

Intern rapport nr. 2309

GJENBRUKSPROSJEKTET

Prosjektrapport nr 1:

**Gjenbruk av knust betong og
tegl i vegbygging. Testing av
mekaniske egenskaper -
Erfaringsinnsamling**



Februar 2003

Teknologiavdelingen

GJENBRUKSPROSJEKTET

Prosjektrapport nr 1:

Gjenbruk av knust betong og tegl i vegbygging. Testing av mekaniske egenskaper - Erfaringsinnsamling



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. Som ledd i dette må det skaffes en del data om det resirkulerte tilslaget, og om konstruksjoner hvor slik tilslag er benyttet.

I rapporten presenteres en innsamling av erfaringsdata for resirkulert tilslag, utført som prosjekt ved SINTEF. Målsettingen var å finne ut hvordan mekaniske egenskaper for resirkulert tilslag, spesielt knust betong og tegl, kan måles og beskrives. Hovedvekten er lagt på tilslag til ubunden bruk (mekanisk stabilisering).

Rapporten er basert på en litteraturundersøkelse. Både norske og utenlandske erfaringsdata er undersøkt. Følgende problemstillinger er undersøkt:

- Hvilke testmetoder for naturtilslag er også egnet for resirkulert tilslag?
- Hvordan er de funksjonelle egenskapene hos resirkulert tilslag i forhold til naturlig tilslag ut fra resultater/erfaringer, og hvordan harmonerer dette med testresultater fra lab?

SINTEFs konklusjon er at de vanlige metodene for testing av grus- og steinmaterialer ikke gir noe godt bilde av bruksegenskapene til ikke-homogene tilslagsmaterialer som knust betong o.a., og bruk av kvalitetskriterier basert på tradisjonell testing vil svært ofte underkjenne de alternative materialene. Rapporten fra SINTEF konkluderer også med at det må jobbes videre med testmetoder som bedre samsvarer med de resirkulerte materialenes virkelige oppførsel i felt (funksjonelle målemetoder).

Rapporten er utarbeidet på oppdrag fra Vegdirektoratet, Teknologidivisjonen. Faglige kontakter har vært Geir Berntsen og Gordana Petkovic, Vegdirektoratet. Rapporten er skrevet av Joralf Aurstad, SINTEF.

Emneord: Vegteknikk, vegbygging, materialer, gjenbruk, resirkulert tilslag, betong, tegl, materialtesting, mekaniske egenskaper

Kontor: Veg- og trafikkfaglig senter

Saksbehandler: Geir Berntsen, Gordana Petkovic

Dato: Februar 2003

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, Veg- og trafikkfaglig senter 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. Som ledd i dette må det skaffes en del data om det resirkulerte tilslaget, og om konstruksjoner hvor slik tilslag er benyttet.

Se vedlegg for mer informasjon om delprosjekt 3.

DP3 ledes av Geir Berntsen, Vegdirektoratet.

Denne rapporten er utarbeidet av Joralf Aurstad, SINTEF.



SINTEF Bygg og miljø
Veg og samferdsel

Postadresse: 7465 Trondheim
Besøksadresse: Klæbuveien 153
Telefon: 73 59 46 60
Telefaks: 73 59 46 56

Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA

SINTEF RAPPORT

TITTEL

Gjenbruk av knust betong og tegl i vegbygging
Testing av mekaniske egenskaper - Erfaringsinnsamling

FORFATTER(E)

Joralf Aurstad

OPPDRAGSGIVER(E)

Statens vegvesen Vegdirektoratet

RAPPORTNR. STF22 A02329	GRADERING Åpen	OPPDRAGSGIVERS REF. Geir Berntsen	
GRADER. DENNE SIDE	ISBN 82-14-02819-1	PROSJEKTNR. 223135.02	ANTALL SIDER OG BILAG 47 + 5 sider bilag
ELEKTRONISK ARKIVKODE i:\pro\223135\02 Mekanisk testing\Rapport.doc		PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.) Joralf Aurstad	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) Leif J. Bakløkk
ARKIVKODE 223135	DATO 2002-09-25	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Tore Knudsen	

SAMMENDRAG

Denne rapporten er utarbeidet under DP3 Gjenbruksbetong i Statens vegvesens etatsprosjekt "Gjenbruksprosjektet 2002-2005".

Rapporten er basert på en litteraturundersøkelse hvor man har sett på hvordan mekaniske egenskaper for resirkulert tilslag (spesielt knust betong og tegl) kan måles og beskrives. Hovedvekten er lagt på ubunden bruk. Det er tatt med resultater og erfaringer fra både norske og utenlandske undersøkelser.

Følgende problemstillinger er fokusert:

- Hvilke testmetoder for naturtilslag er også egnet for resirkulert tilslag?
- Hvordan er de funksjonelle egenskapene hos resirkulert tilslag i forhold til naturlig tilslag ut fra resultater/erfaringer, og hvordan harmonerer dette med testresultater fra lab?

Hovedkonklusjonen er at de vanlige metodene for testing av grus- og steinmaterialer ikke gir noe godt bilde av bruksegenskapene til ikke-homogene tilslagsmaterialer som knust betong o a. Og bruk av kvalitetskriterier basert på tradisjonell testing vil svært ofte underkjenne de alternative materialene.

For å synliggjøre potensialet i bruk av resirkulert tilslag må det jobbes videre med testmetoder som bedre samsvarer med virkelig oppførsel i felt (funksjonelle målemetoder).

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Vegteknikk	Highway engineering
GRUPPE 2	Materialer	Materials
EGENVALGTE	Gjenbruk	Recycling
	Betong	Concrete
	Materialtesting	Material testing

INNHALDSFORTEGNELSE

1	BAKGRUNN	7
2	OPPLEGG FOR UNDERSØKELSEN	7
2.1	Avgrensing av tema	7
2.2	Litteraturomfang	8
3	RESULTATER FRA FORSØK MED KNUST BETONG OG TEGL	8
3.1	Norske undersøkelser	8
3.1.1	Forsøksfelt i Trondheim (RIT 2000).....	8
3.1.2	Forsøksfelt på Fornebu	12
3.1.3	RESIBA	13
3.1.4	NORMIN	15
3.2	Undersøkelser ved VTI	16
3.2.1	Laboratorieforsøk	16
3.2.2	Feltforsøk	18
3.2.3	VTIs retningslinjer for bruk av knust betong	19
3.3	Nordtest-prosjekter på kornform og sprøhet	20
3.3.1	Generelt om klassifisering	20
3.3.2	Materialhåndtering	20
3.3.3	Kornform	24
3.3.4	Mekanisk styrke	25
3.3.5	Funksjonelle egenskaper i felt	27
3.4	Andre nordiske prosjekter/rapporter	28
3.4.1	Chalmers	28
3.4.2	KTH	30
3.4.3	Danske veiledninger for bruk av knust tegl og knust betong	31
3.5	ALT-MAT.....	33
3.5.1	Generelt om prosjektet	33
3.5.2	Vurderinger av testmetoder	34
3.5.3	Vurderinger av feltforsøk	36
3.5.4	Vurdering av CEN-standardene	39
3.6	Rilem	40
3.7	Australske undersøkelser	41
3.8	FHWA User Guidelines	41
4	TESTING AV GJENBRUKSMATERIALER, HVA ER STATUS?	42
4.1	Materialhåndtering	42
4.2	Erfaringer når det gjelder testmetoder	43
4.3	Relevans til feltforhold	46
4.4	Hva fortalte ALT-MAT.....	46
4.5	Aktuelle CEN-metoder	48
4.6	Behov for videre arbeid	48
	LITTERATURLISTE	50

Bilag 1 ALT-MAT: Overview and evaluation of mechanical laboratory tests

1 BAKGRUNN

Denne rapporten er utarbeidet under DP3 Gjenbruksbetong i Statens vegvesens etatsprosjekt "Gjenbruksprosjektet 2002-2005".

Litt av bakgrunnen for rapporten er også Vegvesenets behov for å inkludere resirkulert tilslag i nye Håndbok 018 Vegbygging. Revisjon av Håndbok 018 startet januar 2001 og ny utgave skal være ferdig ved utgangen av 2002.

Rapporten er basert på en litteraturundersøkelse hvor man har sett på hvordan mekaniske egenskaper for resirkulert tilslag (spesielt knust betong og tegl) kan måles og beskrives. Hovedvekten er lagt på ubunden bruk. Det er tatt med resultater og erfaringer fra både norske og utenlandske undersøkelser.

Følgende problemstillinger er fokusert:

- Hvilke testmetoder for naturtilslag er også egnet for resirkulert tilslag? Testmetoder som er omfattet av nye CEN-tilslagsstandarder er særlig interessante i den sammenheng.
- Hvordan er de funksjonelle egenskapene hos resirkulert tilslag i forhold til naturlig tilslag ut fra resultater/erfaringer, og hvordan harmonerer dette med testresultater fra lab?

2 OPPLÉGG FOR UNDERSØKELSEN

2.1 Avgrensning av tema

Mulighetene til å nyttiggjøre seg restprodukter i vegbyggingssammenheng styres i stor utstrekning av deres miljømessige og materialtekniske egenskaper.

Her har man kun sett på de materialtekniske egenskapene. Av disse kan man liste opp mange;

- kornfordeling (kornstørrelser, gradering)
- motstand mot nedknusing (mekaniske egenskaper)
- frostbestandighet
- kjemisk bestandighet
- permeabilitet
- telefarlighet
- varmeledningsevne
- kompakteringsegenskaper
- bæreevne
- deformasjonsegenskaper
- fasthetsøkning over tid m m

Denne rapporten befatter seg i hovedsak med de to første temaene;

- **kornfordeling** (herunder hvordan materialbehandling, sikting osv innvirker på materialene)
- **testing av fysiske/mekaniske egenskaper**

Der det er naturlig av sammenhengen er også andre egenskaper drøftet (frostbestandighet, vannabsorpsjon, etterherding m m).

Det er lagt vekt på å få med konkrete resultater fra utførte materialundersøkelser. En bredest mulig understøttelse er viktig når man skal vurdere metoder, kriterier osv.

For mer utfyllende informasjon, detaljerte resultater etc henvises det til referansene. Disse er forsøkt tatt med ved figurer og tabeller, slik at det skal være mulig å finne tilbake.

2.2 Litteraturomfang

Det må sies at denne rapporten er basert på en enkel litteraturstudie. Undersøkelsen er på ingen måte fullstendig (i den grad en litteraturstudie kan bli fullstendig), det er gjort et skjønnsmessig utvalg etter følgende kriterier:

- **Aktualitet;** publikasjoner med antatt direkte relevans for temaet
- **Alder;** publikasjoner av nyere dato (siste 3-5 år)
- **Tilgjengelighet;** publikasjoner for en stor grad “direkte fra bokhylla”

Dette har selvsagt begrenset utvalget, men som det framgår av litteraturlisten er det likevel funnet fram til en god rekke publikasjoner.

3 RESULTATER FRA FORSØK MED KNUST BETONG OG TEGL (UTVALG)

Alle resultater, drøftinger, konklusjoner osv gjengitt i kapittel 3 er hentet fra de angitte referansene. *(Noen egne tilleggs kommentarer er skrevet i kursiv.)*

3.1 Norske undersøkelser

3.1.1 Forsøksfelt i Trondheim (RIT 2000), ref [9] [41] [42] [43] [44] [45] [51]

Ved RiT (tidligere Regionsykehuset i Trondheim, nå St Olavs Hospital) har knust betong og tegl vært utprøvd som bærelag på en parkeringsplass. Videre er ren knust betong lagt ut som forsterkningslag og bærelag på en del av Harald Hardrådes gt.

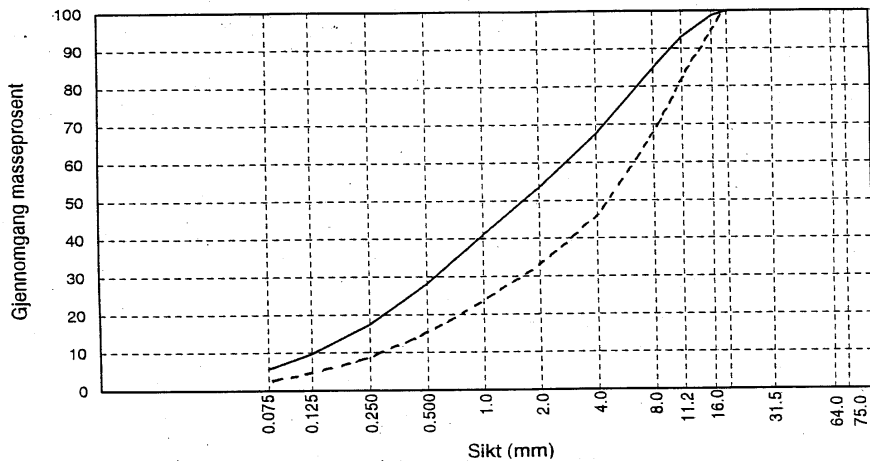
Nedknusing, finstoffanriking

Innledende undersøkelser av materialene brukt på P-plassen viste for det første at det skjer en del nedknusing ved oppredningen (utsikting, fraksjonering osv). Videre vil påkjenninger under selve testprosedyrene slå uvant sterkt ut i forhold til normale grus-/steinmaterialer. Dette må man være oppmerksom på ved evalueringen av resultatene.

På denne konkrete parkeringsplassen inneholdt materialet en god del tegl (ca 15 vekt-%), som sannsynligvis gjorde det mer ømfintlig enn et rent betongmaterial.

TABELL 3.1 Innledende kompakteringsforsøk

	Absorbert vann	Opt. vanninnhold	Maks tørrdensitet
Betong/tegl 0-60 mm	11 %	14,5 %	1,81 g/cm ³
Betong/tegl 0-25 mm	9 %	17,5 %	1,74 g/cm ³



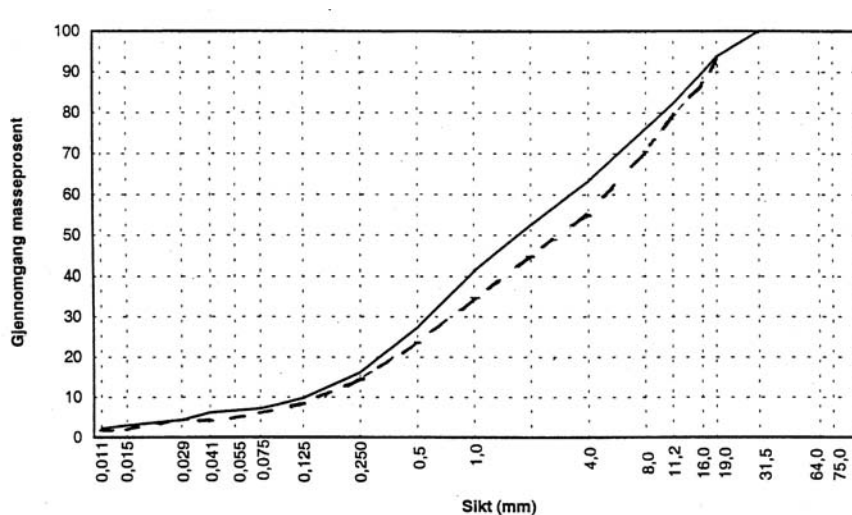
FIGUR 3.1 Siktekurver material 0-60 mm, før ----- og etter — Modifisert Proctor [44]

Disse resultatene illustrerer følgende:

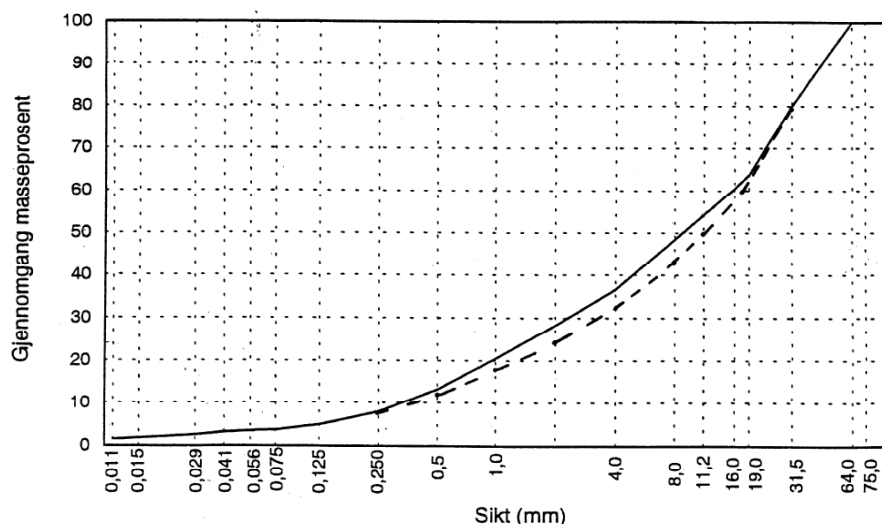
- Svært høyt optimalt vanninnhold sammenlignet med naturmaterialer p g a høy porøsitet (mye vann absorberes i materialet uten å "smøre" overflaten).
- Kraftig nedknusing av materialet gjennom Proctorforsøket vil påvirke densiteten. Usikkert hvordan dette slår ut i forhold til virkelige kompakteringsbetingelser i felt.

Ved utlegging og valsing av bærelagsmaterialet i 1999 ble det observert en del knusing av de største steinene [41]. Ved oppgraving et år etter klarte man imidlertid ikke å påvise noen konsekvent økning i finstoffmengden (antall prøver var riktignok begrenset og at det var store variasjoner i massen) [42] [45].

Sikteanalysene viste at det var stort sett i mellomfraksjonen at kurvene "løftet seg", se figurene 3.2 og 3.3.



FIGUR 3.2 Sammenligning av våtsiktekurver for bærelagsmaterial 0-20 mm, ----- før utlegging (1999) — etter oppgraving (2000) [41]



FIGUR 3.3 Sammenligning av våtsiktekurver for bærelagsmaterial 0-60 mm,
 ----- før utlegging (1999) — etter oppgraving (2000) [41]

Det kan være tegn på at de store partiklene tar av for mye av påkjenningene, slik at økningen i finfraksjonen (og tilhørende økt telefarlighet, vannømfintlighet osv) ikke blir så stor.

Mekanisk testing

Nedenfor er gjengitt nøkkeldata for de fysisk/mekaniske undersøkelsene utført på materialene på P-plassen.

TABELL 3.2 Mekanisk styrke på tilslag, før utlegging [41]

	Fallprøve (standard)		Fallprøve (etter omslag)		Los Angeles (10-14 mm)
	Flisighet	Sprøhet s_8	Flisighet	Sprøhet s_8	
Knust betong 0-60 mm ¹	1,38	72	1,34	54	38
Betong/tegl 0-60 mm ²	1,39	74	1,35	59	44
Betong/tegl 0-25 mm ²	1,37	75	1,34	57	46

¹ Dette rene betongmaterialet var tenkt brukt på P-plassen, men fikk til slutt andre anvendelser

² Teglinnholdet var ca 15 vekt-%

Vurdering:

- Flisighet synes ikke å være noe problem (godt innenfor klasse 1).
- Høy sprøhet, selv uten korleksjon er $s_8 > 60$ (pakningsgrad 3).
- Los Angeles skiller noe bedre mellom materialene enn fallprøven.

TABELL 3.3 Mekanisk styrke på tilslag, etter oppgraving (etter ett år i felt) [41]

	Fallprøve (standard)		Fallprøve (etter omslag)		Los Angeles (10-14 mm)
	Flisighet	Sprøhet s_8	Flisighet	Sprøhet s_8	
Betong/tegl 0-60 mm ¹	1,36	66	1,35	51	47
Betong/tegl 0-25 mm ¹	1,36	72	1,36	49	47

¹ Teglinnholdet ca 15 vekt-%

Vurdering:

- Litt lavere sprøhet enn før utlegging, men fortsatt er $s_8 > 60$.
- LA-verdiene hadde økt noe. Kan være logisk for porøse materialer som har ligget ute og blitt utsatt for frysing og tining.

I Harald Hardrådes gt ble det høsten 2001 lagt ut knust betong (rester/slump fra UNICONS ferdigbetong-fabrikk) som forsterkningslag og nedre bærelag.

TABELL 3.4 Mekanisk styrke på knust betong i Harald Hardrådes gt,

	Fallprøve (standard)		Fallprøve (omslag)		Los Angeles	
	Flisighet	Sprøhet s_8	Flisighet	Sprøhet s_8	10-14 mm	37,5-75 mm
Knust betong (alle prøver utsiktet fra aktuelt material uten ekstra lab-knusing)	1,44	50	1,36	34	26	25

Vurdering:

- Med hensyn på mekanisk styrke er dette materialet av vesentlig høyere kvalitet enn materialene brukt på P-plassen.
- I og med at dette materialet er lagt ut i en grovere fraksjon, er også ”grov Los Angeles” ASTM C-535 (37,5-75 mm) utført. Resultatet er bra sammenfallende med CEN-proseduren (10-14 mm).

Fasthetsøkning

En viss økning i fasthet for bærelagsmaterialene fra 1999 til 2000 ble påvist i forbindelse med oppgravingene på P-plassen [42] [45]. Fasthetsøkningen ble påvist gjennom

- nedbøyningsmålinger med fallodd
- DCP-målinger

Det ble foretatt CBR-undersøkelser på materialet fra P-plassen. Som et ledd i dette ble noen av prøvene satt til lagring (innpakket i plast, romtemperatur) for å se på eventuelle forandringer over tid:

TABELL 3.5 Resultater fra CBR-forsøk på betong/tegl-tilslaget

	Lagringstid	CBR _{0,1} (%)	CBR _{0,2} (%)
Knust betong/tegl (brukt på P-plassen)	4 dager (standard)	19	25
	25 dager	43	57
	400 dager	72	95

Til tross for at materialet inneholdt ca 15 % tegl, kunne det altså påvises en merkbar økning i CBR-verdi etter lagring.

Nærmere drøfting og detaljerte resultater finnes i [42] [45].

Falloddsmålinger i Harald Hardrådes gt viser også generelt høyere bæreevneverdier våren 2002 sammenlignet med høsten 2001. Målingene er i skrivende stund ikke etterberegnet, om fasthetsøkningen eksplisitt kan knyttes til betonglaget er dermed usikkert (men tendensen er der).

Funksjonstesting i lab

Det er også gjort dynamiske treks-forsøk i lab på betongmaterialene fra RiT. Resultatene viser svært god lastfordelende evne og deformasjonsmotstand sammenlignet med vanlige steinmaterialer (naturlig tilslag). Nærmere drøfting av dette finnes i [51].

Det er en tilsynelatende uoverensstemmelse mellom dårlige mekaniske egenskaper i lab og gode funksjonelle egenskaper i felt. Denne tendensen ser man også i andre prosjekter.

3.1.2 Forsøksfelt på Fornebu, ref [35] [36] [37] [38] [39] [40] [42] [50]

I forsøksvegen på Fornebu har flere alternative materialer vært prøvd ut som ubundne bæreevne og forsterkningslag. Materialene som er prøvd er knust betong, knust asfalt og en blanding knust betong/knust asfalt (a la dansk ”Genbrugsstabil”, jfr ref [31]).

Tilstandsutviklingen på forsøksvegen er fulgt opp i detalj med bl a jevnlig spormålinger og bæreevne målinger. Vedrørende funksjonelle egenskaper oppviser feltene med alternative materialer en generell positiv utvikling i felt både med hensyn til bæreevne (elastisk stivhet) og deformasjon (spor).

Parallelt med feltoppfølgingen er det gjort forholdsvis omfattende undersøkelser i laboratorium i form av rene fysisk/mekaniske tester, CBR-forsøk og treks-forsøk.

Noen utvalgte resultater er vist i tabellene 3.6-3.9. For mer utførlig drøfting av resultater henvises til [50].

TABELL 3.6 Densitet og vannabsorpsjon [42]

	Densitet (g/cm ³)			Absorbert vann (%)
	Overflatetørr	Tilsynelatende	Helt tørr	
<i>Material > 8 mm:</i>				
Knust asfalt	2,69	2,76	2,65	1,5
Mix asfalt/betong	2,61	2,72	2,54	2,6
Knust betong	2,51	2,69	2,40	4,5
<i>Material < 8 mm:</i>				
Knust asfalt	2,50	2,61	2,42	2,9
Mix asfalt/betong	2,46	2,62	2,36	4,2
Knust betong	2,25	2,65	2,00	12,1

TABELL 3.7 Kompakteringsegenskaper, Modifisert Proctor [42]

	Maks våtdensitet (g/cm ³)	Maks tørrdensitet ¹ (g/cm ³)	Optimalt vanninnhold (%)
Knust asfalt	2,08	1,95	6,3
Mix asfalt/betong	2,17	2,06	7,6
Knust betong	2,12	1,97	12,2

¹ Korrigert for %-andel > 19 mm

TABELL 3.8 Mekanisk styrke [42]

	Fallprøve				Fallprøve, omslag				Los Angeles (10-14 mm)
	s0	s2	s8	f	s0	s2	s8	f	
Mix asfalt/betong	33	8	37	1,36	25	6	26	1,29	19,2
Knust betong	46	14	48	1,32	36	11	38	1,26	24,5

TABELL 3.9 CBR-forsøk [50]

Lagring ¹ (dager)	CBR _{0,1} (%)			CBR _{0,2} (%)		
	Knust asfalt	Mix asfalt/ betong	Knust betong	Knust asfalt	Mix asfalt/ betong	Knust betong
0	8	13	52	10	17	79
5	7	15	168	9	22	205
30	7	17	203	8	20	228
60			182			205
100	5	18		7	24	
150			153			185

Innstamping 25 slag pr lag med optimalt vanninnhold (jfr tabell 3.7)

¹ Etter standard vannlagring ble prøvene tatt opp og lagret i romtemperatur (100 % relativ fuktighet)

Av de tre materialene hadde den knuste betongen klart høyest initialverdier på CBR. Dette materialet fikk også en markert økning i CBR-verdi i løpet av de første 30 dagers lagring (fra CBR_{0,1} = 50 til CBR_{0,1} = 200). Denne fasthetsøkningen viste seg også å harmonere bra med målte bæreevneverdier i felt [50].

På materialene er det også gjort forholdsvis omfattende treaks-undersøkelser. Disse resultatene utelates her, men kan studeres i [37] og [50].

Kort oppsummert er resultatene i bra samsvar med etterberegnete feltmålinger. Ubundet knust betong viser både høy lastfordelende evne og god deformasjonsmotstand sammenlignet med vanlige granulære materialer. Utvikling i fasthet (etterherding) er også klart påviselig.

En annen interessant observasjon: Sammenlignet med knust asfalt viser betongprøvene marginale forskjeller i stivhet mellom lett og hard kompaktering. Knust betong synes med andre ord ikke å være så avhengig av kompakteringsutstyr/-metode. Denne tendensen så man også på RiT 2000-feltene [41]. (Tilsvarende sammenligning med natur-/grusmaterial er ikke gjort.)

Bestandighetstesting (forvitring, fryse-tine motstand etc) er ikke utført i Fornebu-prosjektet.

Denne type sammenlignende undersøkelser med basis i treaksforsøk er blant de funksjonelle tilnærmingene som er etterlyst i ALT-MAT- prosjektet (jfr kapittel 3.5).

3.1.3 RESIBA, ref [33] [34] [48] [49]

I RESIBA-prosjektet (Resirkulert tilslag til bygg og anlegg) inngår flere vegrelaterte demonstrasjons-prosjekter/feltforsøk med bruk av resirkulert tilslag (betong og tegl). Materialene er fortrinnsvis benyttet i ubunden form som forsterkningslag og nedre bærelag.

I disse prøveprosjektene er det ikke stilt krav til mekanisk styrke. Det er likevel gjort en del undersøkelser på materialene for å få orienterende verdier. Noen resultater er vist her, for mer detaljerte resultater og vurderinger henvises det til referansene.

Kornfordeling

Våtsikting med slemmeanalyse er utført på blandet masse 0-10 mm (antatt "ugunstigste" masse). Innholdet av material < 0,02 mm klassifiserer materialet som *lite telefarlig*, T2.

Kornform

Utførte flisighetsforsøk viser at kornform ikke representerer noe problem (alle utførte forsøk har $f < 1,40$).

Fallprøve

Metoden vurderes uegnet fordi:

- Resirkulert tilslag pakker seg i større grad enn naturmaterialer og gir feil bilde av knusingsmotstanden.
- Testen utføres på en kort/smål fraksjon, det er usikkert hvor godt resultatene gjenspeiler egenskapene for hele materialet.

Los Angeles

Testresultater for de ulike LA-prosedyrer som er kjørt er oppsummert i tabell 3.10:

TABELL 3.10 Resultater av Los Angeles-tester på betong og blandet masse [48]

Material/prøve	HB 014 (10-14 mm)	ASTM (1) (9,5-19 mm)	ASTM (2) (37,5-75 mm)	NSB-mod. (32-40 mm)
blandet masse (sept. 2001)	41,0	37,8	35,2	30,8
blandet masse (okt. 2001)	38,0			
ren betong (sept. 2001)	29,5	28,8	34,6	27,0
ren betong NBI (juni 1998)	25,4			

Vurdering:

- Det er en merkbar forskjell mellom blandet masse og ren betong.
- Los Angeles-verdien synes å avhenge av testfraksjonen, grove fraksjoner indikerer noe bedre mekaniske egenskaper. (Alle verdier i tabellen er framkommet som andel nedknust material $< 1,6$ mm.)

Kulemølle

Utførte undersøkelser er oppsummert i tabell 3.11:

TABELL 3.11 Resultater av kulemølle-tester på betong og blandet masse [48]

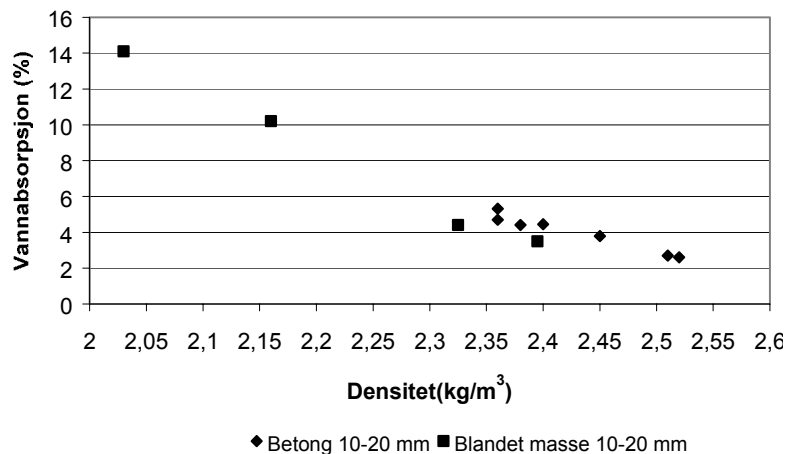
Material/prøve	Kulemølle [mølleverdi]
blandet masse (sept. 2001)	41,7
ren betong (sept. 2001)	31,7
ren betong NBI (juni 1998)	23,8
ren betong (uspesifisert)	24,1

Vurdering:

- Kulemølleresultatene "faller utenfor skalaen" i Håndbok 018 ($M_v > 18$; "meget svak"). Men metoden er heller ikke ventet å gi en representativ beskrivelse av resirkulert tilslag.

Densitet og vannabsorpsjon

Utførte undersøkelser er oppsummert i figur 3.4:



FIGUR 3.4 Sammenheng mellom densitet (ovnstørr partikkeldensitet) og vannabsorpsjon for resirkulert tilslag [48]

Vurdering:

- Tilnærmet lineært forhold mellom vannabsorpsjon og densitet for resirkulert tilslag; jo høyere densitet jo mindre vannabsorpsjon.
- Ren betong har generelt høyere densitet og mindre absorpsjon enn blandet masse.
- Til sammenligning; naturlig tilslag 8-22 mm med densitet 2,65-2,75 kg/dm³ har absorpsjons-verdier i området 0,5-0,9 %.

3.1.4 NORMIN, ref [46]

NORMIN-programmet som startet opp i 1993 inneholdt flere utviklingsprosjekter for bergindustrien rettet mot produksjon og bruk av tilslagsmaterialer. Ett av resultatene var dr.ing-arbeidet til John Natvik på utprøving og sammenligning av ulike metoder for fysisk/mekanisk testing av tilslag.

Natviks avhandling tok for seg naturlige tilslagsmaterialer av ulik kvalitet, men resultatene er også relevante med hensyn på gjenbruksmaterialer.

Spesielt interessant i den sammenheng var utprøving av gyrtorisk kompaktor (type ICT) som alternativ test for bestemmelse av mekanisk styrke/motstand mot nedknusing:

- Resultatene viste at gyrtoren er velegnet for slike undersøkelser og at metoden er følsom for små forskjeller i materialeegenskaper.
- Materialene skilles bedre ved gyrtor enn ved standardtestene (Los Angeles, fallprøve, kule mølle).
- Det ble påvist god sammenheng mellom laboratoriebestemt mekanisk styrke i ICT og registrert nedknusing i felt (spesielt for åpne graderinger).
- Det ble påvist langt dårligere/ingen sammenheng mellom Los Angeles og registrert nedknusing i felt.

Dette samsvarer mye med det som senere er framkommet i ALT-MAT-prosjektet (jfr kapittel 3.5).

3.2 Undersøkelser ved VTI, ref [15] [16] [17] [18] [24] [25] [26] [27] [30] [47]

Disse rapportene kryssrefererer delvis til hverandre, mange av de samme forsøkene omtales. En del av resultatene er også rapportert i ALT-MAT. Da det meste av dette arbeidet er utført ved eller i regi av VTI (Väg- och transportforskningsinstitutet i Linköping), er resultatene presentert under denne overskriften.

3.2.1 Laboratorieforsøk

Mekanisk testing

VTI kjørte for noen år siden en undersøkelse på knust betong for å se om det var noen sammenheng mellom målte laboratorieegenskaper og betongens sylindertykkfasthet. De tok utgangspunkt i 3 ulike betongkvaliteter, med forskjellige trykkfastheter, jfr tabellene 3.12 og 3.13.

TABELL 3.12 Mekaniske egenskaper (kulkvarn) [25]

Material	Sylindertykkfasthet	Korr. kulkvarn-verdi (%)	Krav til kulkvarn-verdi (Väg94)
Prefab. element, 1980-tallet	73 MPa	21	< 18 for ubundet bærelag
Vegg bolighus, 1960-tallet	30 MPa	29	
Kjellergulv hus, 1930-tallet	7 MPa	42	< 30 for forsterkningslag
Forsøksfelt v. 597, hus fra Boden	34 MPa	22	
Forsøksfelt v 109, ukjent opphav	-	28	

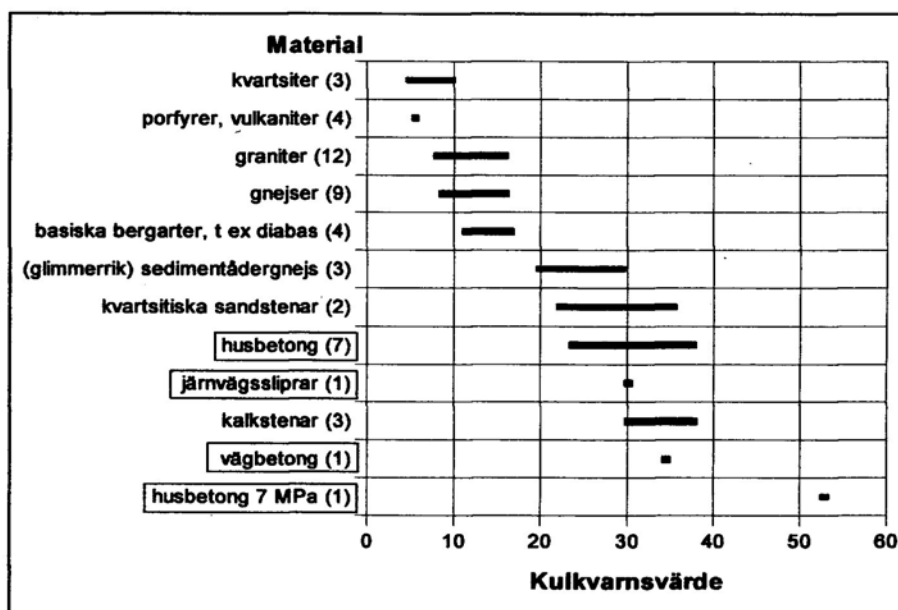
TABELL 3.13 Trecks-forsøk (basert på resultater i [25])

Material	Sylindertykkfasthet	Maks tørrdensitet ¹	Resilientmodul, rangering ²	Perm. deform., rangering
Prefab. element, 1980-tallet	73 MPa	1,79	2	3
Vegg bolighus, 1960-tallet	30 MPa	1,80	1	1
Kjellergulv hus, 1930-tallet	7 MPa	1,94	4	4
Knust fjell 0-32 (referanse)			3	1

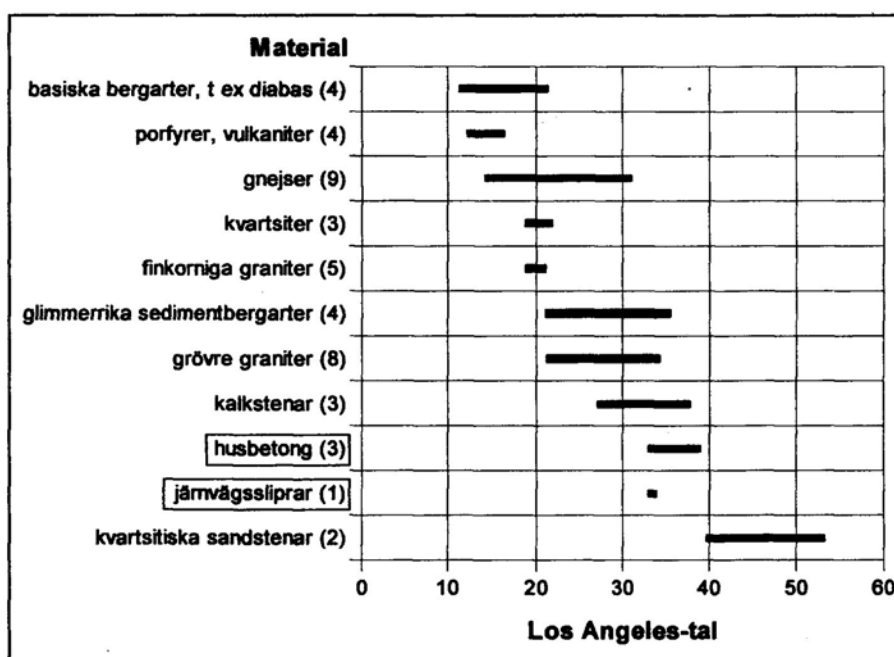
¹ bestemt ved vibroinnstamping, ASTM D4253-83, 1B

² rangeringene gjelder for sum hovedspenninger < 1200 kPa

Figurene 3.5 og 3.6 viser til sammenligning resultater fra VTIs prøvningsdatabank for henholdsvis kule mølle og Los Angeles.



FIGUR 3.5 Kulemølle-verdier for knust betong sammenlignet med noen svenske bergarter (antall prøver i parentes) [47]



FIGUR 3.6 Los Angeles-verdier for knust betong sammenlignet med noen svenske bergarter (antall prøver i parentes) [47]

Vurdering:

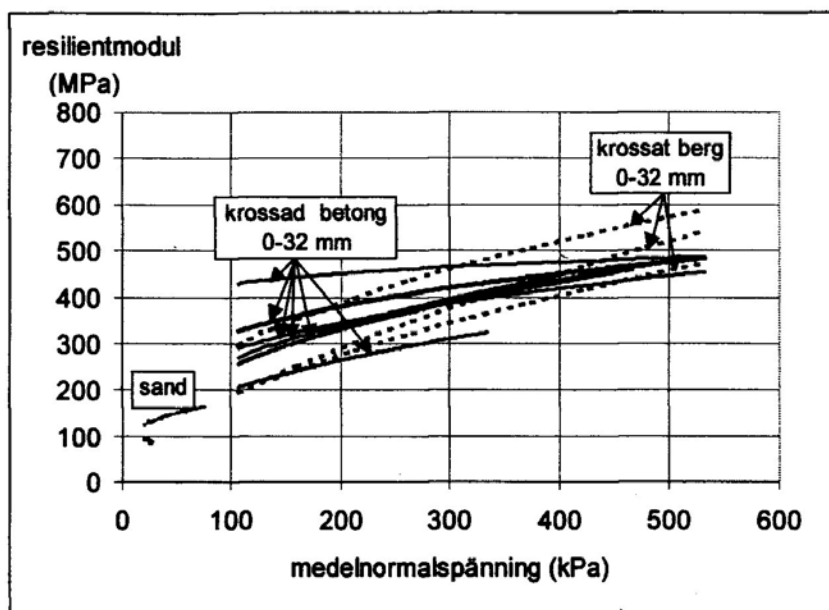
- Knust betong har generelt vanskelig for å oppfylle krav til kulemølle-verdi (spesielt bærelag). Men spørsmål kan stilles om det er riktig å bedømme et bærelags- eller forsterkningslags-material ut fra en slik slitelagstest.
- Treks-forsøk viser at et material med kulemølle-verdi på 30 i virkeligheten kan ha like høy eller høyere resilientmodul enn knust fjell og naturgrus.
- Det er en viss sammenheng mellom trykkfasthet og resilientmodul, men (foreløpig) ikke så god at man kan bestemme den knuste betongens lastfordelende egenskaper bare ut fra trykkfastheten før knusing.

- Det er heller ikke noen entydig sammenheng mellom trykkfasthet og permanente deformasjoner (stabilitet), relasjonene er her avhengige av spenningsnivået.
- Sylindertrykkfastheten til uknust betong kan gi en pekepinn på funksjonelle egenskaper til knust masse. Foreløpig har man satt opp foreløpige anbefalinger (se også [26]):
 - sylindertrykkfasthet < 10 MPa: ikke egnet som ubundet bære-/forsterkningslag på veg
 - sylindertrykkfasthet > 30 MPa: godt egnet som ubundet bære-/forsterkningslag på veg

Treks-undersøkelser

Basert på testresultatene foran (figur 3.5 og 3.6) plasserer altså betong seg blant de "svake bergartene". Men ser man på resultater fra mer funksjonell testing blir bildet noe annet. VTI har kjørt dynamiske treks-forsøk på ulike naturmaterialer. En sammenligning av disse resultatene med det som er oppnådd for knust betong er vist i figur 3.7.

De knuste betongmaterialene i figuren har hatt ulike opphav; jernbanesviller, rivningsbetong fra hus og vegdekker. Naturmaterialene er granitt, gneis og sandstein. Alle materialene er sammenlignbare når det gjelder kornsammensetning, kompaktering og vanninnhold. Materialene er testet uten forutgående lagring (ingen etterherding).



FIGUR 3.7 Sammenligning av elastisk stivhet fra treks-forsøk på knust betong og knuste steinmaterialer av ulike opphav [47]

Vurdering:

- Figuren viser at knust betong oppnår omlag samme stivhet som de naturlige materialene.
- Naturmaterialene ("knust berg") har litt høyere E-moduler ved stor belastning, betongmaterialets stivhet synes mindre spenningsavhengig (flattere kurver)

3.2.2 Feltforsøk

VTI har fulgt opp flere forsøk med knust betong de senere år, både gjennom undersøkelser i lab (fysisk/mekanisk testing og treks) og kartlegging av funksjonelle egenskaper i felt.

Erfaringene fra feltforsøkene på v. 109 og v. 597 er drøftet i mange av referansene, detaljer kan leses bl a i [27].

Hovedkonklusjonene er som følger:

- Knust betong av god og jevn kvalitet har minst like bra stivhet og stabilitet som konvensjonelle steinmaterialer (ved ekstreme belastninger kan deformasjonene bli noe større pga nedknusing, men ved normale trafikkbelastninger er ikke dette noe problem).
- Man fryktet at betongmaterialene skulle få stor nedknusing i anleggsperioden. Uttak av masseprøver 3 uker etter utlegging viste ikke noen påtakelig forskjell i siktekurver fra før utlegging, materialene lå fortsatt godt innenfor grensekurvene.
- Et viktig bidrag til de gode vegtekniske egenskapene er betongmaterialets evne til selvbinding/etterherding over tid. Denne mekanismen er påtagelig, og er dokumentert både i felt og gjennom lab-forsøk. På bare et halvt år er det påvist opp til en tredobling av lagstivheter (E-moduler).
- For å dra nytte av de selvbindende egenskapene må man tilstrebe en høyest mulig grad av renhet. (Ref [27] viser hvor stort utslag ulike prosenter innblanding av tegl og lettbetong kan ha på resultatene.)

3.2.3 VTIs retningslinjer for bruk av knust betong, ref [26]

På bakgrunn av forsøkene og erfaringene beskrevet i referansene foran, har VTI utarbeidet retningslinjer for best mulig utnyttelse av knust betong i vegbygging i Sverige. I disse finnes anbefalte krav til korngradering, mekanisk styrke, renhet m m for ulike anvendelser i vegoverbygninger.

Når det gjelder krav til kornkurve, skiller man mellom bærelagsmaterial (0-32/45 mm) og material til forsterkningslag (0-90/125 mm), se for øvrig bilag 1 i [26].

I selve klassifiseringen av materialene konsentrerer man seg om to viktige kriterier;

- renhet til massen
- betongens trykkfasthet

Kvalitetsklassene framgår av tabell 3.14.

TABELL 3.14 Knust betong, kvalitetsklasser ut fra svenske retningslinjer [26]

Klasse	Sylinder-trykkfasthet	Renhet, krav til bestanddeler ¹			
		Betong	Tegl ²	Lettbetong ³	Øvrig ⁴
1	> 50 MPa	100 %	0 %	0 %	0 %
2	> 30 MPa	> 95 %	< 5 %	< 1 %	< 0,5 %
3	> 13 MPa	> 80 %	< 20 %	< 5 %	< 2 %
4	-	> 50 %	< 50 %	< 50 %	< 10 %

¹ Angitte prosentandeler er i vekt-%. Alle materialer skal være fri for miljøskadelige stoffer (asbest, PCB, kvikksølv o l)

² Her inngår også andre mineralmaterialer > 1600 kg/m³

³ Her inngår også gips, glass, aluminium og andre materialer < 1600 kg/m³

⁴ Øvrige bestanddeler kan være treverk, plast, papir, bitumen m m

- Kontroll av trykkfastheten skjer gjennom uttak av borkjerner og trykktesting av disse.

- Kontroll av renhet skjer ved uttak av masseprøver (material > 4 mm) og manuell sortering av disse med veiing av de ulike typer urenheter. anbefalte prøvestørrelser 2 kg på fraksjon opp til 45 mm (bærelag), 5 kg på fraksjon opp til 125 mm (forsterkningslag).
- Prøvefrekvens er minst én prøve pr rivningsobjekt eller minst én prøve pr 5000 tonn.

Når det gjelder mekanisk styrke, har man kun valgt å innføre et kulemølle-krav for de to beste klassene;

- **kulemølle-verdi < 30** (kvalitetsklasse 1 og 2)

Anbefalte bruksområder for de ulike kvalitetsklassene er vist i tabell 3.15.

TABELL 3.15 Knust betong, anbefalinger om bruk ut fra svenske retningslinjer [26]

Anvendelse	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4
Ny vegbetong/ valsebetong	X	-	-	-
Sementstabilisert grus	X	-	-	-
Ubundet bærelag (veg/gate)	X	X	-	-
Forsterkningslag (veg/gate)	X	X	-	-
Ubundet bærelag (GS-veg)	(X)	X	X	-
Forsterkningslag (GS-veg)	(X)	X	X	-
Nedre forsterkningslag (beskyttelseslag)	(X)	(X)	X	-
Underbygning	(X)	(X)	X	X
Fyllingsmaterial	(X)	(X)	(X)	X

X = anbefalt bruk (X) = kan brukes, men dårlig kvalitetsutnyttelse

3.3 Nordtest-prosjekter på kornform og sprøhet, ref [19] [20] [21]

Resultatene referert i dette avsnittet er kommet fram gjennom testing av forskjellige betongkvaliteter med forskjellige tilslag, utført ved SP (Sveriges Provnings- og forskningsinstitut) i Borås og SINTEF i Trondheim.

3.3.1 Generelt om klassifisering

For å klassifisere rivnings-/bygningbetong som skal brukes i vegbygging ut fra trykkfastheten til betongen kreves bl a at:

- Alle rivningsobjekter holdes adskilt og behandles for seg.
- Materialet fra den enkelte bygning/objekt er av homogen kvalitet.
- Betongmaterialet holdes strengt adskilt fra andre rivingsmaterialer.

I praksis vil disse kriteriene være vanskelige å oppfylle. Et spørsmål er også hvor gode relasjonene mellom trykkfasthet og de øvrige prøvingsmetoder for fysisk/mechanisk testing er:

- Klarer testmetodene å skille materialene ut fra opprinnelig trykkfasthet?
- Er metodene forskjellige med hensyn på å kunne skille mellom ulike fasthetsklasser?

Det er bl a disse spørsmålene som har dannet bakgrunn for de refererte Nordtest-prosjektene.

3.3.2 Materialhåndtering

Knusing

Gjenbruksprodukter kan vanskelig konkurrere økonomisk med tradisjonelt tilslag hvis det kreves en altfor omfattende og kostnadskrevende produksjonsprosess. Egenskapene etter ett knusetrinn er derfor viktige [21].

Problemet er at betong er et inhomogent material, egenskapene til massen etter knusing bestemmes bl a av

- sementpastaens kvalitet
- tilslagetets kvalitet
- vedheften mellom pasta og tilslag

Å optimalisere knusingsprosessen ut fra dette er vanskelig, men ikke desto mindre viktig.

Sikting, fraksjonering

Også for gjenbruksmaterialer er siktekurver og definerte sorteringer viktige for å kunne kontrollere funksjonelle egenskaper (drenerende evne, telefarlighet, stabilitet osv),. Generelt må antall håndtering, omlastinger osv minimeres for å unngå nedknusing og endring av materialsammensetning og materialeegenskaper.

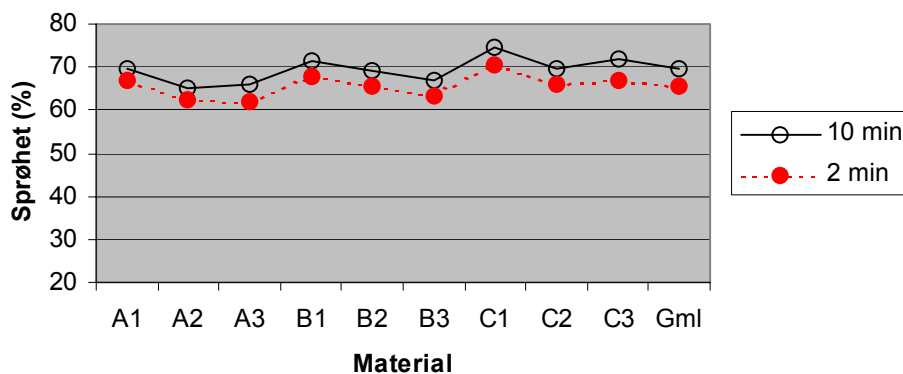
Effekter av ulik siktetid i forbindelse med mekanisk testing (fallprøve) ble studert gjennom forsøk med 10 ulike betongmaterialer [20] [32]. En oversikt er vist i tabell 3.16.

Figurene 3.8-3.11 viser hvordan ulik siktetid slår ut, både på fallprøveresultater og kornkurve.

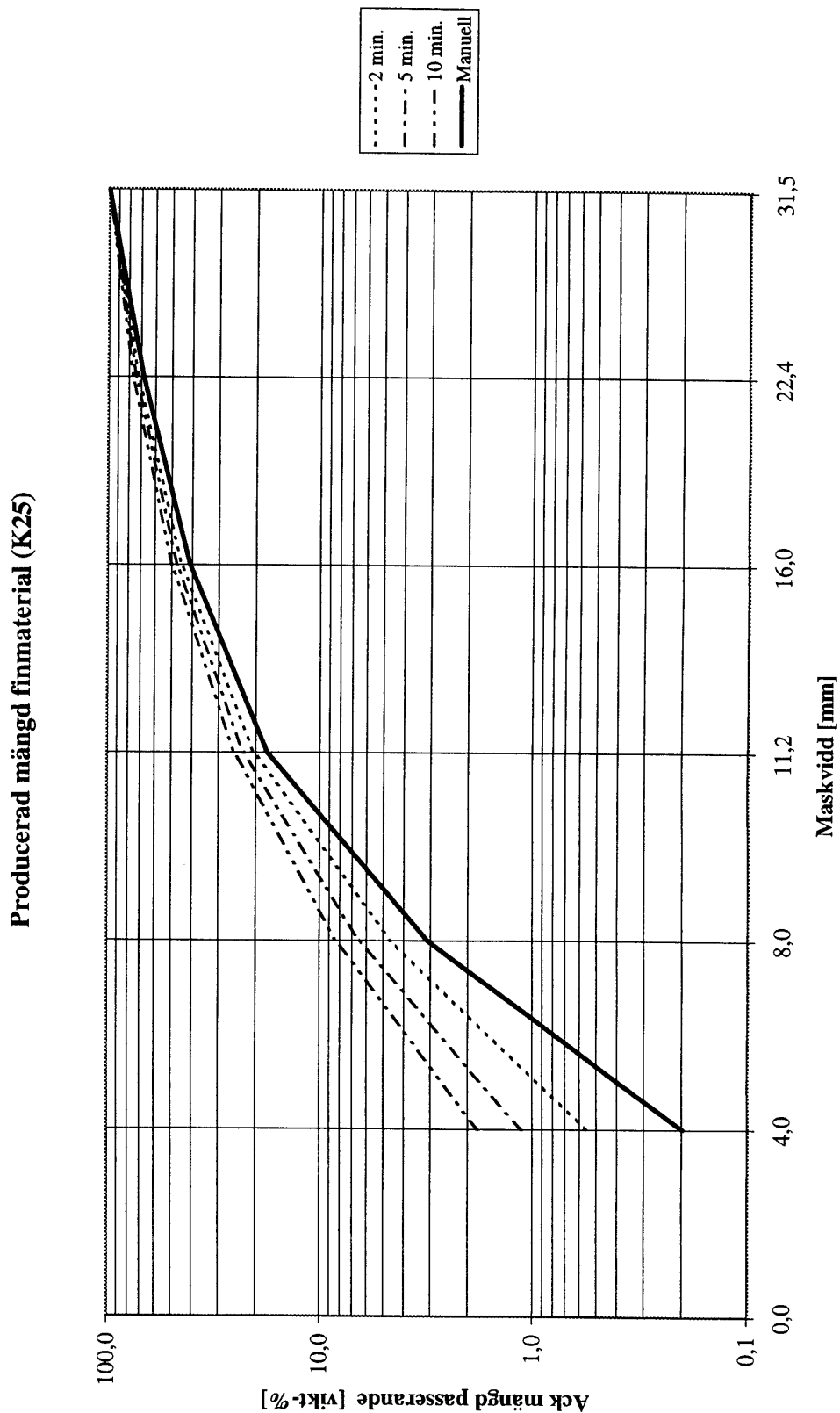
TABELL 3.16 Betongmaterialer som inngikk i Nordtest-prosjektene [20]

Kvalitet	Egenskaper tilslag			Egenskaper betong	
	Bergart	Sprøhet (%)	Los Angeles (%)	Trykkfasthet 28 døgn (MPa)	Fasthetsklasse
A1	Diabas	32,9	15,8	29	K25
A2				46	K40
A3				75	K60
B1	Granitt	42,1	19,5	29	K25
B2				49	K40
B3				73	K60
C1	Granittisk gneis	53,8	29,9	29	K25
C2				46	K40
C3				72	K60
Gammelt betonggulv	-	-	-	63 ¹	

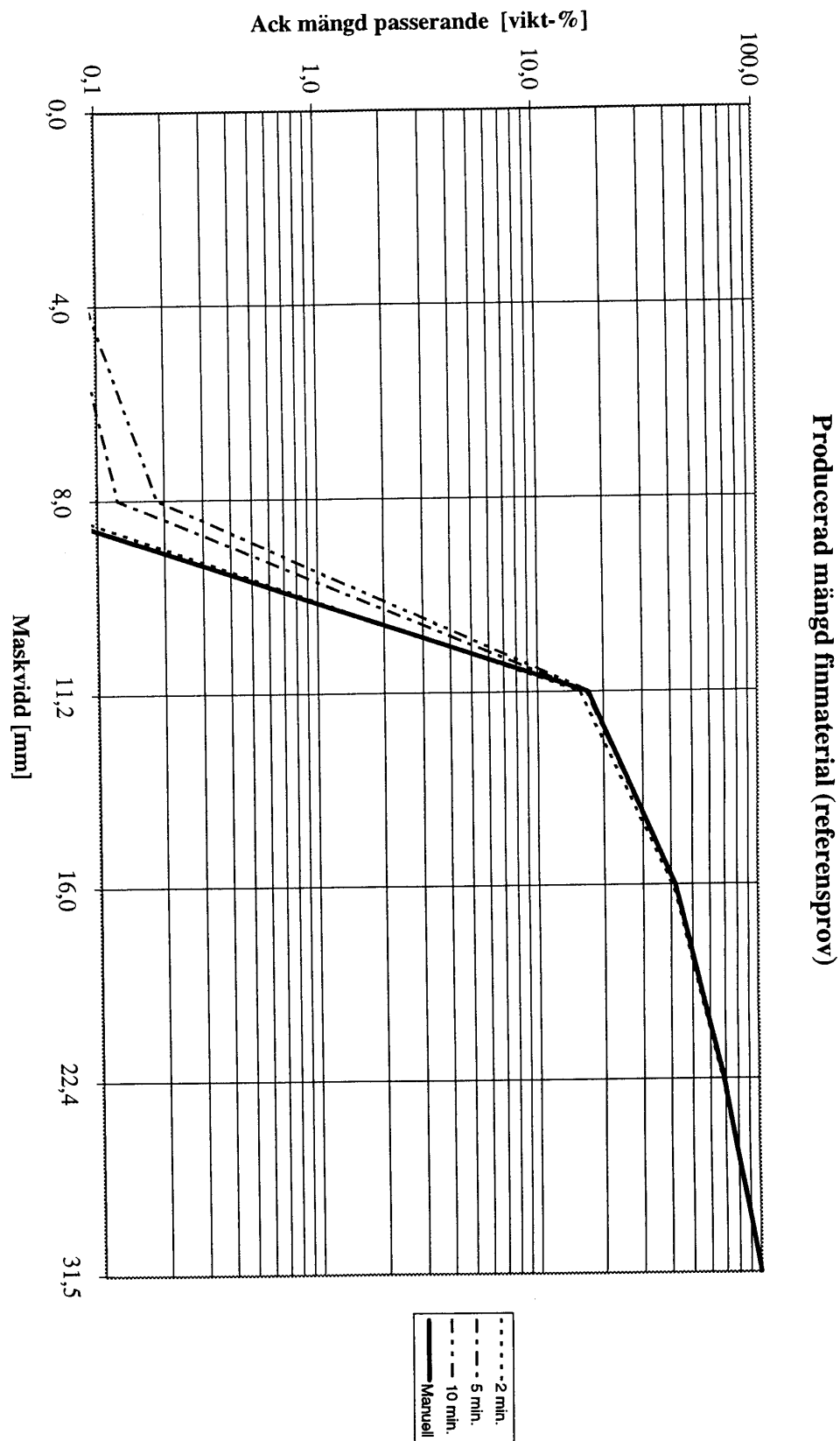
¹ Trykkfasthet bestemt ut fra sylinderprøver



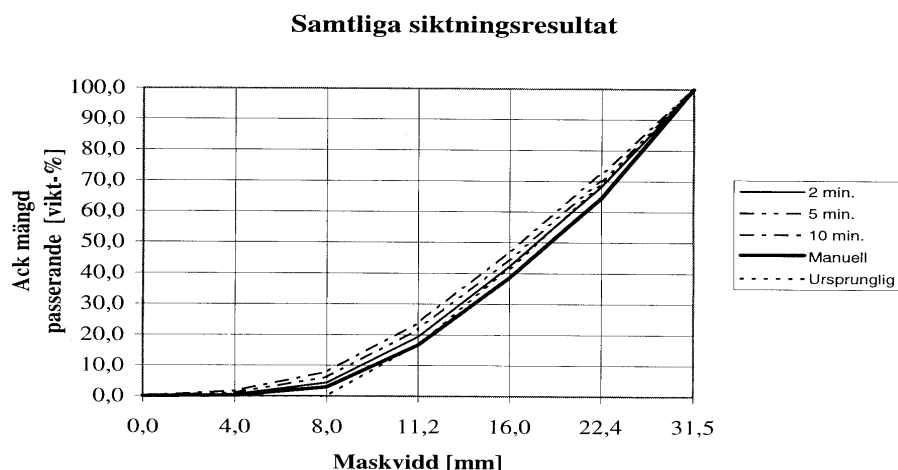
FIGUR 3.8 Sprøhetstall knust betong av forskjellig kvalitet, ulik siktetid etter fallprøve [32]



FIGUR 3.9 Økt finstoff-innhold som funksjon av siktetid, knust betong K25 [19]



FIGUR 3.10 Økt finstoff-innhold som funksjon av siktetid, referanseprøve knust fjell [19]



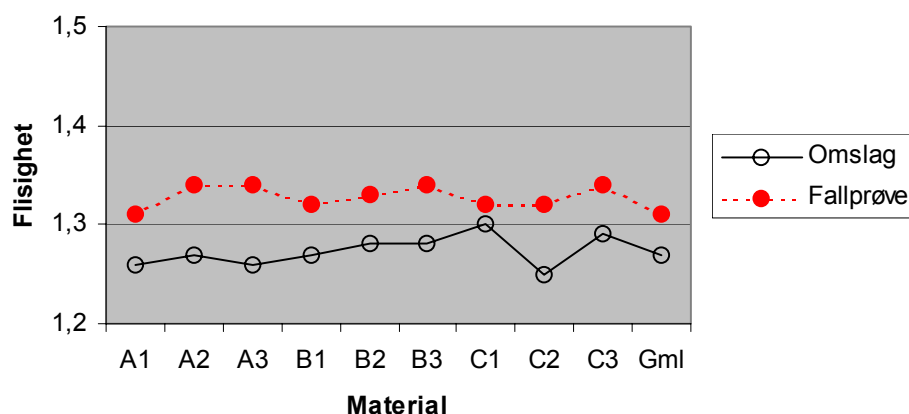
FIGUR 3.11 Endring av kornkurve som funksjon av siktetid, knust betong K25 [19]
(Sikting i siktemaskin 2, 5 og 10 min sammenlignet med manuell sikting)

Vurdering:

- Ved testmetoder der sikting inngår som en del av prosedyren, bør denne gjøres gjennom manuell våtsikting (mest skånsomt, får fram rent material).
- Ved maskinell sikting må denne gjøres mest mulig skånsom gjennom begrenset siktetid (maks 5 min?) og ved oppdeling i flere og mindre prøver.

3.3.3 Kornform

I undersøkelsene [20] [32] så man også på sammenheng mellom flisighetstall og betongkvalitet, her illustrert gjennom verdier fra fallprøvetesting (før og etter omslag).



FIGUR 3.12 Flisighetstall knust betong (ulike kvaliteter, jfr tabell 3.16)

Vurdering:

- Betongens trykkfasthet slår lite ut på flisighetstallene. Generelt synes ikke høy flisighet å være noe problem. Tilråding; ”passelig” flisighet er best (ikke for høyt, men heller ikke for lavt).

- Måling av geometriske egenskaper (flisighet, stenglighet, flakindeks m m) viser generelt at det for heterogene materialer som knust betong kan være store forskjeller mellom fraksjonene. Resultater framkommet gjennom testing på en enkelt fraksjon bør derfor ikke ”trekkes for langt” ved karakterisering av materialet generelt.
- Så langt som mulig bør man for slike materialer derfor teste og vurdere materialet som en enhet. Ergo; flakindeks er bedre enn flisighet!

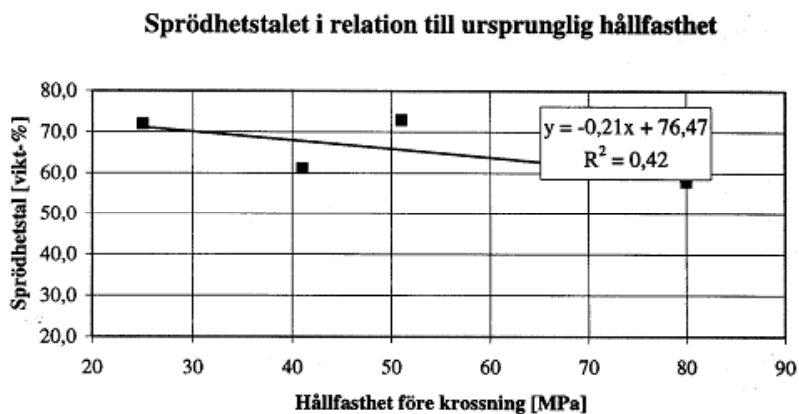
3.3.4 Mekanisk styrke

Fallprøve

Sprøheten ved fallprøve er et vanlig brukt mål på motstand mot nedknusing.

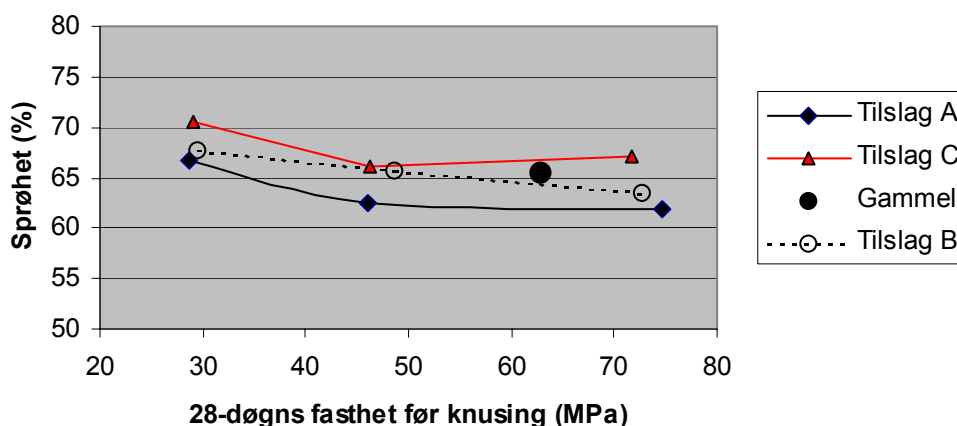
For knust betong vil man som vist foran kunne få en betydelig avsliting/kantrunding gjennom utsikting av testfraksjoner, oppsikting etter fallprøven osv. Beregnet sprøhet for knust betong (og tegl) blir derfor egentlig en blanding av sprøhet og slitasjemotstand.

Tidligere resultater hadde ikke påvist noen klar relasjon mellom betongens fasthet og sprøhets-verdi, jfr figur 3.13:



FIGUR 3.13 Sammenheng sprøhetstall for knust betong og opprinnelig trykkfasthet [19]

I Nordtest-prosjektet ble sammenhengen mellom sprøhet og betongens trykkfasthet undersøkt på nytt. Gjennomsnittsverdiene ble som vist i figur 3.14 (jfr tabell 3.16 vedrørende tilslagsmaterialene).



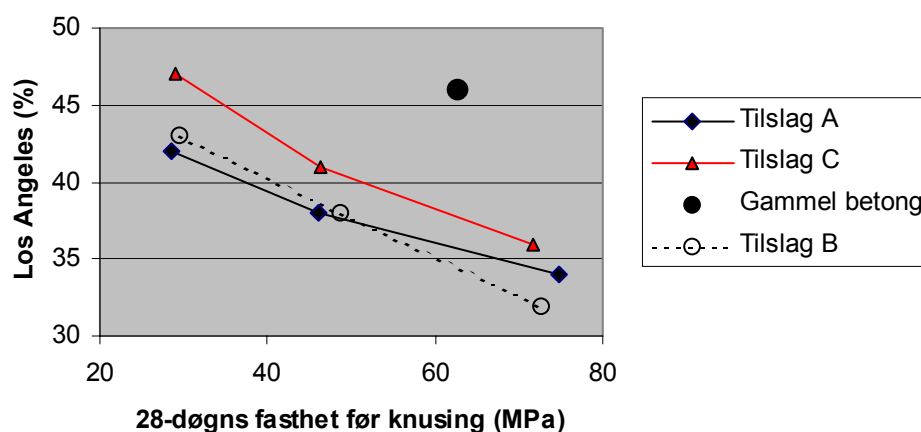
FIGUR 3.14 Sprøhetstall (8-11,2 mm) for knust betong av ulike kvaliteter [20] [32]

Vurdering:

- Sprøhet skiller ikke særlig godt mellom de ulike fasthetsklassene. Tilslaget i betongen har større innvirkning, jfr tabell 3.16.
- Det har vært påvist at kornformen har innvirkning på resultatene, jo rundere kornform jo bedre sprøhetsverdier [20]. Selve materialhåndteringen vil dermed ha direkte innvirkning på resultatet.
- Sprøhetstesting etter tradisjonelle metoder gir et resultat som egentlig er en blanding av slitasjemotstand og sprøhet. For å redusere ”slitasje-komponenten” må materialet siktes fram skånsomt (flere og mindre prøver, kort siktetid maks 5 min). Avsluttende sikting bør gjøres gjennom manuell våtsikting.

Los Angeles

Som for sprøhet var det ikke tidligere påvist noen klar relasjon mellom betongens fasthet og LA-verdi. Gjennom de nyeste Nordtest-undersøkelsene framkom resultater som vist i figur 3.15.



FIGUR 3.15 Sammenheng Los Angeles-verdi og opprinnelig trykkfasthet [20] [32]

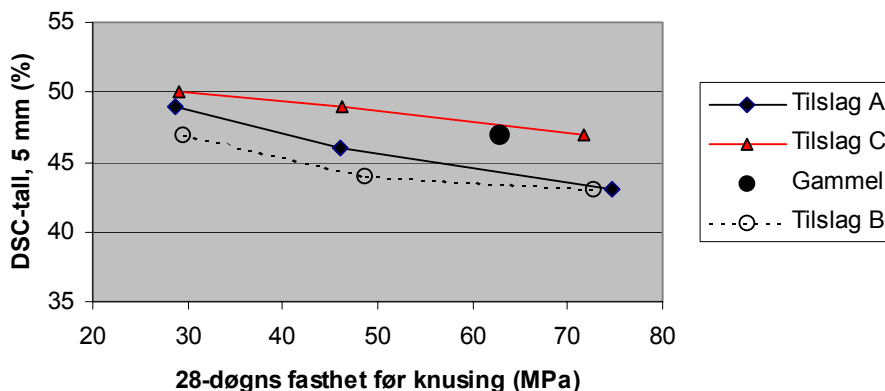
Vurdering:

- Ved Los Angeles-testen knuses sementpastaen ned først, slik at det ved avsluttet forsøk er mer eller mindre ren stein igjen. Los Angeles skiller dermed lite mellom ulike betongkvaliteter, den endelige verdien er mer avhengig av tilslagets egenskaper.
- Merk: De siste forsøkene (figur 3.15) gir en noe bedre sammenheng mellom Los Angeles-verdi og trykkfasthet (unntaket er den gamle betongen).
- Generelt kan sies at metoder hvor materialet testes gjennom de enkelte partikler vil gi andre utslag enn metoder som behandler materialet ”som en enhet”. Dette gjør at metoder som ”påvirker analysepartiklene individuelt” er mindre egnet for et ikke-homogent material som knust betong. Dette gjelder metoder som kulemåle, Mico-Deval og Los Angeles.

DSC (Dutch Static Compression Test)

Ved denne metoden presses/knuses materialet som en helhet, og påkjenningene er derfor antatt å være mer lik virkeligheten.

I Nordtest-prosjektet framkom sammenhenger mellom betongkvalitet og DSC-verdi som vist i figur 3.16:



FIGUR 3.16 Sammenheng DSC-tall (5 mm sikt) og opprinnelig trykkfasthet [20] [32]

Vurdering:

- Resultatene viser noe tilsvarende som LA-forsøkene (figur 3.15), men prøven av gammel betong faller bedre inn på DSC-tallene.
- Metoden vurderes som interessant. Men erfaringene er begrenset, ennå mangler det en del når det gjelder føling med prosedyren, korrelasjon til andre metoder, korrelasjon til felt m m.
- Også denne metoden er begrenset til én testfraksjon (10-14 mm). Spørsmålet er også her hvor godt en snever testfraksjon (kornstørrelse, kornform osv) representerer materialet som helhet (manglende homogenitet er en kjensgjerning!).
- Metoden krever noe spesielt utstyr (kraftig trykkpresse m m).

Kompakteringsforsøk i lab

Vedrørende Proctor-forsøk er vurderingene som følger:

- Modifisert Proctor ("tung innstamping") kan brukes til å bestemme optimalt vanninnhold (typisk 8-12 % for knust betong).
- Men stor nedknusing av materialet i Proctor-forsøket gjør at maksimal densitet bør bestemmes ved vibrobord.

3.3.5 Funktionelle egenskaper i felt

Disse Nordtest-prosjektene har ikke innbefattet egne feltundersøkelser. Men i rapportene henvises det til VTIs undersøkelser [26], og følgende forhold blir understreket:

- Mer forskning kreves for å finne en metode som korrelerer med materialets tenkte funksjon i felt.
- En slik metode kan være treaks-testing. Dette er imidlertid tungt utstyr som vanskelig kan bli noe kontrollverktøy. Et treaks-prosjekt med etablering av korrelasjoner til enklere metoder er derfor ønskelig, også relatert til forsøksveger med samme material (*jfr Fornebu-prosjektet?*)
- Det er svært ønskelig å kunne bestemme graden av "etterbinding" når man skal vurdere materialkvaliteten. Noe kriterium eller prøvingsmetode for dette finnes ikke ennå, og det savnes!

Generelt framheves det fra Sverige at knust betong er best som **forsterkningslag** [30].

Dette fordi:

- Lagtykkelsene er størst, får maksimalt utbytte av selvbinding og stivhetsøkning over tid.

- Materialet er mindre utsatt for frostforvitring (ingen eksponering for salt m m).
- Materialet er mindre utsatt for nedknusing og finstoffanriking pga trafikken (lavere spenningsnivå).

3.4 Andre nordiske prosjekter/rapporter

3.4.1 Chalmers, ref [28]

I sin lic.-grad fra Chalmers drøfter Mats Karlsson egenskapene til knust betong. Resultatene er delvis framkommet gjennom egne laboratorieforsøk og delvis gjennom forsøk gjort andre steder (bl a RiT 2000). Her refereres noen av konklusjonene.

Fysisk/mekaniske egenskaper

Tilslag av knust betong og/eller tegl vil være ømfintlige for materialhåndtering:

- Siktekurvene endres gjennom håndteringsprosessene, utleggingen og kompakteringen.
- Materialene endrer seg også gjennom selve testprosedyrene som brukes for å vurdere/karakterisere materialene (bl a påvirkes resultatene for fallprøve, Los Angeles osv av hvordan siktingen utføres).
- Forskjellene mellom tørr- og våtsikting kan være ekstra store for disse materialene. Mye av finstoffet vil være festet til de grovere kornene, slik at riktig bilde av finstoffinnholdet ikke kommer fram ved vanlig tørrsikting (se figur 3.17).
- Testmetodene kulemløse og Los Angeles og kriterier/grenseverdier satt ut fra disse vurderes som mindre egnet.

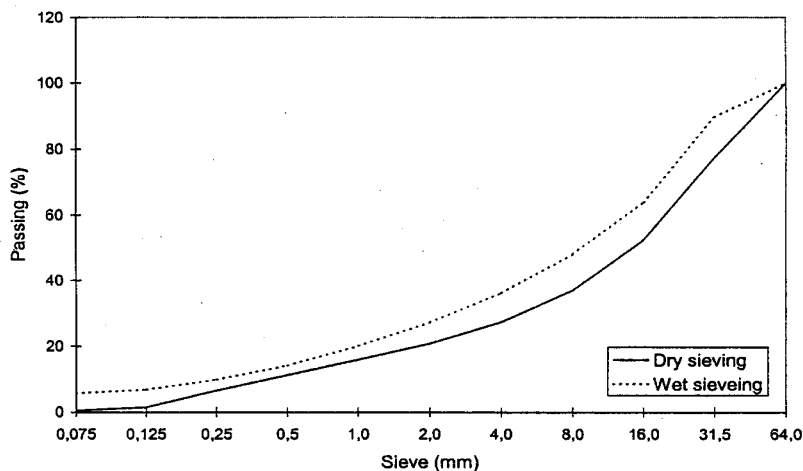


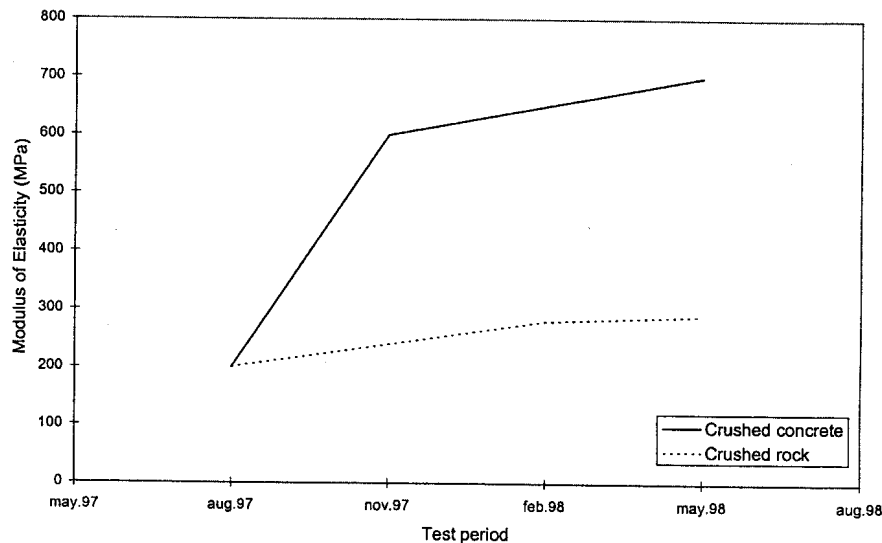
Figure 2.3 Fine particles attached to RCA are detected by wet sieve analysis, data from Aurstad (1999).

FIGUR 3.17 Tørrsikting kontra våtsikting av prøve med knust betong [28] [43]

Funksjonelle egenskaper

Karlsson påpeker at fasthetsutviklingen i felt er mer sammensatt enn det som har vært vanlig å anta, og at flere prosesser innvirker på dette fenomenet:

1. Reaksjon med uhydratisert sement framkommet i knuseprosessen.
Prosessene kan være til stede, men betyr sannsynligvis langt mindre enn tidligere antatt.
2. Prosess med suksessiv oppløsning og avleiring av karbonater.
Utgjør sannsynligvis hovedbidraget, en slik "sammenkitting" er også kjent fra USA på veger hvor det brukes kalkstein.
3. Kjemiske reaksjoner.
Herunder kanskje viktigst reaksjon mellom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i betongen og CO_2 i lufta til CaCO_3 (karbonatisering).



FIGUR 3.18 Etterherding, eksempel på målte stivheter i felt på knust betong og vanlig tilslag [28]

Etterherdingsprosessene er forsøkt simulert i laboratorium gjennom CBR-forsøk. Figur 3.19 og tabell 3.17 viser forsøk hvor man har sammenlignet nyknust (referanse) og CO₂-behandlet (fullkarbonatisert) betong.

Materialet, som her stammet fra et rivingsprosjekt i Göteborg, ble knust ned til fraksjon 0-19 mm. Karbonatiseringen ble utført ved at det nedknuste materialet ble behandlet med CO₂-gass i et trykk-kammer. Med det reagerer Ca(OH)₂ i betongen med CO₂ og går over til CaCO₃.

Resultatene ga ingen klare forskjeller, man fikk en tydelig fasthetsutvikling for begge prøveseriene, også for de "ferdig-karbonatiserte" prøvene.

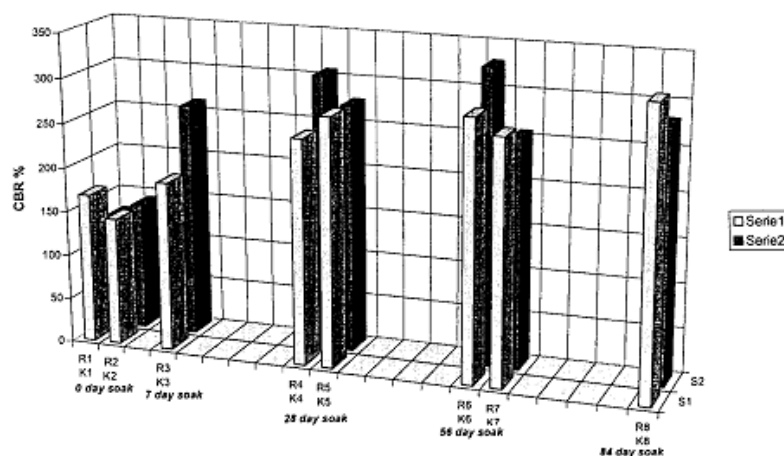


Figure 1. Strength development for RCA measured in CBR, Series 1 illustrates specimens where RCA is carbonated while series 2 is reference.

FIGUR 3.19 Resultater fra CBR-forsøk på knust betong, jfr tabell 3.17 [28]

TABELL 3.17 Resultater fra CBR-forsøk på knust betong [28]
(Prøvene R1-R8 er ubehandlet, prøvene K1-K8 er CO₂-behandlet)

Soakin g period (days)	Sampl e	w (%)	Dry bulk density (kg/ m ³)	Weight before storage (g)	Weight after storage (g)	Deviation (g)	CBR 2,54 mm (%)	CBR 5,08mm (%)
0	R1	10,5	1850	4338	-		105	128
0	R2	10,7	1878	4412	-		120	143
0	K1	10,1	1857	4338	-		118	143
0	K2	10,5	1883	4418	-		140	168
7	R3	11,0	1863	4376	4389	+13	247	262
7	K3	11,0	1847	4336	4353	+17	149	190
28	R4	10,8	1858	4371	4397	+26	254	307
28	R5	10,8	1841	4329	4358	+29	247	276
28	K4	11,4	1828	4324	4355	+31	214	252
28	K5	11,1	1855	4373	4391	+18	243	278
56	R6	11,2	1844	4352	4398	+46	301	329
56	R7	11,0	1837	4330	4366	+36	239	256
56	K6	10,3	1869	4378	4379	+1	258	290
56	K7	11,4	1845	4366	4402	+36	243	272
84	R8	9,2	1888	4376	4339	-37	247	281
84	K8	8,8	1897	4382	4323	-59	298	319

3.4.2 KTH, ref [47]

Maria Arm har i sin lic.-avhandling fra KTH samlet erfaringer fra et stort antall laboratorie- og feltundersøkelser. Her refereres prosjekter fra flere land; ALT-MAT, KPG-prosjektet, VTIs undersøkelser og mange flere. Arm har sett spesielt på materialene knust betong, masovnslegg ("hyttsten") og botnaske fra forbrenningsanlegg ("slaggrus").

I det hele er det samlet svært mye informasjon i denne publikasjonen, vel verdt å lese for de som er interessert i emnet.

Når det gjelder knust betong generelt konkluderer Arm med at dette ikke kan betraktes som ett spesifikt material. Materialeegenskapene vil kunne variere mye avhengig av tre hovedfaktorer som dermed også vil være bestemmende for anvendelsene;

- **opphav** (sementtype, tilslagsmaterial, type konstruksjon, konstruksjonens alder, miljø konstruksjonen har vært i m m)
- **handtering** (rivingsmetode, knusing osv)
- **renhet, andel fremmedmaterialer** (armering, tegl, tre, gips osv)

Av mye interessant detaljinformasjon nevnes her som eksempel de nye finske dimensjoneringsreglene (FINNRA 2000). I Finland er det utarbeidet materialklassifiseringer, kvalitetskrav, dimensjoneringsstabeller og byggt tekniske anvisninger for ubunden bruk av resirkulert betong. Klassifiseringen er vist i tabell 3.18.

Disse finske retningslinjene er i skrivende stund ikke rukket anskaffet og gjennomgått, her gjengis derfor klassifiseringen slik den er presentert i Arms rapport.

TABELL 3.18 Kvalitetskrav på gjenbrukt knust betong (etter FINNRA 2000) [47]

Kvalitets-klasse	Korn-størrelse	Innhold tegl (vekt-%)	Innhold øvrig (vekt-%)	Tele-farlighet	Trykkfasthet (28 døgn) ¹	Dimensj. E-modul
BeM I	0-45 mm	0	≤ 0,5	ikke telefare	≥ 1,2 MPa	700 MPa
BeM II	0-45 mm	≤ 10	≤ 1	ikke telefare	≥ 0,8 MPa	500 MPa
BeM III	0-45 mm	≤ 10	≤ 1	ikke telefare	ingen krav	280 MPa
BeM IV	varierende	≤ 30	≤ 1	varierende	ingen krav	≤ 200 MPa

¹ Lagring og testing i henhold til finske betongnormer

For de to høyeste klassene regnes det med en E-modul som er høyere enn for konvensjonelle steinmaterialer, dette gjør at overbygningstykkelsene i enkelte tilfeller kan reduseres. Erfaringene med disse materialene er med andre ord allerede aktivt tatt inn i dimensjoneringen. Av anvisninger nevnes ellers:

- Lagtykkelsene må være ≥ 150 mm for at en stivhetsøkning skal være utnyttbar.
- Materialet bør legges ut nær w_{opt} (ca 10 ± 2 %).
- Betonglaget bør holdes fuktig en måned etter kompaktering (direkte vanning eller forsegling med asfaltvertrekk) for maksimal stivhetstilvekst.

3.4.3 Danske veiledninger for bruk av knust tegl og knust betong, ref [29], [52]

Danmark har vært foregangslandet i Norden når det gjelder gjenbruk, og var tidlig ute med veiledninger både for bruk av knust asfalt og knust tegl som ubundne bærelag. Nylig er det også kommet en veiledning for bruk av knust betong.

Knust tegl

Når det gjelder veiledningen for bruk av tegl kan følgende hovedpunkter nevnes [29]:

- For vurdering av kornstyrke og motstand mot nedknusing brukes Los Angeles-testen. Erfaringsverdier for tegl er LA = 42-58
Erfaringsverdi for "standard dansk grus" er til sammenligning LA = 25.
Man har foreløpig ikke satt opp spesifiserte krav, disse ventes å innføres sammen med CEN-standardiseringen.
- Knust tegl har begrensninger i slitestyrke, frostbestandighet m m. Dette gjør at materialet bare brukes på lavt trafikkerte veger og områder.
- Tiltak for å hindre nedknusing;
 - Grensekurver på korngraderingen (maks 6 % finstoff < 0,075 mm).
 - Begrensninger i antall valseoverfarer.
 - Rikelig vanning ved utlegging/komprimering (tørr tegl knuses mye lettere enn våt tegl).
- Komprimeringskontroll:
Volumetriske metoder eller isotopmålere (de siste har begrensninger pga porøsiteten).
Referanseverdi for tørrdensitet bestemmes ved vibrasjonsinnstampning (ikke Proctor).

Knust betong

Når det gjelder veiledningen for bruk av knust betong som bærelag er den bygd opp lik veiledningen for tegl, med mange av de samme generelle anførsle. Av de viktigste spesifikke kravene til knust betong kan nevnes følgende [52]:

- Knust betong deles i tre ulike kvalitetsklasser: Kvalitet A, Kvalitet B og Kvalitet C.
Av disse kan Kvalitet A og Kvalitet B brukes på alle vegkategorier, mens Kvalitet C bare kan brukes på lett trafikkerte veger, stier og plasser.

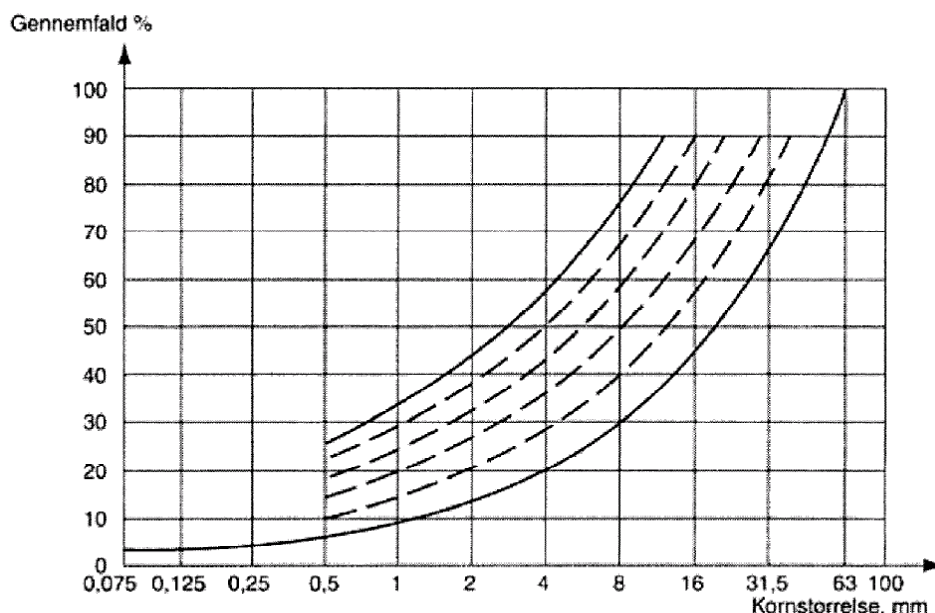
- Grunnlaget for denne klasseinndelingen er renhet, kornkurve og Los Angeles-verdi.

- **Renhetskriteriet** er knyttet til material > 4 mm:

TABELL 3.19: Knust betong, krav til renhet [52]

Fraksjon	Gruppe		Indhold		
	Betegnelse	Bestandele	Kval. A vægt-%	Kval. B vægt-%	Kval. C vægt-%
> 4 mm	”Beton”	Beton og naturmaterialer	≥ 98	≥ 95	≥ 80
	”Tegl”	Tegl, letbeton, ekspanderet ler og kalkmørtel	≤ 2,0	≤ 5,0	≤ 20
	”Asfalt”	Knust asfalt	≤ 2,0	≤ 2,0	≤ 2,0
	”Andet, ikke skadeligt”	Glas, porselæn, hård plast, jern og lignende hårde materialer	≤ 2,0	≤ 5,0	≤ 20
	”Andet, skadeligt”	Træ, papir, isoleringsmateriale*, blød plast, slagge m. v. *Lette isolasjonsmaterialer - styropor, - polyurethan o. lign	≤ 0,5 ≤ 0,02	≤ 1,0 ≤ 0,02	≤ 2,0 ≤ 0,02

- **Kornkurve-kriteriet** er knyttet til grensekurver for kornsammensetningen:



FIGUR 3.20 Grensekurver for knust betong [52]

Kvalitet A; kan skjære maks 2 av de stiplede linjene og ha maks 6 % gjennomgang på 0,075 mm

Kvalitet B; kan skjære maks 2 av de stiplede linjene og ha maks 8 % gjennomgang på 0,075 mm

Kvalitet C; kan skjære maks 3 av de stiplede linjene og ha maks 10 % gjennomgang på 0,075 mm

mm

- **Los Angeles-kriteriene:**

Danske erfaringsverdier for knust betong er LA = 28-42.

I retningslinjene pekes det på at Los Angeles-testen sier mest om materialets motstand mot slag (fra utlegging, kompaktering), mens Micro Deval er bedre med tanke på å teste materialets egenskaper i bruksfasen (slitasje fra senere trafikkpåkjenninger). Inntil videre har man imidlertid valgt Los Angeles som eneste kriterium:

TABELL 3.20 Knust betong, krav til Los Angeles-verdier [52]

	Kvalitet A	Kvalitet B	Kvalitet C
Los Angeles-verdi	≤ 35	≤ 40	Intet krav

- For øvrig gjelder de samme hensyn ved utlegging av knust betong som ved bruk av knust tegl (begrensning i antall overfarter, rikelig vanning m m).

Ellers kan nevnes følgende synspunkter framkommet gjennom kontakter med danske fagfolk [31]:

- Man har begynt å få gode praktiske erfaringer også i Danmark, men det er fortsatt usikkerheter rundt hvordan materialene oppfører seg i sterk kulde og ved store temperaturforskjeller.
- De har ikke tro på trykkprøving/kjerneboringer av betongmaterialet som grunnlag for klassifisering (Sverige og Finland har det).
- For klassifisering og kvalitetsvurdering må man komme fram til metoder hvor man tester det ferdige produkt i sin helhet.
- Det er fortsatt en del ubesvarte spørsmål knyttet til etterherdings-prosessene. Man har bl a sett at fasthetsutviklingen ikke er så tydelig i alle prosjekter (avhengig av knusetidspunkt m m?).

Danmark deltok ellers i ALT-MAT, og deler med det sine erfaringer gjennom rapportene derfra.

3.5 ALT-MAT

3.5.1 Generelt om prosjektet, ref [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]

EU-prosjektet ALT-MAT (Alternative materials in road construction) 1998-2000 hadde sitt utspring i det europeiske samarbeidsforumet COST. Prosjektet var et samarbeid mellom 7 land og 9 forskningsinstitusjoner, og hadde som primær målsetting å bidra til økt bruk av alternative materialer i vegbygging, både for å redusere forbruket av naturmaterialer og å redusere avfallsmengdene.

ALT-MAT har fokusert på avfallsmaterialer som kan brukes som **ubundne granulære materialer**. Foruten knust betong inngikk også ulike typer slag, aske fra forbrenningsanlegg (MSWI-ashes), glass m m. *Disse andre materialene er ikke vektlagt i denne rapporten.*

I prosjektet inngikk sammenligning og evaluering av testmetoder for fysiske/mechaniske egenskaper og miljø-/kjemiske egenskaper for å komme fram til felles kriterier og vurderingsgrunnlag.

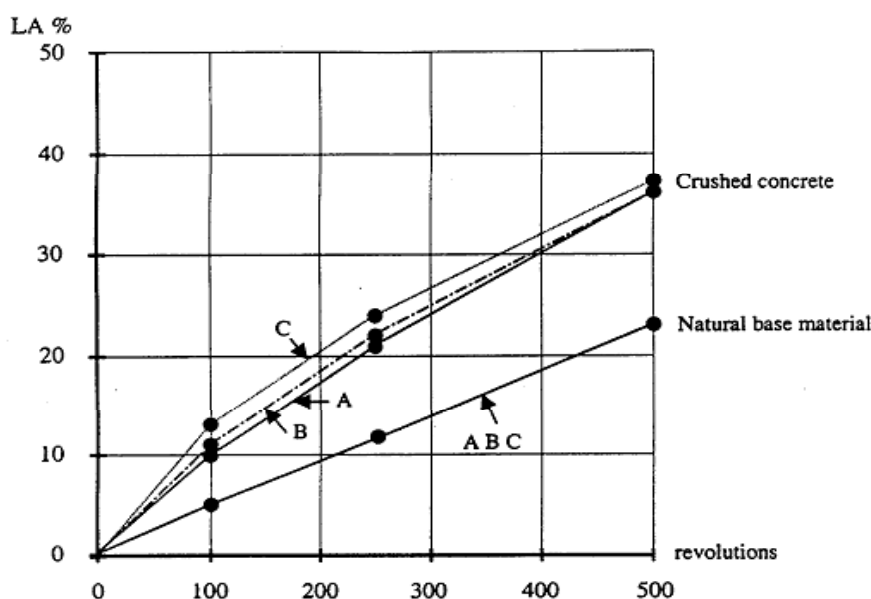
De følgende resultater og vurderinger er stort sett sakset fra hovedrapporten [1] med støtte i de andre delrapportene.

3.5.2 Vurderinger av testmetoder

Los Angeles

TABELL 3.21 Resultater fra Los Angeles-kjøringer på knust betong [1]

	LA-verdier CEN (10-14 mm)			LA-verdier ASTM (9,5-19 mm)		
	100 rot.	250 rot.	500 rot.	100 rot.	250 rot.	500 rot.
Knust betong (Danmark)	12	24	38	11	22	36
Referanse (std. bærelags-matr.)	5	12	22,5	5	12	23



FIGUR 3.21 Los Angeles, sammenligning bærelagspukk og betong, ref [30]

Vurdering:

- ASTM- og CEN-prosedyrene gir tilnærmet samme resultater for begge materialer.
- For referansematerialene (naturlig tilslag) er LA-verdien direkte proporsjonal med antall rotasjoner. Dette er ikke tilfelle for betongen, den slites mest på de første rotasjonene. (Dette forholdet er enda mer framtrødende for slagg-materialer o l, se [1])

Micro-Deval

TABELL 3.22 Resultater fra Micro-Deval-kjøringer på knust betong [1]

	Micro-Deval-verdi		
	3000 rot.	6000 rot.	12000 rot.
Knust betong (Danmark)	8,7	11,5	14,4
Referanse (std. dansk bærelagsmatr.)	3,1	4,2	5,6
Referansestein (Sveits)	1,5	3,3	3,9

Vurdering:

- Micro-Deval skiller tydelig mellom de forskjellige hovedgrupper av materialer; naturlig tilslag får verdier under 6, MSWI-aske o l får verdier over 25 (utelatt her), mens knust betong havner i mellom (sammen med bl a knust glass).
- Som for Los Angeles gir de første rotasjonene langt større påvirkning enn de siste rotasjonene.

Gyratorisk kompaktor

I ALT-MAT ble siktekurver for en del materialer sammenlignet før og etter kompaktering i gyrator. Den valgte prosedyren (150 mm prøvediameter, kontakttrykk 600 kPa, gyratorvinkel 1,25°, 30 rot./min, 178 rotasjoner totalt) ble antatt å tilsvare tung statisk valsing i felt.

Hele fraksjoner/materialkurver ble kjørt "as delivered", uten forutgående vasking. Materialene ble testet tørt.

Nedknusingen ble vurdert ut fra en prosedyre hvor man beregnet endringen i arealet over siktekurvene i kornfordelingsdiagrammet.

Dessverre inngikk ikke knust betong i disse undersøkelsene, men resultater for de andre materialene kan leses i [1].

Metoden vurderes som svært interessant ut fra bl a følgende forhold:

- Mulig å teste nærmere opp til aktuell, hel fraksjon som skal legges i felt (gyratorens sylinder-diameter på 150 mm gir mulighet for maks kornstørrelse på ca 50 mm).
- Prøvehøyden kan reguleres til aktuell utlagt tykkelse i felt (iallfall til en viss grad).
- Forsøkene viste god repeterbarhet for metoden.

For videre undersøkelser anbefales:

- Teste ved optimalt vanninnhold (tilsvarende utlegging).
- Optimalisere prosedyren (kontakttrykk, antall rotasjoner) til å samsvare mer med feltkompaktering.

Vibrobord

Som for gyrator sammenlignet man siktekurver før og etter kompaktering.

Den valgte CEN-prosedyren prEN 13286-5 (280 mm prøvediameter, 230 mm prøvehøyde, påført vekt 160 kg, vibrering 50 Hz), ble antatt å tilsvare en vibrasjonsvals i felt.

Vurdering:

- Metoden er kjent, brukes for bestemmelse av optimalt vanninnhold og maksimal tørrdensitet.
- For naturlige tilslag har nedknusing/endring av siktekurve ved denne prosedyren vist seg å være nesten neglisjerbart.
- For svært "bløte" materialer (MSWI-aske o l) antas endringene å tilsvare den nedknusing/slitasje materialet normalt får ved fraksjonering/utsikting til foreskrevet kurve.
- *For betong vil nedknusingen ligge et sted i mellom naturlig tilslag og MSWI-aske?*
- Den valgte prosedyren er ikke vurdert som egnet til å klassifisere/måle mekanisk styrke.

Frostbestandighet

Flere metoder ble utprøvd;

- Bestemmelse av motstand mot frysing og tining, EN 1367-1 (forsøk på knust betong)
- "Danish frost heaving test" (forsøk på knust betong)
- "Frost heaving test, British Standard" (forsøk på bygningsavfall)

Vurdering:

- Vanskelig å trekke klare konklusjoner; fryse/tine-forsøkene gir delvis motstridende resultater.
- Mangler databaser/erfaringsdata for å knytte de "indirekte" fryse/tine-resultatene i lab opp mot reell oppførsel i felt. Dette gjelder i særlig grad for gjenbruksmaterialer.
- Man antar at "frost heaving tests" er bedre og mer funksjonsrettet enn rene fryse/tine-forsøk på tilslag (jfr EN 1367-1).
- "Frost heaving tests" kombinert med bæreevnforsøk (CBR) anbefales undersøkt nærmere.

3.5.3 Vurderinger av feltforsøk

Følgende avsnitt er tatt med for å gi en kortfattet oppsummering fra feltforsøkene som har inngått i ALT-MAT [1]. De svenske referansestrekningene er de samme som drøftet tidligere.

Danmark

Forsøksveg i Vejle; lett trafikk, bærelag 200 mm knust betong under 70 mm Ab-dekke. Undergrunn av sand.

TABELL 3.23 E-modul for bærelag, forsøksveg Vejle (fra falloddsmålinger) [1]

	1991	1998
Knust betong	320 MPa	540 MPa
Grus (referansefelt)	200 MPa	215 MPa

Vurdering:

- Gode funksjonelle egenskaper etter 8 år i felt. Tilstanden på strekningen med betong-bærelag er bedre enn på referansestrekningen med vanlig oppbygging(!)

England

Forsøksveg i Blacknell; moderat trafikk, nedre forsterkningslag 500 mm "demolition rubble" (knust tegl m m) under et øvre forsterkningslag av 100 mm grus. Bituminøst bærelag og dekke på toppen (250-300 mm). Referanse er en seksjon med 150 mm kalkstein i stedet for tegl.

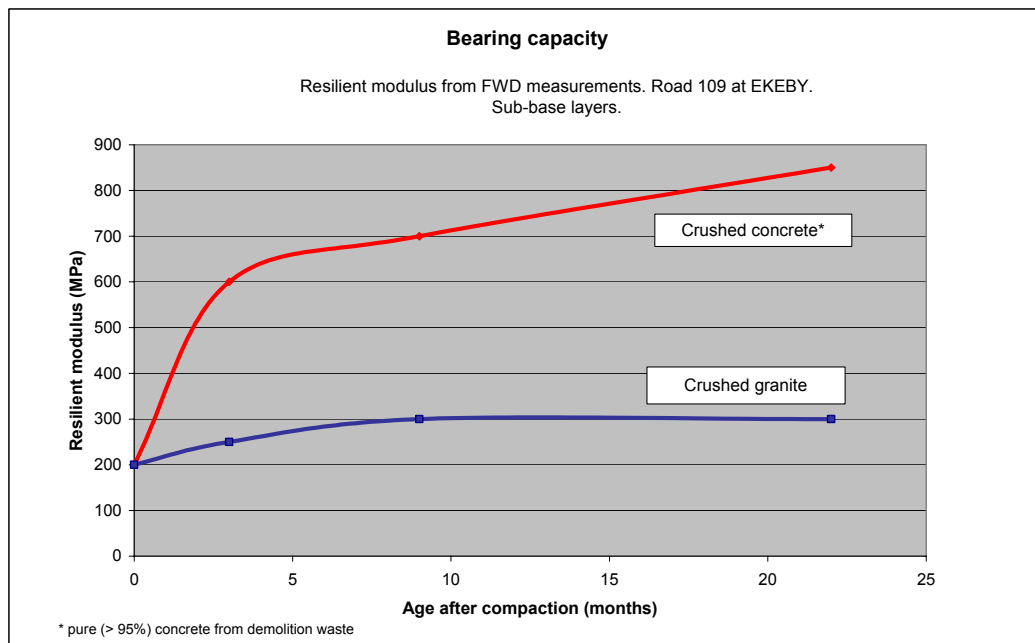
Vurdering:

- Gjenbruksmaterialet falt utenfor spesifikasjonene når det gjelder gradering, vannabsorpsjon og telefarlighet.
- Rivningsmassene av tegl (++) har likevel fungert fullt ut tilfredsstillende. Ingen forskjeller i tilstand er observert mellom referanse-overbygningen med kalkstein og seksjonen med gjenbruksmasse (som riktignok er tykkere).
(Det bemerkes i rapporten at referansematerialet egentlig var et dårlig sammenligningsgrunnlag da det var av svært god kvalitet, og egentlig for høyverdig for denne type anvendelse.)

Sverige

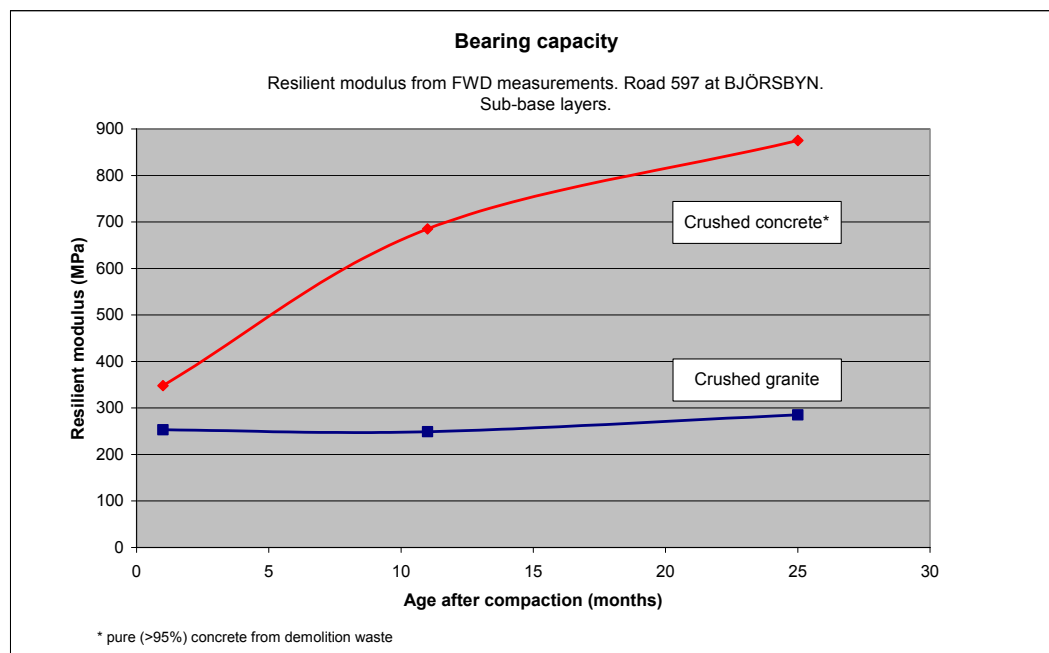
Dette er de samme referanse-prosjektene som er omtalt i [15] [16] [17] [18] [26] [27] m fl.

Forsøksveg Helsingborg; forsterkningslag 765 mm knust betong under bituminøst bærelag og dekke (130 mm). Undergrunn av leire.



FIGUR 3.22 E-moduler for forsterkningslag, v. 109 Helsingborg [1]

Forsøksveg Luleå; to ulike seksjoner med gjenbruksmasser; henholdsvis knust betong som bærelag (150 mm) og som forsterkningslag (420 mm). Den knuste betongen her var mindre homogen enn den som ble brukt i Helsingborg ("forurenset" av lettbetong m m).



FIGUR 3.23 E-moduler for forsterkningslag, v. 597 Luleå [1]

Vurdering:

- Konstruksjonene med gjenbrukt knust betong har vist god funksjonell oppførsel. Av konkrete ting framheves:
- Både treaks-forsøk i lab og FWD-målinger i felt påviser markant økning i stivhet på den knuste betongen over tid (jfr figurene 3.22 og 3.23).
- Fysisk/mechaniske egenskaper (kulemølle, Los Angeles, fryse/tine-motstand) kommer dårligere ut for betongen enn for referansematerialet (knust granitt).
- Men målt resilientmodul er høyere for knust betong enn for referansematerialet.
- Økt finstoffinnhold er påvist i prøver tatt ut i felt noen uker etter utlegging (en viss fare for nedknusing, anleggstrafikken mest kritisk?).

Feltforsøk, samletabell

Oppsummering av feltforsøkene i ALT-MAT med knust betong o l er vist i tabell 3.24. Feltforsøkene med andre alternative materialer er utelatt her, for mer fullstendige tabeller henvises til [1] [5] [7].

TABELL 3.24 Inspiserte forsøksstrekninger i ALT-MAT (utvalg) [1]

	Alternative Material	Acceptability	
		Mechanically	Environmentally
UK	Building demolition material (brick and concrete) sub-base	Acceptable-good GDPBT: 48 MPa Spec.'s: CBR, soundness and ten percent fines within national spec (SHW). Frost heave above spec. for sub-base E-moduli: >900MPa	Certain constituents in the clay subgrade effected by leaching of sub-base. Classified as unrestricted for unbound road layers (CIRIA report 167: Group 1).
	Reference, Limestone aggregate sub-base	Acceptable good GDPBT: 35-47 MPa Spec.'s: All within national spec.'s (SHW) E-moduli: >200MPa	Classified as unrestricted for unbound road layers (CIRIA report 167: Group 1).
Denmark	Crushed concrete base	Very good PCI: 0.70 E-moduli: 300-500 MPa and increasing	High pH and calcium in leachate, chromium and lead higher than sand/gravel reference material
	Reference, natural base	Good PCI: 0.70 E-moduli: 200 MPa	
Sweden	Reference, crushed rock Base and sub-base	Good behaviour Base CBR 200-250 Sub-base E-moduli approx. 300 MPa	
	Crushed concrete sub-base	E-moduli >600 MPa and increasing	Concentration of Cr, Cu, Ni and Pb in leachate from concrete higher than crushed rock
	Reference, crushed rock	E-moduli: 300 MPa	

GDPBT: German dynamic plate bearing test
PCI: Danish Pavement Condition Index

3.5.4 Vurdering av CEN-standardene

De CEN-standarder som av ALT-MAT er vurdert å være relevante for alternative materialer (herunder knust betong og tegl) brukt i ubundet form (granulære bærelag, forsterkningslag m m) er gitt i tabell 3.25.

TABELL 3.25 Relevante CEN-standarder for sekundære materialer, ALT-MAT [1]

Test method	Reference
Methods for sampling	EN 932.1
Methods for reducing laboratory samples	prEN 932.2
Determination of particle size distribution	EN 933.1
Determination of the resistance to wear (Micro-Deval)	EN 1097.1
Methods for the determination of resistance to fragmentation (Los Angeles)	EN 1097.2
Determination of water content by drying in a ventilated oven	prEN 1097.5
Determination of particle density and water absorption	prEN 1097.6
Method for determination of loss on ignition	EN 1744.1
One of the standards prEN 13286.2-13286.5 Test methods for laboratory reference density and water content:	
Standard proctor	prEN 13286.2
Vibrocompression with controlled parameters	prEN 13286.3
Vibrating hammer	prEN 13286.4
Vibrating table	prEN 13286.5

ALT-MAT poengterer at grenseverdier må settes på nasjonalt nivå for å ivareta hensyn til klima, egne erfaringer med ulike materialer osv.

3.6 Rilem, ref [10] [11]

Rilem (The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) har utgitt en state-of-the-art rapport vedrørende gjenbruk av bygge- og rivningsavfall [9].

Rapporten gir en interessant oversikt over mengder, materialer, anvendelser, renhetskrav osv i de ulike land. Men rapporten drøfter i liten grad de kvalitetskriterier som er satt, hvilke metoder som benyttes osv.

Ad hoc-gruppen for gjenbrukstilslag under CEN TC 154 pekte i sin sluttrapport ut følgende metoder og egenskaper som særlig viktige for å vurdere materialenes egnethet som granulære bærelag/forsterkningslag ("Unbound applications"):

TABELL 3.26 Relevante CEN-standarder for sekundære materialer, Rilem [10]

Test method	Reference
Resistance to fragmentation (Los Angeles)	EN 1097-2
Composition	<i>test required</i>
Particle density	prEN 1097-6
Grading	EN 933-1
Content of fines, sieve analysis	EN 933-1
Particle shape(Flakiness index)	EN 933-3
Freeze/thaw resistance (spørsmålstegn ved anvendelighet?)	prEN 1367-1
Resistance to wear (kulemølle)	EN 1097-9

3.7 Australske undersøkelser , ref [8]

I Australia satses det også på å utnytte sekundærmaterialer i vegbygging.

I ref [8] er det vist til forsøk med mekanisk testing på knust betong av ulik fasthet ("compressive strength"), noe a la forsøkene gjort på VTI. De viktigste konklusjonene er som følger:

- Mekaniske tester som Los Angeles og Aggregate Crushing Value har vanskelig for å skille mellom ulike betongkvaliteter/fasthetsklasser.
- "10 % fines"-testen skiller langt bedre, og viser god korrelasjon med trykkfasthet. (Mer om denne testen under pkt 4.2.)
- Trecks-forsøk (standard bærelagskurve) viser at betongmaterialene ved lave spenningsnivå har minst like gode stivhetsegenskaper (resilientmodul) som standard tilslag. Ved store spenningsnivå er resultatene mer ujevne og tydelig avhengig av kornform.
- Derfor: For å få utnyttet stivheten (resilientmodulen) maksimalt foreslås et strengere krav på kornform:
Flakiness Index < 10 (normalverdi for vanlig tilslag er 35)
- Man har sett tendens til at økende trykkfasthet hos "utgangsbetongen" gir økt flisighet på ferdig knust material. Kravene til knuseprosessen må derfor skjerpes (metode, utstyr m m).
- Etterherding: Målingene viser at knust betong får en fasthetsutvikling etter utlegging tilsvarende et vanlig tilslag tilsatt 2 % sement.

3.8 FHWA User Guidelines, ref [12]

Federal Highway Administration har utgitt en publikasjon med anvisninger og råd om bruk av ulike avfallsmaterialer og "by-products" (foreløpig 19) i vegbyggingssammenheng.

Anvisningene er framkommet på grunnlag av forsøk og erfaringer fra ulike stater i USA.

Siden kravspesifikasjoner er ulike fra stat til stat [13], gir FHWA bare generelle råd. F eks når det gjelder materialparametre gjengis bare typiske verdier for de forskjellige materialene, drøfting av testmetoder osv er ikke med.

Det er sikkert nyttige ting å hente ved å gå inn på de enkelte staters spesifikasjoner, det har ikke vært gjort i denne omgang. Direkte linker kan bli funnet fra [14].

FHWA-publikasjonen er lagt på nettet i "løsark-form" for at den skal være enkel å oppdatere.

For knust betong i ubundet form til bærelag og forsterkningslag, er følgende anført under "typiske mekaniske egenskaper":

- Los Angeles Abrasion Loss (ASTM C131)
USA bruker Los Angeles-testen i en litt annen fraksjon (9,5-19 mm) enn CEN-standardens (10-14 mm). Typisk verdi er rapportert til området LA = 20-45 %.

- Magnesium Sulfate Soundness Loss
Magnesiumsulfat-metoden er en fryse-/tine test som ennå er litt fremmed hos oss, men den har blitt offisiell CEN-standard, NS-EN 1367-2.
Rapportert som typiske verdier: < 4 (grove partikler), < 9 (fine partikler).
- California Bearing Ratio (CBR)
CBR vurderes fortsatt som en relevant test for å vurdere skjærstyrke og bæreevne i granulære materialer. Rapportert som typiske verdier for knust betong: CBR = 94-148 %.

Rapporten viser til at de ”typiske verdiene” er konsistente (små avvik), og at man ut fra dette har bra kontroll på de tilvirke materialene. Dette er nok også mye fordi man i USA i stor grad har konsentrert seg om gjenbruk av oppbrutte og knuste betongplater fra vegdekker. Vegbetong er mer homogen og har en jevnere og bedre kvalitet enn Bygningsbetong av ulikt opphav. Dette forholdet er også påpekt i andre referanser, bl a [23].

4 TESTING AV GJENBRUKSMATERIALER, HVA ER STATUS?

Mange har tatt til orde for at ukritisk bruk av eksisterende standardkrav og ”gamle” prøvnings-metoder for tilslag kan gi misvisende resultater når man har å gjøre med alternative materialer, herunder knust betong og tegl.

I denne rapporten har man sett nærmere på

- kornfordeling (herunder påvirkning ved materialhåndtering, sikting etc.)
- testing av fysiske/mekaniske egenskaper

relatert til bruk av knust betong og tegl som ubundne lag i vegoverbygningen.

Her gis en sammenfatning av de framkomne resultatene, inkludert en foreløpig vurdering/evaluering av de mest brukte/aktuelle testmetodene.

4.1 Materialhåndtering

Feltforsøk med betong/tegl i Norge (RiT, Fornebu, RESIBA) og andre land har påvist at nedkusing under materialhåndtering, sikting osv kan påvirke materialene vesentlig (endret siktekurve, finstoffanriking osv).

Tiltak for å redusere dette problemet er bl a

- Ved testmetoder der sikting inngår som en del av prosedyren, bør man bruke manuell våtsikting (mest skånsomt, får fram rent material).
- Ved maskinell sikting må dette gjøres mest mulig skånsomt gjennom begrenset siktetid (maks 5 min?) og ved oppdeling i flere og mindre prøver.

De samme forhold gjør seg også gjeldende i forbindelse med kompakteringsforsøk i laboratoriet:

- Modifisert Proctor (”tung innstamping”) kan brukes til å bestemme optimalt vanninnhold (typisk 8-12 % for knust betong).
- Men stor nedkusing av materialet i Proctor-forsøket gir sannsynligvis feil maksimal densitet (referanseverdi for tørrdensitet). Denne bør derfor bestemmes ved vibrasjonsinnstamping.

Naturlig nok bør det også tas hensyn til den reduserte mekaniske styrken i forbindelse med utlegging. I de danske retningslinjene for bruk av knust tegl er bl a følgende tiltak nevnt for å hindre nedknusing;

- Grensekurver på korngraderingen (maks 6 % finstoff < 0,075 mm).
- Begrensninger i antall valseoverfarter.
- Rikelig vanning ved utlegging/komprimering (tørr tegl knuses mye lettere enn våt tegl).

4.2 Erfaringer når det gjelder testmetoder

Trykkfasthet

Det er litt delte meninger om hvor mye man skal vektlegge betongens trykkfasthet:

- Sammen med renhet er trykkfasthet valgt som hovedkriterium i de svenske retningslinjene, mens f eks Danmark har mindre tro på kjerneboring og trykkprøving som klassifiserings-grunnlag.
- Trykkfastheten regnes å kunne gi en ”pekepinn på funksjonelle egenskaper”.
- Det er en viss sammenheng mellom trykkfasthet før knusing og E-modul til knust masse, men ikke så god at man kan bestemme det ubundne betonglagets resilientmodul bare ut fra kjerneprøver.
- Det er heller ikke noen entydig sammenheng mellom trykkfasthet og motstand mot permanente deformasjoner, relasjonene er her avhengige av spenningsnivået.
- Det er delvis dårlig korrelasjon med kornform (flisighet) og mekanisk styrke (kulemolle).
- Fra Australia rapporteres det at kornformen synes å variere en del med trykkfastheten til betongen (hardere betong, høyere flisighet). Dette forholdet må tas i betraktning ved valg av knuseutstyr etc.

Kornform

Kornform kan generelt ha stor innvirkning på vegbyggingsmaterialer (kompakteringsegenskaper osv). Når det gjelder undersøkelser på knust betong og tegl er følgende rapportert:

- Høy flisighet synes generelt ikke å være noe problem. De aller fleste norske måleresultater ligger under $f = 1,4$.
- Resultater framkommet gjennom testing på en enkelt fraksjon bør ikke ”trekkes for langt” ved karakterisering av heterogene materialer som knust betong. Så langt som mulig bør man teste og vurdere materialet som en enhet.
- Tilråding; Flakiness Index er bedre enn flisighet.
- Fra Australia rapporteres at stivheten (E-modulen) til knust betong er svært avhengig av kornformen, særlig ved høye spenninger. Det gjør at man der har foreslått et strengere krav på kornformen for knust betong i forhold til naturmaterialer for å utnytte stivhetsegenskapene maksimalt;
Flakiness Index < 10 (normalverdi for vanlig tilslag er 35)

Fallprøve (sprøhet)

Erfaringer med bruk av fallprøven på knust betong viser bl a

- Ofte høye sprøhetstall, gjerne kombinert med høy pakningsgrad.
- Usikkert hvor godt resultatene gjenspeiler egenskapene for hele materialet, testen utføres på en kort/smål fraksjon.
- Kornformen har innvirkning på resultatene, jo rundere kornform jo bedre sprøhets-verdier. Materialhåndteringen vil dermed ha direkte innvirkning på resultatet.
- Sprøhet skiller dårlig mellom ulike fasthetsklasser for betongen. Tilslaget i betongen har stor innvirkning på resultatene.
- Sprøhetstesting av betong/tegl etter tradisjonelle metoder gir et resultat som egentlig er en blanding av slitastjemetstand og sprøhet. For å redusere ”slitasje-komponenten” bør

materialet siktes fram skånsomt (flere og mindre prøver, kort siktetid maks 5 min). Avsluttende sikting bør gjøres gjennom manuell våtsikting.

Dutch Static Compression Test

Denne testen har vært prøvd i forbindelse med Nordtest-prosjektene. Metoden skiller ulike betongkvaliteter minst like godt som Los Angeles, og vurderes som interessant. Men erfaringene er så langt svært begrenset, det mangler gode korrelasjoner til andre metoder og til felt, og metoden krever noe spesielt utstyr (kraftig trykkpresse m m). Nærmere innhenting av erfaringer fra Holland (som har lengre erfaringer både med metoden og betong/tegl-materialene) kan være aktuelt?

Los Angeles

Mange erfaringer er gjort med denne testen i ulike land. Konklusjonene når det gjelder bruk på betong/tegl/andre alternative materialer er mye de samme:

- Ofte høye verdier på knust betong, men metoden skiller noe bedre enn fallprøven (og andre "impact values"). Man ser bl a forskjeller mellom ren betong og blandede masser. Metoden kan kjøres på flere fraksjoner, nærmere opp til materialet som virkelig blir utlagt (Norge).
- Los Angeles-testen brukes for vurdering av kornstyrke og motstand mot nedknusing. I Danmark har man satt krav til til LA-verdier; eksempelvis $LA \leq 35$ for knust betong Kvalitet A. (Erfaringsverdier for knust betong generelt er $LA = 28-42$, for tegl $LA = 42-58$, for "standard dansk grus" $LA = 25$.)
- I denne testen knuses sementpastaen først, slik at det ved avsluttet forsøk er mer eller mindre ren stein igjen. Los Angeles skiller dermed lite mellom ulike betongkvaliteter, resultatene er mer avhengig av tilslagets egenskaper (Sverige).
- Los Angeles Abrasion Loss brukes til materialklassifisering også på resirkulert tilslag (USA). Typisk verdi for knust betong er 20-45 %, dette er hovedsakelig betong fra vegdekker. USA bruker Los Angeles-testen i en litt annen fraksjon (9,5-19 mm) enn CEN-standardens (10-14 mm).

Kulemølle

- Kravene for bære- og forsterkningslagsmaterialer i Sverige er knyttet opp mot denne testen (til tross for at det egentlig er en slitelagstest). Gjeldende krav: Mølleverdi < 30 .
- Men gode treks-resultater er oppnådd også på materialer med mølleverdi > 30 . Kulemølle-kriteriene kan man legge unødige begrensninger på bruken av de alternative materialene.
- De fleste kulemølleresultatene "faller utenfor skalen" etter norske retningslinjer ($M_v > 18$; "meget svak"). Metoden vurderes ikke å gi en representativ beskrivelse av de resirkulerte tilslagsmaterialene.

10 % fines

Denne testen er en avart av ACV (Aggregate crushing value). To kg av granulært material 10-14 mm utsettes for en statisk belastning i en trykkpresse. Ved bestemmelse av ACV er denne belastningen fast (400 kN i 10 min), og andel nedknust material som passerer 2.36 mm siktet gir ACV-verdien. I stedet for å måle hvor stor nedknusingen av materialet er etter en bestemt belastning, måler man i "10 % fines" hvor stor belastning som skal til for å gi 10 % nedknusing.

10 % fines-metoden er fremmed hos oss, men den brukes i en del andre land. Eksempelvis er det rapportert fra Australia at metoden skiller mellom ulike betongkvaliteter langt bedre enn Los Angeles og ACV, og at den har vist god korrelasjon mot betongens trykkfasthet.

Micro-Deval

Heller ikke denne metoden benyttes i Norge, men inngikk bl a i ALT-MAT-prosjektet. Metoden synes å skille ulike materialer noe bedre enn Los Angeles. Fra Danmark rapporteres det dessuten at testen er bedre enn Los Angeles til å vurdere materialenes ”slitasjemotstand” (fra gjentatte trafikkpåkjenninger).

Vibroboard

Metoden brukes for bestemmelse av optimalt vanninnhold og maksimal tørrdensitet (antatt å tilsvare en vibrasjonsvals i felt). Har også vært vurdert som testmetode, men standard-prosedyren er sannsynligvis ikke egnet til å klassifisere/måle mekanisk styrke. Metoden må eventuelt utprøves nærmere.

Gyratorisk kompaktor

Dette er egentlig et prøvetillagingsutstyr. Bruk av utstyret til vurdering av mekaniske egenskaper er foreløpig på forsøksstadiet, men fra flere hold rapporteres det at dette kan være en interessant anvendelse.

I Normin-prosjektet (Natvik) ble gyratorisk kompaktor (type ICT) utprøvd som alternativ test for bestemmelse av mekanisk styrke/motstand mot nedknusing. Resultatene var lovende:

- Materialene skiltes bedre ved gyrator enn ved standardtestene (Los Angeles, fallprøve, kulemølle). Metoden syntes mer følsom for små variasjoner i materialeegenskaper.
- Det ble påvist god sammenheng mellom laboratoriebestemt mekanisk styrke i ICT og registrert nedknusing i felt (spesielt for åpne graderinger). Det ble påvist langt dårligere/ingen sammenheng mellom Los Angeles og registrert nedknusing i felt.

Natvigs dr.ing-avhandling tok for seg naturlige tilslagsmaterialer av ulik kvalitet, men resultatene bør også være relevante med hensyn på gjenbruksmaterialer. Dette er også angitt i ALT-MAT (se eget avsnitt).

CBR

I USA vurderes California Bearing Ratio (CBR) fortsatt som en relevant test for å vurdere skjærstyrke og bæreevne i granulære materialer. Typiske verdier for knust betong oppgis å ligge i området 94-148 %.

Fra Chalmers i Sverige rapporteres det om CBR-verdier for knust betong i området 100-300, avhengig av karbonatiseringsgrad.

I forbindelse med Fornebu- og RiT 2000-prosjektene er det også utført noen CBR-forsøk. Litt avhengig av lagringstid for innstampede prøver før testing viser resultatene verdier på 25-95 (mix betong/tegl, RiT 2000) og 80-230 (ren betong, Fornebu).

Metoden synes med dette også å kunne fange opp tendensene til fasthetsutvikling over tid.

Forvittrings- og frostmotstand

I Norge er det foreløpig begrensede erfaringer med fryse-/tinetesting av gjenbruksmaterialer. I RESIBA er CEN-metoden 1367-1 ”Determination of resistance to freezing and thawing” utprøvd, det rapporteres om varierende resultater avhengig av sammensetning på materialene. Denne prosedyren er visstnok nå til diskusjon/revisjon, bl a foreligger en alternativ Nordtest-prosedyre med saltløsning.

USA med flere bruker ”Magnesium Sulfate Soundness Loss” (typiske verdier < 4 for grove partikler, < 9 for fine partikler). Denne fryse/tine-testen er ennå litt fremmed hos oss, men også den har blitt CEN-standard, NS-EN 1367-2.

Videre arbeid/mer kunnskap på dette området er viktig for å kunne foreskrive riktig bruk av materialene i overbygningen.

4.3 Relevans til feltforhold

Feltforsøkene som er omtalt i referanselisten gir alle indikasjoner på at knust betong (og tegl) vil oppføre seg langt bedre ute i en vegkonstruksjon enn det tradisjonell mekanisk testing av tilslaget tilsier.

På feltene som har ligget ute 1-2 år i Norge er det dokumentert:

- Høyere bæreevne
- Vesentlig økning i lag E-moduler
- Gunstig utvikling i spor/deformasjoner
- Ingen skader på overflaten
- Vesentlig høyere skjærstyrke målt med DCP
- Oppgraving viser liten nedknusing (små endringer i siktekurver)

Når det gjelder verktøy for å vurdere de funksjonelle egenskapene i forkant, har man etter hvert begynt å se på sammenhenger mellom mekanisk testing av tilslag, utvikling i felt (spor, bæreevne, E-moduler) og treaks-forsøk (stivhet, stabilitet). Dessuten har man begynt å se på etterherdings-prosessene (treaks-forsøk, CBR). Fornebu-prosjektet er kanskje blant de best dokumenterte i den sammenheng.

Ellers er det (bl a i Normin-prosjektet) påvist korrelasjoner mellom gyrator og nedknusing i felt (naturlige materialer), noe som gjør også denne metoden interessant.

I Sverige viser feltforsøkene gode resultater, funksjonell tilstand på parsellene med knust betong som bærelag/forsterkningslag er minst like bra som på referanseparsellene. Markant stivhetsøkning er målt på betonglagene (opp til en tredobling på 6 mnd, jfr også Fornebu). For å dra nytte av disse etterherdings-prosessene må man tilstrebe mest mulig rene materialer, forholdsvis tykke lag og god oppfukning. For øvrig savnes også i Sverige en metode for å teste/simulere disse prosessene på en god måte.

Av rapporterte oppgravingsforsøk framgår at det jevnt over ikke er påvist vesentlige forskjeller i kornsammensetning før og etter utlegging. Dette kan tyde på at materialene er mindre utsatt for nedknusing enn først antatt.

I Danmark er man litt usikker på hvordan materialer som knust tegl og betong oppfører seg i sterk kulde og ved store temperaturforskjeller. Det etterspørres testmetode(r) for funksjonsrettet frost-/ forvittrings-/bestandighetsprøving.

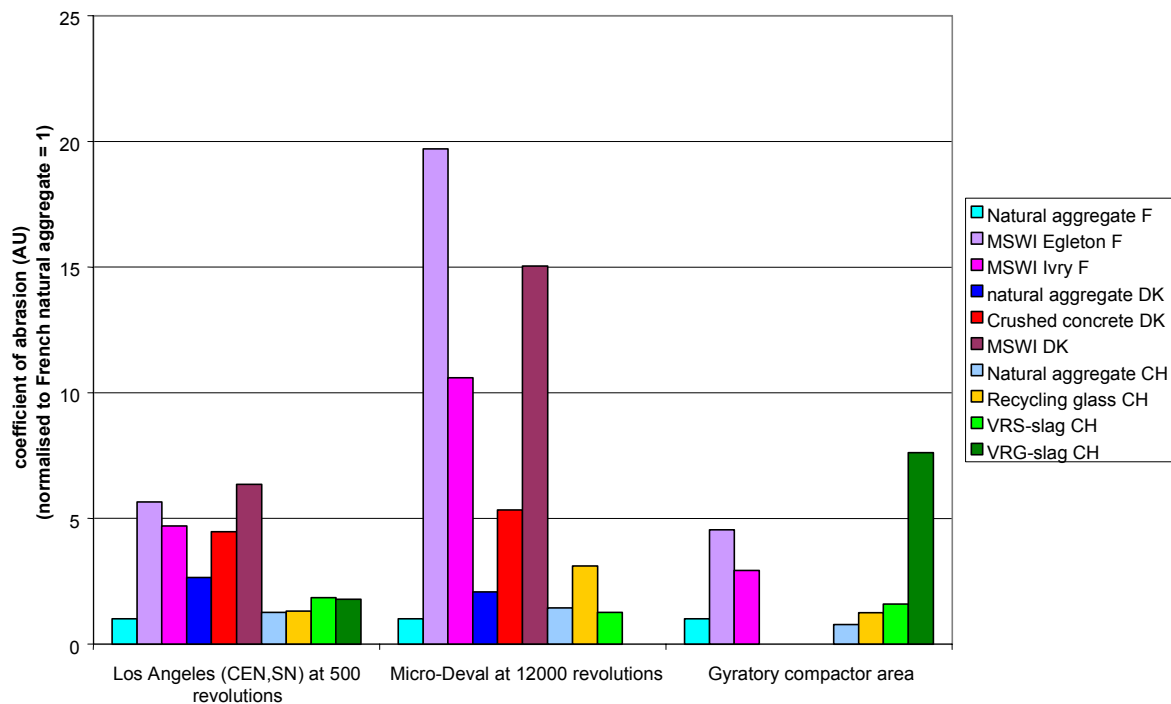
Dynamisk treaks trekkes av flere fram som en metode som korrelerer med materialets tenkte funksjon i felt, men at det her kreves mer forskning.

Flere av disse tingene er også anført i sluttrapporten fra ALT-MAT.

4.4 Hva fortalte ALT-MAT

Da ALT-MAT er det største prosjektet som har blitt kjørt på alternative overbygningsmaterialer er det naturlig nok interessant å se hvordan man her nå oppfatter status og hvordan man bør arbeide videre. ALT-MAT understreker at de følgende konklusjonene er basert på testing av et begrenset antall materialer, og derfor må leses med forsiktighet. For mer fullstendig og utfyllende informasjon henvises det til prosjektets sluttrapport [1].

- De tre metodene for “abrasive testing” (Los Angeles, Micro-Deval og Gyrator) rangerer materialene omtrent likt, jfr figur 4.1.
Bildet er litt uklart for middels harde materialer som knust betong. Los Angeles-resultater antyder at knust betong er å sammenligne med MSWI-aske, mens Micro-Deval viser at egenskapene er langt bedre.
- Testprosedyrene for Los Angeles og Micro-Deval må vurderes spesielt (antall rotasjoner). Naturmaterialene har et lineært forhold mellom slitasje og antall rotasjoner, det er ikke tilfelle for de alternative materialene. Disse har forholdsvis større slitasje og skiller bedre ved et mindre antall rotasjoner.
- Los Angeles-resultatene er i praksis de samme enten det kjøres ASTM- eller CEN-prosedyre.
- Micro-Deval synes å skille materialene best. Harde naturmaterialer får slitasjefaktor < 2, MSWI-aske ligger over 10, og knust betong ligger midt mellom.
- Gyratorisk kompaktor har vist lovende resultater. Metoden kan simulere valsing (stålvals), og kan dermed gi verdifull info om anleggsmessig og funksjonsmessig oppførsel i felt. Metoden bør prøves videre og prosedyren optimaliseres (arbeidstrykk, antall gyreringer etc.)



FIGUR 4.1 Sammenligning av Los Angeles, Micro-Deval og Gyrator (ALT-MAT)
(Referansemateriale er her naturlig tilslag fra Frankrike, med relativ slitasjefaktor satt lik 1. Data for de andre materialene er skalert lineært i forhold.)

- Vibrobord er en hensiktsmessig metode for laboratoriebestemmelse av referansedensitet (gjelder både naturmaterialer og alternative materialer). Prosedyren gir noe nedknusing for de svakeste gjenbruksmaterialene. Men metoden vurderes ikke som god nok for testing/evaluering av slitasjemotstand og nedknusing.
- Når det gjelder de svakeste materialene må spesiell oppmerksomhet vies til sikteprosedyrene. Langvarig eller kraftig skaking/risting kan forandre kornform m m og gi feilaktige resultater når materialene testes videre (fare for overvurdering?).

4.5 Aktuelle CEN-metoder

For gjenbruksmaterialer brukt i ubundet form har Rilem angitt følgende metoder som spesielt viktige/aktuelle:

TABELL 4.1 Relevante CEN-standarder for sekundære materialer, Rilem [10]

Test method	Reference
Resistance to fragmentation (Los Angeles)	EN 1097-2
Composition	<i>test required</i>
Particle density	prEN 1097-6
Grading	EN 933-1
Content of fines, sieve analysis	EN 933-1
Particle shape(Flakiness index)	EN 933-3
Freeze/thaw resistance (spørsmålstegn ved anvendelighet?)	prEN 1367-1
Resistance to wear (kule mølle)	EN 1097-9

Til sammenligning ser tilsvarende liste fra ALT-MAT ut som vist i tabell 4.2.

TABELL 4.2 Relevante CEN-standarder for sekundære materialer, ALT-MAT [1]

Test method	Reference
Methods for sampling	EN 932.1
Methods for reducing laboratory samples	EN 932.2
Determination of particle size distribution	EN 933.1
Determination of the resistance to wear (Micro-Deval)	EN 1097.1
Methods for the determination of resistance to fragmentation	EN 1097.2
Determination of water content by drying in a ventilated oven	EN 1097.5
Determination of particle density and water absorption	EN 1097.6
Method for determination of loss on ignition	EN 1744.1
One of the standards prEN 13286.2-13286.5 Test methods for laboratory reference density and water content:	
Standard proctor	prEN 13286.2
Vibrocompression with controlled parameters	prEN 13286.3
Vibrating hammer	prEN 13286.4
Vibrating table	prEN 13286.5

En mer fullstendig oversikt over metoder og vurderinger av disse er lagt ved i bilag 1.

4.6 Behov for videre arbeid

Et felles ankepunkt mot de fleste av de mekaniske testmetodene er at de er begrenset til én testfraksjon. Da det her er snakk om sammensatte/heterogene materialer er det et åpent spørsmål hvor godt en snever testfraksjon representerer materialet som helhet. Flere rapporter påpeker at metoder hvor materialet testes gjennom de enkelte partikler er mindre egnet for et ikke-homogent material som knust betong. Hvis materialet i tillegg må gjennomgå flere knusetrinn for å få fram testfraksjonene blir resultatene enda vanskeligere å vurdere.

For klassifisering og kvalitetsvurdering vil det beste være å komme fram til metoder hvor man tester det ferdige produkt i sin helhet. Ser man f eks på rapporterte treaks-forsøk på knuste

betongmaterialer oppviser disse gjerne minst like gode stivhetsegenskaper som standard tilslag, mens tradisjonelle mekaniske testmetoder underkjenner materialene.

Følgende punkter ble satt opp av ALT-MAT etter at man der hadde vurdert resultatene fra det prosjektet:

- Funksjonsrelaterte testmetoder må tas i bruk. Dagens testmetoder fanger bare opp deler av egenskapene, med den følge at noe neglisjeres og noe overestimeres. For å få et mer fullstendig bilde må hele lagpakken testes som en helhet. Treks og gyratorisk kompaktor er derfor metoder som må følges videre.
- Testmetoder for vurdering av aldring og langtidsstabilitet må utvikles. Enkelte alternative materialer kan gjennomgå kjemiske forandringer og endre egenskaper over tid ute på vegen som igjen kan føre til skader.
- En metode for mekanisk testing som ikke inneholder noen sikteprosess bør utvikles. Som nevnt kan utsikting være et forstyrrende element i vurderingen av de (svakere) alternative materialenes egenskaper.
- Det behøves bedre forståelse av fryse-/tinemotstand og undersøkelser rundt dette (partikler kontra massen som helhet).
- Testmetoder for å forutsi selvbinding/etterherding savnes. Dette gjelder i kanskje særlig grad for knust betong.
- Instruksjer/rutiner for materialbehandling, kompaktering osv må utarbeides og tilpasses det enkelte material. Fordi gjenbruksmaterialene er så følsomme for mekaniske påkjenninger, bør retningslinjene utformes slik at de ivaretar dette og sikrer at materialene legges ut på en optimal måte og gir en optimal konstruksjon.
Her ligger vel mye av utfordringen også for Gjenbruksprosjektet 2002-2005.

LITTERATURLISTE

- [1] Reid J.M. m fl: ***ALT-MAT Alternative materials in road construction - Final report***
Deliverable D7, Version 2.0, 8 January 2001
- [2] Reid J.M. m fl: ***ALT-MAT Study plan for test methodologies***
Deliverable D1, 31 July 1998
- [3] Reid J.M. m fl: ***ALT-MAT Literature review - Volume 1***
Deliverable D3, 5 February 1999
- [4] Raimbault G.: ***ALT-MAT Literature review - Volume 2: Description of moisture content and water movement in road pavements and embankments***
Deliverable D3, 5 February 1999
- [5] Reid J.M. m fl: ***ALT-MAT Literature review - Volume 3: National application tables***
Deliverable D3, 2 August 1999
- [6] Reid J.M. m fl: ***ALT-MAT Interim report - Volume 1***
Deliverable D4, 18 May 1999
- [7] Berg F. m fl: ***ALT-MAT Interim report - Volume 3: National reports on inspection of existing roads***
Deliverable D4, 3 June 1999
- [8] Nataatmadja A., Tan Y.L.: ***The performance of recycled crushed concrete aggregates***
Proceedings of the 5th International symposium on unbound aggregates in roads (UNBAR5), Nottingham 21-23 June 2000
- [9] Aurstad J., Uthus N.S.: ***Use of stockpiled asphalt and demolition debris in road construction in Norway***
Proceedings of the 5th International symposium on unbound aggregates in roads (UNBAR5), Nottingham 21-23 June 2000
- [10] Hendriks Ch.F., Pietersen H.S.: ***Sustainable Raw Materials - Construction and Demolition Waste***
RILEM Report 22 2000
- [11] Desmyter J., Vyncke J.: ***Use of Recycled Materials as Aggregates in the Construction Industry***
Proceedings 1st ETNRecy.net/RILEM Workshop, Paris 11-12 September 2000
- [12] ***User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction***
Turner-Fairbank Highway Research Center, Federal Highway Administration 2000
- [13] ***From Refuse to Reuse: Recycling and Reuse of Waste Materials and By-products in Transportation Infrastructure***
Transportation Research News No 184 May-June 1996
- [14] ***Recycled Materials Resource Center*** (University of New Hampshire)
Website: <http://www.rmrc.unh.edu>
- [15] Grönholm R.: ***Betong i vägar - förstudie***
Boverket 1998
- [16] Grönholm R.: ***Betong i vägar - krosstudie***
Boverket 1998
- [17] Grönholm R.: ***Betong i vägar - materialstudie***
Boverket 1998
- [18] Knutz Å. m fl.: ***Användning av restprodukter i vägbyggnad***
Vägverket Publikation 1999:161
- [19] Stenberg F., Schouenborg B.: ***Provningsmetoder anpassade för återvinningsmaterial - Kornstorleksfordeling***
SP Rapport 1997:08

- [20] Ewertson C., Schouenborg B., Aurstad J: **Provningsmetoder anpassade för återvinningsprodukter, del 2 - Sprødhed**
SP Rapport 2000:14
- [21] Schouenborg B., Andersson H., Arm M., Carling M.: **Alternativa material till vägunderbyggnad**
SP 1998 (Draft till slutrapport)
- [22] Höbeda P.: **Rapport från deltagande i 2nd SPRINT Workshop Alternative Materials in Road Construction Rotterdam 2-4 juni 1992**
VTI notat V185-1992)
- [23] Höbeda P.: **Återvinning av obundna och hydraulisk bundna material i vägbyggnad**
VTI notat 19-1996
- [24] Ydrevik K., Hellström V., Molin C.: **Krossad betong som vägbyggnadsmaterial**
VTI notat 46-1996
- [25] Ydrevik K.: **Krossad rivningsbetong som bær- og förstärkningslager i gatubyggnad**
VTI notat 54-1996
- [26] Ydrevik K.: **Återvägen - Råd og vägledning for återvinning av krossad betong som ballast i gator og vägar**
VTI notat 67-1999
- [27] Ydrevik K.: **Hållfasthetstillvæxt hos ballast av krossad betong**
VTI notat 69-2000
- [28] Karsson M.: **Application technology in recycling concrete**
Chalmers University of Technology, Göteborg 2000 (Publ. P-00:1)
- [29] Berg F., Milvang-Jensen O., Moltved N.: **Ubundne bærelag af knust tegl**
Statens Vejlaboratorium Rapport 71 1993
- [30] NVF udvalg 34: **Bæredygtig materiale - Anvendelse i vejkonstruksjoner**
Nordisk seminar København 11-12 oktober 1999
- [31] Faksdal I., Gundrosen J., Kveinå J., Nymark G.: **Gjenbruk av betong/tegl og glass til vegformål**
Hovedoppgave Anleggs- og byggelederskolen Statens vegvesen 1999/2000
- [32] Aurstad J.: **Nordtest-prosjekt: Prøving av knust betong**
SINTEF Notat datert 1999-03-19
- [33] Mehus J., Lahus O., Jacobsen S., Myhre Ø.: **Bruk av resirkulert tilslag i bygg og anlegg - status 2000**
BYGGFORSK Prosjektrapport 287-2000
- [34] Mehus J.: **Status RESIBA-prosjektet**
Konferansen "Stein i vei", Harstad 1-2 mars 2001
- [35] Aurstad J.: **Gjenbruk av masser på Fornebu - Forstudie forsøksveg Del A: Erfaringsinnsamling**
SINTEF Rapport STF22 A00454 (mai 2000)
- [36] Aurstad J.: **Gjenbruk av masser på Fornebu - Forstudie forsøksveg Del B: Etablering av forsøksveg**
SINTEF Rapport STF22 A00455 (mai 2000)
- [37] Hoff I.: **Treaksialtesting av gjenbruksmaterialer fra Fornebu**
SINTEF Notat datert 2000-08-24
- [38] Aurstad J.: **Oppfølging av forsøksveg på Fornebu oktober 1999-september 2000**
SINTEF Notat datert 2000-09-08
- [39] Aurstad J.: **Egenskaper for gjenbruksmasse - Forsøksfelt på Fornebu**
NADim seminar 7. desember 2000 (<http://www.norskasfaltforening.com>)
- [40] Aurstad J.: **Etterberegning av E-moduler fra falloddsundersøkelser**
SINTEF Notat datert 2000-12-01
- [41] Aurstad J.: **RIT 2000: Gjenbruk av knust betong - oppfølging av forsøksfelt, resultater**
SINTEF Notat datert 1999-08-16

- [42] Berg L.J.: ***Brukbarhet av gjenbruksmaterialer i vegbygging***
Hovedoppgave 2000, NTNU Institutt for veg- og jernbanebygging
- [43] Aurstad J.: ***Testing av knuste betongmaterialer fra RiT, trinn 1***
SINTEF Notat datert 1999-04-27
- [44] Aurstad J.: ***Testing av knuste betongmaterialer fra RiT, trinn 2***
SINTEF Notat datert 1999-08-20
- [45] Aurstad J.: ***RiT 2000: Oppfølging av forsøksfelt med gjenbruksmaterialer 1999-2000***
SINTEF Notat datert 2001-02-28
- [46] Natvik J.: ***Alternative testmetoder i undersøkelser av tilslagsmaterialer***
Doktor ingeniøravhandling 1998:27, Institutt for geologi og bergteknikk NTNU
- [47] Arm M.: ***Egenskaper hos alternativa ballastmaterial***
Licentiatavhandling Kungl Tekniska Högskolan, Stockholm 2002
- [48] Petkovic G., Lillestøl B.: ***Materialegenskaper for resirkulert tilslag***
RESIBA prosjektrapport 02/2002
- [49] Myhre Ø. m fl: ***Ubunden bruk av resirkulert tilslag i veger og plasser***
RESIBA prosjektrapport 05/2002
- [50] Aurstad J.: Gjenbruksmaterialer til vegbygging på Fornebu
SINTEF Rapport STF22 A02310 (april 2002)
- [51] Hoff I., Aurstad J.: ***Treksialtesting av gjenbruksmaterialer fra RiT***
SINTEF Notat datert 2002-04-30
- [52] Milvang-Jensen O., Pihl K.A., Berg F.: ***Ubundne bærelag af knust beton***
Vejdirektoratet, Vejteknisk Institut Rapport 113 2002

Bilag 1

ALT-MAT:

Overview and evaluation of mechanical laboratory tests

Overview and evaluation of mechanical laboratory tests

Test method title	European Standard no.	Technical relevance		Time consumption/ costs		Purpose		Remarks
		high	low	high	Low	Compliance testing	Basic characterisation	
Test for general properties of aggregates								
Methods for sampling	EN 932.1	x		x		x	x	
Methods for reducing laboratory samples	prEN 932.2	x			x	x	x	
Procedure and terminology for simplified petrographic description	EN 932.3		x		x		x	An improved method is needed for alternative materials
Common equipment and calibration	prEN 932.5) The methods are of general) relevance for laboratory) activities
Definitions of repeatability and reproducibility	prEN 932.6							
Tests for geometrical properties of aggregates								
Determination of particle size distribution - Sieving method	EN 933.1	x			x	x	X	
Determination of particle size distribution - test sieves, nominal size of apertures	EN 933.2							The methods are of general relevance for laboratory activities
Determination of particle shape - flakiness index	EN 933.3		x	x			x	Only relevant for aggregates for asphalt
Determination of particle shape - shape index	prEN 933.4		x	x			x	Only relevant for aggregates for asphalt
Assessment of surface characteristics - percentage of crushed and broken particles in coarse aggregate	EN 933.5		x	x			x	Only relevant for aggregates for asphalt and unbound bases
Determination of shell content - percentages of shells in coarse aggregate	prEN 933.7		x		x		x	
Assessment of fines - sand equivalent tests	prEN 933.8		x		x		x	
Assessment of fines - methylene blue test	EN 933.9		x		x		x	

Test method title	European Standard no.	Technical relevance		Time consumption/ costs		Purpose		Remarks
		high	low	high	Low	Compliance testing	Basic characterisation	
Tests for mechanical and physical properties of aggregates								
Determination of the resistance to wear (micro-Deval)	EN 1097.1	x		x		x	x	
Methods for the determination of resistance to fragmentation (Los Angeles)	EN 1097.2	x		x		x	x	
Determination of loose bulk density and voids	EN 1097.3		x		x	(x)	x	
Determination of void in dry compacted filler	prEN 1097.4		x		x		x	Only relevant for aggregates for asphalt
Determination of water content by drying in a ventilated oven	prEN 1097.5	x			x	x	x	
Determination of particle density and water absorption	prEN 1097.6	x		x			x	
Determination of particle density of filler - Pycnometer method	prEN 1097.7		x	x			x	
Determination of polished stone value	prEN 1097.8	x		x		x	x	Only relevant for aggregates for asphalt wearing courses
Method of determination of the resistance to wear by abrasion from studded tyres: Nordic test	EN 1097.9	x		x		x	x	Only relevant for aggregates for asphalt wearing courses
Tests for thermal and weathering properties of aggregates								
Determination of resistance to freezing & thawing	prEN 1367.1		x	x			x	
Magnesium sulphate test	EN 1367.2		x	x			x	
Determination of volume stability (Sonnenbrand)	prEN 1367.3							Only relevant for armour stones
Determination of drying shrinkage	EN 1367.4		x		x		x	
Determination of resistance to thermal shock	prEN1367.5							Only relevant for aggregates for asphalt

Test method title	European Standard no.	Technical relevance		Time consumption/ costs		Purpose		Remarks
		high	low	high	Low	Compliance testing	Basic characterisation	
Test for chemical properties of aggregates								
Methods for determination of chloride content	EN 1744.1		x		x	x	x	Only relevant for concrete
Methods for determination of acid soluble sulphate content	EN 1744.1		x		x	x	x	Only relevant for concrete
Method for determination of total sulphur content	EN 1744.1		x		x	x	x	Only relevant for concrete
Method for determination of impurities that affect setting and hardening of cement	EN 1744.1		x		X	x	x	Only relevant for concrete
Method for determination of impurities that affect surface finish	EN 1744.1		x	x	X	x	x	Only relevant for concrete
Method for determination of water solubility	EN 1744.1		x		X	x	x	Only relevant for concrete
Method for determination of loss on ignition	EN 1744.1	x			X		x	
Method for determination of slag unsoundness	EN 1744.1	x			X		x	
Method for determination of free lime	EN 1744.1		x	x			x	

Complementary test for unbound mixtures								
Test methods for laboratory reference density and water content - General	prEN 13286.1	x		x		x	x	
Test methods for laboratory reference density and water content - Standard proctor	prEN 13286.2	x		x		x	x	Not recommended for alternative materials
Test methods for laboratory reference density and water content - Vibrocompression with controlled parameters	prEN 13286.3	x		x		x	x	
Test methods for laboratory reference density and water content - Vibrating hammer	prEN 13286.4	x		x		x	x	Not recommended for alternative materials
Test methods for laboratory reference density and water content - Vibrating table	prEN 13286.5	x		x		x	x	



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:

- DP3-1 Uttesting av deklarasjonsordning
- DP3-2 Mekaniske egenskaper
- DP3-3 Kjemisk nedbrytning
- DP3-4 Frostnedbrytning
- DP3-5 Finstoffets betydning
- DP3-6 Bunden bruk
- DP3-7 Feltprøving

DP3-1 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.

DP3-6 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
Edgar Dønåsen, Veidekke ASA
Joralf Aurstad, Sintef
Brit Sylte, Statsbygg
Jacob Mehus, Norges byggforskningsinstitutt (NBI)
Jan Erik Dahlhaug, Statens vegvesen Region midt
Jostein Aksnes, Vegdirektoratet/Teknologiavdelingen
Øystein Myhre, Vegdirektoratet/Teknologiavdelingen
Gordana Petkovic, Vegdirektoratet/Teknologiavdelingen

VEDLEGG

GJENBRUKSPROSJEKTET



RAPPORTOVERSIKT PR. 28.02.2003, STATENS VEGVESENS GJENBRUKSPROSJEKT 2002-2005

Prosjekt-rapport nr.	Intern rapport nr. ¹⁾	Tittel	Delprosjekt	Dato	Utarbeidet av
1	2309	Gjenbruksprosjektet. Prosjektrapport nr 1: Gjenbruk av knust betong og tegl i vegbygging Testing av mekaniske egenskaper – Erfaringsinnsamling	DP3	Feb. 2003	Joralf Aurstad, SINTEF
2	2310	Gjenbruksprosjektet. Prosjektrapport nr 2: Bruk av bildekk i støyvoller – Livsløpsvurdering	DP2 / DP5	Feb. 2003	Karin Synnøve Østby, stud. techn. NTNU
3	2311	Gjenbruksprosjektet. Prosjektrapport nr 3: Forstudie av kjemisk nedbrytning av resirkulert tilslag	DP3	Feb. 2003	Janne Bakke Groth, stud. techn. NTNU

¹⁾ Teknologivdelingens rapportserie (internrapporter)