

DTM

SÆRTRYK 120 *Ingeniøren nr. 4, 1961* kr. 2,-
DK 551.491.4(489):620.193.2:666.97.015.8

Werner Christensen og Alice Kjær
Danske vandtypers indvirkning på beton

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT
I kommission hos Teknisk Forlag · København 1961

Danske vandtypers indvirkning på beton

Af statsgeolog Werner Christensen
Danmarks geologiske Undersøgelse

og civilingeniør Alice Kjær,
Statens Byggeforskningsinstitut

551.491.4(489):620.193.2:666.97.015.8

Forfatterne redegør nedenfor for resultaterne af et studie og en undersøgelse, gennemført ved et samarbejde mellem Danmarks geologiske undersøgelse og Statens Byggeforskningsinstitut, af Danmarks naturlige vandforekomsters geologiske og kemiske forhold med henblik på deres relation til beton.

Indledning.

I henseende til betons teknologi optræder vand i to forskellige egenskaber, nemlig dels under støbning og hærdning som delmateriale, dels gennem betonens senere levetid som et omgivende materiale, hvori aggressive komponenter kan findes opløst.

For støbevandets vedkommende er her ud fra litteraturen, herunder (59 I 1) opstillet kriterier for at bedømme, om en vandtype er egnet til betonstøbning.

Det omgivende vand må accepteres som det er, men af hensyn til faren for angreb på beton, er det af stor betydning at kende omgivelsernes kemiske tilstand. Analyser af vand fra naturlige vandforekomster vil derfor være af værdi ved en bedømmelse af omgivelsernes indvirkning på beton, men man må ikke overvurdere denne betydning, idet vandet fra såvel søer og vandløb som brønde og borer er en blanding af tilsivet vand fra et vist opland, inden for hvilket den kemiske tilstand i jorden kan variere meget stærkt.

Her er ud fra DGU's egne undersøgelser (36 Ø 1) samt fra litteraturen i øvrigt forsøgt klarlagt, hvilke betonskadelige komponenter forskellige vandtyper kan indeholde, og hvorledes de påvirker hærdnet beton.

Samspillet mellem atmosfære, nedbør og jord betinger forvitringens forløb og dermed indholdet af opløste stoffer i såvel overfladevand som grundvand, idet man ved

jord her forstår både de øvre jordlag og de dybere liggende geologiske aflejringer, som vandet kommer i berøring med.

Klimaet spiller en betydelig rolle for forvitringens forløb og derved for de kemiske forhold i jorden. Danmark ligger i den tempererede zone, og nedbøren er større end fordampningen.

Jordbunden består langt overvejende af moræne- og smeltvandsaflejringer fra istiden, stærkt vekslende mellem ler og sand (54 S 14) og (59 M 8). Disse aflejringer er næsten alle afsat med et større eller mindre indhold af kalk, som dog i tidens løb er udvasket i de øvre jordlag; under visse forhold er kalkudvaskningen trængt ned til betydelige dybder.

Under den sidste istid dækkede isen kun øerne samt det nordlige og østlige Jylland. I de øvrige områder er de øvre jordlag langt stærkere forvitret og udvasket end sidste istids aflejringer; også hedesletterne består af stærkt forvitrede sand- og grusaflejringer.

I Vendsyssel findes udbredte hævede marine aflejringer, og sådanne forekommer flere steder langs kysterne. Til de marine aflejringer hører også marsken og kunstigt afvandede havarealer.

Istidsaflejringerne har mange steder kun ringe mægtighed, og de ældre aflejringer kan her øve en betydelig indflydelse på den geokemiske udvikling og vandets kemiske tilstand. På øerne og i det nordøstlige Jylland består prækvartæret i overvejende grad af

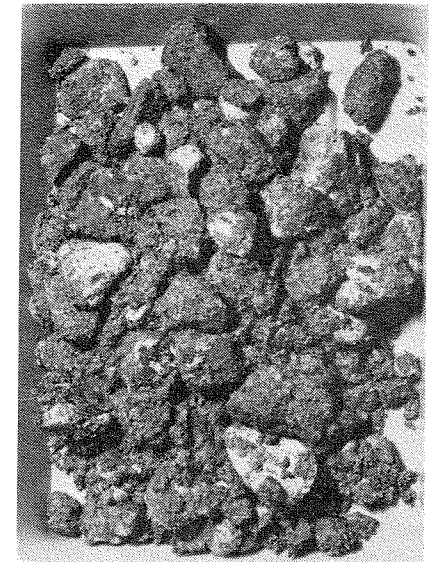


Fig. 1. Smuldrende beton fra fundament angrebet af CO₂-holdigt vand.

kridt, kalk eller kalkholdige aflejringer, idet øvrige Jylland i hovedsagen af de kalkfattige miocæne brunkulholdige aflejringer, der mange steder når omtrent op til jordoverfladen.

Efter istiden er der, særlig i lavninger, aflejret betydelige mængder af gylte og tørv, hvilke aflejringer spiller en betydelig rolle for den videre geokemiske udvikling, idet der heri akkumuleres store mængder af kulstof og ret betydelige mængder af svovl. Efter tørlægning af sådanne aflejringer sker en forvitring, hvorved der dannes store mængder CO₂ og svovlsyre; der skabes således et stærkt surt miljø.

»Den sure front«. Variationen i ferskvandets kemiske forhold og indholdet af opløste stoffer er særlig afhængig af jordarternes fysiske tilstand, af forvitringens nedtrængningsdybde samt af tilførslen af sure, aggressive stoffer. Så længe jorden er kalkholdig, vil de sure stoffer neutraliseres. Først når al calciumkarbonat er udvasket, bliver vandet aggressivt, indtil det ved nedsivningen når eventuelle kalkholdige jordlag.

De sure stoffer fremkommer særlig ved nedbrydning af organiske stoffer, hvorved jordluften og dermed nedsivningsvandet bliver rig på CO₂; endvidere fremkommer lidt svovlsyre. Efter tørlægning af sulfidholdige tørv og dyndaflejringer samt svovlholdige forekomster af brunkul og glimmer kan der opstå meget betydelige mængder svovlsyre (58 F 6).

Da der til stadighed tilføres ned-sivningsvandet sure stoffer, vil den sure front fortsat trænge fremad og længst frem i kalkfattige grus- og sandaflejringer.

Medens den sure front i de unge glacialle aflejringer på øerne og i Østjylland ikke er trængt særlig dybt ned, og der som følge deraf kun ganske få steder findes surt grundvand og overfladevand — så er den langt mere fremskreden i Midt- og Vestjylland, hvor man mange steder ved borer og brønde finder aggressivt vand, og lokalt kan der findes stærkt aggressivt afstrømningsvand og grundvand med pH på 4 og derunder.

I oprindelig kalkholdigt smelte-vandsler i bakkeøerne kan den sure front være trængt ned til 4—5 m dybde og har tilvejebragt et pH, der varierer mellem 4 og 6.

Vandtyper.

Efter disse indledende bemærkninger skal der gives en kort oversigt, dels over de forskellige typer af saltvand og disses oprindelse og optræden, dels over de ferskvands-typer, der optræder i landets forskellige egne afhængig af de varierende forhold.

Ved denne oversigt vil der særlig blive lagt vægt på forhold af betydning for beton, det vil sige i særlig grad vandets pH og alkalitet*) samt dets saltindhold.

Danske vandforekomster kan inddeles i følgende grupper:

Saltvand

- Marint overfladevand.
- Havvand
- Brakvand
- Marint grundvand.
- Residualvand
- Infiltrationsvand
- Salt mineralvand

Ferskvand.

- Ferskvand med alkalitet > 3
- Ferskvand med alkalitet 1—3
- Ferskvand med alkalitet < 1
- Surt vand
- Vand med natriumbikarbonat

Forurennet vand

Saltvand.

Marint overfladevand:
Havvand og brakvand.

*) Alkalitet defineret som det antal ml 0,1 n HCl, der skal til for at titrere 1 liter vand til methyloranges omslag pH = 4,3.

I oceanerne er saltindholdet ret konstant modsat i indhave, søer og fjorde, hvor tilstrømmende ferskvand nedsætter saltholdigheden.

I havvandet omkring Danmark er saltholdigheden størst i Vesterhavet og Kattegat, mindre i Østersøen.

I delvis tørrelagte marine områder kan saltvandet efterhånden fortrænges af ferskvand.

Marint grundvand.

I havede marine aflejringer, der er ret udbredte særlig i Vendsyssel, har grundvandet været havvand; dette fortrænges gradvis af nedbøren, men ved borer og brønde finder man under visse forhold saltvand, der må føres tilbage til indesluttet havvand også kaldet *residualvand*. Der findes i Vendsyssel enkelte kilder med saltvand, der må henføres til residualvand.

Når man ved kysterne sænker vandspejlet under kote 0, vokser faren for indtrængningen af saltvand, salt *infiltrationsvand*. Stor fare for salt infiltrationsvand findes i marsken og i lave strandenge og allerstørst på inddæmmede tørrelagte havarealer.

Ved *salt mineralvand* forstår man saltvand, der kommer fra de dybe lag, og hvis saltindhold stammer fra saltaflejringer i dybgrunden. Saltkoncentrationerne kan blive meget betydelige, men kun undtagelsesvis trænger vandet frem til overfladen, og da gerne i ret svage koncentrationer.

Ferskvand.

Alt efter jordens forvitringstilstand og de hydrologiske forhold optræder ferskvandet med varierende indhold af opløste stoffer. Da ferskvandets saltindhold ikke er stort nok til at virke skadeligt på beton, vil den gængse opdeling af vandet efter hårdhed (indhold af calcium- og magnesiumoxyder) ikke have særlig interesse.

Mere interessant er vandets indhold af aggressiv kuldioxid.

Af størst interesse i denne forbindelse er spørgsmålet, om vandet er surt og i benægtende fald, om der er en vis stødpudevirkning til at modstå en eventuelt forøget tilførsel af sure stoffer, når den sure front naturligt trænger frem.

Ferskvand med alkalitet over 3.

Denne vandtype vil være den fremherskende overalt i mineraljorder inden for sidste nedslignings-

område, hvadenten talen er om overfladevand eller grundvand. Den vil nærmest være enerådende på steder med særlig meget moræneler.

Ferskvand med alkalitet 1—3

— er almindelig udbredt i sandede, stærkt udvaskede områder, særlig skovarealer inden for sidste nedsligningsområde. Endvidere almindelig i bakkeøerne i Midt- og Vestjylland. Kan lokalt optræde overalt i landet.

Ferskvand med alkalitet 0—1

— er almindeligt for overfladevand og grundvand i Midt- og Vestjylland, og hyppigt optræder det desuden lokalt i stærkt udvasket jordbund.

Surt vand

— findes både som overfladevand og som grundvand, særlig i Midtjylland i forbindelse med afvanding af sure moser og brunkulsgravning, altså uden for sidste nedsligningsområde; også inden for dette område kan det lokalt træffes i forbindelse med moseafvanding og i skove.

Vand med natriumbikarbonat.

Denne vandtype vil kun undtagelsesvis findes som overfladevand. Den optræder i aflejringer, hvor saltvand fortrænges af ferskvand og er ret almindelig som grundvand, særlig i Vendsyssel samt på Sjælland og Fyn.

Den er opstået ved ionbytning, idet visse lerarter og andre geologiske aflejringer binder vandets calciumioner til sig og selv afgiver natriumioner til gengæld. Hvis vandet i forvejen har indeholdt $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, indeholder det efter ionbytningen NaHCO_3 , og den CO_2 , der har været bundet af den tilstedeværende $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, vil være fri og kan virke aggressivt over for beton.

Vand med alkalitet over 3 vil ikke i almindelighed indeholde aggressiv CO_2 , men med aftagende alkalitet vokser risikoen for aggressiv CO_2 , særligt i grundvandet. Med overskud af CO_2 uden basiske stoffer (CaCO_3) til at neutralisere den med forbliver vandet aggressivt. Hele processen er ensidig, hvilket understreger den sure fronts tilbøjelighed til at rykke frem.

Lokalt kan indholdet af svovlsyre og sure jernsulfater blive me-

get højt såvel i overfladevand som grundvand.

Forurennet vand.

Spildevand fra mejerier, sukkerfabrikker og kartoffelmelsfabrikker kan bevirke en betydelig stigning i indhold af kulhydrater og organiske syrer i vandløb, såfremt rensningsforholdene ikke er i orden, og destruktionsanstalter, garverier, kemisk industri og flere andre virksomheder kan også forurene vandløb på forskellig måde; hertil kommer, at den stigende anvendelse af vandklosetter i forbindelse med septictanke, kloaker og rensningsanlæg ofte ændrer vandets karakter i vore vandløb. Sådanne forureninger af vandløb vil betyde mest i tørre perioder med ringe afstrømningsvand, idet fortyndingen da bliver mindre.

Omkring industrivirksomheder, der arbejder med syrer eller andre opløselige affaldsstoffer, vil der altid være fare for, at også det øvre grundvandslag kan være forurennet.

En kemisk analyse af det forurenede vand vil belyse, hvad der bør foretages i det enkelte tilfælde.

Vandtypernes indvirkning på beton.

I det foregående er omtalt nogle geologiske og kemiske forhold, som er karakteristiske for vandtyper her i landet. I det følgende skal disse vandtypers indvirkning på beton belyses dels efter deres egenskaber som *støbevand*, dels efter deres betydning som omgivende vand omkring hærdnet beton, *miljøvand*.

Støbevand.

For vand til betonstøbning vil følgende gøre sig gældende:

1. Der er tale om et engangsfænomén.
2. Eventuelle betonskadelige komponenter vil påvirke betonen under støbningen og hærdningen, da betonen her har andre egenskaber end i hærdnet tilstand.
3. Eventuelle betonskadelige komponenter vil kunne virke i betonens indre.

En detaljeret oversigt over forureninger m. m. i naturligt forekommende støbevand har været offentliggjort i (59 I 1) og i (60 S 4).

Om forskellige vandtypers egnethed til betonstøbning kan kort siges følgende:

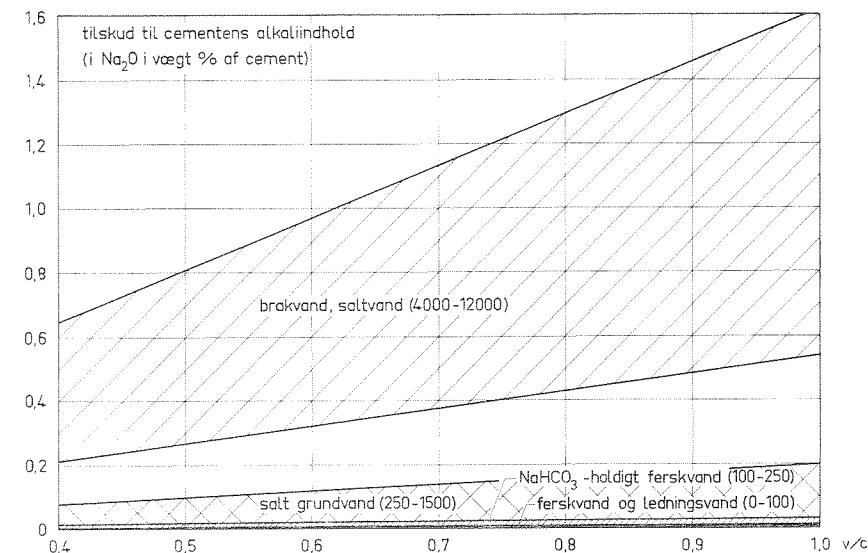


Fig. 2. Forskellige vandtypers tilskud til cementens alkaliindhold.

Ledningsvand samt vand, der anvendes som drikkevand, kan uden videre anvendes til betonstøbning.

Alkaliholdigt vand må vurderes med henblik på mulighederne for udvikling af skadelige alkali-kiselreaktioner. Her er bl. a. betonens alkaliindhold af betydning.

Ud fra en række analyser, som angivet i (36 Ø 1), er foretaget et skøn over variationsområdet for alkaliindholdet*) i forskellige danske grundvandstyper. Den rimelige øvre grænse, som herved er fremkommet, overskrides kun i ca. 10% af analyserne. Der skelnes mellem følgende vandtyper:

- Ferskvand (ledningsvand) — 0—100 mg Na+/l
- Ferskvand, bikarbonatholdigt — 100—250 mg Na+/l
- Salt grundvand — 250—1500 mg Na+/l
- Havvand, salt og brak — 4000—12000 mg Na+/l

På fig. 2 er de på denne måde beregnede værdier benyttet til at vise det tilskud til cementens alkaliindhold, som disse vandtyper vil give som funktion af betonens v/c forhold.

Af figuren ses, at alkaliindhold i ledningsvand og i bikarbonatholdigt grundvand er uden betydning i denne forbindelse.

Et alkalitilskud fra saltholdigt grundvand og endnu mere fra havvand (inklusive brakvand) må derimod tages i betragtning ved vur-

*) Opgivet som antal mg/l (Na+ + K+) omregnet til mg/l ækv. Na+.

dering af betonblandingen »farlige områder«.

Det skal i denne forbindelse nævnes, at i praksis varierer cementens alkaliindhold her i landet inden for grænserne 0,3 og 1,0 % ækv. Na₂O.

Havvand er i øvrigt uegnet til støbning af beton af høj kvalitet på grund af, at det høje saltindhold nedsætter betonens styrke og kan føre til korrosion af armering.

Øvrige vandtyper. Det fremgår af kravene i DS 411, at blandingsvandet ikke må indeholde stoffer, der forhindrer eller forsinker afbindingen eller hærdningen eller korroderer eventuelt armeringsjern, og det må ikke indeholde stoffer, der giver styrkereduktioner på over 15 %.

I tabel I er givet en vurdering af forsvarlige koncentrationer af betonskadelige stoffer ved støbning af armeret og uarmeret beton med Portland cement. Vurderingen er sammenstillet i (57 F 1) og dækker, hvad der i øjeblikket vides herom.

Miljøvand.

Hærdnet beton kan angribes af omgivende vand. Dettets aggressivitet afhænger af opløste salte, luftarter (især CO_2) samt af en del andre stoffer, der enten kan være af naturlig oprindelse eller kan hidrøre fra forurenende spildevand.

Cementkomponenterne i den hærdnede beton kan angribes af følgende vandtyper:

1. Rent vand
2. Surt vand
 - a) på grund af indholdet af opløst CO_2
 - b) på grund af indhold af humussyre

	Forsvarlige koncentrationer for		Bemærkninger.
	Armeret beton	Uarmeret beton	
pH	4,5—8,5	4,5—8,5	Andre kilder angiver 6—8 og 4—8,5
Svævende bestanddele	2000 mg/l	5000 mg/l	Andre kilder angiver 1000—2000 mg/l
Total mængde opløste salte	15000 mg/l	30000 mg/l	Virkningen stærkt afhængig af arten af stoffer
Svovlsyre-anhydrid	3000 mg/l	3000 mg/l	5000 mg/l sulfat giver 4 % styrkereduktion efter 28 døgn
Sulfider	5000 mg/l	5000 mg/l	
Klorider	10000 mg/l	30000 mg/l	
Organiske stoffer	3000 mg/l	3000 mg/l	780 mg/l humussyre har givet betydelige styrkereduktioner
Kulhydrater	0	0	

Tabel 1. Forsvarlige koncentrationer i støbevand til armeret og uarmeret beton (57 F 1).

- Sulfatholdigt vand, herunder også svovlsyreholdigt vand.
- Vand med opløste alkaliske salte
- Vand med andre opløste stoffer.

Rent vand.

I (53 D 2) defineres naturligt rent vand som vand, hvis hårdhed omregnet til danske hårdhedsgrader er mindre end 3,5, som har pH ~ 7 og som kun har et ringe indhold af opløste salte.

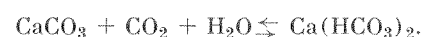
Sådan vand virker både opløsende og hydrolyserende på betonen. Da rent vand er kalkfattigt, vil det især opløse betonens $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og CaCO_3 . Ved hydrolysen dannes $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Al}(\text{OH})_3$ og $\text{Si}(\text{OH})_4$ m. m. Denne proces foregår meget langsomt, og i stillestående vand indstiller der sig en diffusionslignende vægt. Dersom vandet fornyes, kan hydrolysen fortsætte, når de først dannede hydrolyseprodukter er opløst.

Surt vand.

Som to væsentlige årsager til surhed hos naturligt forekommende ferskvand eller natriumbikarbonatholdigt ferskvand kan nævnes, at det indeholder opløst CO_2 eller humussyrer. (Svovlsyre behandles under sulfatholdigt vand, se s. 160).

CO_2 -holdigt vand

CO_2 angriber cementens $\text{Ca}(\text{OH})_2$, idet den først omdanner denne til CaCO_3 og siden reagerer efter ligningen



Denne proces er i ligevægt ved tilstedeværelse af fast CaCO_3 . For at $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ kan eksistere, kræves som tidligere antydnet en vis mængde fri CO_2 . Indeholder vandet mere CO_2 end den nævnte mængde, er det kalkaggressivt. For nærmere enkeltheder henvises til (59 K 4).

I (56 L 8) angives s. 288 følgende tabel 2 over vandets surhedsgrad som funktion af CO_2 -indholdet, samt mængden af CaCO_3 , der kan opløses.

mg CO_2 i 1 kg vand (ppm)* ved 18°C	pH	Idet der tilsættes CaCO_3 ,	
		opløses (CaCO_3 i ppm)	bliver pH
0.00	—	13.1	10.23
0.54	5.72	62.7	8.48
5.4	5.22	138.0	7.81
17.9	4.95	210.6	7.47
178.7	4.45	468.9	6.80
1787	3.95	1057.7	6.13

Tabel 2. Vands surhedsgrad i afhængighed af CO_2 -indhold og opløselig CaCO_3 .

Den aggressive CO_2 -mængde afhænger desuden af eventuelle salte i vandet. Er der opløst andre salte i vandet, såsom CaCl_2 eller CaSO_4 , kræves mere fri CO_2 til at opretholde ligevægten, således at kun en mindre del af den overskydende CO_2 bliver aggressiv; hvis vandet indeholder f.eks. NaCl , bli-

* parts per million kan, når der er tale om fortyndede vandige opløsninger, regnes lig med mg/l.

ver en større del af CO_2 kalkopløsende.

Desuden angives i (56 L 8) side 600 følgende eksempel på cementens sammensætning før og efter, at den har været udsat for CO_2 -aggressivt vand (resultaterne angives som ilter af de pågældende stoffer)

	Ikke-angrebet beton %	CO_2 -angrebet beton %
SiO_2	22.09	28.02
Al_2O_3	7.55	9.46
Fe_2O_3	5.56	9.04
MgO	1.52	0.72
CaO	60.18	40.26
CO_2	2.60	11.06
SO_3	0.50	1.44

Tabel 3. Eksempel på laboratorieanalyser af cementsammensætning før og efter et CO_2 -angreb.

Betonen viser et tydeligt tab af Ca-holdige komponenter samt en forøgelse af CO_2 -indholdet.

I (57 I 4) nævnes, at beton må forventes at blive angrebet af vand med mere end 20 p.p.m. aggressiv CO_2 , medens (49 T 18) angiver, at selv vand med 10 p.p.m. aggressiv CO_2 har angrebet beton.

Humusholdigt vand

Humussyre er højmolekylære tungtopløselige syrer. En mættet opløsning af humussyre har pH ~ 4, dens styrke ligger mellem kulsyrens og eddikesyreens, men i praksis er den mindre aggressiv overfor betonen end kulsyren, fordi humussyrens kalciumsulfat, der aflejres i betonen, er meget tungt opløseligt.

Sulfatholdigt vand.

Overfladevand kan undertiden indeholde følgende sulfater i væsentlige mængder: Na_2SO_4 , K_2SO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, CaSO_4 , MgSO_4 og $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$.

I (56 L 8) side 294 er omtalt, at sulfaterne angriber:

- den fri kalk i cementen, der omdannes til gips,
- de hydrerede kalciumaluminater, der omdannes til kalciumaluminatsulfat; denne proces finder kun sted inden for ret specielle reaktionsomstændigheder i henseende til koncentrationer, pH m. m., og reaktionsproduktet er tilsvarende temmelig instabil.
- de hydrerede kalciumsilikater, der omdannes til gips og opløselige silikater.

I (32 T 2) angives, at angrebets styrke for alle sulfaters vedkommende er afhængig af sulfatkoncentrationen, og for koncentrationer over 5 % har alle sulfater nogenlunde samme virkning. Ved en mere almindelig koncentration såsom 0.5 % har f.eks. Na_2SO_4 en meget langsommere virkning end MgSO_4 .

Koncentrationer under 500 p.p.m. SO_3 kan almindeligvis ingen skade gøre (56 L 8). Større koncentrationer kan medføre sulfatangreb afhængigt af sulfatets art, betonens kvalitet og de ydre omstændigheder ved vandpåvirkningen; tidevand, strømmende vand, bølgegang ensidigt vandtryk m. m. kan således medføre en bortskylning af de dannede reaktionsprodukter og blotte nye flader for angreb.

Alkalisulfater

Den hærdede betons fri kalk og hydrerede kalciumaluminater vil kunne angribes af vand indeholdende K_2SO_4 eller Na_2SO_4 , idet der dannes gips.

I (57 B 1) oplyses, at der ved indtrængning af Na_2SO_4 i betonen sker en forøgelse af NaOH - og Na_2CO_3 -koncentrationerne, hvorved pH stiger, hvilket vil modvirke dannelsen af kalciumaluminatsulfat og dermed i nogen grad beskytte de hydrerede kalciumaluminater mod fortsat angreb.

Alkalisulfater er ikke tilbøjelige til at angribe hydrerede kalciumsilikater, idet disse er tungere opløselige end eventuelle dannede alkaliskilikater og kalciumsulfat.

Kalciumsulfat

CaSO_4 kan kun angribe hydrerede kalciumaluminater, som i så fald omdannes til kalciumaluminatsulfat. En mættet opløsning af gips i vand har en koncentration på ca. 0.23 % og kan derfor ikke forekomme i så store koncentrationer som alkalisulfaterne og heller ikke ødelægge betonen i samme grad som disse.

Ammoniumsulfat

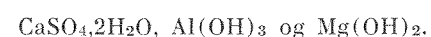
I (56 L 8) fremhæves $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ som det sulfat, der angriber Portland cement hårdest, fordi opløseligheden af CaSO_4 øges, når $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ er til stede, ved at der dannes et dobbeltsalt



Magniumsulfat

Ifølge (56 L 8) angribes i begyn-

delsesstadiet cementen af MgSO_4 på alle de 3 ovenfor anførte måder; yderligere reagerer MgSO_4 med kalciumaluminatsulfat, som det sønderdeles under dannelse af



Dette sidste produkt er næsten uopløseligt og kan bidrage til at gøre betonen tættere og således selv standse et igangværende sulfatangreb, såfremt det ikke skylles bort af bølger, strømmende vand e. l.

Ved analyse af havvandsangrebet beton viser det sig, at $\text{Mg}(\text{OH})_2$ -indholdet forøges med stigende sulfatangreb, hvorimod SO_3 -indholdet først vokser og siden aftager, (56 L 8), s. 598; dette kan forklares ved, at der i betonbygværket først dannes kalciumaluminatsulfat, og at dette ved processens videre fremskriden reagerer med MgSO_4 , hvorved $\text{Mg}(\text{OH})_2$ aflejres og den dannede gips bortskylles.

Som eksempel på ændringer i cementens sammensætning ved havvandsangreb nævnes i (49 R 23) analyseresultater fra betonprøver taget fra en kajkonstruktion. Der er taget en prøve langt over havoverfladen, hvor betonen ikke er angrebet, og en prøve i tidevandszonen, der er angrebet:

	Ikke-angrebet beton %	SO_4^{--} -angrebet beton %
SiO_2	19.2	27.6
Al_2O_3	8.0	12.3
Fe_2O_3	3.4	3.4
CaO	64.0	19.6
MgO	3.4	34.6
SO_3	2.1	2.5

Tabel 4. Analyser af betonprøver fra kajkonstruktion.

Eksemplet viser, hvorledes CaO -indholdet falder stærkt samtidig med, at MgO -indholdet stiger stærkt. SO_3 -indholdet er omtrent det samme i de 2 prøver, hvilket illustrerer, at man ikke alene ud fra indhold af SO_3 i betonen kan afgøre, om betonprøven er havvandsangrebet.

Ferro-, Ferrisulfat

FeSO_4 og $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ kan undertiden findes opløst i vand i betydelige mængder, f. eks. i afstrømningsvand fra nedlagte brunkulslejer. Flere steder i Oslo (57 B 1) finder man disse salte opstået ved forvitring af alunskifer. Undersøgelserne derfra viser, at det primært er *ferrosulfat*, FeSO_4 , der er

den aggressive komponent. FeSO_4 vil ligesom Na_2SO_4 trænge ind i betonens indre og forårsage en kemisk nedbrydning af betonen. Et almindeligt sulfatangreb (Na_2SO_4) ville nu hemmes af, at CO_3^{--} og OH^- bringes i opløsning (pH vil stige), hvilket modvirker videre sulfatangreb. Fe_2SO_4 reagerer i første omgang på samme måde, men der vil udfældes $\text{Fe}(\text{OH})_2$ i betonens indre. Hvis herefter luftens ilt får adgang, kan en oxydation af reaktionsproduktets Fe^{++} medføre sænkning af pH, hvilket igen fører til sulfatangreb i betonens indre og dermed en betydelig fremskyndet nedbrydning. *Ferrisulfat* er relativt uskadeligt, idet $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ vil optræde som syre, der angriber betonoverfladen, men således, at der bl.a. udfældes Fe_2O_3 , nH_2O , som bidrager til at imprægnerer og tætnet betonoverfladen.

Svovlsyre

Svovlsyre kan som omtalt findes frit i ferskvand, f. eks. ved tørvemoser, dyndaflejringer og brunkulsaflejringer. Findes der salte af svagere syrer på stedet, vil svovlsyren frigøre den svage syre (H_2CO_3), og forholdet vil blive som omtalt under aggressiv CO_2 .

I (50 K 13) angives, at fri svovlsyre i vand virker ødelæggende på betonen, idet SO_4^{--} trænger ind og danner kalciumaluminatsulfat med cementens komponenter. Stadig nye tilførsler vil ødelægge betonen. Svovlsyre angreb er ikke alene et sulfatangreb, men også et syreangreb. Den fri svovlsyre omdanner betonens kalk til gips og dekomponerer derefter det først dannede kalciumaluminatsulfat.

I (57 B 1) hævdes, at et angreb af svovlsyreholdigt vand i de koncentrationer, der kan tænkes at forekomme i naturen, ikke er farligere end sædvanlige syreangreb.

Som helhed kan siges, at betons modstandsevne over for H_2SO_4 er stærkt afhængig af betonens kvalitet. En cementrig, tæt beton vil have god modstandsevne mod H_2SO_4 -holdigt vand.

Andre stoffer.

Af andre betonskadelige stoffer kan nævnes alkaliske salte, der i forbindelse med eventuelt reaktivt grusmateriale i betonen kan fremme skadelige alkalireaktioner i denne. Desuden er ammoniumsalte iøvrigt i koncentrationer over 0,5%

og $MgCl_2$ i koncentrationer over 5% skadelige for beton.

$CaCl_2$ i store koncentrationer er kalkopløsende; desuden angriber det de hydrerede kalciumaluminater, som omdannes til kalciumkloroaluminat.

$FeCl_2$ og $FeCl_3$ kan føre til syreangreb.

Sulfitter såsom Na_2SO_3 $NaHSO_3$ og $Ca(HSO_3)_2$ angriber ligesom borax betonen svagt. Cl_2 fra papirindustri angriber beton stærkt.

Organiske stoffer som f.eks. eddikesyre, der har et let opløseligt kalciumsalt, nedbryder beton.

Andre organiske stoffer såsom vegetabiliske og animalske olier kan angribe betonens overflade.

Ellers angribes betonen stærkt af tjæredestillater, formaldehyd, ftalater fra farvefabrikation og de meget sure garvevædsker.

Mindre stærkt angriber detergent samt ikke for sur ensilage.

Vandundersøgelser.

På grundlag af en analytisk kvantitativ undersøgelse er det muligt at bedømme, om en vandforekomst er egnet til at blande i beton, eller hvorledes den kan tænkes at påvirke hærdnet beton.

Det må sikres, at analyseprøverne er repræsentative, hvilket kan kræve geologisk specialistanstalt.

Vandanalyser bør foretages af et velkvalificeret laboratorium, ligesom det også kan være påkrævet at lade dette medvirke ved prøveudtagningen.

Prøveudtagning af vand.

Prøveudtagningen kan foretages efter DS 201, når prøveudtagningen sker fra brønd, boring, aftapning fra ledning eller kilde.

Til en almindelig vandanalyse kræves 4—5 l vand, men i særlige tilfælde, hvor der er vanskeligheder ved at udtage så meget, kan man nøjes med ca. 2 l.

Apparatur. Til prøveudtagningerne anvendes standardapparatur, der består af 3 flasker, mærket a, b og c, med velindslebne glaspropper. Flaske a, med rumindhold 4 l, er til almindelig vandundersøgelse. Flaske b, $\frac{1}{4}$ l, er beregnet til analyse for jern, og flaske c, $\frac{1}{2}$ l, indeholdende pulveriseret $CaCO_3$, til prøve for $CaCO_3$ -opløsende CO_2 .

Ved specielle undersøgelser kan det være nødvendigt at indrette en samledam og suge vandet op i en i forvejen evakueret beholder.

Skal vandprøven hentes i en bestemt dybde i en sø, et vandløb el. lign., kan anvendes en vandhenter. Princippet er, at beholderen ned-sænkes åben for gennemstrømning af vand til den ønskede dybde og derpå lukkes ved hjælp af et faldlod. Samtidig måles temperaturen med et påmonteret termometer.

Målinger på stedet. Umiddelbart efter udtagningen måles prøvens temperatur. Hvis man råder over et batteridrevet autoionometer, bør samholdende værdier af vandprøvens pH og temperatur måles ved prøveudtagningen.

Registrering af prøver. Efter udtagningen forsynes hver prøvebeholder med en etikette, hvorpå der kan noteres:

1. Registreringsnummer
2. Dato og tid for prøveudtagningen
3. Nøjagtig angivelse af udtagningsstedet, så en evt. rekonstruktion af prøveudtagningen kan finde sted
4. Temperatur og strømretning på udtagningsstedet
5. Prøvens temperatur
6. Prøvens pH, hvis denne kan bestemmes på stedet
7. Eventuelle særlige bemærkninger
8. Udtagerens signatur.

Analyse af vandprøver.

Vandanalyser kan af statsautoriserede laboratorier foretages efter Dansk Standard DS 200 f.f. (39—38). For aggressivt vand (vand med indhold af fri kuldioxid), hvor vandets $CaCO_3$ -opløsende evne ønskes bestemt ved den temperatur, der påvirker betonen, bør den metode, der beskrives i (59 K 4) benyttes.

Litteraturliste.

- (32 T 2) Studies on the Action of Sulphates on Portland Cement. T. Thorvaldsen, D. Wolochow and V. A. Vigfusson. Canadian Journal of Research. May, 1932. pp. 485—516.
- (36 Ø 1) Danske Grundvandstyper. Hilmar Ødum og Werner Christensen. DGU 3. række nr. 26. København 1936. C. A. Reitzels Forlag.
- (39-38) Dansk Standard for vandundersøgelser. DS 200 med derfor anførte standardblade. Dansk Standardiseringsråd. Feb. 1939.

(49 R 23) Etat actuel des mortiers et bétons des ouvrages portuaires portugais. M. Rocha, Antonio Coutinho, A. Beja Neves. XVII Congrès International. Lisbonne 1949. pp. 89—116.

(49 T 18) Concrete Deterioration due to Carbonic Acid. Ruth D. Terzaghi. Journal of the Boston Society of Civil Engineers. Reprint. April, 1949. pp. 136—152. With 26 references to literature.

(50 K 13) Einflüsse auf Beton und Stahlbeton. A. Kleinlogel. Verlag Wilh. Ernst und Sohn, Berlin, 1950. 340 pp.

(53 D 2) Action de l'eau de mer et des eaux agressives sur les chaux et ciments. Comportement des mortiers et bétons hydrauliques — Cas particulier du bétons armé. Causes et effets — Prevention et remèdes. M. Duriez. Travaux. Paris, 1953. No. 221, 222, 223, 224, 225. pp 189—199; 259—265; 285—290; 318—328; 349—353

(54 S 14) Geologi og vandboring. Th. Sorgenfrei og Ole Berthelsen. Danmarks Geologiske Undersøgelse. København, 1954. 3. række. Nr. 31.

(56 L 8) The Chemistry of Cement and Concrete. F. M. Lea. Edward Arnold (Publishers Ltd.). London, 1956.

(57 B 1) Bidrag til belysning af visse bygningstekniske problemer ved Oslo-området alunskifre. Ragnhild Bastiansen, Johan Moum og I. Th. Rosenqvist. Norges geotekniske Institut. Publikasjon nr. 22. Oslo 1957.

(57 F 1) Concrete Technology. F. S. Fulton. Johannesburg, 1957. A South African Handbook. 516 pp.

(57 I 4) Concrete Deterioration of a Foundation. G. M. Idorn. Acta Polytechnica Scandinavica. Copenhagen, 1957. Vol. 4, No. 3 39 pp. Med 19 litteraturhenvisninger.

(58 F 6) Undersøgelser af Timå 1948—53. E. Fjerdingsstad. Dansk Ingeniørforening. Spildevandskomiteen. Teknisk Forlag 1958. Skrift nr. 12.

(59 I 1) Vand til betonstøbning. Betontekniske Synspunkter. G. M. Idorn. Beton-Teknik. København, 1959 Nr. 2, Årgang 25. pp. 43—52. Med 5 litteraturhenvisninger.

(59 K 4) Metoder til bestemmelse af vands kalciumkarbonatopløsende evne. Alice Kjær og G. M. Idorn. Statens Byggeforskningsinstitut. København 1959. Særtryk nr. 107. 6 pp. Ingeniøren nr. 14, 1959. 12 litteraturhenvisninger.

(59 M 8) Bidrag til Danmarks Ingeniørgeologi. Ellen Louise Mertz. ATV. Geoteknisk Institut, 1959. Bulletin nr. 5.

(60 S 4) Concrete Mix Water — How Impure can it be? H. H. Steinour. P. C. A. Journal, September 1960. Vol. 2 No. 3 pp. 32—50. 66 references to literature.

