

BLODCELLENES FYSIOLOGI: Livsløp, funksjoner og regulering

H. B. Benestad

HEMATOPOIETISKE STAMCELLER.....	3
ERYTROCYTTER.....	14
NØYTROFILE GRANULOCYTTER.....	21
MAKROFAGER.....	33
EOSINOFILE GRANULOCYTTER.....	38
BASOFILE LEUKOCYTTER.....	40
LYMFOCYTTER.....	42
BLODPLATER.....	46
BETENNELSE (INFLAMMASJON).....	52
MIKROBE- OG CELLEDRAPSMEKANISMER.....	70
APPENDIX.....	77

INNLEDNING

Formål. Undervisningen i blodcellenes fysiologi og hemostasen - i form av forelesninger, laboratoriekurs og PBL-oppgaver - har flere hensikter: (i) innlæring av sentrale cellebiologiske prinsipper, ved at blodcellene gir eksempler på generelle funksjonsmåter for celler; (ii) belysning av utviklingsbiologiske prinsipper og reguleringsmåter, ved at bloddannelsen i utvokste individer rekapitulerer mye av det som skjer i fosterlivet når differensierte celler dannes fra umodne forløperceller; men kanskje først og fremst (iii) illustrasjon av cellebiologiens og fysiologiens betydning for en dypere forståelse av kliniske problemer. God innsikt i blodets fysiologi er derfor viktig for helsepersonell. Det vil fremgå av kursheftet, og også av de kliniske problemer som er skissert i appendix til dette kompendiet.

Kort om mål og målbeskrivelse. Du skal mestre *ferdigheter* som inngår i øvelsene på laboratoriekurset så godt at du ikke unødig blir en plage eller fare for pasienter. Dessuten skal du ha *kunnskaper* - på forståelses-/analyse-/syntese-nivå - som setter deg i stand til å resonnerer fornuftig over fysiologiske og en del patologiske fenomener. Det forutsettes neppe¹ at du til eksamen skal kunne gjengi detaljer fra figurer og tabeller i kompendiet, eller fra "petit-stoffet". Dette siste er ment som **tilvalgsstoff**, tatt med for å illustrere og eksemplifisere – og kan være nyttig i klinikken. Den type fenomener du skal kunne resonnerer over, er angitt i appendix, i kursjournalutkastet, i kasusbeskrivelser og i tidligere eksamensoppgaver.

Blodcellene har 3 hovedoppgaver:

1. **Gasstransport** (O₂, CO₂) for erytrocyttene,

¹ Jeg må være litt vag angående kunnskapskrav, siden også andre enn meg har innflytelse på eksamens form og innhold.

2. **Forsvar** (mot mikrober, virusinfiserte celler og trolig svulstceller) og **renovasjon** (av "utbrukte" celler og intercellulærsubstans) for leukocytene, og
3. **Blodstansning** (hemostase) for trombocytene.

Tabell 1 gir i stikkords form en oversikt over blodcellene og noen av deres forløpere i beinmargen.

Tabell 1 : En oversikt over hovedaktørene.

BLODDANNENDE STAMCELLER: Kan fornye seg ved celledeling og gi opphav til alle blodcellelinjene. Pregløs lymfocyt-/blast-morfologi.

PROGENITORCELLER: Begrenset selvfornyelses-/differensierings- evne. Danner cellekolonier i kultur (vekstmedium + agar/methylcellulose + vekstfaktorer, som er cytokiner, bl.a. av typen "kolonistimulerende faktorer" [CSF]). Blastmorfologi.

ERYTROCYTTER: Gasstransportører (O₂, CO₂).

BLODPLATER: Plugger karskade. Etc.

NØYTROFILE GRANULOCYTTER: Lagret i beinmarg. "Storm-tropper" mot bakterielle og sopp-infeksjoner. Kan "primes" (pre-aktiveres) av CSF etc. Spiser-dreper-fordøyer-dør i betente vev. Skader evt. omgivelsene.

T-LYMFOCYTTER: Celleformidlet immunitet. Utskille cytokiner (interleukiner) og kjemokiner. Regulerer immunreaksjoner (hjelp eller suppresjon). Dreper forandrede egne celler (virus; kreft) og transplanterte celler.

B-LYMFOCYTTER : Humoral immunitet → Plasma-celler, som utskiller antistoffer.

MONOCYTTER: → Makrofager. Mononukleære fagocyt-system (inkl. Kupffer etc.). Frembyr antigenfragmenter for T-hjelpeceller. Fragmentene er bundet til MHC-klasse II-molekyler i cellemembranen. Makrofager reoverer. Kan aktiveres (bl.a. av IFN-γ): Dreper mikroorganismer og andre "fremmede" celler. Viktige cytokinprodusenter.

DENDRITTISKE celler: sammen med B-lymfocytter som makrofager antigenpresenterende celler.

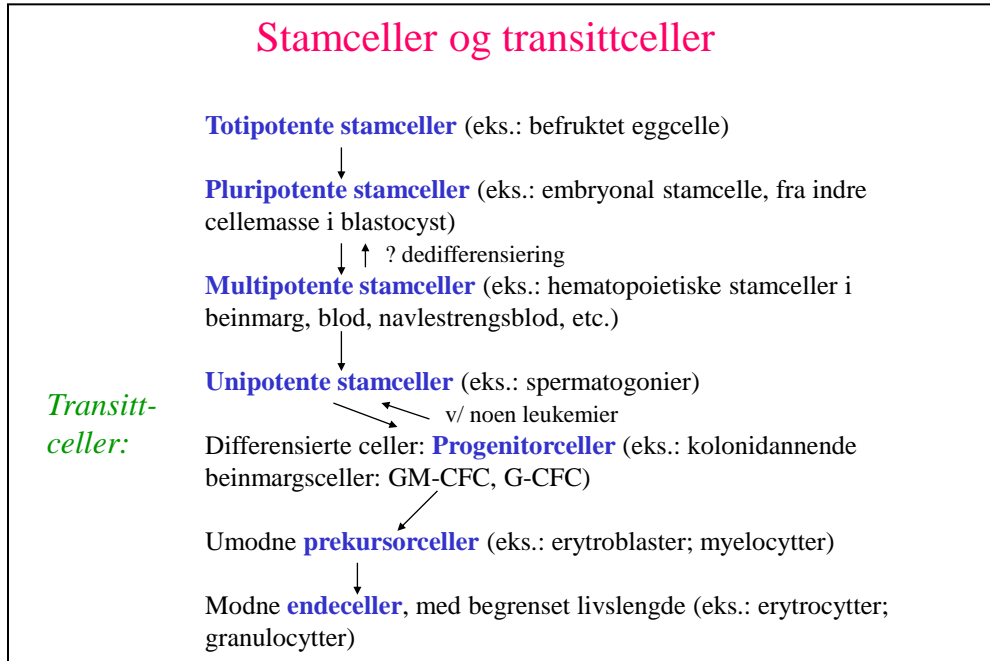
NK- ("natural killer") CELLER og LAK- CELLER ("lymphokine activated killer", dvs. aktiverte NK-celler): Dreper "fremmede" celler. Store, granulære lymfocytter. Førsteangrep på f. eks. virus-infiserte celler, før T-cellene. Andre lymfocytter i samme kategori: ILC, som også står for medfødt («innate»), ikke-adaptiv immunitet. De spiller også en rolle bl.a. ved kronisk betennelse.

EOSINOFILE GRANULOCYTTER: Dreper ormeparasitter, etc. Forårsaker celledskade og er produsent av betennelsesmediatorer i Ig-E-formidlete atopiske allergier.

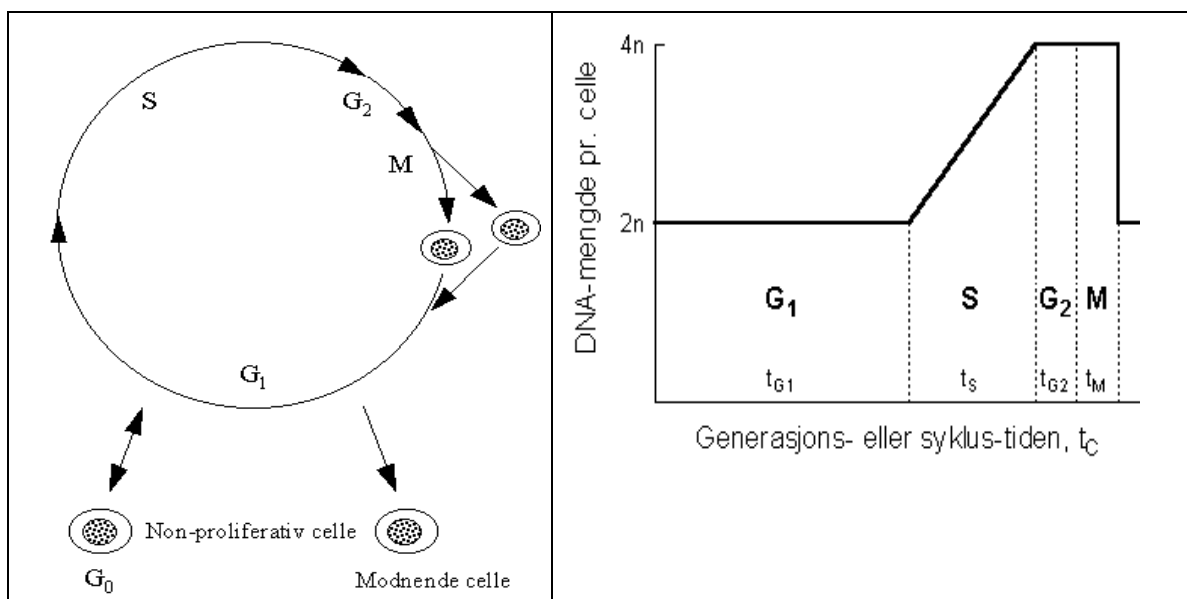
BASOFILE GRANULOCYTTER: Sammen med MASTCELLER (som finnes i alle løse bindevev): Utskille betennelsesmediatorer: Histamin, leukotriener, PAF ("Platelet activating factor"), cytokiner, etc. Viktige bl. a. i atopiske allergier.

HEMATOPOIETISKE STAMCELLER

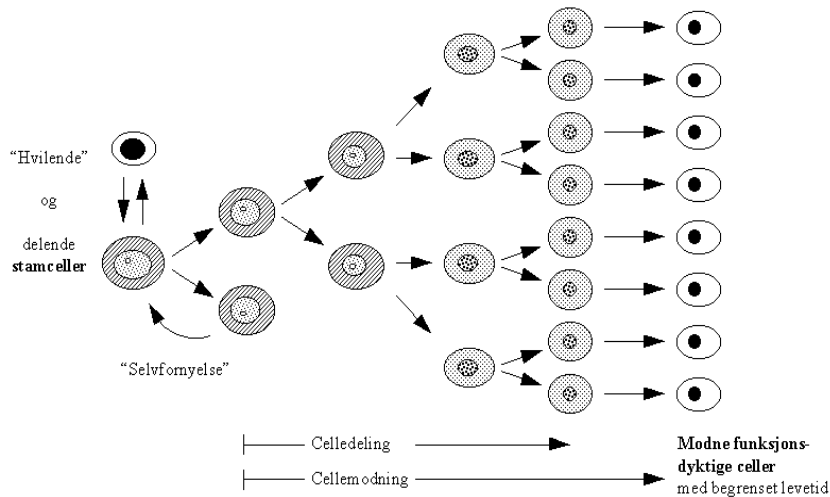
Stamceller kan reprodusere seg selv. De finnes i nesten alle vev. I eksperimentell medisin forsøker man å reparere diverse organskader med stamceller.



Dannelse og skjebne. Multipotente hem(at)opoietiske (bloddannende) stamceller er umodne celler som kan gi opphav til alle celletypene som finnes i blodet (røde og hvite blodceller og blodplater, dvs. erytro-, leuko- og trombocytytter). De kan dessuten "fornye seg selv" når de deler seg, dvs. at dattercellene ikke er mer differensierte enn morcellen. De likner sannsynligvis små lymfocytter når de er i hvilefase (G_0), dvs. ute av cellyklus, og store lymfocytter (=blaster) når de er i syklus, eller delingsfase (G_1 , S, G_2 , M-fasene, se fig. 1-3).



Figur 1. Oversikt over cellyklus.



Figur 2. Fornyelsesvev (som beinmarg, overhud, tarmepitel, der fornyelsen skjer kontinuerlig og med høy celleproduksjon). I kjertler, lever, nyre – endog skjelettmuskulatur og hjerne – mener man nå at en liknende fornyelse kan finne sted, for eksempel etter vevstap, fra stamceller i vevet.

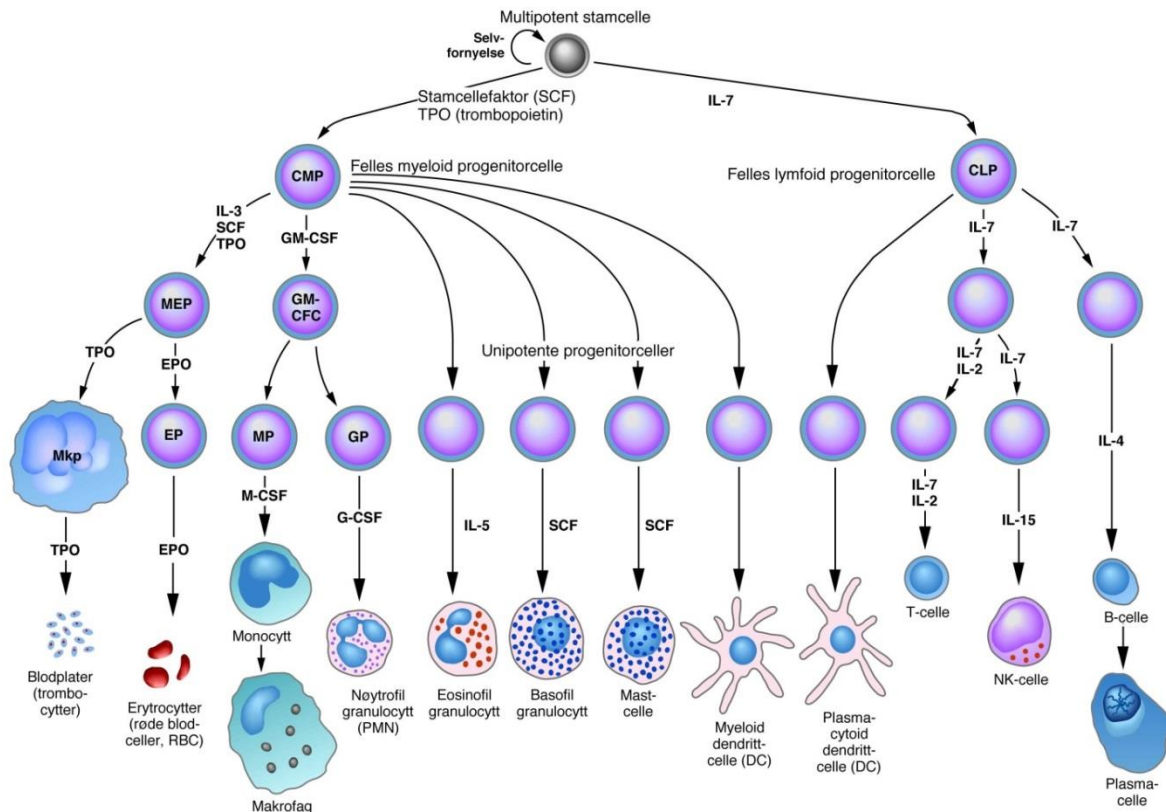
De fleste forfattere reserverer termen multipotent for beinmargstamcellene og bruker pluripotent-betegnelsen på enda mer umodne stamceller, som finnes i de tidlige fosterstadiet (blastocysten), jf. oversikten ovenfor..

Skjemaset i fig. 3 gir en grei oversikt over de hematopoietiske stamcellenes utviklings- eller differensierings-muligheter, men må ikke tas for annet enn det. Man kan nå studere stamceller og mer modne celler enkeltvis, og bildet blir da mer komplisert enn det var. Det er mulig å kartlegge hvilke gener som er aktive i en enkelt celle, ved å sekvensere dens RNA (dvs. kartlegge dens transkriptom). Og man kan genetisk merke enkeltceller, f.eks. gule eller røde, slik at alle cellenes etterkommere får samme farge. Slik kan man kartlegge hvilken celledannelse en transplantert stamcelle (i mus) gir opphav til. Resultatet av slike studier er bl.a. at stamcellepopulasjonen ses på som mye mer forskjelligartet (heterogen) enn før: Vi har «langvarige» («long-term») og «kortvarige» («short-term») stamceller; dessuten «biased» stamceller, med tendens til å utvikle seg mot én eller få modne celletyper, selv om de er multipotente.

Stor grad av heterogenitet eksisterer også innen de andre celledstadiene angitt i fig. 3, slik at man nå kan atskille f.eks. flere monocytstadiet, med kontinuerlig overgang mellom hvert stadium, avhengig av hvilke transkripsjonsfaktorer og epigenetiske mekanismer, f.eks. via cytokiner, som påvirker cellene.

Man mener nå at de mest umodne, «langvarige» hematopoietiske stamcellene hos mennesker ikke er flere enn 3.000–10.000 celler, og at de bare deler seg én gang hver 3. – 36. måned. De lever i en slags hvileform, med glykolytisk metabolisme og tendens til autofagi (som virker foryngende), i motsetning til etterkommerne, som bl.a. har oksidativ metabolisme. Men siden det produseres ca. $1,4 \times 10^{14}$ celler per år (dvs. ca. 4,4 millioner per sekund – 2,9 mill. RBC og 1,16 mill. av hvite og blodplater), må det foreligge mange og raske celledelinger innen differensieringsstadiene etter de mest umodne stamcellene.

Blodcellene dannes etter fødselen fra stamcellene i beinmargen. Unntatt er deler av lymfocyttdannelsen: Umodne celler (T-progenitorceller) føres med blodet fra beinmargen til thymus og gir der opphav til T-lymfocytter.



Figur 3. Oversikt over blodcelledannelsen.

Progenitorceller kan dele seg mange ganger og gi opphav til celler som igjen kan dele seg mange ganger før de er blitt så modne at delingsevnen er gått tapt. Progenitorcellene er etterkommere av stamcellene, men mangler noe på stamcellenes evne til selvfornyelse.

I fosterlivet, og seinere ved enkelte sykkelige tilstander, dannes erythrocytter, leukocyter og trombocyter også i lever og milt.

Normalt finnes noen få stamceller i blodet hos utvokste individer. De kommer fra beinmargen, og det er trolig slike som gir opphav til bloddannelse i lever eller milt. Stamceller kan mobiliseres til blodet fra beinmargen av visse vekstfaktorer: Rekombinant granulocytstimerende faktor (G-CSF, se seinere) og/eller andre cytokiner injiseres for å øke konsentrasjonen av stamceller så meget i blodet at celler herfra kan samles opp og brukes istedenfor beinmarg (som krever narkose av donor) til transplantasjon ("Cellegiftbehandling av kreft, med stamcellestøtte").

I navlestrengsblod er det også mange stamceller, som kan isoleres og brukes til transplantasjon.

Beinmargstransplantasjonen utføres ved at celleduspensjonen som inneholder stamcellene, infunderes intravenøst, som en vanlig blodtransfusjon. Stamcellene vil da sirkulere i blodet, og en liten del av dem slår seg ned i "fruktbar jord", dvs. i beinmargen og der gi opphav til blodcelledannelse (hematopoiese).

Stamcellene og progenitorcellene er svært fåtallige i bloddannende vev. Dessuten har de et ukarakteristisk utseende. For å bestemme mengden av dem kan vi benytte oss av mønsteret av membranproteiner de uttrykker – spesielle cytokinreseptorer og CD ("cluster of differentiation")-molekyler. Slike molekyler kan «merkes» med monoklonale antistoffer. Hvis antistoffene har festet til seg en fluorescerende "merkelapp", kan progenitorceller med disse merkelappene sorteres ut fra en suspensjon av beinmargsceller v.hj.a. væskestrømscytometri ("flow cytometry", se fig. 5).

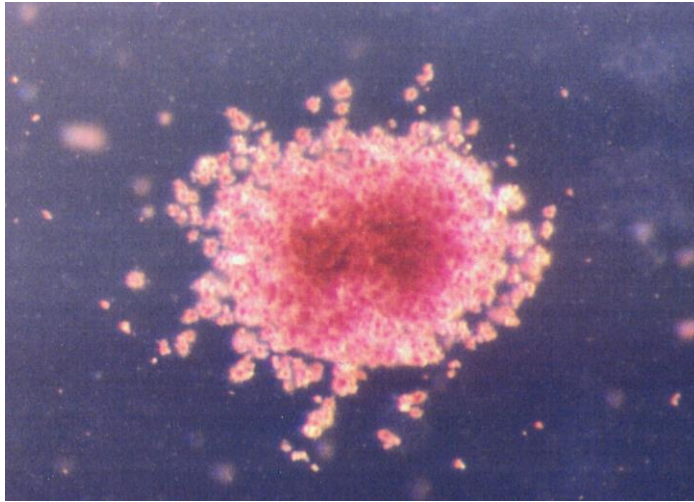
Alternativt kan vi benytte oss av progenitorcellenes egenskaper, som er å danne modne blodceller. En måte å gjøre dette på, er å dyrke beinmargceller i et vekst-medium som er gjort geléaktig - for å holde cellene på plass - ved å tilsette agar eller metylcellulose. Under spesielle kulturbetingelser, som bl.a. betyr tilsetning av vekstfaktorer (cytokiner, se Boks 1), kan da progenitorceller dele seg og danne makroskopisk synlige cellekolonier etter 1-2 uker (fig. 4). Hver koloni stammer fra én celle, dvs. cellene i kolonien utgjør en klon. Koloniene kan inneholde celler innen erytrocytt-, megakaryocyt-, granulocyt- eller makrofag-cellelinjene. I noen av progenitorcellekoloniene kan flere cellelinjer være representert. Ved å telle kolonier kan vi få et uttrykk for mengden av progenitorceller som ble sådd ut i dyrkningsskålen.

Vi har ennå ikke noe fullgodt *in vitro* (= "i glass") dyrkningssystem til testing av de mest umodne humane stam/progenitor-cellene. Tungvinte metoder som baserer seg på celletransplantasjoner til immundefekte mus, med kvantifisering av blodcelledannelsen etter en viss tid, er teknikker som for tiden brukes. Mus er vanlige forsøksdyr i stamcellefeltet. Her har man i ca. 50 år hatt miltkolonimetoden (fig. 4) til å kvantifisere stamceller – som dog ikke er de mest umodne stamcellene.

Stamcelleassayet: miltkoloni-metoden: kloner ("knuter", cellekolonier) dannet i bestrålt musemilt, fra injiserte stamceller etter vel en uke



Beinmargscellekoloni: celleklon som kan være dannet av en progenitorcelle etter 1 uke (mus) eller 2 uker (menneske)

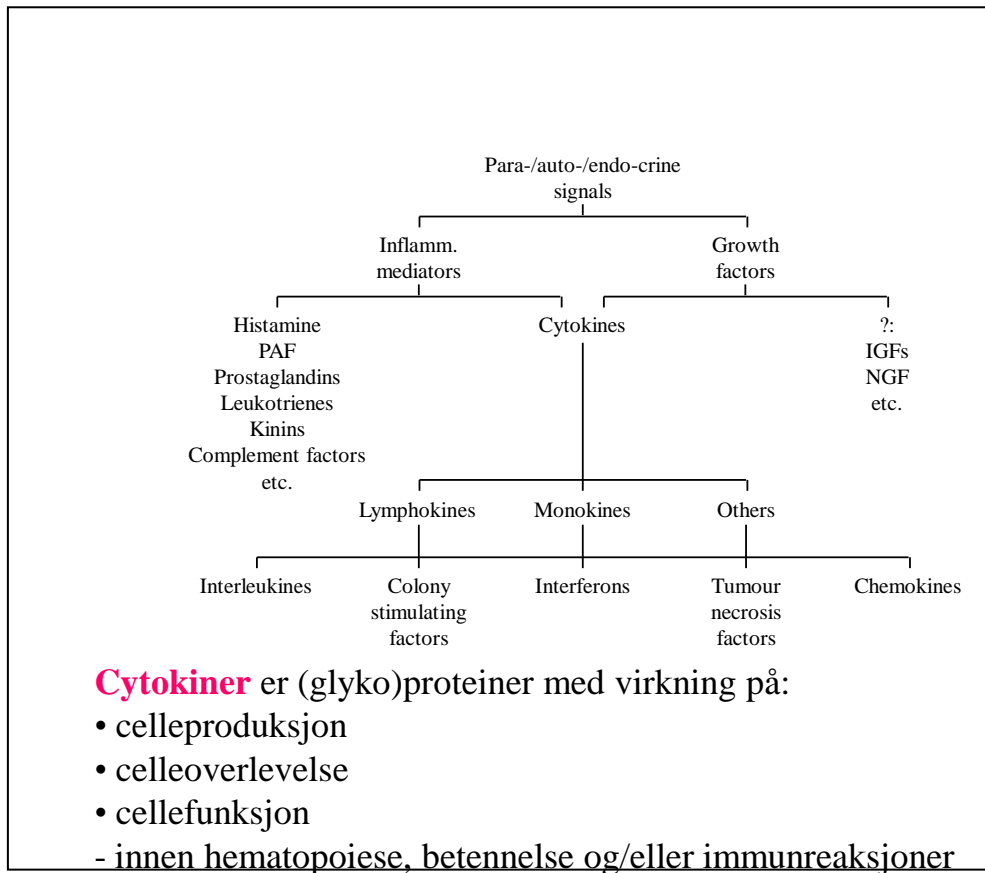


Figur 4. To stam-/progenitor-celle-assays (miltkoloniteknikken, på mus, og cellekolonidyrkning in vitro, også for mennesker).

Reguleringsmekanismer.

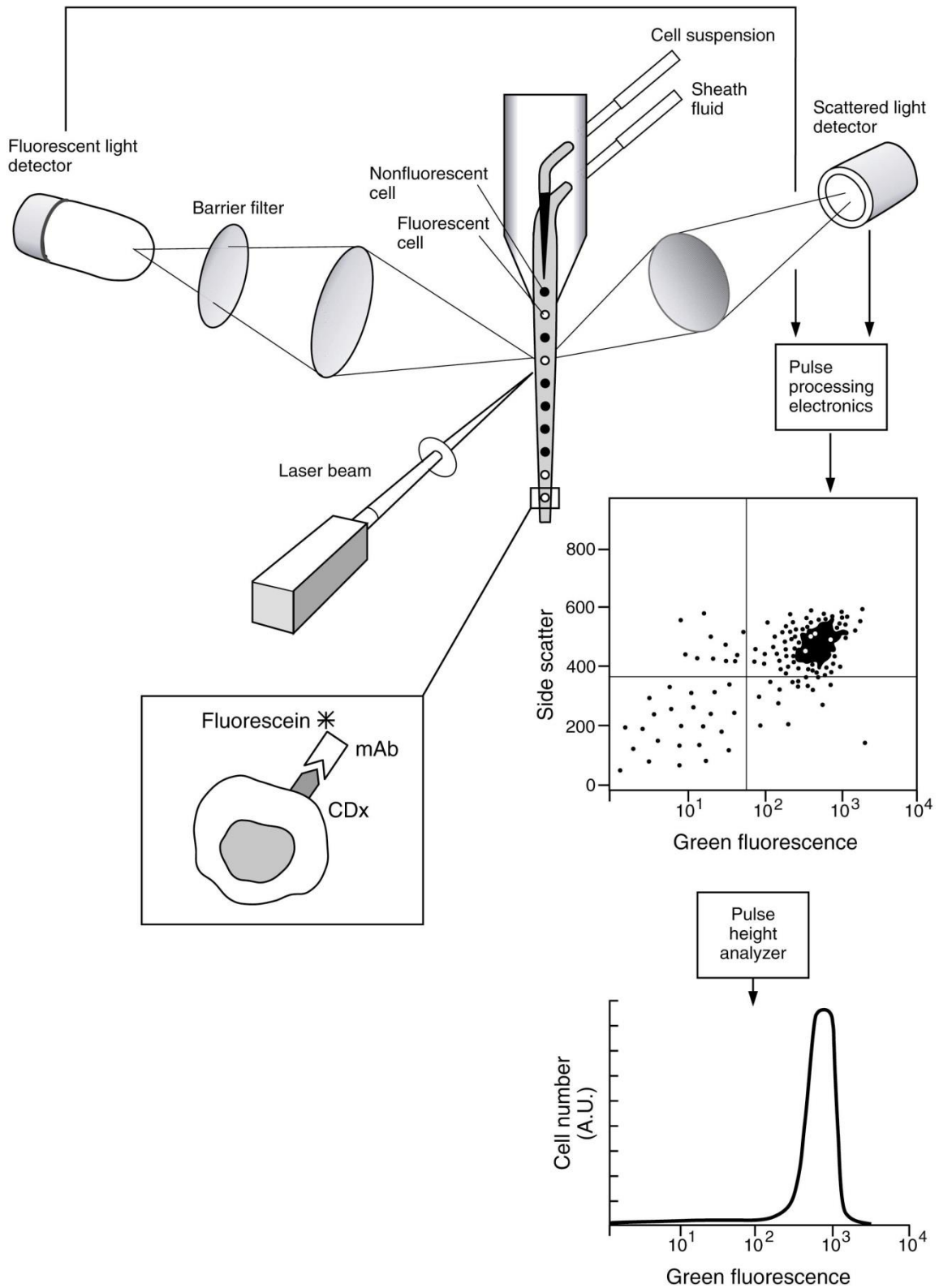
Beinmargskulturer må være tilsatt spesielle vekstfaktorer eller *cytokiner*, bl.a. såkalte kolonistimulerende faktorer (CSF), for at de umodne cellene skal dele og utvikle seg. Disse vekstfaktorene er gjerne glykoproteiner og produseres bl.a. av T-lymfocytter, makrofager, endotelceller og stromaceller i bloddannende vev. Noen av cytokinene har en fysiologisk rolle i reguleringen av blodcelledannelsen ved at de hele tiden må være til stede i beinmargen for at normal celleproduksjon skal foregå, og for at cellene ikke skal dø for tidlig (programmert celledød; *apoptose*); andre produseres bare når det kreves økt celledannelse og funksjonell aktivering av leukocytene (Boks 1, fig. 3).

Cytokinene (Boks 1, Tabell 2) har ulike signalfunksjoner og signalveier: (i) langveis mellom celler og via blodbanen (hormon- eller *endokrine* virkninger), (ii) mellom nærliggende celler (lokalhormon- eller *parakrine* virkninger), eller endog (iii) overfor produsentcellen selv (*autokrin* virkning). Én undergruppe av cytokinene er lymfokinene; de utskilles av aktiverte lymfocytter, en annen er monokinene, utskilt fra monocytter og makrofager. Men de fleste cytokinene er nå så velkarakteriserte at aminosyrekkefølgen er kjent og genet som koder for dem, er klonet. Disse har fortjent navnet *interleukiner*, med et tall etter. Dette navnet viser til at de har en signalfunksjon mellom hvite (leukos) blodceller. Men interleukinene har flere virkninger enn som så (f.eks. virker interleukin-1 på hypothalamus-termostaten slik at vi får feber).



Boks 1: Tentativ klassifikasjon av cytokiner, etc.

FLOW CYTOMETRY

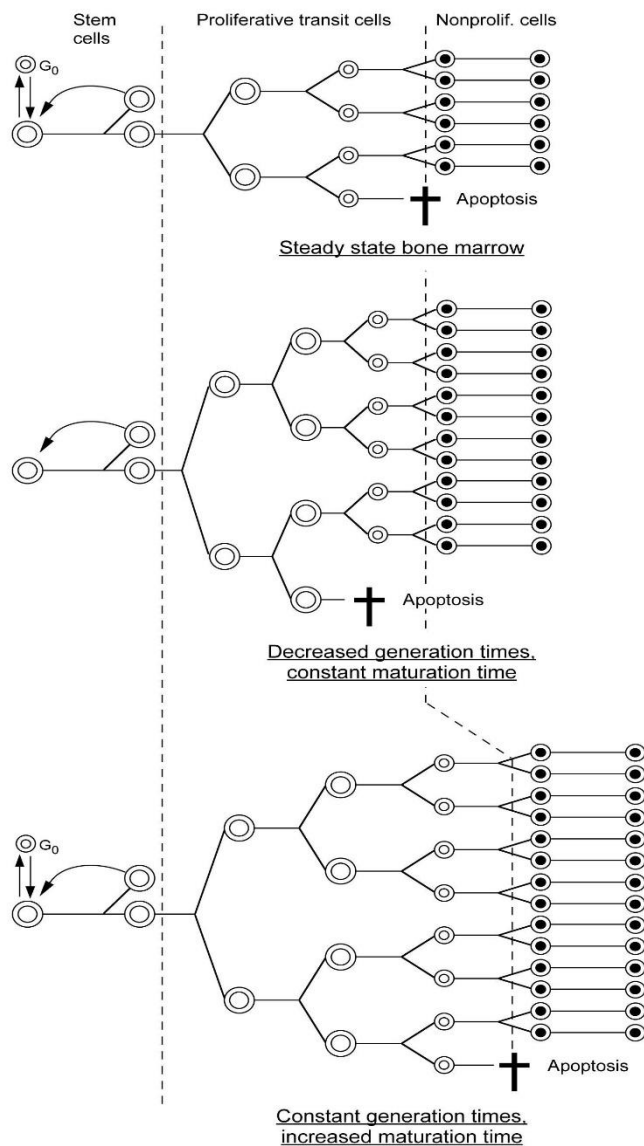


Figur 5. Analytisk væskestrømscytometri ("Flow cytometry")

Tabell 2 : NOEN CYTOKINER OG DERES EGENSKAPER

(IL = interleukin; CSF = koloni-stimulerende faktor; IFN = interferon; G = granulocyt; M = makrofag; S =stamcelle)	
IL-1:	Betennelsesmediator (betennelsescytokin) som også inducerer feber, søvnighet, anorexi, ACTH-frigjøring, nøytrofili, muskelkatabolisme, økt senkningsreaksjon og andre akuttfasereaksjoner – gjerne i samvirke med andre cytokiner (IL-6 og TNF). Stimulerer bl.a. endotelceller og andre beinmargsstromaceller til å secernere CSF. Produseres av bl.a. makrofager, fibroblaster, endotelceller, lymfocytter, keratinocytter.
IL-2:	Stimulerer vekst, differensiering og/eller aktivering av T-, B- og NK-celler. Produseres av aktiverte T-celler.
IL-3:	Er CSF for beinmargs-stamceller/progenitorceller. Vekstfaktor for mastceller. Produseres av aktiverte T-celler.
IL-4:	Vekstfaktor for bl.a. T-hjelper-2-celler; er dermed med på å aktivere B-celler til IgE-produksjon. Produseres av aktiverte T-celler.
IL-5:	Vekst/modningsfaktor, etc., for eosinofile granulocytter. Produseres av aktiverte T-celler.
IL-6:	Betennelsescytokin. Induserer differensiering av aktiverte B-celler til plasmaceller. Stimulerer sammen med IL-1 leveren til å secernere akutt-fase-proteiner. Har trolig også en negativ tilbakemeldingsvirkning på betennelsesreaksjonen, inklusive dannelsen av IL-1 og TNF- α . Produsentceller som for IL-1 + mastceller.
IL-8 (CXCL8):	Virker kjemotaktisk på nøytrofile granulocytter og stimulerer også disse cellene forøvrig. Produseres av monocytter/makrofager og endotelceller.
GM-CSF:	Stimulerer overlevelse og vekst av beinmarg-progenitorceller som kan gi opphav til kolonier av granulocytter, makrofager eller begge deler i kultur. "Primer" (dvs. pre-aktiverer) modne granulocytter; er med på å aktivere makrofager og dendritiske celler. Produsentcellene er makrofager, fibroblaster, endotelceller og aktiverte T-celler.
G -CSF:	Vekstfaktor for granulocytter; jf. GM-CSF. Mobiliserer stamceller og granulocytter fra beinmarg til blod. "Primer" segmenterte granulocytter og forlenger livet deres (utsetter apoptosen). Produseres av samme celletyper som lager GM-CSF.
M -CSF:	Vekst- og aktiveringsfaktor for makrofager; jf. GM-CSF. Produsenter: omtrent som for GM-CSF.
IFN-γ:	Viktigste makrofagaktivator. Motvirker som IFN-alfa og -beta virusmultiplikasjon intracellulært. Induseres bl.a. av IL-18 og inducerer selv klasse 1- og 2-HLA-antigener på en rekke celletyper. Aktiverer også NK-celler og endotelceller. Produseres av aktiverte T- og NK-celler.
TNF-(α)	(Tumor nekrose faktor): Betennelsescytokin. Direkte cytotoxisk for noen kreftceller. Har forøvrig mange av de samme virkningene som IL-1, og produseres som IL-1 av makrofager, etc.
S(C)F	("Stamcellefaktor", alias c-kit-ligand eller "Steel-faktor"): Viktig vekstfaktor for stamceller (celle-til-celle-aktivering). Finnes i secernert (løst i kroppsvæskene) og membranbundet form – sistnevnte viktigst. Produseres bl.a. av visse stromaceller i bloddannende vev.
TGF-β:	(Transforming growth factor): Hemmer betennelse, hematopoiese og immunreaksjoner. Stimulerer bindevevsdannelse. Produseres av bl.a. makrofager, trombocytter, lymfocytter, endotelceller og keratinocytter. Sekresjonsstimuli er bl.a. IL-1 og andre cytokiner. TGF- β kan lagres i inaktiv form bundet til ekstracellulærmatriks.

Hypothetical ways of regulating blood cell production



Or a combination of decreased generation times (and perhaps smaller loss by apoptosis) and increased maturation time when cell production rate has to be augmented.

Figur 6. Mulige måter å regulere blodcelledannelsen på.

I prinsipp kan produksjonen av blodceller (og tilsvarende tarmepitelceller, hudceller, etc.) varieres ved å regulere:

- Stamcellenes delingshastighet
- Stamcellenes selvfornyelses-sannsynlighet
- Stamcellenes sannsynlighet for å determineres i aktuell retning
- Stamcellenes og progenitorcellenes og mer modne cellers apoptose
- Modnende cellers delingshastighet
- Modnende cellers modningshastighet
- Modne cellers livslengde (apoptose-sannsynlighet)

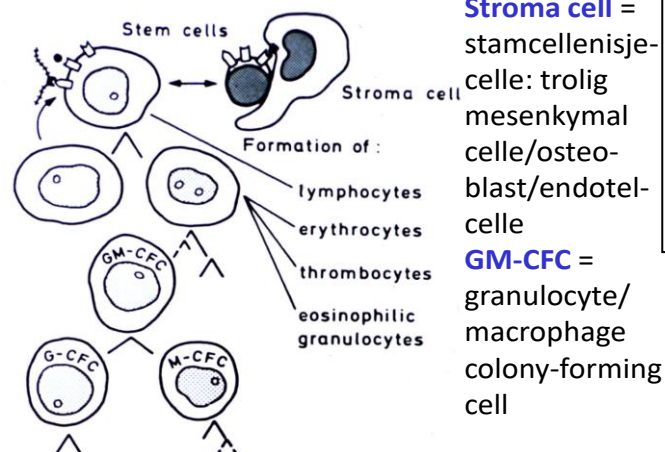
Noen av disse reguleringsmåtene er angitt i fig. 6.

Regulering av stamcellevekst.

Selv om vi vet en del om cytokiner og cytokinvirkninger, er ennå meget ufullstendig kjent. Det ser ut som om celledelingen er styrt både av stimulatorer (CSF etc.) og hemmere (fig. 7). Stamcelle-determineringens (dvs. bestemmelsen av hvilken retning de skal utvikle seg i) og cellemodningens regulering studeres intenst, bl.a. for å kunne få stamceller til å vokse som stamceller i kultur, ikke bare differensiere og miste sine stamcelle-egenskaper: Vi må da kjenne til hvilke egenskaper ved cellene i stamcellenes nærmiljø som er essensielle (Osteoblaster? Endotelceller? Mesenkymale stamceller? Andre?), og hvilke signaler disse cellene sender til stamcellene (i form av "klassiske" cytokiner?)

Signalsystemer som er essensielle også i selve fosterutviklingen: Notch, Wingless type (Wnt), Sonic hedgehog (Shh)? Stamcellereseptorer kan motta signaler fra cytokiner eller andre molekyler (ligander) i de regulerende cellenes overflatemembran ("celle-til-celle-kontroll"), eller fra utskilte ligander som har "hektet seg opp på" (er bundet til) intercellulærsubstansen. Én grunn til at det er viktig å kunne øke en stamcellepopulasjon *in vitro* er at vi da ville få et bedre utgangspunkt for stamcelle-transplantasjoner, ikke minst av stamceller fra navlestrengsblod (som er for fåtallige til å behandle ett voksent menneske).

Regulering på stamcellenivå



Figur 7. Regulering på stamcellenivå. Stamcelle-stimulerende (f. eks. IL-3) og hemmende (f. eks. TGF- β) cytokiner er angitt som små, fylte symboler som enten er frie i ekstracellulær-væske, knyttet til proteoglykaner i bindevevsmatriks eller plassert i stromacellens cellemembran. Et nytt, regulerende cytokin fra stamcellenisjen, pleiotrofin, lansert H-2018.

Funksjon. Stamcellenes oppgave er å danne funksjonsdyktige, modne ende-celler. *Cellemodningen* frem til funksjonsdyktige stadier følger gjerne et generelt mønster i de blodcelle-linjene hvor ende-cellene har begrenset levetid (fig. 2, 3, 8, 15): Cellekjernene blir stadig mindre og tettere. Nucleoli blir ikke lenger synlige i vanlige utstrykspreparater. Delingsevnen går tapt. Cytoplasma blir mindre ribosomholdig, altså mindre basofilt og med mindre proteinsyntese. Spesielle proteiner, som er viktige for den modne cellens funksjon, akkumuleres etter hvert. Eksempler på slike proteiner er de som finnes i korn i granulocytene og hemoglobin i erytrocyttene. Fagocytene blir også mer bevegelige jo mer

modne de blir. Alle celletypene deformeres lettere. Cellene settes dermed i stand til å komme seg mellom eller gjennom endotelcellene i beinmargen og over i blodbanen. Modningsprosessene er også karakterisert ved opptreden av nye membranproteiner, f.eks. Fc-reseptorer og adhesjonsmolekyler hos granulocytene (CD18, CD11b).

Stamcellepoenger

Stamcelledefinisjon: selvfornyelse.

Karakteristika: Finnes i beinmarg (1 blant 10^5 - 10^6 ?), blod; evt. milt og lever. Pregløs morfologi.

Betydning:

- **Biologisk:** utvikling og opprettholdelse av organer og vev (vevshomeostase)
- **Terapeutisk:**
 1. Cellegiftbehandling med stamcellestøtte (gjerne stamceller isolert fra blod etter behandling med f. eks. G-CSF).
 2. Ved differensiering *in vitro* av embryonale stamceller eller stamceller laget v.h.j.a. ”somatic cell nuclear transfer” (SCNT) eller som ”induced pluripotent stem (iPS) cells”: modeller til utprøving av legemidler.
 3. Behandling av arvelige sykdommer? Reparasjon av ødelagt vev (hjerteinfarkt; hjerneslag; Parkinsons sykdom; Alzheimer; muskeldystrofier; tverrsnittslesjoner av ryggmargen)?

Stamceller til reparasjon, regenerasjon og legemiddeltester. Stamcellefeltet har blitt gjenstand for kolossal forskningsaktivitet, siden man håper å kunne bruke stamceller til å reparere skadet vev, slik som ved ryggmargslesjoner ved trafikkulykker. Eller erstatte ødelagt vev, som ved Alzheimers demens, Parkinsons sykdom, hjerteinfarkt og diabetes mellitus type I. Man har tenkt seg å bruke embryonale stamceller (ES) fra blastocyster som blir til overs etter *in vitro*-fertilisering. Dette er etisk kontroversielt og vil kunne by på immunforkastelsesproblemer. Mer forlokkende er det å ”skreddersy” stamcellene til pasienten som skal behandles. Dette kan p.t. i prinsipp gjøres på to måter. Enten kan man bruke et humant egg (og da trenger man en kvinnelig egg-donor) der cellekjernen er fjernet og erstattet av kjernen fra en kroppscelle hos pasienten, f. eks. en fibroblast. Egget kan så utvikle seg til en blastocyst som man kan isolere ES fra. En nyere mulighet er å ”forynge” kroppscellen, ikke ved hjelp av cytoplasmatiske faktorer hos eggcellen, men ved hjelp av tre eller fire identifiserte transkripsjonsfaktorer hvis gener føres inn i cellen v.h.j.a. f.eks. et retrovirus.

Vanskelighetene og betenkelighetene ved denne egentlig enkle metoden er at foreløpig bare en liten del av fibroblastene (eller andre celleslag) lar seg indusere til pluripotente stamceller (iPS(C) – induserte pluripotente stamceller), og man vet ikke alltid om disse cellene kan utvikle seg til kreftceller. Det er derfor hektisk forskningsaktivitet for å komme frem til nye og potensielt sikrere måter å lage iPS på.

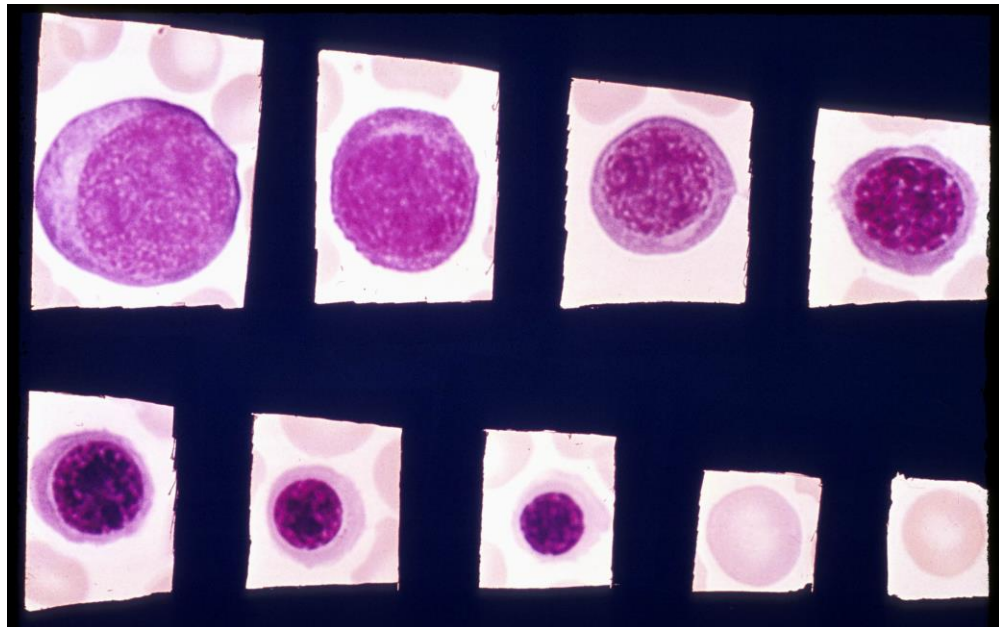
Uten å transplantere celler som dannes fra disse to stamcelletypene, kan man lage cellekulturer *in vitro* fra dem, som kan brukes til å teste bl.a. medikamentvirkninger og medikamentmetabolisme hos den aktuelle pasienten. Dette er jo en mye enklere bruk av metodikken, som allerede er tatt i bruk.

ERYTROCYTTER

Røde blodceller (RBC) er fantastiske gasstransportører. Produksjonen er nøye tilpasset behovet, men kan måtte melde pass ved mangel på byggesteiner og kofaktorer, arvelig syntesevikt, blødninger, forkortet RBC-levetid (hemolyse). Vi har da for oss en anemisk pasient, med lav hemoglobinkonsentrasjon og hematokrit og gjerne uspesifikke symptomer (slapphet, etc.) og tegn (blekhet).

Dannelse og skjebne. De første differensieringsstadier etter stamcellen vet man lite om. Den blivende erytrocytt gjennomgår så modnings- (hemoglobinsyntese) og celledelingsprosesser som forløper delvis parallelt (fig. 8). Erytrocytt-dannelsen foregår omtrent som granulocytt-dannelsen (se seinere), men bare med et kort lagringsstadium for slutt-stadiet i beinmargen, *retikulocyten* (fig. 9).

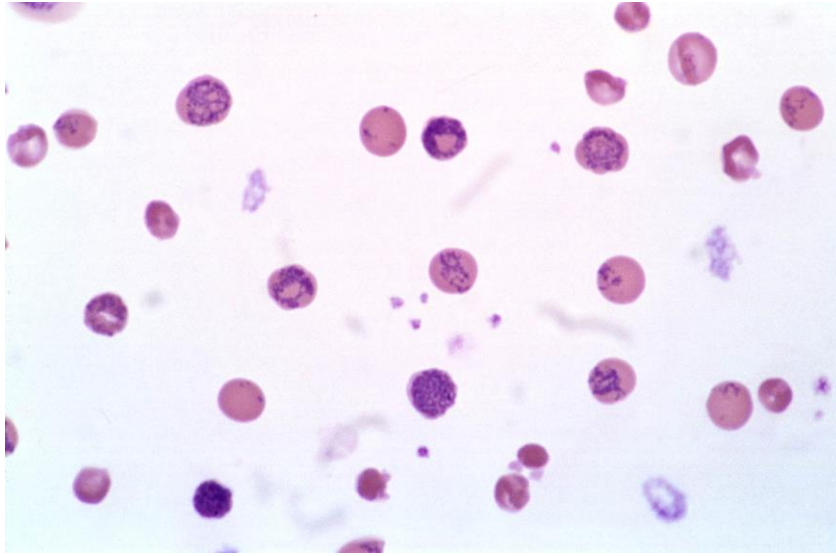
Erytrocytt-dannelsen



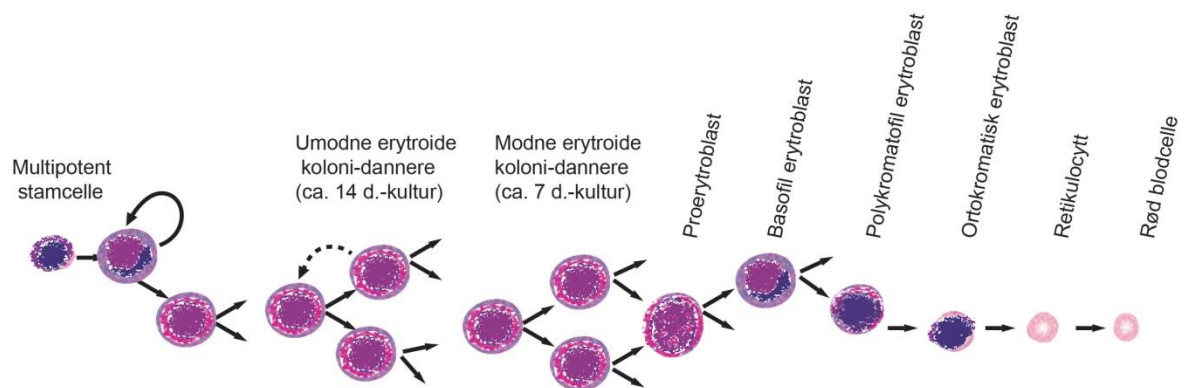
NB! Retikulocytt er ikke "nettverksceller" i May-Grünwald/Giemsa-fargede utstryk

Figur 8. Erytropoiesen.

Retikulocytt



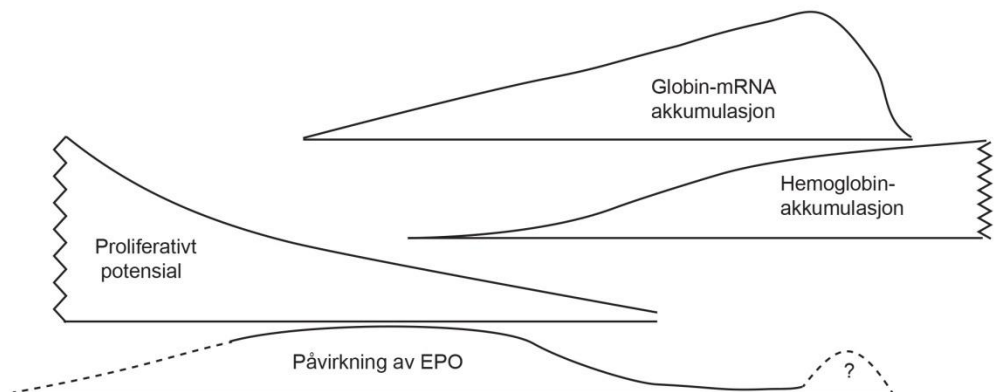
Figur 9. Mange retikulocytt (fra anemisk rotte).



Erytropoesen

Også påvirket av:

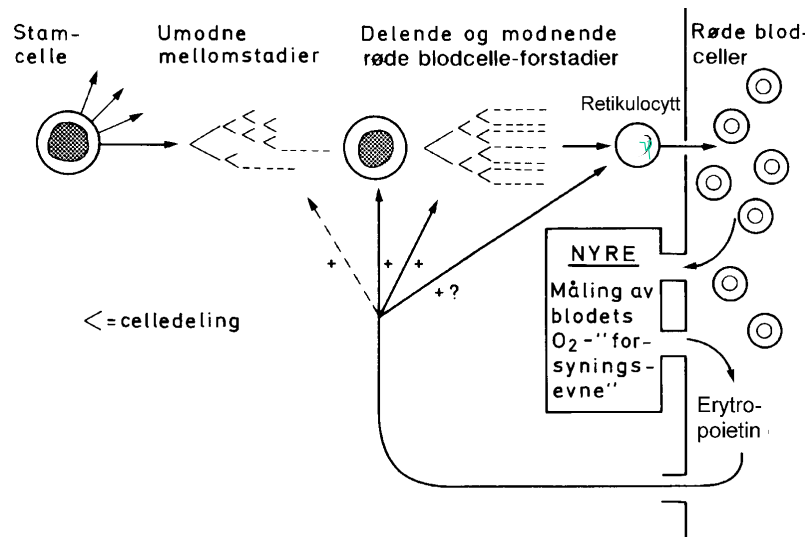
- Andre hormoner og cytokiner (IL-3, SCF, IGF1, kortisol, etc.)
- Epigenetiske endringer (histonmodifikasjoner, miRNA)
- Fibronektin



Figur 10: Oversikt over erytropoesen

Utviklingen fra proerytroblaststadiet består først av en modnings- og celledelingsperiode på ca. 3 døgn (3-4 delinger). Når cytoplasma har fått rødfarge p.g.a. nydannet hemoglobin (ca. polykromatofil erytroblast), tapes delingsevnen. Etter fortsatt modning i noen få døgn (bl.a. med tap av cellekjernen, mitokondrier og andre organeller), trer den umodne erytrocytt (dvs. retikulocytt) over i blodsirkulasjonen. Mitokondrier fjernes ved mitofagi (= selektiv autofagi).

Erythropoiesereguleringen



Figur 11. Erythropoietindannelse og -virkning.

Det er gjerne vel 1% retikulocytter (se kursheftet) blant erytrocyttene, og de har noe mer enn ett døgnns sirkulasjonstid. De modnes i løpet av dette døgnet videre til erytrocytter (dvs. ytterligere litt hemoglobinsyntese finner sted, og ribosomene mistes deretter). Det er ribosomene som klumpes og farges av vitalfargingen, og som har gitt retikulocyttens navnet sitt: "nettverkscelle". Erytrocyttene sirkulerer ca. 120 dager og nedbrytes så ved fagocytose foretatt av makrofager, normalt først og fremst i milten.

Reguleringsmekanismer. Erythropoiesen akselleres av *erythropoietin* (EPO), et glykoprotein-hormon som dannes i nyrene, i peritubulære interstitielle celler, som har lange utløpere mellom proksimale nyretubuli (fig. 10, 11). EPO utskilles i økt mengde ved nedsatt O_2 -tilbud (anemi, hypoksi, etc.), som svar på aktivering av 'hypoxia-inducible factor' (HIF) (fig. 12). EPO synes å øke både celledelingshastigheten og modningshastigheten, men slik at det kan bli "plass til" ca. 3 ekstra celledelinger i løpet av modningsprosessen (dvs. en multiplikasjonsfaktor på henimot 10, sammenliknet med stasjonære normalforhold). I situasjoner med økte EPO-konsentrasjoner i kroppsvæskene sees dessuten akselerert uttømming av retikulocytter fra beinmargen og noe forlenget sirkulasjonstid før de blir modne RBC.

Mannlige kjønnshormoner stimulerer EPO-produksjonen, og dette kan forklare hvorfor menns hemoglobinkonsentrasjon i blodet normalt er litt høyere enn kvinners. EPO virker

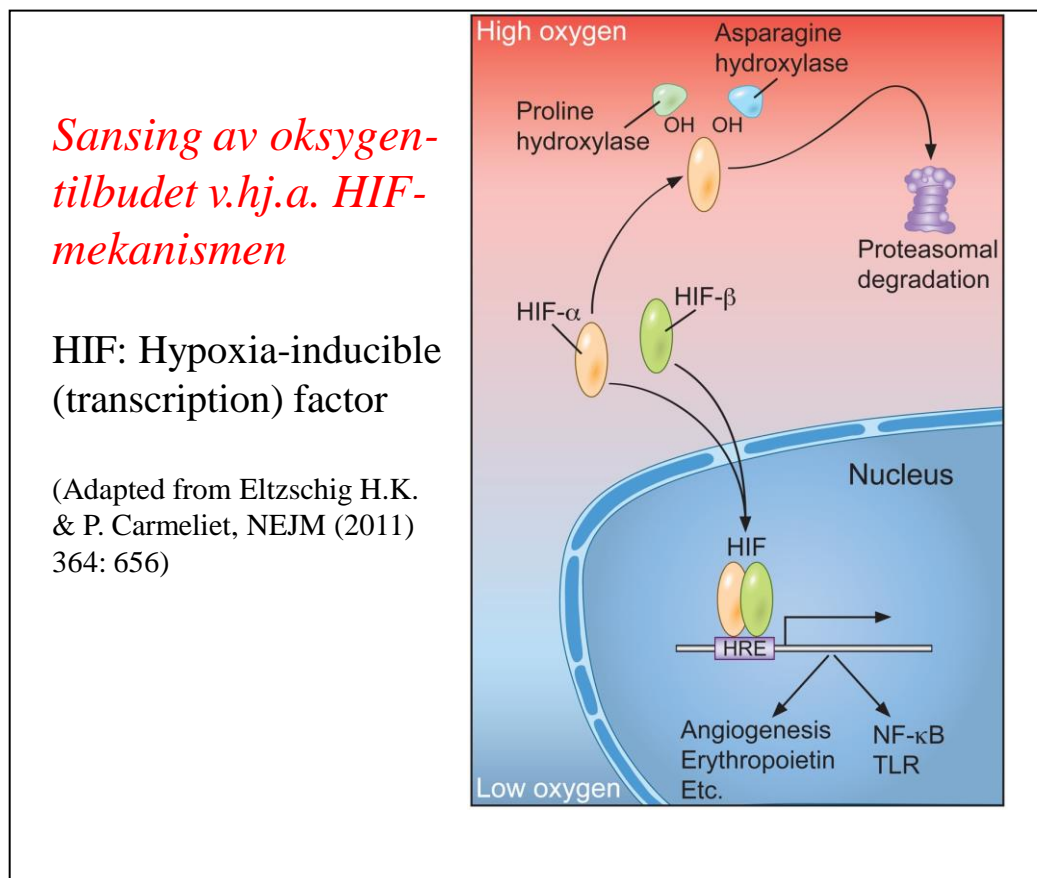
trolig fra og med stadiet foran proerytroblasten (som er det første morfologisk erkjennbare stadium innen den røde cellelinje). EPO kan av og til dannes utenom nyrene, bl.a. i leveren.

Dersom mus (og rimeligvis også mennesker) gis blodtransfusjoner, så hemoglobin-konsentrasjonen (og O_2 -"forsyningsevnen", se fig. 13) blir meget høyere enn normalt og derfor EPO-konsentrasjonen svært lav, kan man etter noen dager finne at beinmargen er tom for erytroblastar pga nedsatt differensiering og apoptose.

Erythropoietin kan nå lages ved hjelp av rekombinant DNA-teknikk. Det er ett blant relativt få cytokiner som foreløpig har sikret seg en plass som viktig (men dyrt!) legemiddel – se Boks 2. Dessverre brukes det – eller diverse derivater – også som ergogent hjelpemiddel ("doping") innen idretten, for kunstig å øke blodets oksygen-transport-evne og dermed "kondisjonen" (maksimalt oksygen-opptak).

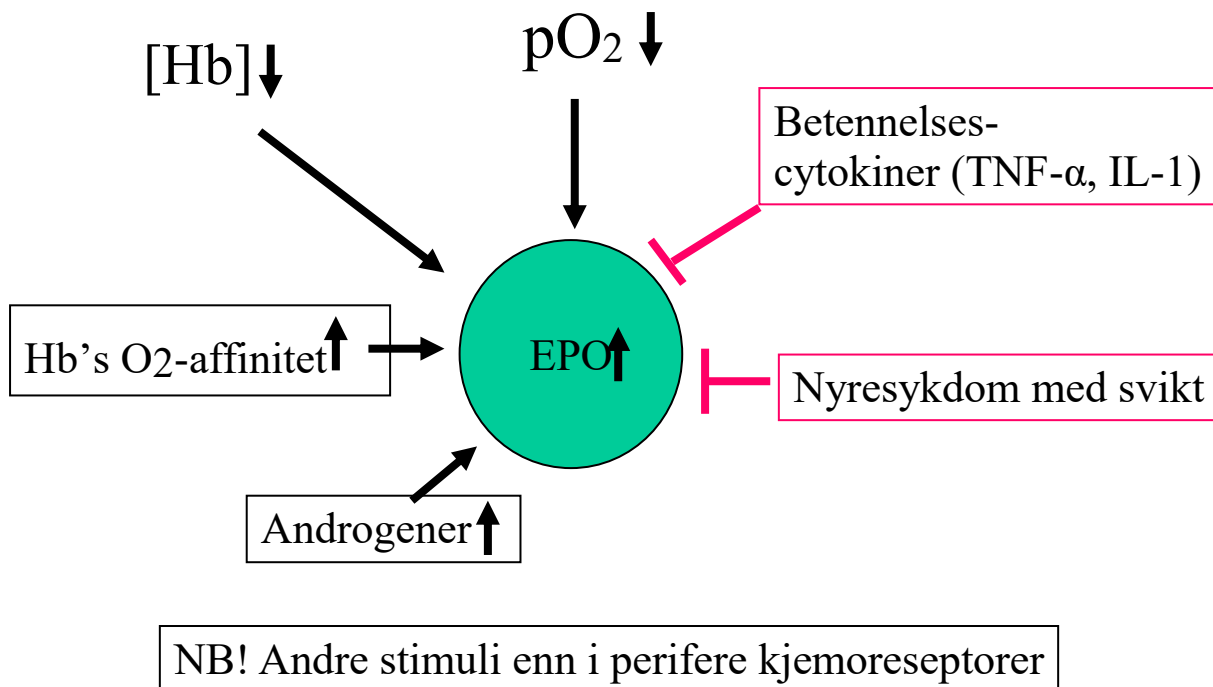
Innen den røde - som innen de andre - cellelinjene finnes det behov for minst én vekstfaktor til, i tillegg til EPO. Dette eller disse cytokinene synes nødvendige for deling, modning og overlevelse av celler på stadiene etter stamcellen og før de EPO-påvirkelige stadiene (se fig. 3).

Erytrocyttens **funksjon** som gasstransportører av O_2 og CO_2 behandles i respirasjons-fysiologien.

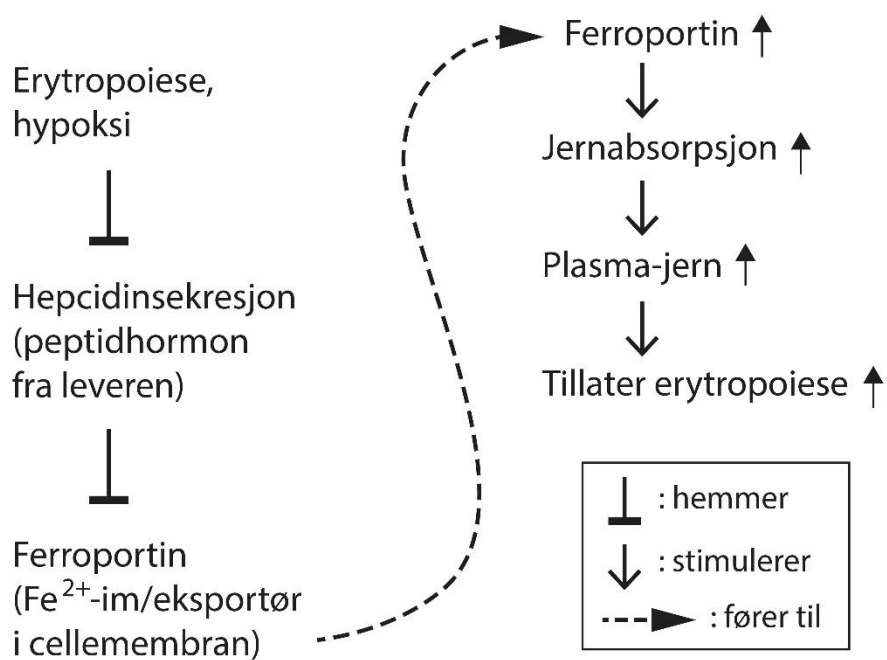


Figur 12. Mekanismen for erythropoietindannelse i nyrene.

A.



B.

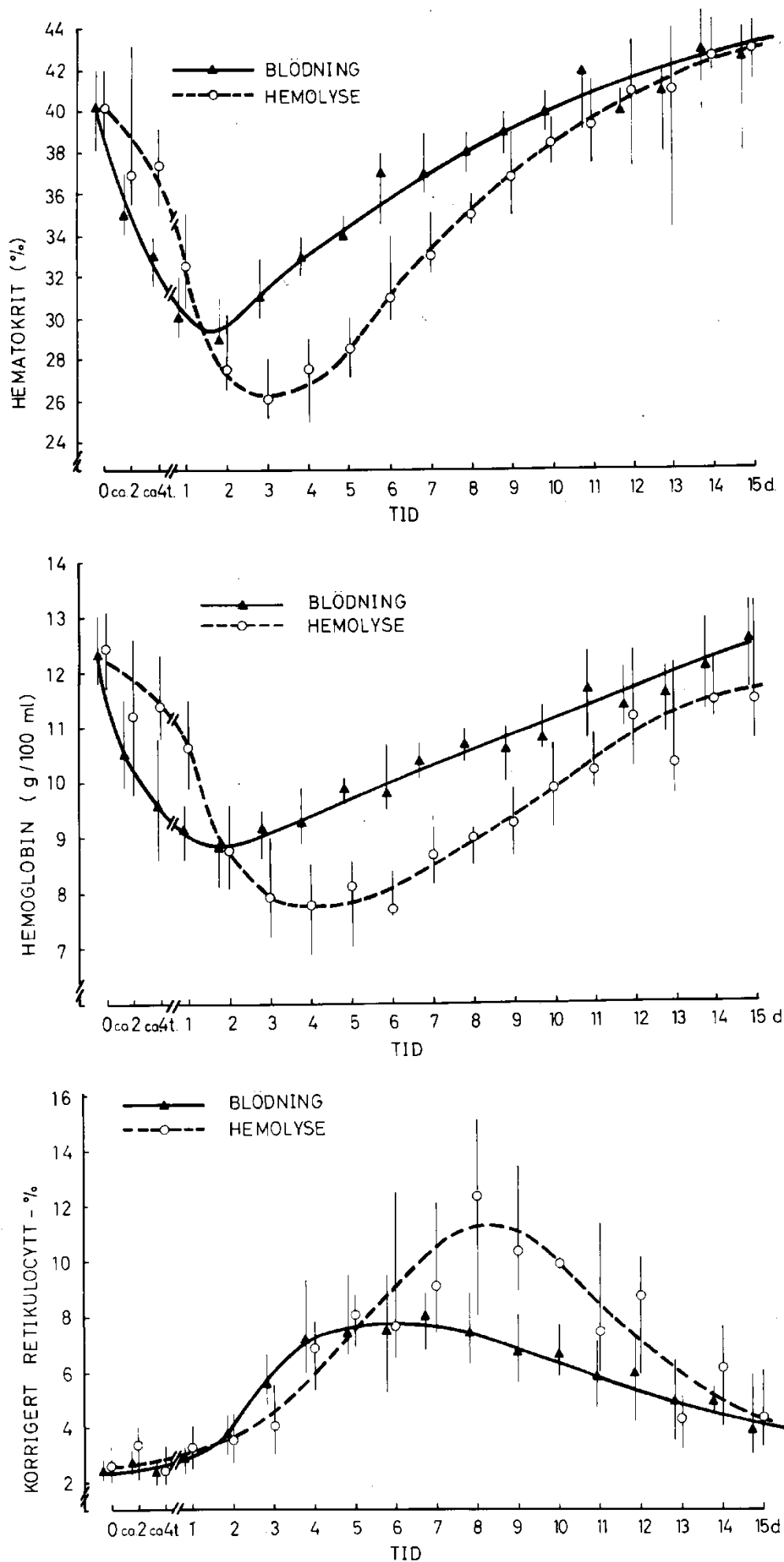


Figur 13. A. Reguleringen av erythropoietinproduksjonen. B. Trekk ved jernmetabolismen.

Boks 2: Erytropoietin-historikk

- 1906: Carnot & Deflandre foreslo humoral regulering av erytropoiesen
- 1936: Erling Hjort; 1953: Allan Erslev: De viste at injeksjon av anemisk kaninplasma til normale kaniner ga en retikulocytose etter noen dager
- 1957: Jacobson *et al.* viste at EPO-produksjonen foregår i nyrene
- 1977: Miyake, Kung & Goldwasser rensset EPO fra humanurin
- 1983: Lin *et al.* klonet *HuEPO*-genet
- 1985: Adamson & Esbach startet første kliniske forsøk med r-HuEPO
- 1990: Mange tusen pasienter med nyresvikt-anemi i Europa allerede behandlet med r-HuEPO

Studér fig. 14 på neste side, som sammenfatter en tidligere øvelse på fysiologikurset; den viser kaniners reaksjon på blødning (ca. 25 % av blodvolumet) og hemolyse (etter injeksjon av phenylhydrazin, som fører til rask aldring og makrofag-fagocytose av store mengder røde blodceller). Kan du *forklare reparasjonsforløpene* ved hjelp av det du nå har lært om EPO? Hvorfor trenger anemien en tid på å manifestere seg for fullt? Hvorfor er det en tidsforsinkelse fra maksimal anemi til maksimal retikulocyt-respons i blodet? Hva synes relasjonen å være mellom anemiens alvorlighetsgrad og den påfølgende retikulocytresponen? [Korreksjonen av hematokrit betyr å finne verdien av hematokrit ved normalkonsentrasjon av erythrocytter, dvs. at verdien blir høyere enn ved anemi, for retikulocytene blir sjeldnere når de fordeles på et større antall modne erythrocytter.]



Figur 14: Utvikling og reparasjon av blødningsanemi og hemolytisk anemi hos kaniner.

NØYTROFILE GRANULOCYTTER

Nøytrofile granulocytter er vår "Telemark bataljon"; de første cellene som rykker ut til et skadeområde (betennelse) for å drepe mikroorganismer, men som også dreper våre egne celler.

Dannelse og skjebne. Dannelsen skjer i beinmargen ved celledelinger og samtidig modning frem til myelocytstadiet. Så følger en videre modningsprosess uten celledelinger og en *lagringstilvarelse* som til sammen utgjør ca. en uke (se fig. 15, 16).

De modne, segmentkjernete granulocytter som kommer over i blodbanen, fjernes *tilfeldig* fra sirkulasjonen, og ikke fordi de blir gamle og utslitte (som erythrocyttene og trombocytene). Granulocytene har altså en *halveringstid* i blodet. Den er ca. 7 timer (fig. 22).

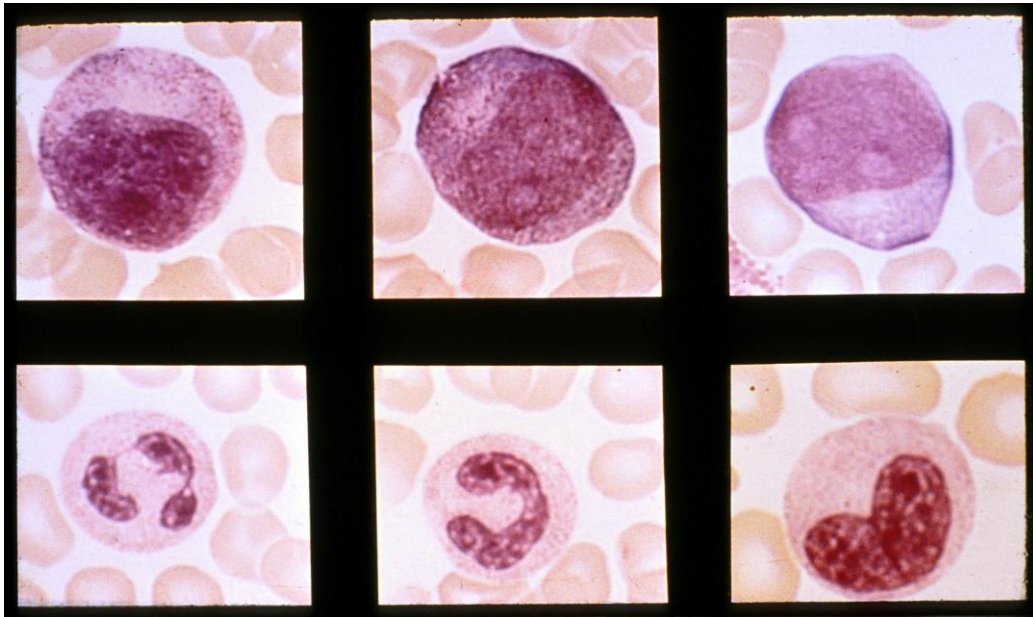
Sirkulerende granulocytter står i rask, dynamisk likevekt med en omtrent like stor mengde "*randstilte*" granulocytter. De finnes i karbanen, - trolig i lungene, leveren, milten og kanskje også i beinmargen. I hvert fall i lungene mener man cellene sitter som løst tilheftede "propper" i ikke-blodgjennomstrømmete kapillærer i lungetoppene. "Randstilte" granulocytter kommer over i fri sirkulasjon og hever på denne måten granulocyt-konsentrasjonen i blodet ved fysisk anstrengelse og etter en adrenalininjeksjon, fordi blodtrykket og blodstrømmen øker (lungene), og leukocytene dessuten blir mindre adherente. Engstelse etc., som gir adrenalinfrigjøring, vil kunne ha samme effekt.

Du kan sammenlikne med en trafikk-situasjon: Dersom det er flaskehals med svær kødannelse på enkelte veistrekninger, og køen løser seg opp så bilene fordeler seg jevnt over veinettet, da blir biltettheten større enn den var på et sted der trafikken også under kødannelsen gikk greit. Vi tar vår blodprøve fra et sted det aldri er "kødannelse" (= "rand-stilling"), nemlig fra en overflatisk vene (eller andre blodårer uten "randstilling"). Her øker altså cellekonsentrasjonen når randstillingen reduseres andre steder pga økt blodstrøm (utvaskingseffekt) og/eller nedsatt adhesivitet av blodcellene overfor endotelet.

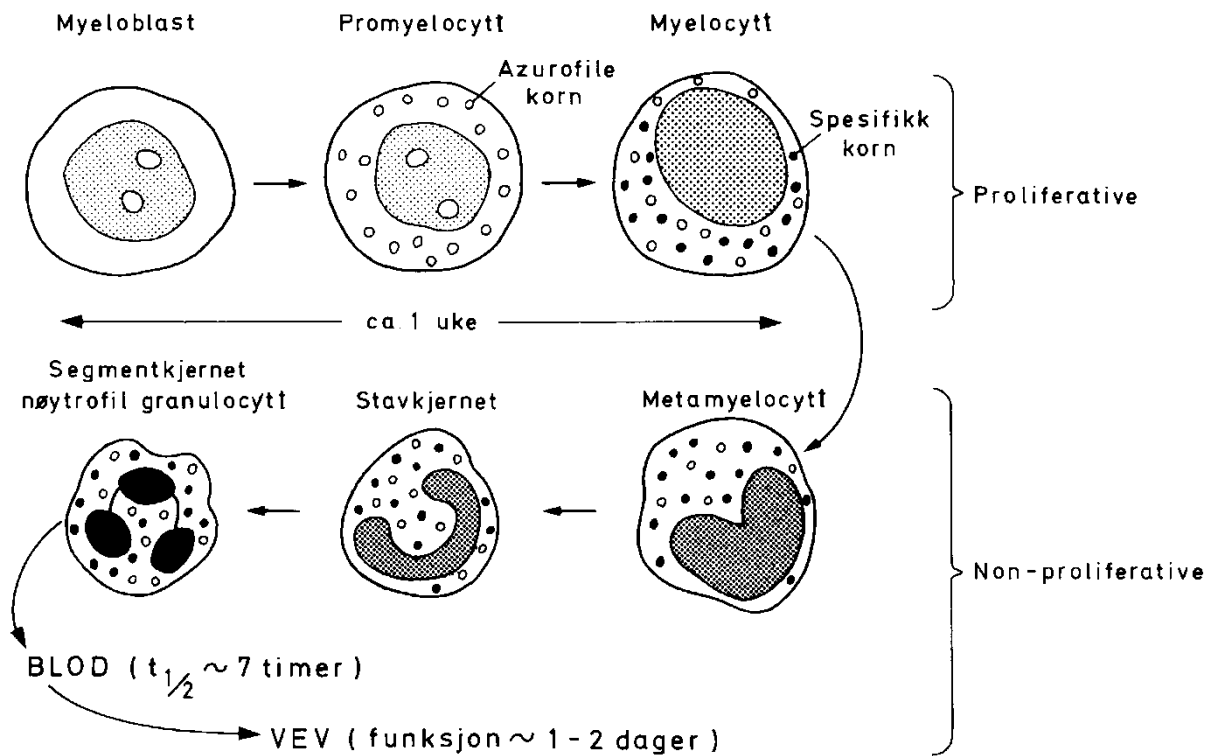
Monocytt og lymfocytter er også "randstilte". Frigjøringen av randstilte hvite blodceller er altså en form for *fysiologisk leukocytose* (= mange leukocytter i blodet) som det er viktig å vite om når man vurderer blodcelletellinger i klinikken og f.eks. skal avgjøre om en pasient har en infeksjonssykdom. Det kan være at han "bare" er veldig redd! Du må altså sjekke i et blodutstryk eller med væskestrømscytometri *hvilke* celler det er blitt flere av, f.eks. stavkjernete nøytrofile granulocytter (fig. 20,21), som kan indikere infeksjon (eller også langvarig, hard kroppsanstrengelse! Jf. kurset).

Granulocytter som via *adhesjonsmolekyler* (se fig. 19) har heftet seg til det "klebrige" (dvs. adhesjonsmolekyl-eksponerende) endotelet i et betennelsesområde (se seinere), kan vandre aktivt ut mellom endotelcellene (*diapedese*) mot skadete celler, bakterier, etc. I vevet går de til grunne ved *apoptose* og *fagocytteres* av makrofager, trolig etter maksimalt 1-2 døgn. Da har de i likhet med makrofagene og de eosinofile granulocytene (i) utskilt enzymer, andre proteiner, lipidmediatorer (PAF, LTB₄, se seinere) og reaktive O₂-intermediater (superoksid, hydrogenperoksid, hydroksylradikal, etc., se seinere) og (ii) fagocyttert, drept og fordøyet mikroorganismer.

Dannelsen av nøytrofile granulocytter (PMN)

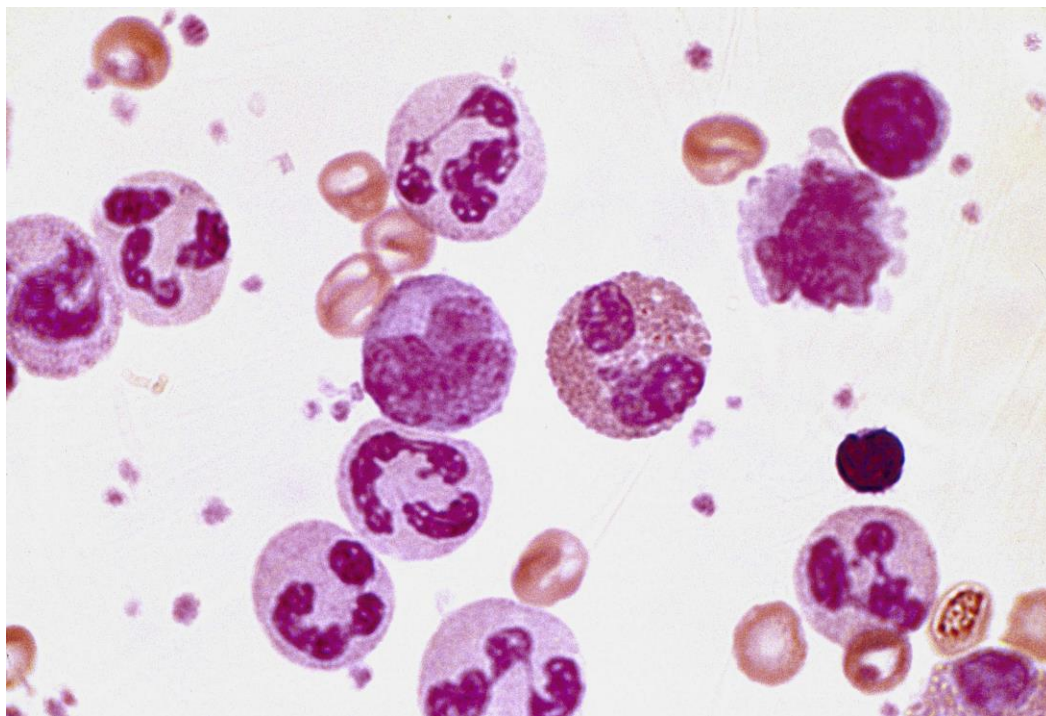


Figur 15. Granulo(cyto)poiesen



Figur 16: Oversikt over nøytrofile granulocytters utvikling i beinmargen.

Blodutstryk: PMN, eosinofile, monocytter, lymfocytt, RBC, blodplater



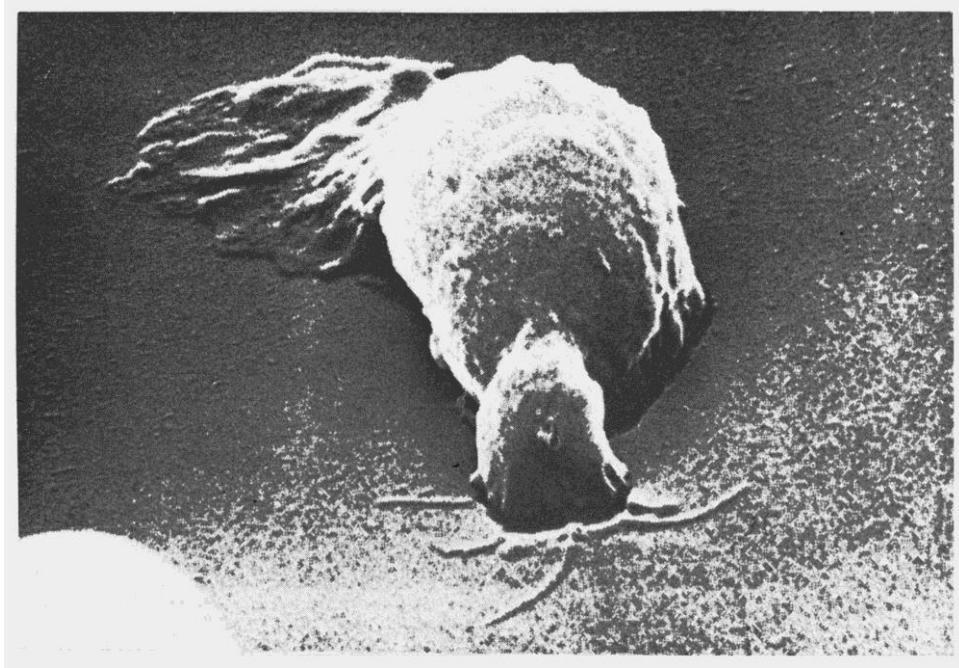
Figur 17. Blodceller

Beinmargen har store lagre av modne (segmentkjernete) og nesten modne (stavformete) granulocytter som kan sendes over i blodet ved behov i betennelsesreaksjoner. Overgangen ("granulocyttmobiliseringen") fører til en såkalt "*venstre-forskyvning*", dvs. økt prosent stavformete celler blant granulocytterne. Cellekonsentrasjonen i blodet, som er et viktig mål i klinikken, bestemmes imidlertid både av tilførselen, avgangen og forholdet mellom frie og "randstilte" granulocytt-populasjoner. For eksempel kan en aksellerert avgang til infisert vev og en økt mengde granulocytter heftet til endotelet i slike områder i prinsippet – men i praksis ikke så ofte – føre til forbigående lave granulocyttkonsentrasjoner i blodet (fig. 48). Det skjer ved svær, akutt infeksjon eller betennelse, før tømningen av beinmargslageret kommer ordentlig i gang (men dette skjer raskt, i løpet av få timer).

Videre er det viktig å huske på det store beinmargslageret og den lange modningstiden dersom man vil vurdere virkningen av *kreftmedisiner* eller *ioniserende stråling* som bare dreper stamceller, lymfocytter og delingsdyktige celler. Først etter noen dager, når lageret er oppbrukt, vil granulocyttkonsentrasjonen i blodet avspeile medisin- eller strålevirkningen.

En del granulocytter kommer over i respirasjons-, gastrointestinal- eller urogenital-traktus og dør der. Det ser forøvrig ut som om de aller fleste granulocytterne, når vi er friske og ikke har betennelser, dør og nedbrytes i organer som har makrofager blant endotelcellene, dvs. renovasjons-celler eksponert for blodet, nemlig i lever, milt og beinmarg.

SEM av PMN: lamellipodium og retraksjonsfibre



Figur 18. Granulocytbevegelse på en glassflate.

Reguleringsmekanismer. Reguleringen av granulocyttdannelsen og granulocyttrafikken er fremdeles ufullstendig kjent. Mange reguleringsmekanismer har blitt foreslått (se fig. 20).

- A. **Økt granulocyttdannelse.** Noen av de tidligere nevnte *koloni-stimulerende faktorer* (CSF) er granulopoietiner; G-CSF trengs hele tiden, GM-CSF trolig bare i krisesituasjoner.

Det trengs minst to ulike cytokiner i løpet av utviklingen innen en cellelinje – minst én for de stamcellenære cellenes delingsstimulering og én for de mer modne stadiene. Mange forskjellige cytokiner kan stimulere (og noen få kan hemme) den multipotente stamcellen.

Man har tenkt seg CSF som ledd i negative tilbakemeldings-sløyfer på følgende måte:

Bakterieprodukter stimulerer CSF-sekresjon eller interleukin-1-(IL-1-) sekresjon fra makrofager etc.. Økt CSF (eller IL-1-indusert CSF-utskillelse fra stromaceller i beinmargen) gir økt granulocyt/makrofag-dannelse og dessuten økt stimulerings svar fra de modne cellene ("priming"). Økt fagocyttemengde og -aktivitet reduserer stimulus til CSF-dannelsen ved at mikrobenes nedbrytes. Dessuten vil G-CSF-katabolismen (nedbrytningen) øke ved økt mengde granulocytter i organismen (reseptormediert endocytose).

Forøvrig er det slik at IL-1 induserer økt ACTH-sekresjon fra hypofysen, via virkning på hypothalamus. Økt ACTH øker glukokortikoidutskillelsen fra binyrene. Litt økt glukokortikoidnivå (kortisol, etc.) synes å stimulere, mens kraftigere økt nivå hemmer cytokinsyntese (IL-1-etc.-dannelse) i makrofager. Altså igjen en negativ tilbakemelding, som også vil affisere granulocytproduksjonen.

- B. Granulocyttemobilisering fra beinmargen.** Det eksisterer en eller flere *granulocytffrigjørende faktorer* med virkning på "lagringsbåsen" i beinmargen. Komplementsystemet og makrofagene (v.hj.a. cytokiner som IL-1) er sannsynlige kilder for slike faktorer. Likeledes kan G-CSF, kjemokiner (bl.a. det kjemotaktiske IL-8), glukokortikoider og veksthormon mobilisere nøytrofile granulocytter.
- C. Granulocyttevandring til betennelsessted.** Celletrafikken fra blod til betente vev, der granulocytterne samler seg i store mengder, må også være regulert (se fig. 20). Det er påvist at en rekke ulike stoffer kan øke granulocyttenes bevegelser, slik at granulocytterne vandrer mot høyere konsentrasjon av stoffene (*kjemotakse*; jf. hvordan du kan tiltrekkes av gode dufter mot f.eks. et innbydende måltid mat). Bl.a. formylerte (dvs. maursyre-påhengte) peptider som frigjøres fra bakterier, aktiverte komplement-faktorer, kjemokinet IL-8 (se Boks 1 og fig.40) og noen andre betennelsesmediatorer er slike *kjemotaksiner* for nøytrofile granulocytter. Kjemotaksiner og visse cytokiner påvirker også endotelceller nær dannelsesstedet, så endotelcellene i betent vev blir "klebrige" overfor granulocytterne ved at de oppregulerer adhesjonsmolekyler (dvs. økt antall eller tilgjengelighet eller bindingsevne). Kjemotaksiner kan også "oppregulere" adhesjonsmolekyler i granulocytterne og i andre hvite blodceller (se fig.20): *Selektiner* er viktige for den initiale tilheftningen som får granulocytter til å rulle over betent endotel; *integriner* er viktige når det gjelder å få dem til å stanse opp og feste seg til endotelet, som opptakt til *diapedesen* (utvandringen i vevet).
- D. PMN-aktivering.** *Stimuleringen av granulocytterne* (polymorfonukleære, nøytrofile, segmentkjernede granulocytter = PMN) (til adhesjon/aggregasjon, vandring, sekresjon, produksjon av reaktive O₂-intermediater, fagocytose) kan utløses av diverse stoffer, først og fremst slike som også har kjemotaktisk virkning (figs. 19, 20 og Tabell 6). Reaksjonen på slike stoffer er økt hos granulocytter som på forhånd er "forberedt", dvs. pre-aktivert ("primet") ved at de har reagert med CSF, interferoner eller visse bakterieprodukter (se Tabell 2).

Funksjon. De nøytrofile granulocytter er "storm-troppene" våre i kampen mot bakterielle infeksjoner, en slags stående ("Telemark") bataljon. De har en spesielt utviklet evne til bevegelse, endocytose, mikrobedrap og fordøyelse.

Bevegeligheten er knyttet til *aktin-* og *myosin*-holdige cytoplasmatiske mikro-filamenter, som har feste i cellemembranen: aktin(monomer)-polymerisering i fronten skyver ut et cytoplasma-flak, et *lamellipodium*, som så må feste seg til omgivelsene (f. eks. kollagenfibre). Proteaser som utskilles fra cellen (metallo-matriks-proteaser), trengs gjerne for å fordøye vevets grunnsustans, dvs. "skape vei i vellinga". Deretter trekkes cellen framover av en myosin/aktin-mekanisme (jf. muskelfysiologien), samtidig som adheranser bak må løsne. Dette er altså noe annet enn "amøboid bevegelse", men det er samme sort bevegelsesmekanisme som endotelceller benytter når nye blodkar dannes, og kreftceller når

de invaderer friskt vev. Varianter av denne bevegelsesmekanismen er også en mulighet, men de beror på de komponentene som er beskrevet over.

Drapsmekanismene (se seinere) og fordøyelsen er knyttet til cellemembranbundne enzymer og til intracellulære korn. Kornvesiklene kan tømme seg til fagosomer (endocytosevesikler) eller ekstracellulært; granulocytene er sekretoriske celler.

Av de ca. 200 kornene (granulae) som finnes i hver granulocyt, er omtrent 1/3 primære eller azurofile korn. De er lysosomer og inneholder bl.a. sure hydrolaser og myeloperoxidase. Ca. 2/3 er sekundære eller spesifikke korn. De dannes noe seinere og inneholder bl.a. det jernbindende laktoferrin, som også har antibakteriell virkning. Ytterligere et par korntyper er beskrevet. De minner om sekundær-kornene og kan som disse utskilles under kjemotaksinpåvirkning. Membranene deres synes å tjene som reservoar for reseptorer, slik at overflatereseptorene kan "oppreguleres" ved at overflatemembranen tar opp i seg kornmembranene under eksocytose-(sekresjons)prosessen.

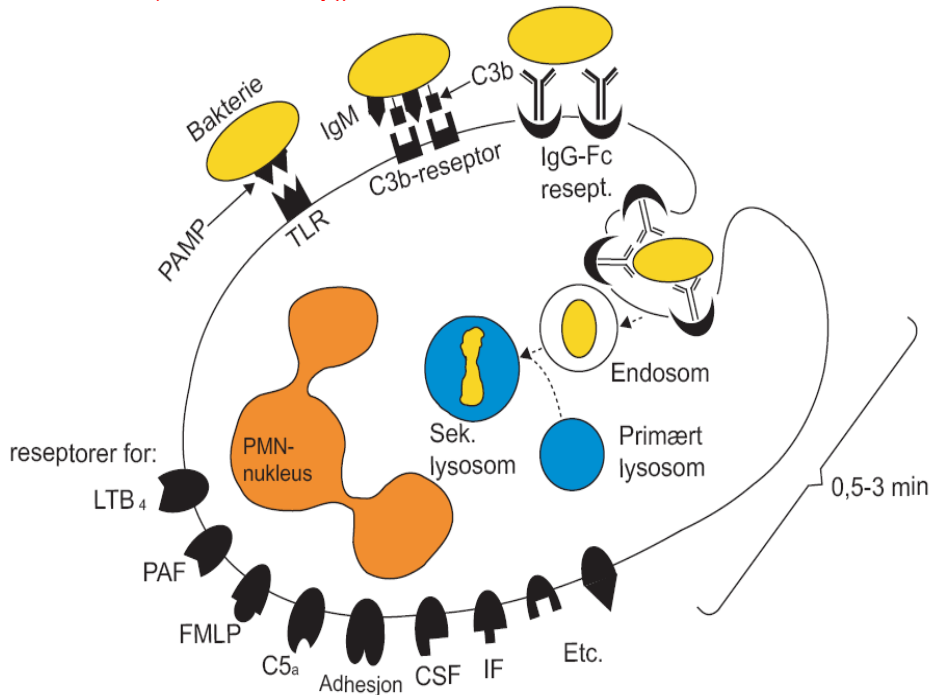
Granulocytene kan også utskille noen cytokiner, kjemotaksiner og proteiner som kan utvide små kar (dvs. lage en betennelse). Blant kornproteinene finnes peptider som kan drepe mikrober (*defensiner* og *katelicidiner*) og en rekke enzymer, som kollagenase og *elastase*; sistnevnte nedbryter mikrober og mange forskjellige proteiner i det ekstracellulære miljøet, og ikke bare elastiske fibre. Elastase-virkningen er essensiell for utviklingen av "sprengte lunger" – emfysem – hos røykere og hos pasienter som har en arvelig mangel på "mot-faktoren", en anti-proteinase.

Granulocytter kan, stimulert av bl. a. reaktive oksygenderivater (ROS), skille ut kjernemateriale (DNA med histoner og tilheftede «drapsmekanismer», slikt som elastase-enzymet) og dermed dø, men fremdeles bekjempe mikrober. Dette ekstracellulære materialet kalles NETs («neutrophil extracellular traps»)

Dersom granulocytter i stort antall stimuleres i et vevsområde, er det lett å forstå at *vevsskade* kan inntre, siden så mange aktive enzymer og andre biologisk virksomme substanser utskilles (secernerer).

Granulocytene synes som nevnt å være gjenstand for programmert celledød (apoptose) både normalt og ved betennelse. Da forandres også granulocytens overflate slik at den blir adherent til og deretter fagocyttert av makrofager, uten at mengder av enzymer, reaktive oksygenderivater, etc. slippes ut i ekstracellulærvæsken. Dermed reduseres trolig skade på vevet omkring granulocytten.

PMN, øvre del: 1. Aktivering via TLR. 2. Endocytose akselerert av opsonisering. **Nedre del:** diverse reseptorer (for adheरणse, kjemotakse, aktivering)



PAMP: pathogen associated molecular pattern. TLR: Toll-like receptor. C: complement. IF: interferon- γ

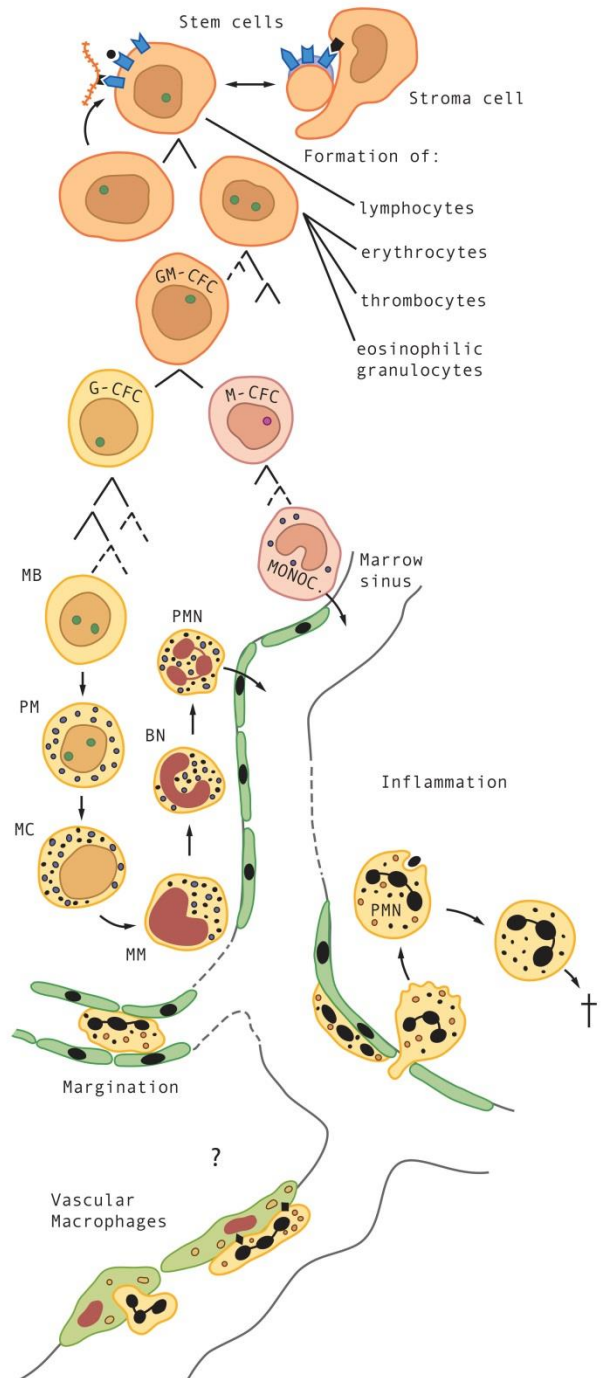
Figur 19: Fagocytose av immunglobulin G (IgG)-opsonisert mikrobe, med angivelse av ytterligere én opsonin-mekanisme (v.hj.a. C3b/C3b-reseptor) og én stimuleringsmekanisme (via PAMP/TLR). Dessuten viser figuren noen membran-reseptorer som er viktige for granulocytters (PMNs) adheरणse, bevegelse, "priming" (pre-aktivering), aktivering og fagocytose. [Endosomet (fagosomet) smelter først sammen med sekundære (spesifikke) korn, så med primære (azurofile) korn, som på figuren. *LTB₄* = leukotrien *B₄*; *PAF* = "platelet activating factor"; *FMLP* = formyl-metionyl-leucyl-fenylalanin; *C5_a* = aktivert 5. komplementfaktor, løselig peptid; *C3b* = aktivert, partikkel/celle-bundet 3. komplementfaktor; *CSF* = "colony-stimulating factor", f. eks. G(M)-CSF; IF = interferoner; Etc.-reseptorene kan være reseptorer for f.eks. adrenalin eller histamin.]

Stem cell regulators: Cytokines - free, matrix-bound, or cell-bound; stimulatory (e.g. IL-3) or inhibitory

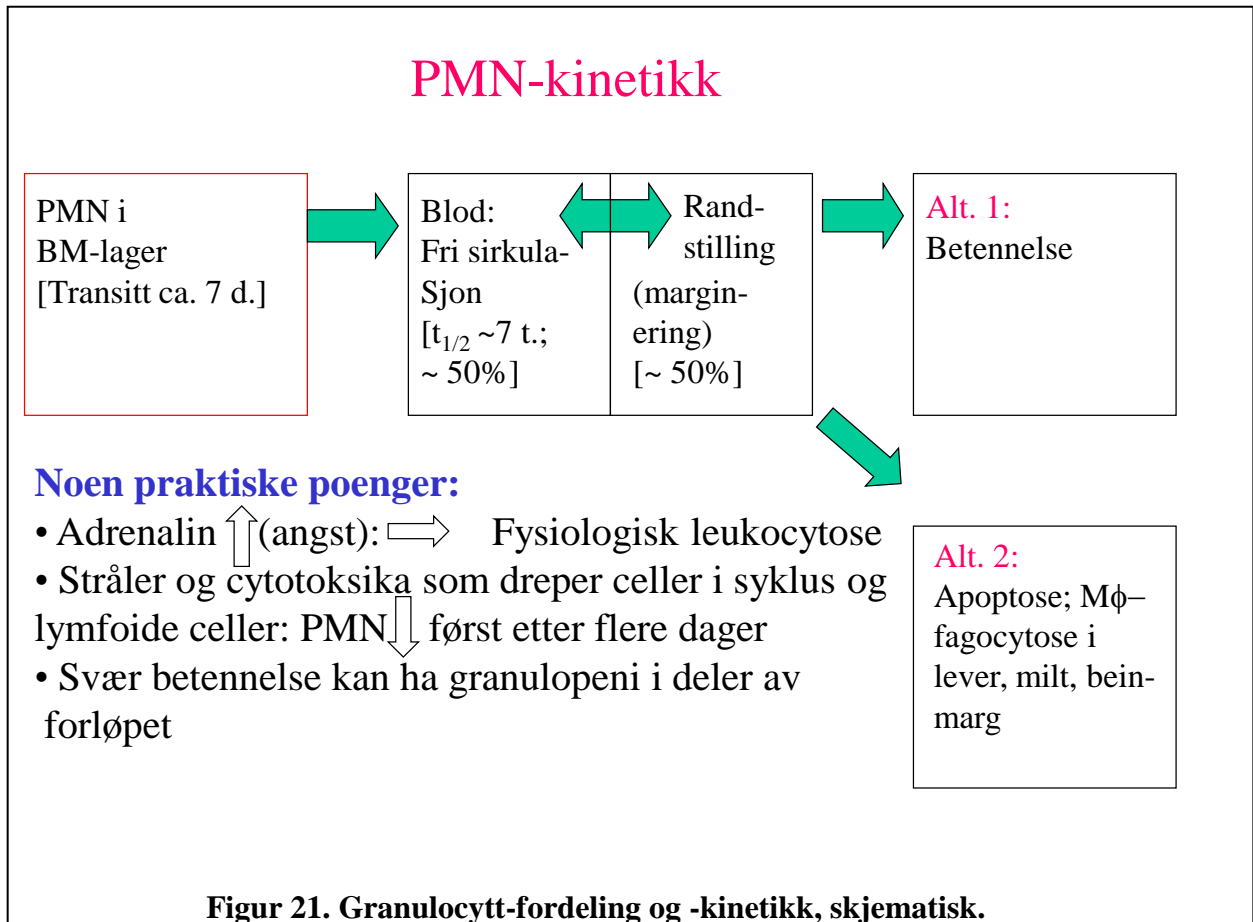
PMN production:
Stimulatory cytokines (e.g. GM-CSF, G-CSF); inhibitory factors also exist

PMN mobilization:
IL-1, G-CSF, complement factors, cortisol
G-CSF

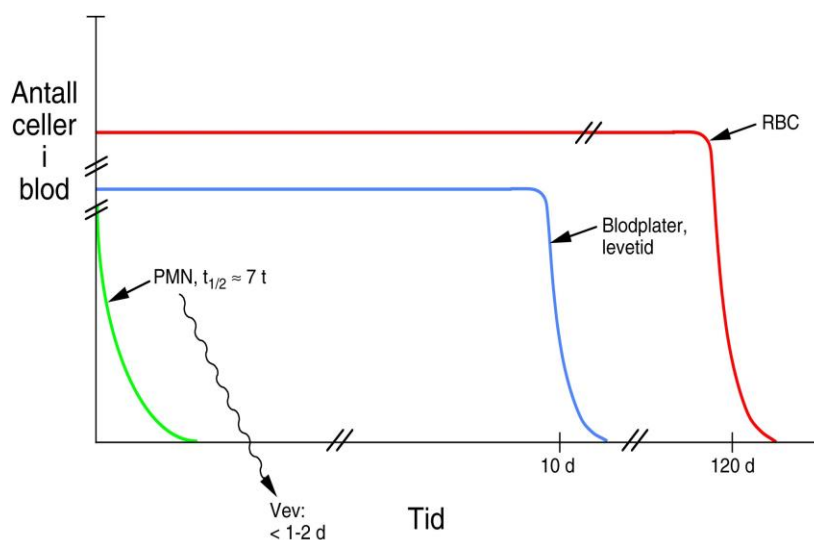
PMN adherence: IL-1, TNF, IL-8, etc.
- II - priming: GM-CSF, G-CSF, TNF, interferons
- II - chemotaxis & activation: cytokines, comp.factors, bacter. peptides, etc.



Figur 20. Nøytrofile granulocytters dannelse i beinmarg, transport med blodet, randstilling (bl.a. i lungekapillærer, som er trange kar) og videre skjebne, som kan være:
1. Adheranse til endotel i betent vev, vandring ut i vevet (diapedese), sekresjon av korn, fagocytose og drap av mikroorganismer, apoptotisk død og nedbrytning i makrofager; eller muligens **2.** begynnende apoptose i blodbanen og opptak av og nedbrytning i makrofager i kontakt med blodet (i beinmarg, milt og lever).
 CFC = "Colony-forming cell, in vitro"; G = granulocyt, M = Monocyt/makrofag; MB, PM, etc: se fig. 11; PMN = polymorfonukleær (celle), dvs. segmentkjernet, nøytrofil granulocyt.
 Se også Tabell 2.



Blodcellers levealder



Figur 22. Blodcellers sirkulasjonstider og livslengder.

LITT PATOLOGI

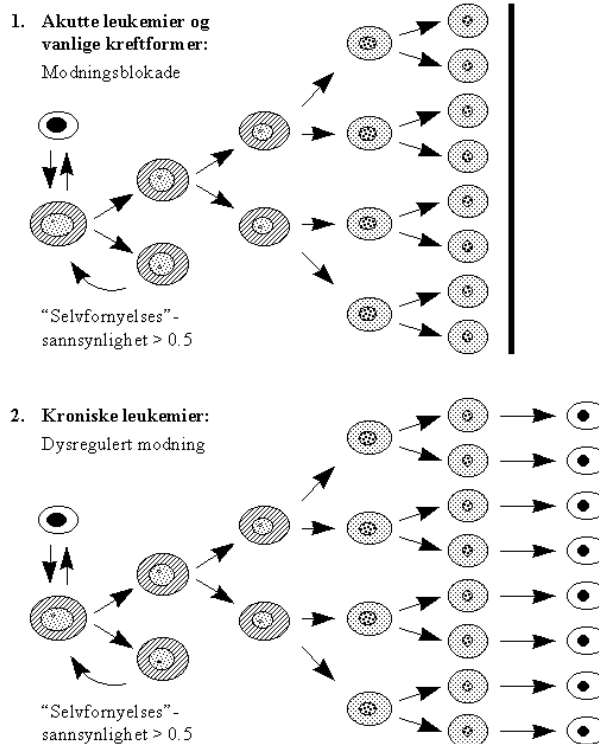
Forståelse av stamcellenes normalfysiologi er nødvendig dersom man vil skjønne utviklingen av myeloproliferative syndromer. Dette er patologiske tilstander med økt celledannelse fra stamceller i beinmargen: *polycytemi* (overproduksjon av røde blodceller) og leukemier.

Beinmargsaplasi ("celletomhet") er også en stamcellesykdom, som opptrer når stamcellene ødelegges ved kreftbehandling, medikamentoverømfintlighet, etc.

Den primære *polycytemi* (i motsetning til den sekundære, som bl.a. skyldes nedsatt oksygenering av blodet) og de *kroniske leukemier* er gjerne karakterisert ved økt celledall innen én cellelinje i beinmargen og i blodet. Årsaken (mutasjonene) synes likevel å ha rammet en multipotent stamcelle - [subsidiært en determinert progenitorcelle (som da også må ha fått stamcelleegenskaper) - slik at til og med tilsynelatende normale blodceller hos disse pasientene kan ha blitt dannet fra en "syk" stamcelle. Sykdommen beror på at kontrollmekanismer er tapt; de umodne cellene deler og utvikler seg og "oversvømmer" organismen med umodne og modne celler.

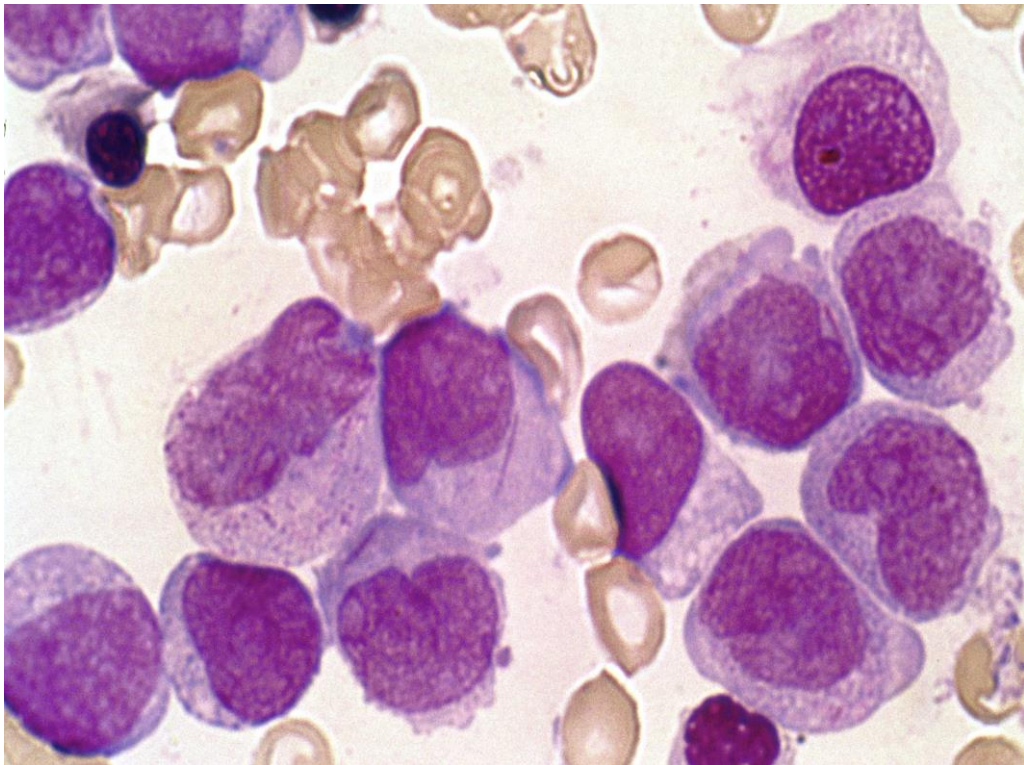
Ved *akutte leukemier* er det differensieringsblokkade av stamceller eller progenitorceller, slik at umodne celler med ukarakteristisk blastcelleutseende hoper seg opp (fig. 15). Opphopning av umodne, leukemiske celler undertrykker på ukjent vis (pga. produksjon av hemmende cytokiner eller fortregning av normale stamceller fra nisjene sine i beinmargen?) dannelsen av normale celler, så pasienten kommer til å lide av (i) *anemi* (blir slapp p.g.a. få røde blodceller), (ii) *leukopeni* (får infeksjoner p.g.a. få hvite blodceller) og (iii) *trombocytopeni* (får lett blødninger p.g.a. få blodplater).

KREFT- (LEUKEMI-) UTVIKLING

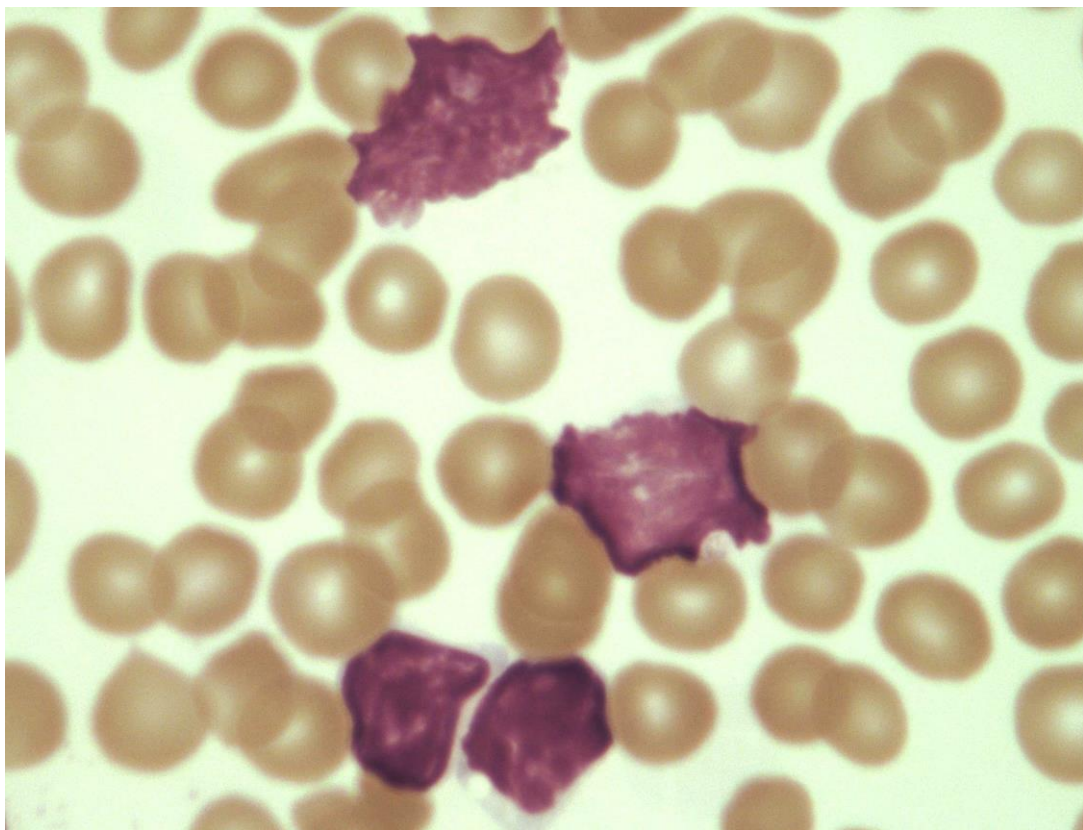


Figur 23. Modell av leukemi/kreft som fornyelsesvev.

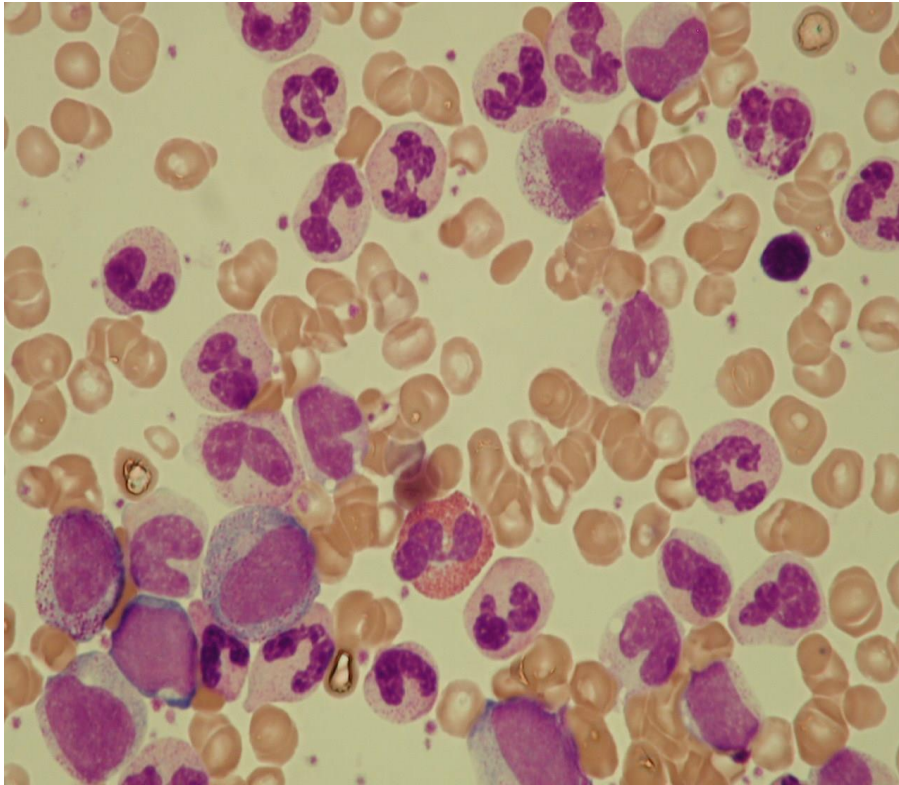
Akutt myelogen (granulocytær) leukemi (AML)



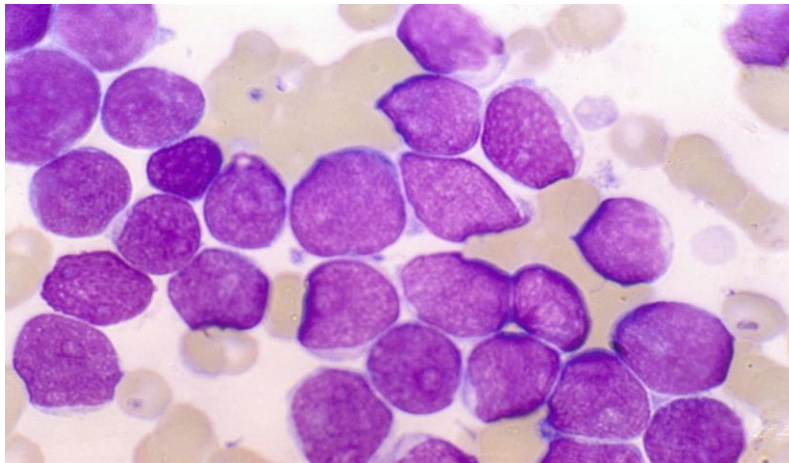
Kronisk lymfatisk leukemi (CLL)



Kronisk myelogen (granulocytær) leukemi. Foto: Finn Wisløff



Akutt, lymfatisk leukemi (ALL)



Figur 24. Fire paneler som viser celler ved de fire hovedtyper av leukemier

MAKROFAGER

Makrofagene er fascinerende "all round"-celler – de dreper mikrober, renoverer dødt og skadet vev, er med på å sette i gang spesifikke immunreaksjoner og regulerer diverse prosesser ved hjelp av utskilte signalstoffer (cytokiner).

Dannelse og skjebne. Monocyttene dannes i beinmargen fra promonocyttene, som igjen via monoblastene og mindre velkarakteriserte forstadier kan føres tilbake til stamcellen. Monocyttene sirkulerer i timer eller få døgn. De vandrer ut fra blodbanen og blir i løpet av timer eller dager til makrofager (f.eks. histiocyttene i bindevev, osteoklastene i knokkelvev, mikroglia i sentralnervesystemet [skjønt disse er kanskje dannet allerede i fosterlivet], Kupfferceller i leveren, alveole-makrofager i lungene og makrofager i lymfeknutenes medullærsinuser). Makrofager kan dessuten i beskjeden grad nydannes ved at de lokale makrofager deler seg (mikroglia er et eksempel). I vevene kan nemlig makrofagene leve kort eller lenge - eller dele seg - avhengig av hvilke stimuli og påkjenninger de utsettes for.

Reguleringsmekanismene er fremdeles dårlig kjente. Det finnes sannsynligvis både spesifikke og mindre spesifikke vekstfaktorer for cellene innen makrofagcellelinjen. En spesifikk faktor er f.eks. makrofag-kolonistimulerende faktor (M-CSF); uspesifikke faktorer er andre kjente cytokiner, jf. granulocytomtalen.

Det er ikke noe beinmargslager av monocyttene av samme sort som vi finner for granulocyttene. Som for granulocyttene finnes det imidlertid en rekke stoffer med kjemotaktisk virkning. De samme kjemotaksinene har oftest, men ikke alltid (jf. f.eks. IL-8, Tabell 2) virkning både på granulocytter og makrofager.

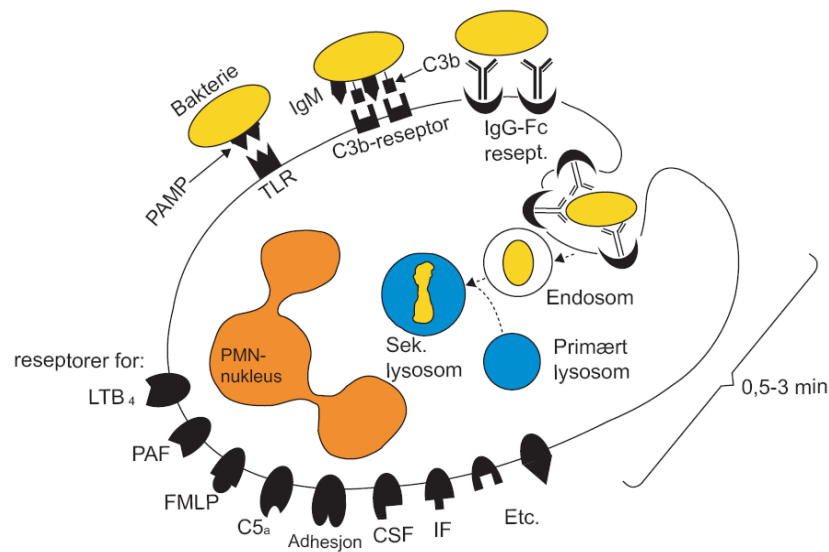
Funksjon. Makrofagene har i likhet med de nøytrofile granulocytter en velutviklet evne til *bevegelse, endocytose* (fagocytose, (mikro-)pinocytose), *mikrobedrap* og *fordøyelse*. Tilsammen utgjør de to celletypene (noen tar med de eosinofile granulocyttene) våre "*profesjonelle fagocytter*". Begge celletyper endocytterer raskere om partiklene som skal "spises", har bundet til seg såkalte *opsoniner* (dvs. "pålegg på maten"). De best undersøkte opsoniner er antistoff (IgG) og aktivert 3. komplementfaktor (C3b) (fig. 25). Andre opsoniner er lungenes surfaktant og akutt-fase-proteinet CRP (C-reaktivt protein; C står for et bakteriepolysakkarid).

CRP produseres av hepatocytter stimulert av betennelsescytokiner. Det finnes en enkel analysemetode for CRP i blod. Den benytter leger seg av til å avgjøre om det foreligger betennelse – og om den sannsynligvis skyldes bakterieinfeksjon ved høye verdier.

Forøvrig har makrofagene et videre og mer variabelt rollespektrum enn de nøytrofile granulocyttene.

Makrofager er bl. a. *forsvarsceller* (M1-makrofager – «Mr. Hyde», fig. 26, 27). Noen mikrobetyper (f.eks. tuberkelbasiller) lever videre i makrofagene etter fagocytose og kan ikke ødelegges før makrofagen er blitt aktivert. Denne *aktiveringen* omfatter bl.a. nye bakteriedrepende egenskaper av ukjent natur (økt produksjon av reaktive oksygenderivater? Nitrogenoksid? - jf. seinere). Aktiveringsreaksjonen startes bl.a. av cytokiner (γ -interferon etc.) som utskilles fra f.eks. aktiverte T-lymfocytter. T-lymfocytterne aktiveres når de reagerer med et antigen som de har reseptor for, i praksis gjerne mot vedkommende mikrobe (se fig. 26). Aktiverte makrofager spiser hurtigere, fordøyer bedre (flere lysosomer) og dreper evt. mer effektivt enn de ikke-aktiverte makrofagene; - de er altså på mange måter

"større og sterkere". De sterkest aktiverte cellene kan til og med drepe kreftceller, i hvert fall *in vitro*.

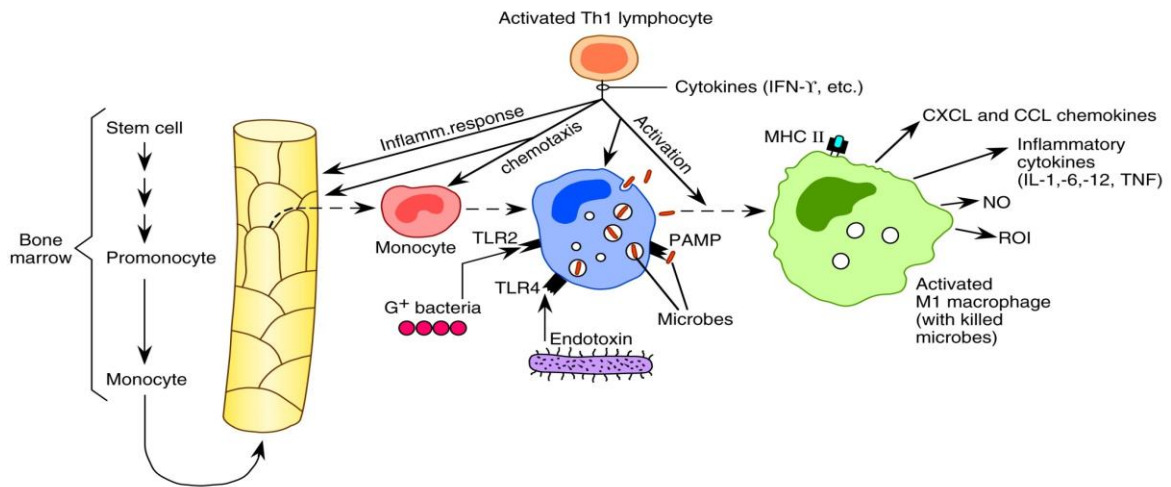


Figur 25. Oversikt over opsonisering og endocytose i makrofagen

Makrofagene er også *renovasjonsceller* (M2 – ”Dr. Jekyll”)(fig. 27). De nedbryter utbrukte vevsbestandddeler (f.eks. røde blodceller, som først og fremst destrueres av M2-makrofager i den røde miltpulpa). De fagocyterer også oksiderte lipoproteiner i arterieveggen, som ledd i utviklingen av aterosklerose, og blir til skumceller.

Makrofager kan spille en rolle for *igangsettingen av en immunrespons*. Antigener (Ag), f.eks. i form av (deler av) bakterier som er kommet inn under huden gjennom et sår, kan føres med lymfestrømmen til nærmeste lymfeknute. Her kan antigenene fanges opp av makrofagene. De fagocyteres og nedbrytes, og antigen-fragmenter (f.eks. peptider med ca. 15 aminosyrer - for å antyde størrelse og art av fragmentene) blir plassert på overflaten av makrofagen, bundet til vevsforlikelighetsantigener (*MHC-molekyler*, "major histocompatibility complex") av klasse II. Slik kan antigen presenteres for T-hjelpelymfocytter. Men kanskje presenteres antigen i enda høyere grad ved hjelp av andre celletyper, nemlig dendrittiske celler (interdigiterende celler, langerhanske celler, etc.) eller B-lymfocytter. Langerhanske celler i huden kan ”samle opp” antigener og bringe dem med lymfen til lymfeknuter eller annet sekundært lymfatisk vev. Samlet kalles disse cellene *APC* – *antigenpresenterende celler*. Disse *dendrittiske cellene* kan også føres tilbake til beinmargens stamceller.

Makrofagaktivering: til ”Mr. Hyde”

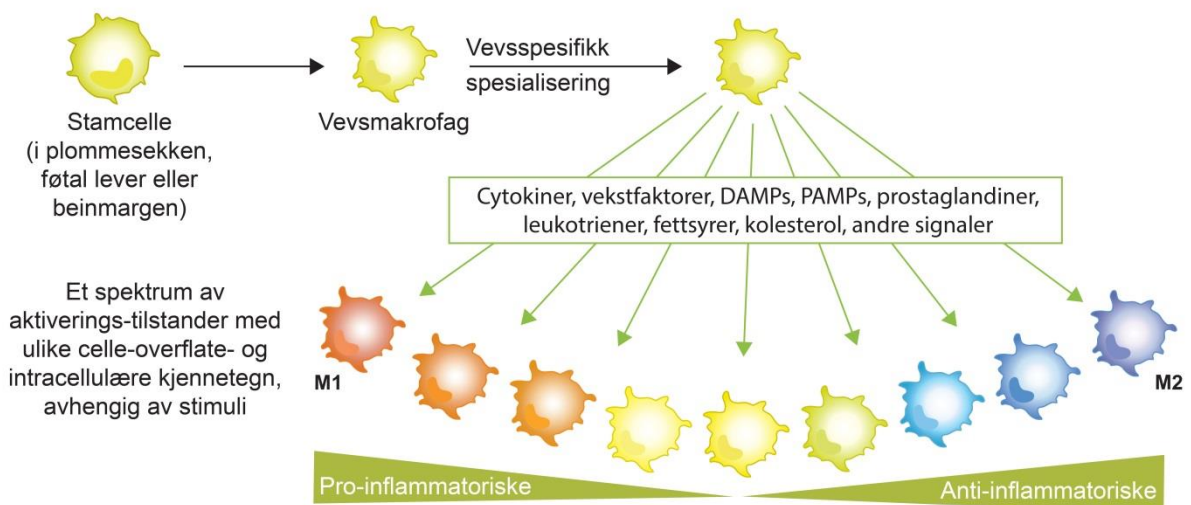


Figur 26. Cytokinvirksomheter på kar og M1-makrofager. IFN- γ – prototypen på en M1-makrofagaktivator – er interferon-gamma; NO = nitrogenoksid; ROI = ”Reactive oxygen intermediates” = ROS = ”Reactive oxygen species” (se seinere); CXCL = CXC-kjemokiner (L = ligand). MHC = ”major histocompatibility complex” = HLA (”Human leucocyte antigens”, vevstypenantigener); andre forkortelser er forklart i teksten til fig. 19.

CXC-kjemokiner tiltrekker f.eks. granulocytter; CCL tiltrekker f.eks. lymfocytter og monocyttar. Makrofagene kan aktiviseres i ulike spesialiseringsretningar – her til drapscellen, M1-makrofagen (”Mr. Hyde”)

A

Multidimensjonal modell for makrofag-aktivering



B

Makrofagaktivering

M1 ("Mr. Hyde") og *M2* ("Dr. Jekyll") er ytterpunktene i et kontinuum

M1

Bl. a. IFN- γ (Th1-cytokiner) og LPS (endotoksin)

Opsoninreseptorer

Inflammatoriske cytokiner (IL-1, etc)

CXCL- og CCL-typer (bl.a. CXCL8 = IL-8)

iNOS (\rightarrow NO); ROI (eks. superoksid)

Differensieringsstimuli

\leftrightarrow

Membranreseptorer

\leftrightarrow

Cytokin-produksjon

\leftrightarrow

Kjemokiner

\leftrightarrow

Effektormolekyler

\leftrightarrow

M2

Bl. a. IL-4, 10, 13 (Th2-cytokiner)

"Scavenger"-reseptorer

Anti-inflamm. cytokiner (IL-1ra, IL-10)

CCL-typer (dvs. tiltrekker ikke ustimulerte PMN)

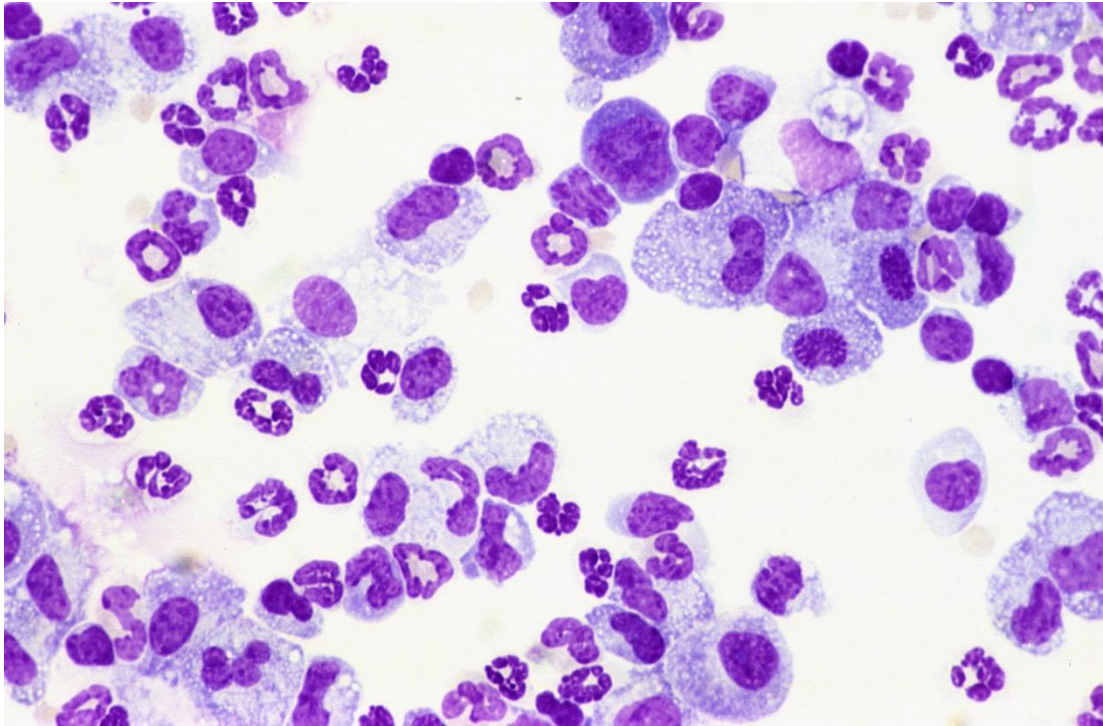
Arginase (... \rightarrow polyaminer \rightarrow celleproliferasjon, og ... \rightarrow proline ... \rightarrow kollagenproduksjon)

Figur 27, A og B. Makrofagspesialisering

Makrofagene utgjør altså en uensartet cellegruppe. En annen makrofagtype – plassert et sted mellom ytterpunktene M1 og M2 – og som har andre proteiner i celledmembranen enn "lymfocyt-stimulatormakrofagen" (dvs. uten klasse II-antigenene), spiller også en viktig *utøverrolle*. Disse makrofagene (som er aktiverte) synes å kunne drepe svulstceller (som har andre overflateantigener enn friske celler), virusinfiserte celler (som har virus-(kodede)antigener på overflaten) og kanskje celler i et transplantat. Man tror at denne celleødeleggelsen kan skje både ved direkte cellekontakt med målcellen, og ved at antistoff rettet mot antigener på målcellen formidler kontakten som skal til, mellom makrofagen og dens bytte. Dette skjer ved at makrofagen (i likhet med nøytrofile granulocytter og NK-celler) har en membran-reseptor for antistoffets Fc-del (se fig. 25).

Makrofagene er også *sekretoriske* celler. De utskiller minst 100 forskjellige celleprodukter og kan konkurrere med levercellene i produktmangfold, jf. Tabell 3.

En sammenlikning mellom granulocyt- og makrofag-egenskaper er gitt i Tabell 4.



Figur 28. Makrofager og granulocytter

**Tabell 3.
NOEN SEKRETER FRA MONONUKLEÆRE FAGOCYTTER**

ENZYMER Lysozym Plasminogen-aktivator Kollagenase Elastase	ENZYMINHIBITORER α 2-makroglobulin	REAKTIVE INTERMEDIATER Superoksid H_2O_2 NO BIOAKTIVE LIPIDER PGE ₂ (prostaglandin E2) Tromboksan Leukotriener
"BINDE-PROTEINER" Fibronektin Transferrin	PMN-KJEMOTAKSINER (leukotrien B4, IL-8, etc.)	CYTOKINER IL-1, IL-6, TNF- α , G-CSF, M-CSF, IFN- α , TGF- β
KOMPLEMENT-FAKTORER		
KOAGULASJONSFAKTORER Tromboplastin		

Tabell 4. Noen forskjeller mellom granulocytter og makrofager

Funksjon	Nøytrofile granulocytter (PMN)	Makrofager
• Drap av “kroniske” og/eller intracellulære mikrober	–	+
• Drap av virusinfiserte og kreftforandrede celler	(+)?	+
• Renovasjon (RBC etc.)	–	+
• Antigen-presentasjon	(+)	+
• Nysyntese av hydrolaser	–	+
• Sekresjonsmangfold	+	+++
Kinetikk		
• Hurtigmobilisering mot pussdannende mikrober, via blodveien	+	(+)
• Stort beinmargslager av modne celler	+	–
• Evt. langlivet i vevene	–	+
• Evt. celledeling i vevene	–	+

EOSINOFILE GRANULOCYTTTER

I vår del av verden spiller de eosinofile granulocytterne for det meste en sykdomsforverrende rolle, nemlig som deltaker i våre vanligste allergier – straksallergiene (atopiske, IgE-medierte reaksjoner: for eksempel høysnue og astma).

Dannelse og skjebne. De eosinofile cellene dannes i beinmarg, sirkulerer i blodet, og fungerer i vevene omtrent som de nøytrofile; men det er noen iøynefallende forskjeller: Sirkulasjonstiden og livslengden i vevene er lenger enn for de nøytrofile. Dessuten er det gjerne få eosinofile celler i blodet når det er mange nøytrofile (f.eks. ved bakterielle infeksjoner), kanskje fordi stresshormonet kortisol har motsatt virkning på blodkonsentrasjonen av de to granulocyttypene.

Reguleringsmekanismer. *Dannelsen* av eosinofile granulocytter i beinmargen stimuleres av *cytokiner* (bl.a. GM-CSF, interleukin-5 og eotaksin).

Det ser ut som om cellene *tiltrekkes kjemotaktisk* bl.a. av peptider som frigjøres sammen med histamin fra mastceller eller basofile granulocytter, av histamin selv, av kjemokinet eotaksin (se Boks 1) og av substanser som utskilles av orme-parasittene. Eotaksin secernerer bl. a. av luftveiseepitel under et astma-anfall.

Funksjon. Begge granulocyttypene, PMN og Eos, har roller i *infeksjonsforsvaret* - men med henholdsvis bakterier og *ormer* (metazoer) som hovedfiender.

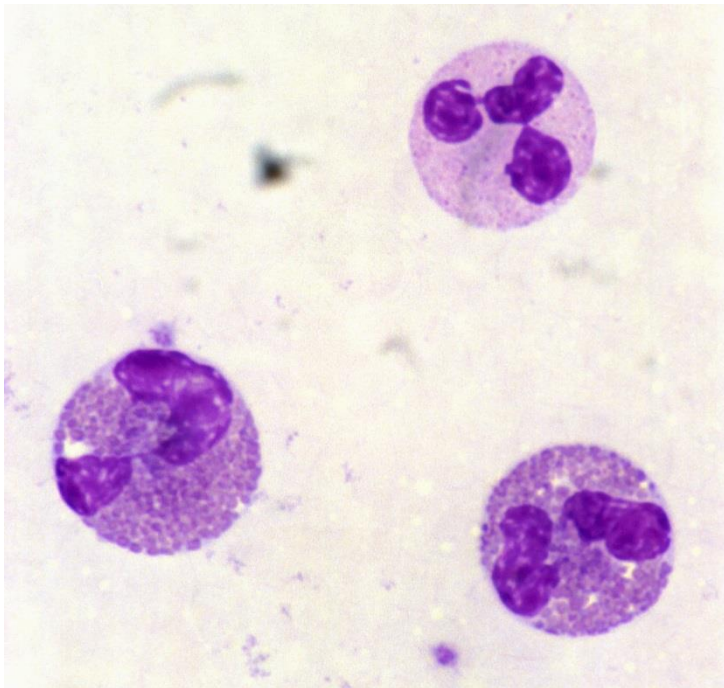
Eosinofile celler kan faktisk invadere ormene og secernere bl.a. cytotoksiske enzymer og aktiverte oksygenderivater inne i ormene.

IL-4 fra T-hjelper-2-celler stimulerer B-lymfocytter til IgE-produksjon. IgE samvirker med de eosinofile om parasitt-drapet, ved å tjene som én av flere typer opsoniner. Det passer godt med at vi i en del ormeinfeksjoner finner høye blodkonsentrasjoner av både IgE og eosinofile granulocytter og dessuten ansamlinger av eosinofile celler i vevet rundt ormelarvene.

De eosinofile celler kan forberedes - "primes" – som de nøytrofile – av CSF, etc. og dermed bl.a. få flere membranreseptorer - både for antistoff (inklusive IgE-R - slike reseptorer har ikke de nøytrofile) og komplement (C3b). Når de så – igjen som de nøytrofile – stimuleres av f.eks. kjemotaksiner til å øke produksjonen av bl.a. reaktive O₂-derivater, blir de toksiske overfor de antistoff/komplement-dekkete parasittene. Eosinofile granulocytter kan også utskille skadelige kornproteiner og viktige betennelsesmediatorer, og de kan få mastceller til å skille ut sine korn.

Eosinofile granulocytter er også tallrike ved *IgE-medierte straks-allergier*, f.eks. i nes slim ved "høysnue" og i bronkialslim ved astma, ofte også i blodet ved disse tilstandene. Her spiller utskillelsen av histamin og andre mediatorer (leukotriener etc.) fra bl. a. mastceller en viktig rolle både for utløsningen av sykdomstegnene og for tiltrekningen av de eosinofile cellene. De eosinofile granulocytters cytokiner og drapsapparat forverrer betennelsen og celledadene på reaksjonsstedet.

Hensikten med straksallergiene er ukjent; kanskje representerer de forsvarsreaksjoner på avveier. De er blitt stadig vanligere i vårt land. En hypotese som har fått en del tilslutning, er at sjeldnere infeksjonssykdommer og mindre antigen-"angrep" i oppveksten har dreiet våre immunreaksjoner fra T-hjelper-1-reaksjoner til T-hjelper-2-dominans.



Figur 29. To eosinofile og én nøytrofil granulocytt

BASOFILE LEUKOCYTTER

De basofile granulocytterne og deres meget mer tallrike "fettere", mastcellene, som finnes i alle løse bindevev, er viktige produsenter av ulike typer betennelsesmediatorer, dvs. stoffer som kan sette i gang en betennelsesreaksjon. Prototypen er histamin.

Dannelse og skjebne. Cellene dannes som nøytrofile og eosinofile celler fra stamceller i beinmargen. De er morfologisk og biokjemisk litt forskjellige fra de totalt sett meget tallrikere *mastcellene*. Mastcellene dannes lokalt i bindevevene, men de stammer også opprinnelig fra den hematopoietiske stamcellen.

Det er to typer mastceller, bindevevs- og mukosa-mastceller; de førstnevnte med heparin-proteoglykan, de sistnevnte med kondroitinsulfatproteoglykan i kornene. Muse-bindevevsmastceller som implanteres i magesekken mukosa, kan dele seg og bli til mukosamastceller. Omvendt kan mukosaliknende mastceller fra spesielle beinmargscellekulturer overføres til bindevevsmiljø utenfor mukosa og bli til bindevevsmastceller. Slike forsøk viser hvordan cellers fenotype kan bestemmes av mikromiljøet de er i. Liknende stromafaktorer synes å bestemme eller innvirke på de hematopoietiske stamcellenes differensieringsretning i bloddannende vev.

Funksjon. Funksjonene - som hovedsakelig er knyttet til *forsvar og betennelses-reaksjonen* (se fig. 40) - er sannsynligvis felles for de to celletyper, mastceller og basofile. Kornene inneholder *histamin, proteaser, heparin- eller kondroitinsulfat-proteoglykaner* og *kjemotaksiner* for nøytro- og eosinofile granulocytter. *Cellemembranderiverte betennelsesmediatorer* (leukotriener, PAF - se seinere) og *cytokiner* skilles også ut fra stimulerte mastceller/basofile granulocytter. Mediatorene har parakrine virkninger.

Histamin er trolig en viktig mediator tidlig i betennelsesreaksjonen - i hvert fall ved allergiske straksreaksjoner (astma, urtikaria, høysnue); de andre mediatorene er viktige seinere i betennelsen. Leukotriener og PAF er kanskje igangsettere av bronkiekonstriksjon, slimhinnebetennelse og økt slimdannelse ved astma.

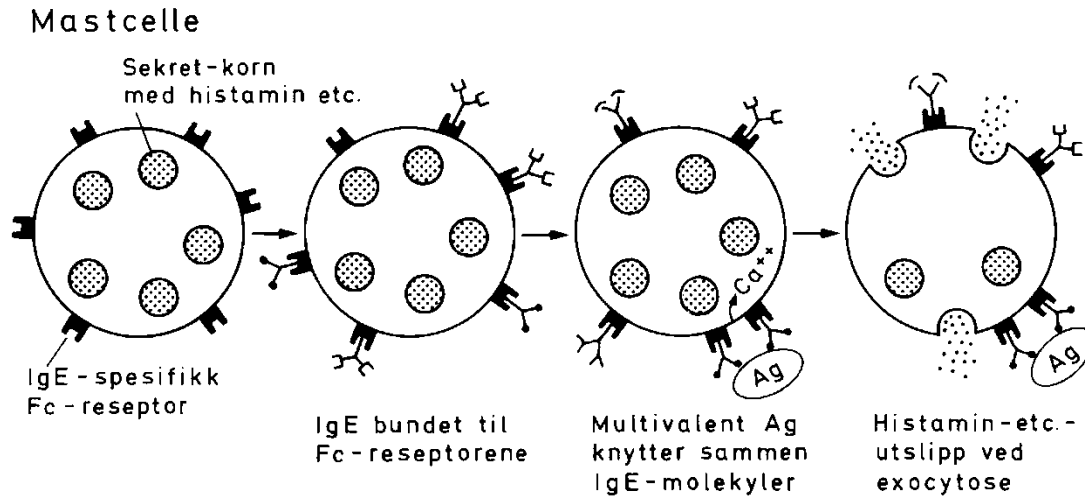
Heparinets fysiologiske roller vet man forbløffende lite om; én hypotese sier at heparin fra mastceller er med og regulerer fibrinkoagulasjonen som aktiverte monocytter/makrofager kan starte opp i et betennelsesområde v.h.j.a. tromboplastin ("tissue factor" – TF) i cellemembranen. En annen hypotese sier at proteoglykanene kompleksbinder og stabiliserer de utskilte proteasene, så de får tid til å fordøye basalmembraner og annet ekstracellulært materiale i betent vev.

Man har også spekulert på om heparin kan tjene som kofaktor for fibroblast-vekstfaktor. Mediatorene fra mastcellene utskilles nemlig ved vevsskade, som jo skal repareres. Det kan altså godt være at heparinet kun tjener en "binde-funksjon", mens **heparansulfat** (som finnes bl.a. på overflaten av endotelcellene) har den antikoagulatoriske funksjonen i organismen som vi benytter oss av når heparin brukes som legemiddel.

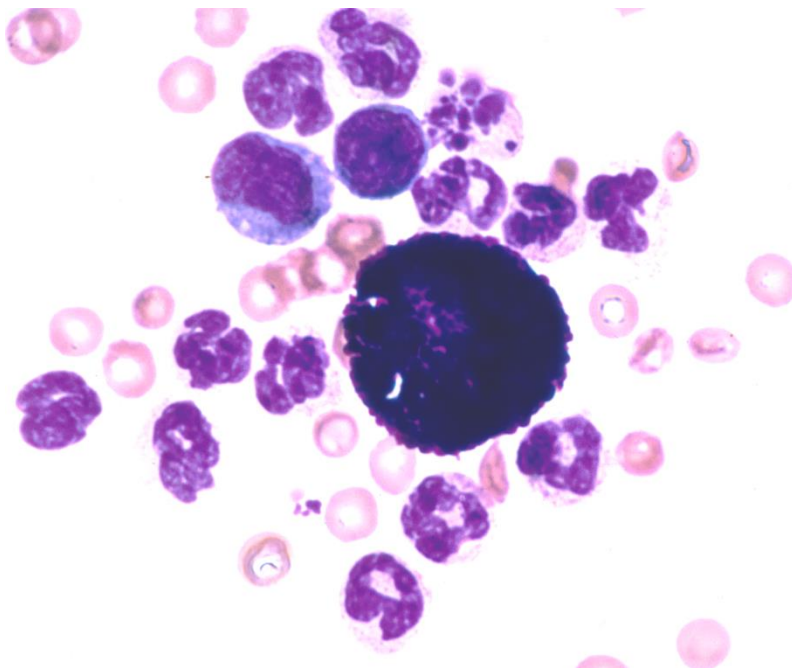
Mastcelle-mediatorene utskilles også når allergener (som pollen, husstøv, etc.) kommer inn i vevet og bindes til immunglobulin E-molekyler (rettet mot allergenet!). Via cellens Fc-reseptorer har IgE trolig allerede satt seg på mastcelleoverflaten (se fig. 30). Visse aktiverte komplementfaktorer og cytokiner (bl.a. IL-1) kan også få mastcellene til å utskille histamin og andre mediatorer.

Blant *medikamentene* som brukes mot straks-allergiske sykdommer virker anti-histaminene ved å binde seg til histaminreseptorer (H-1-reseptorer f.eks. på endotelceller, glatte muskelceller og kjertelceller) og hindrer dermed histamin-binding og -virkning. Natrium-kromoglikat (Lomudal®) "stabiliserer" mastcellene så de ikke så lett skiller ut

betennelsesmediatorer. Glukokortikoidhormoner hemmer proteinsyntese (inklusive cytokinsyntese), dannelse av arakidonsyrederivater, og derfor betennelsesreaksjonen (se seinere; fig. 53, 54).



Figur 30. Modell for allergiske straks-allergier.



Figur 31. Mastcelle og granulocytter fra mus

LYMFOCYTTER

Lymfocytene er viktige deltakere i det naturlige (NK-celler og andre ILC – «innate lymphoid cells») og det spesifikke (T- og B-celler) immunforsvaret. Noen typer patruljerer organismen, med kortere eller lengre vandringsveier, på leting etter fremmede antigener som det skal reageres mot – mikrober, transplanterte celler og kanskje forandret "selv", nemlig kreftceller.

T- og B-lymfocytter dannes primært i *sentrale lymfatiske vev* (thymus, beinmarg). De dannes der uavhengig av antigene stimuli. I *perifere lymfatiske vev* (lymfeknuter, milt, lymfatisk vev i respirasjons-, urogenital- og kanskje spesielt i gastro-intestinal-traktus) ekspanderer lymfocyttkloner etter antigen stimulering. Et *antigen* kan få en ørliten andel av de små lymfocytter til å vokse til store lymfocytter (= lymfoblaster eller immunoblaster). De deler seg flere ganger med ca. ett døgn mellomrom og danner modne "utøverceller" og hukommelsesceller. T-lymfocytene kan trolig først ha utøverfunksjon, så dør de (apoptose) eller blir til hukommelsesceller.

T-cellenes funksjoner er hjelp, regulering, "forsinket hypersensitivitets"-reaksjoner og cytotoxicitet. Det er fremdeles noe usikkert hvordan disse T-cellefunksjonene er knyttet til ulike T-celler, - det er m.a.o. mulig at én T-celle både kan gi hjelp til andre T- og B-celler og skille ut cytokiner som utløser en forsinket hypersensitivitetsreaksjon. T-hjelpe-cellene og de cytotoxiciske T-cellenes er i hvert fall atskilte cellepopulasjoner (henholdsvis CD4- og CD8-celler). De hemmende T-regulatoriske cellene er også CD4-celler.

Det er trolig at det finnes *T-cellehukommelse* for hver av T-celle-utøverfunksjonene – og en slags hukommelse er sannsynlig også for NK-cellenes.

B-cellenes funksjon er å lage antistoff etter at de har modnet til spesialiserte plasmaceller.

T-lymfocytter

Dannelse og skjebne. Forløperne til T-cellenes påvirkes av det epiteliale og mesenchymale *cellenettverk i thymus*, og stimuleres trolig også av et eller flere *thymushormoner* (peptider). De deler seg livlig i thymuscortex og modnes samtidig til små lymfocytter. De fleste dør etter kort tid enten p.g.a. reaktivitet overfor våre egne antigener (negativ seleksjon) eller manglende reaktivitet overfor antigener overhodet. Antigener er bundet til MHC klasse II-molekyler. Det er positiv seleksjon av de T-cellenes som skal overleve og kan bli funksjonsdyktige overfor fremmede antigener. Ca. 5 % av cellene forlater thymus og kommer over i blodet. De detaljerte prosessene som foregår i thymus og beinmarg, hvor DNA-biter som koder for antistoff eller antigenreseptor blir koplet sammen, og som fører til dannelsen av den kolossale variabiliteten, blir behandlet i immunologiundervisningen.

Mange lymfocytter i perifere lymfatiske vev kan *resirkulere*, dvs. forlate blodbanen mellom endotelcellene. Dette skjer gjennom helt spesielle blodårer (såkalte høyendotelvenyler) i lymfeknutenes paracortex (fig. 32) og fra venesinuser på grensen mellom rød og hvit pulpa i milt. Herfra kan de vandre gjennom lymfevevet og via efferente lymfeganger finne veien tilbake til blodet. Hos rotter kan hele 25 % av T-lymfocytene som flyter gjennom høyendotelvenylene i én passasje, feste seg til det høye endotelet og så vandre ut i lymfevevet. Det innebærer at de resirkulerende T-cellenes som tømmes tilbake til blodet fra

de store lymfeganger, får en svært kort sirkulasjonstid før neste resirkulasjonsrunde (halv-tid i blod ca. 1/2 time hos mennesker). T-cellene utgjør omtrent 70 % av våre blodlymfocytter. Ca. 20 % av blodets lymfocytter er B-lymfocytter og resten utgjøres av NK-celler.

Lymfocytters og andre cellers spesielle vandringsveier i organismen beror på tre egenskaper: *motilitet* (bevegelighet, bestemt av polymerisering og depolymerisering av aktin, pluss aktin/myosin-mekanismen, omtrent som i muskelvev), *adhesjonsproteiner* i cellemembranen og *reseptorer for kjemotaksiner* (bl.a. kjemokinene innen CXC- og CC-klassene).

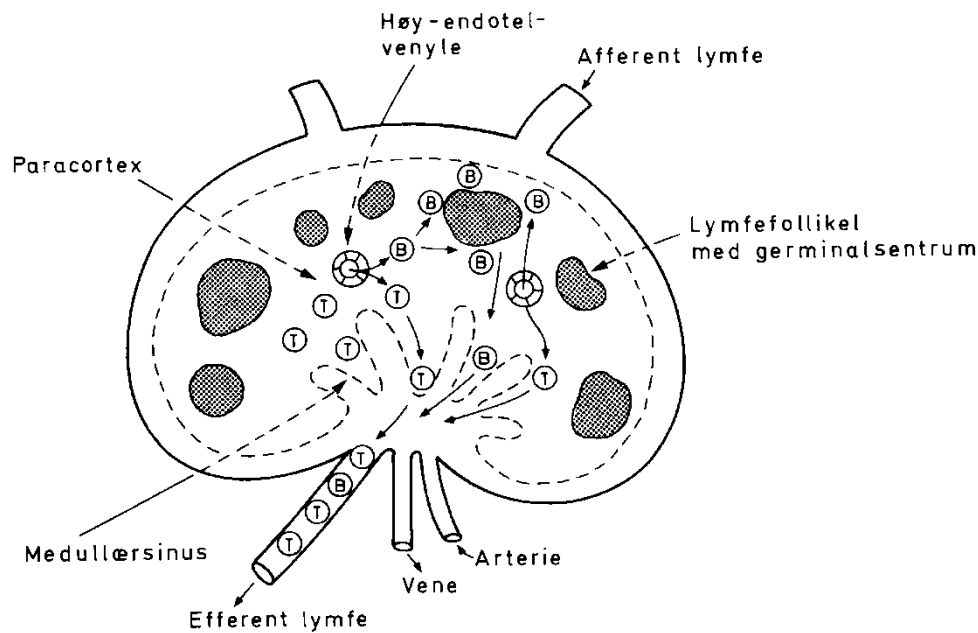
Bare en liten andel (kanskje under 1:100 000) av alle T- eller B-celler kan reagere med et gitt antigen. Siden mikroantigener og andre antigener heldigvis som oftest ikke spres til hele organismen, men fanges opp fra blodet i milten, fra vevene i lymfe-knuter og fra tarmen i peyerske flekker (plakk), kan vi ved hjelp av lymfocyttesirkulasjonen oppnå at denne lille fraksjonen av lymfocytterne som kan spesifikt stimuleres, får kontakt med antigenet. Antigenet frembys for de vandrende lymfocytter av APC: *dendritiske celler*, *B-celler* og *makrofager* (se tidligere).

Både T-celler og B-celler resirkulerer, men med ulike ruter gjennom lymfevevet (fig. 32). Hos rotter fullfører majoriteten av T-lymfocytterne en full resirkulasjonsrunde på ca. et halvt døgn; de fleste B-cellene bruker lenger tid. De få lymfocytterne som har antigenreseptorer som "passer til" deler av antigenmolekylet som er kompleksbundet til vevstypeantigener (MHC klasse I eller II), kan stanse resirkulasjonen og reagere med blast-dannelse og celledeling. Noen av de cellene som dannes etter celledelinger, vil begynne å resirkulere igjen og dermed spres i organismen.

På den måten vil kanskje 90 % av cellene i efferent lymfe fra en lymfeknute komme fra høyendotelvenylene, i underkant av 10 % komme via afferent lymfe (etter en lengre resirkulasjonssløyfe, gjennom f.eks. hud, lever, tarmvegg og 2- 3 % komme fra lymfeknuten selv, der de er dannet i løpet av en immunreaksjon.

Man har i mange år ment at i det minste noen av de resirkulerende T-cellene kan leve lenge – opptil mange år – før de dør eller deler seg. Dette er celler som har hukommelsesfunksjon. Nå er man ikke sikker lenger; det kan komme an på forholdene. Det kan se ut som om det foreligger *homeostasemekanismer for totalpopulasjonen* av de store lymfocytt-kategoriene. Slik at det f. eks. er et "tak" på hvor mange T-hukommelsesceller vi kan ha: Skulle totalantallet være submaksimalt, kan cellene leve lenge. Hvis ikke dør de apoptotisk – ved tilfeldig utvalg. Det som derimot er sikkert, er at selve den immune *hukommelsen* kan leve i årevis. Livslengden til effektorcellene og kanskje de "nyfødte" cellene fra thymus (naive T-celler, Ag-ustimulerte lymfocytter) tror vi snarere må måles i dager eller uker enn i år før de dør en programmert - apoptotisk - celledød.

Reguleringsmekanismer (med cytokiner som fremtredende "aktører" - se Tabell 2) og **funksjon** behandles detaljert i immunologiundervisningen. Det samme gjelder for B-lymfocytterne og NK-cellene (se nedenfor).



Figur 32. Lymfocyt-resirkulasjonen gjennom lymfeknute; skjematisk

B-lymfocytter

Det er stor produksjon av kortlivede lymfocytter (dvs. en levetid på dager til uker) i beinmargen. Deres funksjon er ufullstendig kjent (umodne transitt-celler eller defekte B-celler som skal dø apoptotisk, som tilsvarende T-celler i thymus). Noen av dem er B-lymfocytter som kan vandre fra beinmargen til perifere lymfatiske vev. De dør i løpet av dager eller uker hvis de ikke stimuleres til vekst og deling av antigen som passer til immunoglobulinreseptorene deres. Når de reagerer med antigen, omdannes de til blastliknende celler som deler seg og modnes til hukommelsesceller (trolig lang-livede) og plasmaceller (levetid få uker i perifere lymfatiske vev; trolig opptil flere år i beinmarg). Som nevnt under omtalen av T-cellene resirkulerer også B-hukommelsescellene, skjønt langsommere enn T-cellene. [Affinitetsmodningen i perifere lymfatiske vev omtales av immunologene.]

«Innate lymfoid cells» (ILC)

Beinmargen eksporterer også andre lymfocytter, som tilhører det *naturlige (uspesifikke eller non-adaptive) immunsystemet*. NK-("Natural killer") celler, kan uten tidligere immunisering og uten hjelp av antistoff gjenkjenne og drepe endrede celler, f.eks. kreftceller eller virusinfiserte celler, før T-celle-immuniteten har bygget seg opp.

I likhet med granulocytter og makrofager har NK-celler og andre ILC gjenkjennelsesmekanismer med svært bred spesifisitet og til dels tidlig fylogenetisk opphav.

Granulocytter og makrofager benytter såkalte PRR «pattern recognition receptors»), som kan være TLR ("Toll like receptors"), i cellemembranen eller intracellulært, så vel som liknende intracellulære proteiner som kan være en komponent i inflammasomer. PRR-ene gjenkjenner PAMP ("pathogen associated molecular patterns") eller DAMP («Damage associated molecular patterns»). Dette er diverse kroppsegne komponenter som frigjøres ved celledskade, se fig. 42.

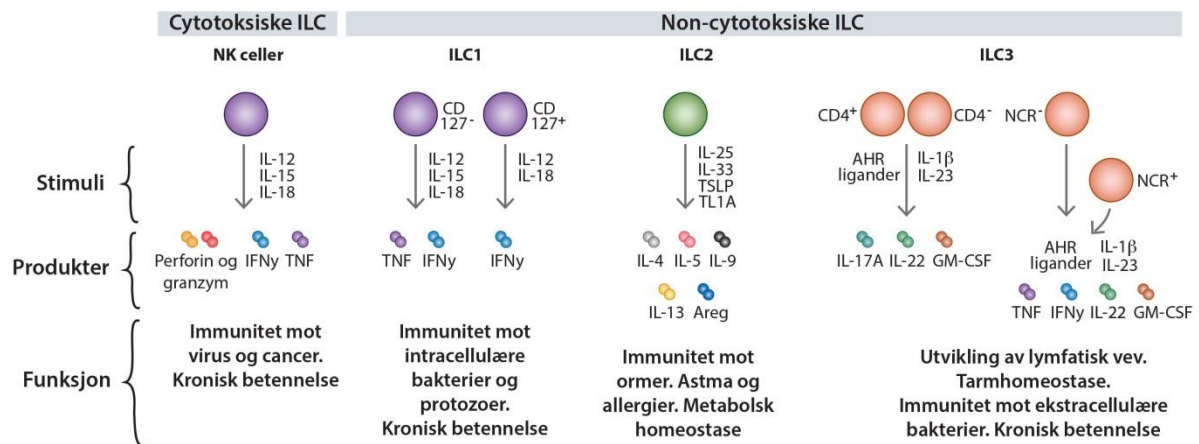
Granulocytter og makrofager gjenkjenner mønstre (se fig.19, 25, 42) av karbohydrater (mannose i glykoproteiner, f. eks.) på mikrobeoverflater, endotoksin (som er en celleveggkomponent hos gram-negative bakterier) eller mikrobers polynukleotider.

NK-celler kan "sanse" om en celle mangler våre egne MHC-antigener (såkalt «missing self»), og vil dermed drepe den. Endrede celler vil ofte uttrykke ulike stress-markører på overflaten, som normalt ikke uttrykkes. NK-cellene vil gjenkjenne disse via en rekke ulike aktiverende reseptorer, for så å drepe den endrede cellen.

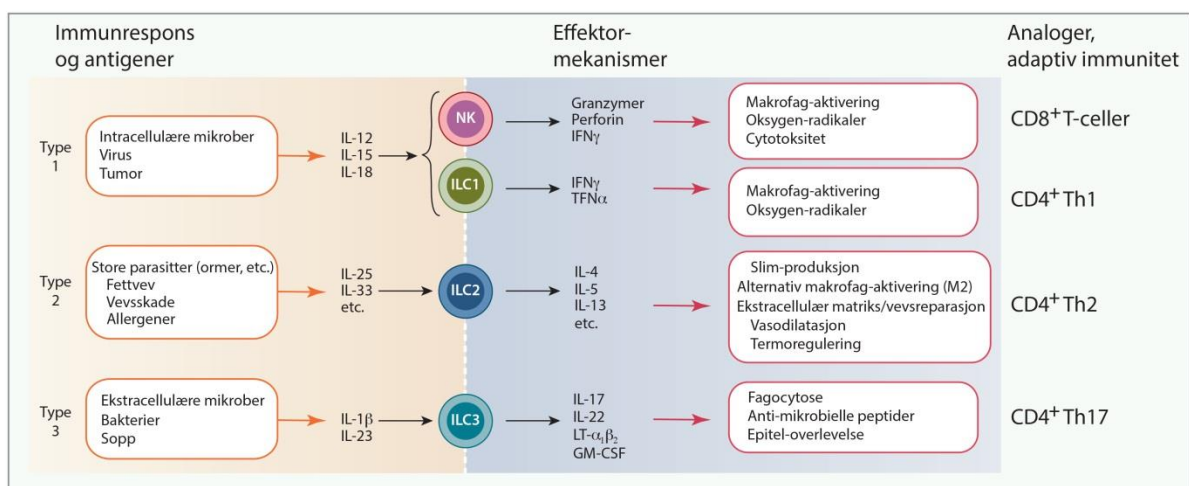
NK- celler kan også drepe celler som er "blinket" ut av antistoff, via antistoffreseptor (Fc-reseptor) sin.

Man vet ennå lite sikkert om NK-cellenes livsløp, vandringsveier og regulering. De dannes i beinmargen og havner for en stor del i lever og milt. Interferon og andre cytokiner (IL-2) øker mengden av NK-celler og øker den drepende virkningen de innehar.

En skjematisk oversikt over ILC-ene gis i de følgende to figurene.



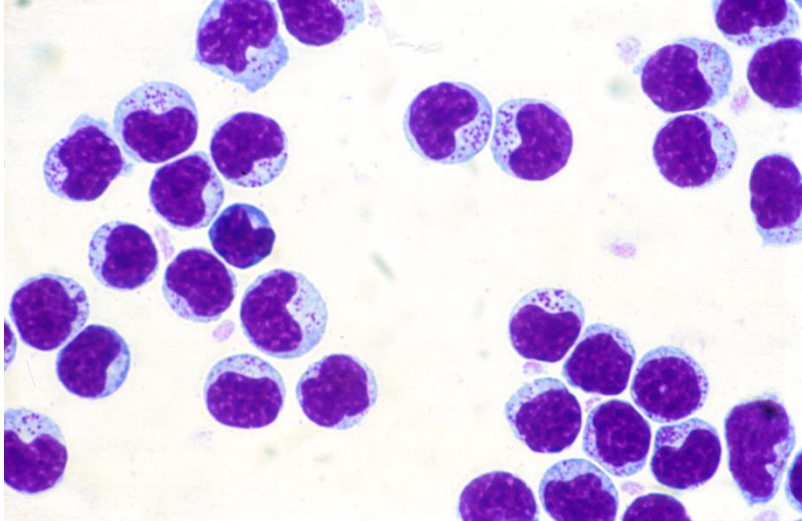
Figur 33. Stikkord om ILC-er



Figur 34. Flere stikkord om ILC-er

I tillegg til NK-celler finnes det også ILC som har en mer regulatorisk rolle (non-cytotoksiske ILC). Man har ikke kjent til de non-cytotoksiske ILCene lenge, og mye er fremdeles ukjent.

Funksjonene deres spenner vidt – fra en rolle i lymfatiske vevs utvikling, via kroniske infeksjoner, til en rolle i tarmen, der de synes å opprettholde en fredelig balanse mellom tarmmukosa og uskadelige, hjelpsomme tarmbakterier, slik at det ikke oppstår betennelsesreaksjoner mot disse mikrobene. Figur 33 og 34 angir ytterligere funksjoner. Immunbiologer foreleser mer om disse spennende cellene.



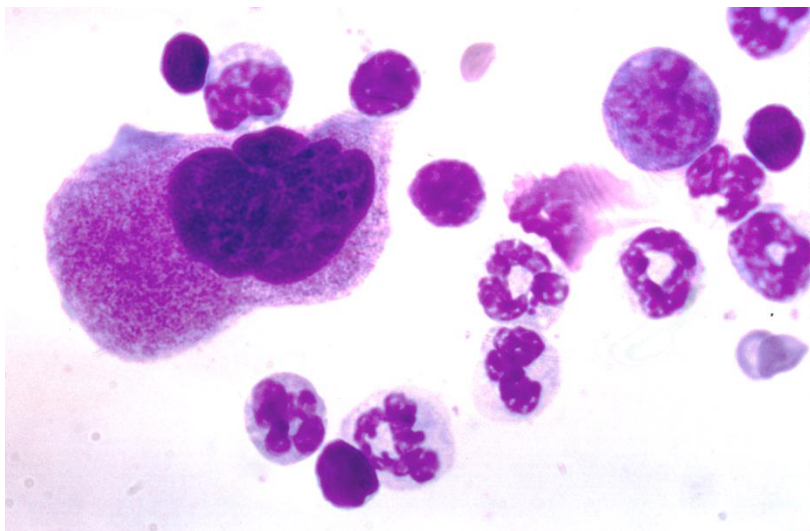
Figur 35. Isolerte NK-celler

BLODPLATER

Blodplatene plugges karskader og stopper blødning, bl.a. fra små kar som stadig brister – og det er normalt. Men de kan også være med på å plugge kar (trombose) – og det kan føre til vevsdød (infarkter).²

Dannelse og skjebne. *Trombopoiesen* har mange fellestrekk med granulopoiesen og erythropoiesen. En determinert, unipotent progenitorcelle utvikler seg fra den multipotente stamcellen og modner i løpet av flere celledelinger videre til morfologisk erkjennbare *megakaryoblaster* og *megakaryocytter*. Kjernen i megakaryoblastene deler seg og danner kjernelapper, uten fullstendig atskillelse av datterkjernene og uten samtidig cytoplasmaoppdeling. Cytoplasma vokser slik at det til hver av kjernelappene svarer et visst cytoplasmavolum. Mesteparten av cytoplasmamodningen (dannelse av ulike korn, etc.) finner sted etter at kjernedelingsevnen har gått tapt, og cellen er blitt til megakaryocyt.

² Les gjerne først om *blodstansning (hemostase)* i kursheftet for å få tak i hovedpunktene, før du gir deg i kast med dette kapitlet, som bare handler om blodplatene, trombocytene. Plasmakoagulasjonen, i overblikk, resymeres likevel i Boks 3 og fig. 38.



Figur 36. Megakaryocyt, granulocytter, lymfocytter og blastcelle fra mus

Cytoplasmaet demarkeres til trombocytter av et plasmamembransystem som står i forbindelse med celleoverflaten. Trombocytene frigjøres til blodet i beinmargsinusoidene.

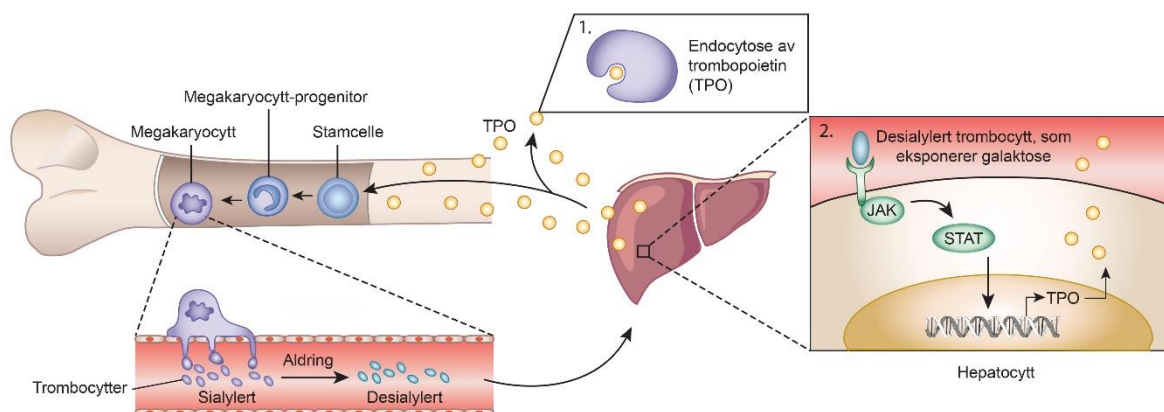
Da gjennomsnittlig trombocytstørrelse er nokså konstant, kan man regne ut at det normalt dannes 150-200 trombocytter av det cytoplasma som "tilhører" en megakaryocyt-kjernelapp. De "avklede" megakaryocyt-kjernene spises opp av mononukleære fagocytter (= makrofager).

Den "nyfødte" trombocyt har større blodstillende evne enn de eldre platene. Den frigjøres trolig i blodbanen fra store "pseudopodier" som megakaryocytten stikker ut mellom endotelcellene i beinmargsinusoidene og inn i blodstrømmen.

Trombocytten lever og funksjonerer som erytrocytten (men i motsetning til leukocytene) i – eller i nær tilknytning til – blodbanen. Den dør (også som erytrocytten) av *alderdom*, etter ca. 10 dager (fig. 22). Normalt er 2/3 av trombocytene til enhver tid i fri sirkulasjon. De står i likevekt med den resterende 1/3 av trombocytene, som er i milten. Trombocytter og erytrocytter synes ikke å være "randstilte", slik som leukocytene er.

Reguleringsmekanismer. Trombocytproduksjonen i beinmargen reguleres av *trombopoietin (TPO)*, som omsider ble klonet i 1994, og som man mener virker analogt med erytropoietin. Trombopoietinkonsentrasjonen i blod stiger ved *trombocytopeni*, dvs. når det er få blodplater i blodet. Produksjonsstedet for hormonet er leveren, kanskje også andre steder. Man tenkte seg at basal TPO-produksjon er jevn og konstant. Videre at trombocytene (og forstadiene i beinmargen) ved reseptormediert endocytose forbruker TPO. Dermed blir TPO-konsentrasjonen i kroppsvæskene høy ved behov, dvs. når det er få trombocytter i blodet (trombocytopeni) (et vice versa). Det forhøyete TPO-nivået gir ved trombocytopeni sterkere enn normal stimulering av dannelsen av blodplater i beinmargen. I 2015 ble det også overbevisende vist at også selve *produksjonen* av TPO er regulert – riktignok foreløpig bare vist hos mus. En spesiell reseptor på hepatocytmembraner som vender mot blodstrømmen, binder gamle trombocytter. De har mistet sialinsyre ytterst på polysakkarider heftet til cellemembranen, slik at monosakkarid nr. 2 i kjeden, galaktose, eksponeres og kan binde seg til hepatocytreseptoren. Dette fører til endocytose av blodplaten. Den brytes ned, mens signalsystemer inn til hepatocyttkjernen aktiveres og øker TPO-produksjonen.

Trombocyttdannelse og regulering



Som for erythropoiesen og granulopoiesen trengs det også her flere vekstfaktorer enn TPO (som kan være bl.a. SF, stamcelle-faktor, men også en/noen ukjent(e)), som regulerer celledannelsen tidlig i utviklingsrekken.

Ved kronisk alvorlig trombocyttemangel i blodet er antallet megakaryocytter tre- til firedoblet og deres størrelse er doblet (gjennomsnittlig antall kjernelapper økt), slik at trombocyttdannelsen har økt seks til åtte ganger (= 3-4 x 2). Den maksimale forøkelse av erytrocyttproduksjonen ved anemi er av samme størrelsesorden. Det angis også at injeksjoner av TPO kan øke blodplatekonsentrasjonen opp til 10 ganger hos mus og aper. TPO kan også "prime" (preaktivere) trombocytter. Dette gjør at man må være varsom ved klinisk bruk av TPO, så man ikke påfører pasientene trombose (blodproppsykdom).

I stedet forsøker man å produsere ufarlige legemidler med trombopoiesestimulerende virkning, for eksempel slik man tror betennelsecytokinet IL-6 gjør det, ved å stimulere TPO-produksjonen.

Funksjon. Blodplatenes hovedoppgave er å danne en *tettende plateplugg* der karveggen er skadet. Sammen med *plasmakoagulasjonen* (Boks 3) og *karkontraksjonen* stanser platepluggen blødninger ut i vevet eller ut på indre eller ytre kroppsoverflater.

Dersom man lager et grunt snittsår i huden, kan man allerede etter 30 sekunder histologisk se små plateplugg i overskårne kar og små fibrinfibre langs sårkanten og i periferien av platepluggene.³

Blodplatene adhererer bl.a. via kollagenreseptorer til kollagen i basalmembranen eller under denne når det er dannet et sår i endotelcelledekket. For at blodplater i strømmende blod skal kunne feste seg på denne måten, må *von Willebrand-faktor* være til stede. Det er et plasmaprotein (som også finnes i endotelceller og i blodplatene selv) som sirkulerer bundet til faktor VIII. Von Willebrand-faktor kan binde seg både til kollagen og til reseptorer i platemembranen – og dermed som kollagenreseptorene feste platene til intercellulærsubstansen.

Andre adheranseproteiner er også viktige for forankringen av blodplatene. Eksempler er fibronektin og fibrinogen. **Fibronektin** er et langstrakt molekyl som finnes i blodplasma og i bindevev. Det kan forankre diverse celler, inklusive blodplater, til andre celler og til intercellulærsubstans (kollagen). **Fibrinogen** + Ca²⁺

³ Studentene anbefales å lese i "Klinisk biokjemi og fysiologi", Gyldendal Akademisk, om hemostasemekanismene, trombosemekanismene og årsaker til økt blødningstendens.

kan "danne bro" mellom blodplater. Adheransereseptorenes cytoplasmatiske deler er forankret til "celleskjelettet" (mikrotubuli og mikrofilamenter) og kan eventuelt som andre reseptorer sende signaler intracellulært.

Kollagentilheftede (*adherente*) blodplater er aktiverte pga. stimulering via kollagenreseptorene, og platene kan aktiveres ytterligere av diverse fysiologiske substanser (ligander), som også har sine spesifikke reseptorer i platemembranen. Jo sterkere platene aktiveres, jo flere forandringer skjer med dem – etter følgende "opptrappingsplan": 1) *Formforandring* (platene blir i løpet av få sekunder kulerunde, med pseudopodier, som skyldes omorganisering av mikrotubuli og aktinfilamenter). 2) *Aggregasjon* (plater festes til hverandre). 3) *Sekresjon* av α -korn til det åpne tubulussystemet, som kan føre sekresjonsproduktene (bl.a. koagulasjonsfaktorer og adheranseproteiner) ut av cellene. 4) *Sekresjon av tette korn* (med bl.a. Ca^{2+} og ADP), pluss delvis *arakidonat-frigjøring* fra fosfolipider i platemembranen (se fig. 37). 5) *Komplett* (dvs. maksimal) arakidonat-frigjøring. 6) *Sekresjon av sure hydrolaser* (lysosomer). Som man kan forstå, kan blodplater brukes som modell-systemer både for glatte muskelceller (kontraksjon) og nerveterminaler (transmitter-frigjøring).

Utskilt ADP fra tette korn har en spesiell funksjon, ved at det fører til blottlegging eller eksposisjon av fibrinogenreseptorene, slik at fibrinogen kan aggregere platene. *Aggregeringen* skjer ved at pseudopodier fra forskjellige plater griper inn i hverandre og henger sammen, med fibrinogen + Ca^{2+} som bindeledd.

Koagelretraksjonen skjer ved at pseudopodiene trekker i og "strammer" fibrinnett som omgir platene og andre blodceller. Fibrin har feste både i trombocytmembranen og i intercellulærsubstansen (kollagen).

Reguleringsmekanismer for blodplatefunksjonen. To agonister i lav konsentrasjon kan forsterke hverandres virkning på aktiveringen, f.eks. trombin (som er det sterkeste platestimulus vi kjenner) og adrenalin.

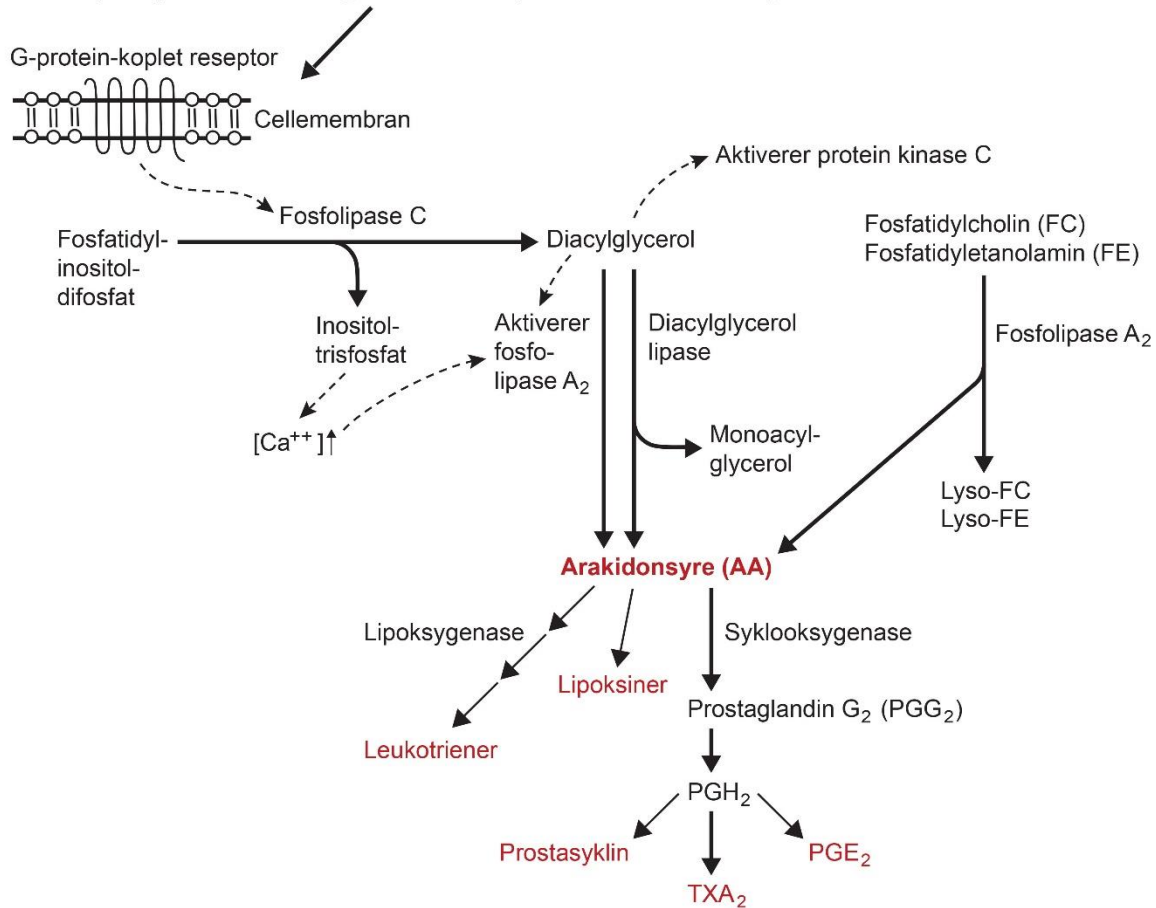
Andre platestimulatorer er kollagen, ADP (frigjøres fra skadede celler og utskilles fra blodplatene), tromboksan A_2 (= TXA_2 , utskilles fra platene, metaboliseres til inaktivt TXB_2 , se fig. 37, 44), prostaglandinene PGG_2 og PGH_2 , serotonin, vasopressin (= anti-diuretisk hormon) og plate-aktiverende faktor (PAF, fig. 40, 44).

Når plater aktiveres, kan tidsbegrensede **positive tilbakemeldingsløyper** settes i gang: Tett-korn-sekresjon frigjør ADP og serotonin, som begge forsterker aktiveringen (men serotonin er en svak aktivator). Et annet eksempel: Prostanoider (TXA_2 , PGG_2 og PGH_2) som dannes i løpet av aktiveringen, fører også til ytterligere aktivering via spesifikke membranreseptorer. På den annen side virker **desensibiliseringsfenomenet** til å begrense aktiveringen: Langvarig stimulering nedsetter følsomheten for vedkommende aktivator og gjerne også for andre aktivatorer. Dette fenomenet ses også i andre celletyper.

Signalveien inn i platene fra stimulerte membranreseptorer: *Fosfolipaser* aktiveres i platene. De katalyserer frigjørelse av inositol-trisfosfat (som mobiliserer Ca^{2+} fra lagre i intracellulære membran-rør/sekker), diacylglycerol (som aktiverer protein kinase C) og arakidonsyre. Dette er signalveier som brukes i mange celletyper. *Arakidonsyren* i blodplatenes cytoplasma omdannes under forbruk av O_2 til kortlivede endoperoksid av enzymet *syklooksygenase* (også kalt COX eller prostaglandin syntetase) (fig.37, 44). Endoperoksidene er forløpere for mer stabile substanser, bl.a. prostaglandiner, dessuten det labile *tromboksan* A_2 , som både har vasokonstriktorsk og aktiverer platene.

I den stimulerede blodplaten aktiveres som nevnt også en **aktin-myosin-kontraksjonsmekanisme** (ved at Ca^{2+} -calmodulin aktiverer myosin lett-kjede-kinase, som fosforilerer den lette myosinkjeden og dermed tillater aktin-myosin-interaksjonen). Kontraksjonsmekanismen er trolig viktig både for koagelretraksjonen og for platenes sekresjonsprosess, den såkalte "release-reaksjonen".

Eksempler på relevante ligander: Blodplatestimulatorer, kjemokiner, histamin, fMLP.



Figur 37. Frigjøring og omdannelse av arakidonat i blodplater, granulocytter og andre celler

Endotelceller kan lage det vasodilaterende (= blodåreutvidende) og anti-aggregerende arakidonsyrederivatet *prostasyklin*. Det stimulerer adenylyl-syklase i platemembranen. Syklisk AMP hemmer blodplateaktivering. "Uforstyrrete" endotelceller kan også på flere andre måter motvirke de tre hemostasemekanismene (se fig. 39), mens mekanisk eller kjemisk stimulerede endotelceller forsterker mekanismene: karkontraksjon (via peptidet *endotelin*), fibrindannelse (via tromboplastin (TF) og plasminogenaktivator-hemmer) og platepluggdannelse (via von Willebrand-adheransefaktoren).

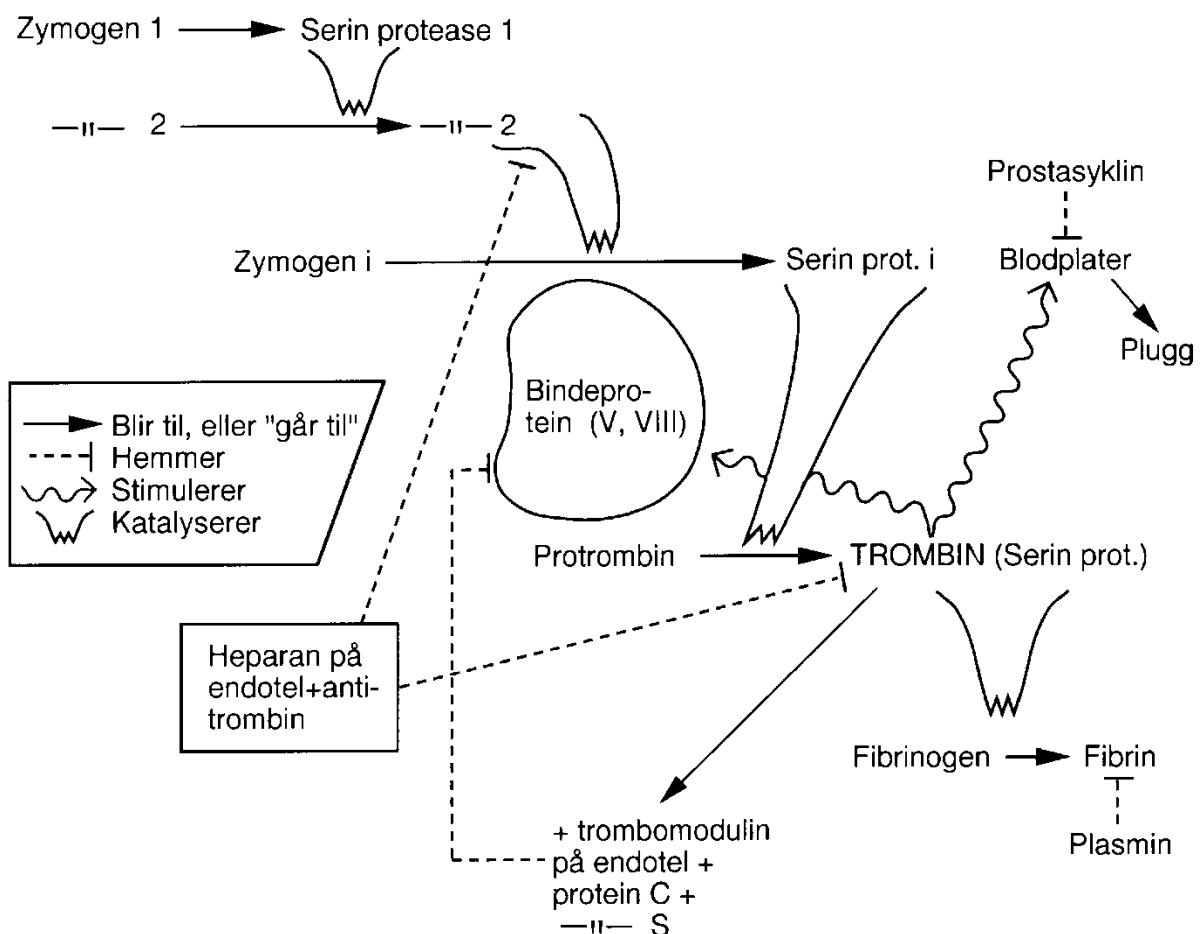
Syklisk GMP (cGMP) er en inhibitorisk signalsubstans både i glatte muskelceller i årene og i blodplatene, og dannelsen stimuleres fysiologisk av *nitrogenoksid (NO)* fra endotelceller og medikamentelt av nitropreparater (nitroglycerol = glyceryl-tri-nitrat, f.eks.).

Balansen mellom plateaktiverende og hemmende mekanismer, f.eks. mellom tromboksan A₂ og prostasyklin, forstyrres ved endotelskade og er trolig en årsak til dannelse av "blodpropper" i f.eks. "forkalkede"

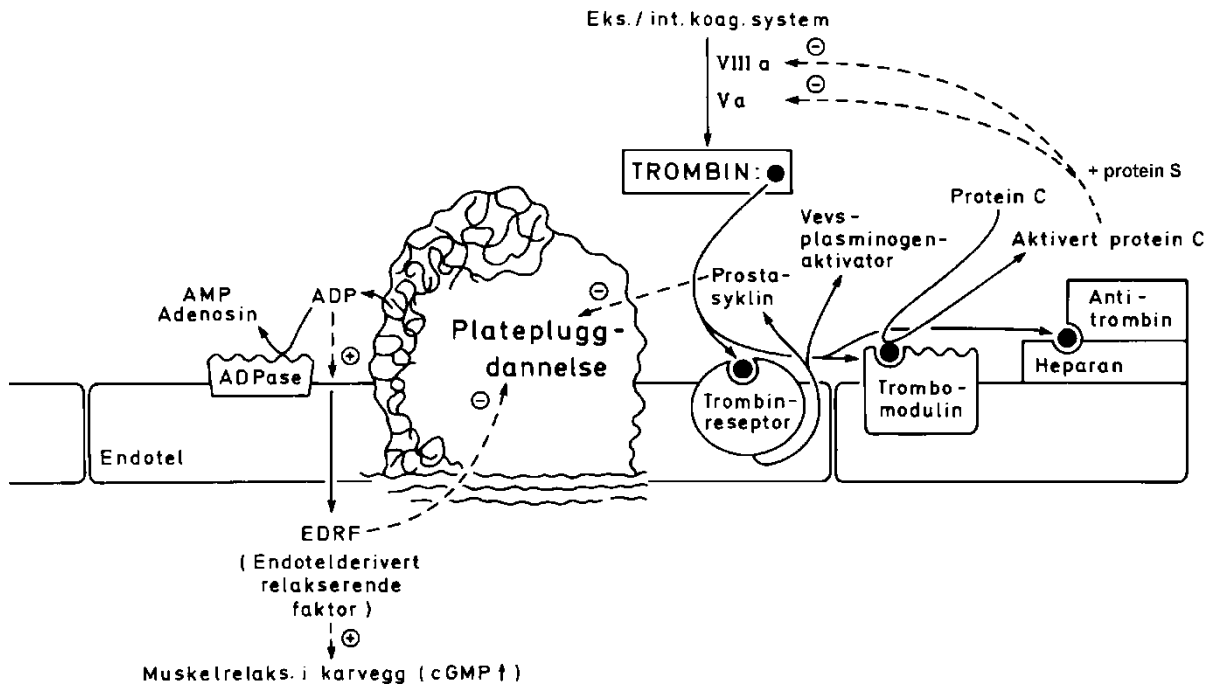
koronararterier med skadet eller stimulert endotel. Det forskes intenst for å finne effektive og ufarlige medikamenter eller kostkomponenter som kan hemme dannelsen av tromboksan A₂-liknende, men ikke prostasyklin-liknende fettsyrederivater.

BOKS 3: PLASMAKOAGULASJONEN

- **Kaskadesystem:** forsterkningseffekter og kontrollpunkter
- **Pro-enzym-aktivering**
- **“Ikke-enzymene” (V, VIII):** kompleksdannelse/spesifisitetsbestemmelse for endopeptidasene
- **XII**, som kontaktaktiveres av kollagen/basalmembran/glass/blodplater, kan også aktivere andre kaskadesystemer (bradykinin- og plasmin-dannelse)
- **Positivt samvirke** mellom indre (“intrinsic”) og ytre (“extrinsic”) koagulasjonssystemer
- **K-vitamin-effekten:** γ -karboksylglutaminsyrer i II, VII, IX og X (til Ca²⁺-kompleksdannelse). Vit. K-antagonister: Warfarin, Marevan; rottegift
- **XIII:** Transamidase: peptidbinding mellom fibrinmonomerene
- **Blødersykdommene:** Hemofili A (VIII-mangel) og B (IX-mangel)



Figur 38: Oversikt over koagulasjonen



Figur 39. Noen anti-trombotiske endotelmekanismer. EDRF er NO^* og trolig også svovel-nitroso-forbindelser (f.eks. S-NO-glutathion).

BETENNELSE (INFLAMMASJON)

Betennelsen representerer et livsviktig forsvar mot infeksjoner, men kan for moderne mennesker ofte være sentral i en sykdomsmekanisme, som ved immun-sykdommer (for eksempel leddgikt eller astma), i et vev der blodtilførselen er stengt av (trombose eller embolisme) og til og med etter at tilførselen er kommet i gang igjen (reperfusjonsskader), og ved idrettsskader. Betennelsen er altså "et tveegget sverd".

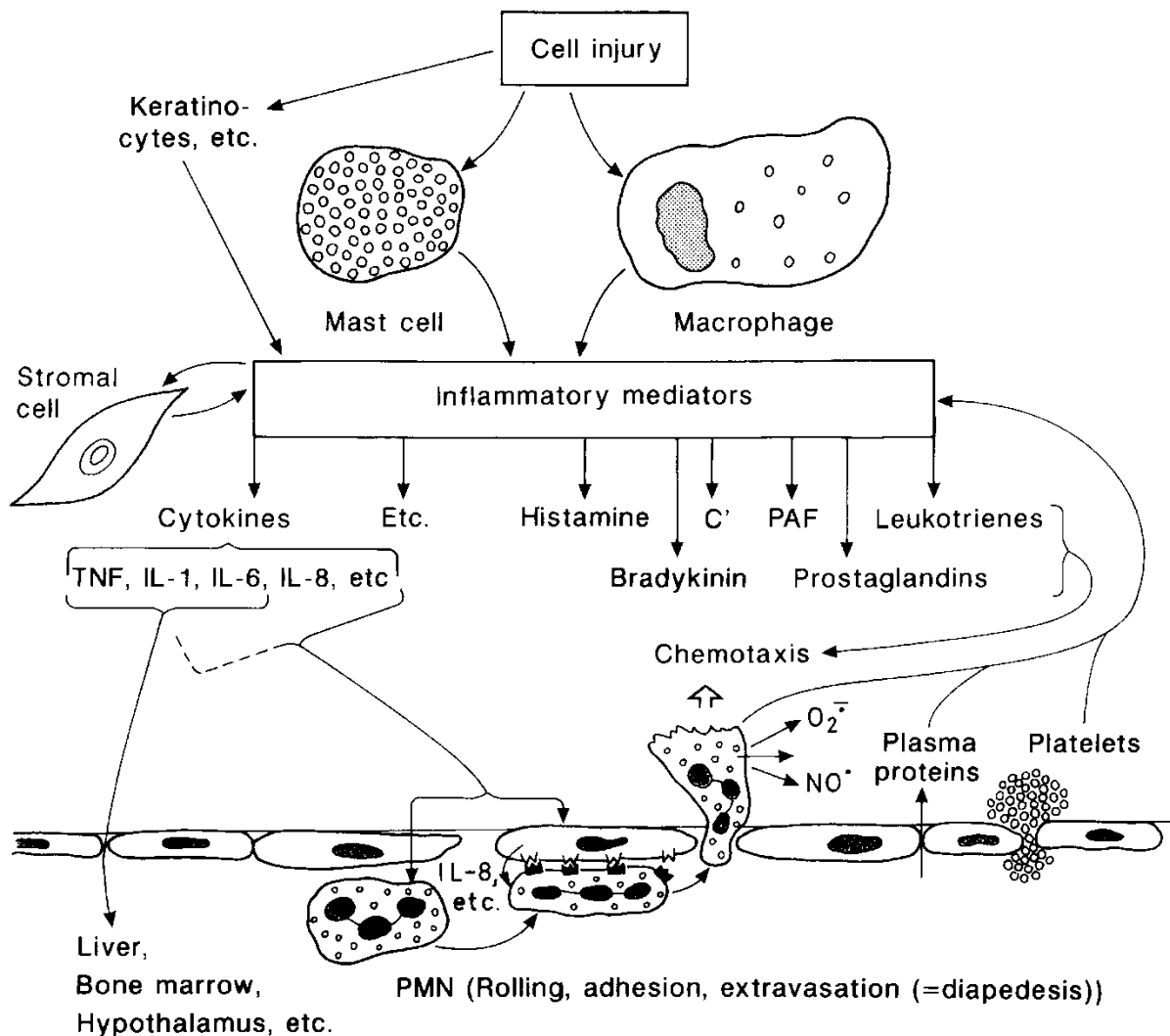
Betennelsesreaksjonen er organismens *lokale reaksjon på celledskade*. Skade skyldes ikke bare mikrober (dvs. infeksjon), men også mekanisk vold (f.eks. stumpt traume, snittsår), stråleenergi (f.eks. solforbrenning), kulde (frostskafer), varme (brannskafer), allergiske reaksjoner (f.eks. høysnue) eller nedsatt blodforsyning (f.eks. hjerteinfarkt).

Hovedtegnene på betennelse – de fleste ble beskrevet allerede av oldtidens leger – er *rubor* (rødhet), *calor* (varme), *dolor* (smerte), *tumor* (hevelse) og *functio laesa* (nedsatt funksjon). De første 4 tegnene er lette å forklare. De skyldes utvidelse av blodårene og væskelekkasje fra dem i det betente området, samt stimulering av smertefibre. Den nedsatte funksjonen i betent vev kan skyldes celledskaden eller reflektorisk immobilisering p.g.a. smerten.

Karreaksjonen fører til ansamling av både væske og plasmaproteiner i det skadete vevet og er dessuten viktig for leukocytttilstrømmingen. Leukocytter fra blodet ledes av *kjemotaksiner* til betennelsesstedet; de vandrer aktivt.

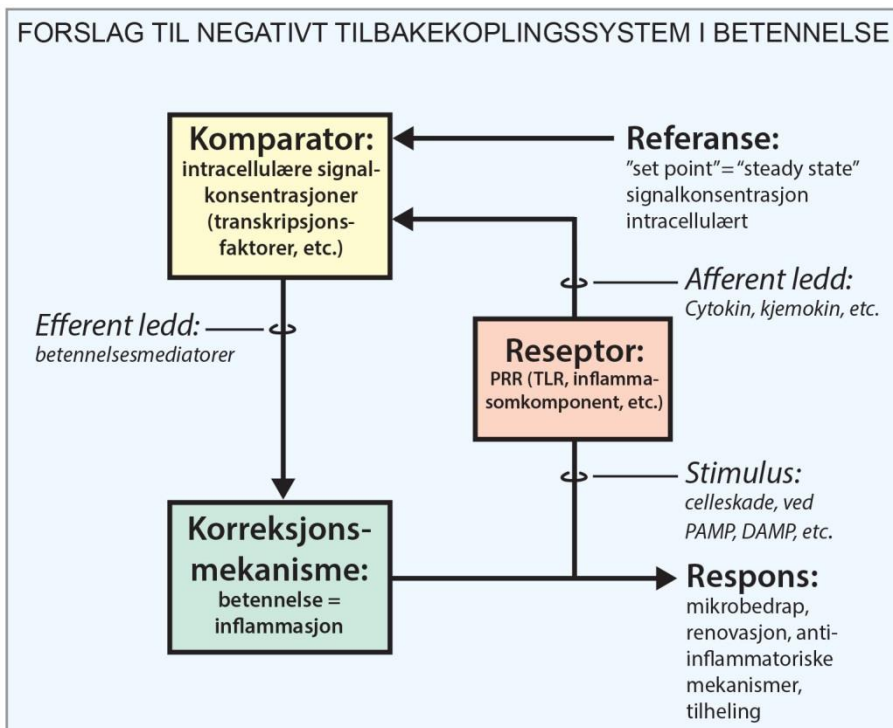
Karreaksjonene, utløsningen av aksjonspotensialer i smertefibre og leukocyttkjemotaksen skyldes stoffer som dannes eller frigjøres i betente vev, dvs. *betennelsesreaksjonens mediatorer*, "kommunikasjonsmolekyler" (figs. 40, 44, 47; tabell 6).

Mediatorene frigjøres fra stimulerte eller skadete *vevsceller*, f.eks. histamin fra mastceller og interleukin-1 makrofager, og dessuten fra *leukocytter* som beveger seg til skadestedet (f.eks. PAF, cytokiner og arakidonsyremetabolitter fra profesjonelle fagocytter og lymfocytter) (fig. 40). Eller de dannes fra forstadier blant *serumproteinene* som lekker ut i det betente vevet (f.eks. komplementfaktorer (fig. 47) og bradykinin (fig. 44).

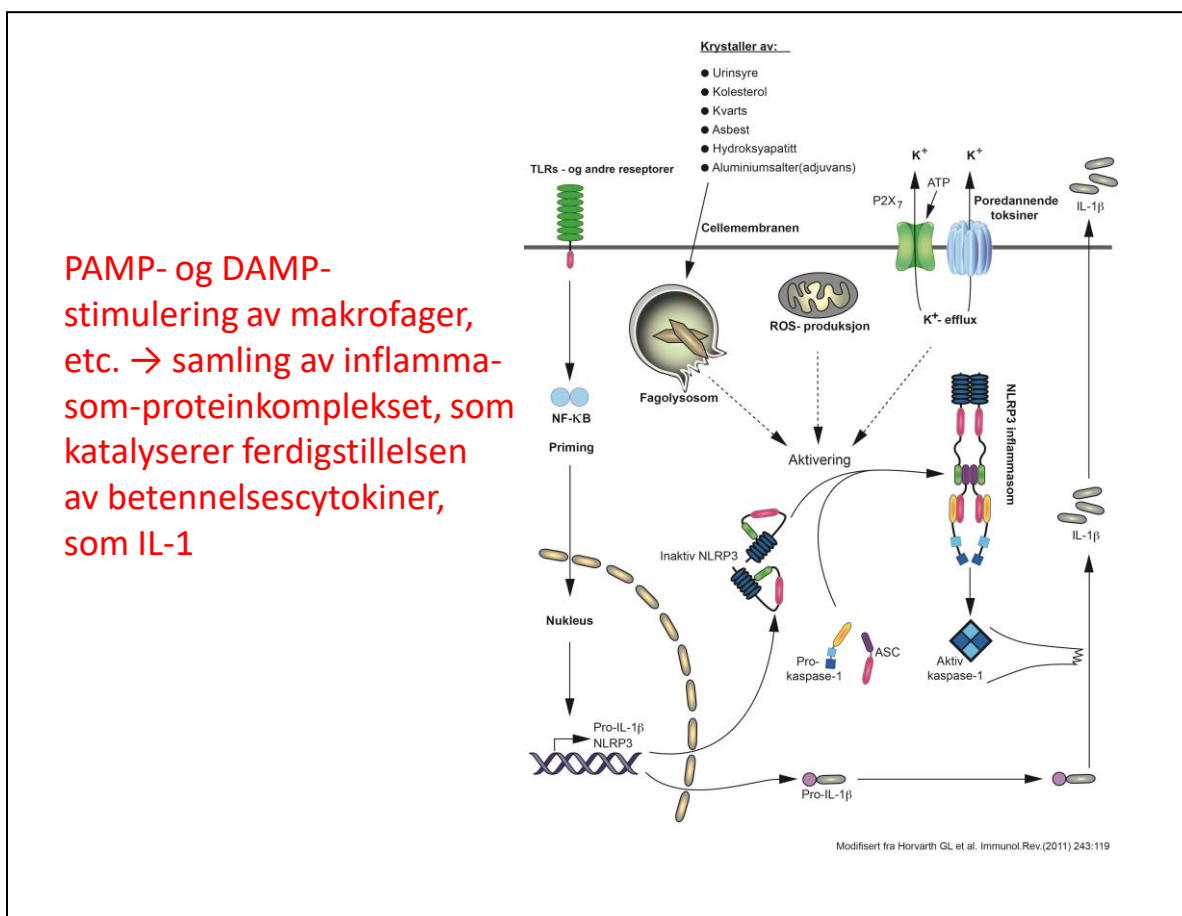


Figur 40. Aktører og mediatorer i akutt betennelse (inflammasjon)

Fysiologer er opptatt av mekanismer som sørger for likevekt (homeostase) i organismen, ved hjelp av tilbakekoplingsløyfer («feed-back»). Et «hjemmesnekret» forsøk på å se betennelses- og reparasjonsmekanismer i et slikt perspektiv – helt overordnet – er vist i fig. 41. Denne figuren kan kanskje tjene som et rammeverk for oversikten over detaljene som gis i de følgende sidene.



Figur 41. Slik synes organismen å gjenvinne likevekt (homeostase) ved celleskade

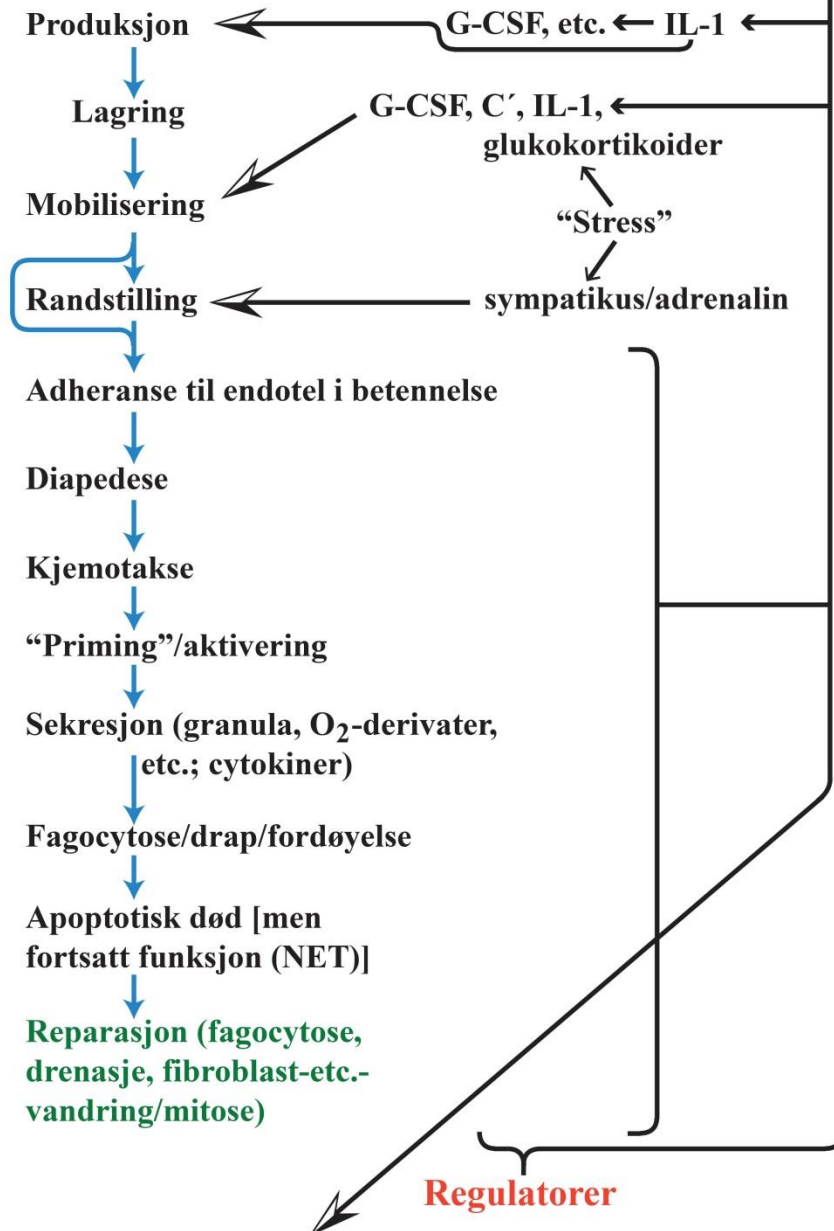


Figur 42. Skjematisert struktur og funksjon til to PRR-er («pattern recognition receptors»): en TLR og en komponent i et inflammasom. Også IL-18 dannes og via NF-κB aktiveres også genene for andre cytokiner og kjemokiner.

BETENNELSE

Skade → dannelse/sekresjon av betennelsesmediatorer
fra mastceller/dendritiske celler (DC)/makrofager/
plasmaproteiner/blodplater/keratinocytter, etc.

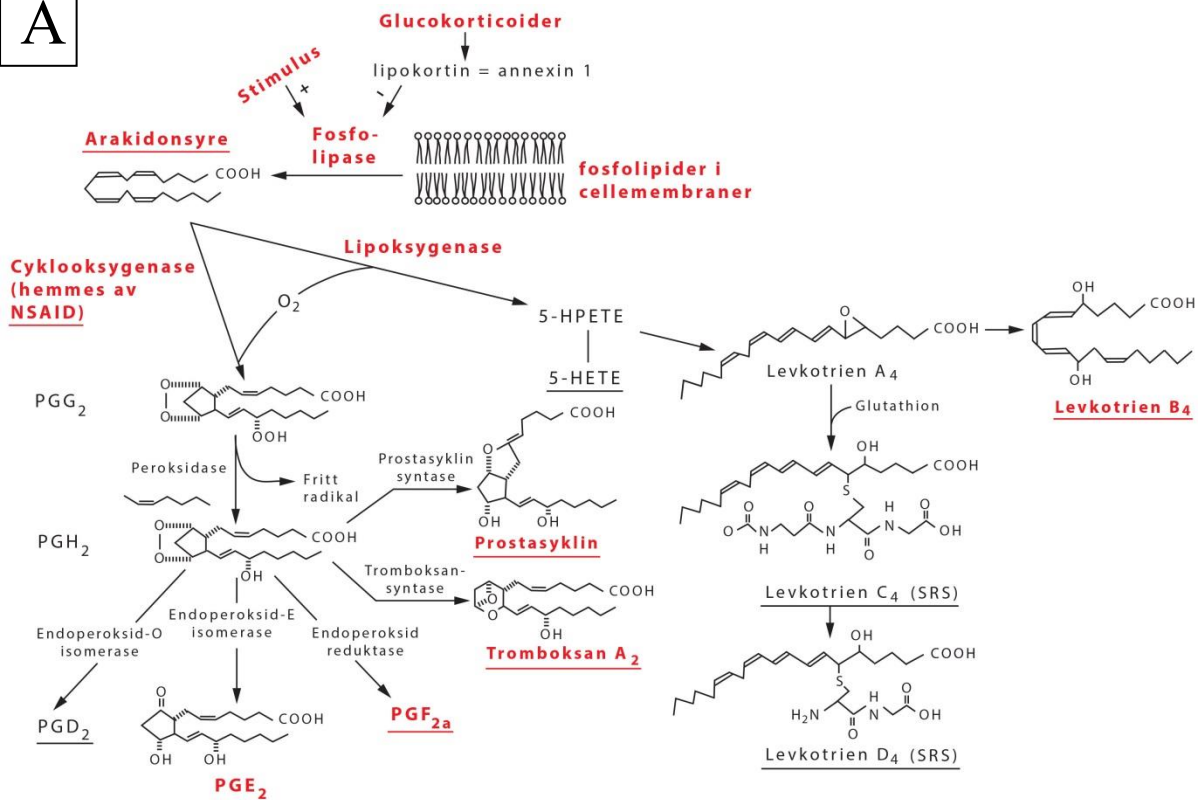
Nøytrofile granulocytter (PMN):



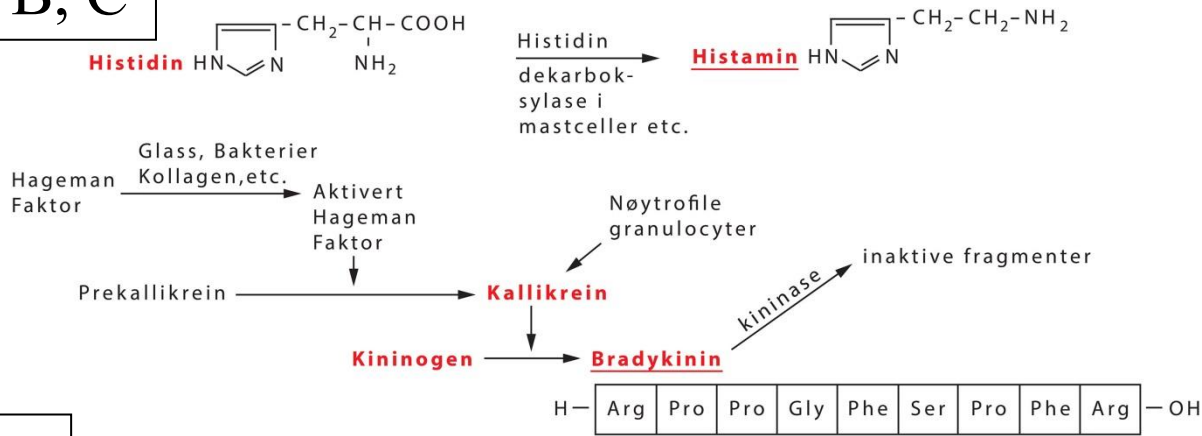
Systemreaksjoner: Feber, somnolens, anorexi, akutfaseproteiner (CRP, etc.; SR↑),
PMN-mobilisering, muskeltatabolisme

Figur 43. Trekk ved utviklingen av betennelse

A

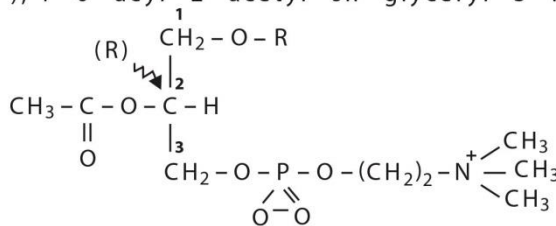


B, C



D

Mastceller, makrofager, nøytrofile granulocyter
 ↓
PAF ("Platelet activating factor"), 1 - O - acyl - 2 - acetyl - sn - glyceryl - 3 - fosforylcholin:



PAF: R = C₁₆H₃₅ or C₁₈H₃₇

- SRS = “slow reacting substances (of anaphylaxis)” = leukotrienene C og D, forbindelser mellom arakidonsyre-metabolitter og glutathion. Navnet skyldes den langsomme kontraktile respons de gir i glatt muskulatur in vitro. SRS utskilles blant annet fra mastceller og spiller sammen med histamin trolig en viktig rolle for utviklingen av astma-anfall; det finnes vanlig brukte legemidler mot dem.
- NSAID = Nonsteroidale anti-inflammatoriske «drug(s)», dvs. medikamenter som acetylsalisylsyre, diklofenak, ibuprofen, naproksen, etc.

Figur 44, A, B, C, D. Noen betennelsesmediatorer og hvordan de dannes

Betennelsesmediatorer og smertenervemekanismer

Sensoriske nervefibre (fig. 45, 46) og aktiverte blodplater (se ovenfor) kan også bidra med betennelsesmediatorer.

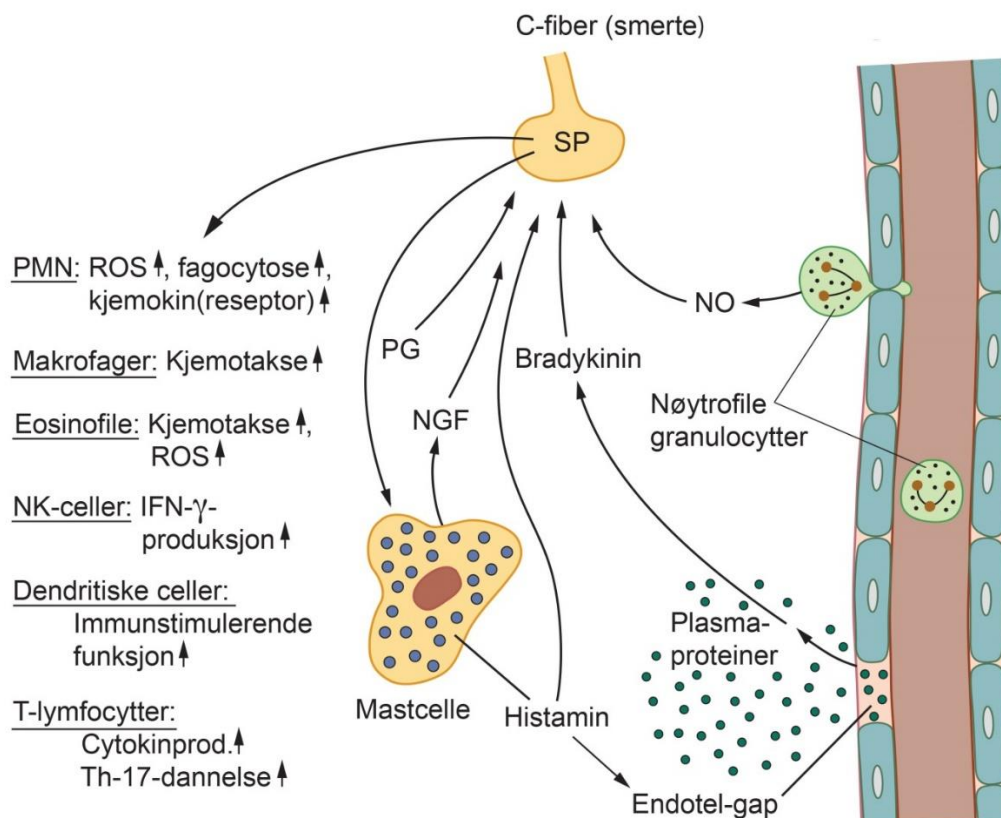
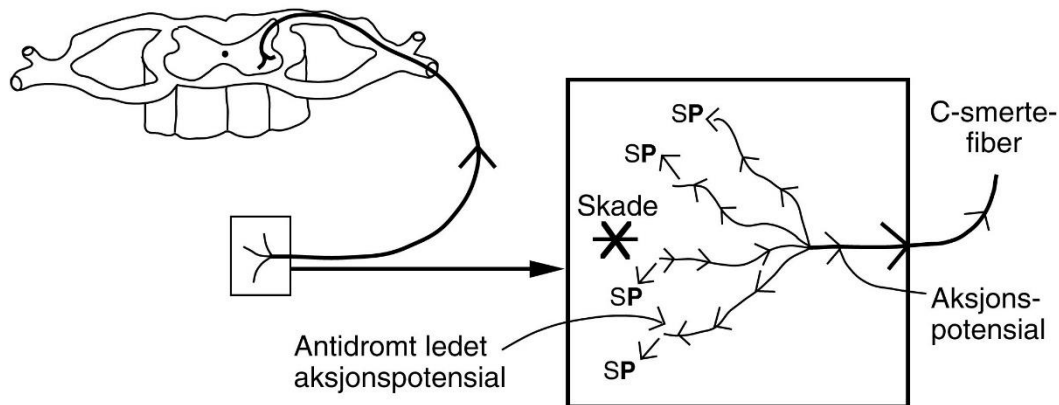


Fig. 45. Nervemekanismer ved betennelse. SP = Substans P; NGF = ”Nerve growth factor”; NO = nitrogenoksid; PG = prostanoider. Smerteseptorer, nociceptorer, finnes også for PAMP/DAMP, nemlig PRR (som TLR og fMLP). Smertefibrene kan seinere eksponere opioidreseptorer, som ved stimulering fra parakrine endorfiner reduserer smerten.



Figur 46. Aksonrefleksen. Dessuten på **ryggmargsnivå: Kronisk smerte** kan moduleres av parakrine sekreter (cytokiner; DAMP; etc.) fra gliaceller (mikroglia: mest hos ♂?), makrofager eller T-lymfocytter (mest hos ♀?) i ryggmargen – og av nedstigende nervebaner. Eventuelt oppstår **hypersensitivitet** (for smerteimpulsene) eller **allodyni** (smerte ved trykk, f.eks.).

Smerte kan skyldes bl.a. histamin, bradykinin, ATP, arakidonsyremetabolitter og betennelsescytokiner (Tabell 6). Stimuleringen av smertenervefibrene på skadestedet initierer aksjonspotensialer som via minst tre nervecelleetapper føres til flere deler av hjernebarken, slik at både skadested og skadens lidelsesaspekt blir bevisste. Men det er også perifert en antidrom (= «motløps») ledning av aksjonspotensial (*aksonrefleksen*), som kan føre til at utskillelse av peptidet substans P (SP) skjer ikke bare på skadestedet, men også i periferien av det skadete området (fig. 46). SP kan blant annet stimulere mastceller til histaminsekresjon (fig. 45).

SP kan også stimulere makrofager til å utskille cytokiner, som kan få nerveender til å uttrykke opioid-reseptorer. Når så immunceller også kan produsere opioider (endorfiner; enkefalin), reduseres smerten. Det finnes flere negative tilbakemeldingsmekanismer i betennelsesreaksjonen, som bare er delvis kjente, som til sammen får betennelsen til å gi seg (Boks 5; figs. 41, 51, 52, 53, 54). Mekanismene har vært intenst utforsket de siste årene og kan muligens tjene som utgangspunkt for produksjon av nye betennelsesdempende legemidler.

«Betennelsesreaksjonen dissekert»

Den første økningen av *karpermeabiliteten* sees fortrinnsvis i små venyler, inntreffer i løpet av få minutter etter skaden og varer ca. 1/2 time. Den kan bl.a. skyldes histamin fra mastceller, som finnes i alle løse bindevev. En forsinket fase med økt permeabilitet begynner etter omtrent en time og kan ofte vare i flere døgn. Denne fasen skyldes muligens bradykinin, arakidonsyremetabolitter, PAF, etc. Komplementsystemet (C3a, C5a; fig. 47) og cytokiner (IL-1, tumor nekrose-faktor, etc.) har også virkninger på små kar.

Leukocytansamlingen i betent vev starter med at cellene ruller over endotelet, stopper og adhererer (se tidligere). Så følger diapedesen og vandringen mot skadestedet. Kjemotakse-

egenskapen er påvist *in vitro* for nøytrofile og eosinofile granulocytter, lymfocytter, monocytter og makrofager, fibroblaster og endotelceller.

Der det er en bakteriell infeksjon, tiltrekkes leukocytterne kjemotaktisk bl.a. av spesielle peptider fra bakteriene, f.eks. fMLP (den frie aminogruppen i metionin er via amidbinding knyttet til maursyre – typisk for bakteriepeptider). Granulocytterne vil selv kunne skille ut både kjemotaksiner og stoffer som øker karpermeabiliteten, altså til å begynne med en selvforsterkende mekanisme (positiv tilbakemelding).

Granulocytterne dominerer gjerne over de mononukleære fagocytterne i begynnelsen, da det er et «mobiliseringslager» av dem i beinmargen, flere granulocytter enn monocytter i blodet, og granulocytterne vandrer litt hurtigere. Siden overtar de mer langlivede *makrofagene og lymfocytterne, dersom betennelsen blir kronisk.*

Fibroblaster, som kan være viktige for den endelige reparasjonen av vevsskader (fig. 57, 58, 59), tiltrekkes kjemotaktisk bl.a. av kollagenfragmenter. Deres mitoseaktivitet og kollagenproduksjon synes å styres av *cytokiner (fibroblastvekstfaktorer, transformerende vekstfaktor (TGF-β), etc.)* som bl.a. utskilles av makrofager.

Også i vev der det foregår *immunreaksjoner*, vil leukocytter gjerne samle seg, p.g.a. lokal cytokinsekresjon, oppregulering av endotelcellers adhesjonsproteiner/reseptorer og aktivering av komplement-systemet som medfører kjemotaksindannelse (fig. 47).

I *lymfeknutene* øker blodstrømmen – og dermed lymfocyttesirkulasjonstrafikken – under immunreaksjoner.

I områder med *ikke-mikrobiell vevsskade* (hjerteinfarkt, solforbrenning, knusningsskade, etc.) vil vi også få en betennelsesreaksjon med leukocyttsamling. Kjemotaksinene som er nødvendige for denne reaksjonen, skriver seg fra skadesignaler av DAMP-type (fig. 42) og kanskje også bl.a. fra komplementsystemet (som trolig aktiveres uspesifikt, f.eks. av frigjorte lysosomale enzymer eller binding av C-reaktivt protein (CRP) til skadete celler) eller fra koagulasjonskaskadene. C3a, fibrinogenfragmenter, etc. har kjemotaktisk virkning.

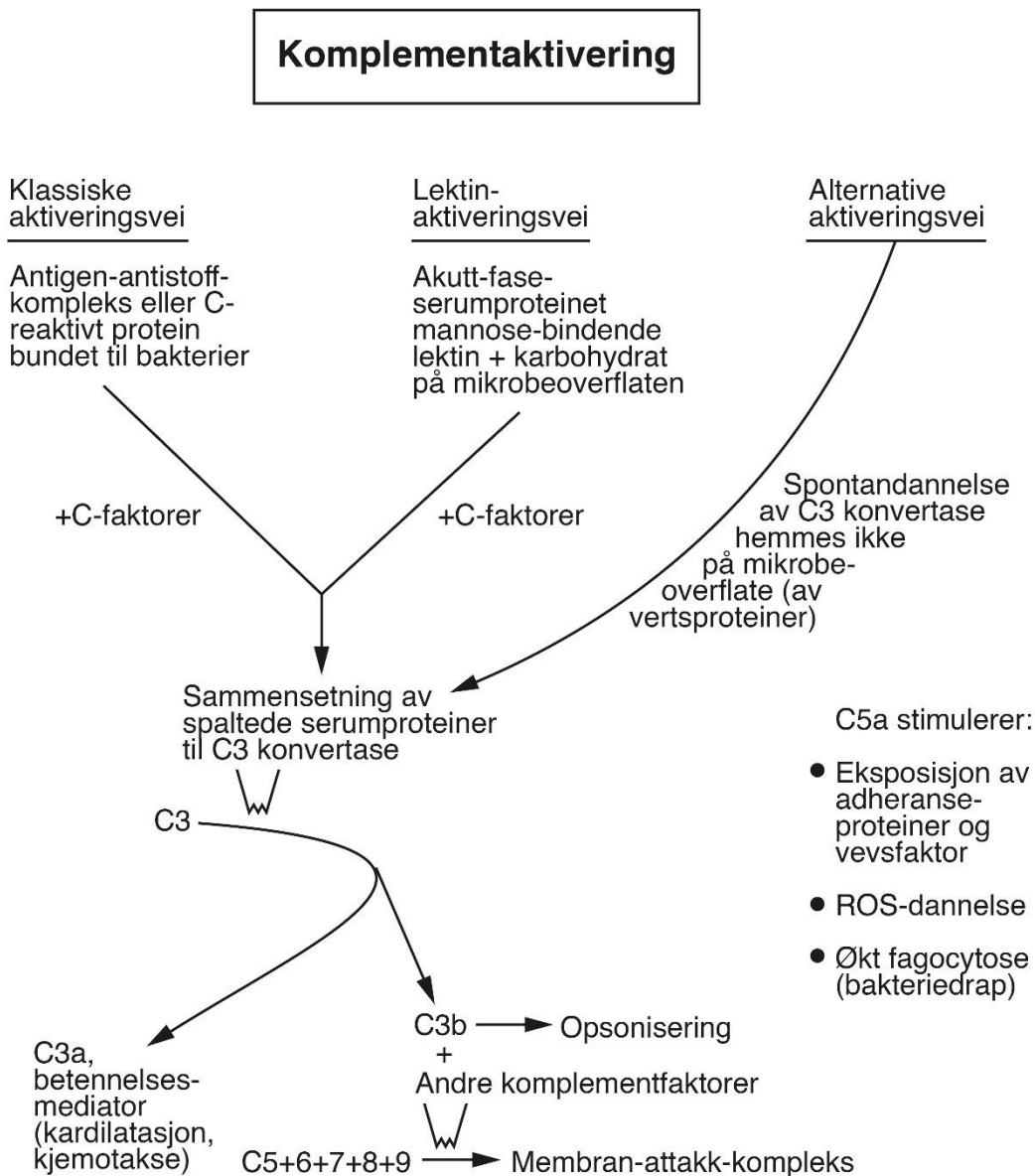
Kjemotaksiner av formylmetionyl-peptid-type (se ovenfor) kan frigjøres fra mitokondrier i skadede celler (fig. 19, 25, 42). Mitokondriene stammer jo sannsynligvis fra bakterier som har inngått symbiose med eukaryote celler. Disse peptidene er altså både PAMP og DAMP.

Hensikten med betennelsesreaksjonen, som fører til opphopning av væske, proteiner og leukocytter i skadet vev, er åpenbar når det gjelder infeksjoner og muligens svulster:

Leukocytterne: Fagocytterne spiser, dreper og fordøyer mikroben. Det spesifikke (adaptive) immunsystemets reaksjoner er også viktige i denne forbindelse (jf. IgG som opsonin, = "pålegg på maten" for fagocytterne). Makrofager og T-lymfocytter samarbeider om mikrobedrap når det gjelder "vanskelige" mikrober som kan leve i makrofagens cytoplasma, slike som tuberkelbasiller (se tidligere; fig.26). T-lymfocytter, NK-celler og makrofager kan drepe virusinfiserte celler og kanskje svulstceller, ved intim kontakt med målcellen og uten fagocytose (se seinere). Disse cellene overviner virusinfeksjoner i samarbeid med interferon (som hemmer virusmultiplikasjon i celler og aktiverer NK-celler og makrofager) og antistoff (som hemmer virus-tilheftning til "vertsceller" og opsoniserer dem for fagocytose og nedbrytning).

Proteiner av antistoff-type (IgG) og proteiner innen komplementsystemet (C3b) er opsoniner for både granulocytterne og makrofagene, som har membranreseptorer for disse opsoninene (fig. 19, 25). Aktivering av koagulasjonen fører til fibrindannelse, som bl.a. danner «vegg» i en pusschule (dvs. hemmer mikrobespredning). Puss er oftest en blanding av døde leukocytter, vevsceller, mikrober og vevsvæske. Plasmaproteiner er også – som nevnt – viktige for dannelsen av en del betennelsesmediatorer.

Væsken i vevet øker lymfestrømmen fra området. Antigenpresenterende celler med mikrobekomponenter kan føres med lymfestrømmen til lokale lymfeknuter, der cellene frembyr de antigene peptidene for lymfocytter som stadig sirkulerer til og resirkulerer gjennom perifert lymfatisk vev, og vi får startet en immunreaksjon (se tidligere).



Figur 47: Aktiveringsmåter for og virkninger av komplementsystemet

Tabell 6: ALLE BETENNELSES-MEDIATORENE PÅVIRKER IKKE ALLE SIDENE VED EN BETENNELSE

	Kar-dilatasjon	Kar-lekkasje	Smerte	PMN-kjemotakse	Degranulering	ROS-produk.
Histamin	+	+	+			
Kallikrein/ Bradykinin	+	+	+	+		
Syklooksygenase- omdannet arakidon- syre (PGE ₂ , etc.)	+	+	+	+?		
Lipoksygenase- omdannet arakidon- syre (LT-C,D,E)		+				
— ” — (LTB)				+	+	(+)
PAF			+	+	+	+
fMLP (bakteriepeptid) + andre mikrobe- komponenter			+	+	+	+
C3a/C5a (evt. via histaminfrigjøring)	+	+		+	(+)	+
Cytokiner/kjemokiner (IL-8 = CXCL8, etc.)	+	+	+	+	+	+
Opsoniserte "partikler" (C3b, IgG)					+	+
ATP			+			

Flere faktorer bidrar til *betennelsesødemet*: blodtrykket i kapillærene i det betente vevet er økt pga. den lokale arteriole-utvidelsen. Spaltene mellom endotelcellene tillater som nevnt plasmaproteiner å komme ut i vevet. Dermed reduseres den proteinosmotiske ("kolloidosmotiske") gradienten mellom blod og interstitiell vevsvæske. Dessuten synes det normalt negative (dvs. subatmosfæriske) væsketrykket i interstitiet å bli ytterligere redusert. Dette øker trykkfallet fra blodkarene til vevet og øker væskestrømmen ut til vevet.

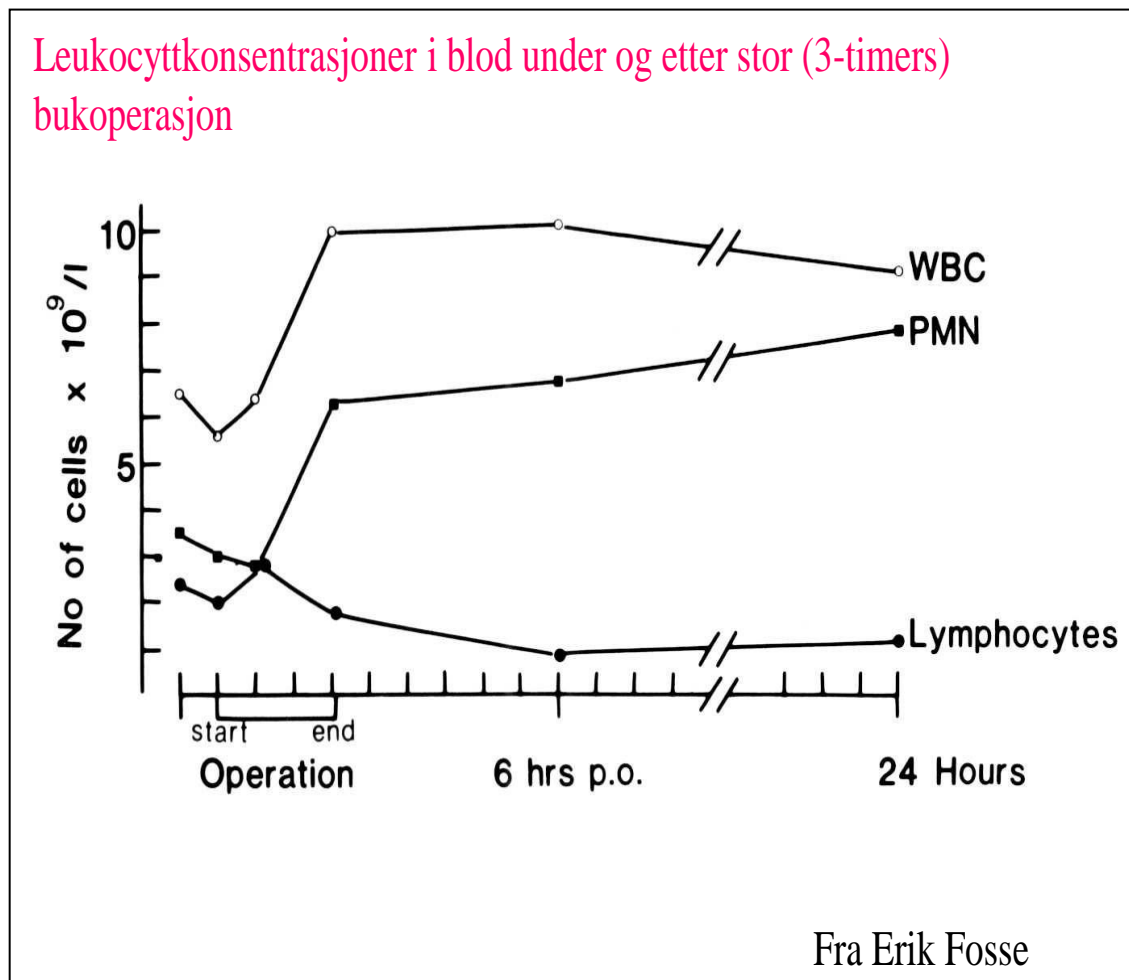
Man mener undertrykket i vevene er en resultatant av to krefter: (1) En komprimerende kraft fra fibroblaster som ved hjelp av integriner i cellemembranen henger fast i et nettverk av kollagenfibre og trekker i dette nettet; (2) en ekspanderende kraft fra "oppkveilet" hyaluronan (et glykosaminoglykan) i grunnsubstansen (som sammentrykkete fjærer som vil utvide seg). Ved betennelse mener man så at noen av fibroblastenes festepunkter løsner, fordi integriner eksponeres i mindre grad etter cytokin- og prostaglandin-påvirkning av disse cellene, og bindevevskontraksjonskraften avtar dermed.

Betennelsesreaksjonen kan også være ledsaget av **allmennsymptomer**, som feber (fig. 49), hodepine, søvnighet, nedsatt matlyst, muskelverk, etc., hvis den er kraftig nok. Det ser ut som om cytokinet interleukin-1 (IL-1) kan være ansvarlig for flere av disse fenomenene (evt. sammen med IL-6 og TNF). IL-1, som utskilles bl.a. fra makrofager, har diverse virkninger (figs. 20, 33, 34, 40, 43, 49). Det kan bidra til å aktivere T-hjelpeceller. Viktigere synes dets systemiske ("fjern-") virkninger å være: IL-1 har pyrogenvirkning (pyr = brann, ild; gennan = produsere, skape; dvs. gir feber). Det synes å påvirke ikke bare temperaturreguleringssentrene i hypothalamus, men også bl.a. sentre som styrer ACTH-utskillelsen fra hypofysen. Økt IL-1 fører til økt ACTH, som fører til økt kortisolsekresjon,

som igjen ved høye kortisolkonsentrasjoner gir immundepresjon, altså en negativ tilbakemelding til betennelsesstedet. IL-1 synes videre å gi proteinkatabolisme i muskelvev og forandringer i leverens proteinsekresjon, sammen med andre cytokiner, som IL-6 (fig. 50).

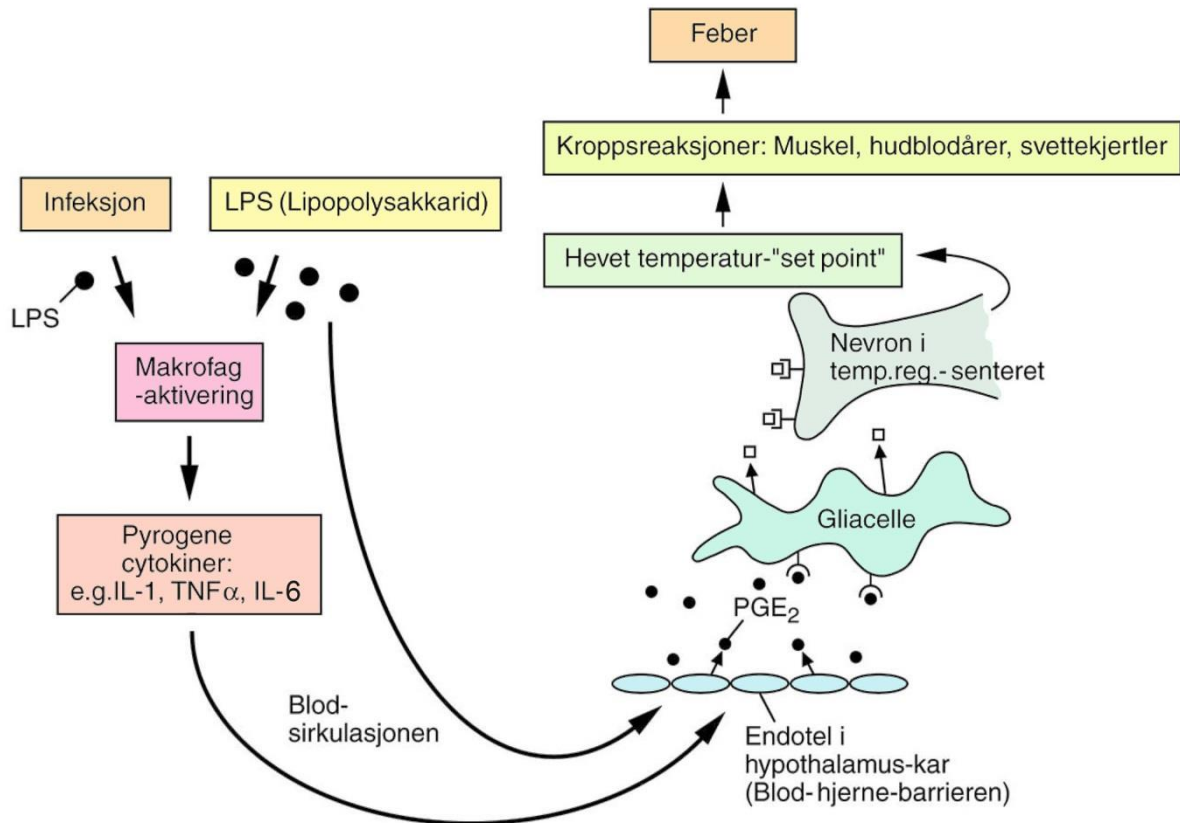
De endringene i plasmaproteinkonsentrasjoner som følger av leverpåvirkningen, kalles "akutfase-reaksjonen" eller "aktiv prosess". Endringene kan ses på som ledd i skadeforebyggende eller reparative prosesser. Proteinene kan kvantifiseres i laboratoriet og være til hjelp for diagnosen av diffuse betennelsestilstander. Blant akutfaseproteinene er C-reaktivt protein (CRP, fig. 47, 50) og fibrinogen. CRP er spesielt, fordi det finnes en hurtiganalysemetode for det, som fastleger bruker som et hjelpemiddel til å sannsynliggjøre at en betennelse skyldes bakterier (verdier over 100 mg/L). C-reaktivt protein bindes bl.a. til forandrede cellemembraner og aktiverer komplement-systemet (fig. 47). Dermed kan det opsonisere. Økt fibrinogenkonsentrasjon kan bidra til bedre avgrensning av bakterielle infeksjoner ("walling off"), med en fibrinbarriere. Flere forandringer i akutfaseproteinkonsentrasjonene bidrar til SR, senkningsreaksjonen (dvs. røde blodcellers sedimenteringshastighet). Men fibrinogenforandringene er viktigst.

Dessuten er von Willebrandfaktor, komplementsystemets C3 og faktor B, ceruloplasmin (koppertransportprotein) og anti-proteaser blant akutfaseproteinene.

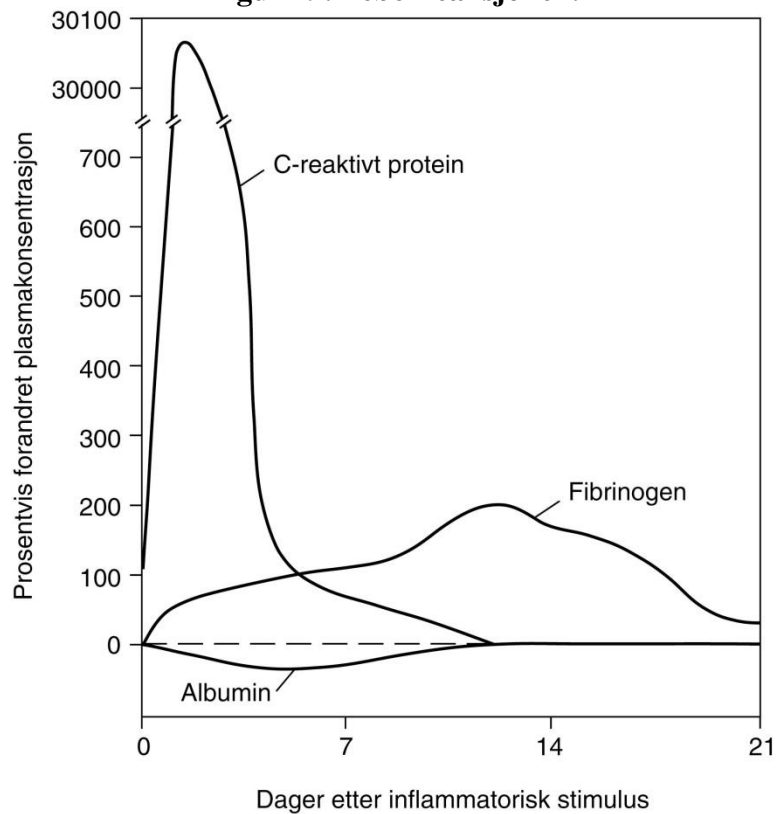


Figur 48. Leukocyttkonsentrasjoner i blod under og etter store, sterile betennelser

Feberreaksjonen



Figur 49. Feberreaksjonen.



Figur 50: Systemreaksjon på betennelse fra leveren: litt av akutfase-reaksjonen

Boks 4. Betennelse som sykdomsmekanisme – noen eksempler

- **Idrettsskader ("ICE")**
- **Leddgikt**
- **Hjerteinfarkt**
- **Arteriosklerose**
- **Astma**
- **Emfysem**
- **Reperfusjonsskader**
- **Fettvev →metabolsk syndrom**

Betennelsesreaksjonen ved ikke-infeksiøse skader

Makrofagene – og til en viss grad kanskje også granulocytene – kan spille en gunstig rolle ved at de hjelper til med nedbrytningen av drepte celler, fibrin, etc. Men i dyreforsøk kan man i noen modeller vise at sårtilheling går raskere om leukocyttilstrømningen uteblir.

Både granulocytene og makrofagene kan selv gi betydelig vevsskade (Boks 4). I en del situasjoner forsøker vi derfor å dempe betennelsesreaksjoner, uten at dette tilsynelatende har ugunstige virkninger. Det gjelder f.eks. immunbetingete leddbetennelser (kronisk polyartritt, etc.), dessuten *idrettsskader*, som behandles med avkjøling, kompresjon og hevet stilling: *ICE* ("ice + compression + elevation") av den skadete lemsdel – evt. *PRICE*, der P og R står for "Protection" og "Rest".

I en del tilfelle av betennelse kan det også være riktig å gi pasienten f.eks. acetylsalicylsyre (eller andre syklooksigenase-hemmere, NSAIDs) eller kortisol (glukokortikoider), som dermed bl.a. bremser dannelsen av henholdsvis prostanoide og prostanoide pluss leukotriener, etc. (fig. 54). (Men husk at *alle* medikamenter kan ha bivirkninger!)

Til og med utbredelsen av et hjerteinfarkt og omfanget av vevsskade i diverse organer etter gjenopprettelse av sirkulasjonen etter avstengning ("reperfusion injury") økes trolig av tilstrømmende granulocytter. Man har forsøkt å redusere celledøden ved å motvirke de vevsskadelige oksygen-derivatene som stimulerer granulocytter skiller ut. Man har da bl. a. brukt diverse nedbrytende enzymer - som superoksid dismutase og katalase, som er vist i fig. 55 - og "radical scavengers" (antioksidanter som vitaminene C og E, karotener og selen). Hittil har ikke disse behandlingsforsøkene vært spesielt vellykkede.

En oppsummering og oversikt over diverse uspesifikke og spesifikke immunmekanismer er gitt i Boks 6. De uspesifikke mekanismene settes først inn mot en infeksjon – oftest klarer de å overvinne infeksjonen alene; de har også en viktig funksjon ved å stimulere den spesifikke (adaptive) og langsommere immunitetsutviklingen (jf. stimuleringen v.h.j.a. antigenpresenterende celler (APC)).

Betennelsesreaksjonens avbrytermekanismer

Det finnes en mengde mer eller mindre kjente naturlige **antagonister** til de fleste inflammatoriske mediatorer (se Boks 5, men også om **kortisol**, figs. 53, 54). Uten motfaktorene ville trolig mange av reaksjonene (betennelsesreaksjonen, koagulasjonen, kjemotaksen, etc.) løpe løpsk. F.eks. finnes **enzym**er i normale vev som inaktiverer histamin og bradykinin (Boks 5), og det finnes **serumproteiner** som motvirker komplement-faktorer. Antagonister til mange slags proteolytiske enzymer er til stede i serum og i vevene. Det finnes også **hemmende cytokiner**, som IL-10 og IL-1-reseptor-antagonist (IL-1-ra). Interleukin-6 kan også spille en slik rolle – det er et cytokin som kan ha både pro- og anti-inflammatoriske virkninger.

Pro-opiomelanokortin-proteinet (POMC) syntetiseres bl.a. i hypofysen og i leukocytter. Det kan spaltes og modifiseres post-translasjonelt til diverse **melanokortin-peptider**, bl. a. ACTH, melanocyt-stimulerende hormoner (MSH) og endorfin. Stimuli til makrofager og endotel i et betennelsesområde, i form av endotoksin og visse cytokiner, fører til dannelsen av melanokortin-peptider (spesielt α -MSH). Via auto- og parakrin virkning hemmer de translukasjonen av transkripsjonsfaktoren **NF- κ B** til cellekjernen og ”slår av” mange gener som styrer betennelsesfenomener (Boks 5; samme mekanisme som i fig. 52).

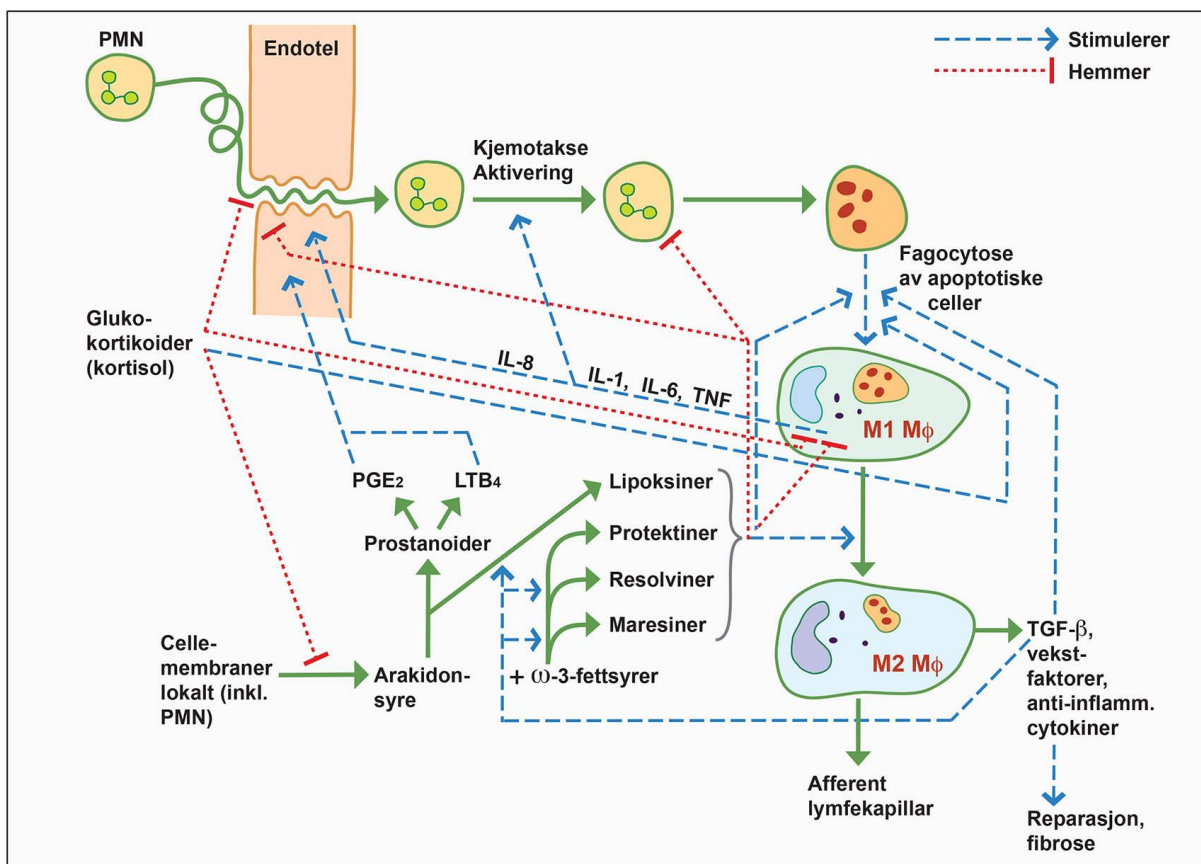
En gruppe anti-inflammatoriske mediatorer dannes fra arakidonsyre, eikosapentaensyre (EPA) og dokosaheksaensyre (DHA) – de to sistnevnte er polyumettede omega-3-fettsyrer som bl.a. finnes i feit fisk og tran, og som man tror har mange gunstige virkninger i organismen (mot trombose, for eksempel). Disse tre fettsyrene kan gi opphav til **lipoksiner, resolviner, maresiner og protektiner** som i nanomolare konsentrasjoner kan dempe betennelsesreaksjoner. De hemmer granulocyt-tilstrømning og andre betennelsesfenomener bl.a. ved å hemme produksjonen av betennelsescytokiner (inklusive kjemokiner) og øke produksjonen av det anti-inflammatoriske **TGF- β** . De er selvfølgelig gjenstand for stor oppmerksomhet som mulige utgangspunkt for dannelsen av nye anti-inflammatoriske medikamenter (fig. 51).

Nervesystemet kan også være med på hemningen av betennelsesreaksjoner, via parasympatikus og i visse situasjoner også sympatikus (fig. 52).

Den viktigste "avbrytningsmekanisme" for betennelsesreaksjonen er likevel trolig **eliminering** av det skadelige stimulus, f.eks. fagocytose og nedbrytning av bakterier.

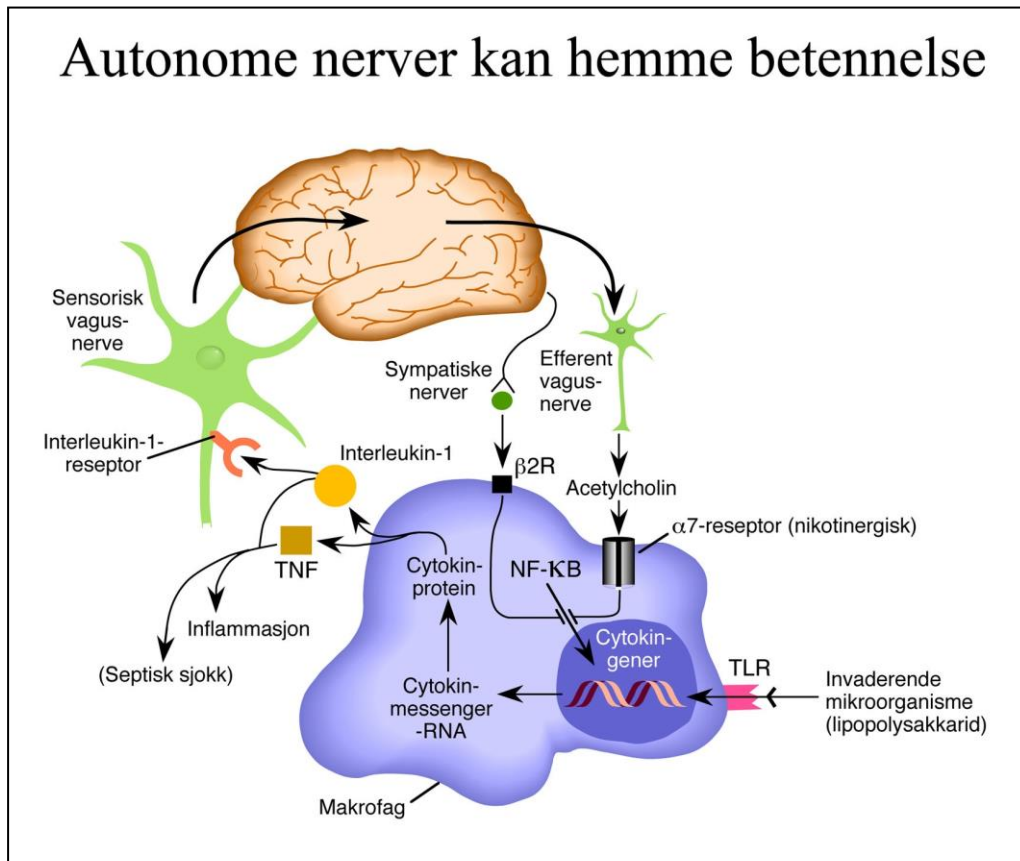
Boks 5: Noen anti-inflammatoriske mekanismer

- Eliminasjon av årsaken (nedbryting av dødt vev og mikrober)
- Histaminase, kininaser, anti-proteaser, anti-C', etc.
- Parasympatikus
- Sympatikus
- Melanokortin-peptider (ACTH, α -MSH; begge avspaltet fra pro-opiomelanocortin)
- Glukokortikoider
- IL-10, IL-6 (\rightarrow IL-1-reseptorantagonist), løselige TNF-reseptorer, etc.
- Lipoksiner, resolviner, protektiner, maresiner (arakidonsyre- og ω -3-fettsyrederivater)
- Galektin-1
- T_{reg} -celler
- Tryptofan \rightarrow kynureniner, som bl.a. via APC/M Φ \rightarrow T_{reg}
- Etc.

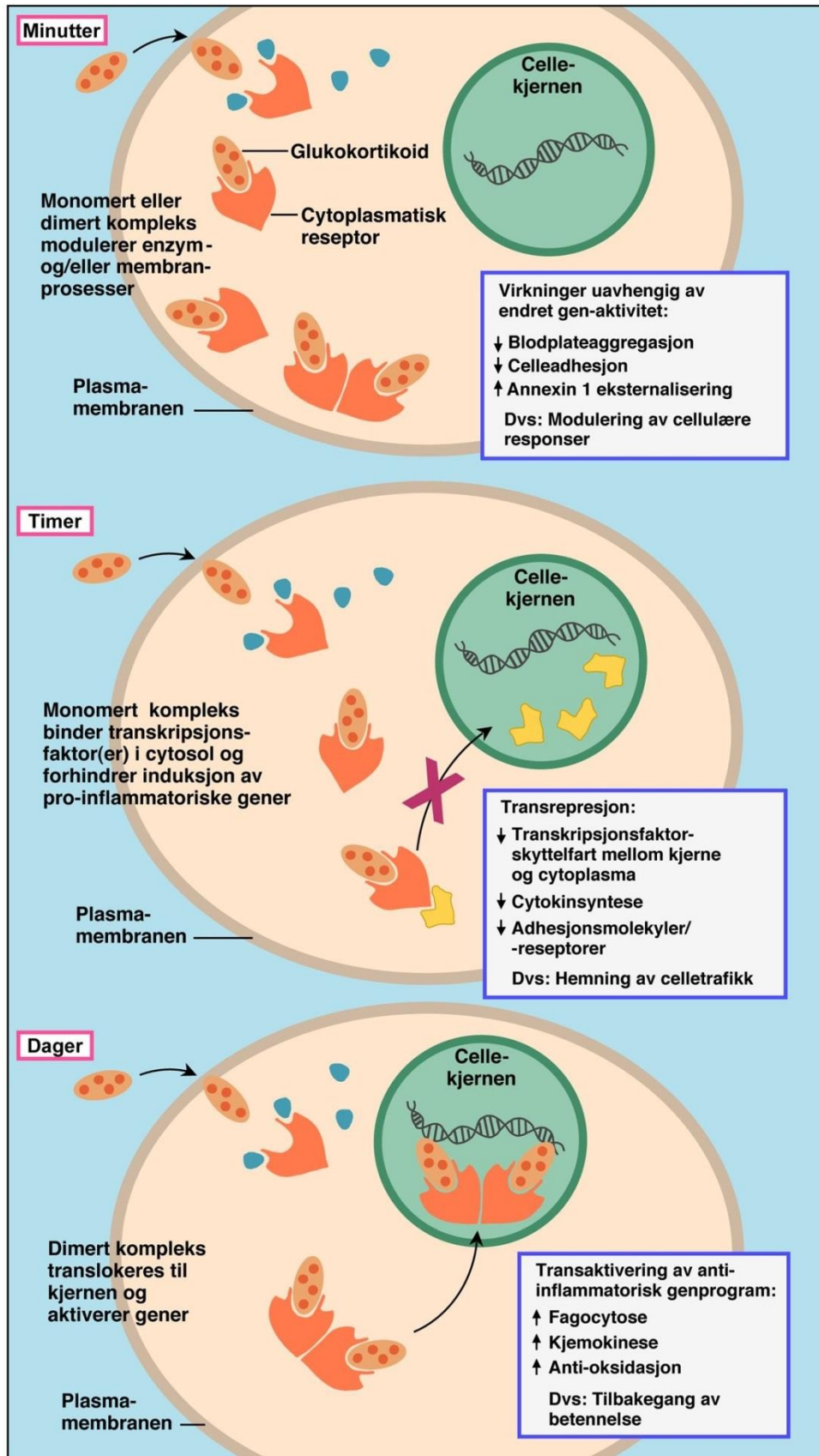


Figur 51. Noen betenneshemmende mekanismer

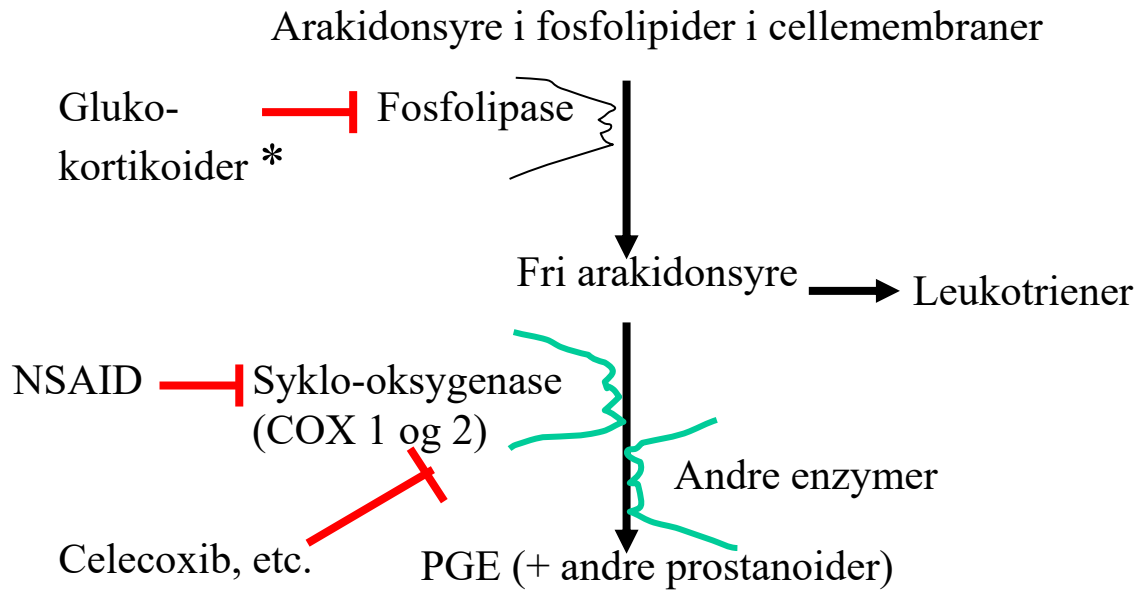
Autonome nerver kan hemme betennelse



Figur 52. Autonome nerver og betennelse



Figur 53. Glukokortikoidenes virkningsmekanismer



*: via lipokortin = annexin 1, som dessuten kan hemme PMN-adhesjon og -kjemotakse, etc., via en lipoksinreseptor. Samme reseptor stimuleres av lipoksiner, hvis syntese startes bl. a. av acetylsalicyl-acetylt COX 2. Se også figs. 37 og 51.

Figur 54. Medikamentell betennelseshemming.

Boks 6. Immunmekanismer

	Uspesifikk immunitet	Spesifikk (erhvervet) immunitet
Humoral immunitet	Aktivert komplement -system (lysis, kjemotakse, opsonisering). Interferoner (hemmet virus-multiplikasjon). Lysozym; laktoferrin; antimikrobielle kationiske peptider (defensiner, etc.) (til nedbrytning av bakterie-cellevegger, veksthemning, lysis av mikrober, etc.).	Antistoffer (nøytralisering, opsonisering, komplement-aktivering)
Celleformidlet immunitet	Nøytrofile (og eosinofile) granulocytter og makrofager (fagocytose, mikrobedrap). NK-celler (lysis av tumorceller, etc.).	B-celler (antistoff-dannelse). T-celler (cellekontakt → lysis av virus-infiserte og andre "fremmede" celler; cytokin-produksjon; B-celle-hjelp). NK-celler + antistoff

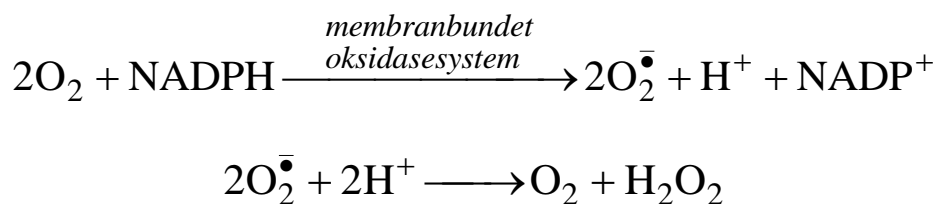
Mikrobe- og celledrapsmekanismer

Drapsmekanismene er mangfoldige og fascinerende! En av dem etterapes i kloreringen av drikkevann, en annen er brukt til bleking av hår, en tredje er viktig også for hudbarrièren – og noen av de aktive stoffene dannes hele tiden i cellevann som biprodukt av metabolismen eller pga kosmisk og UV-stråling. Disse sistnevnte radikalene kan skade DNA og andre cellekomponenter og kan kanskje være én årsak til aldring og kreft.

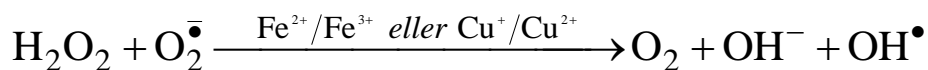
Profesjonelle fagocytter (nøytrofile granulocytter og makrofager – noen tar også med eosinofile granulocytter) kan drepe celler som er fagocyttert, men også celler i fagocytters omgivelser. Mange mekanismer synes å eksistere, og man kjenner dem ikke til bunns. Heller ikke vet man sikkert hvilke som er viktigst. Det ser ut som om fagocytterne har "overdrapskapasitet", slik at én defekt mekanisme ikke alltid gir seg utslag i alvorlig sykdom.

Drapsmekanismene kan klassifiseres i oksygen-/radikal-avhengige og oksygen-uavhengige. De førstnevnte beror på dannelsen av en rekke meget reaktive molekyler, som først og fremst oppstår ved delvis (dvs. ett-elektron-) reduksjon av oksygen. Slike molekyler dannes også i cellevann med oppløst oksygen når celler treffes av *ioniserende stråling* (f.eks. røntgenstråling) og er én årsak til at slik stråling er skadelig.

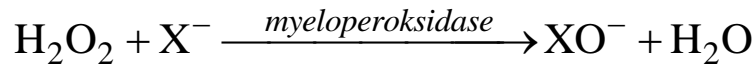
Når fagocytt-membranen stimuleres, f.eks. av høye konsentrasjoner av kjemotaksiner eller ved møte med opsoniserte mikrober, kan man registrere et sterkt økt opptak av O₂ ("the respiratory burst"). Det økte O₂-opptaket inngår imidlertid ikke i oksidativ fosforylering og brukes ikke til å skaffe energi til fagocytosen. Det meste går til dannelsen av *superoksid* (O₂^{•-}) (figs. 55, 56). Man har målt at 80% av superoksidet kan omdannes videre til *hydrogenperoksid* (H₂O₂):



Videre kan det dannes ytterligere høy-reaktive oksygenforbindelser (ROS= reactive oxygen species = ROI= reactive oxygen intermediates) med utgangspunkt i superoksid og hydrogenperoksid (spesielt *hydroksylradikalet* OH[•] angis å ha en sterkt celle- og mikrobedrepende virkning). ROS finnes i fagolysosomene, men utskilles også ekstracellulært (fig. 56).

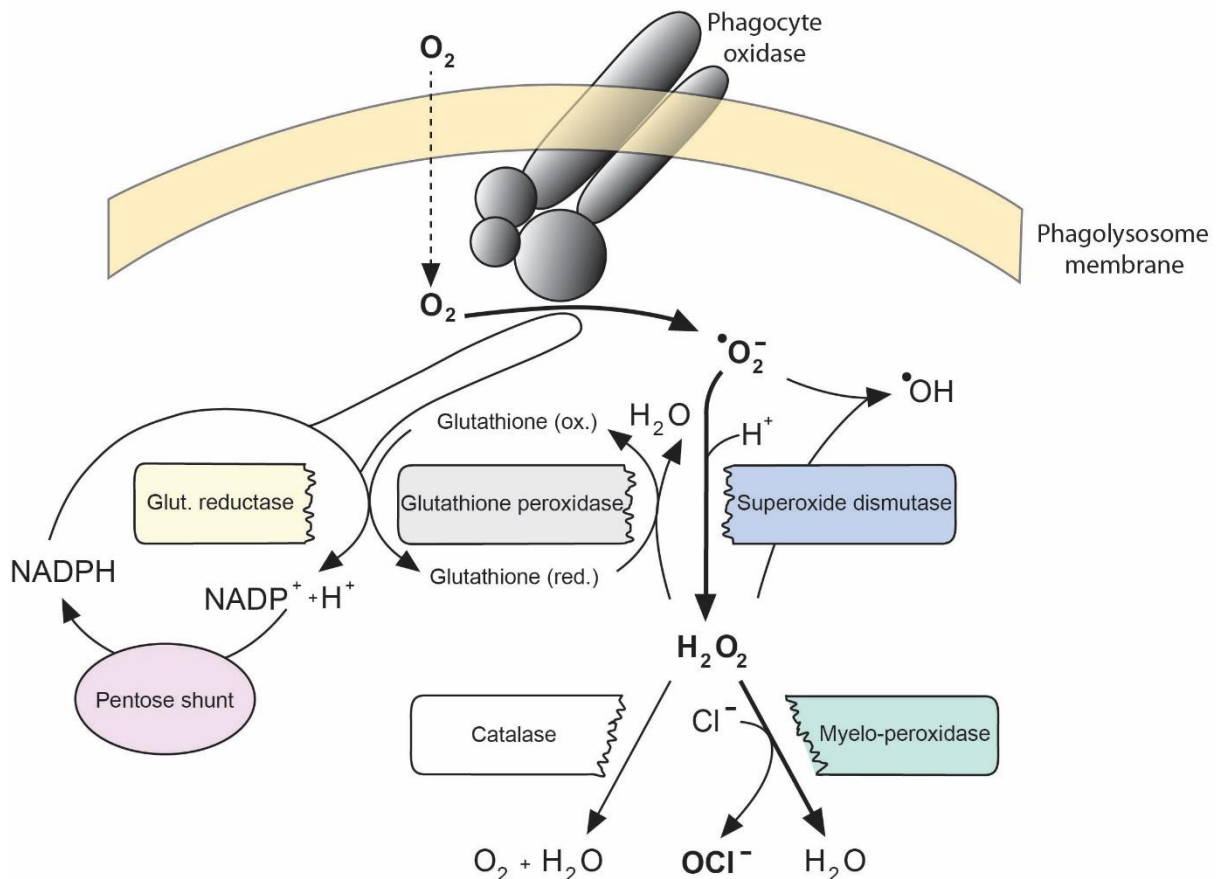


Den bakteriedrepende virkning av H₂O₂ forøkes meget av *myeloperoksidase*, som er til stede i nøytrofile granulocytter, men ikke eller nesten ikke i makrofager:



hvor X er Cl^- , Br^- eller I^- ; under fysiologiske forhold er Cl^- trolig mest aktuelt (og hypokloritt-anion dannes).

ROS generation in neutrophilic granulocytes



Figur 55. Dannelse av aktiverte oksygen-derivater (ROS)

De videre bakteriedrepende reaksjoner er usikre; hypoklorsyre (HOCl) kan bl.a. føre til dannelse av kloraminer, som er giftige for bakterier og kan skade våre egne cellemembraner: $\text{R-NH}_2 + \text{HOCl} \rightarrow \text{R-NHCl} + \text{H}_2\text{O}$.

Hypokloritt-ionet kan også reagere med H_2O_2 og danne det meget ustabile og reaktive singlet oksygen: $\text{OCl}^- + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O} + {}^1\text{O}_2$ (singlet). De kritiske reaksjoner er forøvrig kanskje de samme som de bakteriedrepende reaksjoner i *klorert drikkevann*, der også hypoklorsyre dannes.

Reaktive oksygen-derivater kan angivelig ved tilstedeværelse av antistoff danne ozon (O_3), som også er høy-reaktivt.

En annen type reaktivt radikal, som trolig kan skade mikrober på samme måte som de reaktive oksygen-forbindelsene nevnt ovenfor, er *nitrogen(mon)oksid*. Stimulerte makrofager

og nøytrofile granulocytter kan skille ut NO[•]. Nitrogen-oxid-syntase-enzymet er induserbart i disse to cellypene. Prosessen kan hemmes av glukokortikoider (kortisol, etc.).

Nitrogenoksid kan sammen med superoksid danne det høy-reaktive peroksynitritt (ONOO⁻).

Vi har også en del ikke-oksygen-avhengige drapsmekanismer. *Lysozym* (et småmolekylært enzym) dannes av granulocytter, mononukleære fagocytter, tårekjertler, etc. – og oppdaget av Alexander Fleming, før han fant penicillinet. Det oppløser noen bakteriers cellevegg alene, og mange andre bakterietypers cellevegg i samarbeid med *komplementsystemet* (fig. 47). P.g.a. høyt osmotisk trykk i bakteriecellene vil deretter cellemembranen bryte og bakteriene dø. Den *lave pH* i fagolysosomene hemmer eller dreper bakterier. *Hydrolasene* dreper også en del mikrobetyper og fordøyer dessuten allerede drepte mikrober.

En interessant hypotese for **aldring** går ut på at reaktive oksygenintermediater, som dannes bl.a. p.g.a. bakgrunnsstråling (se ovenfor), skader DNA, proteiner og cellemembraner ved oksidasjon. DNA kan også skades direkte av diverse typer stråling, bl.a. solens UV-stråler. Akkumulasjon av slik skade skulle da kunne ligge bak de kjente aldringsprosessene (svinn av bindevev og celler, opphopning av fettnekbrytningsprodukter (lipofuscin) i celler), evt. **kreftutvikling**. Forkortning av kromosomenes **telomerer** ved hver celledeling kan også ligge til grunn for aldring, ved at f. eks. stamceller eller fibroblaster med alderen mister evnen til videre celledelinger. Men slik celledelingsbegrensning kan også tenkes å nedsette risikoen for diverse kreftformer.

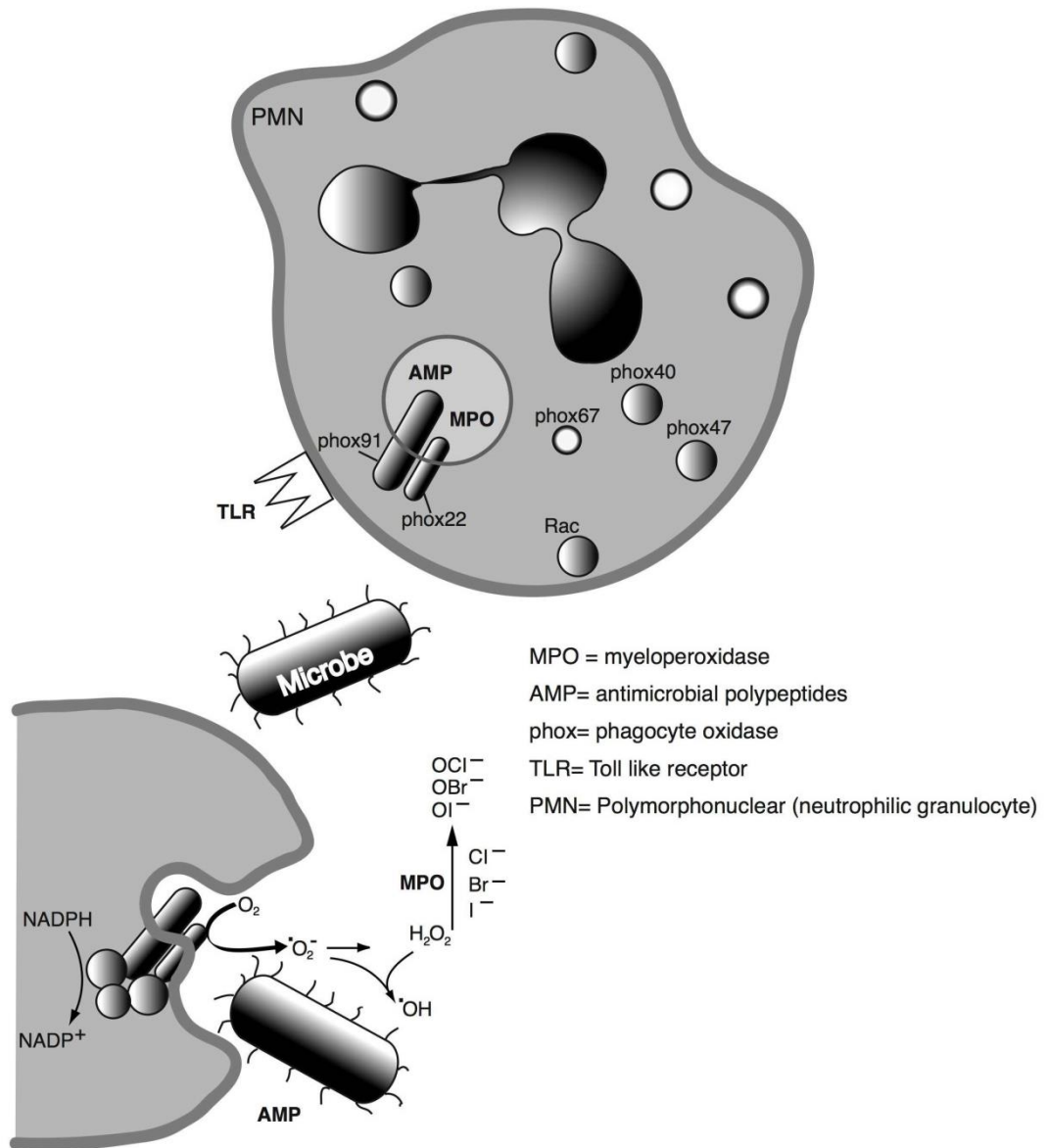
I nøytrofile granulocytter, men ikke i makrofager, har man funnet spesielle kationiske peptider, de best kjente kalt **defensiner og katelicidiner**, og dessuten proteinet **laktoferrin**. Alle kan drepe mikrober, henholdsvis ved å danne porer i – eller på andre måter forstyrre strukturen i – ytre cellemembran og ved å binde jern, som bakterier trenger for å kunne formere seg.

Jern i laktoferrin synes dessuten å kunne katalysere dannelsen av det mikrobe-toksiske hydroksyl-radikalet (se ovenfor). Det er i tillegg beskrevet en rekke andre proteiner og peptider i granulocytene, som motvirker mikrobene v.hj.a. lysis (poredannelse), binding og inaktivering av endotoksin (LPS), eller ukjente mekanismer.

Man kjenner i hvert fall to mekanismer for hvordan ikke-fagocytter (*T-celler, NK-celler*) dreper sine målceller. Man vet at utøvercellene må være levende og at intim cellekontakt er nødvendig. Den ene mekanismen settes i gang ved at **FasL** (Fas-ligand; ”fibroblast associated”) i drapscellens cellemembran binder seg til målcellens Fas (reseptor; CD95). Dette fører til intracellulære signaler som aktiverer caspaser (”cystein protease with **aspartic-acid specificity**”) og dermed en apoptoseprosess.

I den andre mekanismen skiller T- og NK- cellene ut **perforiner**, som plasserer seg i målcellens membran og danner porer i den. Via disse porene passerer **granzym** og **granulolysin** inn i målcellens cytoplasma. Disse proteinene kan drepe intracellulære mikrober og sette i gang apoptose i målcellen. Perforinmekanismen kan muligens i seg selv føre til målcellens lysis. Den minner jo om komplementmekanismen. *De finale komplementkomponenter, membranattakkomplekset*, ødelegger celler ved at de har delvis hydrofob karakter, så de kan plassere seg i cellemembranen og danne ”porer”. ”Porene” tillater ukontrollert diffusjon av små molekyler, og dette kan føre til cellens død ved osmotisk lysis.

Endelig kan visse cytokiner (TNF- α , f. eks.) sette i gang en selvmordsprosess i målcellen, via sine spesifikke membranreseptorer.



Figur 56. Noen av PMNs drapsmekanismer – de kan også «lekke ut av cellen»

En oversikt over de viktigste celle- og mikrobe-drapsmekanismene er gitt i Boks 7.

Boks 7. Celle- og mikrobedrap

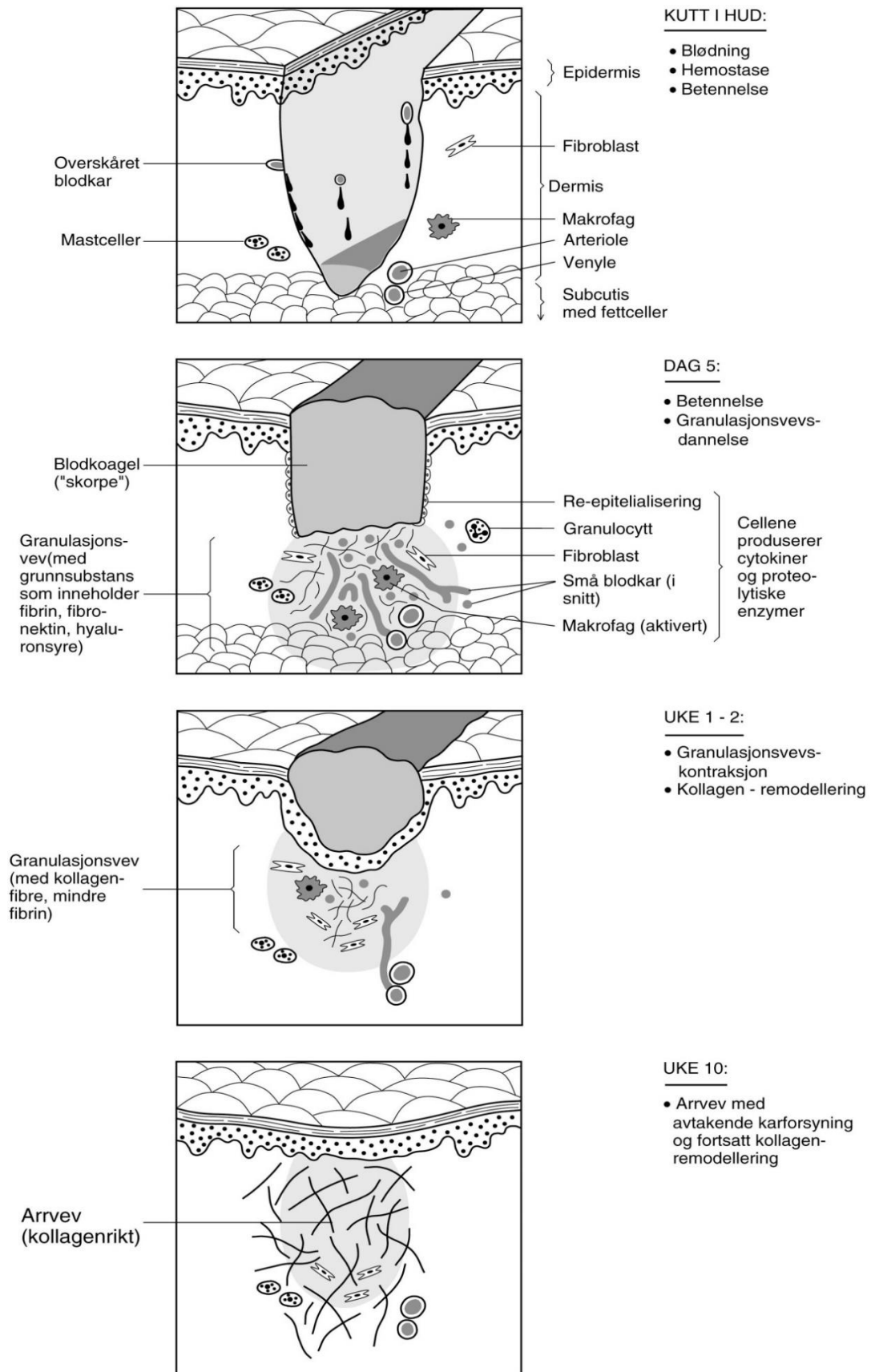
Fagocytter		
Mekanisme	Reaksjon	Stikkord
"Aktivert oksygen"	$O_2 \rightarrow O_2^-$	Superoksid
	$O_2^- + H^+ \rightarrow H_2O_2$	Hydrogenperoksid
	$Cl^- + H_2O_2 \rightarrow ClO^-$	Hypokloritt
"Aktivert nitrogen"	arginin $\rightarrow NO^\bullet$	Nitrogenoksid
O ₂ -uavhengige	Lysozym-katalyserte hull i bakteriecelleveg	Osmotisk lysis
	Laktoferrin	Binder Fe ⁺⁺⁺ , etc.
	Hydrolaser	Spalter (fordøyer) proteiner, KH, etc.
	Defensiner, katelicidiner og andre peptider	Porer og osmotisk lysis; inaktiverer LPS; etc.
	Sur pH i endocytosevakuoler	Hemmer mikrobevekst
	PMN-trogoptose («membran-jafsing»)	Dreper Ab-opsoniserte kreftceller
Lymfoide celler (immunceller)		
Mekanisme	Reaksjon	Stikkord
T- og NK-celle-kontakt	Perforiner/granzymmer + granulolysin; FasL-signal til membranreseptor	Apoptose
Humorale mekanismer, T- og NK-celler	Cytotoksiske cytokiner	Apoptose
	Hemmende cytokiner	<ul style="list-style-type: none"> • Virus: interferoner • Cellevekst og differensiering: diverse interleukiner
Humorale mekanismer, B-celler	Antistoffer	+ komplement: celledød (lysis)
		+ NK-celler (K-celler), makrofager, etc.: celledød

Tilheling etter vevsødeleggelse

Etter sårdannelse i huden (fig. 57) og etter celledød i indre organer vil organismen forsøke å reparere skaden. Dersom vevets "arkitektur" (struktur) er beholdt, kan stamceller danne nye, modne celler til erstatning for de døde. Dette skjer i vev som stadig fornyes ved celledelinger (epidermis, tarmepitel, kjertler, etc.), men i mindre grad i vev med "permanente" celler, men som også har sine stamceller (skjelettmuskelcellenes satellittceller, nervestamceller). Riktignok kan "permanente celler" hypertrofiere, men vevsdefekter utfylles her og ellers når vevsstrukturen (dvs. bindevevs"stilaset", inklusive basalmembranene) er brutt, helst av arrvev. Dannelsen av arrvev generelt er illustrert i fig. 57.

Figur 57.
En rekke
cytokiner er
med på å
regulere
celle
-vandring,
-deling,
blodkar-
nydannelse
(angio-
genese) og
syntesen av
intercellu-
lærsubstans
(kollagene
fibre;
grunn-
substansens
hyaluron-
syre og
proteo-
glykaner).

Eksempler
 på
 regulerende
 cytokiner er
 EGF
 (Epidermal
 vekstfaktor),
 FGF
 (Fibroblast-
 vekstfaktor),
 PDGF
 (Plate-
 derivert
 vekstfaktor),
 VEGF
 (Vaskulær
 endotelial
 vekstfaktor)
 og TGF- β
 (Trans-
 formerende
 vekstfaktor).



KUTT I HUD:

- Blødning
- Hemostase
- Betennelse

DAG 5:

- Betennelse
- Granulasjonsvevs-dannelse

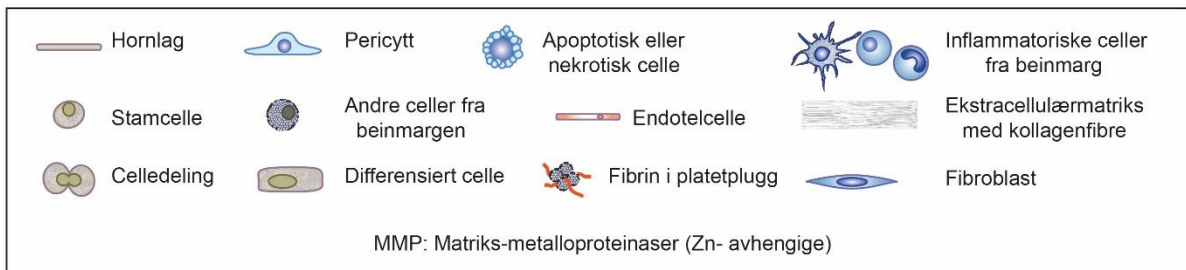
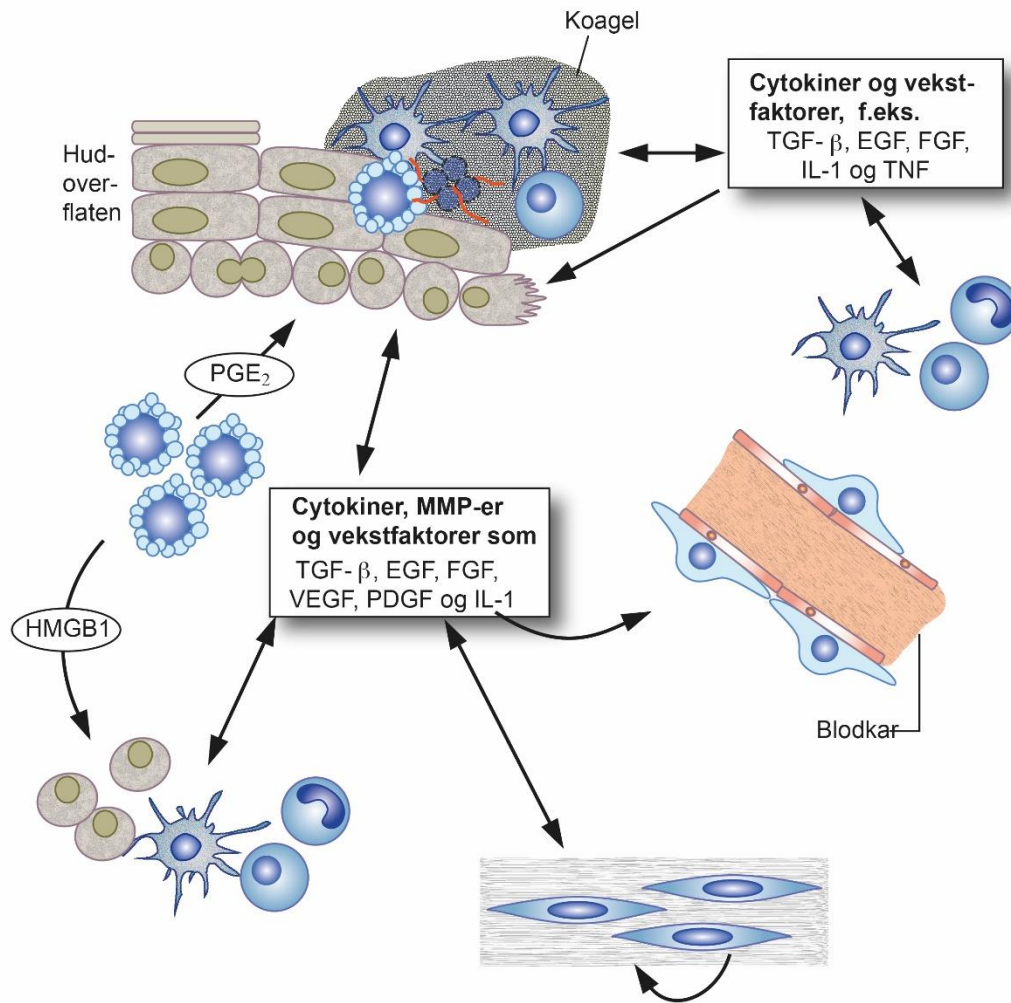
UKE 1 - 2:

- Granulasjonsvevs-kontraksjon
- Kollagen - remodellering

UKE 10:

- Arrvev med avtakende karforsyning og fortsatt kollagenremodellering

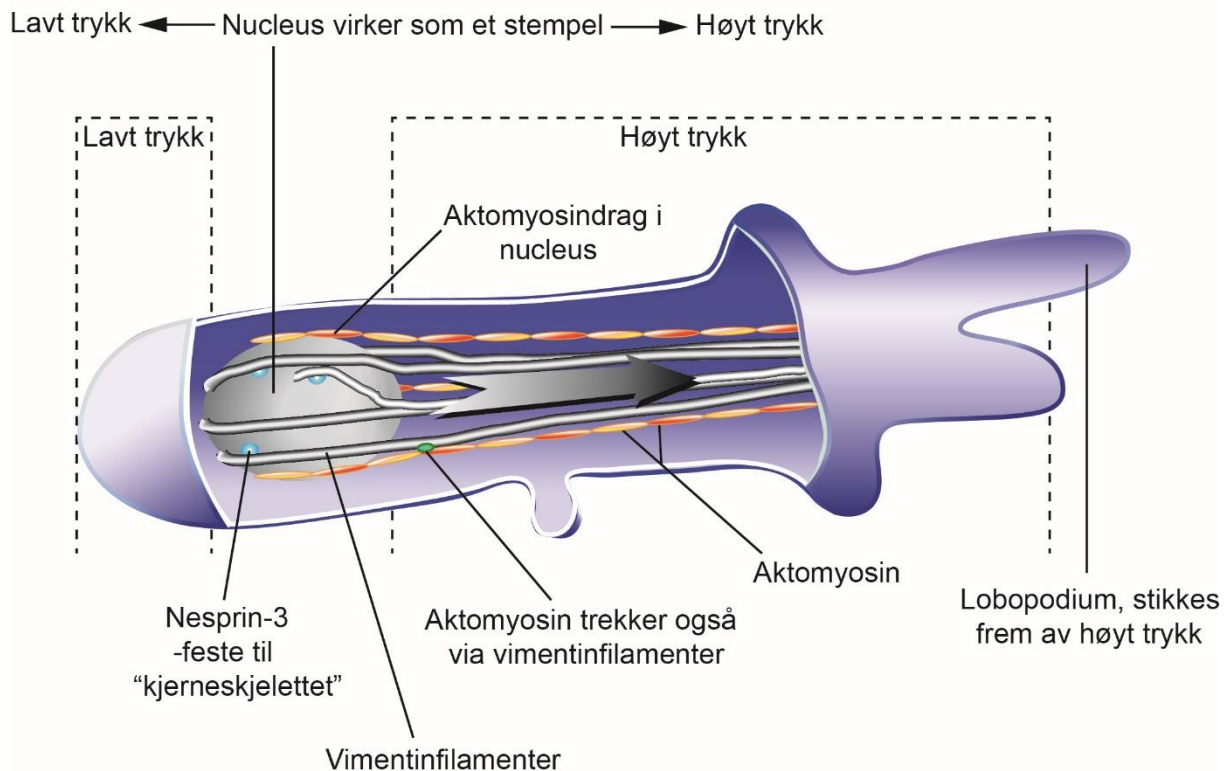
Sårtilheling



HMGB 1, High mobility group box 1, er et nukleus-protein (alarmin, eller DAMP) som frigjøres til cytoplasma eller ekstracellulært ved celledød eller -skade, og som synes å ha ulik funksjon avhengig av oksidasjonsgrad. Proteinet inneholder 3 konserverte, redoks-sensitve cysteiner – to av dem så nær hverandre at oksidering av de to -SH-gruppene fører til -S-S-dannelse (disulfid). Fullt redusert er proteinet angivelig kjemotaktisk; i disulfidformen kan det aktivere inflammasomer (og → cytokin-frigjøring). Det tredje cysteinet kan også oksideres; sluttoksideringen gir sulfonyl (-SO₃H)-former – som synes å være uten biologisk effekt. Disse effektene viser hvor viktig cellers og vevs redokspotensial (elektronegativitet) er.

Figur 58. Sårtilheling – en sammenfatning, og litt om cellers redokspotensial, som har viktige regulatoriske effekter i mange celletyper

Modell for fibroblastvandring: bindevev



Figur 59. Hypotetisk modell for hvordan fibroblaster beveger seg under tilheling av en vevsdefekt

APPENDIX

Noen problemer som bør kunne diskuteres fornuftig etter undervisningen i blodcellenes fysiologi, inkl. laboratorie-kurset

1. Ved vevsuforlikelighet mellom giver og mottaker av et transplantat (f.eks. en nyre) kan mottakeren forkaste, dvs. ødelegge, transplantatet. Medikamenter som dreper lymfocytter, lymfocyttiliknende celler og celler i delings-syklus, brukes gjerne for å hindre transplantatforkastelse. Hvorfor er det rimelig å vente at slike medikamenter kan være effektive? Hvilke uheldige virkninger kunne slike medikamenter tenkes å ha? Svar kort!
2. Du finner mange lymfocyttiliknende celler i blodet hos en 4-årig pike med høy feber, hovne lymfeknuter og sår hals, og få av de vanlige leukocyttypene. Dessuten var det svært få blodplater til stede, og en hemoglobinmåling viste at piken var anemisk. Du stiller diagnosen akutt lymfatisk leukemi. Det viser seg at piken i tillegg til cytotoksiske (celledrepende) medikamenter (mot leukemien) kommer til å trenge erytrocyttransfusjoner og blodplatetransfusjoner. Hva tror du bestemmer behovet for og hyppigheten av slike transfusjoner?

3. Når du oppholder deg en tid i høyden (f.eks. 5000 m.o.h.), vil arterieblodets oksygeninnhold øke utover de verdier du finner like etter ankomsten. Forklar hvorfor. Hvis du foretok daglige retikulocyt-tellinger fra og med oppstigningsdagen, hva ville du vente å finne? Gi en kort forklaring, som omfatter reguleringsmekanismen(e).
4. En pasient som har røkt daglig i mange år, søker lege p.g.a. tungpustethet som har vart noen dager. I årevis har hun hostet opp slim fra nedre luftveier. Nå har slimmengden økt og slimet skiftet farge fra gråaktig til gulgrønt. Pasientens hematokrit (= "pakket cellevolum", PCV) er 0,55 (referanseverdi 0,35 - 0,46). Gi en rimelig forklaring på dette funnet, med bakgrunn i pasientens lungesykdom.
5. Du faller, slår deg mot en skarp stein og får et snittsår i kneet. Det blør noen minutter. Etterat såret har sluttet å blø, er det dekket av en blodskorpe. Rundt skorpen er huden rød, varm og litt hoven. I løpet av de følgende dagene tiltar denne hudreaksjonen. Såret blir dessuten mer smertefullt, og det bryter frem puss gjennom skorpen. Huden blir rød og varm også ved økt varmeavgift. Hva er forskjellen mellom karreaksjonene ved vevsskade og ved økt varmeavgift? Hva er hensikten med karreaksjonen ved skade, og hva er de umiddelbare årsakene til reaksjonen?
6. I betent vev finnes gjerne en stor mengde leukocytter, bl.a. nøytrofile granulocytter. Forklar mekanismen bak granulocytansamlingen i interstitiet. Hvorfor er denne ansamlingen av og til gunstig og av og til ugunstig?
7. Som lege blir du konsultert av foreldre som har en 4-årig datter med høy feber, hovne lymfeknuter og sår hals. Foreldrene tror hun har en bakteriell infeksjon i mandlene. Du tar en blodprøve, bestemmer konsentrasjonen av hvite blodceller og gjør en differensialtelling. Hvilke hovedfunn (angis som verdier: større enn, like med eller mindre enn referanseverdiene (= "normalverdiene")) vil støtte foreldrenes diagnoseforslag? Forklar.
8. En pasient som har røkt daglig i mange år, søker lege p.g.a. tungpustethet som har vart noen få dager. I årevis har hun hostet opp slim fra nedre luftveier. Nå har slimmengden økt og slimet skiftet farge fra gråaktig til gulgrønt.
 - a) Legen mikroskoperer slimet og finner bl.a. mange nøytrofile granulocytter. Hva betyr dette?
 - b) Hvordan kan du tenke deg at gjentatte akutte episoder av den typen pasienten nå har, med granulocyttopphopning i lungevevet, kan ha bidratt til å redusere lungenes elastisitet?
9. En pasient med luftveisinfeksjon hoster mot deg, og du inhalerer små spyttdråper som inneholder bakterier. Dersom bakteriene kommer inn i vevet, reagerer organismen og prøver å begrense skadene som bakterieprodukter kan volde. Hvilken betydning har makrofagene på infeksjonsstedet og i de lokale lymfeknutene?
10. Makrofager og nøytrofile granulocytter har til dels de samme oppgaver i organismens forsvars- og renovasjonssystem. Hvilke forskjeller er det mellom disse to celletyper med hensyn til (i) funksjon og (ii) kinetikk (dvs. mobiliseringshastigheter, oppholdstider ulike steder i organismen, etc.)? Svar gjerne i tabellarisk eller skjematisk form; forskjeller i morfologi og reguleringsmekanismer faller utenom oppgaven.
11. Vil tapet av (i) lymfocytter og/eller (ii) nøytrofile granulocytter ved et blodtap som tilsvarende 1% av kroppsvekten være betydelig og derfor medføre en alvorlig svekkelse av motstandsevnen mot infeksjoner? Begrunn svarene.
12. Du faller, slår deg mot en skarp stein og får et snittsår i kneet. Det blør noen minutter. Etterat såret har sluttet å blø, er det dekket av en blodskorpe. Rundt skorpen er huden rød, varm og litt hoven. I løpet av de følgende dager tiltar denne hudreaksjonen. Såret blir dessuten mer smertefullt, og det bryter frem puss gjennom skorpen. Noen dager etter skaden kan man finne en økt mitosefrekvens i de lokale lymfeknuter. Gjør rede for de forskjellige trinn i kjeden av hendelser fra såret dannes til lymfeknutecellene er stimulert til deling.

13. Transplantatforkastelse skyldes bl.a. hvite blodcellers evne til å drepe fremmede celler. Nevn inntil 4 cellyper som kan drepe transplantatceller. Hvilke mulige mekanismer benytter de seg av?
14. Gjør rede for forskjellige mekanismer hvorved immunreaksjoner og hvite blodceller kan uskadeliggjøre eller drepe fremmede celler (f.eks. bakterier eller transplanterte celler) som kommer inn i kroppen vår.
15. Du faller, slår deg mot en skarp stein og får et snittsår i kneet. Det blør noen minutter. Etterat såret har sluttet å blø, er det dekket av en blodskorpe. Gjør rede for hemostasemekanismene som fikk blødningen til å stoppe. Detaljer angående koagulasjonssystemene skal ikke være med i besvarelsen.
16. Laboratoriekurset omfatter noen plasmakoagulasjonstester. Blod fra pasienter som tar medisin som motvirker vitamin K-effekter i organismen, hadde forlenget koagulasjonstid. Hvilken rolle spiller vitamin K for normal koagulasjonsaktivitet? Kompleks-bindende Ca^{2+} i plasma, f.eks. av EDTA, dannes det ikke fibrinkoagel. Hvorfor ikke? Det er likheter mellom trombin og trypsin, både i måten deres biologiske aktivitet reguleres på og i virkningen. Hvilke likheter?
17. Medisiner som brukes til kreftbehandling, dreper celler som deler seg eller forbereder seg til celledeling. To uker etter en kraftig dose av en slik medisin foretar du en primær blødningstidsbestemmelse (ad modum Ivy) og finner at blødningstiden er forlenget ut over det normale. Hva kan forklaringen være?
18. Noen ukers inntak av en spesiell flerumettet fettsyre kan forlenge blødningstiden uten å senke blodplatekonsentrasjonen. Mulig mekanisme?

HEMOSTATISK ORDLISTE

J.-G. Iversen og H.B. Benestad

- Adhesjon: Betegnelse brukt om blodplater som kleber seg til skadet årevegg eller fremmed overflate.
Induseres av kollagen, basalmembran og mikrofibres assosiert med elastin. Reversibel.
- Aggregasjon: Betegnelse brukt om blodplater som kleber seg til hverandre, ofte med utgangspunkt i adhesjon.
- Indusert av ADP i nærvær av Ca^{2+} og fibrinogen. Reversibel ved små doser av ADP. Irreversibel ved større doser av ADP, p.g.a. "release" og ny tilførsel av ADP; det har skjedd fibrindannelse i "platesfæren".
 - Indusert av trombin både direkte og indirekte ved "release" og frigjøring av ADP. Irreversibel.
 - Indusert av thromboxan A_2 fra blodplatene.
- Antitrombin (III): Plasmaprotein som kan binde til seg heparin og likn. (som aktiverer) og trombin etc. (som inaktiveres).
- Faktor I: Fibrinogen, plasma-protein som polymeriserer til fibrin etter at trombin har spaltet fra små peptidfragmenter.
- Faktor II: Protrombin, proenzym som omdannes til den potente proteasen (endopeptidasen) trombin av Xa og kofaktorer.
- Faktor III: Vevstromboplastin = "tissue factor" = TF. Lipoprotein i cellemembraner. Eneste koagulasjonsfaktor som ikke finnes i blodplasma. Forekommer i en rekke vev som hjerne, lunge, placenta, aktiverte monocytter og årevegger. Omdanner sammen med VII (eller VIIa) og Ca^{2+} faktor X til Xa og IX til IXa .
- Faktor IV: Ca^{2+} . Kofaktor i en rekke av koagulasjonsreaksjonene.
- Faktor V: Proaccelerin. Aktiveres av trombin til Va . Er en kofaktor for Xa ved at den aksellerer den enzymatiske omdannelsen av protrombin til trombin.
- Faktor VII: Prokonvertin. Omdannes muligens til VIIa av Xa , IXa , XIIa eller trombin. Aktiverer faktor IX og X sammen med Ca^{2+} og TF. K-vitamin-avhengig.

- Faktor VIII: Antihemofili A-faktor. Aktiveres til VIIIa av trombin. Kofaktor for IXa ved at den aksellererer aktiveringen av faktor X. Denne faktoren mangler ved den vanligste blødersykdommen.
- Faktor IX: Antihemofili B-faktor. Proenzym som omdannes til endopeptidasen IXa av XIa. IXa og kofaktorer omdanner X til Xa. K-vitaminavhengig.
- Faktor X: Stuart-Prower-faktor. Proenzym som omdannes til endopeptidasen Xa enten av IXa og kofaktorer eller av VII, TF og Ca²⁺. K-vitaminavhengig.
- Faktor XI: Antihemofili C-faktor. Omdannes til XIa av XIIa, og får da endopeptidase-aktivitet. Aktiverer IX til IXa.
- Faktor XII: Hageman-faktor. Aktiveres til XIIa av glassoverflater etc. og kofaktorer; in vivo muligens av kollagen, basalmembraner og enzymer fra granulocytter og endotel. Aktiverer XI til XIa.
- Faktor XIIIa: Endopeptidase. Kan også aktivere plasminogenaktivator, og er involvert i aktivering av plasmakallikrein-kinin-systemet.
- Faktor XIII: Fibrinstabiliserende faktor. Omdannes til transamidasen XIIIa av trombin. Danner kovalente bindinger mellom fibrinmonomerene og stabiliserer derved koagelet.
- Heparin: Polysakkarid. Naturlig antikoagulant som lages i mastceller. Binder seg til antitrombin (III) og kan derved inaktivere flere koagulasjonsfaktorer.
- Plasmin: Potent endopeptidase som kan spalte fibrin og faktorene V og VIII. Aktiveres fra plasmaproteinet plasminogen bl.a. av en plasminogenaktivator som finnes i vev (t-PA). Plasminaktivatoren aktiveres og secernerer bl.a. fra endotel i skjelettmuskulatur, stimulert av skjærekrefter ("shear stress") og hypoksi, under kroppsanstrengelser. Plasmin inaktiveres av antiplasmin som også er et plasmaprotein.
- Platefaktor 3: Ingen egentlig faktor, men en effekt av fosfolipid i den aktiverte blodplatemembranen. Kofaktor for Xa og IXa.
- Platefaktor 4: Protein, sekresjonsprodukt fra blodplater, binder seg til heparin og hemmer derved heparinets antikoagulasjonseffekt.
- Protein C: K-vitamin-avhengig pro-enzym i blod. Trombin kan binde seg til et molekyl på endotelcellene, trombomodulin, som forandrer trombins

substratspesifisitet slik at det kan aktivere protein C. Protein C er et antikoagulant-enzym som spalter og inaktiverer faktorene VIIIa og Va. Protein S er også et K-vitaminavhengig protein, som finnes i blodplatenes α -korn og er kofaktor for aktivert protein C.

- "Release": Frigjøring av serotonin, ADP, ATP og Ca^{2+} fra blodplatenes "tette" granula. Utløses av lave konsentrasjoner av kollagen og av ADP. Trombin og høye konsentrasjoner av kollagen gir en mer omfattende "release"-reaksjon, idet også α -granula og lysosomer blir frigjort.
- Trombin: Kan bl.a. aktivere faktorene V, VIII og XIII; fremme dannelsen av blodplateplugg ved å aktivere blodplater; omdanne fibrinogen til fibrin. K-vitamin-avhengig.
- Vitamin-K: Fettløselig vitamin som normalt syntetiseres av tarmbakterier. Siste trinn i syntesen av bl.a. faktorene II, VII, IX og X i leveren er avhengig av vit. K. Det som skjer, er en ekstra karboksylering av glutamin-syre-residuer som følger etter hverandre i peptidkjedene i disse faktorene. Karboksylutaminsyre-residuen binder Ca^{2+} , som er nødvendig for at faktorene skal bindes til fosfolipidholdige cellemembraner (ved at Ca^{2+} også bindes til membranen og dermed "danner bro" mellom faktorene og trombocytten, eller muligens ved at proteinkomplekset forandrer konfigurasjon, blir mer lipofilt i deler av komplekset og dermed bindes til blodplateoverflaten).