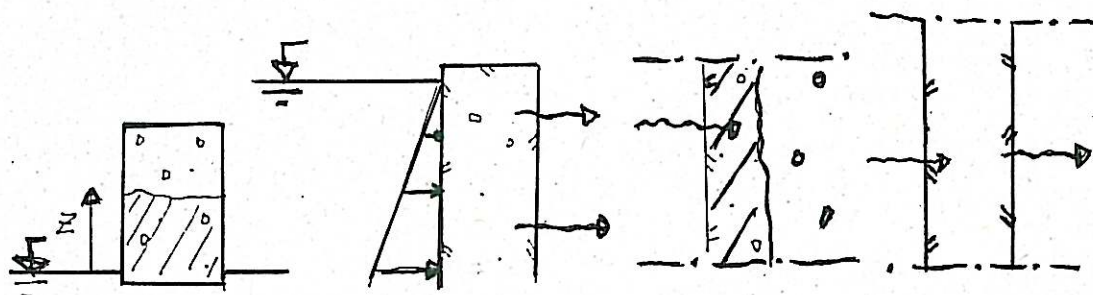


PR 206 / ex1

Depoteksemplar - ikke til utlån

Stefan Jacobsen

Betongens permeabilitet: Vurdering av måle- prinsipper og metoder



206

Prosjektrapport 1996

BYGGFORSK

Norges byggforskningsinstitutt

Stefan Jacobsen

Betongens permeabilitet: Vurdering av måle- prinsipper og metoder

Prosjektrapport 206 – 1996

Prosjektrapport 206

Stefan Jacobsen

**Betongens permeabilitet: Vurdering av
måleprinsipper og metoder**

Prøveforelesning, dr.ing.disputas 20. desember
1995

Emneord: betong, permeabilitet, massetransport,
laboratoriemetoder, bestandighet,
materialstruktur

ISSN 0801-6461

ISBN 82-536-0549-8

100 eks. trykt av

S.E. Thoresen as

Cyclus resirkulert papir

Omslag 200 g, innmat 100 g

© Norges byggforskningsinstitutt 1996

Adr.: Forskningsveien 3 B
Postboks 123 Blindern
0314 OSLO

Tlf.: 22 96 55 00

Fax: 22 69 94 38 og 22 96 55 42

Innhold

Sammendrag	2
1. Innledning	2
2. Måleprinsipper - drivkrefter for massetransport	3
2.1 Strømning av væske- eller gass under trykk - Darcys lov	3
2.2 Kapillærabsorpsjon.....	4
2.3 Diffusjon.....	5
2.4 Elektrisk potensialforskjell.....	6
2.5 Overganger/grensetilfeller mellom de ulike transportprinsippene	7
2.6 Ikke-stasjonær transport	8
3. Metoder for bestemmelse av permeabilitet.....	9
4. Vurdering av målemetoder og -prinsipper - relasjon til naturlig eksponering.....	10
4.1 Vann- og gasstrykk.....	10
4.2 Kapillærsug	10
4.3 Diffusjon.....	11
4.4 Elektrisk potensialforskjell.....	11
4.5 Andre prinsipper enn laboratorieprøving av transportprosesser.....	11
5. Materialets betydning for kontroll av permeabilitet - utførelses- og funksjonskrav.....	12
6. Oppsummering.....	14
7. Litteratur (et utvalg)	14
Appendix: kopier av overheads	

Sammendrag

Det er foretatt en vurdering av måleprinsipper og metoder for bestemmelse av betongens permeabilitet med hovedvekt på væsker, gasser og ioner med betydning for bestandighet:

- Måleprinsipper - drivkrefter for transport
- Metoder for bestemmelse av permeabilitet
- Vurdering av målemetoder og -prinsipper - relasjonen til naturlig eksponering
- Materialets betydning - aldringsprosesser og endring av permeabilitet over tid

Kopier av transparenter brukt ved presentasjonen er lagt ved bakerst.

1. Innledning

Permeabilitet (= gjennomtrengelighet) er den viktigste materialparameter for betongens bestandighet, og uttrykker generelt betongens evne til å motstå gjennomtrenging av ulike gasser eller væsker. I tillegg brukes betong ofte i en eller annen tettende funksjon som skal oppfylles fra det tidspunkt konstruksjonen tas i bruk (dammer, dekker, vegger, off-shore plattformer, tetting, injisering, beholdere/tanker for lagring av ulike væsker, gasser, kjernefysisk avfall mm.). Som materialparameter må betongs permeabilitet derfor kontrolleres for levetidsprosjektering eller levetidsbedømmelse, samt kontroll av funksjonsegenskap, dvs. tetthet. Målemetodene består i all hovedsak i at betongprøver eksponeres for væske eller gass på ulike måter, og opptak eller gjennomstrømning i prøven måles som funksjon av tid.

Betong er et porøst materiale. Transport av væsker og gasser skjer i porene. Mengden porer vi kan observere avhenger av betongens kvalitet og måten vi måler porøsitet på. Målt ved enkel tørking, oppsuging av vann og metting med trykk eller vakum utgjør porevolumet i størrelsesorden 7 - 20 volum % for de vanligste typer betong i bruk i dag. Norske bergarter har porøsitet i størrelsesorden 0.5 volum %. Det er derfor sementpastaen og heftsonen mellom sementpasta og tilslag som utgjør den porøse delen i betong produsert med naturlig tilslag. Sementpastaens porøsitet er i størrelsesorden 20 - 50 volum % for de vanligste typer betong i bruk i dag.

I engelskspråklig litteratur om betong brukes begrepet massetransport (eng.: mass transport/mass transfer) i økende grad for å beskrive gjennomgang av væsker og gasser.

Emnet "Betongens permeabilitet" er meget omfattende fordi det angår de fleste bestandighets- og funksjonsrelaterte parametre, og fordi det innbefatter betongens permeabilitet mht. alle typer gasser, væsker og oppløste stoffer. For tiden finnes to RILEM kommiteer som befatter seg med emnet: TC 116 Permeability of concrete as a criterion of its durability /1/, og TC 146 Tightness of concretes with respect to fluids /2/. TC 116, som har befattet seg med permeabilitet i forbindelse med betongs bestandighet, har avlevert sin sluttrapport /1/, som gir en god oversikt. TC 146 arbeider i hovedsak med transport av ulike typer væsker i betong med en tettende funksjon. Dette arbeidet pågår fortsatt, og pr. dags dato foreligger bla. en review /2/.

Det er her lagt hovedvekt på måleprinsipper og metoder for betongens permeabilitet med relevans for bestandighet. Det vil i praksis si transport av vann i væske eller dampform, med eller uten ulike oppløste ioner (Cl^- , Ca, Na, K mm). Viktige gasser er CO_2 og O_2 .

2. Måleprinsipper - drivkrefter for massetransport

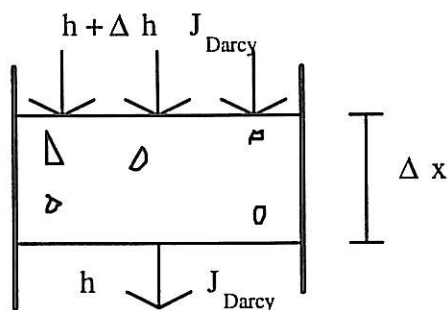
Måleprinsippene kan deles inn etter hvilke drivkrefter eller fysiske mekanismer som forårsaker gjennomtrengning av vann eller væske. I det etterfølgende deles disse inn i de 4 vanligste drivkrefter som brukes ved laboratorieforsøk:

- 2.1 Væske- eller gasstrykk
- 2.2 Kapillærsug
- 2.3 Konsentrasjonsforskjell (diffusjon), (inkl. vanndamptrykkforskjell)
- 2.4 Elektrisk potensialforskjell

I tillegg finnes andre drivkrefter, som for eksempel temperatur. Temperaturforskjeller er en viktig årsak til transport, men tas ikke med her fordi vi kan regne den som indirekte årsak ved at viskositeten reduseres, damptrykkforskjeller og diffusivitet øker. En annen viktig transportform er osmose, som gir trykkforskjeller fordi alle stoffer ikke transporteres like lett gjennom svært små porer ("semipermeable membraner"). Drivkraften er prinsipielt den samme som for diffusjon. Ikke-stasjonær tilstand er kun behandlet kort.

2.1 Strømning av væske- eller gass under trykk - Darcys lov

Trykk er den drivkraft som vanligst assosieres med begrepet permeabilitet. Permeabilitetskoeffisienten K i Darcys lov er proporsjonalitetskonstanten mellom strømning (vann) og trykkfall. Ved transport iht. Darcys lov foregår massetransporten som strømning i et tett poresystem (dvs. ingen kapillærkrefter) som følge av trykkforskjell mellom oppstrøms og nedstrøms side. For en betongskive med tykkelse Δx (m) og trykkfall Δh (m vannsøyle) over tykkelsen Δx , og stasjonær strøm J_{Darcy} ($\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) = \text{m/s}$), er Darcys lov:



$$J_{\text{Darcy}} = K \Delta h / \Delta x \quad (1)$$

Dersom man bruker massestrøm J_{Darcy} ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) og trykkfall Δp (N/m^2) fås Darcys lov på følgende form:

$$J'_{\text{Darcy}} = k \Delta p / \Delta x \quad (2)$$

hvor k har enhet s.

Ofte brukes et minustegn foran K for å uttrykke at J_{Darcy} er positiv når trykkgradienten $\Delta h/\Delta x$ er negativ, dvs. at strømmen går i retning av fallende trykkgradient.

Ligning (1) og (2) gjelder for strømning av inkompressibel væske (vann) i et mettet pore-system. Dersom væskens viskositet η (Pa·s) tas i betraktning fås K' (m^2). Følgende omregning gjelder mellom K og K' :

$$K' = K\eta/dg \quad (3)$$

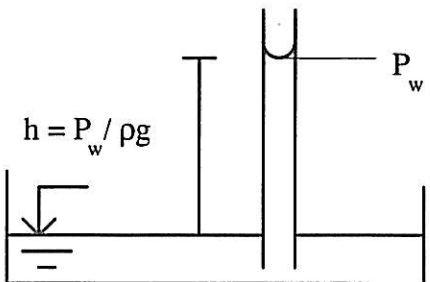
hvor d er densitet av væske (kg/m^3) og g er tyngdeaksellerasjonen (m/s^2). Viskositeten uttrykker intern motstand eller friksjon i væsken eller gassen mot at strømningshastigheten varierer over strømningsprofilen. Viskositet kan beregnes fra Poisselle strømning i et rør med diameter r (m), lengde l (m), strømningshastighet v (m^3/s) og trykkforskjell p (Pa) over rørlengden l (antar at strømmingen er laminær i betongens porer):

$$\eta = \pi r^4 / 8lv \quad (4)$$

Ved måling/sammenligning av gasspermeabilitet for ulike væsker og gasser må det tas hensyn til at viskositeten varierer, og da brukes K' . Her er vann den mest aktuelle væske. Ligning (4) viser at strømningshastighet er større i store porer.

2.2 Kapillærabsorpsjon

Drivkraften ved "klassisk" kapillær absorpsjon er vannets overflatespenning og kontaktvinkelen mellom væsken og poreveggen. For betong (og porøse bygningsmaterialer) gjelder dette i hovedsak vann. Undertrykket P_w (Pa) under en vannmenisk med overflatespenning σ (N/m) og kontaktvinkel α i et kapillærrør med radius r (m) er gitt av Laplaces lov (antar friksjonsfritt rør):

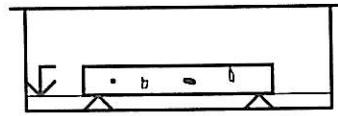
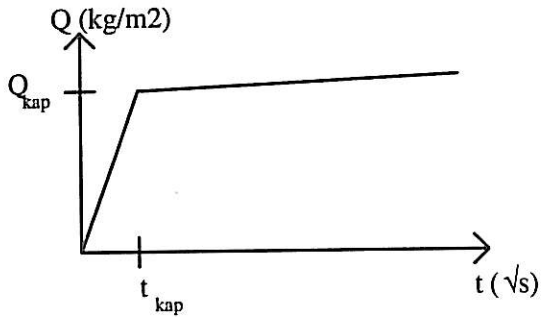


$$P_w = 2\sigma \cos\alpha / r \quad (5)$$

Når betong med et ikke-vannmettet kapillærporesystem kommer i kontakt med vann (i væskeform), vil væsken "dras" gjennom materialet som resultat. Ligning (5) viser at stige-høyden/undertrykket blir større i mindre porer. For en betongprøve i kontakt med vann uttrykkes den kapillære stige-høyde h_{kap} (m) som funksjon av tid t (s):

$$h_{\text{kap}} = \sqrt{(t/m)} \quad (6)$$

Hvor m (s/m^2) er motstandstall. Høyt motstandstall uttrykker lav permeabilitet, og dermed lav stige-høyde etter en tid t . Ligning (6) følger delvis empirisk fra det faktum at vektøkningen er lineært økende med kvadratroten av tid for relativt tynne skiver i ensidig kontakt med vann. Figuren nedenfor viser prinsipiell sammenheng mellom vektøkt og kvadratroten av tid ved ensidig kapillær suging av en betongskive:



Kapillaritetstallet k_{kap} ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})$) er stigningsforholdet til den bratte delen av kurven:

$$k_{\text{kap}} = Q_{\text{kap}} / \sqrt{t_{\text{kap}}} \quad (7)$$

Motstandstallet m (se ligning (6)), kan beregnes fra forsøket som er beskrevet ovenfor som forholdet mellom tiden væskefronten bruker på å nå toppen av prøven, t_{kap} (s), og kvadratet av prøvens høyde $h_{\text{prøve}}$ (m):

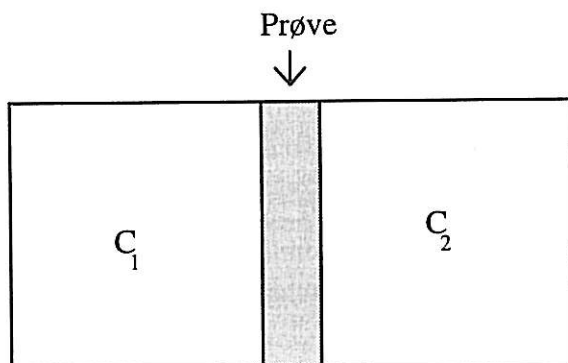
$$m = t_{\text{kap}} / h_{\text{prøve}}^2 \quad (8)$$

Prøvemethode for bestemmelse av m er utviklet av bla. Smeplass /3/. Transportert mengde væske pr. tidsenhet J_{kap} ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) i den bratte delen av kurven kan beregnes fra likning (7) ved å derivere $Q_{\text{kap}} = k_{\text{kap}} \sqrt{t_{\text{kap}}}$ med hensyn på tiden, Fagerlund /4/:

$$J_{\text{kap}} = k_{\text{kap}} / (2 \cdot \sqrt{t}) \quad (9)$$

2.3 Diffusjon

Drivkraften for diffusjon er konsentrasjonsforskjeller. Bevegelse av gass, væske eller ioner fra et sted med høyere konsentrasjon mot et sted med lavere konsentrasjon (makronivå) gjennom betongens porer skyldes molekylenes og ionenes bevegelse (mikronivå). Denne type transport er normalt langsommere enn den type strømning som er beskrevet ovenfor. Ficks 1. lov gir transportert mengde J_{diff} ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) gjennom en betongskive med tykkelse Δx (m) ved stasjonær tilstand. J_{diff} er proporsjonal med konsentrasjonsforskjell ΔC (kg/m^3) og omvendt proporsjonal med Δx . Diffusjonskoeffisienten D (m^2/s) er proporsjonalitetskonstant.



$$J_{\text{diff}} = D \Delta C / \Delta x \quad (10)$$

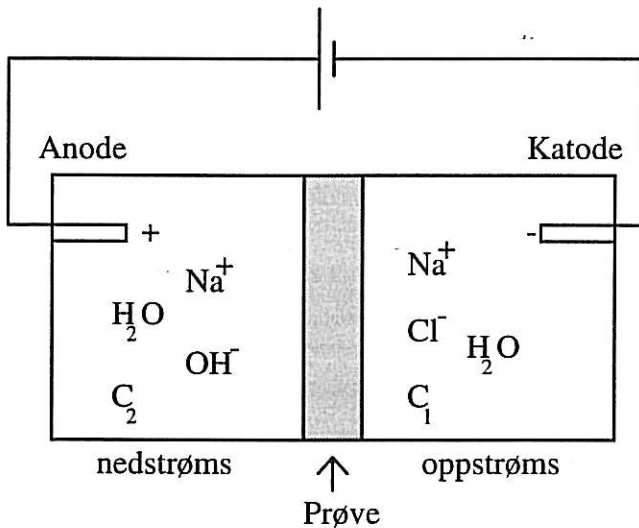
Som for permeabilitet kan minustegn brukes foran D for å illustrere at strømmingen går i retning av fallende konsentrasjon. For gasser uttrykkes konsentrasjonsforskjellen vanligvis i damptrykkforskjell p_d (Pa), og Ficks 1. lov brukes da på formen:

$$J_{\text{diff}} = D_{\text{H}_2\text{O}} \Delta p_d / \Delta x \quad (11)$$

hvor gassdiffusjonskoeffisienten eller damppermeabiliteten, $D_{\text{H}_2\text{O}}$, har enheten $\text{kg}/(\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}) = \text{s}$. Dette er ekvivalent med Darcys lov som gitt i ligning (2), hvor k har enheten s .

2.4 Elektrisk potensialforskjell

Bruk av elektrisk potensialforskjell som drivkraft brukes i hovedsak for å aksellerere transport av ioner gjennom porene i betong. Måleprinsippet består i å plassere prøvestykket i en elektrisk ledende væske (elektrolytt) mellom positiv og negativ pol og påføre en konstant likestrøm. Det mest vanlige ionet som måles i betong er klorid (Cl^-) fordi inntrenging av klorider i armert betong, med armeringskorrosjon og betongskader som følge, er det største bestandighetsproblem. I figuren nedenfor er vist prinsippskisse for et slikt forsøk med NaCl-løsning oppstrøms og NaOH nedstrøms ved start av forsøk.



Betongprøvens såkalte kloridpermeabilitet K_{Cl} (m^2/s) beregnes ved å måle endring i ionekonsentrasjon i nedstrøms beholder ΔC_2 (mol/m^3) i løpet av tidsintervall Δt (s) ved stasjonære forhold $/5/$:

$$K_{\text{Cl}} = (V \cdot l) / (C_1 \cdot A) \cdot (\Delta C_2 / \Delta t) \quad (12)$$

hvor V (m^3) er volum av nedstrøms beholder, l (m) er prøvens tykkelse og A (m^2) er areal av prøveflaten. Man kan også måle prøvens elektriske (Ohmske) motstand og antall elektroner (ladning) som passerer prøven. Det må antas at oppstrømskonsentrasjon (C_1) er uendret. Ligning (12) tar ikke hensyn til at kloridionetransporten økes med økt spenning. Da kan Nernst-Planks ligning (13) brukes. I følge ligning (13) er transportert mengde ioner J_{migr} ($\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}) = \Delta C_2 \cdot m_{\text{Cl}} / A \cdot \Delta t$):

$$J_{\text{migr}} = K_{\text{migr}} z F E C_1 m_{\text{Cl}} / RT \quad (13)$$

hvor K_{migr} (m^2/s) er migrasjonskoeffisient (som uttrykker betongens kloridpermeabilitet), z er ionets valens (1 for Cl^-), F er Faradays konstant (96500 Joule/Volt), E er spenningsfall over prøven (Volt/m), m_{Cl} er molvekt (kg/mol), R er gasskonstanten ($8.314 J/(mol \cdot K)$) og T er absolutt temperatur (K).

2.5 Overganger/grensetilfeller mellom de ulike transportprinsippene

Drivkreftene for massetransport beskrevet ovenfor i pkt. 2.1 - 2.4 representerer enkle, stasjonære tilstander hvor enkeltmekanismer for transport er beskrevet. Ved naturlig eksponering vil flere transportmekanismer oftest være aktive samtidig, og drivkraften for massetransporten kan ikke klart plasseres i noen av de 4 kategoriene.

Et eksempel på dette er kapillærabsorpsjon av betong med lavt v/c tall, og også silikastøvbetong. Slike betonger har meget avrundede vannabsorpsjonsforløp uten den karakteristiske "knekk punkt kurven" vist ovenfor i pkt. 2.2, Punkki og Sellevold /6/. Forklaringen er at betongene har lavt innhold av porer hvor vannmenisker kan dannes, og transporten har derfor mere preg av diffusjon. Transporten foregår trolig ikke i gassform, men i hovedsak adsorbent på overflaten av de små porene til det lavporøse materialet. Sammenhengen mellom porestørrelse (generell porøsitet i materialer, ikke nødvendigvis betong) og transportform for gass er diskutert av Lydersen /7/.

En annen mulighet er at selve transportmekanismen kan være en blanding av mekanismene gitt under pkt 2.1 - 2.4. Et eksempel på blandede transportformer er vandampdiffusjon ved høy relativ fuktighet, og kapillær transport. Det er velkjent at diffusjonskoeffisienten for vandamp målt ved enkle stasjonære koppforsøk, f.eks. /8/ og ligning (11) varierer med fuktighetsnivået, /9/. D er generelt lav ved lavt vandamptrykk, eller lave relative fuktigheter (RF) og høy ved høy RF. Ved økende RF vil vandamp etterhvert kondenseres kapillært i de minste porene, og vandampen kan dermed transporteres kapillært når et kontinuerlig system av vannfylte porer dannes i prøven. En slik transportmekanisme er diskutert bla. av Mills /10/ og Hedenblad /11/. Samtidig transport ved diffusjon og kapillærtransport er også aktuell ved kloridinntrengning i betong ved at klorider både diffunderer og transporteres ved absorpsjon, oppløst i vannet, se bla. /1/.

Et annet eksempel på blandede transportmekanismer er overgangen mellom hydraulisk strømming og kapillær transport hos en betongkonstruksjon med en side i vann og en side i luft. Den kapillære strømningshastigheten begrenses av betongens permeabilitetskoeffisient, med mindre betongen på noe tidspunkt delvis tørker ut slik at strømmingen ikke foregår i mettet tilstand. En slik mekanisme er bla. beskrevet av Mills /10/, og beregningseksempler er gitt av Bazant og Najjar /9/ og i Beton-Bogen /12/.

Et tredje eksempel på blandede transportmekanismer er overgangen mellom gassdiffusjon (ligning (11)) og gasspermeabilitet (ligning (1) og (3)). Ved synkende gasstrykk vil strømmingen få gradvis mere preg av diffusjon.

Et fjerde og siste eksempel som tas med her er noe fjernt fra naturlig eksponering, og gjelder overgangen mellom migrasjon og diffusjon. Prøveoppsettet vist i ovenfor i pkt. 2.3 kan brukes (uten elektrisk spenning) til å måle ren diffusjonskoeffisient, ved å bruke ligning (10) etter at en stasjonær kloridgjennomgang er oppnådd. Dette vil imidlertid kunne ta lang tid. I følge flere forskere, se review av Streicher og Alexander /13/, kan Ficks 1. lov og Nernst-Planks

likning (likning (10) og (13) kombineres slik at den virkelige diffusjonskoeffisienten kan måles ved aksellerert spenning, se også Luping og Nilsson /14/. Dette vil ikke bli diskutert i nærmere detalj her.

2.6 Ikke-stasjonær transport

I praksis vil transportprosesser i betong som følge av de fire typer drivkrefter beskrevet i pkt 2.1 - 2.4 ovenfor stort sett skje i ikke-stasjonær tilstand. Matematisk beskrives ikke-stasjonær strøm ved de samme transportkoeffisientene, men uttrykkene blir mere kompliserte enn de stasjonære tilfellene. Her gis noen forenklete beskrivelser i én dimensjon:

For permeabilitet er ikke-stasjonær strømning bla. beskrevet av Meletiou et al /15/, Neville /16/ og i /1/. I /prop. of concrete/ gis følgende uttrykk for inntrengningsdybde d (m) som følge av vanntrykk h (m vannsøyde) i en betong med permeabilitetskoeffisient K (m/s) over en tid t (s):

$$d = \sqrt{Kht} \quad (14)$$

For kapillær absorpsjon vil ikke-stasjonær strømning kunne bestå i å avbryte tilførselen av væske, f. eks. ved gjentatt oppfukning og uttørking. Absorpsjon Q_{kap} (kg/m²) kan beregnes sum av kapillærabsorpsjon i de enkelte tidsintervall $Q_{\text{kap}i}$:

$$Q_{\text{kap}} = \sum Q_{\text{kap}i} \quad (15)$$

For diffusjon vil ikke-stasjonær strømning følge Ficks 2. lov, som gir endring i konsentrasjon C (kg/m³) etter en tid t (s) i et punkt med avstand x (m) fra start:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D \frac{\partial C}{\partial x}) \quad C = C(x, t) \quad (16)$$

Med grensebetingelsene $C(x > 0, t = 0) = 0$, og $C(x = 0, t > 0) = C_0$, finnes følgende funksjon $C(x,t)$ for konsentrasjonen i et pkt x ved tid t som løsning på (16):

$$C(x,t) = C_0 [1 - \text{erf}(x/2\sqrt{Dt})] \quad (17)$$

hvor verdier for feilfunksjonen $\text{erf}(x/2\sqrt{Dt})$ for ulike verdier av $(x/2\sqrt{Dt})$ kan finnes fra matematiske tabeller eller regneprogrammer.

For migrasjon vil ikke-stasjonær strømning være tilfelle i begynnelsen av forsøket og for kortvarige forsøk hvor stasjonær tilstand ikke får tid til å etableres. Også dersom oppstrøms konsentrasjon C_1 i figuren under pkt 2.4 ikke er konstant vil ikke-stasjonær strømning kunne oppstå. Luping og Nilsson /14/ utledet en likning tilsvarende Ficks. 2 lov, likning (16), modifisert v.hj. av Nernst-Plank, likning (13), for å beskrive transporten i dette tilfelle.

3. Metoder for bestemmelse av permeabilitet

To ulike inndelinger av metoder for måling/kvantifisering av betongs permeabilitet er:

- 1) Inndeling etter drivkraft eller prinsipp
(vanntrykk, kapillærabsorpsjon, diffusjon, migrasjon, klimasimulering/syklisk eksponering, modellering av permeabilitet fra porøsitet/mikrostruktur).
- 2) Inndeling "på tvers"; etter prøvegjennomføring
(Stasjonær strøm, ikke-stasjonær/hurtigmetoder, feltmetoder).

Tabell 1 viser prøvemetoder inndelt på disse to måtene, med referanse til aktuelle prøvestandarder. Mer fullstendige oversikter finnes i reviewartikler, lærebøker og prøvestandarder, se for eksempel /1, 12, 16, 31/. /1/ gir en bred innføring i bla. prøvemetoder (oversikt, gjennomføring) med omfattende referanser til prøvemetoder, publikasjoner og rapporter.

Tabell 1: Prøvemetoder for betongs permeabilitet - for referanser se /1, 12, 16, 31/.

Prøveprinsipp	Stasjonære metoder	Ikke-stasjonære/ hurtigmetoder	Feltmetoder
Trykk	Vanngjennomgang Gasspermeabilitet	Vanninntrengning	Overflatebetong "Bulk" betong Betongkule senket i vann /17/
Kapillærabs.	Ensidig kapillær- absorpsjon	Hel nedsenking, vannoppsug	Måles før trykk påføres i metodene angitt over
Diffusjon	Vanddamp- permeabilitet (koppmetoden) Kloriddiffusjons celle	Klorid bulkdiffusjon	Beregning av D fra klorid profiler eller karbonat.dybde
Migrasjon v.hj. av elektrisk spenning	Kloridpermeabilitet	Kloridinntrengning, Passerende ladning El-motstand	-
Klimasimulering	-	Kloridsprøytetekammer	-
Naturlig eksponering	-	-	Beregning av D_{Cl} fra kloridprofiler
Modellering av permeabilitet	Basert på porøsitet, porestruktur og modeller for transport /1, 2, 19/.		

I tillegg til de prøveprinsipper som er angitt i tabell 1, har Betongvareindustrien egne metoder for funksjonsprøving av bla. betongrør (tetthet under vann og lufttrykk) /20/ som ikke tas med her.

4. Vurdering av målemetoder og -prinsipper - relasjon til naturlig eksponering

Transportprosessene i prøvemethodene kan være nokså forskjellige fra de transportformer som finner sted ved naturlig eksponering. Her er dette diskutert kort for de enkelte prinsippene. I tillegg innvirker materialfaktorer på forholdet mellom prøvemethode og natur, (diskutert nedenfor i pkt. 5.).

4.1 Vann- og gasstrykk

Vanngjennomgang i betongkonstruksjoner slik det måles i permeabilitetstesting opptrer sjelden i konstruksjoner. Ved vanntrykk vil oftest kun den ene siden være i luft, for eksempel dammer, noe som gjør at transporten blir en kombinasjon av trykk (oppstrømsside), kapillærkrefter og diffusjon /10/. Forutsetningen for mettet strømming er da ikke tilstede. For betong som er helt neddykket i vann, for eksempel kaipæler, vil vanninntrengningen skje fra alle kanter. Denne situasjonen etterlignes trolig best ved vanninntrengningsforsøk /1/.

Vanntrykkspermeabilitet gir et bilde på betongens "innebygde" tetthet: om det i det hele tatt er mulig for væske å gå gjennom materialet, selv under svært høye trykk. Måling av permeabilitet på svært tette betonger (lav v/c) er imidlertid vanskelig rent teknisk pga. svært lav gjennomstrømming. I eldre publikasjoner på permeabilitet finnes ofte at ingen strømming kunne måles for de tetteste betongkvaliteter /21, 22, 23, 24/. I den senere tid er det utviklet apparaturer for måling av permeabilitet i høyfast betong med svært lave permeabilitetskoeffisienter ($K = 10^{-14} - 10^{-16}$ m/s), /25, 26/. Den direkte anvendelighet av slike resultater er ikke helt åpenbar, selv om de klart indikerer at betongen har svært lav permeabilitet.

Gjennomføring av permeabilitetsmålinger kan ofte være tidkrevende, både prøvekondisjonering, prøveinnsetting og selve testen. I praksis finnes mange ulike måter å gjennomføre testing på, både når det gjelder tetting og måling av strømming, /1/.

Ved måling av gasspermeabilitet vil gjennomstrømming føre til uttørking av betongprøven, som diskutert ovenfor i pkt. 4. Dette vil gi for høye permeabilitetsverdier i forhold til prøving med vann /27/. Videre er permeabiliteten ulik for ulike gasser /16/ og proporsjonaliteten strømming - trykk for økende trykk nokså ikke-lineær /1, 27/. Metoden er mest relevant for vurdering av betongkonstruksjoners gasstetthet. En fordel ved metoden er imidlertid at den er rask å gjennomføre, fordi stasjonær strømming oppstår mye raskere enn ved målinger med vann, /27/.

4.2 Kapillærsug

De aller fleste konstruksjoner er utsatt for syklisk uttørking og oppfukning i en eller annen form. Kapillærabsorpsjon er derfor trolig den mest vanlige måten vann tas opp på i virkelig eksponering. Kapillærabsorpsjon er en enkel, relativt rask, rimelig og nokså pålitelig metode for å bestemme betongens permeabilitet, målt som evne til å suge opp vann. To viktige faktorer som bestemmer forholdet mellom laboratorieprøving og virkelig eksponering er:

- forbehandling - startfukttilstand /3, 6/
- kapillærabsorpsjon er sjelden stasjonær i virkeligheten

I ikke-stasjonære metoder (30 min. vannoppsug og lign.) er prøveutformingen viktig å ta hensyn til fordi prøvens størrelse og volum/overflate forhold innvirker på vannopptaket.

4.3 Diffusjon

Prinsippet ved ren diffusjon er mest brukt for måling av vanndamppermeabilitet ved koppmetoden, se f.eks. Hedenblad /11/, Nilsson /28/ og /8/ og kloridpermeabilitet ved stasjonære forsøk, Page /29/ og ikke-stasjonære forsøk /30/.

Vanndamppermeabiliteten er sterkt avhengig av betongens fuktighetsnivå /9, 11, mfl./, og for at den skal kunne brukes til beregning av vanndampgjennomgang i konstruksjoner i varierende klima må den ikke-lineære sammenhengen mellom fuktighet og vanndampdiffusivitet være kjent. Vanndamppermeabiliteten har størst variasjon med RF for betonger med høyere v/c /11, 28/.

Ren kloriddiffusjon vil være mest aktuelt for betong kontinuerlig nedykket i sjøvann. Ved store dyp virker også vanntrykk inn. Sporadisk salting og sjøsprøyt i skvalpesone vil innebære at kapillærsug og diffusjon virker samtidig.

4.4 Elektrisk potensialforskjell

Det er det måleprinsippet som er fjernest fra virkelig eksponering mht. drivkraft. (I visse typer betongrehabilitering hvor elektriske felt brukes (realkalisering, kloriduttrekk) vil dette kunne føre til drift av ioner.) Laboratorieforsøk har vist at målemetoder basert på dette prinsippet under gitte forutsetninger kan rangere betong nokså likt med metoder basert på vanntrykk, kapillærsug eller diffusjon, /1, 31/. Prøveprinsippet brukes fordi prøvetiden er relativt kort.

4.5 Andre prinsipper enn laboratorieprøving av transportprosesser

For å komme rundt de problemer som eksisterer med å relatere laboratorieprøving til virkelig eksponering finnes endel andre metoder og prinsipper:

Feltmetoder:

Dette er i hovedsak prøving av absorpsjon og vanninntregning (med og uten vanntrykk) på overflater eller i borehull normalt på overflaten. Metodene har blitt kritisert for høy spredning og for å være for avhengig av fuktilstand. På den annen side må det sies at metodene er raske, og at de måler egenskaper hos overflatelaget, som er den viktigste delen av betongen for bestandigheten.

I tillegg brukes måling av kloridinntregning og karbonatiseringsdyp for bestemmelse av diffusjonskoeffisient.

Klimasimulering:

I Norge har kloridsprøytetekammer, Vennesland /18/ fått en viss anvendelse. Resultatene fra /31/ viste imidlertid ingen klar forskjell på denne metoden i forhold til ren diffusjon /30/.

Felteksposering:

Felteksposering har alltid vært brukt, men har blitt aktualisert i dag som følge av at bestandighet generelt har fått øket interesse. I tillegg har "klassiske" metoder for måling av permeabilitet fått noe redusert status som følge av vanskeligheter med å relatere disse direkte til naturlig eksponering.

Permeabilitetsmåling ved felteksposering kan sammenlignes med laboratorieforsøk (K , m , D , K_{migr}). Resultater så langt for norske bruer /31/ har vist at D_{Cl} målt i laboratorium er 5 - 60 x høyere enn D_{Cl} basert på felt eksponering. Her pågår fortsatt forskning /32/ for å komme fram til sikrere sammenheng mellom klima og prøvemeteode.

5. Materialets betydning for kontroll av permeabilitet - utførelses- og funksjonskrav

Materialegenskapenes betydning:

Betong er et porøst materiale hvor permeabiliteten (makroegenskap) bestemmes av mikroegenskaper (porøsitet, porestruktur/-porestørrelsesfordeling, riss, aldrings- og endringsprosesser). Permeabilitet reduseres ved å redusere porøsitet og/eller gjøre poresystemet finere. Betydningen av betongens poresystem/materialstruktur for kontroll av permeabilitet er imidlertid et relativt lite aktet felt i Norge, selv om vi gjør bruk av denne teknologien i utstrakt grad ved bruk av høyfast betong og silikastøv.

Endring av permeabilitet over tid:

En viktig årsak til vanskelighetene med å sikre betongens permeabilitet ved både utførelseskrav og funksjonskrav er at betongens permeabilitet kan endres over tid som følge av miljø og aldringsprosesser. Endringene kan både være av positiv karakter (selvtetting, "healing") /33, 34, 35 m.fl./, og av negativ karakter (økning av permeabilitet som følge av riss, tørking eller kjemisk omvandling) /24/, Sellevold og Bager /36/, Bager /37/ m.fl. Endringer i permeabilitet over tid må tas hensyn til ved prosjektering av bestandighet, særlig fordi det er overflatebetongen ("Skin of concrete") som er mest utsatt, både for aldrings- og endringsprosesser og for massetransportprosesser.

Nedenfor diskuteres den praktiske betydningen av aldring og endring i permeabilitet med utgangspunkt i dagens filosofi for sikring av lav permeabilitet i betong /38/. Tilslutt oppsummeres endringsprosesser for de ulike permeabilitetsparametrene.

Utførelseskrav:

Hovedparametre som det stilles krav til for betong til et gitt miljø for å kontrollere permeabilitet er iht. dagens standard /38/:

- materialsammensetning (v/c, sementmengde, tilsetningsstoffer og -materialer, tilslag etc.)
- utførelse (blanding, utstøping/komprimering, herding)
- vikarierende parametre (fasthet og vanninntrengning (laboratorieprøver))

Laboratorieundersøkelser på laboratoriestøpte betonger med varierende sammensetning, v/c-tall, tilsetning av pozzolaner etc., viser at permeabilitet (K , m , D , dC/dt , K_{migr}), reduseres ved å følge de utførelseskrav som er angitt i /38/, som forventet.

Funksjonsprøving:

På den annen side viser det seg ved ringforsøk mellom ulike laboratorier at permeabilitet (K) kan oppvise store spredninger. Høyest spredning er observert når både støping av prøver og utføring av tester utføres ved ulike laboratorier. Høy spredning har også vært observert når prøvene produseres ved kun et laboratorium og distribueres til de andre deltagende laboratoriene /27, 39, 40/. Selv under laboratorieforhold kan altså utførelse ved produksjon, og/eller målemetodene gi store kvalitetsvariasjoner. Videre, ved måling av permeabilitet på betongprøver utboret fra konstruksjoner har det vist seg vanskelig å relatere ulike permeabilitetsparametre til hverandre /31/, selv om de samme permeabilitetsparametre kan relateres til hverandre på laboratoriestøpte prøver /1/. Dette er et fundamentalt problem: hvordan bruke/overføre resultater fra velkontrollert laboratorieprøving på "virkelig betong" ?

Diskusjonene ovenfor ang. Utførelseskrav og Funksjonsprøving viser at utførelseskrav ikke nødvendigvis kan sikre at funksjonsprøvningskrav blir overholdt, at permeabilitetsmålinger kan være beheftet med relativt store spredninger, og at erfaringer med funksjonsprøving på laboratoriestøpt betong ikke nødvendigvis kan overføres til feltbetong/virkelig betong. Kontroll av betongens permeabilitet kan altså vise seg vanskelig i praksis.

Tabell 2 viser prosesser/faktorer som endrer betongens permeabilitet:

- endringer i konstruksjon ved eksponering for vær (tørking, karbonatisering, utluting mm.)
- endringer som følge av prøving (tørking, preparering, utluting mm.)

Tabell 2: Faktorer/prosesser som kan gi endringer i permeabilitet

Prinsipp/-metode	Endringsprosess	Endring	Referanse
Trykk K, K' (vann, gass)	Tørking	Økes	/24, 1, 27/
	Utluting	Økes	/23, 41/
	Riss	Økes	/34, 35, 42/
	Karbonatisering	Reduseres (OPC), kan øke for slagg	/1/
	Selvtetting/healing	Reduseres	/33, 34, 35/
Kap.abs. m	Kondisjonering	Reduseres ved hard tørking, Følsom for initiell fuktinnh. og tørketemp.	/6, 43/ /3/
	Begroing/utfelling	Økes	/31/
Diffusjon D	Tørking	D_{H_2O} økes,	/9, 11/ /1/ /44/
	Variasjon i fukt	D_{H_2O} funksjon av damptrykk .	
	Karbonatisering	Reduseres (OPC), kan øke for slagg	
	Binding av Cl^-	D_{Cl} funksjon av mengde Cl^- som bindes	
El.spenning dC/dt , K_{migr}	Tørking	Økes som K	/45, 46/ /47/
	Elektrisk felt	Transport av komponenter pga. el. strøm (Ca, Na, K, OH etc.), mulig effekt på dC/dt , K_{migr}	

6. Oppsummering

Det er foretatt en vurdering av måleprinsipper og -metoder for betongens permeabilitet, med hovedvekt på bestandighetsrelaterte transportprosesser (vann, vanndamp, kloridioner, O₂, CO₂).

Prøveprinsipper i "klassiske" prøvemeter er basert på "rene" transportmekanismer (strømning, kapillærkrefter, diffusjon, migrasjon pga. elektrisk spenning). Av disse er det kapillærtransport som er den viktigste for inntrengning av væske i felt, mens diffusjon sammen med kapillærkrefter trolig er viktigst for transport. Ioner transporteres trolig ved en blanding av diffusjon og kapillært, løst i vann.

Permeabilitet kan være vanskelig å kontrollere i virkelige konstruksjoner, fordi det kan være en dynamisk materialparameter, i den forstand at permeabiliteten kan endres som funksjon av klima og aldringsprosesser.

Framtidig forskning ser i hovedsak å rette seg mot felteksponering og modeller, mens de "klassiske" prøvemeterene for måling av permeabilitet (Darcys lov, kapillærabsorpsjon, diffusjon og migrasjon i elektrisk felt) i hovedsak vil bli brukt for "sortering" av betong, samt koblet mot andre typer studier (felteksponering, modeller mm.).

7. Litteratur (et utvalg)

- /1/ Rilem Report 12 Ed.: J.Kropp and H.K.Hilsdorf Rilem TC 116 PCD: Performance criteria for concrete durability E&FN Spon London 1995, 327 p.
- /2/ Hall C.: Barrier performance of concrete: A review of fluid transport theory, Rilem Tc-146 TCF, Materials and Structures, 1994, 27 291-306
- /3/ Smeplass S.: Kapillærabsorpsjon som kvalitetskriterium rapport STF 65 A88028, 1988
- /4/ Fagerlund. G.: On the capillarity of concrete, Nordic Concrete research Publication No.1, 6.1 - 6.20 1980
- /5/ Nordtest metode NT Build 355, Concrete repairing materials and protective coating: diffusion cell method, chloride permeability, 1989
- /6/ Punkki J. and Sellevold E.J.: Capillary suction in concrete effects of drying procedure, Nordic concrete research Publ no.15 2/1994, pp. 59-74
- /7/ Lydersen A.L.: Mass transfer in engineering practice, 321 p. John Wiley & sons 1983
- /8/ Nordtest metode NT Build 369, Concrete, repair materials: Water diffusion, 1991
- /9/ Bazant Z.P., Najjar L.J.: Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, materials and structures 1972, 5, 25 pp. 3 - 20
- /10/ Mills R.H. Mass transfer of water vapour through concrete, Cement and concrete research 15, pp. 74-82, 1985
- /11/ Hedenblad G.: Moisture permeability of mature concrete, cement mortar and cement paste, 250 p. Div. of build. materials, Lund inst. of tech., rapport TVBM-1014, 1993
- /12/ Beton-Bogen, Herholdt et al. CtO, 1. utg, 719 p., Danmark 1979
- /13/ Streicher P.E., Alexander M.G.:3rd CANMET Dur. of Concr. Sup.papers pp.517-530 (1994)
- /14/ Luping T. Nilsson L-O.: ACI Materials Journal V.89 No.1 Jan.-Feb. pp. 49-53 (1992)
- /15/ Meletiou C.A. et al, ACI Materials Journal V.89 No.1 Jan.-Feb. pp. 83-89 (1992)
- /16/ Neville A.M. Properties of Concrete, Longmans, London 3rd ed. 1988, 779 p.
- /17/ Haynes H.: ACI SP-65 pp. 21-38, 1980
- /18/ Saltsprøytetekammer - metode for eksponering av betongprøver SINTEF - FCB

- /19/ Marchand J., Gerard B.: New developments in the modelling of mass transport processes in cement based composites: A Review. Second Canmet/ACI Int. Symp, Las Vegas Nevada 1995 45 p.
- /20/ CEN TC 165
- /21/ McMillan F.R, Lyse I.: Some permeability studies of concrete, Proceedings ACI Journal Dec. 1929 pp. 101-141
- /22/ Ruetters A., Vidal E.N. and Wing S.P.: An investigation of the permeability of mass concrete with particular reference to Boulder dam. ACI Journal March April 1935, pp.382-416
- /23/ Markestad A.: An investigation of concrete in regard to permeability problems and factors influencing the results of permeability tests, SINTEF-FCB rapp. STF 65 A 77027 278 p. 1977
- /24/ Powers T.C., Copeland L.E., Hayes J.C. and mann H.M.: Permeability of portland cement paste, Journal of the ACI, pp. 285-298, November 1954
- /25/ Hooton R.D., El-Dieb A.S.: Evaluation of water permeability of high performance concrete, Concrete under severe conditions, pp. 423-432, Chapman&Hall 1995
- /26/ Hearn N. and Mills R.H.: A simple permeameter for water or gas flow, Cement and Concrete Research, Vol 21 pp.257-261, 1991
- /27/ Dutron et al: The Cembureau co-operative programme on permeability measurements for concrete, Proc. 1st. Int. Rilem Congr. Vol.1 pp.41 - 48, Chapman & Hall 1987
- /28/ Nilsson L.O. Div. of build. materials, Lund inst. of tech., rapport TVBM-1003, 1980, 162 p.
- /29/ Page C.L., Short N.R. and tarras A.El, Diffusion of chloride ions in fardened cement paste Cem.Conc.Res 11 (3) pp. 395-406 1981
- /30/ Betonprøvning Hærdnet beton. Chloridinntængning, AEC Laboratoriet APM 302, 2. Utg. Maj 1991 Danmark 7 p.
- /31/ Kloridbestandighet for kystbruer av betong, Vegdirektoratet/Norges Byggeforskningsinstitutt 1993 154 p.
- /32/ Vegdirektoratet, Bruavdelingen, Pågående prosjekt, felt eksponering (se bla. Våre Veger 9/1995)
- /33/ Hearn N.: A recording permeameter for measuring time sensitive permeability of concrete, Ceramic Transactions Vol.16 1990 pp.463-475
- /34/ Clear C.A.: Cement and Concrete Association Technical Report 559, England (1985)
- /35/ Ripphausen B.: PhD thesis RWTH, Achen (1989)
- /36/ Bager D.H. and Sellevold E.J.: Cem. and Conc. res. Vol.16, pp.835-844 (1986)
- /37/ Bager D.H.: Hardened cement paste and concrete as a living material from the point of view of porestructure, Int.Kollokvium, Materials Science and restoration, 1983 Esslingen
- /38/ EN 206 Concrete - Performance, production, placing and compliance criteria
- /39/ Farstad T. m.fl: Metoder for bestemmelse av betongs vanntetthet (Fase 1) Rapport Nordtest prosjekt 1118-93 8 p. Norges Byggeforskningsinstitutt 1994
- /40/ Hooton R.D.: Concrete permeability and the search for the holy grail, The first Canadian symposium on cement and concrete, Université de Sherbrooke, Qué. Canada
- /41/ Kjennerud A.: Korrosjon av mørtel/betong ved vanngjennomgang, Rapport F-1503 Norges Byggeforskningsinstitutt 1973 57 p. + vedlegg
- /42/ Breyse D., Gérard B. and Lasne M.: ACI-SP 145, pp.1013-1032, (1994)
- /43/ Marchand J.: Upubliserte data ang. kapillærabsorpsjon og liquid replacement, Université Laval, Qué. Canada 1994

- /44/ Nilsson L.O., Massat M., Tang L.: The effect of Non-linear Chloride Binding on the prediction of chloride penetration into concrete structures, ACI SP 145 pp. 469 - 486, 1994
- /45/ Hauck C. Dr.Ing avh. NTH 1993
- /46/ Rodgers S. M.Sc. Thesis, Université Laval, Qué. Canada 1994
- /47/ Gerard B.: PhD-thesis Ecole Norm et Supérieure de Cachan - LMT, Paris/Université Laval, Qué. Canada Juni 1996.

**BETONGENS PERMEABILITET -
VURDERING AV MÅLEPRINSIPPER OG
METODER**

Prøveforelesning til graden dr.ing.

NTH 20. Desember 1995

Stefan Jacobsen

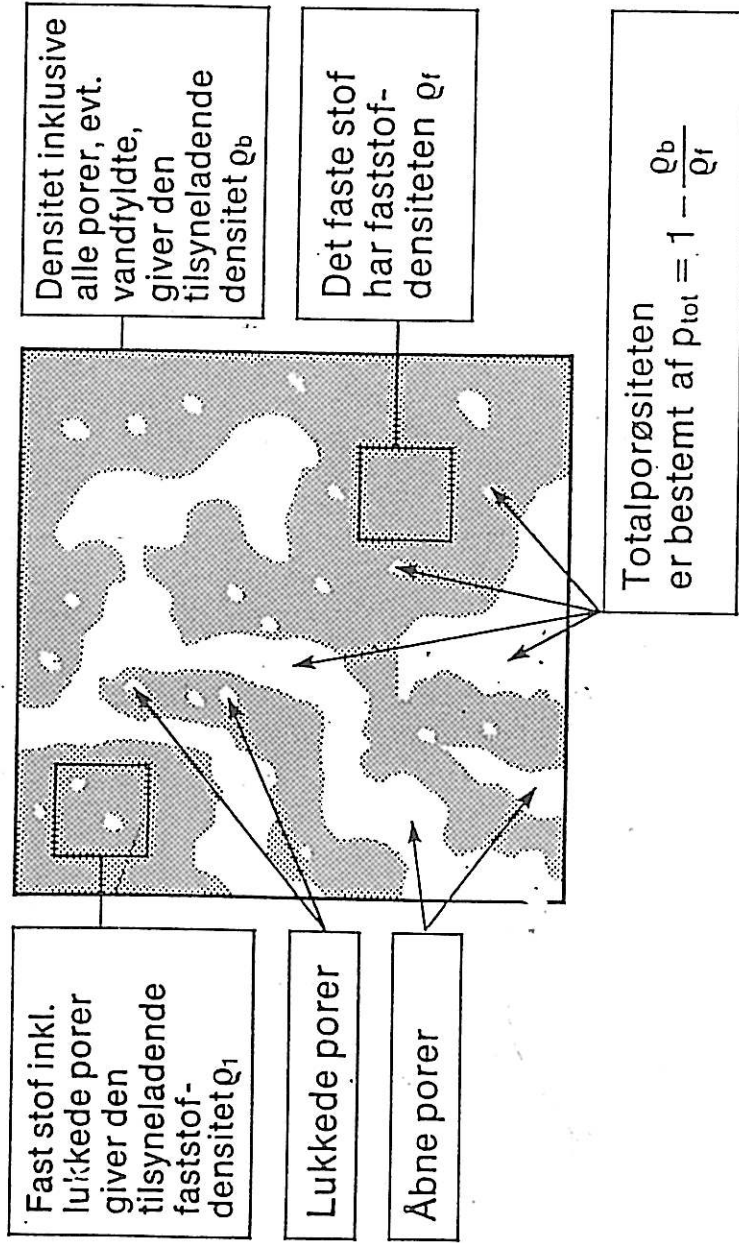
DEFINISJONER

- **Permeabilitet = gjennomtrengelighet**
 - **Massetransport av gass, væske, ioner i betong**
- **Prøving av permeabilitet**
 - **Eksponeere betongprøve, måle massetransport over tid**
- **Prøveprinsipp**
 - **Teoretisk bakgrunn: drivkraft og parametre**
 - **Prøveoppstilling**
- **Prøvemethode: detaljert beskrivelse**

FORMÅL - HOVEDVEKT

- Beskrive prøveprinsipper
- Vurdere prøveprinsipp
 - vekt på fukttilstand
 - forhold til naturlig eksponering
- Relatert til bestandighet (Rilem TC 116 PCD)
 - vann, vanddamp, CO₂, O₂, Cl, alkalier
- Mindre vekt
 - eksperimentelle detaljer
 - tettende funksjon/ulike væsker (TC 146 TCF)

BETONG ET PORØST MATERIALE



(Fra Beton-Bogen, 1979)

TRANSPORT FOREGÅR I PØRER

BETONG - PORØST MATERIALE

- **Variasjon i kvalitet**
 - Porevolum
 - Porestørrelse
 - Poreform
 - Porekontinuitet
 - Poreoverflater
- **Variasjon i klima**
 - vannmetningsgrad -> tilgjengelig porevolum

DRIVKREFTER SOM ER GRUNNLAG FOR PRØVEPRINSIPPER

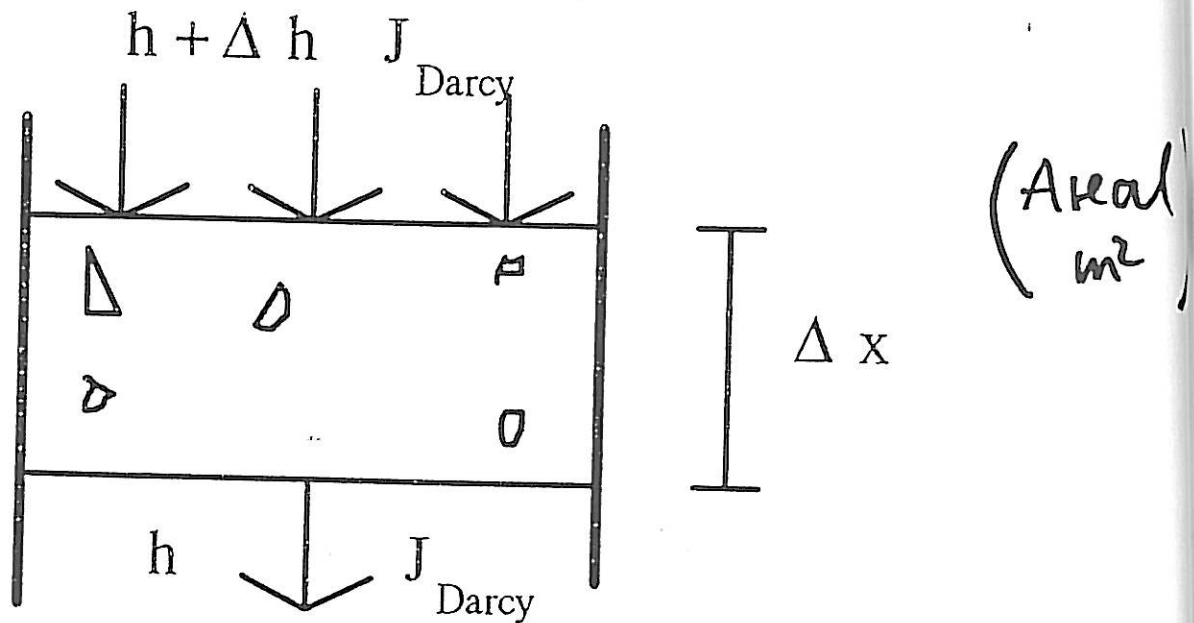
- 1 • Trykk (væske, gass, inkl. temperaturforskjell)**
- 2 • Overflatespenning (kapillærkrefter)**
- 3 • Konsentrasjonsforskjell (diffusjon, osmose)**
- 4 • Elektrisk felt**

INNHOLD

- • Stasjonær strømning
 - Prøveprinsipper
 - Samtidige transportmekanismer
- Ikke-stasjonær strømning/hurtigmatoder
- Feltmetoder
- Modeller
- Materialets betydning - naturlig eksponering
- Oppsummering

1. TRYKK

STASJONÆR VÆSKESTRØM DARCYS LOV



STRØMNING $J_{Darcy} = K \frac{\Delta h}{\Delta x}$ $\frac{m}{s} - \frac{m^3}{m^2 \cdot s}$

PERMEAB. KOEFF. K $\frac{m}{s} -$

TRYKKGRADIENT $\frac{\Delta h}{\Delta x}$ $\frac{m}{m}$

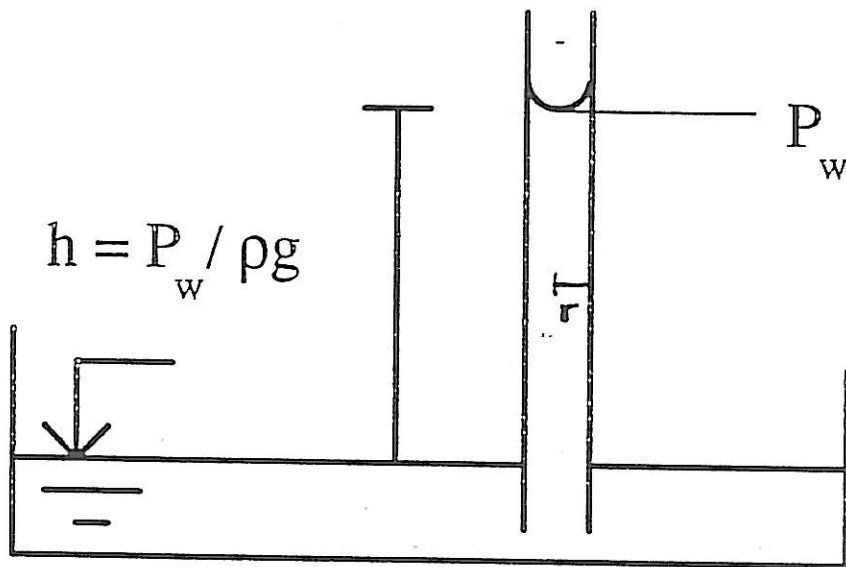
(GASS: $K - m^2$)

DARCYS LOV

- + • Empirisk sammenheng
- Høyere K jo høyere porøsitet
- • Mindre praktisk for betongkvaliteter $v/b \leq 0.40$
- Gasspermeabilitet tørker ut betong, ikke relevant for væsker
- Forutsetter mettet strømming (ingen menisker)
- +/- • Kan være meget følsom for fukttilstand/herding

2. KAPILLÆR SUGING:

- VANNETS OVER FLATE SPENNING
- UNDERTRYKK I VÆSKE



LAPLACE FOR
SYLINDER

$$P_w = 2\sigma \cos\alpha / r$$

I PRAKSIS:

MINDRE PORER - STØRRE UNDERTRYKK

(SUGER HØYERE)

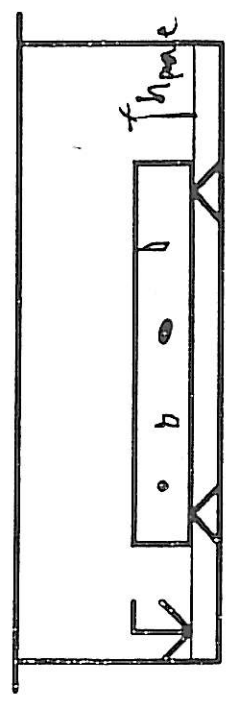
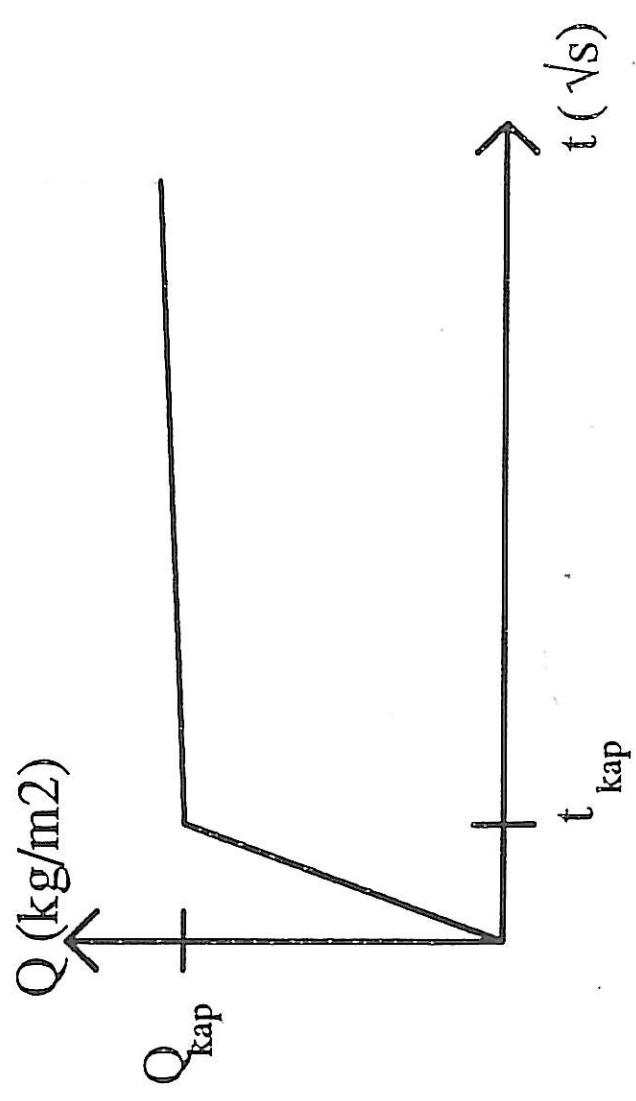
STØRRE PORER - MINDRE MOTSTAND

(LAM. STRØM)

(SUGER RASKERE)

KAPILLÆR ABSORPSJON I BETONG PRØVER

EMPIRISK SAMMENHENG



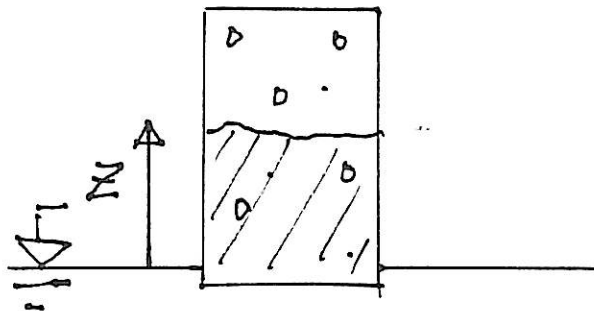
MOTSTANDSTALL $m = \frac{t_{\text{kap}}}{h^2} \quad \left(\frac{\text{s}}{\text{m}^2}\right)$

KAPILLÆR STI GEHOYDE $= \sqrt{\frac{t}{m}} \quad (\text{m})$

KAPILLÆR ABS. I KONSTRUKSJON

KVADRATROT LOVEN

$z = \sqrt{\frac{t}{m}}$ MINDRE GYLDIG FOR
STØRRE TYKKELSER / STIGE HØYDER
($z \sim \sqrt[3]{t} - \sqrt[4]{t}$)



DVS.

m MÅLT PÅ TYNNE SKIVER

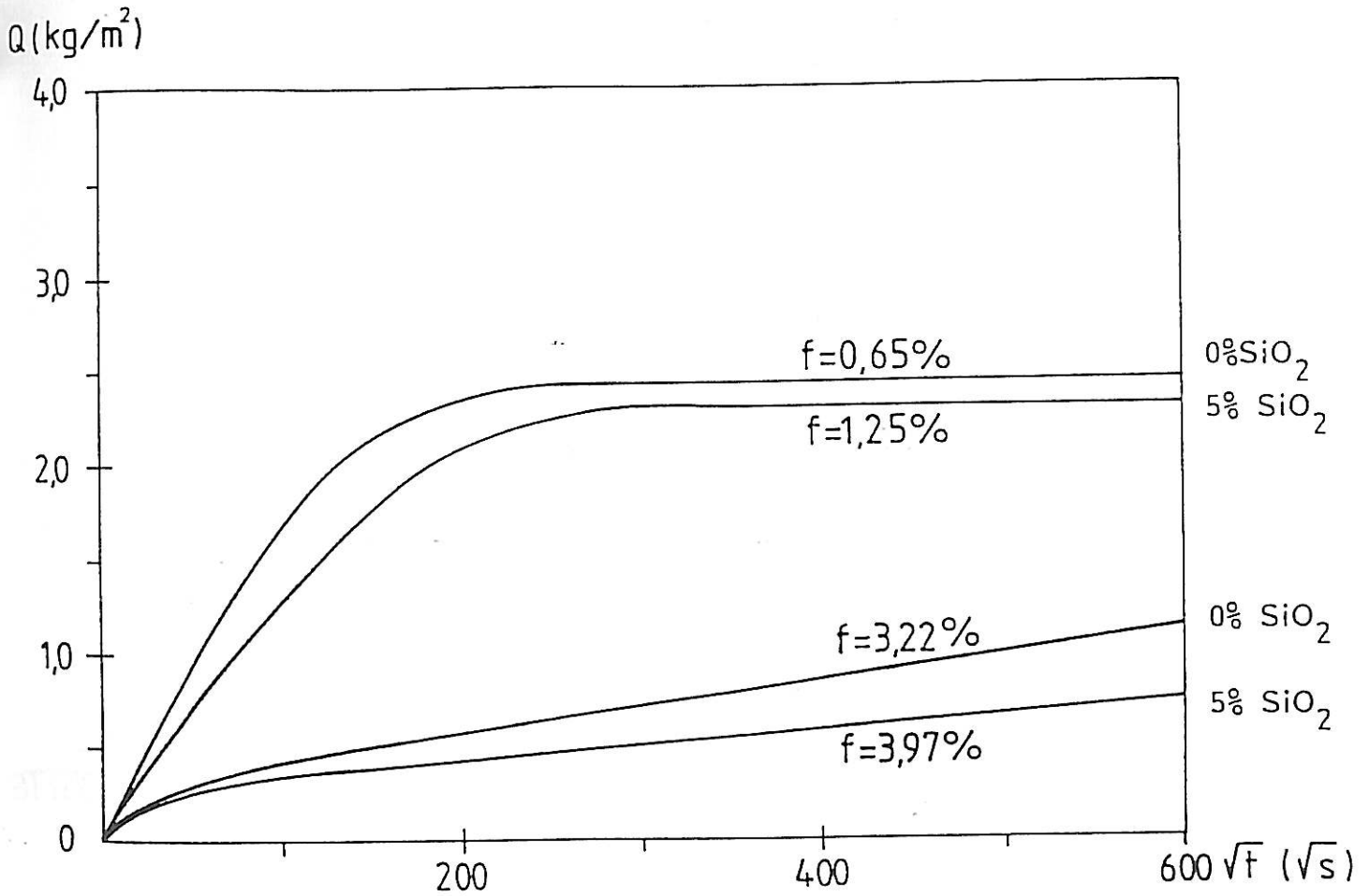
MINDRE REPRESENTATIV FOR

STØRRE KONSTRUKSJONS DELER

- LUFT
- TYNGDE AKS.
- ETTER FYLLING AV MINDRE PORER

BETYDNING AV FUKTINHOLD VED START

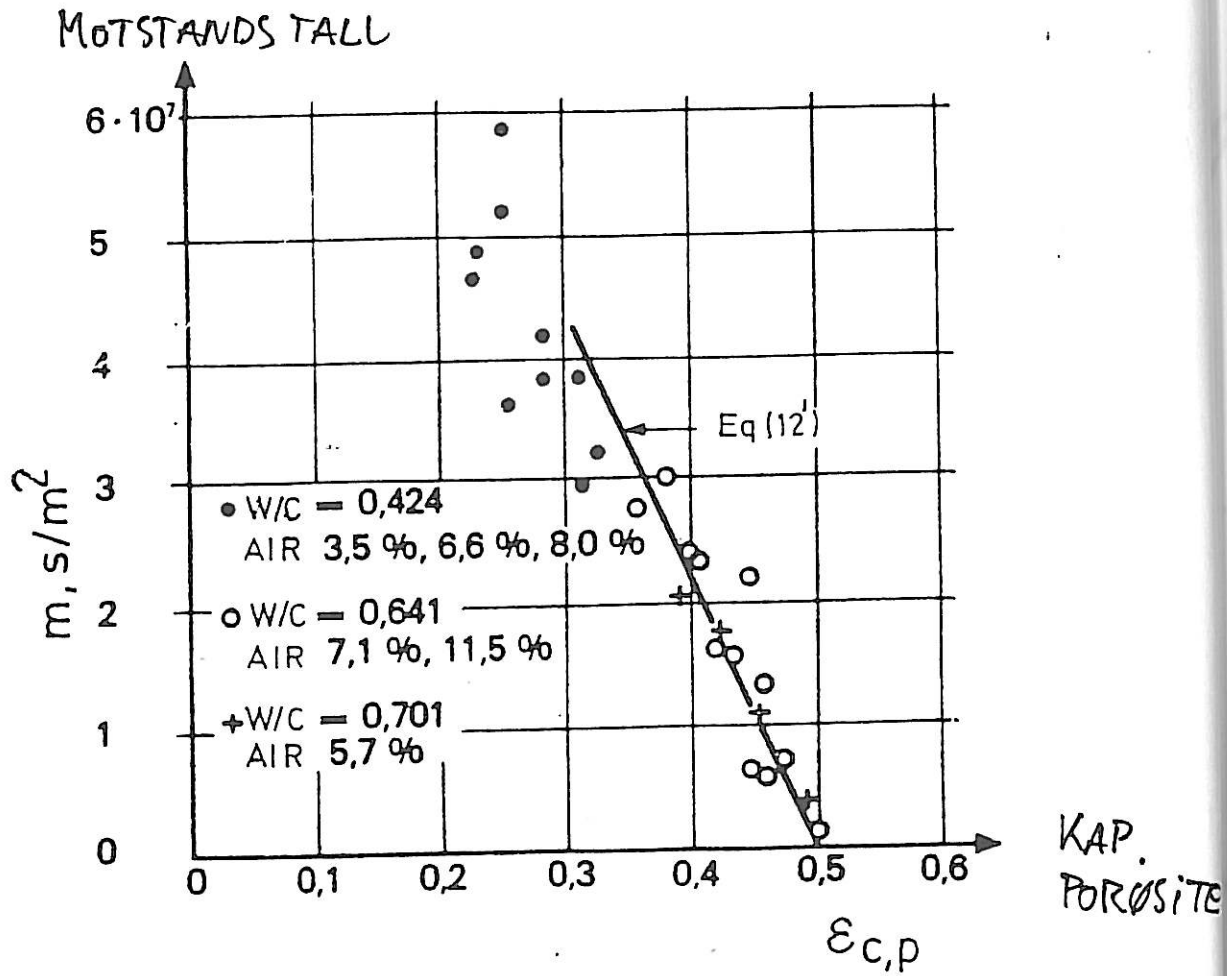
BETONG MED $v/b = 0.5$ 0 og 5 % Si



(Smeplass 1988)

MATERIAL SORTERING

EKS. SAMMENHENG KAPILLÆR POROSITET - M



(Fagelund 1980)

KAPILLÆR ABSORPSJON

- +
 - Enkel, hurtig
 - Direkte simulering av vannopptak i felt

- - Noe grov
 - Avhenger av forbehandling/startfukttilstand
 - Kvadratrottloven $z = \sqrt{\frac{t}{m}}$ er mindre gyldig for
 - høyfast betong
 - store stige høyder
 - "ikke helt tør" betong

3. DIFFUSJON

TRANSPORT PGA. KONSENTRASJONS FORSWELLER

ULIKET YPER GASS DIFFUSJON I PORE

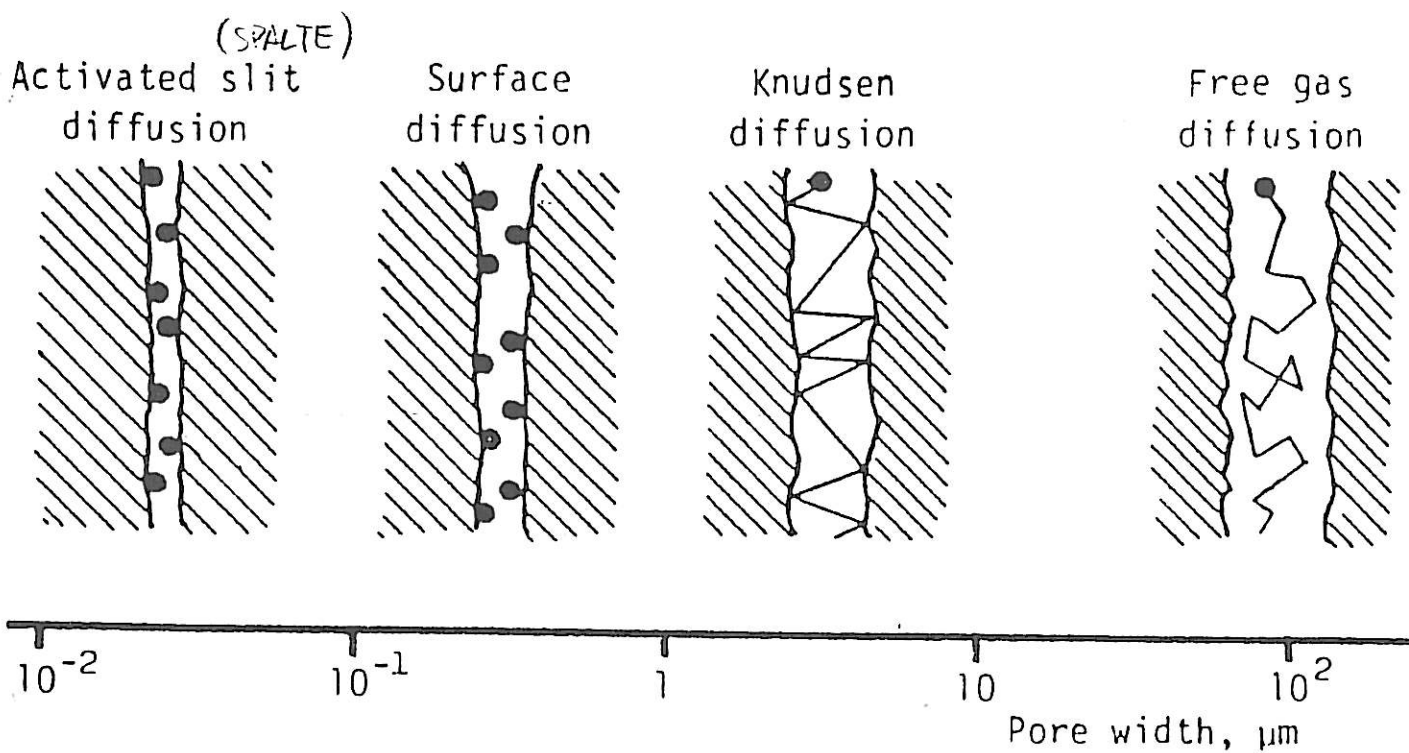


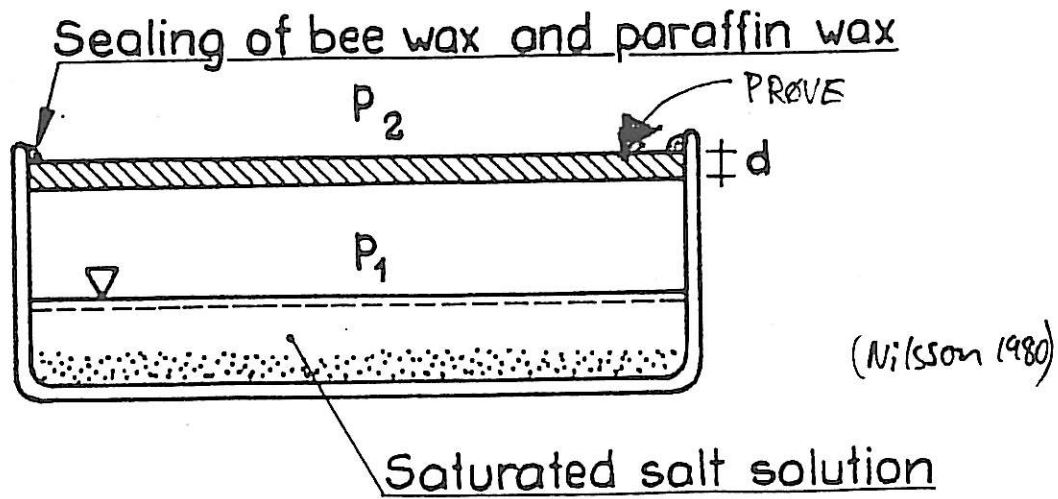
Figure 1.5 Dominating transport mechanisms as a function of the pore width⁴

(Efter Lydersen, 1983)

DIFFUSJON OGSÅ AV

- VÆSKER
- IONER
- (- FAST STOFF, LITTE AKT. FOR BETONG)

DIFFUSJON - EKS. KOPPMETODEN



Ficks 1. lov - STASJONÆR STRØM

STRØM $J_{H_2O} = D_{H_2O} \frac{P_2 - P_1}{d}$ $\frac{kg}{m^2 \cdot s}$

DIFF. KOEFF./D. PERM. D_{H_2O} $\frac{kg}{m \cdot Pa \cdot s}$

TRYKK P Pa
 d m

ALT.: KONSENTRASJON - $C = \frac{kg}{m^3}$ (Eks. for $C(l^\circ)$)

STRØM : $J = D \frac{\Delta C}{\Delta x}$

DIFF. KOEFF. : D $\frac{m^2}{s}$

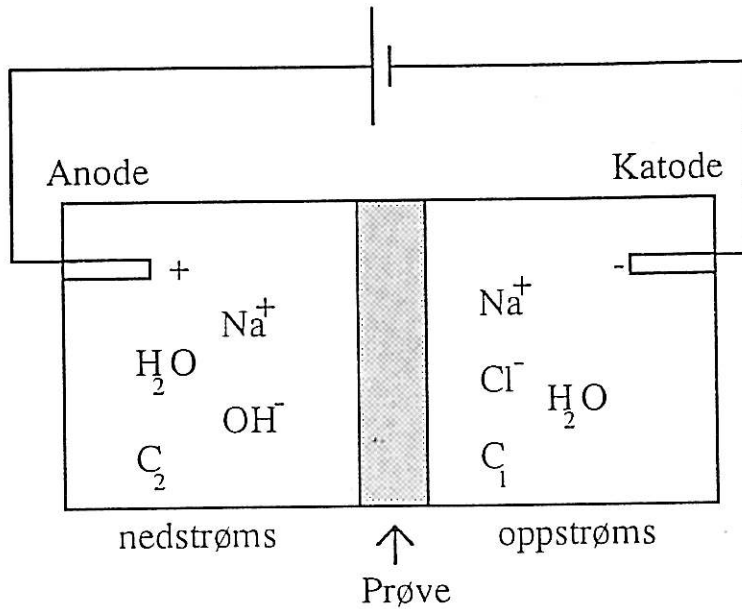
KONS. GRAD. : $\frac{\Delta C}{\Delta x}$ $\frac{kg}{m^3 \cdot m}$

DIFFUSJON

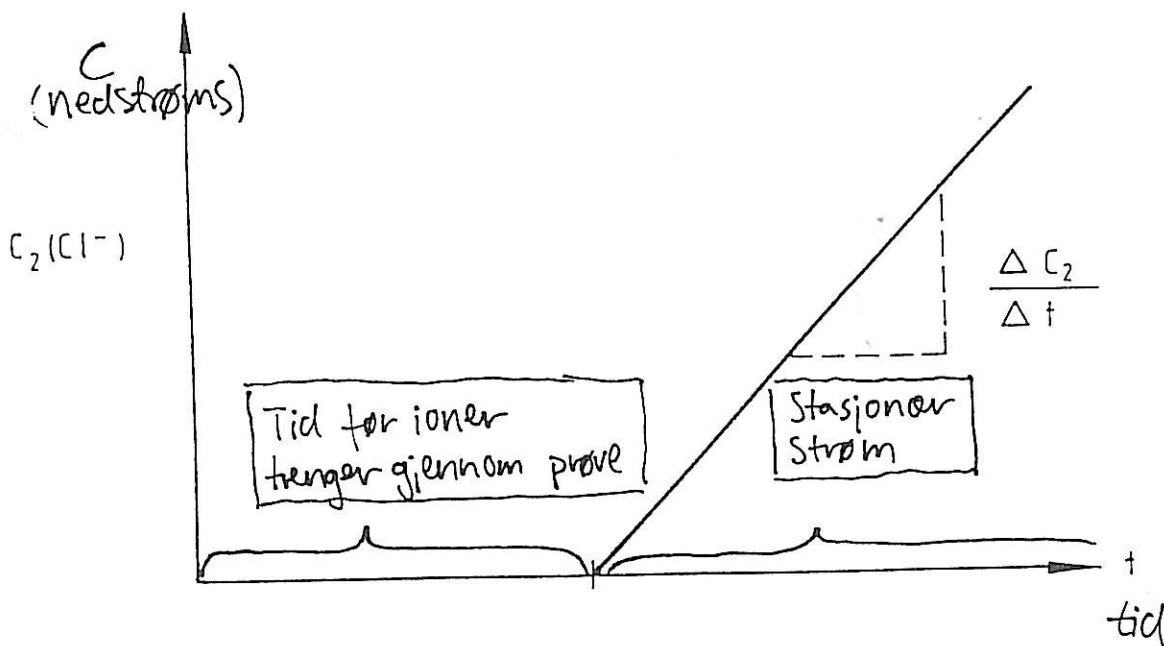
- +
 - Enkel, rimelig
 - Samme transport som i felt – dvs. *simultant felt (gass)*
 - God for overflatebehandling (H_2O , CO_2 , O_2)
- - Tidkrevende for betong
 - D funksjon av konsentrasjon for betong
 - H_2O
 - Cl
 - CO_2

MIGRASJON I ELEKTRISK FELT

- IONER, LADEDE PARTIKLER
- ELEKTROLYTT
- LIKESTRØM → DRIFT AV IONER.



KLORID (Cl^-) PERMEABILITET ($\sim \frac{\Delta C}{\Delta t}$) VED STASJONÆR STRØM



VED VARIERENDE SPENNING: ELEKTROKJEMI - NERNST-PLANCK.

MIGRASJON I ELEKTRISK FELT

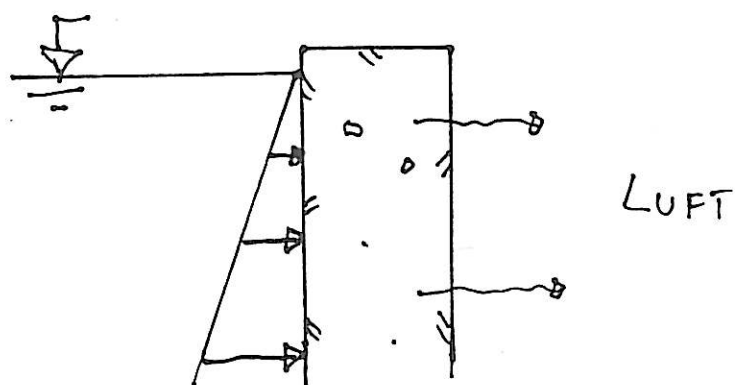
- +
 - Hurtig
 - Sortering (kan også bruke el. motstand og ladning)
- - Transportform ulik transport i felt
 - Betongens komponenter tendens til migrasjon (Ca, Na, K, Al, OH, Fe)

INNHOLD

- Stasjonær strømning
 - Prøveprinsipper
 - Samtidige transportmekanismer
- Ikke-stasjonær strømning/hurtigmatoder
- Feltmetoder
- Modeller
- Materialets betydning - naturlig eksponering
- Oppsummering

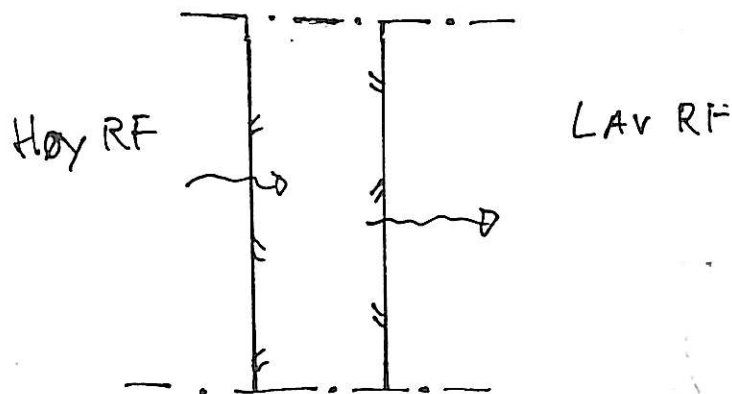
SAMTIDIGE TRANSPORT MEKANISMER

EKS.1: VANNTRYKK OPPSTRØMS
LUFT NEDSTRØMS



OVERGANG VÆSKESTRØM → DIFFUSJON

EKS.2: LUFT OPP- OG NEDSTRØMS



KONDENSERING / KAPILLÆR KREFTER
OG DIFFUSJON

TRANSPORT VED AVTAGENDE VANNMETNINGSGRAD

VANNM. GR. REL. FUKT (FUKTIGHET)

TRANSPORT

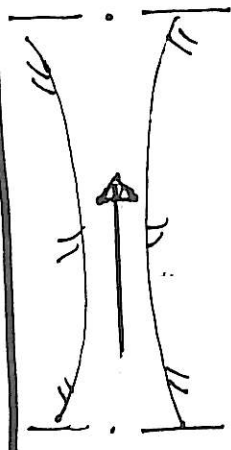
PORE

PERMEABILITETS-PARAMETER

HØY

1

STRØMNING

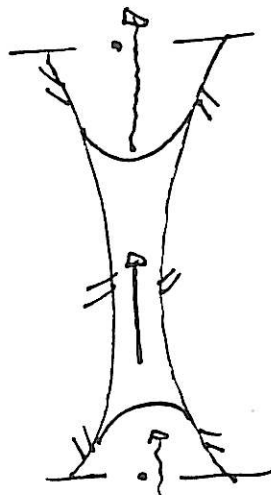


K

MIDDELS

1-0.45

STROM M/ KAP. KREFTER OG DIFFUSION

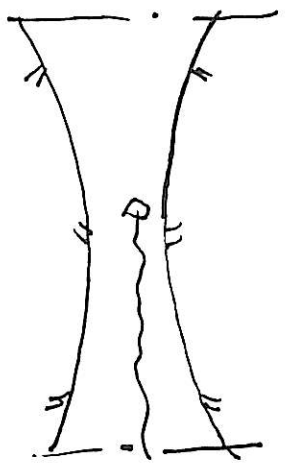


m, D

LAV

(< 0.45)

DIFFUSION



D

DIFFUSJON - KAPILLÆRABS.

- Begge realistiske
- Mindre forskjell i transportform jo tettere betong
- Hovedforskjell for "tett" betong: (?)
 - Kapillærabsorpsjon: mål på evne til opptak av væske
 - Diffusjon: mål på evne til transport

FORHOLD PRØVEPRINSIPP - VIRKELIG TRANSPORT:

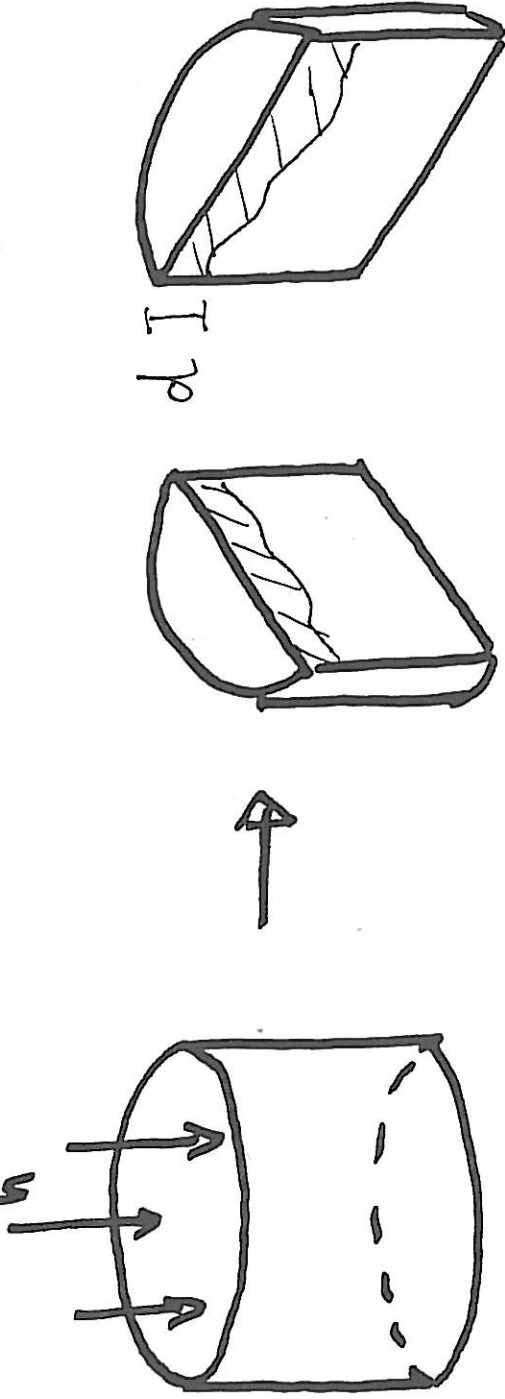
- Darcy strømning
 - Sjelden mettet strømning uten kapillærkrefter
- Kapillær strømning og diffusjon
 - Ofte samtidig
- Migrasjon i elektrisk felt
 - Sjelden
 - Teoretisk mulig ved elektrokjemiske rehabiliteringsmetoder (katodisk beskyttelse, realkalisering, desalinering)

INNHOOLD

- Stasjonær strømning
 - Prøveprinsipper
 - Samtidige transportmekanismer
- Ikke-stasjonær strømning/hurtigmatoder
- Feltmetoder
- Modeller
- Materialets betydning - naturlig eksponering
- Oppsummering

IKKE-STASJONÆR (STRØM ENDRES OVER
TID)

VANNINNTRÈNGNING



max d - funksjonskrav

VANNINNTRENGNING FORTS.

+ • ENKEL METODE

- KANSKE MERE REALISTISK
ENN DARCY (VANN KUN OPPSTRØMS)

÷ • HØY SPREDNING

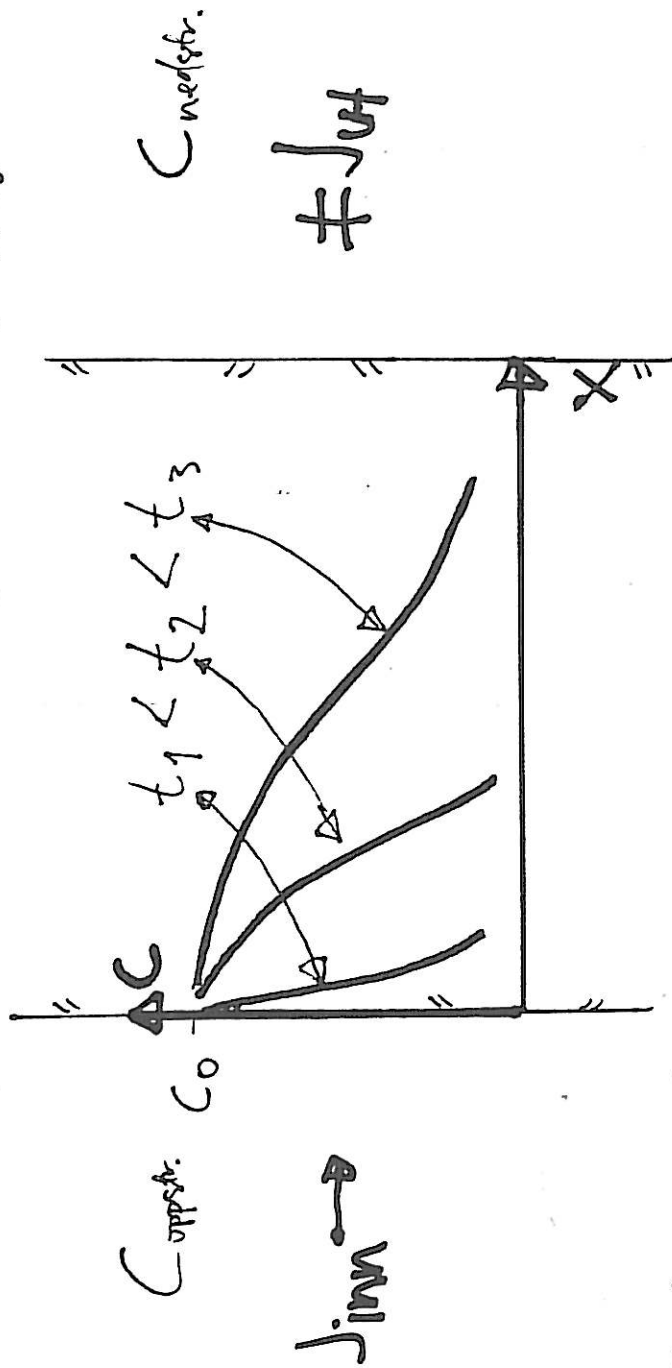
- SKILLER DÅRLIG MELLOM
"GOD" OG "VELDIG GOD" BETONG.

- FUKTTILSTAND IKKE DEFINERT
- RAND BETINGELSER / STØRRELSE

FORSLAG:

- BRUKE "IN SITU" FUKTTILSTAND
ELLER
"SELVUTTØRKET" FUKTTILSTAND
(ISOLERT HERDING).

IKKE - STASJONÆR DIFFUSJON (2): STRØM ENDRES OVER TID



Ficks 2. lov

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right), \quad C = C(x, t)$$

BETONG

- D IKKE KONSTANT

- H_2O
- Cl^-
- CO_2

- IKKE ANALYTISK LØSNING PÅ
 $C(x,t)$ (FICKS 2. LOV)

- PROBLEM

- IKKE-STASJONÆR STRØM MEST REALISTISK
- MEST KOMPLISERT Å MÅLE PÅ "GOD" MÅTE.

INNHold

- Stasjonær strømning
 - Prøveprinsipper
 - Samtidige transportmekanismer
- Ikke-stasjonær strømning/hurtigmatoder
- • Feltmetoder
- Modeller
- Materialets betydning - naturlig eksponering
- Oppsummering

BETONG

- D IKKE KONSTANT

- H_2O
- Cl^-
- CO_2

- IKKE ANALYTISK LØSNING PÅ
 $C(x,t)$ (FICKS 2. LOV)

- PROBLEM

- IKKE-STASJONÆR STRØM MEST REALISTISK
- MEST KOMPLISERT Å MÅLE PÅ "GOD" MÅTE.

INNHOOLD

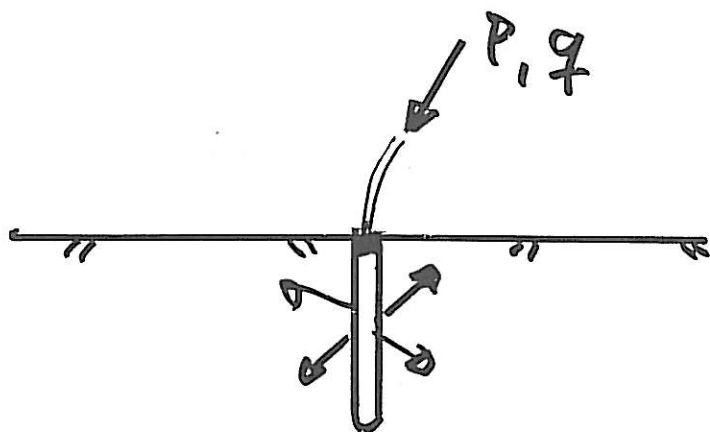
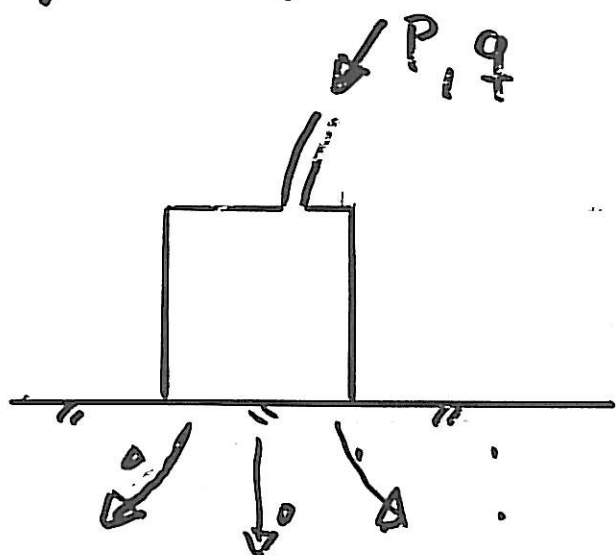
- Stasjonær strømning
 - Prøveprinsipper
 - Samtidige transportmekanismer
- Ikke-stasjonær strømning/hurtigmatoder
- • Feltmetoder
- Modeller
- Materialets betydning - naturlig eksponering
- Oppsummering

FELT PRØVE METODER FOR VANN PERMEABILITET

To prinsipper

1) Overflate

2) 'Bulk' betong



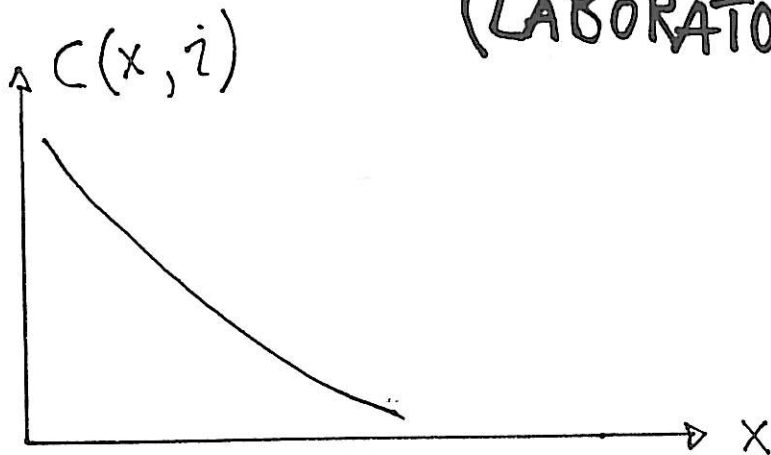
Måler både absorpsjon (atm) og
"permeabilitet" (K)

+ : - virkelig betong
- tørt

÷ : - fukt tilstand varierer
- spredning

FELT METODE Cl^- -DIFFUSJON

- MÅLE KLORID PROFIL VED KJENT ALDER ($t=i$) $\rightarrow C(x, i)$
(LABORATORIE ANALYSE)

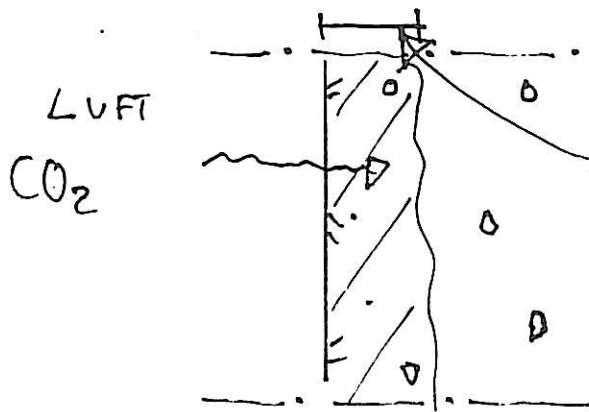


- BEREGNE D FRA FICKS 2. LOV $C(x, t)$

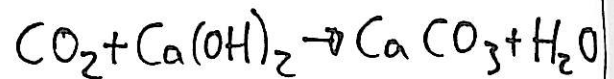
- NB!
- D MÅLT I LAB. HØYERE
(KYSTBRU: $D_{\text{LAB}} = 5-60 \times D_{\text{FELT}}$)
 - DVS. LAB. METODE KONSERVATIV
 - IKKE KUN DIFFUSJON I FELT
 - KJEMISK BINDING AV KLORIDER
 $\rightarrow D_{\text{eff}}$ IKKE KONSTANT.

FELTMETODE CO₂-DIFFUSJON

- MÅLE KARBONATISERINGSDYBDE d_k



d_k KARBONATISERING:

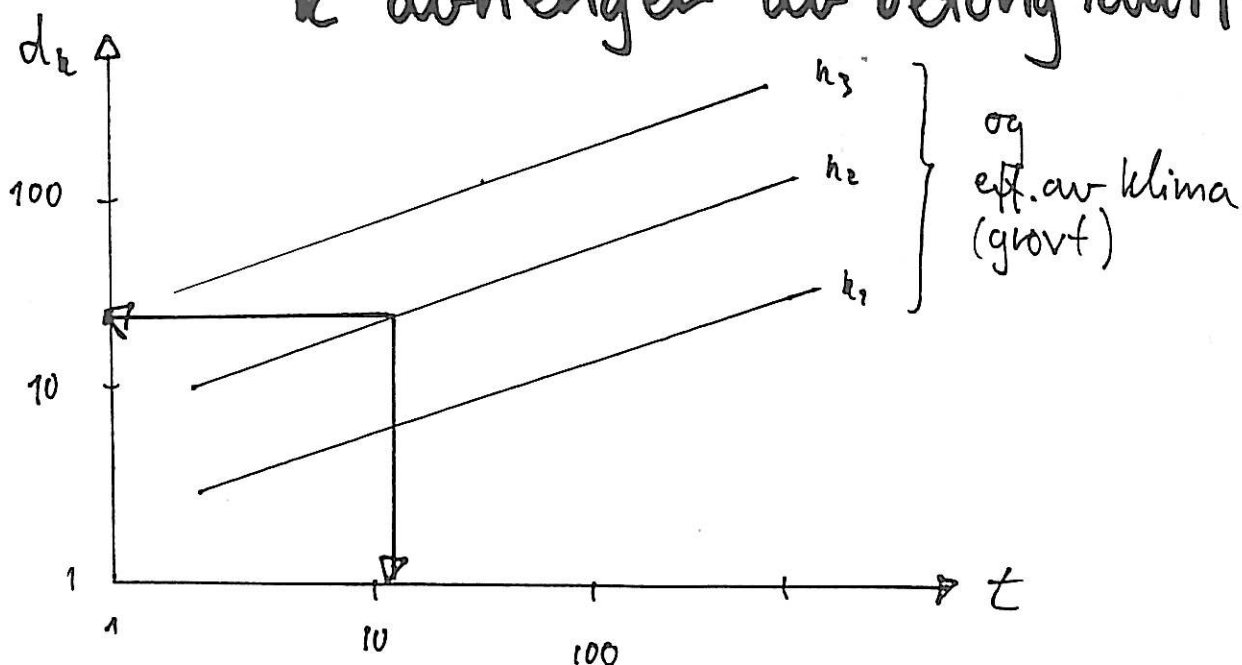


D_{CO_2} IKKE KONSTANT

- TETTING AV BETONG (EX. SLAGG)
- AVH. AV FUKT NIVÅ

$$d_k = k \cdot \sqrt{t} \quad (\text{TILNÆRMET LØSNING})$$

k avhenger av betong kvalitet.



⊖ • KARB. DYBDE VARIERER
MYE INNEN ËN KONSTRUKSJON

- MIKROKLIMA

- VAR. I BET. KVALITET
(SOM FOR $CL^{\ddot{}}$)

→ GROV METODE

⊕ • MEGET RASK OG
RIMELIG

- SER KLAR EFFEKT AV
OVERFLATE BEHANDLING

- KORRELERER TIL ANDRE
FELT METODER.

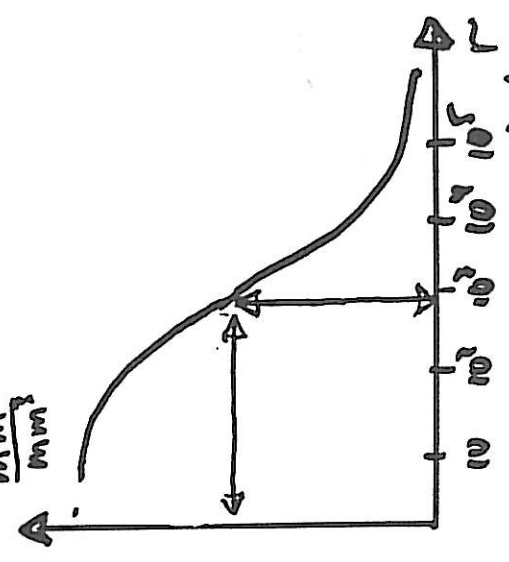
INNHOOLD

- Stasjonær strømning
 - Prøveprinsipper
 - Samtidige transportmekanismer
- Ikke-stasjonær strømning/hurtigmatoder
- Feltmetoder
- • Modeller
- Materialets betydning - naturlig eksponering
- Oppsummering

MODELLERING - MIKRO → MAKRO

MATERIAL-
EGENSKAP

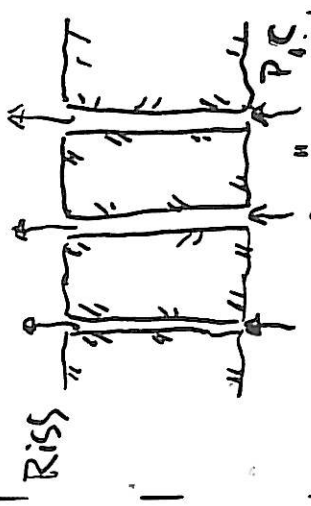
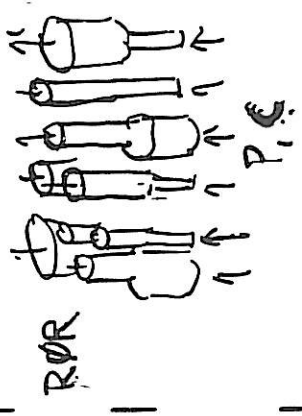
Porøsitet (kumulativ)
 $\frac{mm^3}{mm^3}$



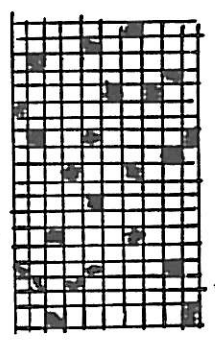
Eks.: Porefordeling
(MIP)

TRANSPORT-

MODELL

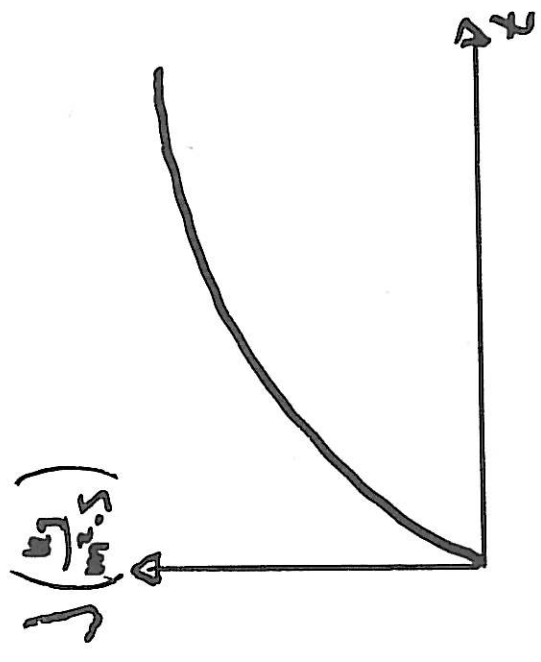


GJENNOMSTR ("PERCOLATION")



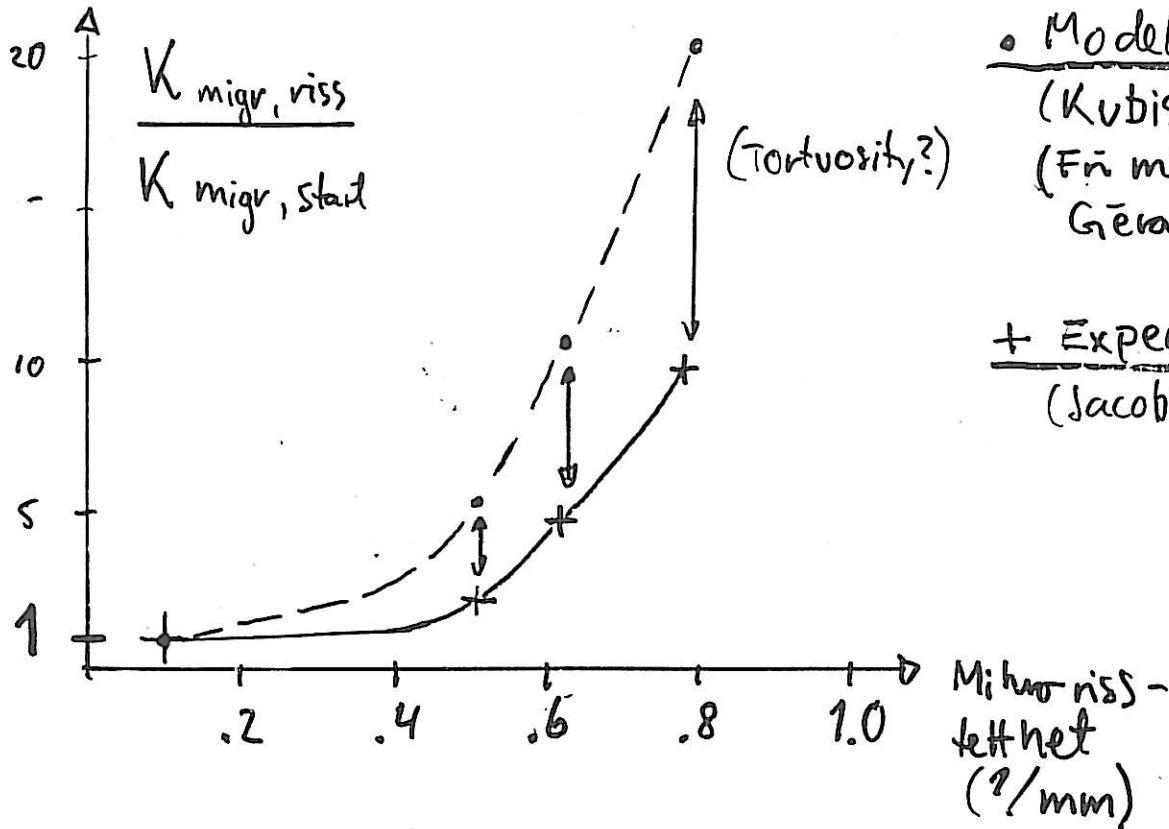
↑ P, C ↑ ↑

MASSE-
TRANSPORT



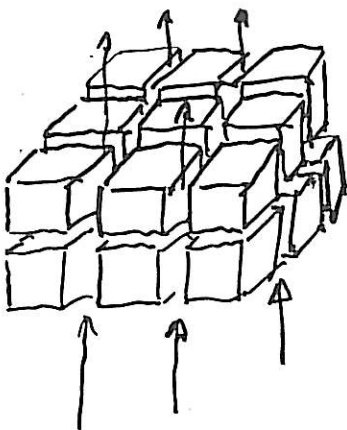
EKS. MODELL VS. EKSPERIMENT

KLORIDMIGRASJON - RISSTETHET

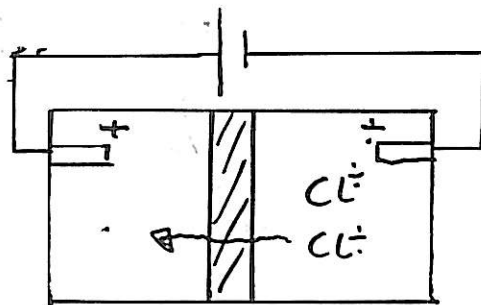


• Modell
 (Kubisk rissvol.)
 (Fr migrasjon i riss)
 Gérard 1994.

+ Experiment
 (Jacobsen et al 1995)



MODELL.



EKSPERIMENT.

MODELLER AVHENGIGE AV

- Kjennskap til transportmekanisme
- Gode materialdata
- Gode verifiseringsforsøk (laboratorium og felt)

INNHOOLD

- Stasjonær strømning
 - Prøveprinsipper
 - Samtidige transportmekanismer
- Ikke-stasjonær strømning/hurtigmatoder
- Feltmetoder
- Modeller
- • Materialets betydning - naturlig eksponering
- Oppsummering

MATERIALETS BETYDNING:

“Betong et levende materiale”

- Permeabilitet kan endres over tid - aldring
 - $K, m, D, K_{migr} = f(t, T, RF/\text{vannmetningsgrad})$
- Økning av permeabilitet
 - Tøking/gjenmetning, “åpning” av mikrostruktur
 - Kjemiske reaksjoner, utluting
 - Mikroriss
- Reduksjon av permeabilitet
 - Selvparasjon av mikroriss
 - Kjemiske reaksjoner, utfellinger

DÅRLIG KORRELASJON LABORATORIE - TRANSPORT IN-SITU:

- Aldringsprosesser
 - felt: overflatebetong - lab: "bulk" betong
- Ulike transportmekanismer/eksponeringsformer
- Spredning/inhomogenitet i felt betong

FAKTORER SOM KAN ENDRE BETONGS PERMEABILITET.

Tabell 2: Faktorer/prosesser som kan gi endringer i permeabilitet

Prinsipp/-metode	Endringsprosess	Endring	Referanse
Trykk K, K' (vann, gass)	Tørking	Økes	/24, 1, 27/
	Utluting	Økes	/23, 41/
	Riss	Økes	/34, 35, 42/
	Karbonatisering	Reduseres (OPC), kan øke for slagg	/1/
	Selvtetting/healing	Reduseres	/33, 34, 35/
Kap.abs. m	Kondisjonering	Reduseres ved hard tørking, Følsom for initiell fuktinnh. og tørketemp.	/6, 43/ /3/
	Begroing/utfelling	Økes	/31/
Diffusjon D	Tørking	D_{H_2O} økes,	/9, 11/
	Variasjon i fukt	D_{H_2O} funksjon av damptrykk.	/1/
	Karbonatisering	Reduseres (OPC), kan øke for slagg	/44/
	Binding av Cl ⁻	D_{Cl} funksjon av mengde Cl ⁻ som bindes	
El.spenning dC/dt, K_{nier}	Tørking	Økes som K	/45, 46/
	Elektrisk felt	Transport av komponenter pga. el. strøm (Ca, Na, K, OH etc.), mulig effekt på dC/dt, K_{nier}	/47/

GENERELT: FUKT TIL STAND / VANNMETN. GRAD VIKTIG.

VANLIGSTE METODER I NORGE:

- **Laboratorium**
 - Kapillærabsorpsjon
 - Vanninntrengning
 - ikke-stasjonær diffusjon
 - kloridpermeabilitet (elektrisk spenning)
- **Felt**
 - kloridprofil
 - karbonatiseringsdybde

INNHOOLD

- Stasjonær strømning
 - Prøveprinsipper
 - Samtidige transportmekanismer
- Ikke-stasjonær strømning/hurtigmatoder
- Feltmetoder
- Modeller
- Materialets betydning - naturlig eksponering
- Oppsummering

OPPSUMMERING

- Darcys lov: Tidkrevende
- Kapillærabs.: Hurtig, enkel, realistisk, MEN grov
- Diffusjon: Enkel, realistisk, MEN tidkrevende
- Migrasjon: Hurtig, MEN fjernt fra natur
- Feltmetoder: Grove eller basert på konstant D
 - ALLE AVHENGIGE AV FUKTTILSTAND, ALDRING mm.
- Modeller: alternativ til prøving, forutsetter kunnskap om transport og material samt verifisering

Sortering

OPPSUMMERING (forts.):

- “Klassiske” prøvemeter (K, m, D, K_{migr})
 - “rene” transportprinsipper/mekanismer ->
 - brukes til sortering/rangering av betonger
- For utendørs betong
 - Kapillærabsorpsjon viktigst ved fuktopptak
 - Diffusjon og strømmning viktigst ved transport

OPPSUMMERING (forts.):

- **Relasjon prøvem metode - felt kompleks**
- **Kunnskap om material/porestruktur viktig**
 - **Permeabilitet er en dynamisk materialparameter**
 - **Aldring**