



Statens vegvesen

Gjenbruksprosjektet

Prosjektrapport 16:
Kjemisk nedbrytning av
resirkulert tilslag
Forsøk med akselerert
gjennomstrømning av vann

RAPPORT

Teknologiavdelingen

Nr. 2438



Veg- og trafikkfaglig senter
Dato: Juni 2007

Teknologirapport nr. 2438

GJENBRUKSPROSJEKTET

Prosjektrapport nr 16:

**Kjemisk nedbryting av
resirkulert tilslag
Forsøk med akselerert
gjennomstrømning av vann**



Juni 2007

Teknologiavdelingen

Teknologirapport nr. 2438

GJENBRUKSPROSJEKTET

Prosjektrapport nr 16:

Kjemisk nedbryting av resirkulert tilslag - Forsøk med akselerert gjennomstrømning av vann



Sammendrag

Rapporten inngår i en serie rapporter fra Gjenbruksprosjektet 2002-2005 (etatsprosjekt).

Delprosjekt 3 "Gjenbruk av betong" (DP3), som denne rapporten tilhører, har som overordnet målsetting å formulere et forslag til anvendbare retningslinjer for bruk av resirkulert tilslag (knust betong og tegl) til vegformål og på denne måten gjøre det enklere for bestiller å ta i bruk materialet.

I dette arbeidet var hensikten å studere effekten av vanngjennomstrømning på materialegenskaper til resirkulert tilslag over et lengre tidsrom. I en prøverigg ble materialet utsatt for konstant gjennomstrømning av vann med henholdsvis pH 4 og pH 8. Materialet ble undersøkt ved 0, 237, 419, og 600 døgn. Følgende parametere ble undersøkt: partikkeldensitet, vannabsorpsjon, bulkdensitet, kornstørrelsesfordeling og mekaniske egenskaper ved Los Angeles test i tillegg til kjemisk analyse av eksponeringsvannet.

Ut fra de mekaniske målte mekaniske egenskapene kan det konkluderes med at i dette akselererte nedbrytningsforsøket så ble partikkelstørrelsen redusert. En signifikant andel blir oppløst som følge av kjemisk nedbrytning av sementhydratfasene. Dette vises først og fremst i kornfordelingskurvene men underbygges av både bulkdensitets- og korndensitetsmålingene.

Korngraderingen forandret seg mest i den første eksponeringsperioden. Liten forandring ble målt ved de neste prøveuttakene. Ved pH 8 kan det likevel ses at andelen finere partikler også øker etter prøveuttak 2 og 3. Eksponeringsvannets pH ga den største forskjellen på korngraderingen. Ved pH 4 ble det målt langt større andel finere partikler(0,5- 8 mm) enn ved pH 8.

Syreløslig andel i betongen ble redusert fra 23 vekt-% i ubehandlet materiale til 12 vekt-% for materiale eksponert ved pH 4 og 15 vekt-% for materiale eksponert ved pH 8. Oppløsning av sementpastaen var raskere ved pH 4. Det totale materialtapet ble estimert til ca. 12 vekt-% etter 600 døgn ved pH 4 og ca. 9 vekt % etter 600 døgn ved pH 8. Massetapet beregnet ut fra de kjemiske analyseresultatene av eksponeringsvannet ga samsvarende resultater. Den knuste betongen tilfredsstillende de fleste av kravene gitt av Statens vegvesen i håndbok 018 for bruk i grøfter og til forsterkningslag i veier også etter eksponering mot vann.

Emneord: *Gjenvinning, miljø, betong, BA-avfall, resirkulert tilslag, kjemisk nedbryting*

Seksjon: *TEK-T*

Dato: *Juni 2007*

Statens vegvesen, Vegdirektoratet
Teknologiavdelingen
Postboks 8142 Dep, 0033 Oslo
Telefon: 0 20 30 Telefax: 22 07 38 66

Forord

Statens vegvesens Gjenbruksprosjekt er ett av fem etatsprosjekter i perioden 2002 - 2005. Prosjektet ble startet på Vegteknisk avdeling i Vegdirektoratet. Fra og med 2003 tilhører prosjektet Teknologivdelingen i Trondheim. I tillegg til fagpersoner i Statens vegvesen, består både Prosjektrådet og arbeidsgrupper av ressurspersoner fra BA-næringen, forskningsmiljøer og administrative instanser.

Prosjektets overordnede mål er å *tilrettelegge* for gjenbruk. Dette skal gjøres ved å:

- øke kunnskapen om materialenes tekniske og miljømessige egenskaper
- implementere kunnskap underveis ved utførelser i Vegvesenets regi
- vurdere muligheter for ressursvennlig prosjektering
- studere økonomiske sider ved anvendelsen av resirkulerte materialer
- gjennomgå relevant regelverk, revidere eller supplere Vegvesenets håndbøker og veiledninger

Statens vegvesens Gjenbruksprosjekt består av åtte delprosjekter:

- DP 1 Avfallshåndtering
- DP 2 Miljøpåvirkning
- DP 3 Gjenbruk av betong
- DP 4 Gjenbruk av asfalt
- DP 5 Lette fyllmasser og isolasjonsmaterialer
- DP 6 Gjenbruksvegen
- DP 7 Prosjektering, økonomi og administrative forhold
- DP 8 Nye ideer, materialer og tiltak

Gjenbruksprosjektet ledes av Gordana Petkovic, Vegdirektoratet.

Delprosjekt 3 "Gjenbruk av betong" (DP3), som denne rapporten tilhører, har som overordnet målsetting å formulere et forslag til anvendbare retningslinjer for bruk av resirkulert tilslag (knust betong og tegl) til vegformål og på denne måten gjøre det enklere for bestiller å ta i bruk materialet. De er viktig å ha kontroll over materialets langtidsegenskaper. I de fleste bruksområder er resirkulert tilslag utsatt for gjennomstrømning av vann. Formålet med dette arbeidet var å underøke om langvarig eksponering for vanngjennomstrømning endre materialeegenskaper til resirkulert tilslag.

Se Vedlegg 1 for mer informasjon om delprosjektet. DP3 ledes av Geir Berntsen, Statens vegvesen Region øst.

Arbeidet rapportert i denne prosjektrapporten ble påbegynt av Jacob Mehus, NBI /Standard Norge. Den er videreført og skrevet av Christian J. Engelsen og Thale S. W. Plessner, SINTEF Byggforsk.

Innholdsfortegnelse

1	INNLEDNING	6
2	EKSPERIMENTELT OG PRØVING	6
2.1	PRØVEMATERIALET	6
2.2	TESTTRIGG	8
2.3	PRØVETAKING	10
2.4	PRØVEMETODER.....	10
2.4.1	<i>Korngradering</i>	10
2.4.2	<i>Bulkdensitet og hulrominnhold</i>	11
2.4.3	<i>Korndensitet og vannabsorpsjon</i>	11
2.4.4	<i>LA-test</i>	11
2.4.5	<i>Syreløselighet</i>	11
2.4.6	<i>Kjemisk analyse</i>	11
3	RESULTATER	13
3.1	MEKANISKE EGENSKAPER	13
3.1.1	<i>Korngradering</i>	13
3.1.2	<i>Bulkdensitet og hulrominnhold</i>	14
3.1.3	<i>Korndensitet og vannabsorpsjon</i>	15
3.1.4	<i>Mekanisk styrke</i>	17
3.1.5	<i>Oppsummering av endringer i materialeegenskapene</i>	17
3.2	KJEMISK NEDBRYTING AV SEMENTPASTAEN	18
3.2.1	<i>Mengde sementpasta oppløst</i>	18
3.2.2	<i>Syrenøytraliseringskapasitet</i>	20
3.2.3	<i>Kjemisk analyse av eksponeringsvann</i>	21
3.2.4	<i>Beregning av massetap</i>	23
4	KRAV TIL MATERIALER SOM BRUKES I VA-GRØFTER OG VEGFUNDAMENTER	25
4.1	VURDERING AV TESTBETINGELSENE	25
4.2	SPESIFIKKE KRAV	25
5	KONKLUSJON	27
6	REFERANSER	28

1 Innledning

Ved studier av gjenbruksmaterialer utsatt for gjennomstrømning av vann er man i de fleste tilfeller opptatt av utlekking av forurensninger (metaller og organiske komponenter) fra gjenbruksmaterialet til omkringliggende miljø. Mye arbeid har blitt gjort på utlekkingssegenskaper til resirkulert tilslag av betong, se bl.a. prosjektrapporter og anbefalinger fra RESIBA-prosjektet [1] samt prosjektrapportene 14 og 14a-14d fra Gjenbruksprosjektet [2].

I dette arbeidet er fokuset imidlertid på egenskaper til resirkulert tilslag som utsettes for vanngjennomstrømning og hvordan de forandrer seg med eksponeringstiden. Resirkulert tilslag brukes for det meste i ubundet form (som løsmasse) og det er sannsynlig at materialets langtidsegenskaper er påvirket av gjennomstrømning av vann. Denne problemstillingen er mest relevant for bruk i grøfter og som dreneringsmasse.

Det ble konstruert en testtrigg som eksponerte tilslaget ved konstant vanngjennomstrømning og forskjellig pH. Hensikten var å tilnærme seg feltbetingelsene i en grøft med knust betong i ledningssonen. Testtriggen ble bygget på grunnlag av resultater av en forstudie som var rettet mot å velge faktorene som har størst påvirkning på kjemisk nedbrytning [3].

2 Eksperimentelt og prøving

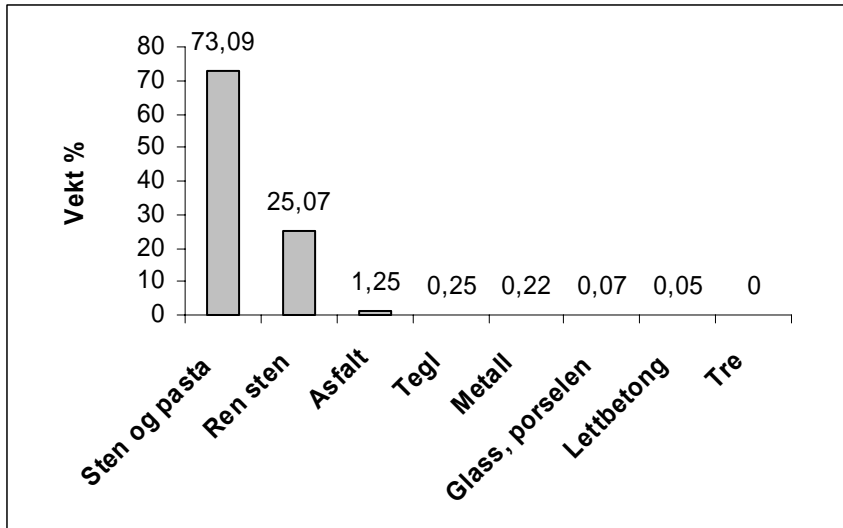
2.1 Prøvematerialet

Knust betong og murverk produseres ved rivning av fundamenter og konstruksjonselementer fra bygninger og infrastruktur. Rivematerialet får betegnelsen resirkulert tilslag etter nedknusing og sikting, og kan benyttes i bunden bruk og ubunden bruk. Dersom gjenvunnet tilslag benyttes i ny betongproduksjon betegnes bruken som bundet. De fleste anvendelsesområder for resirkulert tilslag er imidlertid som løsmasse, eller i ubunden bruk, som for eksempel i grøfter, veger etc. Tabell 1 viser hvordan resirkulert tilslag klassifiseres som knust betong, Type 1, og blandet masse, Type 2 [4].

Tabell 1: Klassifisering av resirkulert tilslag i ubunden bruk

Bestanddel	Type 1		Type 2	
	Knust betong		Blandet masse	
	A	B	A	B
	Bunden bruk	Ubunden bruk	Bunden bruk	Ubunden bruk
<u>Hoveddelmaterialet</u>				
Knust betong og/eller naturtilslag		> 94 %		----
Knust betong, knust murverk og naturtilslag		----		> 90 % ¹⁾
<u>Andre granulære delmaterialer:</u>				
Knust murverk	< 5 %	< 5 %		----
Knust gjenbruksasfalt	< 5 %	< 5 %		< 5 %
<u>Ikke mineralsk innhold</u>				
		< 1 %		< 2,5 %
Treverk, papir og metall, isolasjonsmaterialer*, planterester**, plast, glass, gummi annet		< 0,1 v. % ²⁾ < 0,1 v. % ²⁾		< 0,5 v. % ²⁾ < 0,5 v. % ²⁾
*Isolasjonsmaterialer **Planterester				
Densitet – ovenstørr ³⁾ - vannmettet overflatetørr ³⁾		> 2000 kg/m ³ > 2000 kg/m ³		> 1500 kg/m ³ > 1800kg/m ³
Vannabsorpsjon		< 10 %		< 20 %

Testen ble utført på knust betong med kornstørrelse 10-20 mm fra BA Gjenvinning. Sammensetningen til den knuste betongen ble bestemt etter prEN 933-11 [5, 6] og er vist i Figur 1. Resultatene viser at prøvematerialet klassifiseres som Type 1 materialet (ubunden bruk) i henhold til Tabell 1 ovenfor.



Figur 1: Sammensetningen til prøvematerialet benyttet i forsøket [3]

2.2 Testrigg

Forsøket ble utført som en kolonnetest i to deler av testriggen, hver med fire kolonner. Figur 2 viser en planskisse av rigg 1. Rigg 2 er lik rigg 1 bortsett fra at den ikke er tilkoblet syretank eller ledningsevne måler.

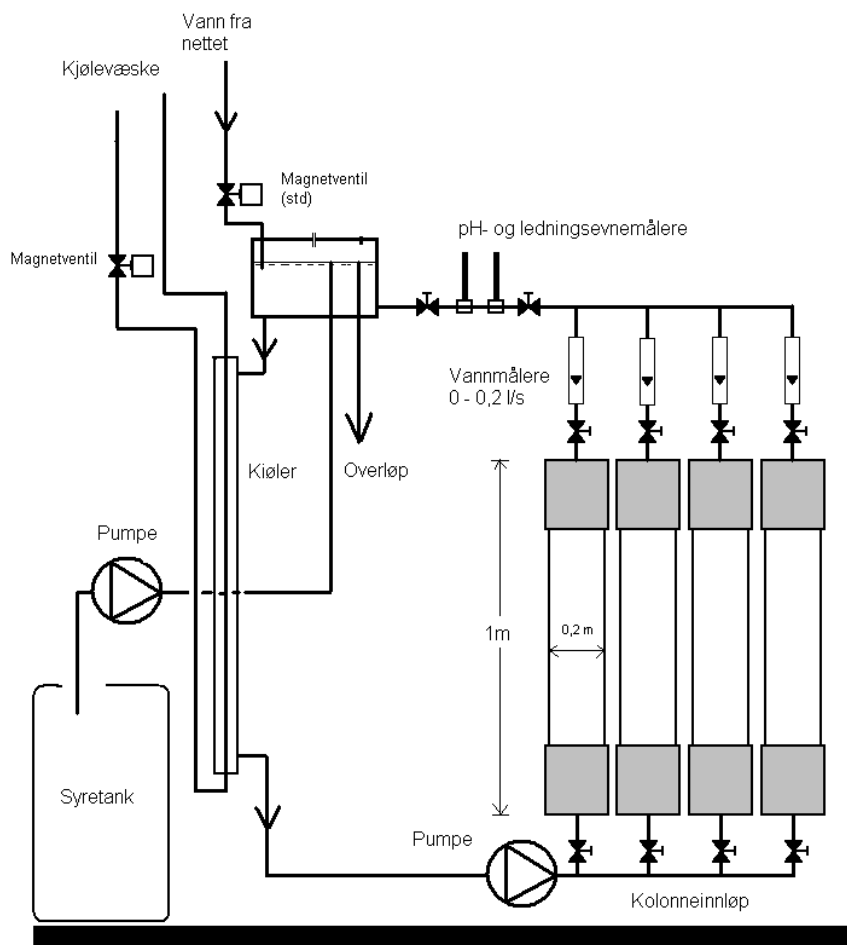
Hver kolonne ble fylt med 40 kg materiale. Før oppfylling ble materialet vasket på 2 mm sikt, mettet med vann og overflatetørket [3].

Prøvematerialet ble eksponert for vann uttatt fra ledningsnettet ved at vannet ble pumpet inn i kolonnene oppstrøms, se Figur 2. Ved utløpet til kolonnene ble pH i eksponeringsvannet målt kontinuerlig for begge prøveriggene. Vannet sirkulerte i lukket krets og gikk til overløp når enten syre eller vann fra ledningsnettet ble tilsatt for å oppnå de ønskede eksponeringsbetingelsene. Gjennomstrømningshastigheten for vannet i hver kolonne var satt til 240 l/h for rigg 1 og 175 l/h for rigg 2.

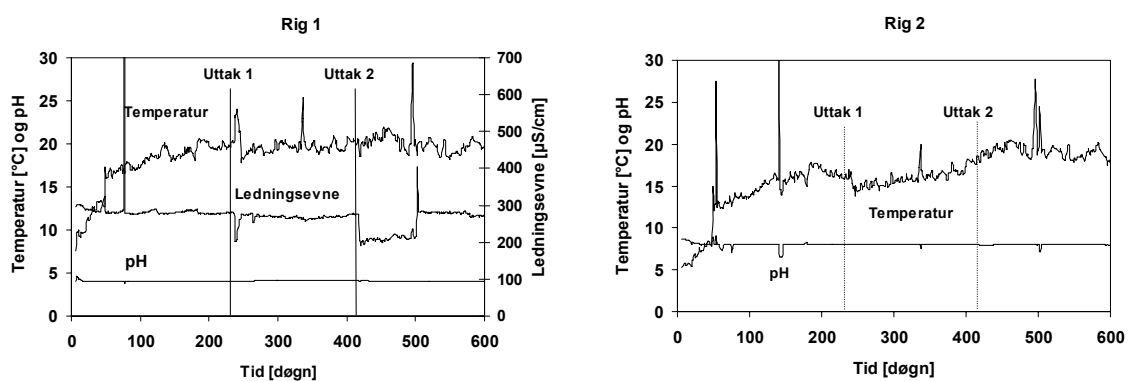
I rigg 1 ble materialet eksponert ved pH 4. For å holde konstant pH, ble eksponeringsvannet tilsatt 2 % saltsyre (0,66 M HCl). Syren ble tillaget ved å fortynne konsentrert HCl (37 % p.a., Merck) med vann fra ledningsnettet i egen tank. Syretilsetningen ble pumpet inn ved en perestaltisk pumpe. Den ønskede elektriske ledningsevnen i eksponeringsvannet var satt til 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Denne konstante ledningsevnen ble oppnådd ved å regulere inn vann fra ledningsnettet (fortynning).

I rigg 2 ble materialet eksponert ved pH 8. I denne riggen ble konstant pH oppnådd kun ved å regulere mengden vann fra ledningsnettet inn i sirkulasjonssystemet.

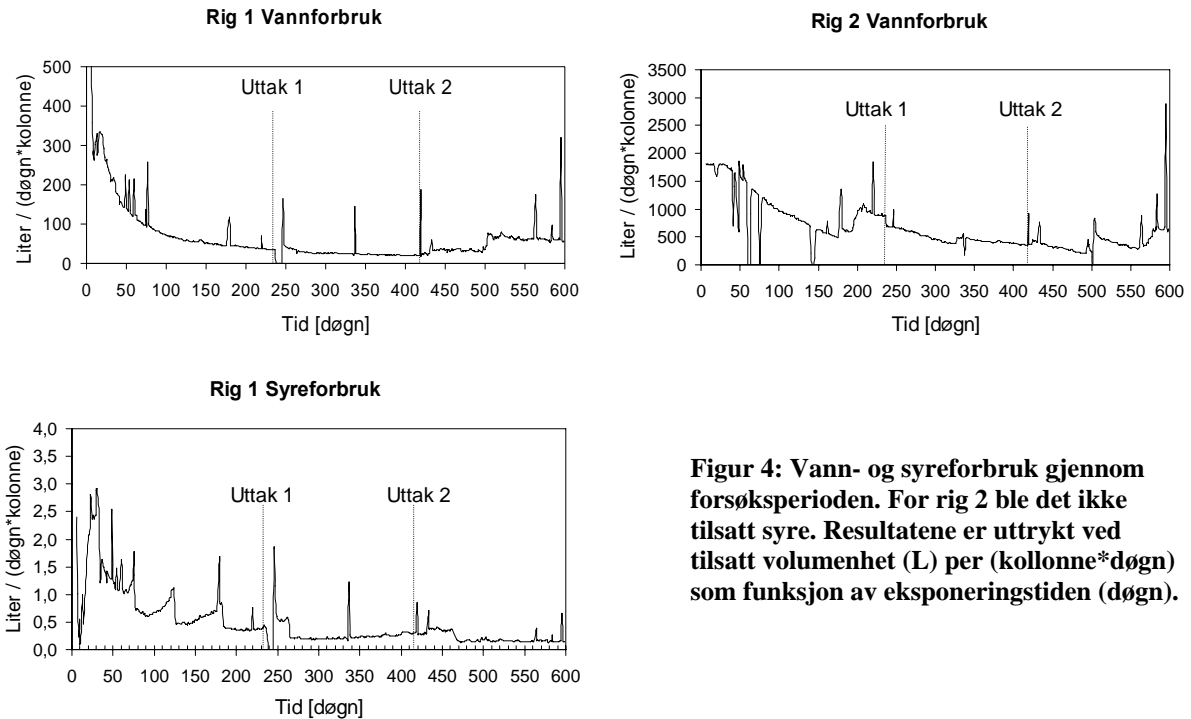
Prøveriggene var automatisert og ble styrt med PC tilknyttet en datalogger Agilent 34970A. Software ("Resirk PH v1.4") var utviklet på SINTEF Byggforsk, og skrevet i Visual Basic. Ledningsevne, pH, temperatur, vannforbruk og syreforbruk ble logget gjennom hele forsøksperioden, se Figur 3 og Figur 4.



Figur 2: Planskisse av rigg 1. Rigg 2 er lik rigg 1 bortsett fra at den ikke er tilkoblet syretank eller ledningsevne måler



Figur 3: Loggedata gjennom forsøksperioden. Rig 1: Ledningsevne, pH og temperatur. Rig 2: Temperatur og pH



Figur 4: Vann- og syreforbruk gjennom forsøksperioden. For rig 2 ble det ikke tilsatt syre. Resultatene er uttrykt ved tilsatt volumenheter (L) per (kolonne*døgn) som funksjon av eksponeringstiden (døgn).

2.3 Prøvetaking

Det ble tatt 100 ml prøve av riggvannet fra hver rigg med tre til 6 dagers mellomrom. Første vannprøve ble tatt ut 42 dager etter oppstart.

Under eksponeringen ble det tatt ut tilslag fra testtriggen i tre omganger som vist i Tabell 2. Uttaket ble gjort ved å demontere og tømme en kolonne fra henholdsvis rigg 1 og rigg 2. Ved prøveuttak 2 ble det tatt ut 2 kolonner fra rigg 1 og to kolonner fra rigg 2. Tilslagets kornstørrelsesfordeling, bulkdensitet, korndensitet, vannabsorpsjon, LA-verdi og syreløslighet ble bestemt. Bestemmelse av bulkdensitet og syreløslighet ble utført på ovnstørt tilslag fra korngraderingsbestemmelsen. Tilslaget ble først blandet og splittet i henhold til NS-EN 932-2 [7]. Før eksponering ble materialet testet for de samme mekaniske egenskapene i tillegg til at den syreløselig andelen ble bestemt [3].

Tabell 2: Prøveuttak og antall kolonner

Prøveuttak	Utført	Eksponeringsdøgn	Antall kolonner
1	17.11.2004	237	2
2	18.05.2005	419	4
3	15.11.2005	600	2

2.4 Prøvemethoder

2.4.1 Korngradering

Bestemmelse av korngradering ble utført i henhold til NS-EN 933-1, Prøvmingsmetoder for geometriske egenskaper for tilslag. Del 1: Bestemmelse av kornstørrelsesfordeling. Sikteanalyse. Det ble utført to parallelle målinger på tilslaget fra hver rigg.

2.4.2 Bulkdensitet og hulrominnhold

Bestemmelse av bulkdensitet ble utført i henhold til NS-EN 1097-3, Prøvningsmetoder for mekaniske og fysiske egenskaper for tilslag. Del 3: Bestemmelse av løst lagret densitet og hulrominnhold.

Vibrert bulkdensitet ble bestemt som beskrevet i NS-EN 1097-3, men før volumregistrering ble tilslaget vibrert i 60 sekunder.

2.4.3 Korndensitet og vannabsorpsjon

Korndensitet og vannabsorpsjon ble bestemt i henhold til NS-EN 1097-6, Prøvningsmetoder for mekaniske og fysiske egenskaper for tilslag, Del 6: Bestemmelse av korndensitet og vannabsorpsjon. Korndensitet og vannabsorpsjon ble både bestemt på hele fraksjonen og på fraksjonen etter fjerning av partikler mindre enn 4 mm.

For å beregne korndensitet og vannabsorpsjon på prøver med finfraksjon måtte partikler < 4 mm separeres og volumbestemmelsene for denne andelen ble utført etter en egen modifisert prosedyre. Dette var på grunn av problemene med å veie tilslag mindre enn 4 mm i vann for volumbestemmelse. Volumet ble derfor estimert ved å komprimere tilslaget i et litermål. Volumet i milliliter brukes som mål på tilslagetets masse i gram (m_v) i vann. Vannet helles av tilslaget mindre enn 4 mm, og masse av overflatetørt tilslag inkludert boks ($m_1 + m_b$) estimeres ved tørking i tørkeskap kombinert med hyppig omrøring.

De målte verdiene for partikler < 4 mm oppnådd ved denne modifiserte prosedyren summeres med de målte verdiene utført i henhold til standarden på standardfraksjonen (> 4 mm). Dette gir grunnlag for beregning av overflatetørr (ρ_{rd}) og ovenstørr (ρ_{ssd}) partikkeldensitet samt vannabsorpsjon (w_{abs}) bestemt både med og uten tilslag mindre enn 4 mm.

Det ble utført tre parallelle målinger på tilslaget fra hver rigg.

2.4.4 LA-test

LA-test ble utført på uvasket tilslag i henhold til NS-EN 1097-2, Prøvningsmetoder for mekaniske og fysiske egenskaper for tilslag. Del 2: Metoder for bestemmelse av motstand mot knusing. Prøvingen ble utført ved laboratoriet til Statens vegvesen. LA-verdi ble bestemt på tre partikkelfraksjoner:

1. 10-14 mm (standard LA verdi)
2. Partikler > 4 mm (modifisert LA test I)
3. Partikler > 2 mm (modifisert LA test II)

2.4.5 Syreløselighet

Syreløselighet ble bestemt etter en metode basert på NT Build 437. Fire gram prøve ble tørket i to timer ved 105 °C. Prøve ble veiet og tilsatt 3 ml absolutt etanol, 150 ml vann og 10 ml konsentrert perklorsyre. Blandingen ble rørt med magnetrører i 10 min og fikk deretter stå over natten før filtrering. Den syreløslige fraksjonen ble tørket ved 105 °C og veiet. Fire paralleller av tilslaget fra hver rigg ble analysert.

2.4.6 Kjemisk analyse

Vannprøvene fra riggene (100 ml) ble filtrert på 589² Blue ribbon filterpapir, fylt på 100 ml polypropenflasker, tilsatt 0,5 ml 14,4 M HNO₃ og oppbevart ved romtemperatur før analyse.

Alle vannprøvene ble først analysert med hensyn på Ca og Si. Analysen ble utført ved hjelp av Shimadzu AA-6800 flamme atomabsorpsjonsspektrometer (FAAS). Før kalsiumanalysen ble 3-5 ml

prøve tilsatt 1 ml 10 g/L La_2O_3 (endelig konsentrasjon 0,2 g/L) samt 0,25 ml 65 % HNO_3 og fortynnet til 50 ml. Silisiuminnholdet ble analysert uten videre preparering av prøven. Alle reagenser var av p.a. kvalitet fra Merck.

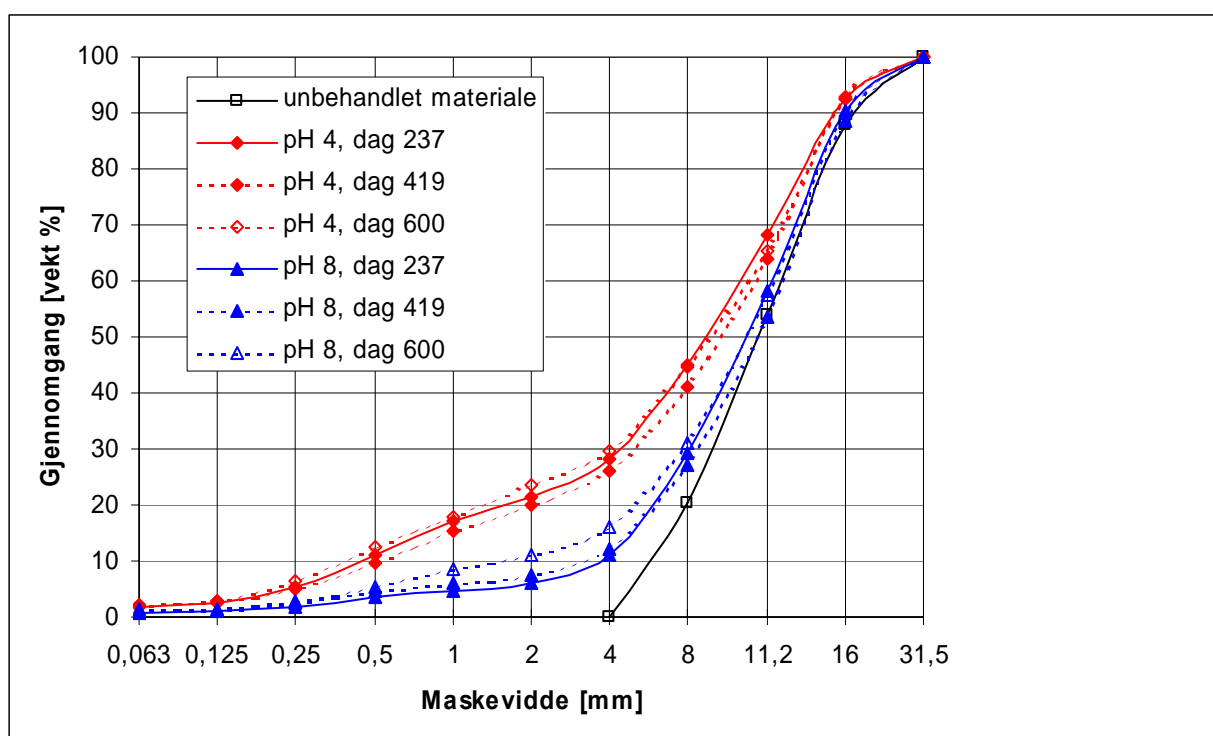
På bakgrunn av analyseresultatene av Ca og Si ble et prøveutvalg gjort for en multielement bestemmelse i vannprøvene ved ICP-OES. Dette var typiske elementer i sementmatriksen (Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Na, S og Si), tung metaller (Cd, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn) og elementer som danner (oxy)anioner (As, B, Cr, Mo, Sb, Se and V). Analysene ble utført ved Energy Research Centre of the Netherlands (ECN). I denne rapporten blir elementene som er viktige i forhold til sementhydratfasene diskutert. Dette inkluderer Al, Ca, Fe, Si og SO_4 .

3 Resultater

3.1 Mekaniske egenskaper

3.1.1 Korngradering

Gjennomsnittlige resultater er gitt i Figur 5. Beregnet graderingstall er vist i Tabell 3. Korngradering av ubehandlet materiale ble bestemt før vasking av materialet på 2 mm sikt. Ettersom kolonnene ble fylt med materiale som var vasket på 2 mm sikt er det valgt å trekke 0-2 mm fraksjonen fra den målte korngraderingen for ubehandlet materiale. På den måten oppnås det et estimat av kornfordelingen ved testperiodens begynnelse. Figur 5 viser at finere partikler dannes under eksponeringen. Denne effekten er sterkest ved pH 4, noe som figuren viser klart. Økningen i graderingstallet som funksjon av eksponeringstiden var derfor langt høyere for pH 4 enn for pH 8, se **Tabell 3**.



Figur 5: Gjennomsnittlig kornfordeling for tilslag fra hvert uttak og for ubehandlet prøve. Partikkelstørrelsesfordelingen for det ubehandlede materialet er estimert, se teksten

Tabell 3: Graderingstall, C_u , beregnet fra kornkurven for ubehandlet og behandlet materiale

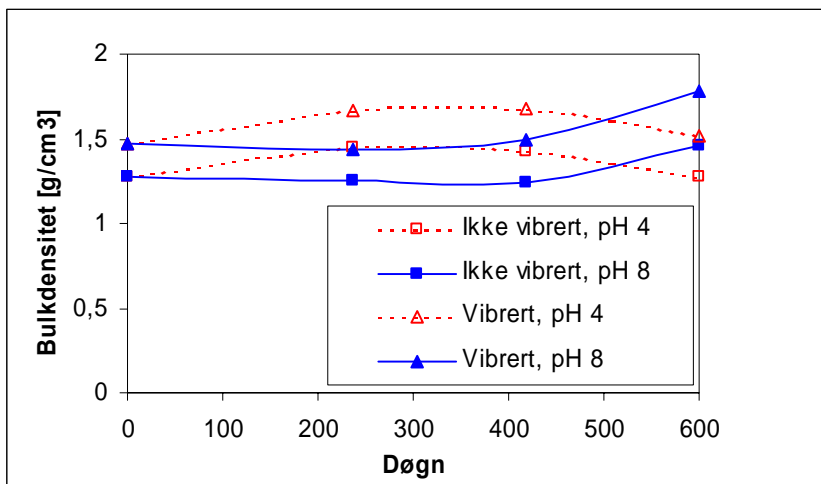
Dag	pH 4			pH 8		
	d_{10}	d_{60}	$C_u = d_{60}/d_{10}$	d_{10}	d_{60}	$C_u = d_{60}/d_{10}$
0	6,18	11,8	1,9	6,18	11,8	1,9
237	0,43	10,03	23,3	3,68	11,42	3,1
419	0,53	10,62	20,0	3,3	11,87	3,6
600	0,38	10,35	27,2	1,58	11,5	7,3

3.1.2 Bulkdensitet og hulrominnhold

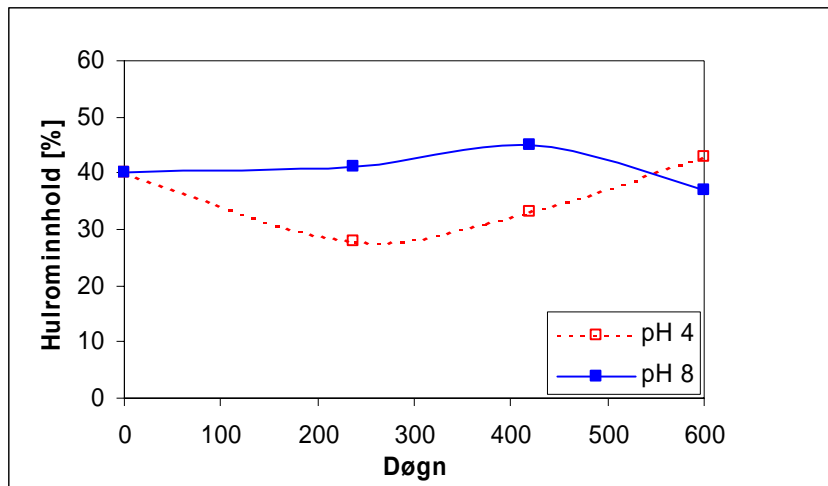
I forrige avsnitt ble det vist at graderingstallet ($C_u=d_{60}/d_{10}$) økte kraftig for materialet eksponert ved pH 4. Det kan derfor forventes at bulkdensiteten vil øke når C_u øker, noe som også ble målt i dette forsøket, se Figur 6. Økningen i bulkdensitet ble målt i den første perioden. I denne perioden ble den største økningen i C_u også målt. Etter 600 døgn synker bulkdensiteten. Årsaken til dette kan være noe vanskelig å fastsette ut fra undersøkelsene som er utført. En sannsynlig årsak kan imidlertid være at de finere partiklene har blitt løst opp. I tillegg er målingene utført på eksponert materiale som er vasket på 63 μm rist (se avsnitt 2.4.2). Dersom sementpastakornene blir redusert i størrelse med økende eksponeringstid vil en andel til slutt danne partikler < 63 μm . Ved pH 4 vil også en gellignende masse dannes når kalsiumsilikathydratene brytes ned [8]. Dette er prosess som også er tidsavhengig. En del av denne andelen vil derfor vaskes bort under prepareringen av prøvene til bulkdensitetsmålingene. Prøven vil fortsatt oppta det samme volumet og bulkdensiteten vil derfor synke.

For pH 8 måles det ingen signifikant økning i bulkdensitet opp til 419 døgn, se Figur 6. Dette samsvarer med liten økning i målt C_u i forhold til pH 4. Etter 600 døgn øker bulkdensiteten ved pH 8. Årsaken til dette er, som ved pH 4, vanskelig å fastsette ut ifra undersøkelsene som ble utført. Den kjemiske nedbrytningen er imidlertid forskjellig ved de to pH verdiene, og det kan forventes utfellingreaksjoner i poresystemet ved pH 8, noe som kan øke bulkdensiteten (se avsnitt 3.2).

Det beregnede hulrominnholdet vises i Figur 7 og samsvarer med endringen i målt bulkdensitet for begge pH verdier.



Figur 6: Målt bulkdensitet som funksjon av eksponeringstiden.



Figur 7: Beregnet hulrominnhold som funksjon av eksponeringstiden

3.1.3 Korndensitet og vannabsorpsjon

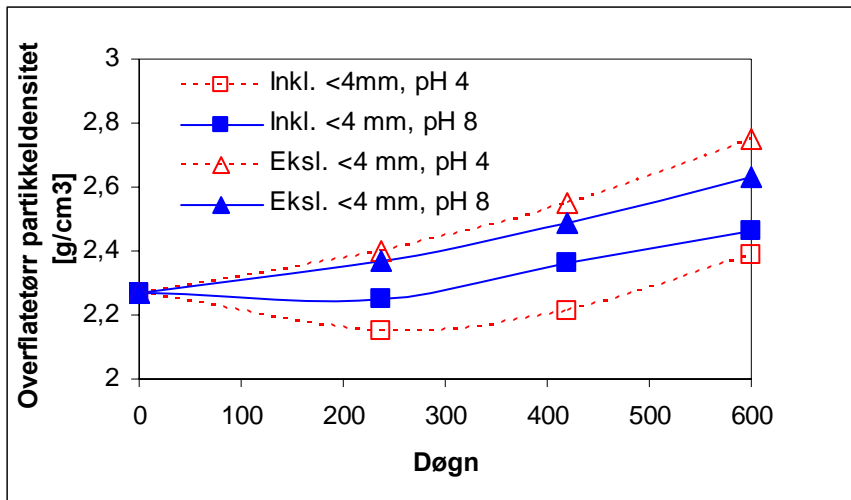
Densiteten til tilslag og sementpasta i betong er forskjellig. Norske bergartforekomster benyttet som tilslag i betong har en partikkeldensitet rundt $2,6-2,8 \text{ g/cm}^3$. Densiteten til ren sementpasta vil variere med vann/sement forholdet (w/c). Økende w/c gir synkende densitet og vil normalt være i området $1,3-1,8 \text{ g/cm}^3$. Differansen i tetthet til delmaterialene i (knust) betong gjør at densiteten ved kjemisk nedbrytning av sementpastaen vil enderes. Det er vist i avsnitt 3.1.1 at *mindre* partikler dannes fra prøvematerialet (10-20 mm) under eksponeringen. Figur 5 viser at mengden partikler i området 1-4 mm har økt betydelig ved pH 4 som følge av eksponeringen. Dersom denne økte finfraksjonen består hovedsakelig av sementpastakorn (redusert i partikkelstørrelse som følge av nedbrytning) kan det forventes at den målte partikkeldensiteten for hele partikkelstørrelseområdet vil synke. I dette arbeidet ble målingene utført med og uten finfraksjon (< 4 mm).

Figur 8 og Figur 9 viser henholdsvis overflatetørr og ovnstørr partikkeldensitet. Resultatene viste at det var forskjell mellom målingene utført med og uten finstoff. Begge figurene viser at densiteten øker med tiden i målingene utført på materialet uten finstoff for begge pH verdier. Dette er i samsvar med at små sementpastakorn løses og større korn reduseres i størrelse, avhengig av utgangsstørrelsen. Dette betyr at prøven vil inneholde en større andel naturtilslag ved målingene uten finstoff og densiteten vil øke som følge av forskjellen i materialtetthet på pasta og naturtilslag.

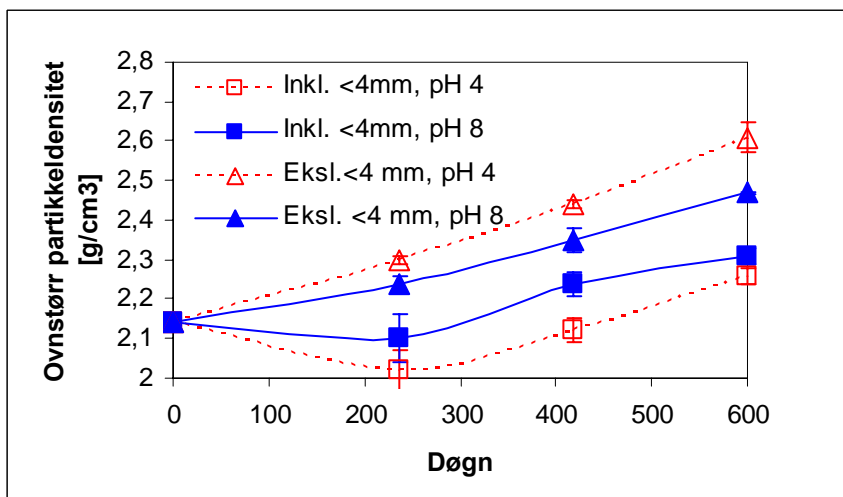
I densitetsmålingene hvor finfraksjonen er tatt med synker densiteten ved den første målingen (237 døgn) for pH 4 samtidig som den ikke øker ved pH 8. Dette er klare indikasjoner på at den økte finfraksjonen målt i Figur 5 består i stor grad av sementpastakorn. Effekten er sterkest ved pH 4. Ved ytterligere eksponering vil en del av finfraksjonen løses samtidig som det vil dannes ny finfraksjon. Sistnevnte prosess retarderes fordi tilgjengeligheten til sementpastahydrater blir mindre (se avsnitt 3.2). Dette betyr at densiteten igjen vil øke, noe som også måles etter 419 døgn.

Den målte vannabsorpsjonen er vist i Figur 10 a-b. Målingene utført på materiale uten finstoff viste en lavere vannabsorpsjon etter 237 døgn (svakt for pH 8). Dette samsvarer med en økning i partikkeldensiteten (Figur 8 og Figur 9) da prøven vil inneholde mindre pasta og mer naturtilslag. Ved videre eksponering øker vannabsorpsjonen. Målingene utført på materiale med finstoff var forbundet med stor usikkerhet. Årsaken er at det generelt var vanskelig å utføre målingene på prøver som inneholdt hele fraksjonen (inkl. andelen < 4 mm) etter eksponering. Standard prøving utføres på materiale som er > 4 mm. Fraksjonen < 4 mm ble målt etter egen modifisert prosedyre (se avsnitt 2.4.3) og resultatene viste en betydelig spredning. Til tross for dette er det ganske sannsynlig at vannabsorpsjonen ved 237 døgn er vesentlig høyere i målingene med finstoff enn uten, og at denne

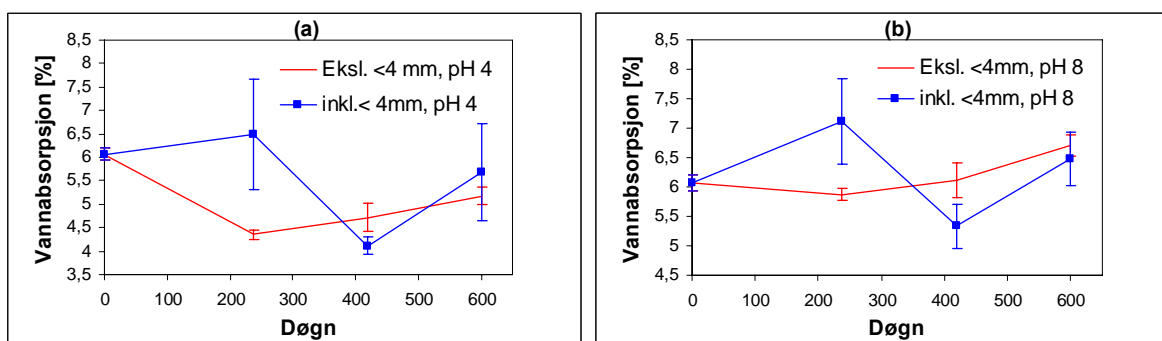
effekten er sterkest for pH 4. Dette samsvarer med at dannet finfraksjon i stor grad består av sementpastakorn som diskutert ut fra tidligere resultater.



Figur 8: Overflatetørr korndensitet for tilslag inklusive og eksklusive materiale med kornstørrelse mindre enn 4 mm



Figur 9: Ovnstørr korndensitet for tilslag inklusive og eksklusive materiale med kornstørrelse mindre enn 4 mm



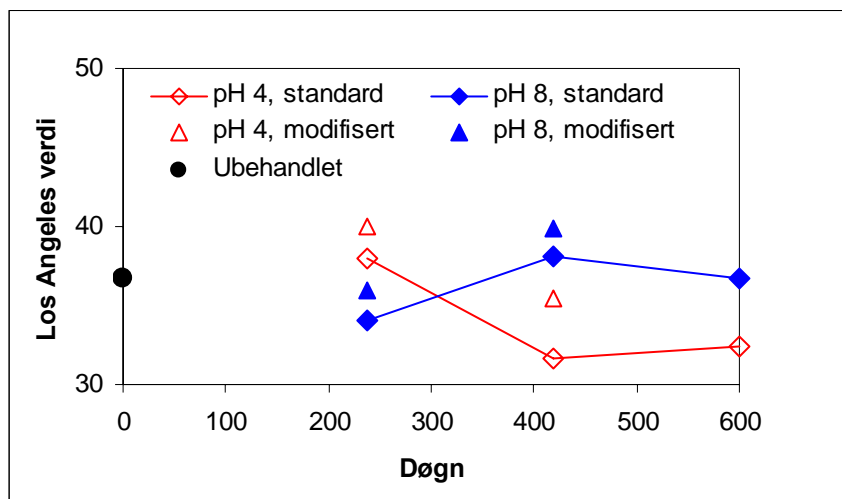
Figur 10: Vannabsorpsjon for tilslag inklusive og eksklusive materiale med kornstørrelse mindre enn 4 mm eksponert ved (a) pH 4 og (b) pH 8

3.1.4 Mekanisk styrke

Motstandsevne mot nedknusing ble målt etter Los Angeles metoden. Resultat av Los Angeles testen er vist i Figur 11. Ubehandlet materiale ble målt etter modifisert LA metode II (> 2 mm) [3]. Dersom samme ubehandlet materialet hadde vært målt etter LA metode I (> 4mm), er det sannsynlig at den målte LA verdien hadde vært noe lavere enn målt etter LA metode II.

Ut i fra dette kan vi se at LA verdien stiger for pH 4 ved 237 døgn. Ved 419 døgn har LA verdien sunket signifikant for begge metoder ved pH 4. Denne nedgangen oppnåes fordi mer sementpasta løses eller reduseres i størrelse slik at en del ikke vil være innenfor partikkelstørrelseområdene til de forskjellige LA metodene og derfor bli vasket bort før testen. Ved 600 døgn er LA verdien tilnærmet uendret.

Ved pH 8 er den kjemiske nedbrytningen forskjellig fra pH 4 (se avsnitt 3.2). Figur 11 viser at en økning i LA verdien ble målt ved begge metoder fra 237-419 døgn. Årsaken til dette kan være at det felles ut mineraler (kalsitt, jern- og aluminium(hydr)oksider) på overflaten og i poresystemet til tilslagskronene. Dette vil gi bidrag til finstoff i en LA test. Ved 600 døgn er LA verdien tilnærmet uendret.



Figur 11: Måling av LA verdi utført etter standard metode (10-14 mm fraksjon) og modifisert LA metode I (> 4mm). Ubehandlet materiale (0 døgn) ble målt etter modifisert LA metode II (> 2 mm)

3.1.5 Oppsummering av endringer i materialegenskapene

Eksposeringen fører til en økning i mengden fine partikler ved begge pH-nivåene, se Figur 5. Effekten er mer utpreget ved pH 4 enn ved pH 8. Dette kan tydelig sees i kornfordelingskurvene. Den største endringen ble målt i den første eksponeringsperioden (0-237 døgn).

Partikkelstørrelsesfordelingen endret seg lite etter dette. Årsaken til dette kan være at vannforbruket er høyest i den første perioden. Mengden ”nytt vann” vil være mer aggressivt i forhold til vannet som sirkuleres og derfor endres kornfordelingen ved å oppløse sementpasta.

Bulkdensiteten øker noe over tid ved pH 4 men synker igjen i siste del av forsøksperioden, se Figur 6. Økningen er i samsvar med den økte andelen finstoff som ble vist i kornfordelingskurvene. Ved pH 8 er bulkdensiteten nokså konstant frem til uttak 2, men øker noe i uttak 3.

Både overflatetorr og ovnstorr korndensitet øker noe gjennom forsøksperioden, se Figur 8 og Figur 9. Dette er fordi sementpastaen løses og etterlater naturlig tilslag med høyere korndensitet.

Korndensiteten målt på materialet med finfraksjon (< 4 mm) sank i løpet av den første eksponeringsperioden. Dette samsvarer med dannelsen av finere partikler vist i Figur 5.

Vannabsorpsjonen ved pH 4 synker betydelig i første del av forsøksperioden og øker noe i siste del av perioden, mens den stiger svakt gjennom hele perioden ved pH 8, se Figur 10. Vannabsorpsjon målt på materiale med finstoff hadde stor spredning i resultatene men var i samsvar med de øvrige resultatene med hensyn til dannelsen av finere partikler.

Den mekaniske styrken ble målt ved Los Angeles test, se Figur 11. Resultatene viser forskjellig styrkeutvikling ved de forskjellige pH verdiene. Dette har en klar sammenheng med at nedbrytningsmekanismene er forskjellige ved pH 4 og pH 8.

3.2 Kjemisk nedbryting av sementpastaen

Knust betong reagerer ulikt med vannet i dette kolonneforsøket. Årsaken er at rig 1 og 2 eksponeres ved forskjellig pH og at vannforbruket er mye høyere i rig 2. Ved pH 4 er vannet svært aggressivt mot sementhydratene. Siden rig 1 blir kjørt i kontinuerlig vannmettet tilstand og ved sur pH, felles det ikke ut kalsiumkarbonat som kan retardere utlekkingen av Ca. Prøvematerialet som ble benyttet var også delvis karbonatisert, det vil si at tilslagskornene hadde et ytre sjikt (få millimeter) av kalsiumkarbonat (CaCO_3). Ved pH 4 vil dette sjiktet løses raskt og ”fersk” sementpasta løses. Portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] vil løses direkte. Kalsiumsilikathydratene (C-S-H) vil dekomponere til oppløst $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og en silikagel (lav løselighet). Aluminat- og ferritthydratene vil dekomponere og vil i liten grad felles ut som henholdsvis $\text{Al}(\text{OH})_3$ og $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ved denne pH verdien [8]. Under de akselererte laboratoriebetingelsene i dette forsøket (pH 4 og høyt vannforbruk) kan det forventes at alle sementpasta-mineralene vil løses med unntak fra deler av C-S-H fasen. Tidligere utlekkingsforsøk viser imidlertid at ved pH 4 er en stor del av Si bundet i en amorf silika ($\text{SiO}_2_{[\text{am}]}$) men at en målbar mengde Si foreligger i vannfasen. Dette kan skyldes at ved nedbrytning av C-S-H, kan andre Si mineraler [$\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot\text{X}(\text{H}_2\text{O})$] ha blitt utfelt som har en vesentlig høyere løselighet i vann enn $\text{SiO}_2_{[\text{am}]}$ [8]. Antas det at C-S-H fasen kan generelt støkiometrisk beskrives som $(\text{CaO})_3(\text{SiO}_2)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ vil SiO_2 andelen være på 33 vekt %. Dette vil være en øvre grense for hvor mye det dannes av $\text{SiO}_2_{[\text{am}]}$. På bakgrunn av dette kan det forventes en hurtig masseoppløsning som funksjon av eksponeringstiden ved pH 4 helt til oppløsningen (utlekking) på et tidspunkt blir fullstendig diffusjonsstyrt og avtar kraftig.

Ved pH 8 (rig 2) er betingelsene forskjellige. Rundt denne pH verdien er CaCO_3 (kalsitt) i likevekt med vann ved atmosfæretrykk ($P_{\text{CO}_2} = 10^{-3,5}$ atm) vist i ligning (1):



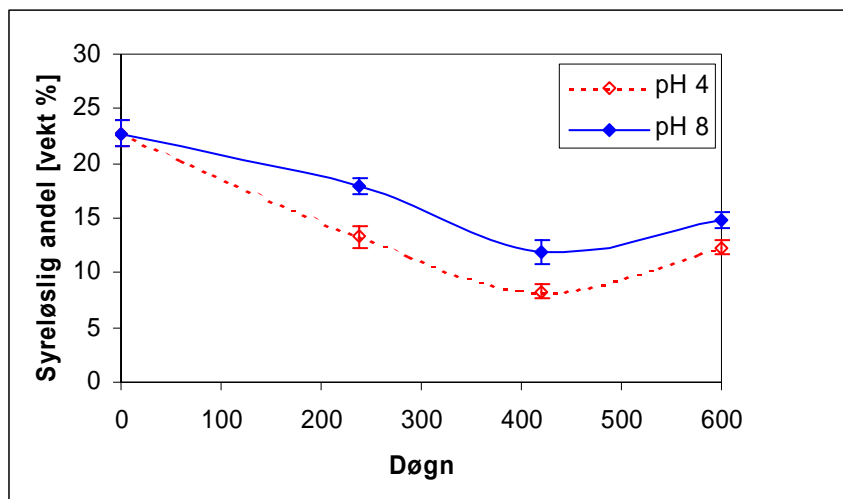
Kalsitt er tungtoppløselig og små mengder vil i utgangspunktet løses ved en pH 8. Det kan imidlertid ikke forventes at tilslagskornene benyttet i dette forsøket er uniformt dekket av et sjikt med kalsitt. Derfor vil også de andre sementpastamineralene løses. Innover i tilslagskornene vil det dannes konsentrasjonsgradienter, spesielt med hensyn til løst $\text{Ca}(\text{OH})_2$, og en andel vil felle ut som CaCO_3 innover i poresystemet til større tilslagskorn avhengig av tilgjengelig karbonat. Dette vil også retardere oppløsningen av sementpastaen. Denne prosessen antas å være liten, siden eksponeringsvannet har liten alkalitet, men over en lengre tidsperiode kan den ha betydning.

3.2.1 Mengde sementpasta oppløst

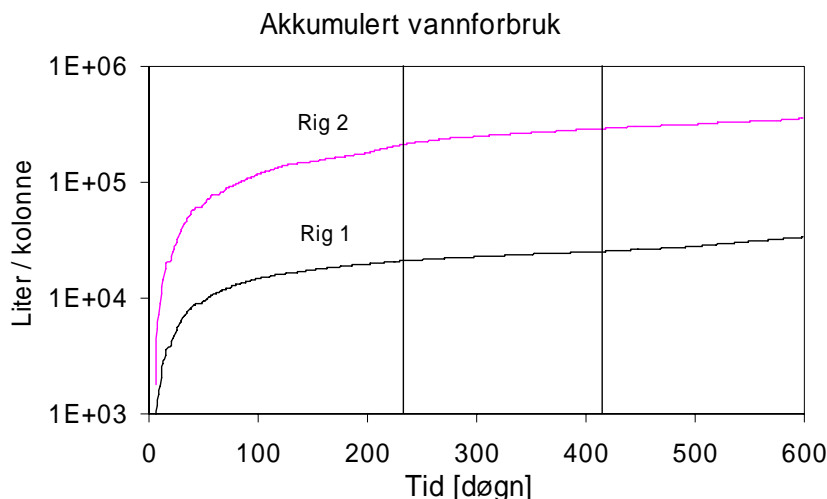
For å måle andelen sementpasta som løses opp ble den syreløselige andelen målt ved hvert prøveuttak. Resultatene er vist i Figur 12. Ved pH 4 løses sementpastaen i eksponeringsvannet hurtig opp til 400 døgn, noe som viser at et kalsitt sjikt ikke retarderer denne prosessen ved en slik aggressiv pH. Det største massetapet måles ved første prøveuttak (237 døgn). Målingen etter 600 døgn viser en noe

høyere syreløselig andel enn etter 419 døgn, noe som kan skyldes inhomogenitet i prøvematerialet. Det som imidlertid er viktig å registrere er at den syreløselige andelen med stor sannsynlighet ikke har sunket ytterligere i forhold til de tidligere prøveuttakene selv om det eksisterer usikkerhet med hensyn til den siste målingen (600 døgn). At den kjemiske nedbrytningen avtar og tilnærmet opphører forklares ved at tilslagskornene blir utvasket for de kjemiske hovedelementene i sementpastaen. Resterende utlekkbar mengde $\text{Ca}(\text{OH})_2$ blir fullstendig diffusjonsstyrt (større tilslagskorn).

Ved pH 8 er nedbrytningsforløpet forskjellig. Sammenlignet med pH 4 ble det målt betydelig høyere syreløselig andel (lavere massetap) gjennom hele forsøksperioden, noe som viser den kraftige effekten av pH verdien, se Figur 12. Videre så løses det en mindre mengde sementpasta i den første perioden (0- 237 døgn) i forhold til den andre perioden (237-419 døgn) ved pH 8. I den siste perioden (419-600 døgn) løses det ikke ytterligere mengde sementpasta slik forløpet også var ved pH 4 i samme periode. Dette viser at forskjellige løselighetsmekanismer er gjeldende gjennom forsøksperioden for denne pH verdien. Dette underbygges av Figur 13 som viser at det akkumulerte vannforbruket som funksjon av eksponeringstiden var langt høyere i den første perioden i forhold til den andre hvor det største massetapet ble målt ved pH 8. Dette viser mest sannsynlig effekten av kalsitt (lav løselighet) som er styrende for løseligheten (massetap) i den første forsøksperioden. Når kalsittsjiktet gradvis løses over tid så vil mer fersk sementpasta komme i kontakt med eksponeringsvannet. Dette fører til en raskere oppløsning siden løseligheten er langt høyere for hydratfasene enn kalsitt ved pH 8. I den siste perioden blir tilslagskornene gradvis utvasket og diffusjonshastigheten blir svært lav. Her kan det heller ikke utelukkes at noe kalsitt utfelles som følge av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gradienten (se over), noe som også fører til lav diffusjon.



Figur 12: Gjennomsnittlig syreløslig andel inkludert tilslag mindre enn 4 mm

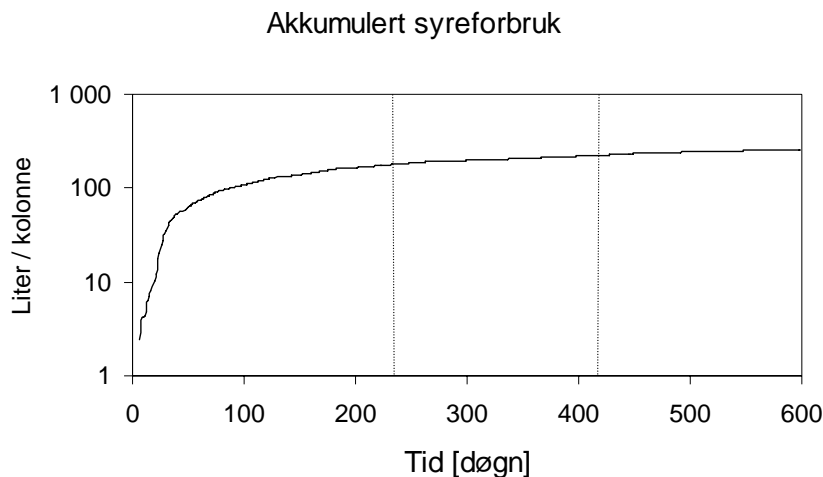


Figur 13: Akkumulert vannforbruk som funksjon av eksponeringstiden. Vertikale linjer indikerer prøveuttak etter 237 og 419 døgn

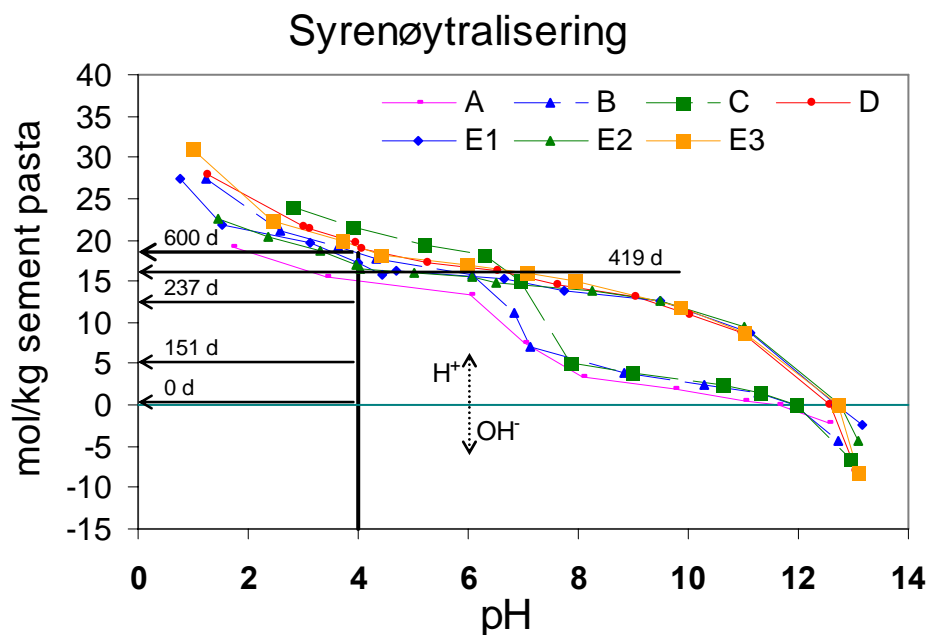
3.2.2 Syrenøytraliseringskapasitet

Syrenøytraliseringskapasiteten (bufferkapasitet) til et materialet defineres som den mengde syre som må tilføres for å bringe material-pH til en bestemt slutt-pH. Dette kan måles ved å nedknuse materialet (< 1 mm) og tilsette en fortennet syre i et bestemt væske/faststoff forhold. Suspensjonen omrøres i lukket beholder inntil likevekt er oppnådd (48 timer). Ved å repetere dette for forskjellige tilsatser av syre oppnåes en syrenøytraliseringsmengde som funksjon av pH.

I dette nedbrytningsforsøket har materialet blitt tilført syre for at prøvematerialet skal holdes konstant ved en pH 4. Dette vil si at syretilsetningen vil gradvis avta ettersom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ løses og nøytraliseres slik at bufferkapasiteten synker. I Figur 14 vises det at syreforbruket er høyest i starten av forsøket og at det avtar hurtig. I den siste eksponeringsperioden var syreforbruket svært lavt. Vi kan derfor anta at akkumulert syreforbruk ved 600 døgn er ekvivalent med syrenøytraliseringskapasiteten til materialet ved denne pH. Omregnes akkumulert syreforbruk til $(\text{mol tilsatt } \text{H}^+)/(\text{kg sement pasta})$ kan denne verdien sammenlignes med andre prøver av resirkulert tilslag undersøkt i Gjenbruksprosjektet [8]. Figur 15 viser en slik sammenligning og målt syreforbruk i dette forsøket er i godt samsvar med øvrige undersøkte prøver. Dette viser at det akkumulerte syreforbruket ved 600 døgn tilsvarener bufferkapasiteten til materialet ved pH 4. Videre så viser Figur 15 at det finnes en "rest" bufferkapasitet som er svært lite tilgjengelig i kolonneforsøket men som kan måles ved å knuse ned partiklene (prøve A-E i Figur 15). Dersom resirkulert tilslag (lik mengde sementpasta) skulle bli eksponert ved slike ekstreme betingelser som i kolonneforsøket (pH 4) så ville en mindre partikkelstørrelse (f. eks. 4-8 mm) være mer følsomt for massetap pga mer tilgjengelig bufferkapasitet selv om den målte syrenøytraliseringsverdien vil være den samme.



Figur 14: Akkumulert syreforbruk som funksjon av eksponeringstiden. Vertikale linjer indikerer prøveuttak etter 237 og 419 døgn



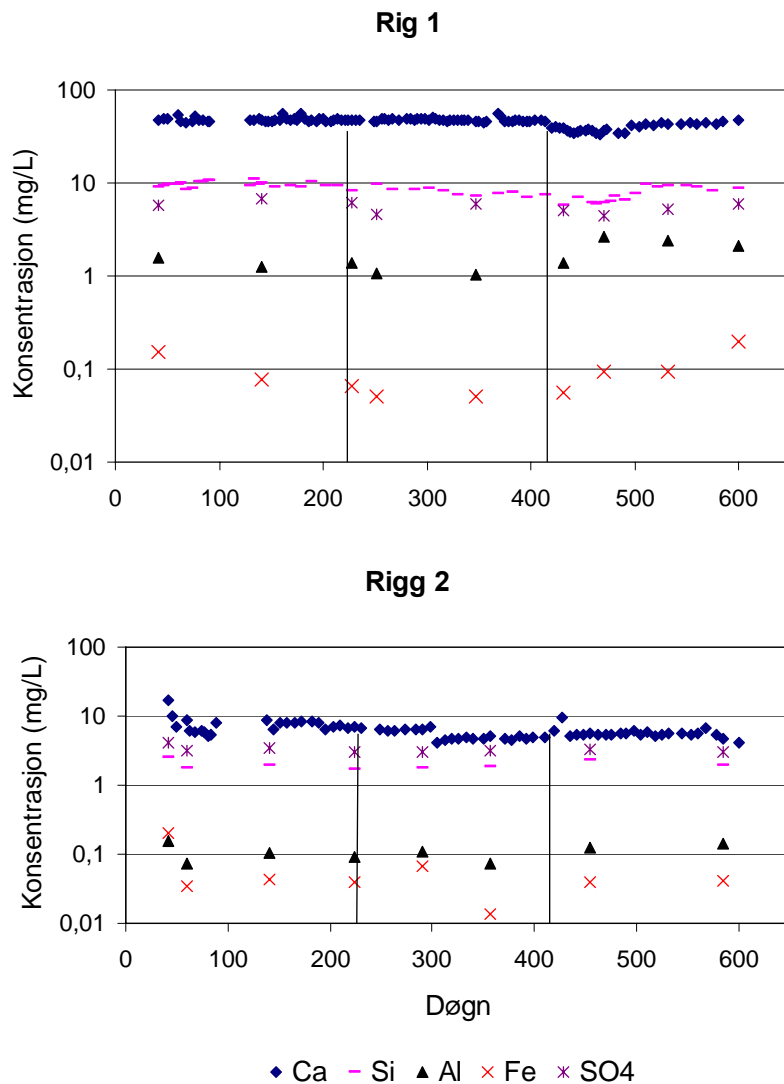
Figur 15: Syre/base-nøytraliseringskapasitet målt for forskjellige tilslagsprøver (A-E) med et sementpasta innhold i området 12-28 vekt % [8]. Akkumulert syremengde ved pH 4 i rigg-forsøket er vist i samme diagram. Alle verdier er omregnet til mengde syre tilsatt per vektenhet sementpasta

3.2.3 Kjemisk analyse av eksponeringsvann

Kjemisk nedbrytning av sementpastaen kan også undersøkes ved kjemisk analyse av eksponeringsvannet som funksjon av tiden. I forhold til typisk kjemisk sammensetning av en sementpasta så vil det være relevant å analysere hovedelementene; Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Si og SO_4 . Av disse elementene er det svært viktig å bestemme Ca og Si og til en viss grad Al, Fe og SO_4 . Konsentrasjonen av de sistnevnte elementene i eksponeringsvannet er vist i Figur 16. Her ble det funnet forhøyede konsentrasjoner av Ca, Si og Al i forhold til forventet bakgrunnskonsentrasjoner i eksponeringsvannet for begge pH verdier.

Ved pH 4 er gjennomsnittet for Ca og Si på henholdsvis 43 mg/L og 7,1 mg/L. Verdiene er korrigert for bakgrunnskonsentrasjoner på 3 mg/L og 1,5 mg/L for henholdsvis Ca og Si [9]. Dette gir et $\text{CaO/SiO}_2 \sim 4$. Dersom sementpastaen løses støkiometrisk ville $\text{CaO/SiO}_2 \sim 3$ hvor det antas at CaO og SiO_2 i en sementklinker er henholdsvis 65 og 22 vekt %. Dette viser at det oppnådde CaO/SiO_2 forholdet er svært nærme den støkiometriske verdien. Dette viser igjen den aggressive effekten ved pH 4 hvor nedbrytningen av sementpastaen ikke bare skyldes utlekking av Ca(OH)_2 , men en mer total nedbrytning av hydratfasene. Figur 16 viser også konsentrasjoner av Al som ligger minimum 10 ganger over forventet bakgrunnsnivå på $< 0,1$ mg/L. Dette er fordi aluminatfasene i sementpastaen vil nedbrytes og ikke utfelle som Al(OH)_3 ved denne pH verdien. SO_4 og Fe konsentrasjonene er litt vanskeligere å bedømme siden bakgrunnsverdiene varierer. Det forventes likevel at alt ”tilgjengelig” SO_4 og Fe (noe mindre) foreligger i løsning. Ut i fra de målte konsentrasjonene og det akkumulerte vannforbruket, ble et minimum massetap beregnet (se avsnitt 3.2.4). Dette er utført på bakgrunn av de målte Si og Ca konsentrasjonene i eksponeringsvannet.

Ved pH 8 ble det målt signifikant lavere konsentrasjoner av alle elementene bortsett fra Fe, se Figur 16. Gjennomsnittlig Ca og Si konsentrasjon var på henholdsvis 3,3 mg/L og 0,5 mg/L korrigert for de samme bakgrunnskonsentrasjonene angitt over. Her er det betydelig mer usikkerhet i forhold til resultatene ved pH 4, siden verdiene ved pH 8 nærmer seg bakgrunnsverdiene, som kan variere. Det vil derfor ikke være relevant å se på CaO/SiO_2 forholdet. Resultatene viser imidlertid en sterk reduksjon i Ca, Si og Al konsentrasjonene i forhold til pH 4, noe som er i henhold til resultatene diskutert i avsnitt 3.2.1. Ved pH 8 vil nedbrytningen derfor være en utvasking av Ca(OH)_2 fra sementpastaen. Avhengig av karbonatmengden i vannet så vil det utfelles CaCO_3 . Aluminat- og ferrittfasen vil også nedbrytes til blant annet $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ (gips), CaCO_3 , Al(OH)_3 og Fe(OH)_3 , der gips har høy løselighet sammenlignet med de andre spesiene ved denne pH verdien.



Figur 16: Konsentrasjonen av Ca, Si, Al, Fe og SO₄ i uttatte vannprøver som funksjon av eksponeringstiden. Vertikale linjer indikerer prøveuttak etter 237 og 419 døgn

3.2.4 Beregning av massetap

Den syreløslige delen av betongen (sementpasta) nedbrytes og vaskes gradvis ut av materialet over tid, se Figur 12. Nedbrytningen går raskere ved pH 4 enn ved pH 8. I prøveuttak 3 observeres det en økning i syreløslig andel. Økningen skyldes sannsynligvis inhomogenitet i prøvematerialet.

Massetapet kan estimeres direkte fra endring i syreløslig andel slik:

$$S.M._t + X = S.M._0$$

der

X	Total mengde materiale, av de opprinnelige 40 kg, som forsvinner mellom tid 0 (før eksponering) og tid t
S.M. _t	Total mengde syreløslig materiale ved tid t = (Syreløslig andel ved tid t)*(40 -X) kg/100
S.M. ₀	Total mengde syreløslig materiale i kolonnen før eksponering = (Syreløslig andel før eksponering)*40 kg/100

Massetapet ble også beregnet ut fra de kjemiske analysene (avsnitt 3.2.3). For pH 4 ble Si konsentrasjonen benyttet til å beregne oppløst C-S-H fase. Den målte Ca konsentrasjonen, fratrukket den ekvivalente andelen fra C-S-H fasen, ble medregnet som oppløst CaO. For pH 8 ble Ca konsentrasjonen regnet som oppløst CaO. Den første perioden på 40 døgn ble utregnet med en konsentrasjon av Ca på 16 mg/L fordi måledataene antyder en slik verdi i denne perioden. Si konsentrasjonen ved pH 8 ble utregnet som oppløst SiO₂. Det understrekes at en slik beregning medbringer usikkerhet siden bakgrunnsverdien er en konstant størrelse (1,5 mg/L) men som reelt vil variere. I tillegg har vi lave konsentrasjoner av Si ved pH 8.

Massetapet er angitt i Tabell 4. En god korrelasjon oppnåes mellom massetapet beregnet etter syreløselighet og kjemisk analyse. Det forventes at massetap beregnet etter den første metoden angir totalt massetap. Det vil si at finere partikler som dannes og blir transportert ut vil måles i den syreløselige resten som funksjon av tiden. Beregningen ved kjemisk analyse angir stoffer som er kjemisk oppløst i eksponeringsvannet og tar ikke med seg eventuelle finpartikler. På bakgrunn av dette så forventes det best korrelasjon mellom beregningene for pH 4 fordi eksponeringsvannet har sterk løselighetsevne og mindre finpartikler transporteres ut. Dette vises også i Tabell 4. Ved begge metoder så er massetapet størst ved pH 4.

Tabell 4: Massetap ved pH 4 og 8 utregnet på bakgrunn av syreløselighetsmålingene og kjemisk analyse.

pH	Massetap (vekt %) beregnet ved	
	Syreløselighet	Kjemisk analyse
4	12	11,3
8	9	6,6

4 Krav til materialer som brukes i VA-grøfter og vegfundamenter

4.1 Vurdering av testbetingelsene

Testrigger simulerte vanngjennomstrømning i en grøft der det er brukt knust betong i ledningssonen. Det var ønskelig å utføre forsøket under akselererte betingelser. Det innledende litteraturstudiet viste at følgende parametere påvirker nedbrytningshastigheten til knust betong i kontakt med vann [3]: kornstørrelse, vannets pH, CO₂-innhold i vannet, vannets temperatur og gjennomstrømningshastighet.

Det ble valgt å bruke 10-20 mm knust betong. Dette er realistisk i forhold til bruk i grøfter og veier.

Det ble valgt å gjøre testen ved to pH-nivåer: pH 4 og pH 8. Regnvann, overflatevann og jordvann varierer i pH: regnvannet i Norge har normalt pH 4,5-5,5 [10], rent ferskvann har pH 6-8 [11], mens myrvann kan ha ned mot pH 4. Når vann kommer i kontakt med betong vil pH øke raskt og stabilisere seg rundt pH 11 [3] avhengig av karboniseringsgraden til knust betong. De valgte pH nivåene i forsøket (pH 4 og 8) ligger innenfor det området som kan forventes ved bruk av knust betong i grøfter og veier.

De første 50 døgnene steg temperaturen i testvannet fra ca 7 °C til 16 °C i rigg 1 (pH 4) for deretter å stige langsomt til ca. 20 °C. I rigg 2 steg temperaturen i testvannet fra 5 °C til 13 °C i løpet av de første 50 døgnene, for deretter å stige langsam til 20 °C. Forsøket ble utført ved noe høyere temperatur enn det som er realistisk ved bruk som fyllmaterialer i grøfter, i og med at grunnvanntemperaturen i Norge er normalt < 8 °C, men det er vist tidligere at temperatur i liten grad influerer syreløsligheten til sementpasta i temperaturområdet 5-45 °C [12]. Innledende forsøk til dette studiet viste, tilsvarende, at betydningen av å heve temperaturen fra 17 °C til 25 °C var liten. Det antas derfor at temperaturvariasjonen i løpet av forsøksperioden ikke har hatt stor innvirkning på resultatene og heller ikke har bidratt nevneverdig til å endre nedbrytningshastigheten på tilslaget.

Av praktiske årsaker ble ikke CO₂-innholdet i vannet overvåket.

Gjennomstrømningshastigheten i en sidegrøft med 5 % lengdefall som er fylt med resirkulert tilslag ble beregnet å være 316 l/t [3,1]. Gjennomstrømningshastigheten i kolonnene var satt til å være noe lavere enn dette, henholdsvis 240 l/t for rigg 1 og 175 l/t for rigg 2.

Vanngjennomstrømningen ble holdt konstant gjennom forsøksperioden uten innlagte tørkeperioder. Under normale betingelser vil en grøft bare være vannmettet i perioder. Enkle beregninger [3] viser at ett år i testrigger med en konstant gjennomstrømningshastighet på 316 l/t, tilsvarer 365 år i midtsonen og 24 år i den nederste delen av en VA-grøft. Det vil si at 600 dager tilsvarer 600 år i midtsonen og ca. 40 år i bunnsone.

4.2 Spesifikke krav

I Statens vegvesens håndbok 018 [13] stilles det ingen spesielle mekaniske krav til materialene som brukes i ledningssonen eller til gjenfylling. Materialene som brukes må være slik at de ikke skader rørmateriellet og ikke knuses for mye under utlegging.

I Statens vegvesens håndbok 018 [13] stilles det en del krav til egenskaper for gjenbruksmateriale av betong og tegl i forsterkningslag, se Tabell 5. Krav til gjenbruksbetong i bærelag for gang- og sykkelveier og i parkeringsplasser med lett trafikk er gitt i Tabell 6.

Tabell 5: Egenskaper for gjenbruksmateriale av betong og tegl i forsterkningslag på vegger [13].

Egenskap	Krav	Observert verdi
LA-verdi, øvre forsterkningslag	≤ 35	pH 4: 32-38, pH 8: 34-38
LA-verdi, nedre forsterkningslag	≤ 40	pH 4: 32-38, pH 8: 34-38
Graderingstall C_u - øvre forsterkningslag	≥ 15 ¹⁾	pH 4: 2-27, pH 8: 2-7
Graderingstall C_u - nedre forsterkningslag	≥ 5	pH 4: 2-27, pH 8: 2-7
Ovnstørr korndensitet ²⁾	$> 2 \text{ g/cm}^3$	Inkl. < 4mm: 2-2,3, Ekskl. < 4 mm: 2,1-2,6
Overflatetørr korndensitet ²⁾	$> 2,1 \text{ g/cm}^3$	Inkl. < 4mm: 2,1-2,5, Ekskl. < 4 mm: 2,3-2,8
Vannabsorpsjon ²⁾	$< 10 \%$	Inkl. < 4mm: 5,7-7,1, Ekskl. < 4 mm: 4,4-6,7

1) $C_u \geq 10$ kan benyttes for atkomstveier.

2) Gjelder gjenbruksbetong Type 1B, knust betong og naturtilslag $> 94 \%$

Tabell 6: Krav til gjenbruksbetong (Type 1B) i bærelag for gang- og sykkelveier og i parkeringsplasser med lett trafikk [13].

Egenskap	Krav	Observert verdi
LA-verdi	≤ 35	pH 4: 32-38, pH 8: 34-38
Korngradering	Som for knust fjell	-

Gjenbruksbetongen tilfredsstiller krav til korndensitet og vannabsorpsjon. LA-verdi ligger noe høyt i forhold til kravet for øvre forsterkningslag og krav for bærelag i gang- og sykkelveier, men tilfredsstiller kravet for nedre forsterkningslag gjennom hele prøveperioden.

Graderingsstallet for ubehandlet materiale tilfredsstiller knapt kravet til bruk i nedre forsterkningslag. Over tid øker graderingstallet for materialet i surt miljø kraftig (til > 20) mens det endres lite ved pH 8.

Krav til korngradering er evaluert ved å sammenlikne observerte kornkurver med grensekurver for knust fjell, se figur 523.5 i håndbok 018 [13]. For materiale som skal brukes i bærelag overholdes kravene ikke, verken for ubehandlet eller behandlet materiale. Materiale som behandles ved pH 4 holder seg stort sett innenfor grenseverdiene som er gitt i håndbok 018 for knust fjell, men krysser mer enn to av de parallelle kurvene i området 0,5-22,4 mm. Ubehandlet materiale og materiale behandlet ved pH 8 har en kornkurve som ligger noe nedenfor den nedre grenseverdien for materiale med diameter $\leq 4\text{mm}$. Forøvrig holder de observerte kornkurvene ubehandlet og pH 8 materiale seg innenfor grenseverdiene, men krysser alle fire parallelle linjer i diagrammet.

5 Konklusjon

Ved studiets begynnelse var det forventet at den knuste betongen i kontakt med vann skulle bli mer porøs, få en øket vannabsorpsjon og dårligere mekaniske egenskaper målt som LA verdi. I stedet viste resultatene at sementpastaen gikk i oppløsning uten at dette fikk stor innflytelse på partikkeldensiteten eller LA-verdien. Vannabsorpsjonen ble redusert noe ved pH 4, men forble tilnærmet uforandret ved pH 8.

Ut fra de mekaniske målte mekaniske egenskapene kan det konkluderes med at i dette akselererte nedbrytningsforsøket så ble partikkelstørrelsen redusert. En signifikant andel blir oppløst som følge av kjemisk nedbryting av sementhydratfasene. Dette vises først og fremst i kornfordelingskurvene men underbygges av både bulkdensitets- og korndensitetsmålingene.

Korngraderingen forandret seg mest i den første eksponeringsperioden. Liten forandring ble målt ved de neste prøveuttakene. Ved pH 8 kan det likevel ses at andelen finere partikler også øker etter prøveuttak 2 og 3. Eksponeringsvannets pH ga den største forskjellen på korngraderingen. Ved pH 4 ble det målt langt større andel finere partikler(0,5- 8 mm) enn ved pH 8.

Resultatene fra de kjemiske analysene viste at mekanismene ved den kjemiske nedbrytningen var forskjellig ved pH 4 og 8. Den aggressive sure pH verdien løste opp sementhydratfasene mens eksponeringen ved pH 8 var mer forbundet med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ utlekking. Utfelling ved sistnevnte pH er også en mekanisme som kan være signifikant.

Syreløslig andel i betongen ble redusert fra 23 vekt-% i ubehandlet materiale til 12 vekt-% for materiale eksponert ved pH 4 og 15 vekt-% for materiale eksponert ved pH 8. Oppløsningshastigheten var raskere ved den lavere pH-verdien. Det totale materialtapet ble estimert til ca. 12 vekt-% etter 600 døgn ved pH 4 og ca. 9 vekt-% etter 600 døgn ved pH 8. Massetapet beregnet ut fra de kjemiske analyseresultatene av eksponeringsvannet ga samsvarende resultater.

Den knuste betongen tilfredsstillende de fleste av kravene gitt av Statens vegvesen i håndbok 018 for bruk i grøfter og til forsterkningslag i veier også etter eksponering mot vann.

6 Referanser

- 1 Mehus J., Skaare L., Myhre Ø.: Ubunden bruk av resirkulert tilslag i VA-grøfter, RESIBA Prosjektrapport 06/2002.
- 2 ”Miljøpåvirkning fra gjenbruksmaterialer i veg” Prosjektrapport nr 14 fra Gjenbruksprosjektet, Teknologirapport 2432, Statens vegvesen, under publisering.
- 3 Groth J. B.: Hovedoppgave: Kjemisk nedbryting av resirkulert tilslag, NBI og NTNU 2003.
- 4 J. Karlsen, G. Petkovic, O. Lahus A Norwegian Certification Scheme for Recycled Aggregates (RCA), In: Proceedings (CD), Sustainable Building 2002, 3rd International Conference on Sustainable Building, 23-25 September 2002, Oslo Norway.
- 5 EN 933-11 Tests for geometrical properties of aggregates – Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregates, 2001.
- 6 Kontrollrådet, Tekniske bestemmelser for Klasse V resirkulert tilslag.
- 7 NS-EN 932-2, Prøvningsmetoder for generelle egenskaper for tilslag. Del 2: Metoder for deling av laboratorieprøver
- 8 C.J. Engelsen, H.A. van der Sloot, G. Wibetoe, E. Stoltenberg-Hansson, G. Petkovic, W. Lund, Release of major oxides from Recycled Concrete Aggregates and geochemical modelling, Cement and Concrete Research, in preparation 2007.
- 9 D. Hongve, M. Weideborg, E. Andruchow og R. Hansen, Landsoversikt - drikkevannskvalitet, Spormetaller i vann fra norske vannverk, Folkehelseinstituttet, vannrapport nr 92., 1994.
- 10 Norsk institutt for luftforskning (NILU): hentet 18 mai 2006 fra http://www.nilu.no/index.cfm?ac=topics&folder_id=4343&text_id=7745&view=text
- 11 Bellona: hentet 18 mai 2006 fra www.bellona.no/no/harde_miljoefakta/luftforurensing/12994.html
- 12 Rombén, L.: Aspects on Testing Methods for Acid Attacks on Concrete - Further Experiments, CBI rapport 9:97.
- 13 Statens vegvesen: Håndbok 018 Vegbygging, januar 2005, hentet april 2006 fra (www.vegvesen.no/vegnormaler).

VEDLEGG

GJENBRUKSPROSJEKTET



VEDLEGG 1: DELPROSJEKT 3 "GJENBRUK AV BETONG"LXI

VEDLEGG 2: RAPPORTOVERSIKT STATENS VEGVESENS GJENBRUKSPROSJEKT
2002-2005 LXIII

GJENBRUKSPROSJEKTET



VEDLEGG 1: DELPROSJEKT 3 "GJENBRUK AV BETONG"

Overordnet mål for DP3 er å formulere et forslag til anvendbare retningslinjer for bruk av resirkulert tilslag til vegformål og på denne måten gjøre det enklere for bestiller å ta i bruk materialet. Samtidig vil produsenter av resirkulert tilslag vite hvilke kvalitetskrav som gjelder. I tillegg skal også en deklarasjonsordning foreslått gjennom RESIBA-prosjektet utprøves.

En egen aktivitet i delprosjektet vil bli knyttet til resirkulert tilslag til ny betong, selv om det trolig er lite aktuelt å bruke vesentlige mengder resirkulert tilslag i bruer og kaikonstruksjoner. Tidligere prosjekter har vist at fasthet og egenskaper av fersk betong ikke er særlig påvirket av resirkulert tilslag brukt i grovere fraksjoner. Bestandighetsrelaterte egenskaper er lite undersøkt.

Delprosjekt 3 "Gjenbruk av betong" er delt inn i 7 aktiviteter:

- GJP-1 Uttesting av deklarasjonsordning
- DP3-2 Mekaniske egenskaper
- DP3-3 Kjemisk nedbrytning
- DP3-4 Frostnedbrytning
- DP3-5 Finstoffets betydning
- GJP-2 Bunden bruk
- DP3-7 Feltprøving

GJP-1 Uttesting av deklarasjonsordning

RESIBAs forslag til deklarasjonsordning for resirkulert tilslag ønskes utprøvd på resirkulert tilslag tilgjengelig på markedet. På den måten får man kjennskap til materialenes egenskaper samtidig som vi skaffer erfaring med laboratorieprøving av slike materialer.

DP3-2 Mekaniske egenskaper

Tradisjonelle laboriemetoder for testing av mekaniske egenskaper av steinmaterialer er ikke optimale for resirkulert tilslag. Målet med aktiviteten er å beskrive mekanismer som fører til mekanisk nedbrytning, beskrive aktuelle testmetoder og vurdere hvilke krav som bør stilles til resirkulert tilslag.

DP3-3 Kjemisk nedbrytning

Aktiviteten tar for seg nedbrytning av resirkulert tilslag på grunn av gjennomstrømning av vann. Målet er å vurdere om dette er et problem ved bruk av resirkulert tilslag i vegbygging, å vurdere hvilke materialegenskaper som best beskriver kjemisk nedbrytning og å vurdere hvilke krav som bør stilles til materiale og bruksmåte.

DP3-4 Frostnedbrytning

Motstand mot frostnedbrytning er viktig for resirkulert tilslag. Metoder for testing av frostegenskaper av vanlige steinmaterialer har vist seg å være for tøffe for resirkulert tilslag i forhold til realistiske eksponeringsforhold. Målet er å foreslå passende testmetode og realistiske krav til frostbestandighet.

DP3-5 Finstoffets betydning

Overordnet målsetting for denne aktiviteten er å beskrive og vurdere finstoffets sammensetning og dets betydning for oppførselen til resirkulert tilslag i vegkonstruksjoner, så som stivhetsøkning pga etterbinding, utvasking osv. Til slutt ønskes det å formulere et forslag til krav mht finstoffinnhold.

DP 3-6 Bunden bruk

Bruk av resirkulert tilslag som tilslag i ny betong er ikke det største bruksområdet for resirkulert tilslag i Statens vegvesen, men man ønsker å supplere erfaringer fra RESIBA-prosjektet med bestandighetsrelaterte egenskaper. Aktiviteten er knyttet til bygging av Vegdirektoratets kontorbygg på Alnabru i Oslo.

DP3-7 Feltprøving

Overordnet målsetting er å ta vare på og systematisere erfaringer fra utførte prosjekter med gjenbruksmaterialer, bl.a. med tanke på innspill til feltforsøk i DP 6. For bedre oppfølging av prosjekter med gjenbruksmaterialer er det utviklet en database med kortfattet informasjon om utførelser med gjenbruksmaterialer, tilhørende laboratorie- og feltmålinger, rapporter, bilder m.v.

Delprosjektgruppen for DP3 "Gjenbruk av betong" består av:

Geir Berntsen, Vegdirektoratet/Teknologiavdelingen (delprosjektleder)

Nils Uthus, Franzefoss Pukk AS /Statens vegvesen

Edgar Dønåsen, Veidekke ASA

Joralf Aurstad, Sintef /Statens vegvesen

Jacob Mehus, Norges byggforskningsinstitutt /Standard Norge

Jan Erik Dahlhaug, Statens vegvesen Region midt

Jostein Aksnes, Vegdirektoratet/Teknologiavdelingen

Øystein Myhre, Vegdirektoratet/Teknologiavdelingen

Gordana Petkovic, Vegdirektoratet/Teknologiavdelingen

GJENBRUKSPROSJEKTET



VEDLEGG 2: RAPPORTOVERSIKT STATENS VEGVESENS GJENBRUKSPROSJEKT 2002-2005

Prosjekt-rapport nr.	Intern rapport nr. ¹⁾	Tittel	Del-prosjekt	Utarbeidet av
1	2309	Gjenbruksprosjektet. Prosjektrapport nr 1: Gjenbruk av knust betong og tegl i vegbygging Testing av mekaniske egenskaper – Erfaringsinnsamling	DP3	Joralf Aurstad, SINTEF
2	2310	Gjenbruksprosjektet. Prosjektrapport nr 2: Bruk av bildekk i støyvoller – Livsløpsvurdering	DP2 / DP5	Karin Synnøve Østby, stud. techn. NTNU
3	2350	Gjenbruksprosjektet. Prosjektrapport nr 3: Varm asfaltgjenvinning i verk	DP4	Olav Ruud, ATI et al.
4	2351	Gjenbruksprosjektet. Prosjektrapport nr 4: Kontroll og dokumentasjon av retur-asfalt	DP4	Olav Ruud, ATI
5	2357	Gjenbruksprosjektet. Prosjektrapport nr 5: Gjenbruk av bildekk i vegbygging – Tekniske og miljøtekniske vurderinger	DP5	Arnt-Olav Håøya, Rambøll AS og Roald Aabøe, Statens vegvesen
5A	2375	Gjenbruksprosjektet. Prosjektrapport nr 5A: Miljøovervåking av 3 pilotprosjekter med oppkuttete bildekk 2001-2003	DP5	Arnt-Olav Håøya og Guro Thue Unsgård, Rambøll AS
6	2408	Erfaringer fra feltstrekninger med kaldblandet gjenbruksasfalt - Vurdering av tilstandsutvikling og dekkelevetid	DP4	Joralf Aurstad, SINTEF et al.
7	2420	Materialegenskaper for kaldblandet gjenbruksasfalt - vannfølsomhet og styrkeparametere	DP4	Johnny Stenshagen, Mesta as, Øivind Moen, Veidekke ASA et al.
8	2421	Feltforsøk med ubundet asfaltgranulat - Avsluttende undersøkelser på forsøksstrekningene på Fornebu	DP4	Ragnar Bragstad, ATI et al.
9	2410	Materialstrøm for gjenvunnet asfalt	DP4	Ragnar Evensen, Via Nova et al.
10	2411	Frostbestandighet av resirkulert tilslag	DP3	Synnøve A. Myren, Statens vegvesen og Jacob Mehus, NBI /Standard Norge
11	2422	Gjenbruk av knust betong i vegbygging. Mekaniske egenskaper og testmetoder for resirkulert tilslag	DP3	Joralf Aurstad, SINTEF et al.
12	2423	Gjenbruksvegen E6 Melhus	DP6	Jostein Aksnes og Dag Atle Tangen, Statens vegvesen
13	2431	Materialdeklarasjon av resirkulert tilslag. Uttesting av deklarasjonsordning	DP3	Synnøve A. Myren, Statens vegvesen og Jacob Mehus, NBI /Standard Norge
14	2432	Miljøpåvirkning fra gjenbruksmaterialer i vegbygging	DP2	Gordana Petkovic, Statens vegvesen et al.
14A	2433	Miljøpåvirkning fra gjenbruksmaterialer i vegbygging – sementbaserte materialer	DP2	Christian J. Engelsen, NBI /Sintef Byggforsk et al.
14B	2434	Miljøpåvirkning fra gjenbruksmaterialer i vegbygging – asfalt	DP2	Torbjørn Jørgensen, Statens vegvesen et al.
14C	2435	Miljøpåvirkning fra gjenbruksmaterialer i vegbygging – oppkuttete bildekk	DP2	Arnt-Olav Håøya, Rambøll AS et al.
14D	2436	Miljøpåvirkning fra gjenbruksmaterialer i vegbygging – Skumglass	DP2	Arnt-Olav Håøya, Rambøll As et al.

15	2437	Finstoffinnhold i gjenbruksbetong	DP3	Joralf Aurstad, Statens vegvesen et al.
16	2438	Kjemisk nedbrytning av resirkulert tilslag. Forsøk med akselerert vanngjennomstrømning	DP3	Christian J. Engelsen, NBI /SINTEF Byggforsk et al.
17	2439	Konstruksjonsbetong med resirkulert tilslag	DP3	Synnøve A. Myren, Statens vegvesen og Jacob Mehus, NBI /Standard Norge
17A	2440	Støttemur ved E6 Taraldrud. Anleggstekniske erfaringer med bruk av knust betong i nye betong	DP3 /DP6	Dag Atle Tangen, Brobyggern AS /Statens vegvesen
18	2441	Gjenbruksvegen E6 Klemetsrud – Assurtjern	DP6	Dag Atle Tangen, Brobyggern AS /Statens vegvesen
19	2442	Reelle muligheter for gjenbruk – status ved avslutning av Gjenbruksprosjektet	DP7	Gordana Petkovic, Statens vegvesen
20	2377	Utradisjonelle gjenbrukstiltak – Eksempelsamling	DP8	Dag Atle Tangen, Brobyggern AS /Statens vegvesen
21	2445	Gjenbruk av avfallsglass som granulert skumglass i vegkonstruksjoner	DP5	Roald Aabøe, Statens vegvesen et al.
22	2446	Flyveaske fra papirproduksjon brukt i kalksementpeler	DP5	Guro Brendbekken, Optimal geoteknikk et al.

¹⁾ Teknologivdelingens rapportserie (Internrapporter, fra juni 2005 Teknologirapporter)



Statens vegvesen

Statens vegvesen Vegdirektoratet
Postboks 8142 Dep
N - 0033 Oslo

Tlf. (+47 915) 02030
E-post: publvd@vegvesen.no

ISSN 1504-5005