saavutetut maksimierotuskyvyt. Tulokset muodostavat kaksiulotteisen taulukon, jossa on laskettu jokaisen rivin ja sarakkeen keskiarvo sekä koko taulukon yleiskeskisarvo ja hajonta. Nämä tulokset ovat peräisin vuoden 1982 havaintoaineistosta ja ne on luettu korkeakontrastisesta yhdensuuntaiskuviosta.

"/min \ °C	PX			ka.
	20	22	24	
16	50	37.5	50	45.8
23	45	35	40	40.0
30	42.5	37.5	40	40.0
40	35	45	42.5	40.8
ka.	43.1	38.8	43.1	41.7 (5) a)

"/min \ °C	DX			ka.
	20	22	24	
16	42.5	37.5	47.5	42.5
23	42.5	35	45	40.8
30	55	37.5	42.5	45
40	47.5	37.5	50	45
ka.	46.9	36.9	46.3	43.3 (6) b)

"/min \ °C	TX			ka.
	20	22	24	
16	30	27.5	35	30.8
23	35	27.5	30	34.2
30	35	25	40	33.3
40	40	32.5	35	35.8
ka.	35.0	28.1	35.0	32.7 (5) c)

Taulukko 5. Kehitysnopeuden ja -lämpötilan vaikutus eri emulsioiden maksimierotuskykyyn.

Mikään kehitysnopeus ei ole systemaattisesti muita huonompi tai parempi. Suurin poikkeama yleiskeskia arvosta on PX:llä nopeudella 16 "/min. Suuruudeltaan 4.1 L/mm olevaa eroa ei kuitenkaan voitane pitää merkitsevänä.

Lämpötila 22<sup>o</sup>C tuntuu antavan systemaattisesti pienimmän erotuskyvyn. Suurin poikkeama yleiskeskia arvosta on DX:llä 6.4 L/mm. Erot eivät ole suuria, mutta yhtä poikkeusta lukuunottamatta kaikissa tapauksissa samansuuntaisia. Tapaus vaikuttaa karkealta virheeltä.

Koska havaintoaineisto on näin pieni ja halutaan välttää ennako-oletuksia siitä, ovatko havainnot otoksia normaalijakaumasta, on käytettävä ei-parametrisia testimenetelmiä tutkittaessa tilastollisesti havaintoaineistoa. Testauksella pyritään selvittämään, edustavatko eri lämpötilat samaa populaatiota vai onko niiden välillä merkittäviä eroja. Testaukseen on käytetty Friedman'in kaksisuuntaista varianssianalyysiä /6/, jota on sovellettu erikseen taulukon 5 osiin a), b) ja c).

Friedman'in testissä havaintoaineisto on kaksiulotteisessa taulukossa, jossa on N riviä ja k saraketta. Rivit edustavat tutkimuksen kohteita ja sarakkeet niitä olosuhteita, joiden vaikutusta kohteeseen tutkitaan. Testi antaa vastauksen kysymykseen, ovatko kaikki otokset peräisin samasta populaatioista, ts. onko olosuhteilla vaikutusta tutkittavaan kohteeseen.

Testin käytännön suoritus on seuraava. Havaintoaineisto muunnetaan ensin sijaluvuiksi. Jokaisella rivillä paras tulos saa arvon 1, seuraavaksi paras 2, jne. aina arvoon k asti. Jos tulee kaksi samaa tulosta, ne saavat sijalukujen

keskiarvon. Esimerkiksi 'jaetulla ensimmäisellä sijalla' tulee sijaluvuiksi 1.5. Jokaisessa sarakkeessa lasketaan sijalukujen summa  $R_j$ . Jos nollahypoteesi (kaikki otokset ovat samasta populaatiosta) on tosi, niin sijalukujen jakauma jokaisessa sarakkeessa on täysin sattuman tulosta. Näin voidaan odottaa kaikkien sijalukujen esiintyvän kaikissa sarakkeissa suunnilleen samalla frekvenssillä. Jos nollahypoteesi on väärä, niin summat  $R_j$  vaihtelevat sarakkeesta toiseen. Friedman'in testi siis määrittää, eroavatko sijalukujen summat merkitsevästi toisistaan. Tämän testin tekemiseksi on ensin laskettava testisuure  $\chi_r^2$ . Friedman'in mukaan voidaan osoittaa, että  $\chi_r^2$  on likimäärin  $\chi^2$ -jakautunut vapausastein  $k-1$ , kun

$$\chi_r^2 = \frac{12}{Nk(k+1)} \sum_{j=1}^k (R_j)^2 - 3N(k+1) \quad (3)$$

Käsiteltävässä tapauksessa kehitysnopeudet ovat vaakari-veillä ja -lämpötilat sarakkeilla. Kehityslämpötilat ovat siis niitä olosuhteita, joiden vaikutusta kohteeseen tutkitaan. Sijalukutaulukot on esitetty taulukossa 6.

"/min \ °C	PX			DX			TX		
	20	22	24	20	22	24	20	22	24
16	1.5	3	1.5	2	3	1	2	3	1
23	1	3	2	2	3	1	1	3	2
30	1	3	2	1	3	2	2	3	1
40	3	1	2	2	3	1	1	3	2
$R_j$	6.5	10	7.5	7	12	5	6	12	6

Taulukko 6. Friedman'in kaksisuuntaisen varianssianalyysin sijalukutaulukot

Kun yhtälöön (3) sijoitetaan  $k=3$  ja  $N=4$ , testisuurelle  $\chi_r^2$  saadaan seuraavat arvot:

PX 1.625, DX 6.500, TX 6.000

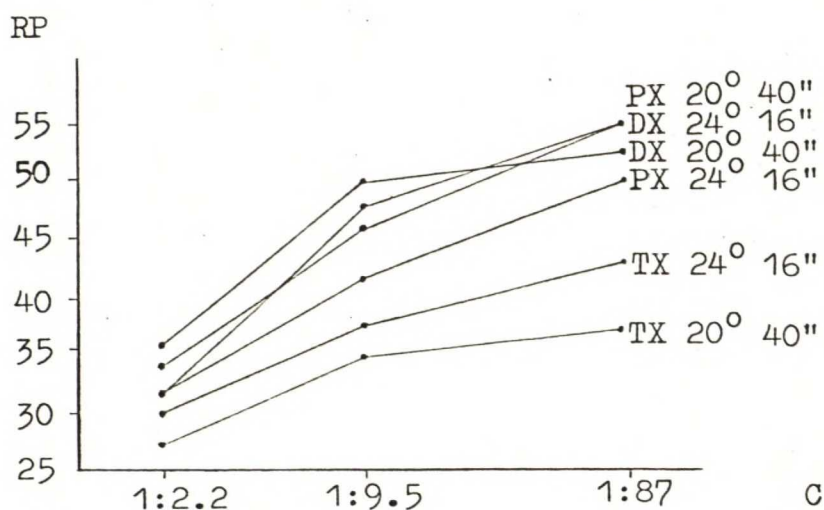
Friedman antaa seuraavat riskitasot  $p$  muutamille  $\chi_r^2$ -arvoille:

$\chi_r^2$	4.5	6.0	6.5
$p$	0.125	0.069	0.042

Tämän testin perusteella voidaan sanoa, että DX:ää käytettäessä kehityslämpötilalla on tilastollisesti melkein merkitsevä vaikutus erotuskykyyn. Muissa tapauksissa ei ole havaittavissa edes melkein merkitsevää vaikutusta.

Havaintojen lukumäärä on niin pieni, että testin perusteella ei vielä voida yleisesti päätellä lämpötilan  $22^\circ\text{C}$  olevan huonomman kuin  $20^\circ\text{C}$  tai  $24^\circ\text{C}$ . On myös huomattava, että käytetty Friedman'in testi reagoi ainoastaan havaintojen eroihin, mutta ei lainkaan tämän eron suuruuteen. Vaikka koetuloksissa on nähtävissä tiettyä systematiikkaa, karkeiden virheiden mahdollisuus on kuitenkin niin suuri, että maksimierotuskykyä on pidettävä riippumattomana kehitysjasta ja -lämpötilasta.

Kuvassa 16 on esitetty saavutetut maksimierotuskyvyt lämpötila/nopeus-kombinaatioilla  $24^\circ\text{C}/16"/\text{min}$  ja  $20^\circ\text{C}/40"/\text{min}$ . Erot jokaisella kontrastilla ovat normaalin hajonnan seurausta. Tämän perusteella ei ole estettä käyttää mitä tahansa kehityslämpötilan ja -nopeuden kombinaatiota. Tämä koskee lämpötilaa välillä  $20-24^\circ\text{C}$  ja nopeutta välillä  $16-40"/\text{min}$ . Filmin herkkyyttä voidaan näin ollen vaihdella varsin laajalla alueella.



Kuva 16. Saavutetut maksimierotuskyvyt lämpötila/nopeus-kombinaatioilla, jotka edustavat filmin herkkyyden kannalta ääritapauksia.

#### 4.3 Hajavallo

Hajavalon vaikutusta on tarkasteltu tutkimalla erotuskyvyn alentumista verrattuna kuvaukseen ilman hajavaloa. Kohdan 4.2 tulosten mukaan on oletettu, että erotuskyky on riippumaton kehitysnopeudesta ja -lämpötilasta. Näin ollen lämpötila/nopeus-kombinaatioista on laskettu jokaiselle filmityypille ja kohdekontrastille optimierotuskykyjen keskiarvo. Samoin on menetelty hajavalon vallitessa suoritettujen kuvausten suhteen. Näin saadut tulokset on esitetty taulukossa 7. Vastaavat prosentuaaliset muutokset ovat taulukossa 8.

haja- valoa \ C	1:1.4	1:1.7	1:10	1:30	1:100	
0%	16	21	37	44	44	
50%	10	16	26	37	41	
75%	5	14	16	27	36	a) PX

haja- valoa \ C	1:1.4	1:1.7	1:10	1:30	1:100	
0%	17	21	40	45	46	
50%	11	18	29	37	44	
75%	7	14	23	32	40	b) DX

haja- valoa \ C	1:1.4	1:1.7	1:10	1:30	1:100	
0%	12	14	27	32	34	
50%	5	13	18	26	31	
75%	0	11	11	20	27	c) TX

Taulukko 7. Maksimierotuskyvyt taulukoituina hajavalon määrän ja kontrastin mukaan.

haja- valoa \ C	1:1.4	1:1.7	1:10	1:30	1:100	
50%	38	24	30	16	7	
75%	69	33	57	39	18	a) PX

haja- valoa \ C	1:1.4	1:1.7	1:10	1:30	1:100	
50%	35	14	28	18	4	
75%	59	33	43	29	15	b) DX

haja- valoa \ C	1:1.4	1:1.7	1:10	1:30	1:100	
50%	58	7	33	19	9	
75%	100	21	59	38	21	c) TX

Taulukko 8. Erotuskyvyn lasku prosentteina taulukoituna hajavalon määrän ja kontrastin mukaan.



Erotuskyvyn lasku hajavalon vaikutuksesta on ilmeisesti riippuvainen kohteen kontrastista. Kontrastilla 1:100 erotuskyvyn prosentuaalinen lasku oli korkeintaan 15-20 %, kun se alhaisilla kontrasteilla oli 60-70 %. Selvänä poikkeuksena tästä olivat kontrastilla 1:1.7 saadut arvot. Esimerkiksi TX:ää käytettäessä ne olivat lähes samanlaiset kuin kontrastilla 1:100. Tämä saattaa johtua siitä, että näillä kontrasteilla testikuvion tausta on valkoinen, kun se taas muilla kontrasteilla on harmaa. Valkoiset viivat aiheuttavat joka tapauksessa filmille melko voimakkaan mustuman, olipa hajavaloa tai ei.

Hajavalon määrä 75 % aiheutti odotetusti suuremman laskun erotuskykyyn kuin 50 %, jonka vaikutus korkeilla kontrasteilla oli yllättävän pieni, lähes olematon. Hajavalon vaikutti TX:ään hieman enemmän kuin PX:ään tai DX:ään. Ero oli kuitenkin niin pieni, että on vaikea sanoa onko tämä nimenomaan tälle emulsiolle tyypillinen ominaisuus.

Näin pienellä havaintomäärällä on uskallettua esittää hajavalon erotuskykyä pienentävä vaikutus yhdellä luvulla. Karkeasti voidaan sanoa, että 50% hajavaloa laskee erotuskykyä noin 10-40% ja vastaavasti 75% hajavaloa noin 20-60 %. Poikkeamia näistä rajoista voi kuitenkin olla.

#### 4.4 Valotus

Erotuskyky riippuu selvästi valotuksesta, ja valotuksen optimikohta on helposti määritettävissä. Valotusalue riippuu toisaalta siitä, miten suuri erotuskyvyn lasku sallitaan ja toisaalta saavutettavasta maksimierotuskyvystä. Mikäli maksimierotuskyky on alhainen, erotusky-

kykäyrä on yleensä varsin laakea ja näin ollen valotusalue suuri.

Seuraavassa taulukossa on esitetty erotuskyvyn lasku ali- ja ylivalotuksilla. Valotuksen referenssinä on optimierotuskyky, ts. ali- ja ylivalotusta on verrattu siihen valotukseen, jolla saadaan paras erotuskyky.

$\Delta f \backslash C$	1:87			1:9.5			1:2.2		
	PX	DX	TX	PX	DX	TX	PX	DX	TX
-2	12	8	11	13	9	10	17	12	18
-1	4	3	3	4	2	1	4	4	5
+1	3	3	1	3	1	2	4	3	4
+2	11	7	6	10	6	7	13	8	10
+3	20	13	9	21	13	18	24	15	18
+4	30	20	14	36	22	29	38	25	32

Taulukko 9. Erotuskyvyn lasku prosentteina optimierotuskyvystä ali- ja ylivalotuksilla. Valotuksen referenssinä on erotuskyvyn optimikohta.

Yhden aukon yli- tai alivalotus ei vaikuta erotuskykyyn käytännöllisesti katsoen lainkaan. Suurin lasku on 5%. Kahden aukon poikkeama optimista aiheuttaa noin 10 % ja kolmen aukon poikkeama 15-20 % laskun. PX on ilmeisesti arempi väärälle valotukselle kuin DX tai TX. Korkeakontrastiset kohteet lienevät vähemmän arkoja väärälle valotukselle kuin matalakontrastiset, mutta erot ovat varsin pieniä.

Optimimustuma on se mustuma, joka keskiharmaalevyn pitää

saada, jotta erotuskyky olisi maksimissa. Kaikki emulsiot antoivat niin samanlaisia tuloksia, että optimimustumia ei ole eroteltu filmeittäin. Tulokset kontrasteittain ovat:

1:8.7	0.29	(0.13)	
1:9.5	0.71	(0.16)	} 0.67 (0.15)
1:2.2	0.63	(0.13)	

Tulokset on laskettu 23 tapauksen keskiarvona. Mukana on eri kehitysaikoja ja -lämpötiloja sekä suotimia. Sulkeissa olevat luvut ilmoittavat hajonnan. Kontrasteille 1:9.5 ja 1:2.2 on laskettu optimimustuma sekä yhdessä että erikseen. Näillä kontrasteilla optimit ovat niin lähellä toisiaan, että niiden yhdistämistä voidaan pitää perusteltuna.

Korkeilla kontrasteilla optimimustuma oli yllättävän alhainen, hyvin lähellä huntutasoa. Tämä johtuu ilmeisesti siitä, että testitaulun kirkkaan valkoiset viivat aiheuttavat filmille diffuusiovalopihan, joka laskee erotuskykyä. Näin ollen ei voida varmuudella sanoa, onko noin 0.7 D mustuma matalille kontrasteille tyypillinen ominaisuus vai johtuuko se testitaulun tummuudesta. Ilmeisesti kirkkaan kohteen kuvaamisessa diffuusiovalopiha on varsin merkittävä erotuskykyyn vaikuttava tekijä.

#### 4.5 Suodin

##### 4.5.1 Keltasuodin

Keltasuotimella ei ollut merkittävää vaikutusta. PX:llä ja DX:llä saatiin keltasuodinta käyttäen noin 10 % parempia tuloksia kuin ilman sitä, mutta TX:llä 15 % huonompia. Muutokset olivat noin 5 L/mm.

#### 4.5.2 Interferenssisuotimet

Spektrin punainen pää antoi parhaan ja sininen pää huonoimman tuloksen. On luultavaa, että kameran sinisen päään värikorjaus on huono. Koetulokset kertonevat enemmän objektiivin kuin emulsioiden laadusta.

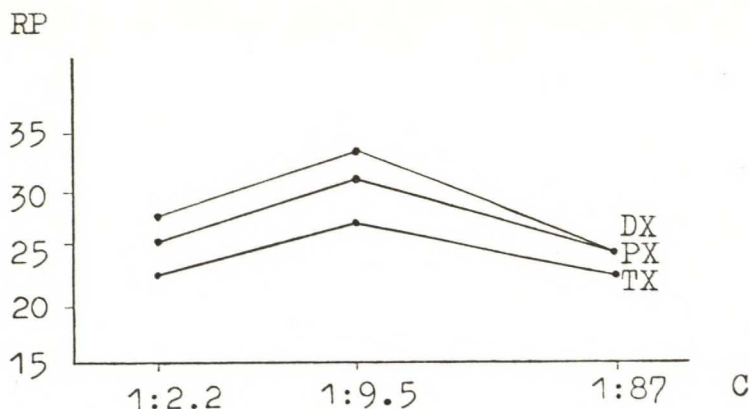
Taulukossa 10 on esitetty erotuskyvyn muutos prosentteina eri suotimilla kuvattaessa verrattuna tapaukseen, joka on kuvattu ilman suodinta.

suodin \ filmi	PX	DX	TX
350-450 nm	-44	-37	-26
450-550 "	-20	-27	-10
550-650 "	+ 3	- 1	+ 8
650- "	- 6	+12	+ 9

Taulukko 10. Suotimien vaikutus erotuskykyyn prosentteina. Referenssinä on kuvaus ilman suodinta.

Aallonpituusalueilla 550-650 nm ja 650- nm kuvaustulos on suunnilleen sama kuin kuvattaessa koko spektrin alueella. Alueilla 350-450 nm ja 450-550 nm tulos on kuitenkin selvästi huonompi kuin ilman suodinta kuvattaessa.

Mielenkiintoinen ilmiö oli korkeaa kontrastia käytettäessä aallonpituusalueella 350-450 nm tapahtunut erotuskyvyn lasku alle keskikontrastin erotuskyvyn. Ilmiötä havainnollistaa kuva 17, jossa erotuskyky on esitetty kontrastin funktiona. Millään muulla aallonpituusalueella vastaavaa ilmiötä ei esiintynyt.



Kuva 17. Erotuskyky filmeillä PX, DX ja TX kontrastin funktiona aallonpituusalueella 350-450 nm.

#### 4.6 Filmi

Keskimääräiset erotuskyvyt korkeilla kontrasteilla olivat PX:llä 54 L/mm, DX:llä 56 L/mm ja TX:llä 39 L/mm. Tulos on filmien keskinäisten suhteiden osalta varsin odotettu. TX:n heikompi erotuskyky johtuu luonnollisesti PX:ää ja DX:ää suuremmasta rakeisuudesta. Korkeimmat yksittäiset erotuskykyhavainnot olivat seuraavat:

PX 60 L/mm

DX 70 L/mm

TX 47.5 L/mm

Tätä parempia tuloksia on tuskin syytä odottaa saavutettavan, jos käytetään Mamiyan kameraa. Varovasti pyöristettyinä odotusarvoina voidaan pitää PX:lle ja DX:lle 55 L/mm sekä TX:lle 40 L/mm.

#### 4.7 Kohteen kontrasti

Eri kontrastien keskimääräiset erotuskyvyt on esitetty taulukossa 11.

Filmi	PX	DX	TX
1:87	54	56	39
1:9.5	46	51	36
1:2.2	35	38	26

Taulukko 11. Filmien PX, DX ja TX keskimääräiset erotuskyvyt eri kontrasteilla.

Erotuskyvyn suhteellinen lasku kontrastin alenemisen vuoksi oli kaikilla emulsioilla samaa kertaluokkaa. Kontrastin lasku arvoon 1:9.5 heikensi erotuskykyä noin 10 % ja arvoon 1:2.2 noin 30 %.

#### 4.8 Muita kuvaustulokseen vaikuttaneita tekijöitä

Vaikka kameran sisäiset värähtelyt pyrittiin eliminoidaan mahdollisimman tarkoin, jäivät häiriötekijöinä jäljelle vielä kameran ulkopuoliset värähtelyt. Näistä merkittävin oli kuvalaboratorion ilman mahdollinen värinä. Laboratoriotiloissa on koneellinen ilmanvaihto, joka saattaa aiheuttaa sellaista kuvan erotuskykyä heikentävää värähtelyä. Kuvausalusta oli epäilemättä riittävän tukeva, koska laboratoriossa on kivilattia, joka on tuettu peruskallioon.

Käytetyt filmit olivat mahdollisimman tuoreita. Valmistaja ilmoittaa niiden säilyvän vähintään syksyyn 1984 saakka.

## 5. EHDOTUS ILMAKUVAFILMIEN TUTKIMISMENETELMÄKSI

### 5.1 Yleistä

#### 5.1.1 Menetelmän periaate

Perusratkaisuksi ilmakuvaafilmiä tutkivaksi menetelmäksi ehdotetaan tässä työssä käytettyä. Se perustuu testitaulun kuvaamiseen kameralla ja näin saadun kuvan tutkimiseen. Suureksi epäkohdaksi jää toistaiseksi kuitenkin kameran objektiivin vaikutus lopputulokseen.

Lähtökohtana on ajatus, että jokaisella filmillä on olemassa tietty peruserotuskyky,  $RP_0$ . Se voidaan määrittää kuvauksesta, jossa ovat mukana vain välttämättömät muuttujat, ei siis suotimia, hajavaloa tai muuta niihin verrattavaa. Tähän perusarvoon voidaan verrata tapauksia, joissa on mukana useampia muuttujia. Peruserotuskykyä itseään voidaan verrata tämän työn aikana saatuihin tuloksiin.

$RP_0$  määritetään käyttämällä korkeakontrastista testi-kuviota ja tekemällä havainnot vain kuvan keskiosasta.

#### 5.1.2 Kuvausolosuhteet

Kuvaukset tehdään laboratoriossa, joka on järjestettävä mahdollisimman häiriöttömäksi. Kamera sijoitetaan jalustalle, joka kiinnitetään tukevasti lattiaan. Mikäli suinkin on mahdollista, laboratoriotiloissa ei saa kuvauksen aikana käyttää koneellista ilmanvaihtoa. Muutoinkin on kiinnitettävä huomiota siihen, että lattia- ja seinärakenteisiin ei pääse johtumaan värähtelyjä.

Kuvausten aikana laboratoriossa käytetään vain testitaulun valaisemiseen tarkoitettuja lamppeja. Niiden väri-

lämpötila mitataan. Sen pitäisi vastata päivänvalon väri-  
lämpötilaa mahdollisimman hyvin. Valaistuksen tulee olla  
testitaulun alueella tasainen.

### 5.1.3 Koetoistojen määrä

Yhtenä kokeena pidetään yhdestä kuvauksesta määritettyä  
maksimierotuskykyä. Yksi koe sisältää siis useita va-  
lotuksia, jotka ovat kaikki samalla filmillä ja kehite-  
tään yht'aikaa. Mikäli yksittäisiä valotuksia pidettäi-  
siin erillisinä kokeina, ne eivät olisi toisistaan riip-  
pumattomia, koska niillä on sama kehitys yhdistävänä te-  
kijänä. Ne ovat siis olleet yht'aikaa kehityskojeessa,  
jolloin kaikki satunnaistekijät vaikuttavat niihin samal-  
la tavalla.

Erillisiä, toisistaan riippumattomia kokeita pitää olla  
vähintään kolme. Näin vähäinen koetoistojen määrä ei oi-  
keuta hylkäämään yhtä, kahdesta muusta poikkeavaa havain-  
toa, ellei ole kysymys selvästä karkeasta virheestä. Täl-  
löin koe on uusittava.

## 5.2 Testikuviot

### 5.2.1 Kontrasti

Testitaulussa täytyy olla kontrastiltaan kolme erilaista  
kuviota. Kaksi kuviota, joista toinen olisi matala- ja  
toinen korkeakontrastinen, ei ole riittävä määrä, koska  
eräissä tapauksissa erotuskyvyn muutos kontrastin funkti-  
ona on epäsäännöllinen. Vertaa kohta 4.5.2.

Suurempaa kontrastia kuin 1:100 ei ole tarpeen käyttää.  
Keskikontrastina noin 1:10 on hyvä. Matalana kontrastina



ei tulisi käyttää suurempaa kuin 1:2. Kontrastiin 1:1.6, jota mm. Kodak käyttää, ei välttämättä kannata pyrkiä. Vertailu valmistajan ilmoittamien ja itse saatujen koe-tulosten välillä on erilaisten koejärjestelyjen vuoksi muutenkin niin epävarmaa, että kontrastin asettaminen sa-maksi ei kuitenkaan tee tuloksia vertailukelpoisiksi. Ma-tala kontrasti voidaan näin ollen valita alueelta 1:1.6-1:2.

### 5.2.2 Taustan tummuus

Testikuviot valmistetaan valokuvauspaperille, jonka mustu-ma-alue on noin 0-2 D. Korkeakontrastiselle kuviolle taustan tummuuden valinta ei siis ole mikään ongelma. Tausta on valkoinen ja viivat ovat mustat.

Testitaulussa on syytä olla useita keski- ja matalakont-rastisia kuvioita, joiden taustan tummuus vaihtelee. Yh-det kuviot voivat olla tässä työssä käytettyjen kaltaisia, eli niiden tausta on keskiharmaa. Näiden lisäksi tauluun voidaan sijoittaa kuviot, joissa tausta on valkoinen ja viivat vastaavasti vaaleanharmaat, sekä kuviot, joissa tausta on tummanharmaa ja viivat mustat, ts. mustuma on noin 2 D.

Tällä koejärjestelyllä voidaan tutkia, vaikuttaako tietyn kontrastin toistoon se mustuma-alue, jolla tämä kontrasti on. Diffuusiovalopi-hailmiön käyttäytymisestä lienee mah-dollista saada tietoa tällä tavoin.

Testikuvioiden lisäksi tauluun sijoitetaan 2-4 keskihar-maalevyä. Näiden levyjen on oltava niin suuria, että ne kuvautuvat filmille vähintään kokoon 2x3 mm densitometrin mittausaukon koon takia.

### 5.2.3 Viivataajuus

Testikuvion yksittäisten elementtien viivataajuuksien eron ei tule olla yli 5 L/mm oltaessa alueella alle 100 L/mm. Käytetäänkö elementtien erona 5 vai 2.5 L/mm, on toisarvoinen kysymys. Mikäli käytetään eroa 5 L/mm, erotuskykyraja lienee havaittavissa yksikäsitteisimmin kuin erolla 2.5 L/mm. Vaikka käytettäisiin eroa 2.5 L/mm, niin tarkkuus tuskin kasvaa, mutta erotuskykykriteerin soveltaminen tulee hieman vaikeammaksi. Jos käytetään eroa 5 L/mm, erotuskykyä ei pidä arvioida kuvioden väliin.

Kumpaa tahansa elementtien viivataajuuksien eroa käytetäänkin, on valittua eroa käytettävä systemaattisesti koko tutkimuksessa. Missään tapauksessa testitauluun ei pidä sijoittaa elementtien viivataajuuksien suhteen erilaisia kuvioita.

## 5.3 Valotus

### 5.3.1 Sensitometrinen valotus

Sensitometrissä valotettava harmaakiila valotetaan filmirullan kumpaankin päähän. Harmaakiila, jossa on 21 porasta portaan suuruuden ollessa 0.15 D, on sopiva.

Sensitometrin laatuun on syytä kiinnittää erityistä huomiota. Kojeen sisäinen tarkkuus on ehdottomasti tärkein kriteeri arvioitaessa sensitometrin hyvyttä. Ulkoinen tarkkuus, eli kyky tuottaa absoluuttisesti tunnettuja valotuksia on toisarvoinen tekijä, ellei haluta verrata tuloksia muiden laitosten saamiin tuloksiin.

## 5.3.2 Kuvan muodostava valotus

Kuvausta varten mitataan valotus testitauluun sijoitetusta harmaaalevyistä. Valotusmittarin herkkyysasetus valitaan taulukon 12 mukaan. Kamerassa käytetään keskiaukkoja, esimerkiksi aukkoa 8. Suljinaikana voidaan käyttää esimerkiksi aikaa 1/30. Valaistuksen intensiteettiä säädetään siis viime kädessä valaisimilla. Kuvia otetaan viisi: yksi nimellisvalotuksella, kaksi puolen aukon ja kaksi yhden aukon yli- ja alivalotuksella.

Filmi "/min \ °C	PX			DX			TX		
	20	22	24	20	22	24	20	22	24
16	640	800	800	400	1600	1600	2500	4000	4000
23	400	640	640	320	400	800	1200	2000	2500
30	250	250	400	200	400	400	1000	1600	2000
40	200	200	250	125	160	160	500	1000	1000

Taulukko 12. Filmien PX, DX ja TX suositeltavat käyttöherkkyydet ASA-lukuina.

Jos valotus mitataan käyttäen taulukon 12 esittämiä herkkyksiä ja kehitysparametreja, niin keskiharmaan kohteen pitäisi saada filmillä noin 0.7 D mustuma. Tämä sopii erityisesti matala- ja keskikontrastisten kuvioiden tarkasteluun. Kuvattaessa korkeakontrastisia kuvioita valon määrää voidaan vähentää himmentämällä 1.5-2 aukkoa käytettäessä PX:ää, 2.5 aukkoa käytettäessä DX:ää ja 3 aukkoa käytettäessä TX:ää. Keskiharmaan kohteen pitäisi tällöin saada mustuma 0.3 D, jossa korkeakontrastisten kuvioiden erotuskyky on maksimissaan.

## 5.4 Kehitys

### 5.4.1 Aika ja lämpötila

Kehitysaika ja -lämpötila voidaan taulukon 12 esittämissä rajoissa valita vapaasti. On huomattava, että taulukossa ei esitetä kehitysaikoja, vaan -nopeuksia. Kysymyshän on oleellisesti samasta asiasta. Koko työskentelyn ajan on syytä käyttää samaa yhdistelmää, jotta emulsion jyrkkyys ja maksimimustuma eivät muutu. Kehitysparametrien ja filmin käyttöherkkyyden valinta riippuvat täysin toisistaan. Riippuu siis käyttäjästä, kumman hän valitsee ensin.

### 5.4.2 Kehitysolosuhteiden seuranta

Kehitysolosuhteita tai pikemminkin niiden vaikutusta voidaan seurata sekä erillisten tarkkailukiilojen että filmille valotettujen harmaakiilojen avulla. Erillisten, valmistajan valmiiksi valottamien tarkkailukiilojen avulla kehite tuorestetaan oikein. Niitä käytetään siis lähinnä etukäteen kehitysolosuhteiden vakioimiseksi.

Tarkastelemalla filmin kumpaankin päähän valotettua harmaakiilaa kehityksen mahdolliset muutokset voidaan todeta yhden filmirullan kehityksen aikana. Nopeaa tarkastusta varten harmaakiilloista voidaan mitata esimerkiksi portaat 7, 14 ja 21. Nämä antavat jonkinlaisen käsityksen jyrkkyydestä ja maksimimustumasta. Jatkuvaa seuranta on syytä harjoittaa siten, että jokaisen tutkimustyön aikana kehitetyn filmin gamma-arvo ja maksimimustuma kirjataan tarkkailukorttiin. Tällä tavoin voidaan varmistaa kehityksen pysyminen kutakuinkin vakiona tai todeta siinä tapahtuneet muutokset.

## 5.5 Erotuskyvyn arviointimenetelmä

### 5.5.1 Erotuskykykriteeri

Lähtökohdaksi otetaan testikuvion viivojen suunnan ja lukumäärän erottaminen. Tämän lisäksi tarkastelijan on pystyttävä hahmottamaan viivat erillisinä kuvioina, vaikka kuviosta peitettäisiin viivojen pituussuunnassa puolet. Kuviota ei katsota erottuneeksi, mikäli jokin suurempi kuvio ei ole erottunut.

Esimerkki suositeltavasta kriteeristä on kuvassa 14. Kaikissa tutkimuksissa ja niistä tehtävissä raporteissa erotuskykykriteeri tulee esittää yhden tai useamman kuvan avulla.

### 5.5.2 Havaintojen teko

Koska havaitsijalla on huomattavaa vaikutusta erotuskykytestin tuloksiin, yhden havaitsijan on syytä tehdä kaikki havainnot. Toinen vaihtoehto on, että kaksi havaitsijaa tekee havainnot ja tulokseksi otetaan näiden keskiarvo. Sellainen työnjako, että toinen havaitsija tekee osan ja toinen toisen osan havainnoista, ei ole suositeltavaa.

Tehtiinpä havainnot suoraan filmiltä tai mikroskooppikuvilta, ne on tehtävä kahdesti siten, että havaintokertojen välillä on riittävästi aikaa. Kaikin tavoin on tehtävä edellisen tarkastelukerran tulosten muistaminen vaikeaksi. Useampikertaiset havainnot lisäävät aina tulosten luotettavuutta.



## 5.6 Tutkimustulosten analysointi

### 5.6.1 Tilastolliset menetelmät

Mikäli tilastollisia menetelmiä aiotaan käyttää tulosten analysointiin, koesuunnitteluun on kiinnitettävä erityistä huomiota. Tarkkoja, yleispäteviä ohjeita on vaikea antaa, koska tutkimusten päämäärät poikkeavat tavallisesti toisistaan. Jokaista tutkimusta on tarkasteltava erikseen ja tällöin on selvitettävä, onko perusteltua ja mahdollista käyttää tilastollisia menetelmiä.

Koska koetoistojen määrä pakostakin jää varsin pieneksi, on ensisijaisesti käytettävä ei-parametrisia testimenetelmiä. Samalla vältetään rajoittavat ennako-oletukset havaintojen kuulumisesta normaalijakaumaan. Testauksella yleensä selvitetään, ovatko tutkittavat näytteet otoksia samasta populaatiosta. Viitteessä /6/ on esitetty useita ei-parametrisia testejä.

On syytä vielä korostaa, että tilastollisten menetelmien käyttö edellyttää huolellista etukäteissuunnittelua. Havaintotyön jälkeen tehty päätös niiden käyttämisestä on liian myöhäinen.

### 5.6.2 Muut menetelmät

Muut kuin tilastolliset menetelmät tulosten analysoinnissa perustuvat enemmän tai vähemmän intuitioon ja kokemukseen.

Probleemana on usein päättää, poikkeako joillakin muuttujilla saatu erotuskyky  $RP_i$  peruserotuskyvystä  $RP_0$ . Yksi tapa ratkaista ongelma on valita suhteelle  $RP_i/RP_0$  ra-

jat, joita se ei saa ylittää. Esimerkiksi suhde  $RP_i/RP_o$  ei saa olla suurempi kuin 1.2 eikä pienempi kuin 0.8. Tässä työssä tätä suhdetta on käytetty kriteerinä.

Voidaan päätellä, että on olemassa jokin kiinteä raja, esimerkiksi 5 L/mm, jota suurempia poikkeamia ei sallita. Huonona puolena on ymmärrettävästi se, että suhteellista virhettä ei tässä oteta huomioon.

Koetoistojen määrän lisääminen tuo tässäkin tapauksessa lisää luotettavuutta tuloksiin.

## 6. YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli toisaalta hankkia ja systematisoida tietoa ilmakuvaukseen käytettävien filmien ominaisuuksista ja toisaalta kehittää menetelmää näiden filmien tutkimiseksi.

Työssä tutkittiin kehitysajan ja -lämpötilan, valotuksen, hajavalon, suotimien, kohteen kontrastin ja eri filmityyppien vaikutusta kuvan laatuun. Erotuskykyä käytettiin kuvan laadun mittana, koska se oli yksinkertaisin määrittää ja samalla havainnollisin. Erotuskyvyn määrittämisen tarkkuus oli noin 15 %.

Kehitysajalla ja -lämpötilalla ei ilmeisesti ole vaikutusta erotuskykyyn. Tämä koskee luonnollisesti vain sitä aika- ja lämpötila-aluetta, jota tutkimus käsitteli. Valotuksella on vaikutusta erotuskykyyn, mutta filmeillä on noin  $\pm 2$  aukon valotusalue, jolloin erotuskyky ei vielä merkittävästi laske. Keskiharmaan kohteen optimimustuma on 0.7 D tarkasteltaessa keski- ja matalakontrastista kohdetta ja 0.3 D tarkasteltaessa korkeakontrastista kohdetta. Hajavalon luonnollisesti laskee erotuskykyä. Sen vaikutus matalakontrastisiin kuvioihin on suurempi kuin korkeakontrastisiin. Valon aallonpituuden vaikutusta tutkittaessa todettiin, että spektrin punainen pää antoi parhaan ja sininen pää huonoimman tuloksen. On ilmeistä, että kameran sinisen pään värikorjaus on huono ja se aiheutti tämän tuloksen. Erotuskyvyn käyttäytyminen kontrastin suhteen oli odotusten mukainen lukuunottamatta aallonpituusaluetta 350-450 nm. Keski- ja matalakontrastinen kuvio antoi noin 10 % ja matalakontrastinen kuvio noin 30 % huonomman tuloksen kuin korkeakontrastinen kuvio. PX ja DX



olivat erotuskyvyltään suunnilleen samanlaisia ja TX oli 25-30 % näitä heikompi.

Työskentely on ollut luonteeltaan lähinnä kokeilevaa. Tulokset eivät näin ollen voi olla täysin kiistattomia. Erityisesti on korostettava tulosten ja tehtyjen johtopäätösten sidonnaisuutta käytettyyn laitteistoon, materiaaliin ja menetelmiin. Johtopäätökset eivät ole yleispäteviä lainalaisuuksia, vaan ne antavat hyvän kuvan siitä, mihin seikkoihin tulevassa tutkimustoiminnassa on kiinnitettävä huomiota.

## LÄHDELUETTELO

- /1/ Brock, G.C. Image Evaluation for Aerial Photography. London and New York 1970.
- /2/ Frieser, Hellmut Photographische Informationsaufzeichnung. München, Wien 1975.
- /3/ Kodak Data for Aerial Photography. Fourth Edition. 1976.
- /4/ Lewry, D.A. Thomson, G.H. Processing methods used for aerial survey film and their effects on image quality parameters. Int. Arch. of Phot.. Vol 24, part 1. Canberra 1982.
- /5/ Mutter, Edwin Kompendium der Photographie, 1. Band, Die Grundlagen der Photographie. Berlin-Borsigwalde.
- /6/ Siegel, Sidney Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences. Tokyo 1956.
- /7/ Walter, Henning Short report on results of experiments with Aviphot Pakotone processor for aerial films. Int. Arch. of Phot.. Vol 24, part 1. Canberra 1982.