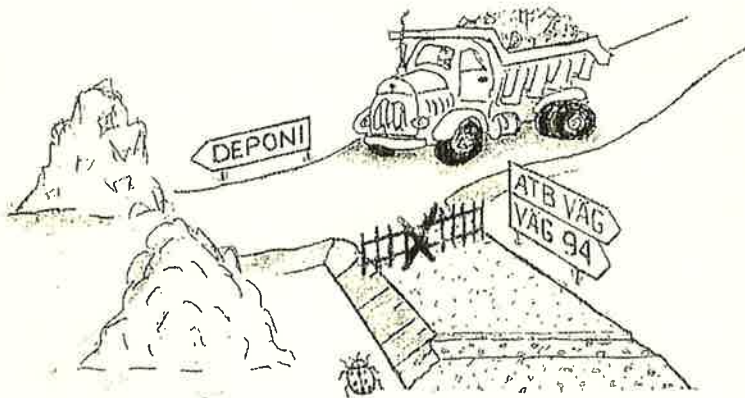




# Egenskaper hos alternativa ballastmaterial

– speciellt slaggrus, krossad betong och hyttsten

*Maria Arm*



Stockholm 2000



TRITA-AMI LIC 2063  
ISSN 1400-1292  
ISRN KTH/AMI/LIC 2063-SE  
ISBN 91-7283-017-4

Kungl Tekniska Högskolan  
Inst. för anläggning och miljö  
Avd. för mark- och vattenresurslära

---

# **Egenskaper hos alternativa ballastmaterial**

– speciellt slaggrus, krossad betong och hyttsten

*Maria Arm*

Licentiatavhandling  
Stockholm 2000



# Abstract

**Bakgrund:** När resurshushållning införs i vägbygget medför det bland annat att alternativa vägmaterier introduceras. Det innebär att konventionella ballastmaterial av sand, grus och krossat berg i vissa fall ersätts med återvunnet material eller restprodukter av olika slag. Bakgrunden till detta är ett antal politiska mål och styrmedel. Den nyligen introducerade avfallsskatten om 250 kr per ton deponerat avfall är ett exempel.

Varje år uppkommer ca 30 miljoner ton restprodukter i Sverige som är tänkbara som vägmaterier. För att de ska utgöra ett intressant alternativ måste de ha lämpliga tekniska egenskaper, ge en acceptabel miljöpåverkan samt innebära rimliga kostnader.

Nuvarande regler för användning av alternativa vägmaterier finns beskrivna i Vägverkets tekniska beskrivning för vägar, VÄG 94 som ersätts av ATB VÄG. Enligt dessa regler krävs bevis för att det alternativa materialet är likvärdigt med det material det ersätter i en standardkonstruktion. En annan möjlighet är att föreslå en alternativ konstruktion vars hållfasthet också ska bevisas.

**Problem:** För att kunna använda alternativa ballastmaterial rätt i vägbygget krävs kunskap om deras egenskaper. Även om kunskapen ökar varje år är den fortfarande bristfällig och framför allt dåligt spridd. **Syftet** med forskningsprojektet är att öka kunskapen om vilka egenskaper några utvalda alternativa ballastmaterial har. Förväntat resultat är ett underlag som gör det enklare att dimensionera vägar med dessa material.

**Avgränsning** har gjorts till alternativa material i *vägkonstruktioner* och där enbart i *obundna* lager, alltså inte i asfaltbundna eller cementbundna tillämpningar. Slaggrus, krossad betong och hyttsten har valts ut för närmare studier. *Slaggrus* är en restprodukt från sopförbränning. *Krossad betong* innebär dels rivningsbetong från rivning av byggnader och anläggningar, dels restbetong från betong- eller betongvaruproduktion. *Hyttsten* är en restprodukt från järnframställning. Alla tre restprodukterna används inom väg- och anläggningssammanhang i andra europeiska länder. Följande egenskaper har studerats: deformation vid belastning, hållfasthetstillväxt, beständighet mot mekanisk påverkan och klimatpåverkan, tjällyftningsbenägenhet, värmekonduktivitet och miljöpåverkan (utlakning).

**Resultatet** av arbetet redovisas i form av följande delområden: *Egenskaperna* och deras betydelse för funktionen hos ett obundet vägmaterier behandlas. För varje egenskap beskrivs också befintliga *provningmetoder*, både standardiserade och icke standardiserade. Diskussion kring lämpligheten hos de standardiserade provningmetoderna förs i vissa fall. Svenska och utländska *regler och erfarenheter* från användning av materialen beskrivs. (Danmark, Nederländerna, Finland och USA har studerats.) *Provningresultat* från provningar av de tre materialen presenteras, både resultat från egna undersökningar och från undersökningar beskrivna i litteraturen. Slutligen presenteras ett förslag till *metodik för att dimensionera* vägar utifrån vägmateriers olika förutsättningar. Dimensioneringsvillkor, provningmetoder och materialkaraktisering behandlas. Begreppet bärförmåga beskrivs och exemplifieras.



# Förord

Denna licentiatavhandling är en delredovisning av ett doktorandprojekt som startade 1997. Under perioden 1997–2000 har projektet samfinansierats av Kommunikationsforskningsberedningen (KFB), Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) samt Väg- och transportforskningsinstitutet (VTI). Projektet genomförs vid VTI i samarbete med Avdelningen för Mark- och vattenresurser vid institutionen för Anläggning och miljö på Kungliga Tekniska Högskolan (KTH).

Avhandlingen är skriven som en monografi enligt författarens eget önskemål. Den är dessutom skriven på svenska enligt finansiärernas uttryckliga önskemål med motiveringen att resultatet ska användas i Sverige. För att uppfylla andra eventuella önskemål innehåller rapporten dessutom en fyllig sammanfattning på engelska och två publicerade artiklar på engelska (bilaga 1 och 2).

Tyngdpunkten i rapporten ligger på de båda materialen slaggrus och krossad betong. Hyttsten kommer att studeras närmare i det fortsatta arbetet.

Observera att miljöpåverkande egenskaper inte har studerats speciellt inom detta projekt. Data till de delar av rapporten som behandlar miljöpåverkan från de studerade materialen har hämtats från publicerade forskningsrapporter samt studier utförda av Statens geotekniska institut (SGI) i Linköping.

## Läsanvisning

Rapporten är grupperad i sex delar som är betecknade med romerska siffror. Grupperingen är gjord för att undvika alltför många rubriknivåer. För att inte flera kapitel ska få samma nummer är kapitelnumreringen löpande igenom hela rapporten. Förhoppningsvis ska denna struktur göra det lätt för läsaren att hitta.

*Del I* – Introduktion – beskriver bakgrunden till projektet och syftet med arbetet. I denna del anges också vilka avgränsningar som har gjorts och vilket tillvägagångssätt som har använts för arbetet. *Del II* – Materialegenskaper och provningsmetoder – beskriver i tur och ordning de egenskaper som har studerats. Egenskaperna och deras betydelse för funktionen hos ett obundet vägmateriell beskrivs i denna del, men inte några provningsresultat. För varje egenskap beskrivs också befintliga provningsmetoder, både standardiserade och icke standardiserade. De metoder som nämns i senare kapitel finns beskrivna här. Diskussion kring lämpligheten hos de standardiserade provningsmetoderna förs i vissa fall, speciellt för restprodukter men också för övriga obundna material.

*Del III* – Regler och erfarenheter – beskriver regler och erfarenheter från användning av materialen i Danmark, Nederländerna, Finland och USA. Även tidigare användning i Sverige samt kommande inverkan från europaharmonisering behandlas. *Del IV* – Studerade materials egenskaper – presenterar provningsresultat från provningar av de tre materialen slaggrus, krossad betong och hyttsten. Både resultat från egna undersökningar och undersökningar beskrivna i litteraturen presenteras här.

*Del V* – Funktionsbaserad vägdimensionering – presenterar ett förslag till metodik för att dimensionera en väg utifrån vägmateriells olika förutsättningar. Dimensioneringsvillkor, provningsmetoder och materialkaraktisering behand-

las. Begreppet bärformåga beskrivs och exemplifieras. Del VI – Diskussion och slutsatser – innehåller diskussion av de funna resultaten samt slutsatser som kan dras av dessa. I denna del finns också förslag till fortsatt forskning inom området.

Den omfattande *referenslistan* ska förhoppningsvis vara till hjälp för de läsare som vill göra fortsatta studier inom ämnet. Till rapporten hör också tre bilagor. *Bilaga 1* är kopia på ett konferensbidrag som publicerats. *Bilaga 2* är kopia på en artikel som har godkänts för publicering i tidskriften *Waste Management*. *Bilaga 3* är en sammanställning av de avsnitt i VÄG 94 och ATB VÄG som behandlar användning av alternativa material eller restprodukter i obundna lager.

*Det är många som bidragit till denna licentiatavhandling. Jag vill här framföra ett stort TACK*

- \* *till min handledare Gert Knutsson, numera professor emeritus vid KTH Mark- och vattenresurser, som med tålamod och positiv inställning lotsat mig fram till slutresultatet.*
- \* *till min projektledare Hans G Johansson (VTI), som skapat värdefulla kontakter och fört hem intressanta rapporter från sina resor i andra länder.*
- \* *till Mats Bjelkevik och Per-Ola Jönsson (Skanska Sverige AB) som deltagit aktivt i styrgruppen.*
- \* *till Håkan Arvidsson (VTI) som utfört de flesta laboratorieanalyserna.*
- \* *till Ankica Martic, Jörgen Svensson och Anders Swenson (samtliga VTI) samt Jim Bengtsson (Skanska Sverige AB) och Britt Aurell (SGI) som också deltagit i projektet med laboratorie- eller fältmätningar.*
- \* *till Håkan Carlsson, Peet Höbeda, Anita Ihs, Håkan Jansson och Krister Ydrevik (samtliga VTI), Maria Carling, Ann-Marie Fällman, Karsten Håkansson och Ingrid Wetterlöv (samtliga SGI), Raul Grönholm (SYSAV), Christer Hagert (Vägverket), Knud Pihl (Vejdirektoratet, Danmark) och Margaretha Wahlström (VTT, Finland) som försett mig med data och andra uppgifter på olika sätt.*
- \* *till personalen på VTI:s bibliotek som försett mig med all tänkbar litteratur.*
- \* *till Lewis Gruber som hjälpt mig med den engelska sammanfattningen.*
- \* *till Scandiaconsult och Ingenjörsvetenskapsakademien som gav mig 1/15 av Sigge Thernwalls pris 1997. Ett stipendium som jag använde till mina studieresor.*
- \* *till alla kollegor för uppmuntran och stöd, speciellt Jörgen, Krister, Peet, Lennart, Klas och Leif som ställt upp som tålmodiga bollplank under arbetets gång.*
- \* *och till Tommy som stöttat och stått ut.*

*Linköping i november 2000*

*Maria Arm*



# Innehåll

<b>SUMMARY</b> .....	<b>1</b>
<b>I INTRODUKTION</b> .....	<b>32</b>
<b>1 Bakgrund och problembeskrivning</b> .....	<b>33</b>
<b>2 Syfte och avgränsningar</b> .....	<b>36</b>
2.1 Användningsområden .....	36
2.2 Material .....	37
2.3 Egenskaper .....	40
<b>3 Metodik för genomförandet</b> .....	<b>41</b>
3.1 Kunskapsinhämtning .....	41
3.2 Kunskapsluckor som identifierats .....	42
3.3 Experimentellt arbete .....	43
3.4 Kunskapsspridning .....	44
<b>II MATERIALEGENSKAPER OCH PROVNINGSMETODER</b> .....	<b>48</b>
<b>4 Deformation vid belastning</b> .....	<b>49</b>
4.1 Provningsmetoder .....	49
4.1.1 Belastning i laboratorium .....	50
4.1.2 Belastning i fält .....	55
4.1.3 Indirekta metoder .....	61
<b>5 Hållfasthetstillväxt</b> .....	<b>62</b>
5.1 Hållfasthetstillväxt i krossad betong .....	62
5.1.1 Karbonatisering av betongkonstruktioner .....	63
5.1.2 Karbonatisering/kalkutfällning i lager av krossad betong .....	64
5.2 Provningsmetoder .....	67
<b>6 Organisk halt</b> .....	<b>67</b>
6.1 Provningsmetoder .....	67
<b>7 Beständighet</b> .....	<b>70</b>
7.1 Beständighet mot mekanisk påverkan .....	70
7.1.1 Traditionella provningsmetoder .....	70
7.1.2 Alternativa provningsmetoder .....	74
7.1.3 Jämförelse mellan provningsmetoder .....	79
7.2 Beständighet mot klimatpåverkan .....	81
7.2.1 Provningsmetoder .....	81
7.2.2 Jämförelse mellan provningsmetoder .....	83
<b>8 Permeabilitet</b> .....	<b>84</b>
<b>9 Tjällyftningsbenägenhet</b> .....	<b>85</b>
9.1 Provningsmetoder i laboratorium .....	87
9.2 Mätning av tjällyftning i fält .....	90
<b>10 Värmekonduktivitet</b> .....	<b>91</b>
10.1 Provningsmetoder .....	92
<b>11 Miljöpåverkan (utlakning)</b> .....	<b>96</b>
11.1 Provningsmetoder i laboratorium .....	100
11.2 Fullskaleförsök .....	106
11.3 Värdering av lakningsresultat .....	108
11.4 Slutsatser – miljöpåverkan .....	112

<b>III</b>	<b>REGLER OCH ERFARENHETER .....</b>	<b>114</b>
	<b>12 Utländska regler och erfarenheter .....</b>	<b>115</b>
	12.1 Danmark .....	115
	12.2 Nederländerna .....	121
	12.3 Finland .....	127
	12.4 USA .....	131
	<b>13 Europaharmonisering.....</b>	<b>133</b>
	<b>14 Svenska erfarenheter .....</b>	<b>135</b>
<b>IV</b>	<b>STUDERADE MATERIALS EGENSKAPER.....</b>	<b>140</b>
	<b>15 Slaggrus .....</b>	<b>141</b>
	15.1 Faktorer som påverkar slaggrusets egenskaper .....	141
	15.1.1 Avfallets innehåll och homogenitet .....	141
	15.1.2 Förbränningsprocessen .....	143
	15.1.3 Efterbehandling.....	148
	15.2 Deformation vid belastning .....	151
	15.2.1 Deformation vid statisk belastning .....	151
	15.2.2 Deformation vid dynamisk belastning i laboratorium .....	152
	15.2.3 Deformation vid dynamisk belastning i fält.....	161
	15.3 Hållfasthetstillväxt .....	163
	15.4 Beständighet.....	165
	15.5 Vattenabsorption och permeabilitet .....	168
	15.6 Tjällyftningsbenägenhet.....	169
	15.7 Värmekonduktivitet .....	169
	15.8 Miljöpåverkan.....	173
	15.8.1 Kemisk sammansättning ("totalhalter") .....	173
	15.8.2 Lakningsegenskaper i laboratorium .....	175
	15.8.3 Lakningsegenskaper i fält .....	176
	15.8.4 Jämförelser med bakgrundshalter .....	177
	15.9 Sammanfattning – slaggrus .....	177
	<b>16 Krossad betong .....</b>	<b>181</b>
	16.1 Faktorer som påverkar den krossade betongens egenskaper.....	181
	16.1.1 Ursprunglig betong.....	181
	16.1.2 Ursprungsmiljö.....	183
	16.1.3 Renhet .....	185
	16.2 Deformation vid belastning .....	188
	16.2.1 Deformation vid statisk belastning .....	188
	16.2.2 Deformation vid dynamisk belastning i laboratorium .....	189
	16.2.3 Deformation vid dynamisk belastning i fält.....	196
	16.3 Hållfasthetstillväxt .....	198
	16.3.1 Utländska undersökningar .....	198
	16.3.2 Undersökningar vid VTI .....	205
	16.3.3 Diskussion – hållfasthetstillväxt hos krossad betong .....	212
	16.4 Beständighet.....	214
	16.4.1 Beständighet mot mekanisk påverkan .....	214
	16.4.2 Beständighet mot klimatpåverkan.....	218
	16.5 Vattenabsorption och permeabilitet .....	220
	16.6 Tjällyftningsbenägenhet.....	221
	16.7 Värmekonduktivitet .....	223

16.8	Miljöpåverkan.....	224
16.8.1	Kemisk sammansättning ("totalhalter").....	225
16.8.2	Lakningsegenskaper i laboratorium.....	230
16.8.3	Lakningsegenskaper i fält.....	233
16.8.4	Jämförelse mellan laborativärden och fältvärden.....	235
16.9	Sammanfattning – krossad betong.....	236
<b>17</b>	<b>Hyttsten</b> .....	<b>239</b>
17.1	Faktorer som påverkar hyttstenens egenskaper.....	239
17.2	Deformation vid belastning.....	240
17.3	Hållfasthetstillväxt.....	241
17.4	Beständighet.....	241
17.5	Tjällyftningsbenägenhet.....	241
17.6	Värmekonduktivitet.....	242
17.7	Miljöpåverkan.....	242
17.8	Sammanfattning – hyttsten.....	244
<b>V</b>	<b>FUNKTIONSBASERAD VÄGDIMENSIONERING</b> .....	<b>248</b>
<b>18</b>	<b>Förslag till metodik</b> .....	<b>249</b>
18.1	Deformationsvillkor.....	249
18.1.1	Viktiga parametrar.....	249
18.2	Nya provningsmetoder.....	251
18.3	Förslag till ny materialkarakterisering.....	252
18.3.1	Bedömning av bärförmåga.....	253
18.3.2	Praktisk användning av begreppet bärförmåga.....	254
<b>VI</b>	<b>DISKUSSION OCH SLUTSATSER</b> .....	<b>262</b>
<b>19</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>263</b>
19.1	Slaggrus.....	263
19.2	Krossad betong.....	265
19.3	Hyttsten.....	266
19.4	Provningsmetoders lämplighet – gränsvärden.....	266
19.5	Dimensionering – Materialkarakterisering – Produktcertifiering...	269
<b>20</b>	<b>Slutsatser</b> .....	<b>270</b>
<b>21</b>	<b>Förslag till fortsatt forskning</b> .....	<b>272</b>
<b>22</b>	<b>REFERENSER</b> .....	<b>273</b>
<b>BILAGOR</b>		
Bilaga 1:	Variation in mechanical properties of MSW incinerator bottom ash. ...	293
Bilaga 2:	Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests. ....	307
Bilaga 3:	VÄG 94:s och ATB VÄG:s föreskrifter om användning av restprodukter i obundna lager.....	317
<b>Sökordsregister</b> .....		<b>329</b>



# Summary

This licentiate thesis is entitled "The properties of alternative aggregate materials – with special reference to MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag". It is the first part of a Ph.D. project that is being carried out at VTI in collaboration with the Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology (KTH).

The Swedish Transport and Communications Research Board (KFB), the Development Fund of the Swedish Construction Industry (SBUF) and the Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI) provided funding of the project.

The main emphasis in this report is put on MSWI bottom ash and crushed concrete, while blast furnace slag will be studied in greater detail in the continued work on this project.

Note that environmental impact has not been studied particularly within the project. Data to those part of the report that deal with environmental impact from the materials studied have been taken from international research reports and studies performed at the Swedish geotechnical institute, SGI, Linköping.

## I Introduction

**Background and problems:** Every year, about 75 million tonnes of aggregate material are used in Sweden. The road construction industry is responsible for about half of this. When economic management of resources was commenced in road construction, it resulted in the introduction of alternative aggregate materials such as recycled material or residual products of different kinds. The background to this comprises a number of political goals and control instruments. The recently introduced waste tax of SEK 250 per tonne of waste deposited on landfill sites is one example.

About 30 million tonnes of residual products, which can possibly be used as road materials arise annually. In order that they should be an interesting alternative to conventional road materials such as sand, gravel and crushed rock, they must have suitable engineering properties, have an acceptable environmental impact, and their cost should be reasonable.

The present regulations for the use of alternative road materials in unbound layers are set out in the Swedish Road Administration technical specifications for roads, VÄG 94 and ATB VÄG. According to these regulations, evidence is required that the alternative material is equivalent to the material it replaces in a standard construction. Another possibility is to propose an alternative design whose strength must also be demonstrated. The same test methods and limit values thus apply for all unbound materials. The difficulty is that, for a number of properties, no methods or limit values are specified. This applies for e.g. bearing capacity, stability, strength, resistance to climatic action, resistance to chemical action, and environmental impact.

In order that alternative aggregate materials should be used correctly in road construction, it is necessary to know their properties. Research is in progress in many places, but knowledge is still inadequate and, most of all, it is inadequately disseminated.

**The object** of this research project is to increase knowledge of the properties of some selected alternative aggregate materials. It is expected that the results will form a basis for easier design of roads with these materials.

The project has been **limited** to alternative materials in *road construction* and only in *unbound layers*, i.e. it does not refer to bitumen or cement stabilised applications.

The materials selected for detailed studies are MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag. *MSWI bottom ash* is the waste management industry's product name for sieved and aged bottom ash from waste incinerator plants. The term *crushed concrete* refers to both concrete from the demolition of buildings and installations and to residues from the production of concrete or concrete products. *Blast furnace slag* is air-cooled slag from blast furnaces. These materials have been selected in view of their expected scope of application, available quantities and accessibility over the whole country, and the wishes of the users. All three residual products are used in road and civil engineering construction in other European countries.

The following properties have been studied:

- *deformation on loading*
- *strength development*
- *resistance to mechanical and climatic action*
- *susceptibility to frost heave*
- *thermal conductivity, and*
- *environmental impact (leaching)*

The **methodology** employed can be described as follows: Information was collected through studies of the literature and study visits. Previous Swedish experiences were evaluated and foreign experiences translated, which identified the areas where there was a lack of knowledge. Experimental work was carried out by investigating an old test road, planning and evaluating new field tests, and planning and evaluating new laboratory experiments. Finally, knowledge was disseminated in the form of lectures and publications.

**Results** in this report are presented separately for different areas. Part I contains this *introduction*. Part II describes *properties* and their importance for the function of an unbound road material. The existing *test methods*, both standardised and non-standardised ones, are also described for each of these properties. In some cases the suitability of the standardised test methods is discussed.

Part III describes the *regulations and experiences* relating to the use of these materials in Denmark, the Netherlands, Finland and USA. Former use in Sweden and the future impact of European harmonisation are also discussed.

Part IV sets out the *test results* for these three materials, both from investigations within this project and from investigations described in the literature.

Finally, Part V presents a proposal for a *design method* for roads, based on the different properties of the road materials. Design conditions, test methods

and material characterisation are discussed. The concept of bearing capacity is described and exemplified.

## II Material properties and test methods

This section describes the properties of an unbound road material and their significance for the function of this material, as well as existing test methods and their suitability.

### Deformation on loading

The amount by which a material is deformed when loaded depends on its stiffness and stability. *Stiffness*, or the ability to spread the load, is a measure of the resistance to elastic deformation, and is expressed in terms of a modulus of elasticity or resilience that is used in designing the pavement. *Stability* is a measure of the ability to resist permanent deformation. Another term is *bearing capacity*. This is defined here as the load, which a layer of material can carry without being deformed more than the permissible amount. Determination of the bearing capacity thus requires a limiting value of deformation.

These three properties are indirectly dependent on the maximum particle size, fines content, particle size distribution, particle shape and organic matter content. In order that the deformation properties should *remain the same* over the life of the road, the particle size and particle shape must not change, i.e. the material must be resistant to both mechanical and climatic action.

A large number of methods have been developed for measuring the deformation properties of a material under load. A well-known laboratory method is the CBR (*California Bearing Ratio*) method that is widely used in other countries but is not applied in Sweden. It is intended for testing subsoil material comprising particles of 19 mm maximum size.

A more recent method is the *cyclic load triaxial test*, which is used increasingly especially in the context of performance testing. It is based on the principle that the entire material, up to a certain particle size, e.g. 64 mm, is exposed to a simulated traffic load and the deformation is recorded. The way new materials can be evaluated with the cyclic load triaxial test by comparing them with well-known materials is shown in this project. The possibility of comparing permissible loading with calculated actual loading is also demonstrated.

The *static plate bearing test* and test loading with a *falling weight deflectometer* are well-known and standardised field methods in Sweden and several other countries. Neither of these can be used on weak subsoil, such as a soft fine-grained material. The first can measure the results of compaction but cannot locate weak layers in the road pavement at a later date. The latter works well on constructions comprising alternative materials.

There is also other field equipment that can be used during construction to assess the bearing capacity achieved. These are *dynamic cone penetrometer DCP*, as well as a number of *mini falling weight deflectometers* of different makes.

Apart from these direct loading methods there are some *indirect methods* such as the sand equivalent test and the methylene blue test. These are used in other countries, for example in Denmark, to assess the properties of fine-grained materials, and are also covered by European standards. These methods are intended for clayey materials and are therefore, according to several sources, unsuitable for alternative aggregates such as MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag.

## Strength development

In some materials, deformation properties are not constant over time, and an increase in stiffness due to chemical binding reactions can be expected. This applies for pozzolanic materials and for hydraulic and non-hydraulic binders. A hydraulic binder such as Portland cement hardens through reaction with water into a product that is resistant to water. Hardening occurs in both the air and water. On the other hand, a *non-hydraulic binder* reacts with water but does not harden under water. Lime, CaO, which is an example of such a material, requires atmospheric carbon dioxide to harden.

Strength development has been noted in layers of crushed concrete, blast furnace slag and MSWI bottom ash. This report discusses the phenomenon in crushed concrete. Strength development in the other two materials will be studied in the continuation of this project.

The cause of strength development in a layer of compacted crushed concrete is that the *calcium hydroxide* that is formed during original hydration is first dissolved and then precipitates as hard calcium carbonate. Calcium hydroxide readily dissolves in rain or on wetting, and forms *calcareous water* that has a high concentration of calcium and hydroxide ions. When this water comes into contact with atmospheric *carbon dioxide*, *calcium carbonate* is precipitated. This reaction is called carbonation.

In order that strength development should proceed rapidly, the concrete should not have undergone major carbonation earlier, either when it was part of a concrete structure or when it was stockpiled as crushed material. The calcium carbonate formed during carbonation is almost insoluble and retards further reactions.

The factors that influence strength development are the composition, compaction and curing of the original concrete, the environment of the original concrete construction and the storage site of the crushed concrete (carbon dioxide concentration and humidity). In the completed layer of crushed concrete the dissolution and precipitation of lime are affected by the period of contact between water and the concrete material and by the particle surfaces, i.e. the *particle size distribution* of the material is very significant.

Carbonation in an existing concrete structure can be measured by a phenolphthalein test. Strength development in a crushed material can be determined by measuring the stiffness when the material is fresh and subsequently after different periods, either in the laboratory or in the field. In order that strength development may be predicted, some form of accelerated testing that can give an in-



dication of the ultimate strength value in a relatively short time would be desirable.

## Organic matter content

Organic matter has a *deleterious effect* on the deformation properties of an unbound road material. Sweden and a lot of other countries have therefore limited the permissible organic matter content of road materials. VÄG 94, for example, limits the content in all pavement materials and in fill situated within 1 m from the formation level. If cement bound layers are used in the pavement, the limit applies within 2 m from formation level. The requirement in VÄG 94 is expressed as not more than 2% organic matter measured with the colorimeter method.

There are several methods to determine the organic matter content of a material, e.g. the loss on ignition method, colorimetric measurement and determination of total organic carbon TOC. The most usual method is the loss on ignition method. It is essential to record the temperature used. Note also that *the different test methods yield different results*. Colorimetric measurement generally gives a lower content than the loss on ignition method. Investigations within this project have revealed large differences between the results given by these methods, and suggest that the loss on ignition method is not suitable for MSWI bottom ash or crushed concrete, since some inorganic matter may also be lost.

## Resistance to mechanical action

It is important for unbound materials to have resistance to mechanical action since they are exposed to mechanical action all the time they are handled (loading, unloading, spreading, compaction and construction traffic). Final traffic also has an action, but this is very slight if the road is properly designed.

This property is a function of the particle strength which, in turn, depends on the geometrical shape, mineral composition and mineral cohesion, structure and texture of the particle. In a *layer* of unbound materials, the contact between the particles, e.g. the degree of compaction of the material, which, in turn, depends on particle size distribution, and so on, also has an influence.

The Swedish *standard methods* in this field produce different types of mechanical action. Tests in a ball mill and Los Angeles drum produces a combination of abrasion and crushing, while a micro-Deval test causes only abrasion. An impact test determines impact strength.

Other methods have been developed in different countries and are standardised there. In the USA, for example, there are five versions of the Los Angeles test depending on the fraction being tested. In Britain there is the Aggregate Abrasion Value that measures abrasion resistance, Aggregate Impact Value that measures impact strength, and Aggregate Crushing Value and Ten Per Cent Fines Value, both of which measure resistance to pressure. In Germany there is the Schlagversuch which forms the basis of the European standard for Impact Test.

All the standard methods now in use study the resistance of the *individual particle* instead of the resistance of a layer of unbound materials. In recent times a search has started for new methods. Some *alternatives* to the traditional methods are *gyratory compaction*, the *Icelandic Bg index* and the *wet abrasion test in a rotary attrition apparatus*. These methods are interesting since a large portion or even *the whole of the unbound material* is used in the test. Further development is needed to find methods that do not involve sieve analysis, since this in itself can cause degradation of weak materials.

## Resistance to climatic action

The term climatic action is used here to denote temperature alternations. Resistance to temperature alternations or freeze–thaw resistance is an important property of materials that may be expected to freeze and thaw repeatedly under wholly or partly saturated conditions.

Degradation owing to poor freeze–thaw resistance occurs because the volume of water which has penetrated into the pores increases by about 10% when it freezes, which gives rise to high stresses that break up the particle of aggregate. The risk of damage increases if salt is present, since salt reduces the surface tension of water and makes it easier for water to penetrate into small pores. Freeze–thaw resistance is dependent on the strength of the particle and on the number of pores and the sizes of pores inside the particles. Note, however, that it is only the pores accessible to water, which participate in this process. A porous material does not therefore automatically have a low freeze–thaw resistance.

Direct tests for resistance to climatic action make use of *freeze–thaw tests with water*, with or without salt, or *tests with magnesium sulphate*. The indirect methods used are *petrographic analysis* and *water absorption tests*.

In freeze–thaw tests and tests with magnesium sulphate, degradation in many alternative materials, owing to their porous nature, is greater than in most Swedish natural materials. The same difference has not yet been demonstrated in the field. The intention in European harmonisation work is to obtain more information on the applicability of freeze–thaw tests for alternative aggregate materials.

## Permeability

Permeability or hydraulic conductivity,  $k$ , indicates the permeability of a material to water. This property is *important for the choice of drainage method and in assessing frost susceptibility and the rate of leaching*.

Permeability is affected by particle size distribution, mineral composition, particle shape and texture, pore volume and degree of saturation. The properties of water, such as its temperature and viscosity, and the type of flow, also play a part. The cementing properties of some residual products must also be borne in mind.

Different types of equipment are used in measuring permeability, depending on the expected results. In the laboratory a cell permeameter is suitable for self-

hardening materials, and a tube permeameter for granular materials. In the field, infiltrometers and piezometers are used.

## Susceptibility to frost heave

As a material susceptible to frost heave freezes, it absorbs water and thus undergoes large volumetric expansion; this raises the surface of the soil or the road. When the material thaws, water is released in large quantities. This type of freezing is heterogeneous, which means that water is drawn to the freezing zone by capillary flow. In homogeneous freezing, on the other hand, only the existing water freezes and the effect is much less serious.

Whether freezing will be heterogeneous or homogeneous is determined by the particle size of the material, the rate of freezing, the pressure due to the load, and water conditions.

Materials susceptible to frost heave are not permitted in road pavements since uneven heave can cause cracking in bound layers higher up, and the excess of water reduces bearing capacity unless it can be drained off quickly.

In the laboratory, susceptibility to frost heave is determined by *freezing tests* in which a material is subjected to freezing and the rise in its level is recorded. Determination by *indirect methods*, i.e. via capillarity, is however most common. Most countries therefore specify indirect requirements concerning fines content and the plasticity of the fine fraction, instead of direct tests for frost heave.

There is no field method for measuring the frost heave susceptibility of a material. The frost heave that occurs can however be measured. Apart from the simplest method, which is manual levelling of the ground surface, there is equipment that is mounted in the road and continuously measures frost depth, frost heave and groundwater level.

## Thermal conductivity

Thermal conductivity is the measure of the ability of a material to transfer heat. Since air and water have much lower thermal conductivity than mineral particles, water ratio and relative density are of great importance for the thermal conductivity of an unbound material layer. The mineral content, primarily the quartz content, of the material is also very significant.

A material of low thermal conductivity acts as insulation, which is both advantageous and disadvantageous in a road construction. On the one hand, an insulating material can be used to reduce frost depth. On the other hand, an insulating material prevents soil heat from warming the road surface, which can give rise to slippery conditions. The regulations of the Swedish Road Administration therefore limit the use of materials of low thermal conductivity in the pavements of paved roads. Materials with a thermal conductivity  $\lambda$  less than 0.6 W/m°C must therefore be placed not less than 25 cm below the road surface, and materials with  $\lambda$  lower than 0.3 W/m°C not less than 50 cm below the road surface. These values hold for dry materials.

The most usual way of measuring thermal conductivity in soil is the *probe method*, which can be used in both the laboratory and the field. For solid materials thermal conductivity can be determined in the laboratory using a *guarded hot plate apparatus*. This can also be used for granular materials, provided that the particle size is not too great in relation to the thickness of the sample.

Thermal conductivity is significant with regard to frost penetration in a material. Mounting a *frost penetration meter* in a road construction can therefore be seen as an indirect way of measuring the thermal conductivity of the constituent materials.

## Environmental impact

The term environmental impact implies that the road material, which is incorporated in the road pavement, disintegrates or reacts with water so that some environmentally harmful substances are leached out. These substances may subsequently, through percolation or the flow of water, be transported to the groundwater table or to surface water.

There are *several factors that influence the leaching* and spreading of a certain substance. The quantity leached depends on the total concentration of the substance concerned, the solubility or availability of the substance, and water circulation. The solubility of many metals depends on the pH value of water, and the solubility of some metals also depends on the redox conditions in the soil. The particle size of residual products determines the specific surface from which the substance can leach out. The spread of the substance is influenced by the hydraulic conductivity of the residual product and the surrounding soil, the reduction or buffer capacity of the surrounding soil, and the distance to the groundwater table.

The *substances* that are of interest in relation to leaching are heavy metals, salts and a number of organic compounds. The salts concerned are mainly chlorides, sulphates and sodium. Organic compounds that are of interest are aromatic, polyaromatic and chlorinated hydrocarbons, as well as pesticides. The concentration of the following heavy metals is usually investigated: arsenic, mercury, cadmium, nickel, chromium, lead, copper and zinc. The toxicity of heavy metals is due to the fact that they compete with lighter trace elements, which form part of enzymes or activate enzymes.

The *chemical composition* of a material is usually determined by melting and dissolving it in different chemicals and then analysing it using the ICP (inductive coupled plasma) technique. This yields the total content of different substances.

The leaching properties of a material can be determined in both the laboratory and the field. A large number of leaching tests has been developed, and comprehensive work is at present in progress to try and harmonise these methods inside Europe. The existing methods can be grouped in different fields of application. The available quantity, i.e. the *potentially leachable quantity*, is determined in the laboratory with availability tests. The *time scale* of the leaching process, which is a function of water circulation, is studied in the laboratory with column

tests or in the field by means of lysimeter tests. The *pH dependence* of leaching is investigated using the pH-static test. In continuous *quality control* a two-stage control test can be employed. It is a common feature of all these laboratory methods that *sampling and sample preparation are very significant* for the results since the samples to be analysed are very small.

### III Regulations and experiences

The regulations and the experiences gained from the use of these materials in Denmark, Netherlands, Finland and USA are described in this section. Former use in Sweden and the future effect of European harmonisation are also discussed.

#### Regulations and experiences abroad

The four countries that are represented have either long experience in this field or have been judged capable of contributing with special knowledge regarding the properties of the three materials studied.

In Denmark and Netherlands alternative aggregate materials have been used in road construction for many years. The Netherlands can be seen as a pioneering country in this respect. Denmark will introduce tighter environmental regulations next year for the use of residual products. Finland and USA report results that increase knowledge of the strength development of crushed concrete. Finland has recently published design regulations for roads comprising crushed concrete in the unbound layers.

Note that all the studied countries have different conditions as regards the supply of aggregates and that their conditions are also different from those in Sweden.

#### Denmark

In order to stimulate recycling, Denmark has employed landfill and incineration charges since 1987. When materials are re-used in e.g. road construction, some of the charge is repaid on application.

*MSWI bottom ash* has been used in civil engineering construction in Denmark since 1974. The predominant proportion of the 420,000 tonnes of MSWI bottom ash that is produced annually is used after ageing, sieving and classification. The most common field of application of this material is as sub-base in parking areas, bicycle lanes, paved and unpaved streets and major roads.

*Crushed concrete* has been re-used increasingly in the last ten years.

The same *requirements* as for the use of natural aggregate materials also apply when residual products and alternative aggregate materials are used. There are further requirements for MSWI bottom ash and building waste when these are used in building and civil engineering projects.

Conventional materials are not subject to special requirements with regard to *environmental impact*, while the use of residual products is generally regulated

through the Environmental Protection Act. On 1 January 2001 new environmental requirements come into force concerning the recycling of residual products and soil for building and civil engineering works.

The new requirements assign residual products and contaminated soil for building and civil engineering works to *three categories*. Category 1 can be used without restrictions; Categories 2 and 3 can be used if certain requirements are complied with. The requirements specified for materials in Categories 2 and 3 relate to the concentration of a number of contaminants, primarily heavy metals, which must not exceed specific levels. Limit values are specified for *total content* and *leachate content*. The materials that are covered are bottom ash from the incineration of waste and coal, fly ash from the incineration of coal, and contaminated soil. The use of other residual products is regulated by the Environmental Protection Act.

Clean, sorted building waste consisting of stone, brick and concrete can be used as replacement for natural aggregate materials in building and civil engineering works without special approval according to the Environmental Protection Act.

## Netherlands

The Netherlands uses ca 140 million tonnes of aggregate materials every year. Of this quantity, about 16 million tonnes are secondary aggregate materials. In order to achieve a high degree of recycling, prohibition of landfill and high landfill charges are made use of. Since 1995 it has been forbidden to deposit household waste on landfill sites, and since 1997 this prohibition also applies to reusable building and demolition waste.

A new regulatory system has been established for *all construction materials*. This "Building Material Decree" sets out the *environmental quality requirements* (composition and leaching properties) which must be satisfied by conventional and alternative granular materials in order that they may be used as construction materials. In addition, the technical requirements for materials set out in other regulations must also be complied with. The Building Material Decree came into force with full effect on 1 July 1999, and contains three principal obligations: information, notification and removal. The information obligation implies that the client or the user of a construction material must be able to prove its environmental quality.

All granular construction materials, both primary and secondary, for building and civil engineering purposes are generally assigned to *three categories*. These are construction material categories 1 and 2, and soil category 1. There are also two temporary special categories, namely bottom ash from waste incineration and aggregate made from asphalt granulate containing tar. Materials in Category 1 can be used without restrictions while materials in the other categories may be used if certain waterproofing precautions are taken. For the special category MSWI bottom ash, further waterproofing and control measures are specified.

Classification into categories is based on *composition* and *emission*. Composition is determined as the total content of different substances. The term *emission*

sion refers to the process when the substances leached out penetrate into the surrounding soil or water. The imission therefore depends on the leaching properties of the material and on the planned use. Formulae are given for calculation of imission, i.e. for the conversion of laboratory results into field conditions.

*Limit values* for use are based on the additional load that is acceptable for the site in question. They are defined as "an increase of one per cent in contamination concentration over 100 years in relation to the calculated background values in 1 metre of soil".

Almost all *bottom ash from incineration of waste*, 700,000 tonnes, is re-used in some way, mainly as fill in road embankments and noise barriers. Almost all incineration stations have by now certified their bottom ash. Most of the bottom ash is assigned to the special category, but some satisfies the requirements of Category 2.

90% of the building and demolition waste that arises annually is re-used in the form of "betonggranulaat" (*crushed concrete*) or "menggranulaat" (one half concrete plus one half other mineral demolition material). These materials are normally assigned to Category 1 and are used, for instance, as aggregate in concrete surfacings and in unbound base courses.

All the domestic production of *blast furnace slag*, 1.2 million tonnes annually, is used in cement manufacture. Almost as much, one million tonnes, is imported from Belgium and Germany for use in base courses. Blast furnace slag is normally assigned to Category 1, but classification into Category 2 also occurs.

## Finland

In order to increase recycling, Finland imposes landfill charges and also, from 1 January 1998, a landfill tax.

As in Sweden, there are no legally imposed environmental quality requirements for re-used residual products. On the other hand, there are *guidelines* for certain specific situations. It is intended that, in future, risk assessment analyses will be made instead of only leaching studies.

*Waste incineration residues* do not arise in major quantities.

*Crushed demolition concrete and residual concrete* have been used in some civil engineering schemes. Exactly as in Sweden, for each demolition a demolition schedule must be drawn up which sets out the types and quantities of materials and the way the waste is to be disposed of. There is also a guide for classification and selective demolition. In order to estimate the *development in stiffness* in layers of crushed concrete, preliminary tests are made on test specimens produced using gyratory compaction equipment. When layers of crushed concrete are compacted, considerably more water is needed than for conventional materials. It is recommended that concrete should be watered for one month, or until the bitumen surfacing has been applied.

On the basis of the experiences gained so far, *design rules* for constructions containing re-used concrete were published in the spring of 2000. The instructions comprise material classification, quality requirements, design tables and

building technological rules. Fatigue criteria for use in computerised analytical design are being developed.

According to the new instructions, it is the material supplier who is responsible for the *environmental impacts* of a concrete material. The properties shall be investigated as the material is crushed. When the concrete is from demolished buildings, its environmental impact properties must at all times be ascertained. This is not required for residual concrete from the manufacture of precast concrete products. If the project is situated in an area protected as a groundwater catchment, consultations are required between the environmental authorities and the material supplier. The guide values for leaching from re-used concrete and brick that are proposed for certain substances are based on Dutch values.

All the *blast furnace slag* produced in Finland is used in some way. No environmental requirements are specified when this material is used in road construction.

## USA

Experience of the use of *MSWI bottom ash* in unbound courses in roads is limited in the USA.

On the other hand, *crushed concrete* has been used in several places. Research reports describe mixed experiences from its use in civil engineering schemes. In Washington State, the material is described as a weakly bound base course material that is both hard and durable. The re-used concrete must comply with the same requirements as natural materials, and may be used either on its own or mixed with natural materials. The contractor must certify that the re-used material is neither dangerous nor toxic. In California, regulations are being drawn up requiring the contractor to report the use of re-used materials. In New York State, residual products that satisfy certain requirements are listed as alternatives to conventional materials.

Studies in Minnesota, Michigan and Ohio show that base courses of crushed concrete, in combination with rainwater, cause *lime deposits* in drainage systems, blockage of geotextiles and high alkalinity in drainage effluent. The use of crushed concrete is therefore restricted in drained base courses, or expensive preparatory treatment is required to prevent leaching of calcium based products.

*Blast furnace slag* is used very extensively in the USA. Almost all blast furnace slag that is produced is used in either concrete, asphalt concrete or unbound layers. In several states, blast furnace slag is covered by the ordinary regulations for road materials.

## European harmonisation

European harmonisation work relating to unbound road materials has produced a large number of product and method standards. Some have been ratified while others are still preliminary. It is expected that the final *product standards* for aggregates and unbound road materials will be ratified in December 2003. As regards *method standards*, many test methods have already been ratified, but there are many which are not yet completed, for example for permeability, frost heave



susceptibility and the environmental impact of aggregate materials due to leaching. Methods for the determination of environmental impact are the subject of controversy. There are preliminary test methods for leaching from waste, but not for leaching from aggregate materials.

When the above EU regulations have been ratified in their final form, the conflicting national regulations will cease to apply. As far as Sweden is concerned, this will mean, *inter alia*, that

- the *particle strength* of an aggregate will be tested using the micro-Deval (abrasion and wear) or Los Angeles (abrasion and impact) method. These methods will therefore supersede the ball mill method.
- *Organic matter content* shall be determined by the loss on ignition instead of the colorimeter method.
- The requirement concerning *particle size distribution* will apply on delivery, and not for the material as spread.
- The *clay content test* will be superseded by the sand equivalent test for fine grained materials and by assessment of fine grained material with the methylene blue test.
- *Particle shape* shall be given in terms of percentage of crushed particles, flakiness index or LT index.
- *Resistance to climatic actions and to weathering* shall be investigated by means of freeze–thaw tests with water or by testing with magnesium sulphate. At present there are no Swedish requirements for these properties.

In their present versions, both product standards for aggregates for unbound materials contain no mandatory text concerning alternative materials or residual products. It is intended that the next version will have this and work on revision has already commenced. It may be mentioned that in these standards blast furnace slag and also steel slag are considered equivalent to natural materials.

Further work on harmonisation requires *new methods* or more information regarding the composition of alternative materials, density distribution, contaminant/organic matter content, and leaching properties. More information is also needed regarding the applicability of the methylene blue, sand equivalent and freeze–thaw methods for these materials.

## Swedish experiences

There is not much use of alternative materials in Swedish road construction, with the exception of blast furnace slag in some cases, but research in this field has gone on for many years. Blast furnace slag and MSWI bottom ash were studied mainly in the 1970s and 1980s by means of laboratory tests and the construction of test sections. Crushed concrete was studied in the laboratory and the field during the 1990s. During the 1990s some major field tests were also made with MSWI bottom ash.

*MSWI bottom ash* has so far been used within the areas of the different incineration plants, for transport roads and similar purposes. It has also been used in some documented test areas or test roads, all of which, with the exception of one, are situated in Skåne Province. The combustion residue used in the previ-

ous tests was not the same type of material as that produced today, but the conclusions drawn from these first tests provided the basis for the later investigations. These relate to e.g. ageing for some time prior to use, spreading near the optimum water ratio, maximum 10% fines content, and rejection of particles greater than 40–50 mm. It must be noted that it is difficult to evaluate the early tests because, in actual fact, they were not planned as test sections with equivalent reference sections.

The experiences of *crushed concrete* in road construction that have been documented are relatively recent and are therefore described in Part IV of this report. The results are based on seven field tests during the period 1995–98. In one case concrete from crushed railway sleepers was used, and in other cases crushed demolition concrete from buildings. The material was laid as a sub-base and in some cases as a base course in parking areas, streets and minor roads.

*Blast furnace slag* is discussed only in brief outline in this report. In the continuation of this work a more comprehensive picture will be given. Blast furnace slag has been used locally for a long time around the blast furnaces in Luleå and Oxelösund. It has been used in internal transport routes inside the plant areas and in streets and roads in both municipalities and their surroundings. In recent times blast furnace slag has also been used at a greater distance from the furnaces, in projects where the special properties of the material could be utilised.

## **IV The properties of the studied materials**

Test results from investigations within this project and investigations described in the literature are set out in this section.

### **MSWI bottom ash**

MSWI bottom ash is sorted and aged bottom ash from the incineration of solid waste. Both the waste and the incineration process therefore influence the properties of the ash. Sorting and ageing of the bottom ash are also of great significance. The *waste* affects the homogeneity of the bottom ash and its content of environmentally harmful substances. The chemical composition of the waste, the availability or distribution of the different substances, as well as particle size and homogeneity, are important factors. The *incineration process* affects the chemical composition, organic matter content, particle size and water content of the bottom ash. The type of furnace and furnace design, the rate of feed of fuel, air supply, air temperature and the rate of movement of the incineration grate and quenching are also important factors. *Sorting/sieving* influences the particle size of the bottom ash. Together with *ageing*, *sorting* influences the stiffness, bearing capacity and leaching properties of the bottom ash.

## Deformation properties and strength development

According to laboratory tests, MSWI bottom ash initially has the same *stiffness* as sand, and probably the same stiffness as gravel under small loads. It increases slightly when load is applied, and its stress dependency is about the same as that of sand. Stiffness varies significantly between plants and periods, but this variation is no greater than in the investigated natural materials.

*Bearing capacity* is better than that of sand. If the permissible maximum deformation is 2%, the bearing capacity for all investigated MSWI bottom ashes is between 70 and 100 kPa.

According to field tests, MSWI bottom ash which, by definition, is of 0–50 mm particle size, naturally has lower stiffness initially than a natural material of 0–200 mm particle size, expressed as the *layer modulus* determined by falling weight measurements. Static plate bearing tests after six months showed similar layer moduli for MSWI bottom ash and a natural material of 0–100 mm particle size.

Deformation properties are greatly influenced by *organic matter content*. A high proportion of unburnt material is deleterious. Reduction of the organic matter content from 9% to 4% (determined by loss on ignition test at 550°C) may double the stiffness.

According to field measurements on MSWI bottom ash from the 1980s, its *stiffness* increases over time. Stiffness expressed in terms of layer modulus from falling weight deflectometer measurements had doubled after about 1 year, which meant that the initial difference in relation to natural material had vanished. A similar increase has not yet been noted on materials of later incineration date.

## Resistance to mechanical and climatic action (temperature alternations)

In tests using standardised laboratory methods, MSWI bottom ash has, in the form of greater fine material formation and disintegration, a lower resistance than natural aggregate. As regards *mechanical action*, the Los Angeles value for MSWI bottom ash may vary between 10 and 90%, with typical values around 40–45%. An example of micro-Deval value is 26. Compaction according to modified Proctor for determination of compaction characteristics produces significant disintegration.

One attempt to determine disintegration in the field by digging up old MSWI bottom ash gave results that were difficult to interpret, since disintegration may have been caused by the actual digging operation through the layer which became partly bound in time.

One result of a *freeze–thaw test* with water was 4% disintegration.

## Permeability

MSWI bottom ash has fairly low permeability when compacted. It is of the same order as in gravelly moraine, with values between  $10^{-7}$  and  $10^{-5}$  m/s depending

on the incinerator plant. These values are low for even a well-graded material, and may be due to the voids being blocked by fines.

### Susceptibility to frost heave

In *freezing tests* in the laboratory, MSWI bottom ash was found not to be susceptible to frost heave.

*Water absorption* is a property that is associated with susceptibility to frost heave. MSWI bottom ash is a very porous material and, according to the literature, its absorptive capacity is higher than that of most natural materials. 14% absorption has been measured for 0–4.75 mm particle size (one material), and 4–6% for coarser material (two values). The test method was however questionable.

### Thermal conductivity

MSWI bottom ash has lower thermal conductivity than natural aggregate. In the dry state its thermal conductivity is half that of gravel and in the wet state it is much lower. An example of thermal conductivity  $\lambda$  is 0.2–0.5 W/m<sup>2</sup>°C.

Sections with MSWI bottom ash in the sub-base, situated about 25 cm below the road surface, have a considerably lower frost penetration depth than sections with natural gravel in the sub-base.

The low thermal conductivity may be advantageous in the form of frost insulation. It also has the result that, according to present Swedish regulations, the material must be placed not less than 25 cm from the road surface to prevent its giving rise to slippery conditions. This is no limitation on its use since, because of its other properties such as bearing capacity and resistance, MSWI bottom ash must in any case be placed at this depth.

### Environmental impact

The *principal constituents* of MSWI bottom ash are silicon, iron, calcium and aluminium. These substances are listed in order of magnitude, with the largest first. These and other substances occur in MSWI bottom ash to the same extent as in the lithosphere or the soil. There are often elevated concentrations of chlorine, zinc, copper, lead and chromium in MSWI bottom ash since these are the principal constituents in manufactured products that gradually end up as waste. In Swedish MSWI bottom ash, the total contents of zinc, copper, lead and chromium are in the order of 0.1–1%. There are great variations between different incinerator plants and different seasons.

Leaching tests in the laboratory show that it is mainly zinc, copper and cadmium that are *potentially leachable trace elements*. Under oxidising conditions, the potentially leachable content of chromium increases. It is also these elements, together with lead, which exhibit the greatest difference when a comparison is made with potentially leachable substances in a natural material such as granite.

In leaching tests that take account of the supply of water and thus the time aspect, zinc and lead leach out in very small quantities, i.e. the leaching process is slow. Sulphate and chloride that are mobile ions leach quickly.

When leachate was collected in the field, the leachate from an MSWI bottom ash section and a crushed rock section contained approximately the same quantities of metals. Further, transport of metals and salts in surface water was of the same order as leaching from MSWI bottom ash slopes. This field test was made in Malmö at the end of the 1980s.

## Application

According to present Swedish regulations, MSWI bottom ash cannot be used unless the organic matter content is less than 2%, as measured by the colorimeter method! Nor can bottom ash from the incineration of hazardous waste be used.

Owing to its road engineering properties, MSWI bottom ash can be laid 25–35 cm below the road surface, depending on the type and thickness of surfacing. The same stiffness as for sand may be assumed. According to the existing VÄG 94, MSWI bottom ash can be used as fill (material type 2) and as a capping layer. The category Material Type 2 is for good fill materials and includes coarse-grained soils such as gravel, sand, gravelly moraine, sandy gravel etc. MSWI bottom ash may also be used as a sub-base, depending on the handling of the material and the thickness of the surfacing.

Owing to its environmental properties, special measures are required.

## Crushed concrete

The term crushed concrete is used here for material containing not more than ca 10% contaminants (e.g. lightweight concrete, brick, wood, paper, plastics and bitumen), even if its origin is building and demolition waste.

It is not possible to specify properties that apply for all types of crushed concrete, classified as one single material group. The *origin* and *handling* of the concrete influence the properties of the crushed material. The term origin refers to the material parameters of the original concrete, such as compressive strength and the type of aggregate and cement, as well as age, field of application and the environment of the original construction. Important parameters as regards handling are method of demolition, crushing and cleaning. The proportion of *foreign material* in the crushed product has great significance for its properties. Weak particles such as lightweight concrete and brick, but also wood, plaster and reinforcement, reduce quality. In order that demolition concrete may be used for high quality purposes, selective demolition must therefore be carried out. Chemically contaminated concrete must not be re-used.

## Deformation properties and strength development

According to laboratory tests, crushed concrete initially has the same *stiffness* as crushed rock, and is much stiffer than sand. Stiffness increases when the crushed

concrete is loaded, but it is not so load dependent as in crushed rock. *Bearing capacity* varies with origin, and is as good as, or inferior to, that of crushed rock.

According to field tests, crushed concrete initially has about the same stiffness as crushed rock, expressed in terms of *layer modulus* from falling weight deflectometer measurements. Static plate bearing tests have given mixed results.

Deformation properties vary with origin. Porous cement paste and also impurities have a deleterious effect. Particle size distribution with a large maximum particle size, and also a good grading curve (coefficient of concavity approximately two) are positive, just as in the case of natural materials.

The *stiffness* of crushed concrete *increases over time* in both laboratory and field tests. In the laboratory, 11–76% increase in the modulus of resilience has been measured during the first month. The scatter is probably due to differences in test procedure between Dutch and Swedish tests. In the field, falling weight deflectometer measurements and dynamic plate bearing tests show that stiffness, expressed as the layer modulus, doubles or triples during the first three months. The results from static plate bearing tests are not so uniform.

A low degree of carbonation in the original concrete produces more rapid carbonation and resultant increase in stiffness in the road. A lot of brick and natural material have a limiting effect, since these materials do not themselves become carbonated. Long contact between water and concrete material, as well as a large particle surface area, i.e. dense grading with a lot of fines, is favourable.

#### Resistance to mechanical and climatic action (temperature alternations)

When tested with standardised laboratory methods, crushed concrete has lower resistance in the form of a greater proportion of fines formed and greater disintegration than gravel and crushed rock.

Examples of indices under *mechanical impact* are ball mill value of 23–53 and Los Angeles value of 17–39 depending on origin and micro-Deval value of 14–23. Compaction according to modified Proctor produces significant crushing. Resistance to mechanical impact depends on particle shape and indirectly on method of crushing, type of crusher and the number of crushing stages. The flakier the particles, the lower is resistance. Resistance is also influenced by purity, so that a lot of brick and lightweight concrete have a deleterious effect on the recycled product. Original concrete of higher strength produces better abrasion resistance.

Examples of values in *freeze–thaw tests* with ordinary water are 8–17% disintegration depending on origin, and in tests with salt water, 15–39%.

If the concrete material is pure, the fines formed will not be plastic but participate instead in the strength development referred to before.

In the test sections monitored in Sweden, courses of crushed concrete do not as yet exhibit any signs of disintegration or increase in fines content. The oldest of these were laid three years ago. An increase in particle size has been noted instead, as a result of carbonation.

## Susceptibility to frost heave

In *freezing tests* in the laboratory, crushed concrete without impurities is not frost susceptible if the particle size distribution is favourable, i.e. if the proportion of fines is less than 10%.

Water absorption and capillarity are properties associated with susceptibility to frost heave. According to the literature, the *water absorption* of crushed concrete is about 10 times as high as that of natural materials. Various sources claim, however, that standard methods give too high values of water absorption for crushed concrete since the water adsorbed on the surfaces of particles is also included.

Coarse crushed concrete (8–32 mm) has much lower *capillarity* than crushed rock, while fine crushed concrete (0–4 mm) has about twice the capillarity of gravel. (Results from one test).

In the *field*, frost heave in crushed concrete is about the same as in crushed rock. On the other hand, demolition waste with ca 45% foreign material such as brick and plaster has much greater frost heave, some of which is permanent. Sub-bases of crushed concrete exhibit no deterioration in stiffness during thaw.

## Thermal conductivity

In the dry state, crushed concrete has about the same thermal conductivity as gravel ( $\lambda = 0.5 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ ). In the wet state concrete has slightly higher insulation than gravel. (Results for one material).

When frost penetration depth was measured in sections with crushed concrete in the sub-base, it was the same as in sections with crushed rock.

In view of the thermal conductivity of layers of crushed concrete, there is no reason for restricting its use, but there are also no advantages, such as insulation effect, compared with natural materials.

## Environmental impact

Concrete consists of cement, aggregates and possibly admixtures. What is different between the contents of crushed concrete and crushed rock is therefore cement, admixtures if any, and impurities which may have been mixed into concrete during demolition or other handling. Examples of impurities are plaster, plastics, rubber, wood and plants. Chlorides may have been added as accelerating admixtures or used as skid prevention agents in the original construction.

According to laboratory experiments, the leaching properties of crushed concrete without impurities are the same as those of crushed rock and moraine.

When leachate from two test sections containing building demolition concrete was collected and analysed, the concentrations of chromium, nickel and lead, and in one case even arsenic, were greater in leachate from crushed concrete sections than from sections containing crushed rock. Locally, drainage effluent may be alkaline.

## Application

According to the present VÄG 94, clean crushed concrete can be used as embankment fill of material type 2, as capping layer and as sub-base. Crushed concrete can also be used in base courses, but not overall. It should not be used in constructions with thin bound courses where large traffic load stresses may be expected in the base course.

When crushed concrete is used as sub-base material, the same values of Young's modulus can be used in design as for crushed rock. If special investigations are made of the material concerned, and if details of the planned construction are known, a higher value of the modulus may be applied. In this way the increase in strength that the material exhibits can be utilised.

## Blast furnace slag

Blast furnace slag is a material that has for a long time been regarded, both in other European countries and the USA, as largely the same as conventional natural materials.

Since the material is a residual product from the manufacture of iron, the raw materials, for example the character of the iron ore and the added flux, are significant for the properties of the final product. Somewhat simply, it may be said that the better the ore, the lower is the strength of the blast furnace slag. The manufacturing process, primarily cooling, is also very significant. The *raw materials* affect chemical composition and strength development. The *cooling process* during manufacture affects both particle size, porosity and strength development. The *grading* chosen influences the susceptibility to disintegration of the finished blast furnace slag layer.

Very little *variation* has been found in the properties of blast furnace slag from the two plants in Sweden. This relates to chemical composition, deformation on application of load, durability measured in ball mill tests, and thermal conductivity. The explanation may be that the manufacturing process is controlled.

## Deformation characteristics and strength development

Blast furnace slag and crushed granite of the same particle size have about the same *stiffness* in cyclic load triaxial tests. The *stability* of blast furnace slag, expressed in terms of accumulated permanent deformation, is initially considerably inferior to that of crushed granite, but better than that of uncrushed granite. The stress dependence of blast furnace slag is lower than that of conventional rock materials.

Blast furnace slag subjected to accelerated ageing in the laboratory has better *stiffness development* than unaged slag and crushed rock. However, the fastening formed during ageing is weak. Permanent deformation is also markedly improved by ageing. Increase in strength has also been measured in the field by falling weight deflectometers and it has been observed in trial pits.



## Resistance

*Resistance to mechanical action*, determined by ball mill tests, has the value 22–26. These values represent blast furnace slag of different origins and from different times, which suggests a homogeneous material. Resistance to climatic action will be determined in the continuation of this project.

## Susceptibility to frost heave

Blast furnace slag is a porous material, but its water absorption is nevertheless low since water remains on the surface instead of being absorbed into the material. This may be interpreted to imply that susceptibility to frost heave is low, but further studies should be made.

## Thermal conductivity

Blast furnace slag has low thermal conductivity, 0.3–0.7 W/m·°C depending on water content. It is therefore surprising that no effect in the form of reduced frost penetration could be confirmed in frost depth measurements on a test road outside Luleå. Further investigations are needed.

The low thermal conductivity should be utilised as frost insulation. The low value also implies that courses of blast furnace slag should not be placed too near the road surface owing to the risk of slippery conditions. According to Swedish regulations the depth should be not less than 0.25 or 0.5 m depending on thermal conductivity.

## Environmental impact

Blast furnace slag, like crushed rock, mainly consists of silicon, calcium, magnesium and aluminium. The difference lies in the low iron content, ca 0.5%, and the high sulphur content, ca 1.5%, of the quantity of slag. Among trace elements barium and vanadium have the highest concentrations, 0.03–0.06%.

The results of several laboratory investigations show that blast furnace slag is comparable to crushed rock, gravel and moraine as regards leaching of heavy metals. According to availability tests on blast furnace slag, the *potentially leachable quantities* of most metals are considerably lower than their total content. Under oxidising conditions, the potentially leachable quantity of cadmium, copper and vanadium increases. *Column tests* show that, after the initial period, leaching will go on for a long time and at a low level. Vanadium is however an exception, leaching probably remains at the same level over an extended period. The sulphur that is leachable leaches out in a short time and rapidly degrades, for example during storage prior to use.

Sampling in *wellpoint piezometers* along a blast furnace slag section on European Route E4 outside Nyköping shows no elevated values for any substance.

## Application

Even though the properties of blast furnace slag will be studied in greater detail in the continued work on this project, it can already be said that neither its engineering nor environmental impact properties constitute any obstacle to its normal use in Swedish road construction.

According to the present VÄG 94, blast furnace slag can be used as fill (material type 2), capping layer and sub-base. Its properties are best utilised in a sub-base. The slag can also sometimes be used as base, depending on the thickness of surfacing.

If unaged blast furnace slag is laid on poorly drained subsoil so that the material will be lying in still water, problems due to leaching of sulphur may arise.

## V Performance based road design

Alternative materials cannot at all times replace conventional materials in all respects. In order that the alternative materials may nevertheless be utilised, it is sometimes necessary to employ a different design that takes account of the properties of these materials. This report proposes a method for classifying unbound materials on the basis of their bearing capacities, and for selecting the appropriate *depth of placing* in view of this.

The term *bearing capacity* is defined as the maximum load or stress that a layer of material can support without undergoing unacceptable permanent deformations. The bearing capacity of a material must therefore be related to a definite limit value of permanent deformation in the layer. Bearing capacity is conveniently determined in a series of loading tests in the laboratory during which the state of stress and water ratio are varied. The results are expressed as a maximum vertical stress or as a certain depth of placing below the road surface. The depth required depends on traffic load, the stiffness and thickness of the bound layers and of course the bearing capacity. Development of deformation due to degradation of the protecting bound layer can then be calculated. This equation should include the vertical stress in, and water ratio of, the unbound layer.

The report also contains a proposal for *material characterisation*. This comprises bearing capacity, resistance, susceptibility to frost heave and environmental impact.

Bearing capacity shows where in the construction the material can be laid. Any strength development should also be elucidated here. Resistance to mechanical action should be determined using a newly developed method, for instance modified gyratory compaction. This determines whether compaction and construction traffic must be adjusted. Design must ensure that no crushing can occur in the finished construction. Resistance to climatic action should be ascertained by a modified freeze-thaw test. This determines whether there are any limitations regarding use of the material, both geographically and in the construction. Susceptibility to frost heave and also its load dependence should be

determined by freezing tests. Finally environmental impact should be ascertained through a series of tests such as total content, available quantity and dependence of leaching on water content, pH and redox potential. Also the content of organic matter should be determined.

## VI Discussion and conclusions

The object of this project was to increase knowledge of the properties of crushed concrete, MSWI bottom ash and blast furnace slag and to make it easier to design roads using these materials. The following areas were also selected for further studies: Variability, thermal conductivity, long term properties and strength development, as well as methodology for performance based design of roads.

In this section, *MSWI bottom ash* and *crushed concrete* are discussed. Comments are also made on some *test methods*, in addition to those already made earlier, and on the proposed *material characterisation*.

### Test results for MSWI bottom ash

During the study of the literature it became evident that the deformation properties of combustion residues or MSWI bottom ash have been studied only by CBR tests. In order to facilitate design of Swedish roads with this material, an extensive series of dynamic loading tests, and comparison of the results with conventional Swedish materials, were performed within this project.

As regards *variability*, the results show that the mechanical properties, expressed in terms of measured permanent deformation and modulus of resilience calculated from cyclic load triaxial tests, are relatively similar for the four bottom ashes studied. There is a significant difference between the materials from different plants and also within the production of each plant, but the scatter is no greater than for the investigated natural materials. The tests also showed that the organic matter content has a limiting effect on the modulus of resilience, which was expected.

The frost depth measurements made within the project show that MSWI bottom ash has a clear insulating property. The results are in good agreement with the laboratory measurements made for the *thermal conductivity* of the material. Note that three different MSWI bottom ashes were investigated. These represent both different plants and different years of production. Further studies will have to show how this property can be utilised.

The studies of *long term properties* that could be made are confined to two field tests. In one of these the test and reference sections were twelve years old, and the 8 cm thick surfacing had in recent years exhibited damage in the form of cracking and alligator cracking, the extent of which was greater on the test section. Unfortunately, the design of the sections is not wholly comparable, and this makes comparisons difficult. This demonstrates how important it is to plan field tests well in order that correct conclusions may be drawn. In the second field-

test the two-year-old test and reference sections had a 13-cm thick surfacing. As expected, these have not as yet exhibited any damage, but they will be monitored further.

In both field tests the sections were subjected to falling weight deflectometer measurements. In the first case a clear but slow *strength development* could be detected. Note that these results refer to an MSWI bottom ash from the 1980s. The two year old test section was subjected to falling weight tests once, ca six months after construction. The stiffness of the bottom ash layer was then about half the stiffness of the reference material. In view of the fact that the material had been in place for six months, some increase in strength would have been expected. Further investigations will show whether strength development will be absent even in the future.

Only results from this investigation have been discussed here, and no comparisons have been made with foreign MSWI bottom ashes. The reason is that it is difficult to compare combustion residues when recycling policy and thus waste composition also are not the same.

### MSWI bottom ash in the future

It is likely that there will be an increase in waste incineration, which means that more bottom ash will have to be driven to landfill. This is all the more reason to find fields of application for MSWI bottom ash, but in order that the expensive waterproofing measures that are required for environmental reasons may be avoided, the product must be *refined*. Such refinement will also be favourable for its engineering properties.

A lot of research has been devoted to investigation of the MSWI bottom ash produced at present. When attempts are made to find different techniques of using bottom ash, it is sometimes found that excessive quantities of one or more substances are leached out. The solution tried then is to insulate or encapsulate the material in some way, but these measures are *passive* ones and do not tackle the actual problem. Where do the noxious substances come from? What does the waste contain? What happens during incineration? To what extent are the substances concentrated in the bottom ash? How can the composition of the waste be changed? How can the incineration process be altered so as to enhance the quality of the bottom ash?

There has been great progress during the last decade regarding the knowledge of, and the technology for, *flue gas cleaning* at waste incineration plants, owing to the comprehensive requirements regarding the emissions to air in the form of flue gases. Technology for the improvement of the MSWI bottom ash has not at all had the same attention so far. Only a few studies of the incineration process have been made at laboratory scale and by theoretical reasoning. Nor are there any requirements for this residual product, presumably because it is, after all, only going to be driven to landfill.

In view of the requirements being imposed by an ecocyclic society, the incineration plants of the future will not be able to regard themselves only as energy producers. Fundamental practical studies of the incineration process are required

in order to *increase the usability* of MSWI bottom ash and thus reduce the need for landfill.

### Test results for crushed concrete

The properties of crushed concrete *vary* in several parameters. Crushed concrete cannot therefore be regarded as one single material group. It is not clear whether it is the original material or handling, e.g. crushing and cleaning, that affects the properties most.

Purity, i.e. the absence of wood, paper, plastics, bitumen, lightweight concrete, brick etc, is of great significance for deformation properties, susceptibility to frost heave and even the properties that have an impact on the environment. However, this is not likely to be a problem in Sweden today, since selective demolition is already applied extensively.

As in the case of conventional aggregate materials, crushing is of great importance since the particle size distribution arrived at influences stiffness, stability, frost susceptibility etc. In view of the results of tests regarding resistance, crushing in several stages may give rise to unnecessarily large quantities of fines.

The conclusion drawn from the literature studies is that the mechanism underlying the *strength development* of crushed concrete is a leaching of lime, followed by precipitation of calcium carbonate. In the light of this knowledge, it should be possible to determine the appropriate handling and method of construction that will best utilise this property. Concrete should, for example, be stored outdoors and in moist conditions to avoid early carbonation, but thorough compaction and wetting are necessary when the material is being placed in a construction and carbonation is desirable.

Within this project, the extent, and process, of strength development have been evaluated in both laboratory and field tests. It was found that strength development was considerably less in the laboratory than in the field. One explanation may be that the laboratory samples were wrapped in plastic foil during storage, and this prevented the desired carbonation. When the Swedish results are compared with Dutch laboratory and field results and Finnish field results, it is found that the results of field tests are largely in agreement in these countries. The Dutch field tests gave a somewhat more rapid increase in stiffness. On the other hand, the laboratory results are different inasmuch as the Swedish results show much less increase in stiffness than the Dutch ones. Apart from the above explanation regarding method of storage, the difference may also be explained by differences in test procedure and loading history, water ratio and size of test specimen.

*Long-term properties* other than strength development have not yet been shown to differ from those of conventional materials, by either Swedish or foreign experiences. The Swedish objects being monitored are no more than three years old.

## Test methods – limit values

The results presented in the project show that the cyclic load triaxial test is a very suitable method for comparing the *deformation properties* of alternative aggregate materials and known natural materials.

When the *organic matter content* is to be compared with the permitted value, it is obvious that the test method used must be that specified in the regulations concerned. In the literature, however, there are erroneous data when an alternative material is said to be approved or rejected according to VÄG 94. In such cases the organic matter content had been determined by the loss on ignition method instead of by colorimetric measurement. Comparative tests made in this project show that these two methods produce very different results for crushed concrete and MSWI bottom ash. The result is that the material concerned might have been rejected on the wrong grounds.

Note that the two American standards for the *Los Angeles test* include a warning that the Los Angeles value should not be used for other purposes than to show the relative qualities of aggregates from sources with similar mineral composition. This should be borne in mind before the Los Angeles test is introduced as a standard method for all aggregate materials, including alternative ones.

Several tests are in progress to find alternative methods for resistance testing. There is a great demand for methodological development in this area. Tests using *gyratory compaction* have given promising results, but need further development. One drawback of the present version is that it comprises sieve analysis, which can influence degradation of weak materials.

When *limit values of resistance* to mechanical action are specified, it should be borne in mind that even though recycled products often form a lot of fine materials, the fines are not plastic as in the case of natural materials of poor resistance. This has already been taken into consideration in some American States with regard to blast furnace slag by simply removing the requirement for Los Angeles tests on this material. The limit values that will be finally introduced in Sweden should also be varied depending on handling or application in the road.

When Sweden, via the EU, specifies requirements for *freeze–thaw resistance* for unbound aggregate materials, the limit values should be varied depending on field of application.

Different types of *leaching methods* will be needed for different purposes. The proposals put forward distinguish between fundamental characterisation and continuous quality control of a material. The future will show what methods will be agreed on. All that can be done here is to emphasise that it is not the concentration of a substance that determines its environmental impact, but the mobility of the substance in the water system and the vulnerability of the environment. The fundamental test method that is used should therefore take account of e.g. the pH dependence of the leaching process.

The *limit values* for different fields of application should be based on a risk assessment for the site or area concerned, account being taken of the background

concentrations of different contaminants. One rational working procedure in determining limit values is an "inverse exposure analysis". This implies that the permissible exposure level of different types of receiving waters is first determined, and the leaching of contaminants from the material concerned that corresponds to this exposure level is then calculated. A transport model for the contaminants, and data regarding different applications or scenarios for the material, e.g. layer thickness and road design, are used as help in this calculation. A material can then be certified for use in certain applications.

### Design – material characterisation – product certification

Even though the proposal for material characterisation that is given contains some new elements and new test methods compared with present practice, it need not imply more extensive testing. The idea is that material characterisation should have the form of a fundamental investigation that leads to a "type approval" or *product certification* for both conventional and alternative materials.

Production control or quality control can then be carried out using other and quicker methods, where only certain critical parameters are investigated and compared with the fundamental characterisation in order to ensure that the material is the same as that certified. Note that all materials should be covered by the requirement concerning investigation of environmental impact.

In performance based systems there is no room for terms such as "base course in compliance with the regulations" or "sub-base in accordance with VÄG 94". The materials can instead be classified on the basis of their bearing capacities, e.g. B200 or B400, in the same way as the strength classes used within concrete technology.

## Conclusions

The following *general* conclusions can be drawn from this project.

- Alternative aggregate materials should be used near the source of production, since it is then that they are price competitive. The environmental gains also vanish if the haulage distance is too great. In practice, this implies that their use will be greatest in urban areas and their surroundings.
- The limitations of the alternative materials must be taken into consideration. There is otherwise a risk that the material will be blamed when the road deteriorates, although in actual fact it is faulty design that is the cause. The consequence will be that the material acquires a bad reputation and nobody will want to use it. None of the three studied materials should therefore be laid as a base course below a thin surfacing, and construction traffic on MSWI bottom ash should be avoided.
- The properties of the alternative materials should be utilised to the greatest possible extent. This implies that the materials should be laid in road pavements at the depth that their bearing capacity permits. The special frost insulating properties of blast furnace slag and MSWI bottom ash, and the

strength development in crushed concrete and blast furnace slag, should be made use of.

With regard to the existing design regulations, this means that, from the standpoint of strength properties,

- MSWI bottom ash can be used as fill and as a capping layer. In roads with sufficiently thick surfacing, it can also be used as sub-base.
- Crushed concrete and blast furnace slag can be used as fill, capping layer and sub-base. In roads with sufficiently thick surfacing, they can also be used as base course.

The following conclusions can also be drawn from this project as regards *test methods*.

- In assessing the deformation properties of alternative materials in the laboratory, the cyclic load triaxial test is a suitable method.
- CBR tests should not be used as a standard method in Sweden. (It will presumably be brought in as an EU method).
- Method development is needed in regard to tests for resistance, both to mechanical and climatic action. This report gives some proposals.
- Limit values of environmental impact, in the form of maximum permissible leaching in certain conditions, must be introduced soonest for aggregate materials. In this regard, it may be said with some exaggeration that there is no shortage of proposals, only of decisions. The proposals made have been put in the pending tray by some authorities. The limit values that will in time be introduced should be based on an assessment of the risk due to the expected impact, account being taken of the vulnerability of the site concerned. Limit values must be specified for all aggregate materials.

The following conclusions hold for *material properties*.

- Data regarding environmental impact should be required for all aggregate materials.
- Material certification for MSWI bottom ash and blast furnace slag should be performed as soon as possible. Certification should be made for each production plant.
- In order to increase the quality of MSWI bottom ash, the incineration process in district heating plants based on waste should be tuned. After several years of concentration on flue gas cleaning, it is time to devote some effort to the quality of the bottom ash.
- As expected, the deformation properties of MSWI bottom ash are greatly impaired by a high proportion of unburnt material.
- MSWI bottom ash has very low thermal conductivity, which produces a documented reduction in frost penetration when the material is used in a road pavement.
- If crushed demolition concrete is to be capable of use for high quality applications, far reaching selective demolition of buildings and constructions is necessary. This is already taking place to a large extent today.



- Crushed concrete has evident strength development properties. A description of the mechanism underlying this process is quoted in this report. Knowledge of the mechanism can be utilised in optimising strength development.
- Blast furnace slag has very low thermal conductivity, but the results of laboratory experiments and field tests concerning frost depth are not in agreement and further studies should be made.
- Systematic tests on the compaction properties of blast furnace slag should be made.
- In order that both “good” and “poor” aggregate materials may be used correctly, a new design method must be introduced as soon as possible. A proposal based on bearing capacity classification is presented in this report.

To sum up, if common sense is applied in using alternative aggregate materials, natural resources, money and space can be saved and environmental impact reduced.

### Proposal for further research

*Utilisation of the special properties of alternative materials.* One example is the low thermal conductivity that can be used for insulation purposes and thus give rise to thinner road pavements. Another example is the increase in strength over time, which can be made use of where stiff constructions are needed.

*Improvement of the properties of MSWI bottom ash.* Fundamental practical studies of the waste incineration process can identify the measures, which improve the properties of bottom ash. This increases the usability of MSWI bottom ash and thus reduces the load on landfill sites.

*New test method for resistance to mechanical action.* A method is needed that simulates actual conditions in unbound layers and tests the entire material. Perhaps one of the existing methods can be modified. A method that does not involve sieving should be developed.

*The resistance of alternative materials to chemical action* should be investigated.

*Development of limit values for the environmental impact of aggregate materials.* This is a very important area, which is not dealt with in this project.





# I Introduktion

Denna del beskriver bakgrunden till projektet och syftet med arbetet. I denna del anges också vilka avgränsningar som har gjorts och vilket tillvägagångssätt som har använts för arbetet.

- 1 Bakgrund och problembeskrivning 33**
- 2 Syfte och avgränsningar 36**
  - 2.1 Användningsområden 36
  - 2.2 Material 37
  - 2.3 Egenskaper 40
- 3 Metodik för genomförandet 41**
  - 3.1 Kunskapsinhämtning 41
  - 3.2 Kunskapsluckor som identifierats 42
  - 3.3 Experimentellt arbete 43
  - 3.4 Kunskapsspridning 44

# 1 Bakgrund och problembeskrivning

Varje år förbrukas 70–90 miljoner ton ballastmaterial i Sverige varav drygt hälften används inom vägsektorn. Liksom i övriga branscher är kretsloppstänkande och resurshushållning på väg att införas i vägbyggandet. Det medför att alternativa ballastmaterial såsom återvunnet material eller restprodukter av olika slag introduceras. Bakgrunden till detta är ett antal politiska mål och styrmedel samt administrativa och tekniska åtgärder.

För att ett återvunnet material eller en restprodukt ska utgöra ett intressant alternativ till konventionella vägmateriell av sand, grus och krossat berg måste vissa förutsättningar vara uppfyllda. Materialet ska ha lämpliga tekniska egenskaper, ge en acceptabel miljöpåverkan samt innebära rimliga kostnader.

Nuvarande regler för användning av alternativa vägmateriell finns beskrivna i Vägverkets tekniska beskrivning för vägar, VÄG 94, som fr o m 2001 ersätts av ATB VÄG. Enligt dessa regler krävs emellertid antingen bevis för att det alternativa materialet är likvärdigt med det material det ersätter i en standardkonstruktion eller förslag till en alternativ konstruktion vars hållfasthet också ska bevisas. (VÄG 94, ATB VÄG).

För att kunna använda alternativa ballastmaterial rätt i vägbyggandet krävs kunskap om deras egenskaper. Även om kunskapen ökar varje år i takt med att forskningsprojekt avrapporteras och nya erfarenheter görs av t.ex. provvägar är den fortfarande bristfällig och framför allt dåligt spridd.

## Uttalade mål och åtgärder för ökad återvinning

Några av de politiska åtgärder som vidtagits i Sverige för att öka återvinningen inom vägbyggnadsbranschen är följande:

- **Materialinventeringar:** Sedan 1983 görs årliga inventeringar av tillgången på naturgrus, berg i bristområden och ibland också morän. Alla län ska ha en hushållningsplan för materialtillgångar.
- **”Ett ekologiskt hållbart samhälle”:** Ett av riksdagens övergripande mål. Det borde sålunda vara naturligt att använda alternativ där det går och på så sätt minska storleken på deponierna och samtidigt uttaget från grus- och bergtäkterna. Användning av alternativa material förlänger livslängden på de befintliga deponierna och minskar behovet av att öppna nya täkter.
- **Kretsloppspropositionen** (Prop. 1992/93:180): Antogs av riksdagen 1993. Den säger bl.a. ”Vad som utvinns ur naturen skall på ett uthålligt sätt kunna användas, återanvändas, återvinnas eller slutligt omhändertras med minsta möjliga resursförbrukning och utan att naturen skadas”.
- **Naturgrusskatten** 1996 infördes en skatt på naturgrus som för närvarande är fem kronor per ton uttaget material. Skatten betalas in av grusproducenten.
- **Vägverkets handlingsplan för Kretsloppsanpassad väghållning** (Vägverket, 1996): Denna handlingsplan skrevs på uppdrag av regeringen och anger vad Vägverket tänker göra för att kretsloppsanpassa infrastrukturen för vägtrafik. Den beskriver Vägverkets planerade åtgärder, dels som statlig väghållare, dels för att stödja och påverka andra väghållares kretsloppsanpass-

ning inom ramen för Vägverkets sektorsansvar. Under 2000 har handlingsplanen kompletterats och vidareutvecklats i publikationen Inriktningsprogram för mark- och vattenfrågor i Vägverket (Vägverket, 2000).

- **Miljöpropositionen** (Prop. 1997/98:145): Antogs av riksdagen 1999. Där anges att god bebyggd miljö innebär att naturgrus nyttjas endast när ersättningsmaterial inte kan komma ifråga med hänsyn till användningsområdet. Följande mål har föreslagits: År 2010 är den nationella förbrukningen av naturgrus högst 12 miljoner ton per år, vilket motsvarar 20% av den totala ballastproduktionen 1997, och andelen återanvänt material är minst 10% av ballastkonsumtionen. Till år 2020 föreslås att förbrukningen av naturgrus är högst 3 miljoner ton per år och andelen återanvänt material är minst 25% av ballastkonsumtionen.

Under 2000 har ett betänkande från Miljömålskommittén getts ut som ytterligare preciserar miljömålen (SOU 2000:52).

För 15 år sedan kom 82% av den ballast som produceras i Sverige från naturgrustäkter och 1997 var andelen nere i 43%. Orsaken till minskningen är främst skärpta krav på vägballast och svårigheten att få grustäktstillstånd.

- **Avfallsskatten (SFS 1999:673)**: Efter många års förberedelser trädde avfallsskatten i kraft den 1 januari 2000. Den är för närvarande 250 kr per ton deponerat material med vissa undantag, t.ex. masugnsslagg. Skattskyldig är den som bedriver verksamheten på den aktuella anläggningen. Deponerat material som förs bort från en anläggning för att återvinnas i någon form, t.ex. som vägmateriäl, ger möjlighet till skatteavdrag.

## Förutsättningar för återvinning

För att ett återvunnet material eller en restprodukt ska kunna bli ett alternativ till de konventionella materialen måste vissa förutsättningar vara uppfyllda. Användningen ska resultera i

- lämpliga tekniska egenskaper,
- acceptabel miljöpåverkan samt
- rimliga kostnader.

Vad som är **lämpliga tekniska egenskaper** för ett vägmateriäl beror naturligtvis på användningen. Om exempelvis materialet ska ligga uppe i vägytan som slitlager ska det tåla last och slitage från trafiken. Det ska tåla de temperaturväxlingar som klimatet ger och det ska vara tätt och kunna skydda underliggande lager. Ligger materialet lite längre ner, kanske 40 cm under vägytan, är inte lasten från trafiken så stor längre. Den har spridits ut av lagren ovanför. Inte heller är temperaturväxlingarna eller risken att materialet utsätts för vägsalt från halkbekämpning så aktuell längre. I stället är det viktigt att materialet går att packa till ett stabilt underlag för ovanförliggande lager och mycket viktigt att det inte är tjälfarligt. Materialet får inte suga vatten som sedan fryser under volymutvidgning och ger lyftning.

Vad som är **acceptabel miljöpåverkan** är svårt att definiera. Det acceptabla beror på gränsvärden som i sin tur beror på vad som är acceptabelt. Hur stor miljöpåverkan blir beror också på användningen. Det är stor skillnad mellan an-

vändning av ett material i vägytan, där det blir utsatt för all tänkbar påverkan från klimat och trafik, och användning under en 15 cm tjock asfaltbeläggning.

I bedömningen av **rimliga kostnader** måste hänsyn tas till alternativet, som är användning av ett konventionellt material. Då ska tåkten, transporterna, depони-skatten och depониavgiften värderas.

## Nuvarande regler för användning av alternativa vägmaterier

De regler som gäller idag för användning av alternativa vägmaterier anges i Vägverkets tekniska beskrivning för vägar, VÄG 94, som fr o m 2001 ersätts av Allmän Teknisk Beskrivning VÄG, ATB VÄG. Enligt VÄG 94 krävs minst lika goda egenskaper hos det alternativa materialet som hos det konventionella det ska ersätta. Det är naturligt eftersom VÄG 94:s dimensioneringstabeller förutsätter att de ingående materialen har vissa styvheter eller deformationsegenskaper. VÄG 94 ger också möjligheten att föreslå en alternativ konstruktion vars hållfasthet ska bevisas, vilket kräver kunskap om det nya materialets E-modul och "tillåten last". ATB VÄG innebär endast smärre förändringar av reglerna (Bilaga 3).

Att det alternativa materialet ska ha minst lika goda egenskaper som ett konventionellt material innebär att samma provningsmetoder och gränsvärden gäller för alla material. Alltså visas lämpligheten hos ett nytt material genom olika provningar i laboratorium. Emellertid har vissa egenskaper traditionellt inte setts som något problem för obundna vägmaterier och därför har ingen provningsmetod och inget gränsvärde angetts. Kemisk beständighet är en sådan egenskap. För andra egenskaper finns provningsmetoder etablerade, t.ex. för frostbeständighet, men något gränsvärde anges inte för obundna material.

Likvärdiga egenskaper kan också bevisas med hjälp av fältförsök. Då byggs provvägar som följs upp med olika mätningar. Vid uppföljningen jämförs provsträckor som innehåller alternativa material, med referenssträckor byggda av konventionella material. Observera att uppföljningen bör göras under flera år.

De egenskaper som på olika sätt nämns i VÄG 94 är bärförmåga, stabilitet, hållfasthet, beständighet, tjällyftningsbenägenhet och miljöpåverkan. Av dessa saknar följande angiven provningsmetod och gränsvärde för obundna material

- bärförmåga,
- stabilitet,
- hållfasthet,
- beständighet mot klimatpåverkan,
- beständighet mot kemisk påverkan samt
- miljöpåverkan.

För bärförmåga och stabilitet finns visserligen indirekta krav genom de krav på kornstorleksfördelning och organisk halt som hör ihop med VÄG 94:s typkonstruktioner. Dessa bygger på lång erfarenhet av naturmaterial. Om inte restprodukten uppfyller de indirekta kraven kan en alternativ konstruktion föreslås, men denna måste godkännas i varje enskilt fall.

Det nuvarande tekniska regelverket ger alltså ingen bra vägledning, vilket även Vägverket självt påpekar (Vägverket, 1996).

För miljöpåverkan från obundna material finns det inte angivet några metoder eller gränsvärden varken inom eller utanför Vägverket. Denna avsaknad av generella regler för miljöpåverkan innebär att varje användning av restprodukter i vägobjekt måste prövas individuellt av aktuell lokal miljömyndighet, vilket kan ge olika resultat beroende på var i landet prövningen görs.

## Brist på kunskap om alternativa vägmaterial

Användning av alternativa vägmaterial kräver ny kunskap. För det första ska det visas att det nya materialet har egenskaper som är likvärdiga med det konventionella materialet. Det innebär provningar med vissa standardmetoder. För det andra ska det på något sätt visas att det alternativa materialet är likvärdigt även inom de områden där angiven provningsmetod och gränsvärde saknas, vilket kräver en stor provningsinsats. Om sedan provningen resulterar i att materialet inte har likvärdiga egenskaper är det önskvärt att kunna föreslå en alternativ konstruktion där egenskaperna är tillräckliga. Detta kräver också kunskap.

Bland aktörerna i vägbranschen ses denna kunskapsbrist som ett problem. Vägverket skriver till exempel i sin handlingsplan för kretsloppsanpassad väghållning att det är ett stort problem att kunskapen om vad som är lämplig användning och hantering av nya typer av material är bristfällig (Vägverket, 1996).

Inom området miljöpåverkan finns det en hel del kunskap om olika restprodukters lakningsegenskaper. Det har gjorts många lakförsök på energiaskor, en hel del på hyttsten och några på betong. Problemet är att lakningsmetoderna varierar och att resultaten för det mesta inte har relaterats till något, t.ex. gränsvärden eller motsvarande värden för konventionella material.

## 2 Syfte och avgränsningar

Syftet med forskningsprojektet är att öka kunskapen om vilka egenskaper alternativa ballastmaterial har. Förväntat resultat är ett underlag som gör det enklare att dimensionera vägar med alternativa ballastmaterial.

Eftersom ämnesområdet är brett har en del avgränsningar gjorts för denna licentiatavhandling. De har gjorts både med avseende på användningsområde, material och egenskaper. Till exempel behandlas bara tre material och bara användning i obundna väglager. Avgränsningarna beskrivs och motiveras nedan.

### 2.1 Användningsområden

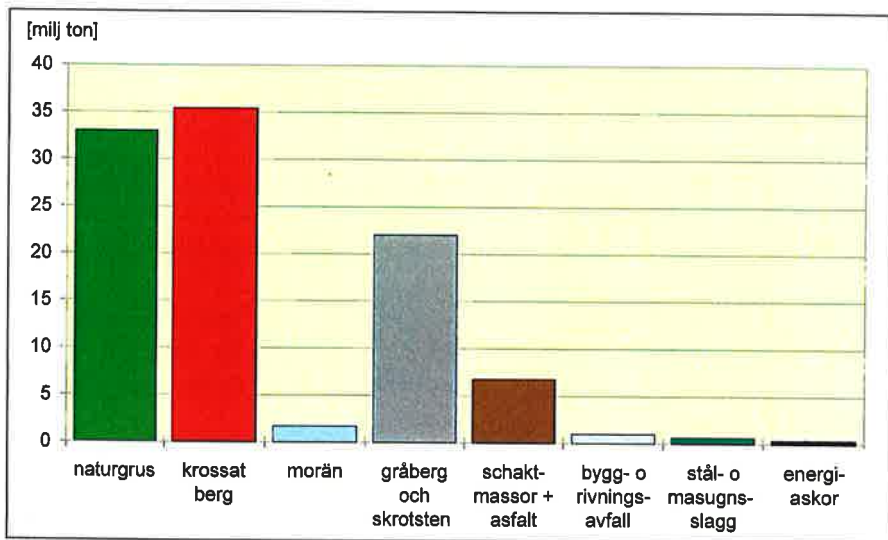
Här behandlas bara användning av alternativa material i **vägkonstruktioner** och där enbart i **obundna** lager, alltså inte i asfaltbundna eller cementbundna tillämpningar.



Motivet till denna avgränsning är att det finns en tradition med tjocka obundna lager i svenska vägar, vilket innebär en stor potential för besparing av naturmaterial. Dessutom har användning av restprodukter i bundna tillämpningar studerats under flera år i utlandet. Däremot är referenser som behandlar obundna tillämpningar mer sällsynta.

## 2.2 Material

Varje år uppkommer ca 30 miljoner ton restprodukter som är tänkbara som ballastmaterial (Arell, 1997). Fördelningen mellan olika restprodukter visas i figur 2-1. För jämförelse finns också produktionen av konventionella ballastmaterial – naturgrus, krossat berg och morän – angiven. Det måste påpekas att denna varierar mellan olika år beroende på infrastruktursatsningar och bostadsbyggande. 1994 producerades 83 miljoner ton ballastmaterial varav 60% användes inom vägsektorn (Vägverket, 1996). 1998 var motsvarande siffror 75 miljoner ton och 55% (Vägverket, 2000).



**Figur 2-1** Konventionella och tänkbara alternativa ballastmaterial. "Producerad" mängd per år. Med energiaskor avses rester från kol- och avfallsförbränning med energiutvinning. (data från SGU 1996, RVF 1997 och Arell 1997)

Såsom framgår av figur 2-1 är mängden restprodukter liten i förhållande till mängden konventionella ballastmaterial. Dessutom utgörs den största delen av gråberg, en restprodukt från våra gruvor vilken uppstår på platser där vägar inte byggs. Trots detta kan restprodukterna bli ett intressant alternativ, speciellt i grus- och bergfattiga regioner. Det är till exempel fullt möjligt att gruvavfallet i norr fraktas med järnväg och båt från Kiruna och blir ballastmaterial i södra Sverige. Export av svenskt gruvavfall är också en möjlighet som redan utnyttjas i viss omfattning. (Boverket, 1998).

De övriga restprodukterna i figur 2-1 fördelar sig lite olika över landet. Rester från bygg- och anläggningsbranschen uppstår här och där beroende på byggverksamheten, medan rester från stenbrott, stålverk och förbränningsanläggningar är lokaliserade till en viss plats. Det gör att fast de svarar för en liten "produktion" sett till hela landets behov så kan de vara intressanta alternativ i sin region.

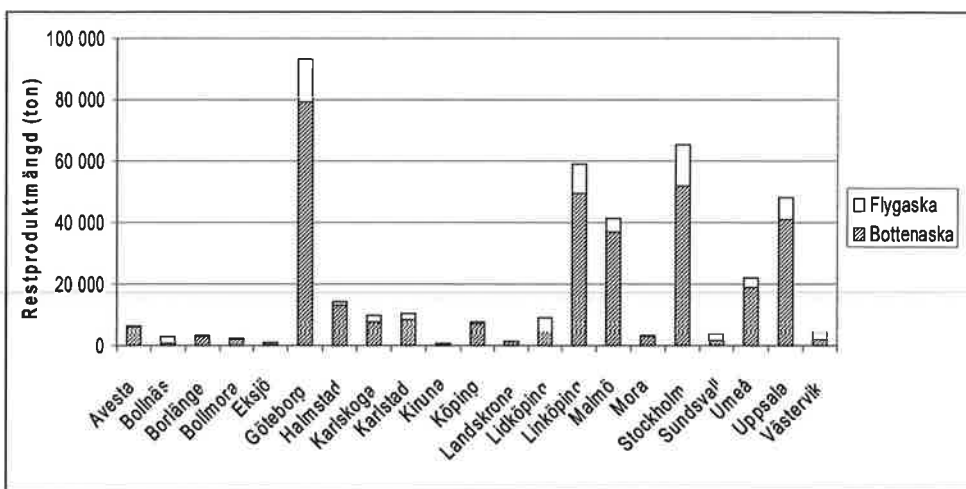
I detta sammanhang är det intressant att se vilka av de tänkbara alternativa ballastmaterialen som berörs av den nyligen införda avfallsskatten. För det första omfattas bara avfall som förs in till en anläggning där mer än 50 ton avfall per år slutligen deponeras eller förvaras under längre tid än tre år. För det andra är vissa typer av avfall befriade från skatt, t.ex. gråberg samt stål- och masugnsslagg. Däremot är energiaskor, asfalt och bygg- och rivningsavfall skattepliktigt avfall. Skrotsten och schaktmassor är skattebefriade under förutsättning att deponeringen av dessa material görs på en anläggning som inte tar emot skattepliktigt avfall också, t.ex. bygg- och rivningsavfall.

Bland alla de restprodukter som kan vara aktuella som obundna vägmateriäl har *slaggrus*, *krossad betong* och *hyttsten* valts ut för närmare studier i detta projekt. Slaggrus är en sorts energiaska, krossad betong en typ av bygg- och rivningsavfall och hyttsten en typ av masugnsslagg. De har valts med ledning av förväntad användningsmöjlighet, tillgänglig mängd och spridning över landet samt avnämarnas önskemål. Alla tre restprodukterna används inom väg- och anläggningssammanhang i andra europeiska länder (se kapitel 12).

De tre valda materialen beskrivs kortfattat här nedan.

**Slaggrus** är en restprodukt från sopförbränning. Det är renhållningsbranschens produktnamn på bottenaska som förädlats på så sätt att magnetiskt material och material större än 50 mm sorterats bort och därefter har askan lagrats utomhus i minst 6 mån. Lagringen innebär att en del kemiska reaktioner hinner ske, vilket är gynnsamt för de vägtekniska egenskaperna och lakningsegenskaperna. Egentligen är det ingen slag eftersom det inte har bildats av någon smälta som till exempel stålslagg. Sorterad och lagrad sopförbränningsrest är en bättre beskrivning.

Det är viktigt att det bara är bottenaska som används, eftersom flygaska som avskiljs från rökgaserna innehåller mycket mer föroreningar. I figur 2-2 anges fördelningen mellan flyg- och bottenaska vid de svenska förbränningsanläggningarna. Av figuren kan också utläsas var anläggningarna är lokaliserade.



**Figur 2-2** Restprodukter från svenska avfallsförbränningsanläggningar 1997 (data från RVF, 1997)

Det framgår att anläggningarna är spridda över hela landet men att de flesta är mycket små. Naturligt nog ligger de fem största i anslutning till storstadsområdena. Totalt kan ca 400 000 ton slaggrus "produceras" varje år.

Med **krossad betong** menas här dels rivningsbetong från rivning av byggnader och anläggningar, dels restbetong från betong- eller betongvaruproduktion. I båda fallen kan betongen krossas till önskvärd kornstorlek.

Mängden rivningsbetong och restbetong som uppstår är svår att beräkna. Arell beräknade den till mellan 0,3 och 3 miljoner ton per år varav ca 40 000 ton är restbetong från betongfabriker (Arell, 1997). Det är också svårt att förutse var rivningsbetongen kommer att uppstå. Däremot är produktionsplatserna för restbetong kända eftersom de sammanfaller med lokaliseringen av betong- och betongvarufabriker.

**Hyttsten** är en restprodukt från järnframställning. Det är marknadsnamnet för luftkyld masugnsslagg. Vid tillverkning av råjärn i masugnen utgörs råvarorna av järnmalmspellet och koks från stenkol. Dessutom tillförs kalk som slaggbildare för att i smält form ta hand om föroreningarna i järnråvaran. Efter kylningen kan masugnsslaggen krossas till hyttsten i valfri kornstorlek. Om slaggen i stället kyls i vatten går kylningen fortare och resultatet blir granulerad masugnsslagg eller hyttsand. Denna är finkornigare än hyttstenen och behandlas inte här.

Masugnar finns på två orter i Sverige – Luleå och Oxelösund. I Luleå uppstår årligen ca 230 000 ton hyttsten och i Oxelösund ca 170 000 ton.

Ett annat material har också studerats inom ramen för detta projekt. Det är s.k. **schaktmassor**. Resultatet av den studien har redovisats separat (Svensson, 1999c) och ingår inte i licentiatavhandlingen.

## 2.3 Egenskaper

Enligt avsnitt 2.1 koncentreras projektet till användning av alternativa material i obundna väglager. Därför är det naturligt att studera de egenskaper som är relevanta för obundna ballastmaterial. Dessa finns bl.a. angivna i VÄG 94, som dessutom i flera avsnitt beskriver vilka ytterligare egenskaper som ska bestämmas hos restprodukter för att de ska kunna användas som vägmateriäl. I bilaga 3 finns samtliga dessa avsnitt sammanställda. Där finns även motsvarande avsnitt i ATB VÄG som från och med 2001-01-01 ersätter VÄG 94. Den nya ATB:n medför inga större förändringar när det gäller restprodukter.

Här följer några citat ur VÄG 94. Det första är det som oftast har refererats till i restproduktsammanhang.

”Restprodukter som till exempel slagg får användas om de accepteras av beställaren och:

- är acceptabla ur miljö- och hälsosynpunkt
- inte ger problem vid återanvändning, deponering eller destruktion
- kan visas ha minst lika goda egenskaper ur bl. a. bärförmåge-, stabilitets- och beständighetssynpunkt som de material de ersätter.

Restprodukter skall analyseras med avseende på kemisk sammansättning och risk för urlakning. Krav på placering och eventuella skyddsåtgärder skall utredas. Samråd skall ske med länsstyrelsens naturvårdsenhet.” (utdrag ur VÄG 94 1.3.4 Hygien, hälsa och miljö.)

Det finns fler avsnitt i VÄG 94, som behandlar restprodukter, se nedan:

”För klassificering av syntetiska material, restmaterial, slaggar etc. skall särskild utredning för bestämning av stabilitet, hållfasthet, beständighet och eventuell miljöpåverkan utföras, se 1.3.4.” (utdrag ur VÄG 94 1.4.2.3 Dimensioneringsföretsättningar. Indelning av jord och bergmaterial.)

”Val av tjälfarlighetsklass för särskilda underlag skall visas med särskild utredning.... Materialtyp för andra särskilda underlag skall visas med särskild utredning.” (utdrag ur VÄG 94 3.5.7 Konstruktiv utformning av överbyggnad. Särskilda underlag).

Texten om ”andra särskilda underlag” avser andra underlag än lättklinker, cellplast med betongplatta eller skumbetong.

Förutom de egenskaper som är aktuella för alla obundna vägmateriäl och de egenskaper som anges specifikt för restprodukter i VÄG 94, finns det speciella egenskaper hos de valda restprodukterna som är intressanta i vägbyggnadssammanhang. Hållfasthetstillväxt samt låg värmekonduktivitet är två sådana egenskaper som har dokumenterats i litteraturen.

Med ovanstående som bakgrund behandlas följande egenskaper i avhandlingen

- bärförmåga, styvhet och stabilitet,

- tjällyftningsbenägenhet,
- beständighet mot mekanisk påverkan och klimatpåverkan,
- miljöpåverkan (utlakning av miljöpåverkande ämnen),
- hållfasthetstillväxt och
- värmekonduktivitet.

Beständigheten är en central egenskap. För att de övriga egenskaperna, till exempel bärförmågan, ska *bibehållas* under vägens livstid måste kornstorlek och kornform bibehållas, dvs. materialet ska vara *beständigt* både mot mekanisk påverkan och klimat.

### 3 Metodik för genomförandet

Arbetet har genomförts i form av följande aktiviteter

- kunskapsinhämtning genom litteraturstudier och studiebesök,
- utvärdering av tidigare svenska erfarenheter och översättning av utländska erfarenheter, vilket lett fram till identifiering av områden med kunskapsbrist,
- experimentellt arbete såsom undersökning av en gammal provväg, planering och utvärdering av nya fältförsök samt planering och utvärdering av nya laborieförsök och slutligen
- kunskapspridning i form av föredrag och publikationer.

#### 3.1 Kunskapsinhämtning

**Relevant litteratur** har sökts med hjälp av VTI:s Biblioteks- och Informationscenter. Sökningen gjordes i databasen Roadline, som är Nordens största bibliotekskatalog inom väg- och transportområdet samt i de två stora internationella databaserna International Road Research Documentation, IRRD, och Transport Research Information Services, TRIS. IRRD administreras av Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD, och TRIS av amerikanska Transportation Research Board, TRB.

Litteratur har också lånats av min kollega Peet Höbeda som har gjort flera kvalificerade utredningar inom området tidigare.

Litteratur om hyttsten har inte sökts hittills utan kommer att göras i det fortsatta arbetet.

**Studiebesök** har gjorts på sopförbränningsanläggningarna i Malmö, Linköping och Umeå. Anläggningar för återvinning av betong och rivningsmaterial har besökts i Malmö och Stockholm. En av Sveriges anläggningar som genererar hyttsten, i Oxelösund, har studerats. Dessutom har en återvinningsanläggning som tar emot schaktmassor och liknande i Ängelholm besökts.

Information om **pågående projekt i andra länder** har samlats in via min projektledare Hans G Johansson och via egna kontakter i samband med studieresor.

**Studieresor** har gjorts till Frankrike, Tyskland och Nederländerna. I Frankrike besöktes Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC, i Bouguenais utanför Nantes. Besöket gjordes i samband med en europeisk workshop 18–19 mars 1999 för slutanvändare av alternativa vägmateriäl. Vid workshopen diskuterades innehållet i tre EU-finansierade projekt, ALT-MAT (alternativa materiäl i vägar), POLMIT (begränsning av vägtrafikens miljöpåverkan) och COURAGE (construction with unbound road aggregates in Europe). Ett studiebesök gjordes också på en sopförbränningsanläggning utanför Nantes.

I Tyskland besöktes BAST som står för Bundesanstalt für Strassenwesen och är ungefär en tysk motsvarighet till VTI. Här inhämtades aktuell FoU samt regler för och erfarenheter av restproduktanvändning. Dessutom gjordes studiebesök på återvinningsstationer för asfalt och rivningsmateriäl.

I Nederländerna besöktes CROW, som kan översättas med Information and Technology Center for Transport and Infrastructure. Dessutom besöktes VROM (Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment) samt Ministry of Transport, Public Works and Water Management. Även här inhämtades aktuell FoU samt regler för och erfarenheter av restproduktanvändning. Studiebesök gjordes också på en återvinningsstation för rivningsmateriäl, ett asfaltverk samt två vägbyggen med sopförbränningsaska och en anläggning för behandling av förorenad jord.

## 3.2 Kunskapsluckor som identifierats

I samband med informationssökandet har några områden identifierats där kunskapen är otillräcklig.

Enligt en OECD-rapport om återvinningsstrategier för vägbyggnadsbranschen, behövs mer forskning om både *regler*, *testmetoder*, *karaktisering av restprodukter*, *dimensioneringsmetoder* och viktigast av allt *långtidfunktionen hos restprodukter* (OECD, 1997).

Arell (1997) nämner tre områden för fortsatt forskning, nämligen *tjällyftning*, *permanenta deformationer* hos ballastmateriäl samt *testmetoder för bedömning av miljöpåverkan*. När det gäller tjällyftning nämns särskilt frågan ifall de självbindande egenskaperna hos krossad betong kvarstår efter en eller flera tjälcykler. För området permanenta deformationer efterlyses en generell metod för att med hjälp av begränsade provningar kunna avgöra om ett visst materiäl deformeras mer än tillåtet, givet en antagen trafikbelastning och användning på ett visst djup från vägytan. Inom området miljöpåverkan efterfrågas generella samband mellan laboratorieresultat och fältresultat samt en generell, enkel och billig metod, på vars resultat en riskvärdering mot olika omgivningsförhållanden kan grundas.

I Vägverkets handlingsplan för kretsloppsanpassad väghållning efterlyses ett *nationellt framtaget underlag för bedömning av miljökonsekvenser* från olika former av vägmateriäl (Vägverket, 1996). Samma rapport pekar på avsaknaden

av *kriterier* för att utvärdera olika sekundära materials och restprodukters lämplighet för användning i vägar.

Nunes, som i sin doktorsavhandling (Nunes, 1997) redovisar resultat från tre-axialprovning av restprodukter, rekommenderar fortsatt forskning av samma restprodukter men med andra ursprung för att fastställa *variabiliteten* (gäller t.ex. kolaskor). Han rekommenderar också att undersökningarna utvidgas till andra restprodukter (hyttsten ingick i hans studie, men inte krossad betong och slaggrus). Nunes påpekar att *funktionsbaserade regler*, som bl.a. baseras på laboratoriebestämda styvhetsmoduler bör tas fram. Vidare efterlyser han matematiska modeller som beskriver *permanenta deformationer* hos obundna material i laboratoriemiljö samt tillämpning av dessa modeller i fält.

Förutom det allmänna syftet att öka kunskapen om de tre utvalda restprodukternas egenskaper har därför följande områden valts ut för närmare studier i detta projekt.

1. **Långtidsegenskaper** hos de utvalda restprodukterna.
2. **Metodik för funktionsbaserad dimensionering** av vägar.
3. **Variabilitet** eller heterogenitet hos till exempel slaggrus och betong. Eftersom projektet ska bidra till förenklad dimensionering av svenska vägar med alternativa ballastmaterial har ytterligare två forskningsområden valts ut.
4. **Hållfasthetstillväxt** hos obundna lager av de återvunna materialen samt
5. **värmekonduktivitet** främst hos slaggrus och hyttsten.

Dessa specialegenskaper studeras för att bestämma vad det är som händer, om processen kan påverkas och hur egenskapen kan utnyttjas i vägbygget.

### 3.3 Experimentellt arbete

#### Fältförsök

Flera provvägar och försökssträckor anlades med stor optimism för 10–15 år sedan. En av dessa provvägar har studerats speciellt inom projektet. Den byggdes 1987 i Linköping och har en sträcka där **slaggrus** använts i förstärkningslagret. På denna väg har uppföljande mätningar genomförts. Dels har tjälnedträngningen följts under två vintrar, dels har fallviktsmätning utförts. Mätningarna gjordes för att konstatera eventuella förändringar i tjälnedträngning eller i konstruktionens styvhet med tiden. Inom ramen för ett annat projekt har prov tagits på förstärkningslagermaterialet och eventuella förändringar med avseende på kornstorleksfördelning och lakbarhet har undersökts.

En ny provväg har planerats och studerats speciellt inom detta projekt. Den ligger i Törringe utanför Malmö, är byggd 1998, och har bland annat **slaggrus** och **krossad betong** i förstärkningslagret och på vissa sträckor också krossad betong i bärlagret. Förhoppningsvis kan sträckornas funktion följas under minst tre år. Hittills har upprepade fallviktsmätningar utförts, tjälnedträngningen registrerats samt lakförsök på ingående material utförts. Inom ramen för andra projekt görs spårdjupsmätning och statisk plattbelastning.

Vid båda provvägarna finns referenssträckor byggda med konventionellt material. Syftet med undersökningarna är att undersöka långtidsegenskaperna hos krossad betong och slaggrus samt att jämföra provsträckornas utveckling med motsvarande för referenssträckorna.

Förutom dessa provvägar har data från VTI:s övriga fältförsök med **krossad betong** och **hyttsten** kunnat analyseras inom projektet.

## Laboratorieförsök

Inom detta projekt har en större undersökning av **slaggrus** från olika svenska sopförbränningsanläggningar genomförts. Undersökningarna har omfattat bestämning av kornstorleksfördelning, innehållsanalys genom okulär besiktning samt utvärdering av styvhet och bärförmåga med hjälp av dynamiska treaxialförsök. Stora variationer i deformationsegenskaper förväntades beroende på säsongsvariationer i avfallsets sammansättning. Även olika förbränningsanläggningar förväntades inverka på de mekaniska egenskaperna. Därför omfattade undersökningen slaggrus från fyra anläggningar och fyra tidsperioder under året.

På samma material har Statens geotekniska institut, SGI, undersökt packningsegenskaper samt miljöpåverkande egenskaper genom lakförsök. Resultatet av dessa undersökningar redovisas separat (Fällman et al., 1999).

**Krossad betong** har undersökts i ett flertal projekt vid VTI, då optimal vattenkvot och maximal torrdensitet samt styvhet och stabilitet vid dynamiskt treaxialförsök har bestämts. Resultat i form av "rådata" från de undersökningarna har utvärderats inom detta projekt och ligger till grund för en del av innehållet i kapitel 16.

**Hyttsten** har hittills inte undersökts speciellt för detta projekt. I det fortsatta arbetet ingår analyser av resultat från planerade laboratorieprovningar.

## 3.4 Kunskapsspridning

Resultat från projektet har rapporterats vid ett antal föredrag, bl.a.

- SBUF:s konferens Bättre teknik på väg, Arlanda, 5 februari 1998. Föredragets titel: "Kritiska egenskaper hos återvunnet material".
- Naturvårdsverkets/GMF:s miljöutbildning, Stockholm, 23–24 mars samt 14 maj 1998. Föredragets titel: "Återvinning" (Arm, 1998a).
- Workshop på Naturvårdsverkets/ Sydvästra Skånes Avfallsaktiebolag SYSAV:s seminarium om användning av alternativa material som fyllnings- och vägbyggnadsmaterial, Lund 29 oktober 1998. Föredragets titel: "Produktkrav – funktionella egenskaper. Nuläget för alternativa material" (Arm, 2000a).
- Länsstyrelsens seminarium om "Ballastmaterial i kretslopp", Umeå 10–11 november 1998. Föredragets titel: "Slaggrus – ett vägbyggnadsmaterial?"



- Transportforum 1999 (VTI:s och KFB:s forskardagar), Linköping 13–14 januari 1999. Föredragets titel ”Alternativa material i vägkonstruktioner – resultat från laboratorium och fält”.
- PAFOG:s (Pavement foundation group) möte i Lissabon, 23 januari 1999. Föredragets titel ”Triaxial testing of MSWI bottom ash, a comparison with sand”.
- Föreläsning vid Lunds Tekniska Högskola, Lund 17 februari, 1999. Föreläsningens titel ”Alternativa vägmateriäl”.
- Seminarium för FHWA International technology scanning program for Recycled materials use in highway environments: Uses, technologies and policies (en USA-delegation med uppgift att studera restproduktsanvändningen inom vägbyggandet i Europa), Linköping 13 september, 1999. Föredragets titel ”Comparison of alternative materials and natural materials by using triaxial tests”.
- Symposium om Avfallsförbränning, Örebro, 18–19 september 1999. Föredragets titel ”Aska som vägbyggnadsmateriäl”.
- SBUF:s konferens Bättre teknik på väg, Arlanda, 10 februari 2000. Föredragets titel: ”Vad händer med kvaliteten när vi bygger med alternativa ballastmaterieäl?”.
- Föreläsning vid Lunds Tekniska Högskola, Lund 16 februari, 2000. Föreläsningens titel ”Alternativa vägmateriäl”.
- International conference on the science and engineering of recycling for environmental protection, Waste materials in construction, WASCON 2000, Harrogate, England 31 maj–2 juni 2000. Föredragets titel ”Variation in mechanical properties of MSW incinerator bottom ash: Results from triaxial tests.” (Arm, 2000c). Återges i sin helhet i bilaga 1.
- International conference on the science and engineering of recycling for environmental protection, Waste materials in construction, WASCON 2000, Harrogate, England 31 maj–2 juni 2000. Föredragets titel ”Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests.” (Arm, 2000d). Återges i sin helhet i bilaga 2. Kommer som artikel i tidskriften Waste Management.

Arbetet har dessutom resulterat i en artikel i AMA-nytt 1/98 med titeln ”Användning av återvunnen betong på väg” (Arm, 1998b) samt i en artikel i Vägingenjören nr 3 Sept 2000 med titeln ”Alternativa material i vägkonstruktioner” (Arm, 2000e).





# II **Materialegenskaper och provningsmetoder**

Denna del beskriver i tur och ordning de egenskaper som har studerats. Egenskaperna och deras betydelse för funktionen hos ett obundet vägmateriel beskrivs i denna del, men resultat från provningar av slaggrus, krossad betong och hyttsten behandlas i del IV.

För varje egenskap beskrivs också befintliga provningsmetoder, både standardiserade och icke standardiserade. Diskussion kring lämpligheten hos de standardiserade provningsmetoderna förs i vissa fall, speciellt för restprodukter men också för övriga obundna material.

- 4 Deformation vid belastning 49**
  - 4.1 Provningsmetoder 49
  
- 5 Hållfasthetstillväxt 62**
  - 5.1 Hållfasthetstillväxt i krossad betong 62
  - 5.2 Provningsmetoder 67
  
- 6 Organisk halt 67**
  - 6.1 Provningsmetoder 67
  
- 7 Beständighet 70**
  - 7.1 Beständighet mot mekanisk påverkan 70
  - 7.2 Beständighet mot klimatpåverkan 81
  
- 8 Permeabilitet 84**
  
- 9 Tjällyftningsbenägenhet 85**
  - 9.1 Provningsmetoder i laboratorium 87
  - 9.2 Mätning av tjällyftning i fält 90
  
- 10 Värmekonduktivitet 91**
  - 10.1 Provningsmetoder 92
  
- 11 Miljöpåverkan (utlakning) 96**
  - 11.1 Provningsmetoder i laboratorium 100
  - 11.2 Fullskaleförsök 106
  - 11.3 Värdering av lakningsresultat 108
  - 11.4 Slutsatser – miljöpåverkan 112

## 4 Deformation vid belastning

Hur mycket ett obundet ballastmaterial deformeras vid belastning beror på dess styvhet och stabilitet. **Styvheten** eller lastspridningsförmågan är ett mått på motståndet mot elastiska deformationer och ger en elasticitetsmodul (E-modul) eller resilientmodul att använda vid dimensioneringen av överbyggnaden. **Stabiliteten** är ett mått på förmågan att motstå permanenta deformationer. Ett annat begrepp är **bärförmågan**. Den definieras här som den last ett lager av materialet kan bära utan att deformeras mer än tillåtet. För att bestämma bärförmågan krävs alltså ett gränsvärde för deformationen. Lasten kan uttryckas som maximal vertikalspänning på nivån för det aktuella lagrets överyta. Den kan också uttryckas som ett visst avstånd från vägytan, erforderligt **läggningsdjup**, men då måste vissa antaganden göras om trafiklastens storlek samt ovanförliggande lagers tjocklek och styvhet. Härvid har bundna lager störst betydelse eftersom dessa har stor lastspridande förmåga.

Styvheten, stabiliteten och bärförmågan är beroende av bland annat packningsresultatet, som i sin tur beror på materialets kornstorleksfördelning och kornform (packningsredskapet och vattentillgången är inga materialparametrar). Kvaliteten hos finjorden, dvs. vilka mineral som ingår är också betydelsefull. Finjord definieras som material med maximalt 0,06 mm stora partiklar.

När det gäller kornstorleksfördelningen är både den största stenstorleken ( $d_{\max}$ ), finjordshalten och själva formen på kornstorleksfördelningskurvan betydelsefull. Kurvformen kan beskrivas med graderingstalet,  $c_u$ , som är kvoten mellan  $d_{60}$  och  $d_{10}$ .  $D_{60}$  innebär den sikt genom vilken 60 viktprocent av det siktade materialet passerar. Ett annat mått är krökningstalet,  $c_e$ , som är kvoten mellan  $d_{30}^2$  och  $(d_{60} \cdot d_{10})$ . För naturliga material har det visats att ju flackare kurvan är desto stabilare är materialet (Arm, 2000f).

För kornformen handlar det om runt eller kantigt och hur kantigt. Ett mer kantigt material kräver ett större packningsarbete, vilket i sin tur kan ge krossning och en ökning av finjordshalten. Ett material med runda korn är vanligtvis lätt att packa, men blir också mer instabilt än ett kantigt material.

En faktor som har visats vara mycket viktig för deformationsegenskaperna, speciellt hos finkorniga jordar, är vatteninnehållet (Arm, op. cit.).

En annan viktig faktor, som inte brukar vara något problem för konventionella material, men kan vara det för till exempel slaggrus, är innehållet av organiskt material. Organiskt material försämrar styvheten (se kapitel 6).

För att de nämnda egenskaperna, till exempel bärförmågan, ska *bibehållas* under vägens livstid måste kornstorlek och kornform bibehållas, dvs. materialet ska vara beständigt både mot mekanisk påverkan och klimat.

### 4.1 Provningsmetoder

Det har utvecklats en mängd metoder för att mäta deformationsegenskaper vid belastning. Här beskrivs två laboratoriemetoder och fyra fältmetoder.

Den ena laboratoriemetoden är California Bearing Ratio, CBR, en gammal och välkänd metod som är mycket spridd utomlands. Den andra är dynamiskt treaxialförsök, en nyare metod som används mer och mer, speciellt i funktionsprovningssammanhang.

Bland fältmetoderna beskrivs statisk plattbelastning samt provbelastning med fallvikt. Båda metoderna är standardiserade i Sverige och flera andra länder. Dessutom presenteras några mindre fältutrustningar som kan vara aktuella i byggskedet vid bedömning av uppnådd bärförmåga. Dessa är dynamisk konpenetrometer, DCP, samt ett antal minifallvikter av olika fabrikat.

Det sista avsnittet beskriver ett par indirekta metoder – sandekvivalentmetoden och metylenblåmetoden. De används i andra länder t.ex. Danmark för att bedöma finjordsegenskaper och är även europastandardiserade numera.

## **4.1.1 Belastning i laboratorium**

### **California Bearing Ratio, CBR**

CBR är en empirisk metod för att bedöma bärigheten i jord- eller stenmaterial. Det är den mest välkända metoden inom bärighetsområdet och den används ofta i utlandet, men inte i Sverige. Här klassificeras jordmaterial av tradition indirekt via kornstorleksfördelningen i stället. CBR utvecklades på 1930-talet av California State Highway Department i USA för bedömning av bärigheten hos undergrundsmaterial. Det finns numera flera standarder för metoden, en engelsk (BS 1377), två amerikanska (AASHTO T193-72 som sammanfaller med ASTM D1883) och nu senast även ett CEN-förslag (draft prEN WI 00227(412)). Det som skiljer de olika standarderna åt är provcylinderns storlek, packningsförfarandet och största kornstorleken.

CBR-värdet erhålls genom att jämföra den kraft som krävs för att uppnå 2,54 mm och 5,08 mm nedsjunkning i ett standardpackat jordmaterial med den kraft som krävs för samma nedsjunkning i ett standardmaterial. Förhållandet mellan dessa krafter uttrycks i procent.

Provningen enligt ASTM D1883 går till så att material packas in i en CBR-cylinder med diametern ca 150 mm och höjden ca 116 mm och belastas därefter i en tryckpress. Försöket kan antingen utföras vid naturlig vattenkvot eller på vattenmättat material. Ibland används överlast vid belastningen (figur 4-1).



**Figur 4-1** CBR-försök på laboratoriepäckat prov med överlast  
(Arm et al., 1995)

Överlasten anbringas med hjälp av ett antal belastningsringar vilka motsvarar den last som jordprovet utsätts för i sitt ursprungliga läge under en vägöverbyggnad. En belastningsring motsvarar ungefär 10 cm överbyggnad.

Belastning av jordprovet sker genom att en kolv med tvärsnittsarean  $19,6 \text{ cm}^2$  trycks ned i provet med en hastighet av  $1,27 \text{ mm/min}$ . Erforderlig kraft registreras och belastningen pågår tills dess att kolven tryckts ned minst  $5,08 \text{ mm}$  i provet. Vanligtvis sker nedtryckningen till ca  $8 \text{ mm}$  djup med tanke på eventuella korrigeringar vid utvärderingen. Efter utförd belastning vägs materialet och torckas, för bestämning av vattenkvot och torrdensitet.

Ur plottade kraft-deformationsdiagram beräknas CBR-värdet. Om CBR-värdet vid  $5,08 \text{ mm}$  nedsjunkning är större än vid  $2,54 \text{ mm}$  görs ytterligare en CBR-bestämning. Om CBR-värdet vid  $5,08 \text{ mm}$  fortfarande är större anges det som jordmaterialets CBR-värde. Beroende på jordmaterialet erhålls olika form på den uppritade kurvan. Ibland blir den konkav uppåt. Detta beror på ojämnheter i provets yta och kurvan korrigeras därför. Vid utvärderingen jämförs den erforderliga kraften för det s.k. standard- eller referensmaterialet med motsvarande för det material som provats. Beräkningen görs enligt följande

$$\text{CBR} = \frac{P_{\text{akt}}}{P_{\text{ref}}} \cdot 100 \quad (\%)$$

Där  $P_{\text{akt}}$  är kraften i det provade materialet och  $P_{\text{ref}}$  är den kraft som ger motsvarande nedtryckning i standardmaterialet ( $13,78 \text{ kN}$  för  $2,54 \text{ mm}$  och  $20,67 \text{ kN}$  för  $5,08 \text{ mm}$ ). CBR-värdet för ett svagt undergrundsmaterial kan vara så lågt som  $2\text{--}3\%$ , medan ett välgraderat grus kan få värden mellan  $30$  och  $80\%$  enligt the Aggregate Handbook (1991).

Observera att vid redovisning av CBR-resultat ska inte bara CBR-värdet anges, vilket ofta förekommer. Eftersom utförandet har stor inverkan på resultatet ska en fullständig rapport innehålla vilken standard som följts, utförande (packningsmetod, vattenmättnad, överlast etc.), jordart, vattenkvot, torr densitet, CBR i procent vid 2,54 mm samt CBR i procent vid 5,08 mm. Det är t.ex. stor skillnad på inpackning av provet enligt standard proctor och modifierad proctor.

Såsom nämnts tidigare är denna metod flitigt använd utanför Sverige, t.ex. i Storbritannien, USA m.fl. länder. I vissa av länderna klassificeras terrassmaterial med ledning av CBR-värde.

Efterhand som analytiska dimensioneringssystem har införts i dessa länder har man också etablerat empiriska samband mellan CBR-värde och elasticitetsmodul, bl.a. det enkla  $E = 10 \cdot \text{CBR}$  som används i Shell Pavement Design Manual (Shell, 1978). Sambanden har tagits fram därför att dimensioneringssystemen kräver en E-modul som indata. Mot sådana samband har emellertid riktats kritik. Kritiken grundar sig på att CBR-provningen ger upphov till en kombination av elastisk och permanent deformation medan E-modulen är en helt elastisk parameter. Eftersom CBR-metoden inte kan särskilja den elastiska deformationen från den permanenta och eftersom relationen mellan de två deformationstyperna kan skilja från material till material är *CBR-metoden olämplig för att bestämma E-moduler* (Sweere, 1990).

Det finns också en variant av CBR-utrustning för bestämning av CBR-värde in situ (ASTM D4429).

CBR-metoden utvecklades ursprungligen för finkorniga undergrundsmaterial och ger för sådana material ett relativt mått på hållfastheten, eller egentligen ett indirekt mått på skjuvhållfastheten. För grovkorniga material däremot är förhållandet mellan kornstorleken och provningsutrustningen för litet. Därför har standarderna anpassats. Sålunda anger ASTM D1883 att material större än 19 mm ska siktas bort före provning. Frågan är då vilket material som CBR-värdet beskriver, knappast det ursprungliga. Slutsatsen av detta resonemang är att metoden *inte bör användas för material med större kornstorlek än 19 mm*, varken restprodukter eller naturmaterial.

## Dynamiskt treaxialförsök

Vid ett dynamiskt treaxialförsök undersöks ett materials deformationsegenskaper under simulerade trafikförhållanden. Materialets styvhet eller lastspridningsförmåga kan bestämmas och resultatet beskrivs som en resilientmodul vid olika spänningsförhållanden. Den permanenta deformationen som uppstår i materialet vid en viss belastning kan också bestämmas och användas som ett mått på dess stabilitet. I detta projekt visas hur metoden även kan användas för att bestämma ett materials bärförmåga.

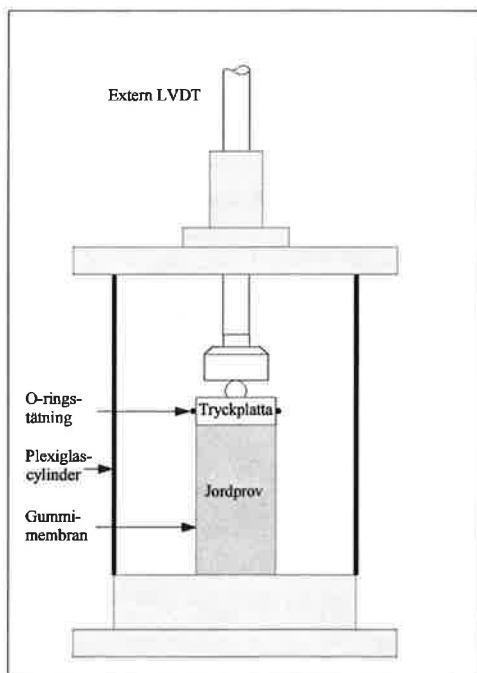
Det har visats att resilientmodulerna för både friktions- och kohesionsmaterial är spänningsberoende, fast på olika sätt (Ydrevik 1995, Arm et al. 1995). Resilientmodulen för ett friktionsmaterial ökar med stigande vertikalspänning medan den minskar för ett kohesionsmaterial. De s.k. blandmaterialen, till exempel silt,



hamnar ungefär mitt emellan, dvs. resilientmodulen är ganska opåverkad av vertikalspänningen.

*För spänningsberoende material är det därför viktigt att en angiven styvhet eller resilientmodul kopplas till ett belastningsförhållande.* Belastningsförhållandet kan anges på flera sätt t.ex. i form av vertikalspänningen, deviatorspänningen (skillnaden mellan vertikal- och horisontalspänningen), summan av huvudspänningarna (vertikalspänningen + dubbla horisontalspänningen) eller medelnormalspänningen (medelvärde av de tre huvudspänningarna) som verkar på materialet.

De svenska provningar som refereras till inom denna rapport har utförts på odränerade provkroppar med diametern 150 mm och höjden 300 mm i VTI:s servohydrauliska materialprovningssystem VMS (figur 4-2).



**Figur 4-2** Utrustning för dynamisk triaxialprovning (Arm et al., 1995)

Denna provstorlek tillåter provning av material med maximal kornstorlek upp till 32 mm.

Provkropparna har varit odränerade eftersom trafiklasten är en snabb belastning. Den är mycket snabbare än de långtidsbelastningar som används inom till exempel geotekniska provningar där dränerade prov är aktuella.

Provkropparna har tillverkats i ett lager med vibrerande packningsutrustning av fabrikat Vibrocompresseur i en speciell packningscylinder. Metoden är skonksam och dessutom kan både vattenkvot och densitet för det färdiga provet väljas. Efter inpackning har provkropparna pressats ur packningscylindern och försetts med ändplattor samt en tunn gummistrumpa runt mantelytan.

Efter ca ett dygns lagring har provkropparna placerats i en s.k. treaxialcell, där luft använts som tryckmedium för att skapa det horisontella sidotrycket eller kammartrycket som simulerar intilliggande jords stöd. Det dynamiska vertikalttrycket erhålls från hydraulcylindern och simulerar trafiklastens inverkan på provet. Den dynamiska lasten har varierats enligt en sinusformad våg med frekvensen 10 Hz utan viloperioder. Detta snabba förlopp ger en belastningstid på 0,1 s, vilket motsvarar en axelpassage i ca 70 km/tim.

Varje prov har utsatts för sju på varandra följande lastsekvenser, där varje ny sekvens inneburit en ökning av den dynamiska vertikalspänningen,  $\sigma_{v\ dyn}$ . Tre sekvenser har haft lågt kammartryck och fyra har haft högt kammartryck. Försöket har pågått tills dess att alla sekvenser är genomkörda eller tills dess att uppmätt permanent deformation vid en enskild sekvens uppgår till mer än 20 mm, varvid provet anses ha gått till "brott" och försöket stoppats automatiskt.

Under varje lastsekvens har värden för elastisk och permanent vertikaldeformation registrerats och lagrats vid ett visst förutbestämt antal belastningar, i princip var 100:e, var 1 000:e eller var 10 000:e belastning. Registrering av vertikaldeformationen har skett med hjälp av en externt monterad lägesgivare (LVDT = Linear Variable Differential Transducer), vilket innebär att deformationen har mätts över hela provets höjd. Horisontaldeformation har ej mätts. Deformationerna har räknats om till töjningar och från den elastiska töjningen,  $\epsilon_v$ , har resilientmodulen,  $M_r$ , beräknats enligt formeln:

$$M_r = \sigma_{v\ dyn} / \epsilon_v\ resilient$$

För varje materialvariant som undersökts har tre provkroppar tillverkats och provats och de värden som redovisas är medelvärden för dessa tre provkroppar.

*Fördelar:* Vid ett dynamiskt treaxialförsök undersöks ett materials deformationsegenskaper under simulerade trafikförhållanden. Den elastiska töjningen används för att beräkna resilientmodulen, som sedan kan användas som indata i analytiska dimensioneringssystem. Den ackumulerade permanenta deformationen kan användas för klassificeringsändamål. Eftersom provkroppen som utsätts för belastning består av hela det obundna materialet upp till en viss kornstorlek kan man påstå att det är materialets funktion som provas. Detta är mycket användbart när det är nya eller okända material som ska klassificeras. Metoden är välkänd både för finkorniga och grovkorniga material och en europanorm håller på att utarbetas (prEN 13286-7).

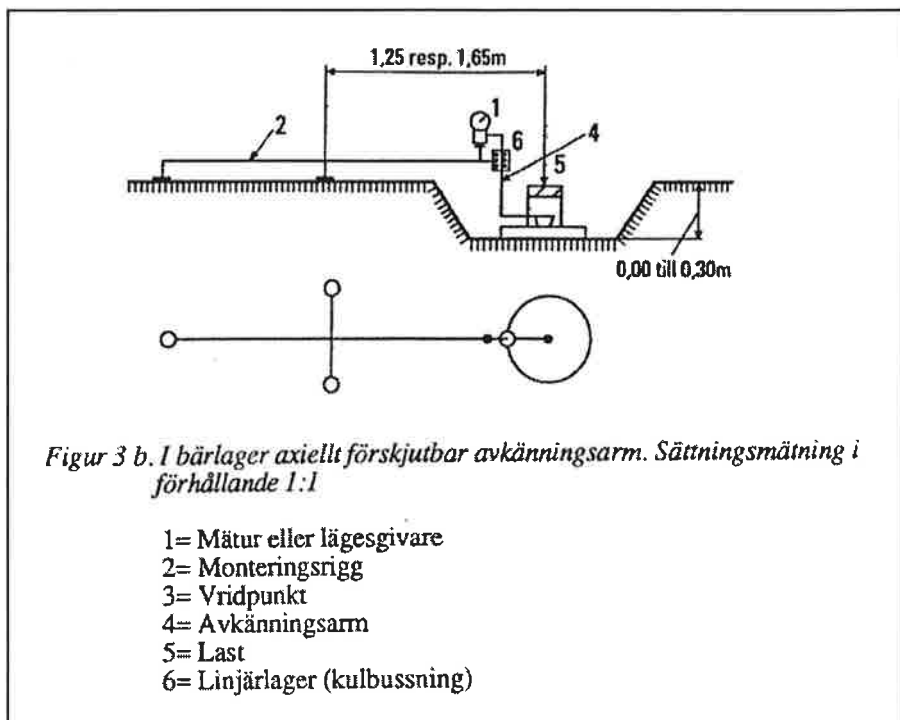
*Nackdelar:* Provningsutrustningen är relativt dyr och finns därför bara på ett fåtal laboratorier i Europa. I USA och Australien har man däremot satsat på metoden och har ett antal utrustningar utplacerade på olika laboratorier. Dessa används för provning av rutinkaraktär, medan forskningsinstitutet och universitetet har utrustningar för forskningsändamål. (Alavi et al., 1997), (AS, 1995).

## 4.1.2 Belastning i fält

### Statisk plattbelastning (VVMB 606:1993)

Vid statisk plattbelastning bestäms bl.a. deformationsmodulen,  $E_{v2}$ , som representerar styvheten eller deformationsmöjligheten hos det jordlager som belastas. Metoden har utvecklats i Tyskland och förekommer i bland annat tyska och finska regelverk för kontroll av uppnådd bärighet hos obundna lager. Även det svenska Vägverket har anammat metoden och bygger sin metodbeskrivning VVMB 606:1993 på den tyska normen DIN 18134.

Vid provningen belastas ett materiallager via en cirkulär platta och den resulterande sättningen registreras (figur 4-3). Sättningen kan antingen mätas i en punkt, via ett hål genom centrum av belastningsplattan, eller i tre punkter jämnt fördelade runt plattan.



Figur 4-3 Princip för statisk plattbelastning, enpunktsbestämning (VVMB 606:1993)

Belastningen är statisk och sättningen är en kombination av elastisk och plastisk deformation. Metoden kan användas på grovkorniga, blandkorniga samt styva och fasta finkorniga jordar. Plattdiametern kan vara 300, 600 eller 762 mm. Stegar större än ca  $\frac{1}{4}$  av belastningsplattans diameter får bara förekomma undantagsvis i ytskiktet.

Belastningen förs på i två omgångar eller serier med en mellanliggande avlastning. Varje belastningsserie utförs stegvis med hjälp av hydraulisk tryckut-

rustning med pålastning i sju respektive sex steg och avlastning i tre steg. Varje steg varar en viss tid. Den maximala lasten och/eller sättningen ska anpassas efter jordmaterialets egenskaper och belastningsplattans storlek. Vid plattdiameter 300 mm ska till exempel den maximala sättningen vara 5 mm och den maximala lasten resultera i spänningen 500 kPa på lagerytan.

För utförandet behövs ett belastningsmothåll som är 4,5 ton större än den nödvändiga högsta provlasten. Lämpligt mothåll är en lastad lastbil, traktor eller motsvarande.

Resultatet redovisas för varje mätpunkt i form av

- last-sättningsdiagram,
- deformationsmodulerna från den första och den andra belastningsserien,  $E_{v1}$  och  $E_{v2}$  samt
- kvoten mellan deformationsmodulerna  $E_{v2}/E_{v1}$ .

Observera att  $E_{v1}$  och  $E_{v2}$  är ytmoduler till skillnad från de lagermoduler som utvärderas från fallviktsmätning. Det innebär att de representerar jordlagret från markytan och ner så djupt som lasten inverkar.

Enligt VÄG 94 ska statisk plattbelastning användas för packningskontroll av färdigpackade obundna överbyggnadslager vid nybyggnad. Den ska också användas för kontroll av uppnådd terrassbärighet. Krav för olika lager anges i VÄG 94. Enligt metodbeskrivning 606:1993 kan metoden även användas i samband med dimensionering av påbyggnad, men hur anges inte.

*Fördelar* med metoden: Gammal och beprövad. Används i andra europeiska länder. Kvoten mellan de två deformationsmodulerna ger ett mått på hur väl packat materialet är.

*Nackdelar*: Kan inte användas på lösa finkorniga material. Ger en statisk last som inte liknar den tunga trafikens påverkan. Ger ytmoduler och inte lagermoduler, vilket innebär att svaga skikt i väggkroppen inte kan lokaliseras i efterhand. Är tidskrävande.

## Dynamic Cone Penetrometer, DCP

DCP är egentligen ett instrument för snabba insitu-undersökningar av uppbyggnaden hos befintliga vägar byggda med obundna material. Om vägens olika lager har skilda hållfastheter kan en DCP användas för bestämning av skiktgränser och lagertjocklekar. En normal mätning tar några minuter, men kan ge information som annars skulle kräva en provgrop.

Metoden beskrivs här därför att den möjligen kan bli aktuell som en fältmetod att relatera laboratoriebestämda deformationsegenskaper till. Chaddock & Brown (1995) rekommenderar att DCP används tillsammans med fallvikt och dynamisk plattbelastning inom ramen för funktionsbaserade regler. Fallvikt och dynamisk plattbelastning skulle användas för att lokalisera svaga partier i plan och DCP för att lokalisera svagheter på djupet.

Instrumentet består i princip av en stålstång med 16 mm diameter och med en kon av härdat stål i ena änden. Konen drivs ned i vägen eller marken med hjälp av en rörlig vikt som släpps från en viss fallhöjd ner på en "bottenplatta" (figur 4-4).



**Figur 4-4** Fältmätning med DCP  
(Arm et al., 1995)

VTI:s DCP består av en åtta kilos vikt med maximal fallhöjd 575 mm och en 60° kon med diametern 20 mm. Vid mätning slås konen successivt ned genom jordlagren som ska undersökas och antal slag och konens sjunkning i mm registreras. Bearbetning och uppritning av hela DCP-profilen görs med hjälp av dator.

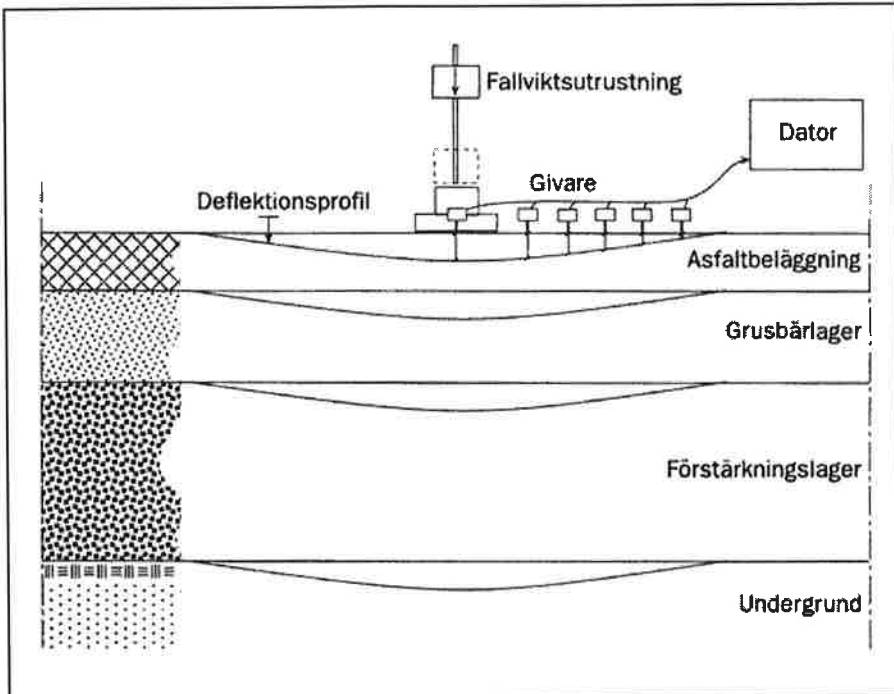
Flera undersökningar har gjorts för att översätta resultaten så att de kan jämföras med CBR-resultat (Van Vuuren, 1969), (Kleyn & Van Heerden, 1983) och (Smith & Pratt, 1983).

DCP:n kan drivas igenom både enkla och dubbla ytbehandlingar, men tjocka bituminösa beläggningar bör förböras. Man kan mäta kontinuerligt ned till 800 mm djup och med hjälp av förlängning ända ned till 1 200 mm. Det går bra att mäta i de flesta typer av friktionsjord eller lätt stabiliserade material. Det är svårare i jord med grova partiklar eller mycket tätt, stabiliserat eller krossat material.

### Provbelastning med fallviktsapparat (VVMB 112:1998)

Metoden benämns också fallviktsmätning och är ett hjälpmedel för att bedöma vägars styvhetsgenskaper.

Vid provbelastningen belastas vägytan av en vikt som får falla ner på en belastningsplatta som vilar på vägen. Under belastningen registreras vägytans maximala nedsjunkning eller deflektion av givare, dels i belastningscentrum, dels i ett antal punkter på valda avstånd därifrån (figur 4-5).



**Figur 4-5** Princip för provbelastning med fallviktsapparat (Carlsson, personlig kommunikation)

Vikten faller ner på ett fjädersystem ovanpå belastningsplattan och plattan överför kraftpulsens storlek beror av viktens massa, fallhöjden, fjädersystemets egenskaper och väggroppens styvhet.

Storleken på deflektionerna och hela "deflektionsprofilens" utseende är en funktion av styvheterna och tjocklekarna hos de lager som påverkas av belastningen. Deflektionen i belastningscentrum påverkas av alla lager inom lastens djupverkan, medan deflektionen under den yttersta givaren påverkas främst av förhållandena i undergrunden.

Observera att det finns fallviktsapparater av olika fabrikat och att deras egenskaper kan skilja en del. Därför bör *uppregade mätningar med syfte att följa upp ett vägobjekt utföras med apparater av samma konstruktion.*

Normalt utförs mätning i höger hjulspår för att fånga den tunga trafikens påverkan på vägen. På färdig vägyta används belastningen 50 kN. På andra ytor, t.ex. terrass, bör en mindre last användas. Vid bestämning av spänningsberoende egenskaper kan laster mellan 12,5 och 70 kN väljas. Normalt är belastningsplattans diameter 300 mm. Deflektionsgivarnas antal och placering väljs med tanke på vägkonstruktionen. *Vägverket rekommenderar generellt minst sex givare som placeras på följande avstånd från belastningscentrum: 0, 200, 300, 450, 600 och 900 mm.*

*Mätning ska göras på otjälad väg om inte syftet är att studera just tjällossning. Temperaturen i beläggningen och luften ska mätas vid belastningstillfället, beläggningstemperaturen flera gånger. Det beror på att en asfaltbeläggnings*

styvhet är temperaturberoende och mätresultaten behöver korrigeras till en referenstemperatur.

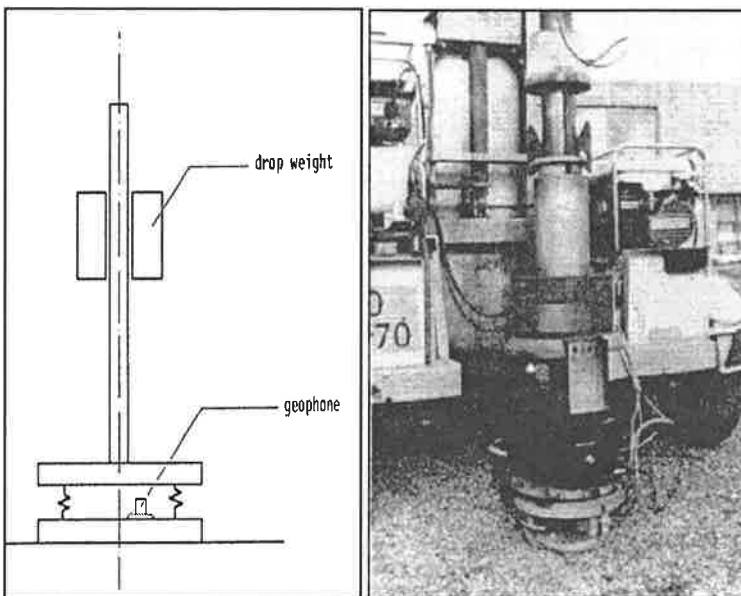
*Fördelar* med metoden: Använder en dynamisk last som simulerar en axelöverfart. Snabb, ickeförstörande provning där olika lagers egenskaper kan särskiljas. Fungerar bra på konstruktioner med alternativa material.

*Nackdelar* med metoden: Kan inte användas på för svagt underlag eftersom mätfordonet inte tar sig fram där.

## Dynamisk plattbelastning/minifallvikt

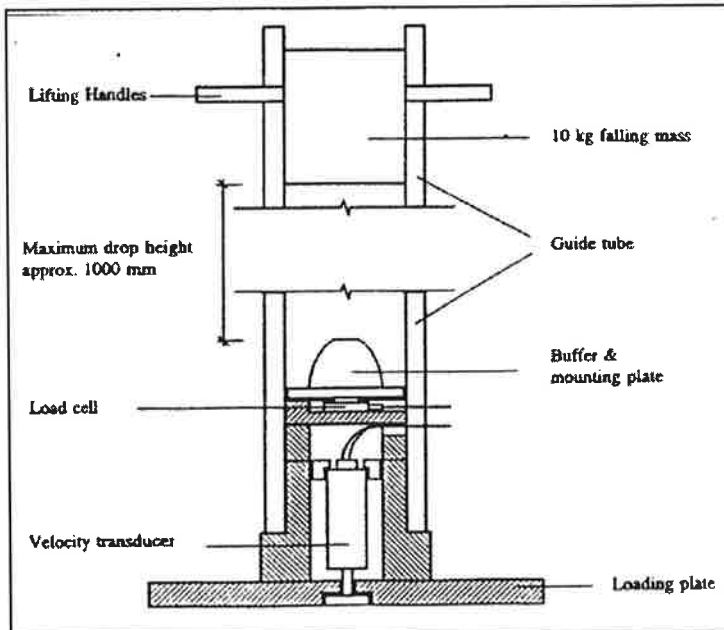
Här presenteras flera utrustningar under det gemensamma namnet minifallvikter. Metoden är en kombination av fallvikt och statisk plattbelastning. Principen är densamma som för statisk plattbelastning fast lasten är dynamisk. En klar skillnad och fördel är att mätningen går mycket snabbare än med statisk plattbelastning.

Sweere (1990) och Galjaard & Cools (1995) använde samma utrustning som för statisk plattbelastning, men bytte helt enkelt ut den statiska lasten mot en fallvikt (figur 4-6). I båda fallen blev erfarenheterna goda. Galjaard & Cools rekommenderar att metoden används för att bedöma styvheten hos en vägkonstruktion under byggnadstiden.



**Figur 4-6** Dynamisk plattbelastning i Nederländerna (Sweere, 1990)

Rogers et al. (1995) beskriver en utrustning som utvecklats vid TRL och kallas TRL Foundation Tester. Till skillnad från den holländska varianten är denna mer lik en fallvikt än en utrustning för statisk plattbelastning (figur 4-7).



*Figur 4-7 Tvärsnitt av TRL Foundation Tester (Rogers et al., 1995)*

TRL Foundation Tester kan ge belastningar mellan 20 och 400 kPa med en frekvens mellan 40 och 60 Hz. Mätresultaten har visat god överensstämmelse med resultat från fallviktmätningar (Chaddock & Brown, 1995) och utrustningen bedöms vara ett värdefullt hjälpmedel för att värdera styvheten hos vägterrasser insitu och på så sätt bidra till en snabbare kontrollprocess.

Det finns en finsk utrustning kallad LOADMAN som också hör hemma i denna samling med minifallvikter (figur 4-8).

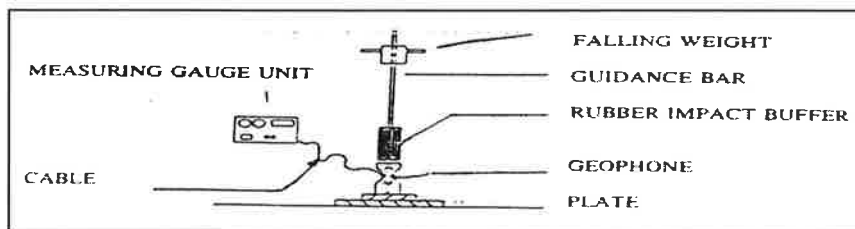


*Figur 4-8 Fältmätning med LOADMAN (Arm et al., 1995)*



LOADMAN är en typ av bärbar fallvikt, som konstruerats av AL-Engineering Oy i Espoo, Finland. Den kan användas för mätning på alla nivåer i väggkroppen och ger resultat i form av en dynamisk E-modul. VTI:s utrustning ger belastningar mellan 20 och 1 295 kPa beroende på vilken belastningsplatta och dämpning som används. Den är mycket smidig och enkel att använda och ger konsekventa värden, men behöver förbättras när det gäller ergonomin.

Tyskland har också utvecklat en minifallvikt. Den kallas Dynamisches Plattendruckgerät (figur 4-9) och ger mindre belastning än de övriga små fallvikterna. En 10 kg vikt med fallhöjden 1 m och plattdiametern 300 mm ger spänningen 90 kPa.



Figur 4-9 Skiss av Dynamisches Plattendruckgerät (Henneveld, 1995)

### 4.1.3 Indirekta metoder

#### Sandekvivalentmetoden (SS-EN 933-8)

Sandekvivalentmetoden används för att bestämma finmaterialkvaliteten i ett ballastmaterial. Normalt bestäms sandekvivalentvärdet, SE, för fraktionen 0–2 mm, men i en bilaga till standarden beskrivs hur det även kan bestämmas för fraktionen 0–4 mm. SE ger ett mått på mängden plastiskt (svällande) finmaterial.

Vid provning hålls materialet i en graderad cylinder och blandas med en liten mängd flockningsmedel som består av kalciumklorid, glycerin, formaldehydlösning och destillerat vatten. Blandningen skakas sedan så att eventuella lerbeläggningar på materialpartiklarna luckras upp. Denna omblandning medför att de finkorniga plastiska beståndsdelarna expanderar. Därefter spolas materialet med ytterligare flockningsmedel så att de fina kornen tvingas gå i suspension ovanför materialet. Efter 20 minuter mäts sedimentets och suspensionens höjd och sandekvivalentvärdet, SE, beräknas som sedimentets höjd uttryckt i procent av flockat material i cylindern. Det innebär att ett stort SE indikerar bra deformationsegenskaper.

Metoden har inte använts tidigare i Sverige. Den metod som närmast motsvarar sandekvivalentmetoden är sedimentering med hydrometermetoden (SS 02 71 24). Pihl & Milvang-Jensen (1996) påpekar i den danska anvisningen för slaggrus att sandekvivalentmetoden inte är lämplig för detta material. Påpekandet grundar sig på Schmiths undersökningar (1984) som visade att askpartiklarna flyter, troligtvis på grund av organiskt innehåll.

## Metylenblåmetoden (SS-EN 933-9)

Metylenblåabsorption eller MB-test är avsett som en enkel och snabb metod för att varna för förekomst av skadliga lerföroreningar, i synnerhet svällande lermineral, i ballast. Metoden bygger på principen att svällande lermineral absorberar och adsorberar metylenblålösning.

Provningsen innebär att ca 200 g ballastmaterial med kornstorlek 0–2 mm blandas med vatten. Sedan tillsätts metylenblålösning i småportioner tills blandningen inte kan adsorbere mer. Adsorptionen provas genom fläckförsök på ett filterpapper efter varje färgtillsats. Metylenblåvärdet, MB, beräknas som mängden färg som absorberats och adsorberats, uttryckt i gram per kilo provmaterial. MB för det svällande lermineralet kaolinit är ca 1–2 g/0,1 kg material.

## 5 Hållfasthetstillväxt

För vissa material är inte deformationsegenskaperna konstanta över tiden utan en ökning av styvheten på grund av kemiska bindningsreaktioner kan förväntas. Detta gäller s.k. puzzolana och hydrauliska material.

Enligt Betonghandbok Material (1997) är ett puzzolant material ett material som reagerar med upplöst kalciumhydroxid och bildar reaktionsprodukter. Dessa har hållfasthetsegenskaper och kemisk sammansättning som liknar reaktionsprodukterna från hydrauliska bindemedel. Puzzolanreaktioner är starkt temperaturberoende.

Enligt samma referens kännetecknas ett hydrauliskt bindemedel av att det hårdnar genom reaktion med vatten till en produkt som är beständig mot vatten. Hårdnandet sker såväl i luft som i vatten. Portlandcement och aluminatcement är exempel på hydrauliska bindemedel. *Ett icke hydrauliskt bindemedel däremot reagerar med vatten, men det hårdnar inte under vatten. Kalk, CaO, är ett exempel på detta. Kalk reagerar med vatten under stor volymexpansion, men kräver luftens koldioxid för att hårdna.*

Hållfasthetstillväxt har noterats både hos lager av krossad betong, hyttsten och slaggrus. I det följande avsnittet diskuteras vilka mekanismer som är aktuella vid hållfasthetstillväxt i krossad betong. Hållfasthetstillväxten i de båda andra materialen avses att studeras i fortsättningen av detta projekt.

### 5.1 Hållfasthetstillväxt i krossad betong

Enligt Arell (1997) som mycket kort citerar Hansen (1992) beror hållfasthetstillväxten i ett lager med packad krossad betong på att kalciumhydroxid som bildats vid den ursprungliga hydratationen, kommer i kontakt med luften och omvandlas till kalciumkarbonat. Reaktionen kallas karbonatisering. I praktiken uppträder finfraktionen i den krossade betongen som ett svagt kalkbruk.

Hansens slutsats bygger på följande försök. Krossad betong med kornstorlek 0–4 mm blandades med vatten till ett bruk med vct 0,50. Sedan delades blandningen i två delar. Den ena delen lagrades i 40°C i en tät box under 28 dygn. Denna behandling resulterade inte i någon som helst bindning och slutsatsen blev att det är inte ohydratiserat cement som orsakar bindningen i krossad betong. Den andra delen av blandningen lagrades i rumstemperatur i laboratoriet. Efter 28 dygn hade ett hårt men sprött ytskikt bildats. Detta ökade i tjocklek tills hela provet hade hårdnat efter ca 180 dygn. Därmed kunde slutsatsen om luftens inverkan dras.

Finmaterialct i krossad betong innehåller 2–4% kalciumhydroxid beroende på cementhalten i ursprungsbetongen enligt Hansen (op. cit.) som refererar till Hansen & Narud (1983).

Hansen konstaterar också att finmaterial från återvunnen betong är olämpligt för dräneringsändamål såvida inte material mindre än 2 mm siktas bort. Orsaken är den ovan beskrivna bindningen.

För att hållfasthetstillväxten i betonglagret ska gå snabbt bör betongen inte ha karboniserats i någon större omfattning tidigare, varken när den ingick i en betongkonstruktion eller låg som krossat material i upplag. Det kalciumkarbonat som bildas vid karboniseringen är nämligen svårslösligt och fördröjer fortsatta reaktioner.

### 5.1.1 Karbonatisering av betongkonstruktioner

Faktauppgifterna i detta avsnitt har hämtats ur Betonghandbok Material (1997).

Med karbonatisering av betong menas att koldioxid, som finns i luft, tränger in i betongen, kemiskt reagerar med hydroxyljonerna och bildar kalciumkarbonat.

Hydroxyljonerna i sin tur har bildats vid tillverkningen av betongen. De bildas vid cementets *hydratation*, dvs. reaktion med vatten, som sker i huvudsak enligt två mekanismer. För det första löser sig lättlösliga föreningar, i huvudsak alkalisulfater, och vattnet blir mättat av kalium-, natrium-, kalcium-, sulfat- och hydroxyljoner. Kristaller av kalciumhydroxid och ettringit faller ut. För det andra täcks cementkornens ytor av reaktionsprodukterna. Tätheten och sammansättningen hos dessa ytskikt bestämmer hur snabbt vattnet kan tränga in till oreagerat cement och bilda ytterligare reaktionsprodukter. Volymen mellan cementkornen fylls med reaktionsprodukter och cementpastan hårdnar.

Karboniseringen tränger in som en front i betongen och orsakar en kraftig sänkning av porlösningens pH-värde. Karboniseringshastigheten bestäms av

- diffusionshastigheten för koldioxid,  $\text{CO}_2$ ,
- betongens förmåga att absorbera  $\text{CO}_2$  samt av
- omgivningens  $\text{CO}_2$ -koncentration.

Diffusionsprocessen beror i sin tur på betongens sammansättning såsom vattencementtal (vct), cementhalt, cementsort och tillsatsmaterial samt på arbetsutförandet, dvs. bearbetning och hårdning. De olika parametrarna inverkar enligt följande:

*Vct* har stor betydelse för betongens täthet gentemot  $\text{CO}_2$ .

*Cementhalten* inverkar på mängden karbonatiserbar kalk.

*Cementets sammansättning* bestämmer mängden karbonatiserbart material samt betongens täthet gentemot CO<sub>2</sub>. När det gäller effekt av olika tillsatser ger Betonghandboken motstridande uppgifter. I kapitel 2 "Cement", skriver Johanson att cement med tillsatsmaterial av flygaska och slagg vanligtvis ger upphov till en snabbare karbonatisering i betong än rent portlandcement. I kapitel 22 "Armeringskorrosion" däremot, skriver Byfors och Tuutti att både slaggcementbetong och betong med flygaska och silikastoft i princip borde karbonatisera snabbare än betong tillverkad av enbart portlandcement, men att så inte blir fallet. Orsaken sägs vara att inverkan av den lägre halten karbonatiserbar kalk i dessa betongtyper kompenseras av inverkan av dess tätare struktur gentemot CO<sub>2</sub>. Man påpekar dock att slagg, flygaska och i någon mån silikastoft är material med varierande egenskaper beroende på deras ursprung och därför är det svårt att dra generella slutsatser beträffande dessa materials inverkan på karbonatiseringen.

*Hårdningen* åstadkommer ett tätt, homogent täckskikt och fördröjer därmed karbonatiseringen. Vattenhärdning ger det minsta karbonatiseringsdjupet medan luftlagring, dvs. ingen härdning alls, ger det största. Regn på den färdiga konstruktionen kan ses som en vattenhärdning i detta sammanhang.

Även *ballasten* påverkar. Sålunda har lättballastbetong generellt lägre karbonatiseringshastighet än normalbetong i samma hållfasthetsklass på grund av hög halt kalciumhydroxid och tätare cementpasta med mindre mikrosprickbildning. Emellertid leder fuktig eller förvattnad ballast till högt vct och därmed motsatt resultat.

## 5.1.2 Karbonatisering/kalkutfällning i lager av krossad betong

På uppdrag av Chalmers har VTI undersökt karbonatiseringens effekt på hållfasthetstillväxten i lager av *krossad* betong. Undersökningen bestod av CBR-försök på två typer av krossad betong med kornstorlek 0–19 mm (Svensson, 1999a). Den ena hade utsatts för medveten karbonatisering genom lagring i kolsyra, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, medan den andra var obehandlad. Försöken visade att bindningen går snabbare i en icke karbonatiserad betong. Båda materialen fick ökade CBR-värden under de tre månader som försöket pågick. Den obehandlade betongens värden ökade snabbt och planade sedan ut medan den karbonatiserade betongens värden ökade långsamt och efter ca tre månader uppnådde samma nivå som den obehandlade och till och med något högre. Resultaten från dessa undersökningar ligger till grund för en licentiatavhandling vid Chalmers (Karlsson, 2000).

Amerikanska studier i Minnesota, Michigan och Ohio visar att bärlager av krossad betong i kombination med regnvatten ger kalkutfällningar (Ford 1987, Muethel 1989 och Tamirisa 1993 citerade efter Bruinsma et al. 1997). Kalkutfällningen äger rum när bärlagrets porvatten når atmosfären genom dräneringsledning. Fenomenet har resulterat i igensättning av geotextilier, utfällningar i dräneringssystem samt mycket alkaliska dräneringsvatten. Därför har några stater begränsat användningen av dränerade bärlager som består av krossad betong.

Det är intressant att studera de amerikanska erfarenheterna närmare eftersom den kalkutfällning som ger problem i amerikanska dräneringssystem är samma fenomen som ger önskad hållfasthetstillväxt i svenska vägar med krossad betong i de obundna lagren.

Bruinsma et al. (op. cit.) drar paralleller med kalkutfällningar i naturen och sammanfattar kemin bakom det som äger rum i kalkstensgrottor enligt nedan.

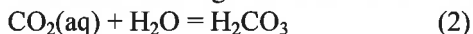
## Kalkutfällning i naturen

Utfällning av kalciumkarbonat,  $\text{CaCO}_3$ , är en av de vanligaste geokemiska processerna på jordytan. Kemiska reaktioner mellan vatten, atmosfären och kalkstensavlagringar resulterar i en andra utfällning av kalciumkarbonat.

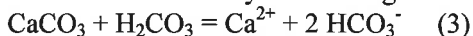
Regnvatten som tränger ned i jord är i jämvikt med koldioxid som finns i atmosfären enligt ekvation 1:



Koldioxid i lösning med vatten bildar kolsyra enligt ekvation 2:



När regnvatten passerar genom jord blir det isolerat från atmosfären och kan bli ännu mer rikt på kolsyra på grund av det höga partialtrycket av koldioxid som finns i organiska jordar. När detta vatten kommer i kontakt med kalksten är koncentrationen av kolsyra tillräcklig för att lösa kalk enligt ekvation 3:



Upplösningen av kalciumkarbonat skapar håligheter i kalkstenen. Slutligen kommer dessa håligheter via ett nätverk av kanaler i kontakt med atmosfären. När grundvatten kommer i kontakt med en grotta som har atmosfärkontakt för-gasas överflödigt koldioxid. Denna minskning i koldioxid resulterar i en minskning av kolsyra. Därför blir lösningen övermättad på kalk och utfällningen av stalaktiter och stalagmiter följer.

När kalciumhydroxid,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , upplöses ur krossad betong bildas kalkrikt vatten som faller ut kalciumkarbonat när det exponeras för atmosfären. I det här sammanhanget kan därför lager av krossad betong betraktas som människogjorda akvifärer liknande de naturliga kalkstensakvifärerna, eftersom båda innehåller kalkrikt vatten.

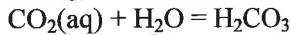
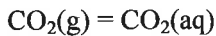
## Enkel modell för kalkutfällning i dräneringsvatten från lager av krossad betong (från Bruinsma et al., 1997)

För det första konstaterar man att det är cementpastan i betongen som är av primärt intresse vid kalkutfällningen. Vidare görs antagandet att kalciumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  är den dominerande reaktiva beståndsdelen. Kalciumhydroxid utgör visserligen bara 20–25% av hydratiserad portlandcement. Det är en biprodukt från hydratiseringsprocessen då kalcium-silica-hydrat C-S-II bildas, vilket är den största beståndsdelen (50–60%) av hårdnad cement. Antagandet motiveras ändå av att lösligheten hos ett cements silikatbeståndsdelar är mycket lägre än den är för karbonater och hydroxider. Därför är kalciumhydroxid mer trolig som  $\text{Ca}^{2+}$ -jondonator än C-S-H.

Liksom vid utfällning av kalk i kalkstensgrottor spelar koldioxid en viktig roll vid kalkutfällningen i krossad betong. Emellertid är det inte förgasningen av överflödigt koldioxid som är den utlösande faktorn, istället är bristen på CO<sub>2</sub> i bärlagret det primära (Tamirisa, 1993), (Muethel, 1989). Porvattnet i bärlagret kan sägas vara isolerat från atmosfärisk koldioxid genom den överliggande konstruktionen.

Kalciumhydroxid i den krossade betongen löses lätt när det exponeras för vatten och skapar då höga koncentrationer av Ca<sup>2+</sup>- och OH<sup>-</sup>-joner. Detta bevisas av de höga pH-värdena som rapporterats i flera laboratoriestudier (Tamirisa, op. cit.), (Muethel, op. cit.). Trots att ett överflöd av Ca<sup>2+</sup>-joner är tillgängliga i porvattenlösning blir bildningen av kalciumkarbonat begränsad utan en stor källa av karbonat, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>.

Till skillnad från jord innehåller krossad betong små mängder av organiskt material, vilket utesluter kolsyra som en stor karbonatdonator för vatten inne i bärlagret. Även om en del kolsyra kommer in i vägkroppen via regnvatten är det inte tillräckligt för en storskalig kalkutfällning som tillåter Ca<sup>2+</sup>-koncentrationen att kvarstå på höga nivåer. Emellertid när bärlagrets porvatten når atmosfären genom dräneringsledningar gör koldioxid, en obegränsad källa av karbonat, att kalciumkarbonat faller ut enligt följande generaliserade ekvationer:



Bildningen av kolsyra och följande utfällning av kalciumkarbonat avspeglas i en motsvarande sänkning av pH. Även fält- och laboratoriemätningar rapporterar minskningar av pH-värden med tiden för dräneringsvatten från krossad betong.

## Faktorer som påverkar upplösning och utfällning

Viktiga faktorer som inverkar på reaktionshastigheten är temperatur, storlek, form och elektrisk laddning på reaktionspartiklarna. Den viktigaste faktorn är troligtvis tid, i detta fallet kontakttiden mellan vatten och krossad betong (Drever, 1988). Kontakttiden är beroende av uppehållstiden för dräneringsvattnet i konstruktionen, dvs. *förmågan hos betonglagret att dränera vatten*. Öppna graderingar hos betongmaterialet borde därför ge kortare uppehållstid, vilket kanske minskar omfattningen på lösning och utfällning av kalciumkarbonat.

En annan viktig faktor är *materialets kornstorlek*. Muethel (1989) och Tamirisa (1993) har visat att krossad betong producerar utfällningar oberoende av partikelstorlek, men mängden utfällningar som produceras är omvänt proportionell mot partikelytan. Användningen av material med öppen gradering, dvs. där finjorden siktats bort, reducerar därför mängden utfällningar men eliminerar inte produktionen.

## 5.2 Provningsmetoder

Karbonatisering i en befintlig betongkonstruktion kan mätas med fenoltaleinprov. Omslag till rödaktig färgnyans anger att betongen är okarbonatiserad (Molin et al., 1996).

Hållfasthetstillväxt hos ett material kan bestämmas till exempel genom mätning av styvheten i färskt tillstånd och som uppföljande mätning efter olika tidsperioder, antingen i laboratorium eller i fält. I laboratorium kan mätningen göras med hjälp av dynamiska treaxialförsök eller med metoder som utvecklats för hårdnad betong. I fält kan mätningen göras med hjälp av fallviktsdeflektometer.

Det vore *önskvärt med någon form av accelererad provning* som på relativt kort sikt kan ge en indikation om hållfasthetens slutvärde och därigenom indirekt mäter hållfasthetsökningen.

## 6 Organisk halt

Den organiska halten eller innehållet av organiskt material har betydelse för ett obundet vägmateriels styvhet och bärförmåga.

Organiskt material *försämrar styvheten*. Bäckman (1989) visade att redan en liten andel organiskt material, 6% av material mindre än 2 mm, försämrar E-modulen kraftigt. Studien gjordes på bergkrossmaterial med tillsats av organiskt material.

I detta sammanhang kan nämnas att de flesta länder har begränsat den tillåtna halten av organiskt material i vägmateriel. VÄG 94 och ATB VÄG begränsar den t.ex. i allt överbyggnadsmateriel samt i fyllningsmateriel som ligger inom 1 m från terrassytan. Om cementbundna lager används i överbyggnaden, gäller begränsningen inom 2 m från terrassytan. Kravet uttrycks som högst 2% organiskt material mätt med kolorimetermetoden.

### 6.1 Provningsmetoder

Det finns flera metoder för att bestämma det organiska innehållet i ett material. Observera dock att olika provningsmetoder kan ge olika resultat. Kolorimetermätning ger överlag lägre halt än glödning, men skillnaderna är små så länge det undersökta materialet är kalkfattigt.

#### Glödning

Den vanligaste metoden för bestämning av halten organiskt material är glödning vid en viss temperatur och beräkning av den resulterande viktminskningen. Viktminskningen antas spegla halten organiskt material i provet. Metoden kallas bestämning av glödning förlust eller Loss on ignition, LOI, och brukar utföras

vid 550°C, 800°C eller 950°C (SS 02 81 13, VVMB 34:1984, SS 02 71 05). Resultatet anges i viktprocent. Det finns också en fastställd EU-norm (EN 1744-1, kapitel 17) som beskriver glödgning vid  $975 \pm 25^\circ\text{C}$ .

Observera att det är *viktigt att ange vilken temperatur som använts* eftersom även en del oorganiskt material kan försvinna vid glödgningen. Risken för detta ökar när temperaturen ökar. Glödgning är därför inte lämplig för material som innehåller karbonater eller vissa lermineral, t.ex. från områden med kalkhaltig berggrund (VVMB 34:1984 och Bäckman 1989). Enligt Larsson et al. (1985) bör glödgning endast användas om vissa villkor är uppfyllda. Dessa är bl.a. att karbonathalten ska vara  $\leq 20\%$ , sulfidhalten ringa, jorden ska ha en mineralsammansättning som någorlunda sammanfaller med den för svenska förhållanden normala samt att provet glödgas vid  $900^\circ\text{C}$  under minst en timme. Också under dessa förutsättningar är spridningen normalt större än för kolorimetermetoden och noggrannare metoder (Larsson et al., op. cit.).

Pavasars (2000) påpekar att bottenaskor från sopförbränning skiljer sig betydligt från avloppsslam och sediment, som LOI utvecklats för. Han nämner flera faktorer som kan bidra till LOI för en bottenaska, t.ex. bundet vatten som avgår vid  $550^\circ\text{C}$ . Undersökningar inom detta projekt antyder också att glödgningsförlusten inte är representativ för det organiska innehållet i slaggrus och inte heller i krossad betong.

## Kolorimetermätning (SS 02 71 07)

Med denna metod bestäms den organiska halten genom en snabb våtförbränning och efterföljande mätning av färgreaktionen med hjälp av en kolorimeter. Det är denna metod som VÄG 94 hänvisar till.

Analysen görs på material mindre än 2 mm. Provmängden varierar mellan 0,2 och 6 g beroende på uppskattad organisk halt.

Vid våtförbränningen tillsätts kaliumdikromatlösning och svavelsyra till materialprovet. Blandningen späds med destillerat vatten och får klarna. Provlösningen överförs till en kyvett som passar i kolorimetern och instrumentet kalibreras med hjälp av en "nollösning". Sedan mäts färgintensiteten i provlösningen med användning av ett ljusfilter för våglängder omkring  $620 \mu\text{m}$ .

Den organiska halten beräknas med hjälp av en ekvation där avläst kolorimetervärde, en "skalfaktor" från kalibreringen samt invägd provmängd ingår. Ekvationen förutsätter att 58% av det organiska materialet utgörs av organiskt kol. Därför är *metoden endast tillämpbar om den organiska halten understiger 60%*.

En felkälla enligt standarden är förekomst av klorider i materialet, vilket kan ge ett för högt värde. Felet är ca 0,2% för vanliga svenska saltvattenavsatta leror. Om kloridhalten bestämts ska den uppmätta organiska halten minskas med en tolfedel av kloridhalten.



## Total Organic Carbon, TOC (prEN 13137)

I denna norm definieras TOC som det kol som omvandlas till koldioxid vid förbränning och som inte frigörs vid syrabehandling. Normen beskriver två sätt att bestämma TOC – indirekt (A) respektive direkt (B), där den indirekta sägs ha minst felkällor. Resultatet anges i båda fallen som mängden organiskt kol i torr substans uttryckt i viktprocent.

I den indirekta metoden bestäms det organiska kolinnehållet såsom skillnaden mellan totalt kolinnehåll, TC, och totalt oorganiskt kolinnehåll, TIC. TC bestäms genom fullständig förbränning och mätning av den avgivna koldioxidmängden genom infraröd spektrometri, gravimetri eller dylikt. TIC bestäms genom syraupplösning och mätning av den bildade koldioxidmängden på samma sätt som vid TC-bestämning.

Vid direkt bestämning av TOC behandlas provet först med syra för att avlägsna karbonater. Därefter bestäms den avgivna koldioxidmängden vid förbränning såsom vid TC-bestämning.

## Jämförelse mellan provningsmetoder

I samband med övriga undersökningar i detta projekt undersöktes även den organiska halten hos de studerade materialen. Det gjordes med hjälp av kolorimetermetoden eftersom VÄG 94 föreskriver det. Emellertid är det nästan uteslutande resultat från glödgning som presenteras i svensk och utländsk litteratur när den organiska halten ska anges för en restprodukt. Därför gjordes en liten studie inom detta projekt för att jämföra de olika metodernas resultat.

Den organiska halten i tre material bestämdes med hjälp av tre olika metoder, kolorimetermätning samt glödgning vid två olika temperaturer. Resultatet presenteras i tabell 6-1.

**Tabell 6-1** Organisk halt bestämd med olika metoder. Material till provsträckor vid Törringe.

Metod	Organisk halt (%)			Metodbeteckning
	Slaggrus	Betong	Naturgrus	
Kolorimetermätning	1,7	<0,2	<0,2	SS 02 71 07
Glödgning vid 550°C	4,1	1,76	0,74	SS 02 81 13
Glödgning vid 950°C	6,3	6,3	1,1	SS 02 71 05

Tabellen visar stora skillnader mellan metoderna. Skillnaderna beror på att även vissa oorganiska komponenter, t.ex. koldioxid från karbonater, kan avgå vid glödgningen och bidra till viktförlusten. Se vidare diskussion i kapitel 19.

En jämförelse mellan glödgningsförlust, och Total Organic Carbon, TOC, utförd på inert avfall visar att TOC-värdet utgör 40–50% av LOI 550°C-värdet (Hjelmar et al. 1998, citerad efter Fällman et al. 1999).

## 7 Beständighet

För att beräknade deformationsegenskaper i ett obundet lager ska bibehållas under vägens livslängd måste materialet vara beständigt. Här behandlas beständighet mot mekanisk påverkan och mot klimatpåverkan. Beständighet mot kemisk påverkan är också nödvändigt, men har inte studerats ännu i projektet.

### 7.1 Beständighet mot mekanisk påverkan

Beständigheten mot mekanisk påverkan är beroende av ballastkornens styrka. Egenskapen är viktig för obundna material eftersom de utsätts för mekanisk påverkan vid all bygghantering (lastning, lossning, utläggning, packning, byggttrafik). Även den slutliga trafiken påverkar, men mycket lindrigt om vägen är rätt dimensionerad.

#### 7.1.1 Traditionella provningsmetoder

Det finns flera svenska standardmetoder för obundna ballastmaterial inom detta område. De kan delas in efter vilken typ av mekanisk påverkan de ger.

- Nötning/slag: – Kulkvarn (FAS Metod 259-98 och VVMB 610:1997)  
– Los Angeles (EN 1097-2)
- Nötning – micro-Deval (SS-EN 1097-1)
- Slag – Impact test (EN 1097-2)

Dessutom finns flera andra metoder som har utvecklats på olika håll i världen och som är standardiserade i sina respektive länder. Några av dem nämns här.

- Nötning/slag: – Los Angeles (USA, ASTM C131 = AASHTO T-96). Samma princip som i europasnormen. Det finns fyra varianter A–D beroende på vilken fraktion som provas (2,36–38 mm). Antalet stålkulor varierar mellan 6 och 12 beroende på fraktionen. Resultatet anges som viktprocent material som är mindre än 1,7 mm efter provningen.
  - Los Angeles (USA, ASTM C535). Avsedd för grovkorniga material (19–76 mm). 10 kg material och 12 stålkulor. För övrigt samma som ASTM C131.
- Nötning: – Aggregate abrasion value (England, BS 812:Part 113). Ett antal partiklar med storlek 10–14 mm sätts fast i en ram. Partiklarna har ett visst utstick. Provet hålls mot en roterande platta under 500 varv och slipsand tillsätts. Resultatet betecknas AAV och anges som vikt förlusten i procent av den ursprungliga vikten. Metoden utgjorde förebild till det svenska sliptalet och sedermera slipvärdet som används för beläggningssten (FAS metod nr 231).
- Slag: – Aggregate impact value (England, BS 812:Part 112). Ett prov med kornstorlek 10–14 mm utsätts för slag från en fallhammare med vikten ca 14 kg och samma diameter som provet. Fallham-

maren faller ca 38 cm 15 gånger och materialet siktas därefter. Resultatet betecknas AIV och beräknas som viktprocent material som är mindre än 2,36 mm relativt den ursprungliga vikten. Metoden påminner om det svenska sprödhetstalet som bestäms för beläggingssten (FAS metod nr 210).

- Schlagversuch (Tyskland, DIN 52 115) Utgör underlag till europanormen Impact test.
- Tryck: – Aggregate crushing value (England, BS 812:Part 110). Ungefär 2 kg material utsätts för ett kontinuerligt tryck via en kolv med samma diameter som provet. Total last 400 kN uppnås efter 10 minuter. Resultatet betecknas ACV och beräknas som viktprocent material som passerar sikten 2,36 mm relativt den ursprungliga provvikten.
- Ten per cent fines value (England, BS 812:Part 111). En variant av ACV. En smal kolv pressas ner i materialet med konstant hastighet. Resultatet anges som den last som krävs för att producera 10% finmaterial (material mindre än 2,36 mm) på tio minuter.

De svenska standardmetoderna beskrivs här mer utförligt.

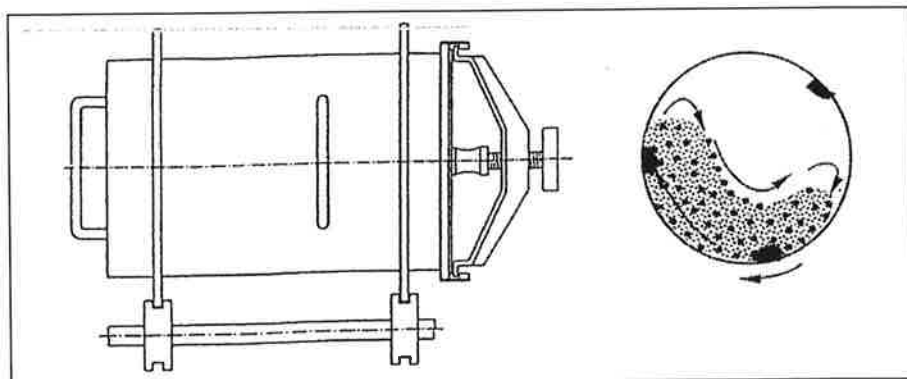
## Kulkvarn (FAS Metod 259-98 och VVMB 610:1997)

Detta är en metod som ursprungligen utvecklades vid VTI under 1980-talet för att prova nötningsegenskaper hos stenmaterial till beläggningar (Höboda & Chytla, 1985), (Höboda, 1988). Metoden har sedan modifierats för provning av obundna material (VVMB 610:1997). Kulkvarnen ger en kombination av nötning och slag eller krossning.

Kulkvarnen kommer att försvinna som metod för att bestämma beständighet hos obundna material. Enligt den nuvarande tidplanen för det europeiska standardiseringsarbetet kommer metoden *fr o m 2003 att bara vara tillämplig för bestämning av beläggingsstens nötningsmotstånd mot dubbdäck*. Den har då beteckningen EN 1097-9.

Den modifiering som har gjorts av FAS metod för att passa material till obundna lager avser provberedning och beräkning av kulkvarnsvärdet. Dessutom ska flisighetstalet för materialet bestämmas. Vid provberedningen ska materialet inte laboratoriekrossas eller på något sätt ges förändrade egenskaper. Det innebär oftast stora provmängder för att tillräcklig mängd material inom fraktionen 11,2–16 mm ska kunna erhållas. Det krävs t.ex. ett laboratorieprov på minst 80 kg för att bestämma kulkvarnsvärdet för ett material där största sten är 125 mm. Är kornstorleksfördelningskurvan flack i området 11,2–16 mm kan det behövas 150 kg material eller mer.

Vid provningen placeras 1 kg material med kornstorlek 11,2–16 mm tillsammans med 7 kg stålkulor och 2 l vatten i en ståltrumma och får rotera 5 400 varv, vilket tar ca 60 minuter. Materialet ska ha en viss fördelning inom fraktionen 11,2–16 mm och stålkulorna ska ha diametern 15 mm. Ståltrumman ska ha inre diametern 206 mm, längden 335 mm och vara försedd med tre längsgående ribbor med vissa mått och viss placering (figur 7-1).



**Figur 7-1** Utrustning för kulkvarnsprovning – längdsektion och provningsprincip (efter FAS Metod 259-98 och FAS, 1995)

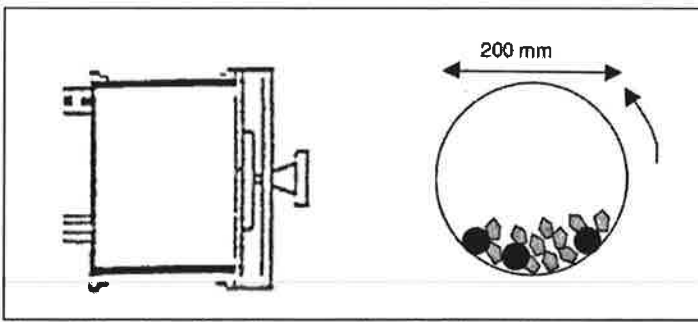
Om kulkvarnsvärdet ska bestämmas för material med största stenstorlek 11,2 mm ska provning istället utföras på fraktionen 8–11,2 mm. Då ska stålkulorna ha diametern 11,1 mm. För övrigt gäller samma förfarande som ovan.

Kulkvarnsvärdet beräknas som 0,8 gånger den andel av det ursprungliga provet, uttryckt i viktprocent, som malts ned under provningen och efteråt passerar sikt 2,0 mm. Faktorn 0,8 är en modifiering jämfört med beräkningen för stenmaterial till belägningsmassa.

### Bestämning av nötningsmotstånd, micro-Deval (SS-EN 1097-1)

micro-Deval används för att bestämma nötningsmotståndet hos ballastmaterial. Metoden utvecklades ursprungligen i Frankrike för ca 40 år sedan och har många likheter med kulkvarnsmetoden. Materialet undersöks normalt i vått tillstånd, men provningen kan också utföras i torrt tillstånd. Enligt standarden ger den torra metoden ytterligare information om materialets egenskaper, men bör inte användas i stället för den våta metoden som är referensmetod.

Provningen går till så att 0,5 kg material av fraktionen 10–14 mm placeras tillsammans med 5 kg stålkulor och 2,5 l vatten i en stålrumma och får rotera 12 000 varv (figur 7-2). Materialet ska ha en viss fördelning inom fraktionen 10–14 mm, stålkulorna ska ha diametern 10 mm och stålrumman ska ha inre diametern 200 mm, längden 154 mm och vara slät invändigt.



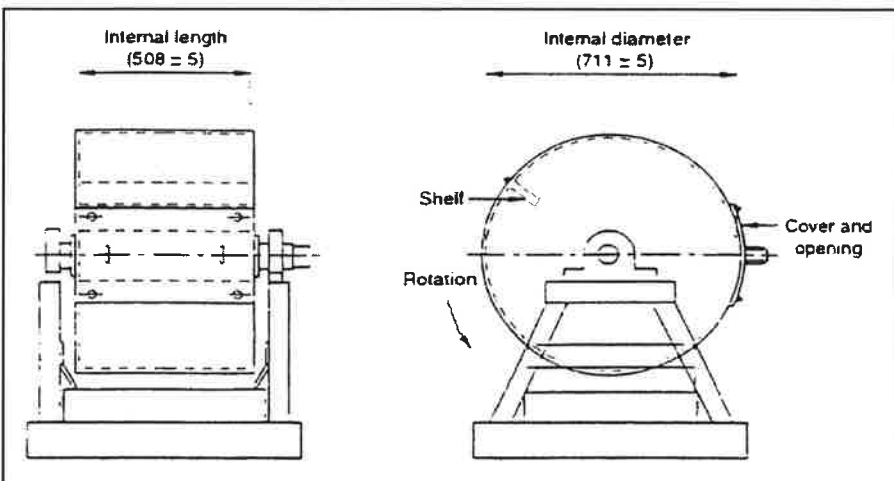
**Figur 7-2** micro-Devaltrumma – längdsektion och provningsprincip (efter SS-EN 1097-1 och ALT-MAT, 2000)

Materialet siktas efter avslutad provning och micro-Devalvärdet är den del av det ursprungliga materialet, uttryckt i viktprocent, som nötts ner till mindre än 1,6 mm. micro-Devalvärdet betecknas  $M_{DE}$  vid våt provning och  $M_{DS}$  vid torr provning.

### Bestämning av motstånd mot sönderdelning, Los Angeles (EN 1097-2)

Denna metod är en modifiering av det ursprungliga Los Angeles-försöket som utvecklades på Municipal Testing Laboratory i Los Angeles i mitten på 1920-talet. Metoden mäter nedbrytningen av ett material genom en kombination av krossning och nötning där krossningen dominerar.

5 kg material av fraktionen 10–14 mm placeras tillsammans med 11 stålkulor i en ståltrumma som får rotera 500 varv. Materialet ska ha en viss fördelning inom fraktionen 10–14 mm, stålkulorna ska ha diametern 45–49 mm och ståltrumman ska ha inre diametern 711 mm, längden 508 mm och en invändig ”hylla” med vissa mått och viss placering (figur 7-3).



**Figur 7-3** Skiss av Los Angeles-trumma – längd- och tvärsnitt (efter EN 1097-2)

Hyllans uppgift är att lyfta materialet vid varje rotation. Efter behandlingen i trumman siktas materialet. Andelen material i viktprocent som passerar sikten 1,6 mm anges som Los Angeles-talet, LA.

Det är möjligt att prova andra fraktioner än 10–14 mm, t.ex. 8–11,2 eller 11,2–16 mm, men då föreskrivs ett annat antal och en annan vikt för stålkulorna.

## Impact test (EN 1097-2)

Enligt EN 1097-2 kan ett alternativ till Los Angeles-försök användas. Alternativet heter Impact test och anger ett materials motstånd mot krossning. Ett materialprov med kornstorleken 8–12,5 mm utsätts för 10 slag med fallhöjden 370 mm och den resulterande nedkrossningen mäts genom att materialet siktas på fem angivna siktar i intervallet 0,2 till 8 mm. Mängden material beror på korndensiteten, men hälften ska bestå av fraktionen 8–10 mm och en fjärdedel av vardera fraktionerna 10–11,2 och 11,2–12,5 mm.

Försöket resulterar i ett Impact value i procent. Det beräknas som den genomsnittliga andelen material som passerar genom de fem siktarna efter provning.

Denna metod har inte översatts till svenska eftersom den har bedömts få marginell betydelse.

## 7.1.2 Alternativa provningsmetoder

De metoder som beskrivits under rubriken traditionella provningsmetoder är egentligen utvecklade för stenmaterial till bundna lager. På senare tid har man sökt efter nya metoder som bättre speglar obundna materials beständighet mot mekanisk påverkan. Ett alternativ till de traditionella metoderna är **gyratorisk packning** som har använts på prov inom det europeiska samarbetsprojektet ALT-MAT och i norska och finska forskningsprojekt. (ALT-MAT, 2000), (Hoff & Natvik, 2000), (Tielaitos geokeskus 1994 och Keto 1995 citerade efter Natvik 1998), (Laaksonen et al., 1999).

Ett annat alternativ är det **isländska Bg-index** (Bjarnarson et al., 1999a).

Höboda & Chytla (1999) nämner **våtnötningsförsök i vändskak** som en intressant metod för vissa återvinningsprodukter t.ex. krossad betong och metallurgiska slagger.

Dessa tre metoder är intressanta eftersom en större del av eller till och med hela det obundna materialet används vid provningen. Metoderna beskrivs närmare här nedan.

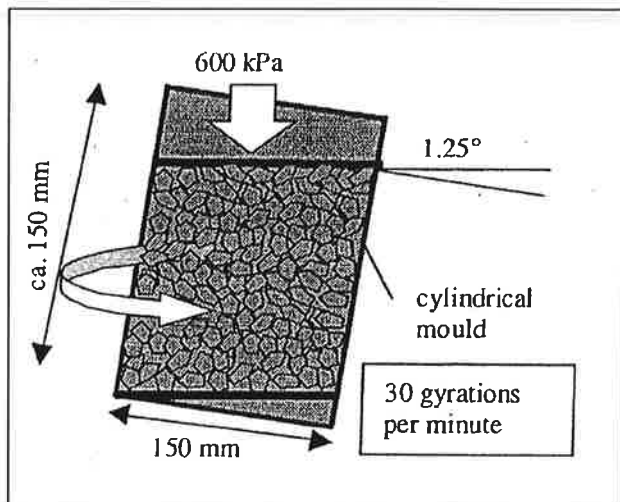
### Gyratorisk packning

En gyrator används egentligen för att tillverka provkroppar med eller utan bindemedel. Vid provkroppstillverkningen packas materialet in med hjälp av samtidigt tryck och skjuvning, vilket är mer likt packningsarbetet i fält än vad stampning i proctorapparat är.

Inom ALT-MAT-projektet användes den gyrator som beskrivs i AASHTO Standard TP4-97. Den utvecklades i USA inom Strategic Highway Research

Program, SHRP, och är nu standardiserad för bitumenbundna massor (SHRP M002 och draft prEN (WI00227139), citerade efter Natvik 1998). I ett tillägg finns också ett förslag till standard för packning och hållfasthetsprovning av obundna material (ASTM P233, citerad efter Natvik op. cit.).

Metoden innebär inpackning under konstant tryck tillsammans med en knådande rörelse som genereras av rotationer (178 st) med vinkeln  $1,25^\circ$ . Inpackningen görs i en cylinder med diametern 150 mm (figur 7-4).



Figur 7-4 Princip för gyratorisk packning enligt AASHTO Standard TP4-97 (ALT-MAT, 2000)

I ALT-MAT-projektet användes gyratorn för att bedöma obundna materials nedbrytningsegenskaper med hjälp av två olika mått. Det ena var en nedbrytningskoefficient enligt Los Angeles-mönster, dvs. producerad mängd finmaterial jämförd med ursprunglig. Det andra måttet var en jämförelse mellan hela kornstorleksfördelningskurvan före och efter provning. Det uttrycktes som en "Gyrator area coefficient" och beräknades som kvoten mellan (arean mellan de båda kurvorna) och (arean över efter-kurvan). Detta mått är oberoende av grade-ringen.

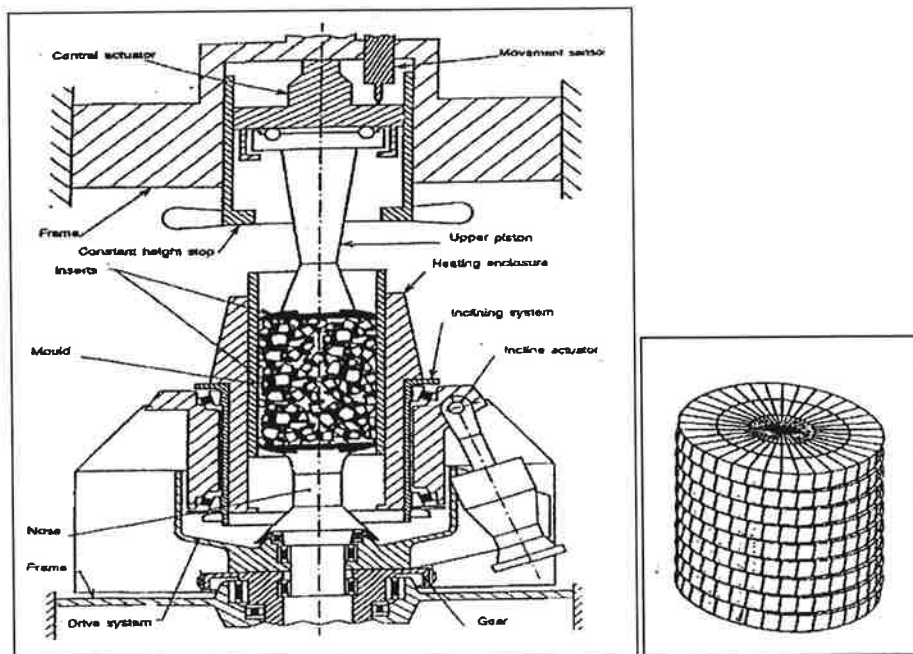
Dessutom erhöles ett mått på materialens packningsbarhet genom att avsätta provkroppshöjden som funktion av antalet rotationer.

Följande kommentarer ges om metoden (ALT-MAT, 2000):

- En fördel är att kornstorleksfördelningen kan vara densamma som i verkligheten. Packningscylinderns diameter bör dock anpassas till maximal kornstorlek. Med 150 mm diameter bör kornstorleken vara högst 50 mm. Även provkroppshöjden kan varieras i viss utsträckning för att efterlikna verklig lagertjocklek.
- Om gyratorisk packning utförs vid samma vattenkvot som i fält blir resultaten ännu mer realistiska.
- Repeterbarheten är god.

- Metoden bör utvecklas vidare genom att antalet rotationer eller storleken på trycket optimeras för att få överensstämmelse med fältresultat.

I det norska projektet Kvalitet av pukk- och grusindustriens produkter, KPG, användes en finsk gyrtator som kallas Intensive Compaction Tester, ICT (Hoff & Natvik, 2000). Packningsprincip och skiss av utrustningen visas i figur 7-5.



**Figur 7-5** Intensive Compaction Tester, ICT, som använts i det norska projektet Kvalitet av pukk- och grusindustriens produkter. Skiss av utrustningen samt packningsprincip. (Natvik, 1998)

Trycket verkar på provet genom att det är placerat mellan två ändplattor som förblir parallella under hela packningsproceduren. Skjuvningen erhålls genom den roterande rörelsen.

I KPG-projektet användes ICT parallellt med olika standardtester i laboratoriet bl.a. de europaanormerade metoderna kulkvarn, Los Angeles och micro-Deval, men också de brittiska AIV, ACV, AAV och 10% fines samt det norska fallprovet (ungefär sprödhetstal) och abrasionstestet (ungefär slipvärde). Sex material med olika styrka och olika kornstorlek undersöktes. Dessutom gjordes fältförsök på samma material då nedkrossningen vid trafikering med fordon registrerades. Syftet var att ta reda på om mätt kornstyrka i ICT ger samma resultat som de standardiserade metoderna. Dessutom ville man dokumentera sambandet mellan kornstyrkan uppmätt i fält och i laboratorium. Följande slutsatser drogs av resultaten (Natvik, 1998):

- ICT lämpar sig väl för bestämning av stenmaterials motstånd mot nedkrossning.
- De provade materialen skiljdes bättre åt av ICT än av standardmetoderna, men variationsområdet räknat i absoluta tal var mindre.



- ICT använd på öppen gradering gav liten nedkrossning och visade starka samband med de standardtester som använder slag som påkänning. ICT använd på tät gradering visade inget sådant samband.
- Mätt kornstyrka i ICT påverkades starkt av tryck, gyratorvinkel och antal rotationer samt av materialets vatteninnehåll, kornform och kornstorlek.
- Skjuvmotståndet som registrerades visade inget samband med registrerad styrka.
- Utrustningen är lätt att hantera, men behöver förbättras så att trycket regleras automatiskt.
- För fraktionen 20–120 mm korrelerade uppmätt nedkrossning i fält bra med laboratoriebestämd beständighet. Bäst samband blev det mellan fältresultat och nötningsdominerade laboriemetoder samt ICT. Däremot skiljde Los Angeles-metoden materialen för dåligt åt.
- För fraktionen 0–32 mm visade uppmätt nedkrossning i fält inga starka samband med mätt laboriestyrka. Bildningen av finmaterial var betydande, men skillnaderna i nedkrossning var för dessa material generellt små.
- Kornstyrka hos ett obundet material värderat från sådana här fältförsök visar att hur kornen är inordnade i förhållande till varandra är av stor betydelse.
- Slutligen menar Natvik att ICT är intressant därför att metoden ger en belastning som liknar den som trafiken ger, dvs. en dynamisk belastning med roterande huvudspänningsriktning. I ICT uppkommer spänningsrotationen genom gyratorvinkeln samtidigt som trycket kan regleras till en given spänningsnivå.

I finska undersökningar har ICT använts för att packa obundna vägmateriäl. Erfarenheter från dessa visar att bergkrossmateriäl av skiffriga bergarter inte packas bra i ICT:n på grund av ”flexibiliteten til glimmer”(Keto 1995, citerad efter Natvik op. cit.). Natvik citerar också en rapport från Tielaitos Geokeskus (1994) som undersökt finmateriälbildningen i ICT. I denna rapport hävdar man att det är lätt att kvantifiera nedkrossning av stenmateriäl 0–32 mm i ICT eftersom den ger bättre upplösning dvs. skiljer materiälerna bättre från varandra än standardtesterna gör.

I Finland har man också använt ICT för att bestämma en skjuvmodul och sedan jämfört resultatet med beräknad resilientmodul från dynamisk treaxialprovning (Laaksonen et al., 1999). Dessa försök redovisas inte här, men några av slutsatserna kan vara intressanta även för beständighetsprovning. Laaksonen et al. (op. cit.) skriver att vattenkvoten i materiälet bör väljas så låg att den inte förändras under provningen samt att diametern på provningscyllindern bör anpassas efter materiälens kornstorlek. Diameter 100 mm är bara tillräcklig för 0–16 mm materiäl.

## Isländskt Bg-index

Bg-index är ett mått på nedbrytningsbenägenheten hos ett obundet materiäl. Det baseras på en beräkning av skillnaden mellan de två graderingarna före och efter proctorinstampning. Raul J Marsal introducerade begreppet 1973 och det har använts på Island i några forskningsprojekt (Bjarnasson et al., 1999a) samt i det

europiska samarbetsprojektet COURAGE (Construction with Unbound Road Aggregates in Europe) (Bjarnasson et al., 1999b).

Följande exempel illustrerar hur indexet beräknas:

- Kornstorleksfördelningskurvorna före och efter proctorinstampning av ett material ritas upp i samma diagram.
- Skillnaden mellan (passerande på sikt 32 mm–passerande på sikt 22,4 mm)<sub>kurvan före proctor</sub> och (passerande på sikt 32 mm–passerande på sikt 22,4)<sub>kurvan efter proctor</sub> noteras. Därefter görs samma sak för övriga siktar. Till sist summeras alla positiva skillnader och summan utgör Bg-indexet.

Det hela blir alltså en jämförelse av de båda kurvornas lutning. Ju högre index desto flackare är kurvan efter proctorinstampningen, dvs. desto fler av de grova partiklarna har krossats sönder.

1985 presenterade B O Hardin en liknande metod som han hävdade var mindre beroende av graderingen. Den innebär att man beräknar kvoten av två areor, nämligen arean mellan före- och efter-kurvorna och arean ovanför före-kurvan (Bjarnasson et al., 1999a). Den ursprungliga metoden visar hur mycket ett material med en viss gradering bryts ner medan den senare visar styrkan på materialet oavsett gradering. De isländska erfarenheterna visar att ju öppnare gradering desto större nedbrytning.

Det finns två isländska Bg-metoder – standard Bg-test och modifierad Bg-test. Den första jämför graderingarna före och efter standard proctorinstampning medan den andra jämför graderingarna före och efter modifierad proctorinstampning. Den senare används mest nu eftersom den verkar ge bättre särskiljning av ballast med olika styrka.

Eftersom proctorinstampning är en central del av Bg-indexet följer en beskrivning av denna packningsmetod här.

### Modifierad proctor (tung instampning) och standard proctor (lätt instampning)

Modifierad proctor är en internationellt använd metod som motsvarar den svenska metoden tung instampning (VVMB 36:1977 och SS 02 71 09). Instampningar vid några olika vattenkvoter resulterar i en packningskurva som är unik för varje material. Ur denna kan maximal densitet och motsvarande vattenkvot avläsas.

Fraktionen 0–20 mm delas ned i 2,5–3,0 kg prov. Vatten tillsätts provet och blandas in noggrant. Det färdigblandade provet instampas i fem lager i en stål-cylinder med hjälp av en fallvikt. Skrymdensiteten erhålls genom att dividera provets torrsvikt med dess volym. Genom att variera vattenkvoten i proven erhålls olika skrymdensiteter och den maximala skrymdensiteten kan bestämmas. Vid tung instampning väger fallvikten 4,5 kg och fallhöjden är 450 mm, vilket ger ett packningsarbete som motsvarar 2,5 MNm/m<sup>3</sup> jord.

I normalfallet siktas partiklar som är större än 20 mm bort från det material som ska provas och korrigerig för eventuellt innehåll av material 20–60 mm görs genom att ersätta med motsvarande viktsandel material 5,6–20 mm.

Standard proctor motsvarar den svenska metoden lätt laboratoriestampning enligt SS 02 71 09 . Provnigen går till som vid tung instampning med undantag

av att jorden fylls på i tre lager i stället för fem samt att använd packningsenergi är mindre. Fallvikten väger 2,5 kg och fallhöjden är 300 mm, vilket ger ett packningsarbete som motsvarar 0,55 MNm/m<sup>3</sup> jord.

## Våtnötningsförsök i vändskak

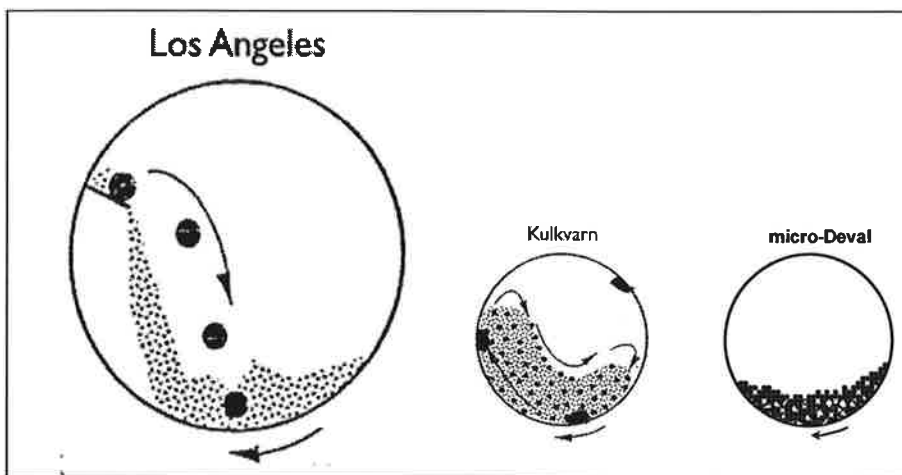
Våtnötning i vändskak (egentligen använd för hydrometeranalys) kombinerad med flockningsförsök för bildat finmaterial har tidigare utvecklats vid VTI (Höbeda, 1972). Metoden går till så att en ganska bred analysfraktion, 2,0–11,2 mm, utsätts för mild våtnötning i 20 minuter. Därefter mäts dels halten bildat finmaterial i procent, dels flockningen eller sedimentshöjden i mm. Fördelen med metoden är att också finare korn testas i den vida analysfraktionen, dvs. de korn som är mest sönderfallsbenägna.

### 7.1.3 Jämförelse mellan provningsmetoder

Enligt ovan finns det många olika metoder för att mäta beständighet mot mekanisk påverkan. Såsom beskrivits ger de också olika typ av påverkan på det undersökta materialet. Detta inverkar olika på resultatet beroende på vilket material det är som blir utsatt för provningen.

Bjarnason (1999a) drar slutsatsen att provningsresultat från krossningsmetoder beror mest på porositeten hos materialet. Han hävdar vidare att resultaten från kulkvarnsförsök beror både på porositet och "alteration" även om resultatet berättar mer om vittringsegenskaper än om motstånd mot nedbrytning.

Stenlid (1996) har bl.a. jämfört provningar med Los Angeles-trumma och kulkvarn och kommit fram till följande. Provning i Los Angeles-trumma ger en annan slags påverkan än den kulkvarnsprovning ger, vilket avspeglas i resultaten. Figur 7-6 illustrerar skillnaden.



Figur 7-6 Provningsprincip för Los Angeles-metoden, kulkvarnen och micro-Deval (efter FAS 1995 och detta projekt)

Kulorna som används i Los Angeles-trumman är stora, 3–5 gånger större än de provade partiklarna, medan kulkvarnens kulor är ungefär lika stora som partiklarna. I Los Angeles-trumman finns en ”lyftbalk” som ger fritt fall för materialet, medan kulkvarnen ger en omrörning. I LA-trumman är behandlingen torr, i kulkvarnen är den våt.

Dessa skillnader gör att partiklarna slås sönder i LA-trumman. Både materialfördelningen och kornformen tyder på det. Därför ger LA-metoden utslag för spröda mineral som kalifältspat och för sprickrikt material. I kulkvarnstesten bidrar istället kalifältspat och kvarts till ett bra nötningsmotstånd vilket ger motsatt provningsresultat. För de glimmerrika och glimmerförande sedimentbergarterna däremot mäter metoderna med LA-trumma och kulkvarn troligen liknande egenskaper. (Stenlid, op. cit.).

Inom ALT-MAT-projektet har det bl.a. gjorts en jämförelse mellan några metoder för provning av beständighet. Syftet var att jämföra hur de olika metoderna kunde bedöma nötningsegenskaperna hos vanliga alternativa ballastmaterial. Speciellt befarades att metoder som Los Angeles skulle ge för höga nötningsresultat för mjuka alternativa material.

De metoder som jämfördes var micro-Deval, Los Angeles (enligt EN), Los Angeles (enligt ASTM), vibrobord och gyratorisk packning. Materialen som undersöktes var krossad betong, slaggrus från olika anläggningar samt några olika naturliga referensmaterial. Följande slutsatser kunde dras av försöken:

- micro-Deval och de två Los Angeles-metoderna rangordnade materialen på samma sätt.
- Metoder som inbegriper siktning av materialet före och efter kan ge missvisande resultat för svaga material på grund av nedbrytning redan vid siktningen.
- Det föreskrivna antalet rotationer vid micro-Deval- och Los Angelesprovning kan ifrågasättas för alternativa material. Skälet är att för konventionella material råder ett linjärt samband mellan nedbrytningen och antalet rotationer, medan de alternativa materialen nöts mer i början än i slutet.
- De olika Los Angeles-metoderna gav inte signifikant olika resultat.
- micro-Devalmetoden separerade de olika materialen bäst.
- Gyratorisk packning visade goda resultat och bör vidareutvecklas.
- Vibrobordet lämpar sig inte för beständighetsmätning. (ALT-MAT, 2000).

Man kan alltså konstatera att de metoder som utvecklats för beständighetsprovning av konventionella material är ofta olämpliga för alternativa material. Höbeda & Chytla (1999) nämner att återvunna material som t.ex. krossad betong ofta får dåliga resultat med konventionella provningsmetoder beroende på innehåll av mycket porösa och svaga partiklar. De påpekar också, att det finns material som bildas är inte plastiskt såsom fallet är vid dåligt beständiga naturmaterial, vilket i sin tur brukar ge upphov till dålig bärighet. Istället är det just detta finmaterial som för vissa återvinningsprodukter ger upphov till den önskade bindningseffekten, vilken ger bärighetsökningen.

## 7.2 Beständighet mot klimatpåverkan

Klimatpåverkan begränsas här till temperaturväxlingar. Beständighet mot temperaturväxlingar eller s.k. frys–töbeständighet är en viktig egenskap för ett material som kan förväntas frysa och tina upprepade gånger under helt eller delvis vattenmättade förhållanden.

Nedbrytningen på grund av dålig frys–töbeständighet uppkommer därför att vatten som trängt in i porerna volymutvidgas ca 9% när det fryser till is, vilket ger upphov till stora spänningar som spränger sönder ballastkornen.

Sönderfallet kan också bero på adsorptionseffekter i porerna vid fuktförändringar (Dunn & Hudec 1965, citerade efter Höboda & Jacobson 1981). I detta fall är det sekundära mineral t.ex. lermineral som adsorberar vatten och sväller, vilket resulterar i sprickbildningar. Ofta kan frysnings- och adsorptionseffekter samverka.

Frys–töbeständighet beror på flera faktorer t.ex. vattenmättnadsgrad, porositet, porstorleksfördelning, portextur, materialets hållfasthet och elasticitetsmodul samt volymutvidgning vid frysning. Dessutom spelar mineralsammansättningen och därmed den vattenbindande förmågan roll. (Rosenthal 1962, citerad efter Höboda & Jacobson op. cit.). Författarna nämner även kornstorlek, antal frys–töcykler och fryshastigheten som inverkan faktorer.

Skaderisken ökar om halkbekämpningsmedel såsom natriumklorid, NaCl, och urea finns närvarande, eftersom dessa minskar vattnets ytspänning och gör att vattnet tränger in lättare i små porer.

Observera att det är endast för vattnet tillgängliga porer som deltar i processen. Ett poröst material har därför inte automatiskt dålig frys–töbeständighet.

### 7.2.1 Provningsmetoder

För beständighet mot klimatpåverkan har det utvecklats många mätmetoder, både direkta och indirekta. Aktuella standardiserade metoder är

- frys–töförsök med vatten (prEN 1367-1),
- provning med magnesiumsulfat (SS-EN 1367-2),
- petrografisk analys (SS-EN 932-3) samt
- vattenabsorptionsförsök (EN 1097-6).

Frys–töförsök med vatten är en direkt metod medan de övriga är exempel på indirekta metoder.

Dessutom finns flera varianter av frys–töförsök som är standardiserade i sina respektive länder. Det som varierar är sättet att vattenmätta (hur lång tid samt med eller utan vakuum), sättet att frysa (helt eller delvis nedsänkt i vatten), antalet frys–töcykler samt temperaturer. Några försök utförs med lösningar av halkbekämpningsmedel, t.ex. de som utvecklats av VTI och NORDTEST.

De nämnda metoderna beskrivs kortfattat här nedan.

## Frostbeständighet (prEN 1367-1)

Provningen innebär att provmaterialet vattenmättas och därefter utsätts för tio cykler med frysning och påföljande upptining i avjoniserat vatten. Temperaturerna är  $-17,5$  och  $+20^{\circ}\text{C}$ . För extrema klimat kan saltblandat vatten användas. Den varianten är emellertid inte godkänd som referensmetod ännu.

Material med kornstorlek mellan 4 och 63 mm kan provas. Utvärderingen sker genom att man kontrollerar hur stor andel av det ursprungliga provet som efter provning passerar en sikt med en maskvidd som är hälften av den undre fraktionsgränsen. Om analysfraktionen är 11,2–16 mm görs alltså utvärderingen med hjälp av en sikt med 5,6 mm maskvidd. (Andersson et al., 1999).

Utvärdering kan också göras genom att man jämför LA-talen före och efter frys-töprovning. Resultatet, hållfasthetsminskningen, uttrycks som den relativa förändringen av LA-talet.

## Provning med magnesiumsulfat (SS-EN 1367-2)

Denna metod kan väljas som ett alternativ till den ovan beskrivna provningen av frostbeständighet.

Vid provningen utsätts ett prov med fraktionen 10–14 mm för fem cykler med omväxlande vätning och torkning i en mättad magnesiumsulfatlösning. Under vätningen tränger saltlösningen successivt in i porerna hos stenmaterialet och vid de efterföljande torkningscyklerna tar saltet upp kristallvatten varvid ett tryck byggs upp, som kan utöva nedbrytning av porösa material. Nedbrytningens storlek bestäms genom siktning av analysfraktionen på 10 mm maskvidd.

## Petrografisk analys (SS-EN 932-3)

Den här normen anger en enkel metod för petrografisk undersökning av ett berg- eller ballastprov. Metoden gäller bara för naturliga ballastmaterial (sand, grus och krossat berg) och dessas ursprungsmaterial.

Analysresultatet ska ange partiklarnas form, ytegenskaper, ingående mineral och bergarter samt i förekommande fall undersökt fraktion, bildningsform (is-älvsvlagring, morän etc.) och geologisk tidsperiod.

## Vattenabsorptionsförsök (EN 1097-6)

Vattenabsorption finns med som ett "screeningtest" för frys-töbeständighet i EU-normerna. Metoden kan användas för bedömning om ett ballastmaterial behöver frys-töprovas.

I normen påpekas det att för porösa material beror absorptionsvärdet på kornstorleken. Därför ska ett välgraderat material delas upp i fraktioner och varje fraktion provas var för sig. Normen beskriver provning av fraktionerna 0,063–4 mm, 4–31,5 mm och 31,5–63 mm. Dessutom finns provning av grova material där enstaka partiklar eller hela "stycken" undersöks.

Vid provning vattenmättas provmaterialet fullständigt i 24 timmar. Grova material vattenmättas tills någon viktökning inte längre kan noteras. För material

mindre än 31,5 mm finns möjligheten att använda vakuum för att få fullständig vattenmättnad. Om kornstorleken är mindre än 31,5 mm läggs materialet i en pyknometer annars i en stålorg. Efter vattenmättningen vägs provet i vatten. Sedan tas det upp och torkas av, med hjälp av en tygtrasa eller en varmluftsfläkt beroende på kornstorlek, tills det är torrt på ytan och därefter vägs det igen. Slutligen ugnstorkas provet i 110°C tills vikten är konstant. Vattenabsorptionen beräknas såsom (yttorr vikt–ugnstorkad vikt)/ugnstorkad vikt.

Alternativa material är ofta mer porösa än traditionellt använda naturmaterial och suger därför vatten under en längre tid än vad som undersöks i standardmetoderna. Andersson et al. (1999) föreslår därför att man bestämmer vattenabsorptionen efter ett dygn på traditionellt sätt och kompletterar med vattenabsorption efter vakuumsugning alternativt kokning. Det senare för att bestämma den maximala absorptionen.

## Frys–töförsök enligt VTI

Försöket utvecklades i början på 1980-talet eftersom det förelåg ett behov av att bestämma beständigheten hos stenmaterial till flygfältsbeläggningar och en standardiserad metod saknades både inom och utom Sverige. (Höboda & Jacobson, 1981).

Provningsen görs på fraktionen 11,2–16 mm och innebär tio cykler med tolv timmars frysning och tolv timmars upptining. Proven vattenmätts före försöket med hjälp av vakuumpump och är delvis nedsänkta i vätska under försökets gång. Vätskan utgörs av 1% NaCl-lösning eftersom detta ger bättre möjlighet att urskilja kvalitetsskillnader än bara vanligt vatten (Höboda & Jacobson, op. cit.). Sönderfallet bestäms som passerande mängd material på 8 mm sikt efter avslutad provning.

## Frys–töförsök enligt NORDTEST (NT BUILD 485)

Denna metod är baserad på EN 1367-1, men skiljer sig på några viktiga punkter. För det första provas materialet i en svag saltlösning (1% NaCl) istället för i destillerat vatten. För det andra tinas provet i luft i stället för nedsänkt i vatten. Slutligen undersöks två delprov i stället för tre. Det huvudsakliga skälet till att saltlösning används är att göra metoden tuffare och mer utslagsgivande.

## 7.2.2 Jämförelse mellan provningsmetoder

I den nationella informationen om EN 1367-2 påpekas att *vittring med sulfatlösning* är annorlunda än frostvittring. Överensstämmelsen mellan sulfattest och frys–töväxlingsförsök blir därför dålig, speciellt när vatten används vid frys–töväxlingsförsök såsom fallet är i SS-EN 1367-1. Bättre överensstämmelse erhålls när frys–töväxlingsförsök utförs med svag saltlösning till exempel enligt den metod som utarbetats inom Nordtest (NT BUILD 485). I SS-EN 1367-2 sägs också att sulfattest kan vara olämplig för vissa stenmaterial.

Det finns ingen tidigare svensk standardmetod för provning av stenmaterials vittringsbenägenhet. Den främsta orsaken är att det inte har behövts eftersom det finns gott om stenmaterial med lämplig kvalitet i Sverige. Enligt Höbeda (1995) har vittringsbenäget stenmaterial på senare år även kunnat bedömas genom våtnötning i kulkvarn.

En amerikansk variant av metoden är ASTM C88 som kallas för Soundness test. Enligt denna jämförs kornstorleksfördelningen före och efter behandlingen och medelhöjningen av kurvan på samtliga siktar beräknas. Medelhöjningen i procentenheter anges som soundness loss. Chandler et al. (1997) beskriver metoden som mycket aggressiv och menar att den kan slå ut material som egentligen fungerar bra. Det är därför viktigt att ett material som klassas som svagt enligt provningen blir bedömt med hänsyn till förväntad användningsmiljö.

Bakgrunden till att *vattenabsorption* används som indirekt metod för frys-töbeständighet är sannolikt att det allmänt anses att ballastmaterial med låg absorptionsförmåga är mer beständiga mot mekaniska krafter och vittring. Följande citat är översatt från Aggregates (1993): "Det är allmänt accepterat att det råder ett ungefärligt samband mellan ballastkvalitet och bergets porositet. En grov tumregel säger att ett för övrigt bra bergmaterial med ett vattenabsorptionsvärde lägre än 2% ger vanligtvis ballast med hög kvalitet och ett bergmaterial med värden över 4% inte".

Emellertid finns undantag också. En studie på skotskt berg visade att bergarten påverkade vattenabsorptionsvärdet mindre än vittringsgraden (Gribble 1990, citerad efter Aggregates op. cit.). Vidare påpekar man att lättviktsballast har absorptionsvärden mellan 5 och 20%, men storleken och karaktären hos porerna i detta material är annorlunda och det går t.ex. att göra hållbar betong av det ändå. (Aggregates, op. cit.).

## 8 Permeabilitet

Permeabiliteten eller den hydrauliska konduktiviteten,  $k$ , anger hur genomträngligt ett material är för vatten. Den definieras som kvoten mellan transporthastigheten och den hydrauliska gradienten. När  $k$  är större än  $10^{-4}$  m/s betecknas materialet som självdränerande, medan material med lägre värden än  $10^{-9}$  m/s anses som täta (Sjöholm et al., 1994).

Egenskapen har betydelse för val av dräneringsmetod samt bedömning av tjälfarlighet och lagningshastighet.

Permeabiliteten påverkas av kornstorleksfördelning, mineralsammansättning, kornform och textur, porvolym och vattenmättnadsgrad. Även vattnets egenskaper såsom temperatur och viskositet samt strömningstyp spelar roll. Den cementserande egenskapen som finns hos vissa restprodukter måste också beaktas.

Permeabiliteten ska bestämmas ur en direkt metod, eftersom empiriska formler, teorier och andra indirekta bestämningar t.ex. ur vattenabsorption är osäkra enligt Sjöholm et al. (op. cit.).



## Provningsmetoder i laboratorium

Valet av utrustning beror på vilken permeabilitet som förväntas. I lågpermeabla material ska en utrustning med rörliga väggar användas för att undvika läckage och för att underlätta vattenmättnad av materialet. En cellpermeameter är lämplig för intervallet  $10^{-6}$ – $10^{-11}$  m/s, t.ex. i "självhårdnande" material, medan en rörpermeameter är lämplig i intervallet  $10^{-2}$ – $10^{-9}$  m/s, dvs. främst för granulära material. (Chandler et al., 1997).

## Provningsmetoder i fält

Den hydrauliska konduktiviteten hos ytliga jordlager t.ex. tätskikt kan uppskattas med s.k. infiltrometrar. Dessa kan vara av typen enkelringsinfiltrometer eller dubbelringsinfiltrometer. På större djup, företrädesvis under grundvattenytan, är filterspetsar s.k. piezometrar lämpligast. (Sjöholm et al., 1994).

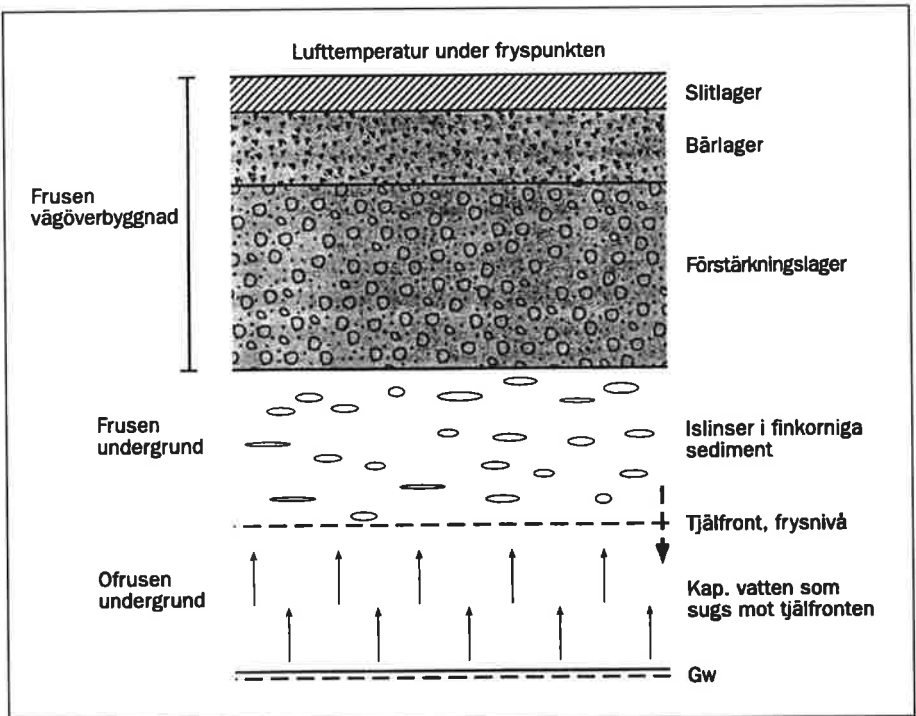
Mätningar av permeabiliteten över grundvattenytan i fält är förknippad med relativt stora osäkerheter enligt Sjöholm et al. (op. cit.). Med hänsyn till detta bör fältbestämningar betraktas som ett mått på storleksordningen av permeabiliteten snarare än som ett absolut värde. För att fältförsöken ska kunna anses som representativa måste en tillräckligt stor yta provas. Därför är infiltrometerförsök med stora infiltrometrar i de flesta fall att föredra framför bestämning med filterspetsar.

## 9 Tjällyftningsbenägenhet

Ett tjällyftningsbenäget material fryser under vattenuptagning och därmed stor volymutvidgning, vilket ger lyftning av markens eller vägens överyta. När samma material tinar bildas ett överskott av vatten.

Båda fenomenen är oönskade i vägkonstruktioner eftersom ojämna lyftningar kan ge upphov till sprickbildning i bundna lager och vattenöverskottet ger bärrighetsnedsättning om det inte kan dräneras bort snabbt. Därför tillåts inte tjällyftningsbenägna material i vägöverbyggnader. Om undergrundsmaterialet är tjällyftande dimensioneras överbyggnadens tjocklek så att lyftning inte ska uppkomma eller åtminstone ska begränsas och framför allt inte ska bli ojämn. Andra åtgärder är att ett isolerande skikt läggs ovanpå undergrundsmaterialet eller att det helt enkelt grävs bort och ersätts med ett icke tjällyftande material.

Tjälbildning och den resulterande tjällyftningen beskrevs redan av Beskow (1935). Han visade att vid s.k. heterogen tjälning transporteras vatten till tjälgränsen där det bildar islinser. Vattentillförseln till tjälgränsen i tjällyftande jord sker så gott som uteslutande genom strömning av vatten genom jordartens porer, dvs. kapillär strömning (figur 9-1).



Figur 9-1 Skiss av tjältningsprocessen (Svensson, 1997)

Det är frysningen av detta tillförda vatten som ger tjällyftningen snarare än den 9-procentiga volymökningen som uppkommer när befintligt vatten fryser till is (homogen tjälning). Kornstorleken, tjälningshastigheten, belastningstrycket och vattenförhållandena bestämmer om tjälningen blir heterogen eller homogen.

För att heterogen tjälning ska uppkomma krävs att nedanstående tre förutsättningar är uppfyllda.

1. Tillgång till kapillärt vatten som kan forma stora islinser.
2. Tillräckligt finkornigt material för att sänka frystemperaturen i de små hålrummen. Fryspunktsnedsättningen beror på den attraktion, adsorptionskraften, som jordartspartiklarna utövar på vattenmolekylerna. Adsorptionskraften har visats vara proportionell mot partiklarnas specifika yta så att fryspunktsnedsättningen för varje vattenhalt är större ju finkornigare jordarten är.
3. Tillräckligt hög permeabilitet för att tillåta fri fuktrörelse till zonen där islinser bildas.

Därför är jordar med medelhög permeabilitet mest tjällyftande, t.ex. siltigt grus, siltig sand, sandig silt och lågplastiska leror.

Att tjällyftningsbenägenheten kan sägas bero av halten av och kvaliteten på finjorden har utnyttjats i kraven på vägmateriäl. I de flesta länder ställs indirekta krav på finjordshalt och plasticiteten hos finjorden i stället för krav på direkt provning av tjällyftningen.

## Kapillaritet och kapillär stighöjd

Kapillariteten är ett hydrostatiskt tryck som kommer till utveckling i en jordart vid dess beröring med vatten, och äger för en viss jordart vid viss packningsgrad ett bestämt belopp (Beskow, 1929). Enligt Tekniska nomenklaturcentralen, TNC, definieras kapillaritet som en vätskas förmåga att till följd av ytspänning stiga eller kvarhållas i rör eller poröst material (TNC, 1975).

Kapillär stighöjd (egentligen maximal kapillär stighöjd) är den höjd till vilken vattnet så småningom stiger i en jordpelare som med sin nederända står i vatten.

Det har visat sig att de normalt tjällyftande jordarnas kapillaritet ligger mellan ungefär 2 och 10 meter. Det är jordar med kornstorlek runt 0,006–0,06 mm. Som jämförelse kan nämnas att maximal kapillaritet för grus är 0–5 cm. Beskow (1935) angav gränsen mellan icke tjällyftande och möjligt tjällyftande jordar till 1 m kapillaritet. Det är denna gräns som ligger till grund för VÄG 94:s krav på maximalt 1 m kapillaritet hos skyddslagermaterial.

## 9.1 Provningsmetoder i laboratorium

Det finns flera indirekta metoder för bestämning av tjällyftningsbenägenhet. Beskows kapillaritetskriterium som beskrivits ovan är ett. Casagrandes kriterium samt det österrikiska mineralkriteriet är två andra.

*Casagrandes* kriterium innebär att om tillräckligt med vatten (grundvatten eller kapillärvatten) är tillgängligt kan man förvänta sig islinsbildning i graderade jordar där andelen partiklar som är mindre än 0,02 mm överstiger 3 viktprocent. I ensgraderade jordar uppträder detta när motsvarande andel är större än 10 viktprocent. (Casagrande 1934, citerad efter Waibel 1975). Med graderade jordar menas att graderingstalet,  $c_u$ , är större än 15.

I det *österrikiska mineralkriteriet* som gäller för material till bärlager har detta villkor vidareutvecklats så att hänsyn också tas till innehållet av s.k. aktiva (svällande) mineraler i finjorden. Det är innehållet av kaolinit, klorit, vermiculit, montmorillonit och glimmer som begränsas på olika sätt. Kan inte mineralkriteriet uppfyllas måste frysförsök utföras.

Mineralkriteriet är uppbyggt så att kornstorleksfördelningen bestäms för det aktuella materialet efter modifierat proctorförsök eller efter inbyggnad i vägen. Om andelen partiklar som är mindre än 0,063 mm understiger 4 viktprocent (5 viktprocent om det är ett känt material) anses materialet icke tjälfarligt. I övriga fall kontrolleras även andelen partiklar som är mindre än 0,02 mm och om denna andel överstiger 3 viktprocent (5 viktprocent för kända material) måste mineralinnehållet kontrolleras och uppfylla vissa krav. Om det visar sig att inga aktiva mineral föreligger får andelen partiklar som är mindre än 0,02 mm vara så hög som 8 viktprocent med tilläggskravet att halten ler (partiklar mindre än 0,002 mm) ska vara maximalt 1 viktprocent. (Kappel, 1987). I Sverige har vi liknande krav där lerhalten i bär- och förstärkningslager ska undersökas om finjordshalten överstiger vissa nivåer.

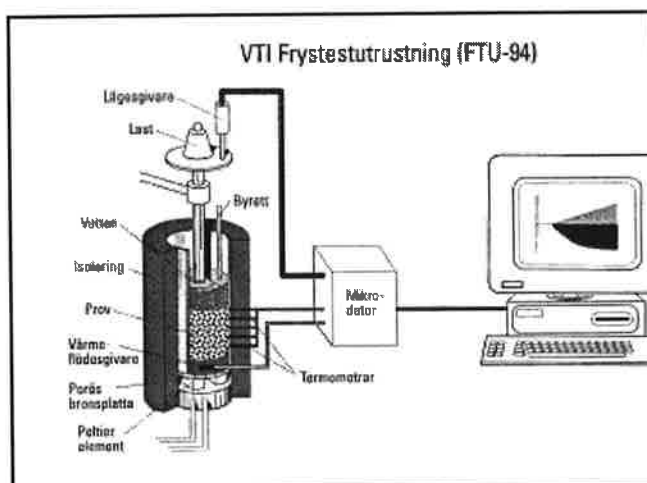
Det har även utvecklats några direkta metoder där ett material utsätts för frysning i laboratoriet och den uppkomna lyftningen registreras. Tre sådana metoder beskrivs här.

## Self-refrigerated unit, SRU

SRU har utvecklats av Transport and Road Research Laboratory, TRRL, i England. Metoden går ut på att cylindriska prov med diametern 100 mm och höjden 150 mm packas in och utsätts för frysning ovanifrån medan den nedre änden har fri tillgång till vatten. Nio prov kan frysas parallellt. Överytans lyftning mäts med vissa intervall under 96 timmar och den maximala lyftningen definieras som materialets tjällyftning. Om lyftningen är högre än ett visst värde klassificeras materialet som tjälfarligt. Metoden är upptagen som brittisk standard (BS 812:Part 124), men hade i sin ursprungliga version en del precisionsproblem och har därför omarbetats under 1990-talet (Aggregates, 1993). Enligt the Aggregate Handbok (1991) hade man också problem med korrelationen mellan laboratorieresultat och fälterfarenheter.

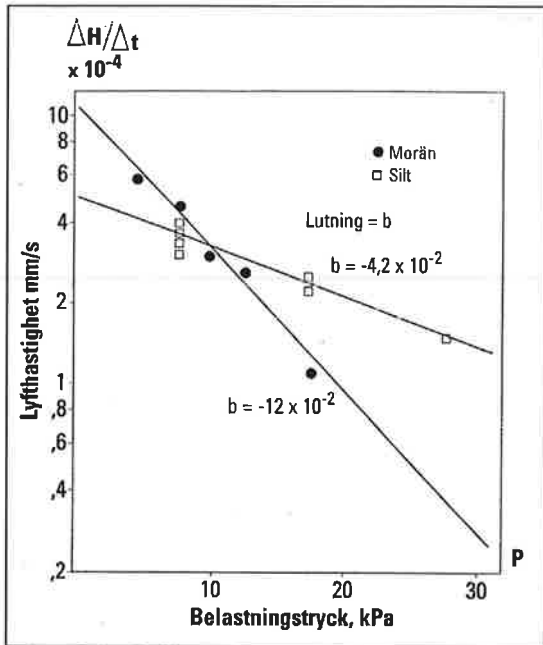
## Frystestutrustning FTU –94

FTU –94 är VTI:s utrustning för frystester som har använts under många år (figur 9-2).



Figur 9-2 VTI Frystestutrustning FTU –94 (Stenberg, 1997)

Provningsen går till så att materialet packas in med handstamp i en plastcylinder med höjden 100 mm och diametern 110 mm. Materialet packas in i kapillärt vattenmättat tillstånd och belastas i ett dygn under vatten. Frysning sker underifrån med konstant värmeflöde och med tre olika vertikallastningar 7, 17 och 27 kPa. Överytans lyfthastighet registreras under provningen och avsätts sedan som funktion av belastningstrycket i ett semilogaritmiskt diagram (figur 9-3).



**Figur 9-3** Lyfthastighet vs belastningstryck för två jordarter. Linjens lutning anger  $b$ -värdet och  $h_0$  erhålls som linjens skärning med  $y$ -axeln. (Stenberg, 1997)

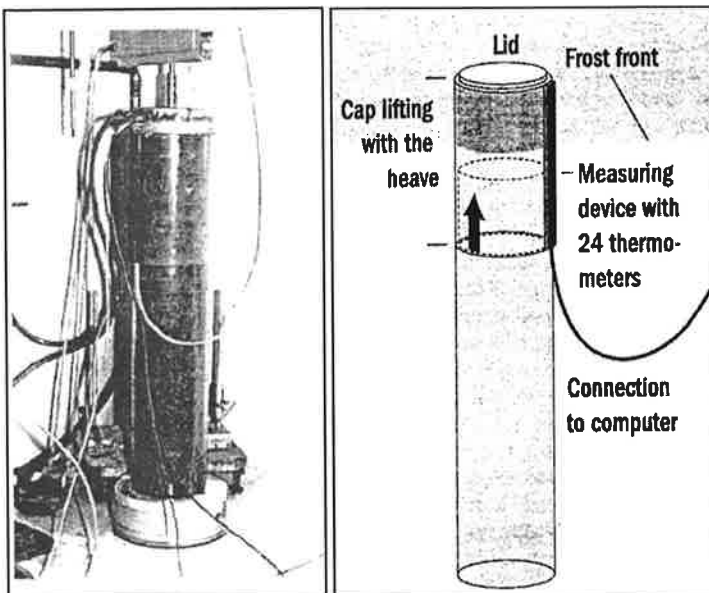
Ur diagrammet utvärderas de båda parametrarna  $a$  och  $b$ . Lutningen hos regressionslinjen benämns  $b$ -värdet.  $a$ -värdet beräknas ur medelvärdet för värmeflödet,  $q_0$ , under de utförda frystesterna och lyfthastigheten,  $h_0$ , vid obelastat prov.

För att ett material ska anses lyftande, dvs. under frysning ackumulera vatten i form av is och därvid överskrida vattenmättnad i ofruset tillstånd, skall det uppmätta lyftbeloppet vara större än 10% av provets porvolym. Är lyftningen mindre än detta belopp är materialet icke lyftande och  $a$ - och  $b$ -värden får ett underordnat intresse för en tjälskyddsdimensionering.

### Frystest enligt Hermansson

Under senare år har en ny frystestutrustning utvecklats vid VTI där provet fryses ovanifrån och vatten tillförs från botten. Metoden efterliknar bättre de verkliga förhållandena. För att kunna studera hur vattnet transporteras under frysförloppet har utrustningen konstruerats för ca 60 cm höga provkroppar och tillåter ett avstånd på drygt en halv meter mellan tjälfront och grundvatten.

Utrustningen består av två plexiglasrör plus sugrör och "mössa" och är så konstruerad att mössan lyfter med tjällyftningen (figur 9-4).



Figur 9-4 Utrustning för frystester i laboratorium (Hermansson, 2000)

Provnigen görs på ett ostört jordprov som trycks in i sugröret så att det sticker upp 11 cm över rörets kant. Mössan träs över provet och locket kommer att vila mot provet. Tanken med hela konstruktionen är att provet kan frysa i mössan och lyfta den utan motstånd på grund av fastfrysning mot rörets vägg. En förutsättning för detta är att tjälfronten inte når ner i sugröret utan hela tiden håller sig i mössan.

Själva frysförsöket utförs i ett kylrum där temperaturen varierar mellan 4 och 6°C. Innan försöket startas placeras ett kylelement på mössans lock, mössan isoleras och hela frysröret placeras i en skål med vatten. På kylelementet läggs vikter, för att efterlikna ett visst marktryck, och på vikterna sätts en lägesgivare som registrerar lyftningen. Till vattenskålen ansluts en anordning som hela tiden säkerställer att vattennivån är konstant och mäter den vattenmängd som förbrukas. I fördjupningar i mössans vägg finns 24 termometrar placerade på 5 mm:s avstånd. Ett mycket tunt skikt av mössans vägg skiljer termometrarna från själva provet. Temperatureerna, lyftningen och vattenförbrukningen registreras automatiskt i en dator under försökens gång, t.ex. varje halvtimme.

Omedelbart efter slutat frysförsök kan den ofrusna delen tryckas ur sugröret och delas i skivor likt en korv. Varje skivas vattenhalt kan bestämmas för att ge svar på hur denna varierar mellan tjälfront och grundvatten (Hermansson, 2000).

## 9.2 Mätning av tjällyftning i fält

Det finns ingen fältmetod för att mäta tjällyftningsbenägenhet hos ett material. Däremot går det att mäta den uppkomna tjällyftningen. Förutom den enklaste

formen som är avvägning av markytan beskrivs här en automatisk metod som utvecklats vid VTI.

## STÖR 99

Detta är en utrustning som kontinuerligt mäter tjäldjup, tjällyftning och grundvattennivå samt termiska förändringar över och under tjälfronten. (STÖR 99 är en vidareutveckling av STÖR 96 som Stenberg och Örbom tog fram.) Utrustningen består av ett långt instrumenterat plaströr med tre delar – jordankare, mellandel och övre del eller hatt (figur 9-5).



*Figur 9-5 STÖR 96  
(VTI aktuellt 3/97)*

Mätaren borrar ned i vägbanans mitt och förankras på drygt fyra meters djup så att rörets övre ände ligger kant i kant med asfaltytan. De tre delarna är teleskopiskt monterade i varandra och hatten är försedd med en horisontell platta som gör att den lyfter i samma utsträckning som vägytan. Vid tjällyftning lyfter först hatten i förhållande till mellandelen, vid större tjäldjup griper marken tag i mellandelen och lyfter den i förhållande till ankaret. Båda dessa relativa rörelser registreras med lägesgivare och adderas vid beräkning av den totala lyftningen. Konstruktionen innebär dock att det bildas ett intervall utan mätare i samma utsträckning som hatten lyfter sig i förhållande till mellandelen.

Utefter hatten och mellandelen finns dessutom mätare av grundvatten samt termometrar för tjäldjupsmätning på var femte centimeter.

Mätvärden sparas t.ex. varje timme i en dator vid vägkanten. Datorn kan också utrustas med modem så att data kan hämtas via telefon.

## 10 Värmekonduktivitet

Värmekonduktiviteten är ett mått på ett materials värmeledningsförmåga. Den anger den värmemängd i joule som på 1 sekund leds genom  $1 \text{ m}^2$  av ett 1 meter tjockt materiallager då temperaturskillnaden mellan materialets ytor är  $1^\circ\text{C}$ . (Betonghandbok, 1997). Värmekonduktiviteten betecknas med  $\lambda$ .

Av de tre komponenterna som finns i en mineraljord – mineralpartiklar, vatten och luft – är luft den sämsta värmeledaren och mineralpartiklarna den bästa.  $\lambda_{\text{luft}}=0,024$ ,  $\lambda_{\text{vatten}}=0,586$  och  $\lambda_{\text{granit}} \approx 2,3$  W/(m·°C) (Beskow, 1935). Det betyder att vattenkvoten och lagringstätheten har stor betydelse för ett obundet materialagers värmeledningsförmåga. Dessutom har mineralinnehållet, framför allt innehållet av kvarts, samt strukturen och kornstorleksfördelningen betydelse. För kapillärmättad mineraljord ligger  $\lambda$  omkring 1,3–1,7 W/(m·°C).

Egenskapen är viktig för vägmateriäl eftersom ett material med låg värmeledningsförmåga är värmeisolerande. Detta kan vara både positivt och negativt i vägkonstruktionssammanhang. Å ena sidan kan ett isolerande material användas för att minska tjälnedträngningen, t.ex. läggs ibland cellplast och liknande ovanpå tjälfarliga terrassmaterial. Cellplast har  $\lambda = 0,045$  W/(m·°C). Å andra sidan hindrar ett isolerande material jordvärmen från att värma vägytan, vilket kan ge risk för frosthalka.

Vägverkets regler begränsar därför användningen av material med låg värmeledningsförmåga i belagda vägars överbyggnader. Sålunda måste material med  $\lambda$  mindre än 0,6 W/(m·°C) läggas minst 25 cm under vägytan och material med  $\lambda$  mindre än 0,3 W/(m·°C) minst 50 cm under vägytan. Värdena gäller för torrt material (VÄG 94).

## 10.1 Provningsmetoder

Det vanligaste sättet att mäta värmeledningsförmågan i jord är med sondmetoden. Den kan användas både vid laboratorie- och fältmätning.

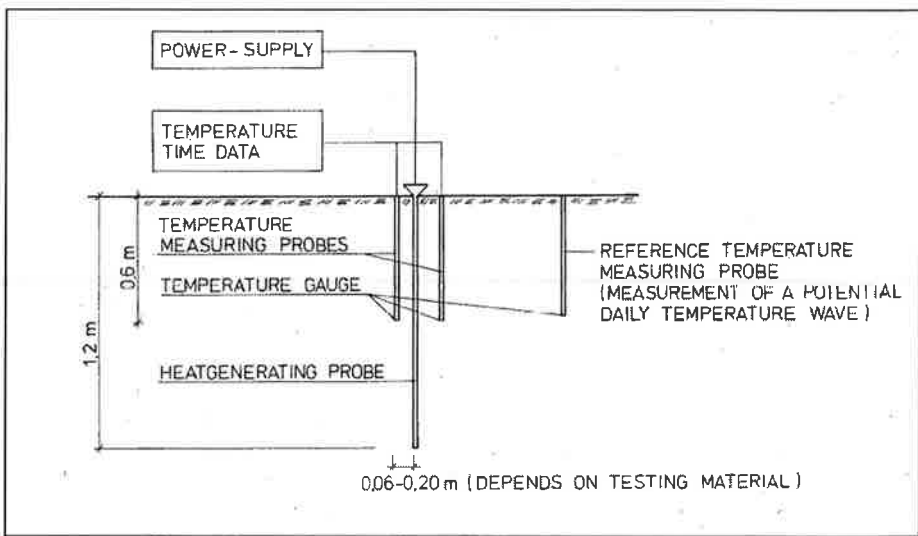
I laboratorium kan värmeledningsförmågan för fasta material bestämmas i s.k. *plattapparat*. Denna kan också användas för granulära material förutsatt att kornstorleken inte är för stor i förhållande till provets tjocklek.

Eftersom värmeledningsförmågan har betydelse för tjälnedträngningen i ett material kan studier av tjälldjupet i olika vägmateriäl ge en uppfattning om värmeledningsförmågan insitu. I denna mening kan *tjälldjupsmätare* ses som en indirekt mätare av värmeledningsförmågan. Därför beskrivs här också ett par fältutrustningar för mätning av tjälldjup eller tjälgräns.

### Sondmetoden

Denna metod innebär att en sond med värmespiral sticks ner i materialet. Sonden värms upp under en viss tid och temperaturen registreras. Temperaturgivaren sitter antingen mitt på värmesonden (ensondsmetoden) eller i ett separat hål bredvid (flersondsmetoden) (figur 10-1).





**Figur 10-1** Flersondsmetoden (Sundberg, 1988)

Temperaturen registreras från och med det att värmesonden börjar avge värme. Värmeledningsförmågan kan sedan beräknas ur ett logaritmiskt samband.

Ensondsmetoden är mycket snabb och enkel. Det är dock viktigt att ett linjärt samband verkligen utbildas mellan temperatur och  $\log(\text{tid})$ . Annars finns risk för stora mätfel. (Sundberg, 1988).

Sondmetoden är en instationär metod, vilket innebär att temperaturen förändras över tiden. Därför kan flersondsmetoden och i viss mån även ensondsmetoden användas för att bestämma diffusiviteten. Det innebär att materialets specifika värmekapacitet kan beräknas.

### Plattapparat (SS 02 42 11)

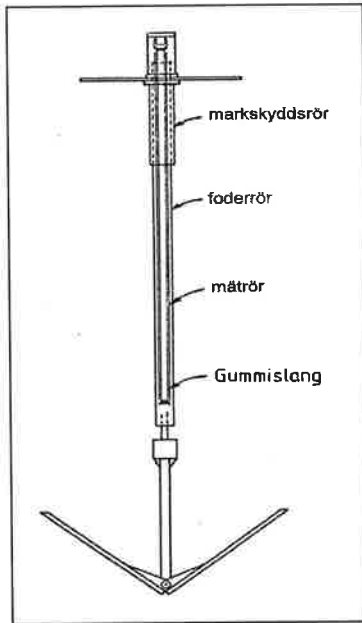
Till skillnad från sondmetoden är plattapparatmetoden stationär, dvs. endast värmeledningsförmågan kan bestämmas.

Vid provning placeras materialet löst utfyllt i en låda. Normalt konditioneras det under en viss tid före provning, så att en jämn fukthaltsfördelning erhålls. Lådan placeras mellan två plattor med yttermåten 600×600 mm. Den ena är en värmeplatta med känd effekt och den andra är en kylplatta. Vanligtvis väljs temperaturer så att provets medeltemperatur blir +10°C. Sedan stationärt tillstånd uppnåtts, mäts temperaturen på båda sidor om provmaterialets ytor och med kännedom om arean och tjockleken på materialet kan sedan värmeledningsförmågan beräknas. (Andersson et al., 1999).

Denna metod kräver relativt lång stabiliseringstid, god kontakt och ett endimensionellt flöde. (Sundberg, 1988).

## Tjälgränsmätare enligt Gandahl

Tjälgränsmätarens konstruktion och funktion är beskriven av Gandahl (1957 och 1987) och framgår av figur 10-2.



**Figur 10-2** Tjälgränsmätare  
(efter Gandahl, 1987)

Själva mät röret är ett genomskinligt plaströr, i vilket en gummislang är inspänd. Gummislangen har en yttre diameter som något understiger den inre diametern av mät röret. Mellanrummet mellan plaströret och gummislangen är fyllt med indikatorvätska av destillerat vatten som färgats med metylenblått.

Till tjälgränsmätaren hör ett yttre foderrör, som också kan vara av plast, och som är förankrat i nederänden, samt ett markskydds rör i vilket mät röret skruvas fast. Markskydds röret är en teleskopisk anordning som medger att mät röret kan följa väg- eller markytans rörelser på grund av tjällyftning.

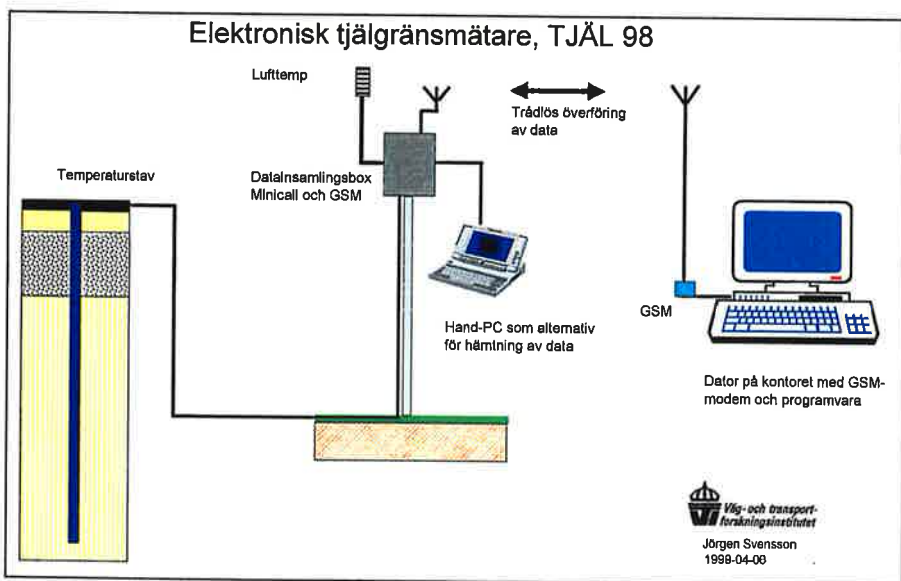
Då tjälen tränger ned i vägen eller marken, fryser samtidigt vattnet i mätaren och den mörkblå indikatorvätskan skiftar till vitt eller färglöst (i praktiken ljusblått) varvid tjälgränsen tydligt framträder. Vid upptining skiftar färgen åter till mörkblått. Mätaren avläses genom att mät röret tas upp ur foderröret (figur 10-3). Mät röret är graderat i fem cm intervall för att underlätta avläsningen.



**Figur 10-3** Avläsning av tjälgränsmätare enligt Gandahl.  
(Foto: VTI Maria Arm)

### Temperaturgivare TJÄL 98 med automatisk registrering

Vid VTI har också utvecklats en modern variant av Gandahlmätaren som kallas TJÄL 98 (Svensson, 1999b). TJÄL 98 är en utrustning för kontinuerlig mätning av temperaturen i väg och undergrund och därigenom även tjäl djupet. Indikatorvätskan är här utbytt mot elektroniska temperaturgivare som registrerar temperaturen kontinuerligt (figur 10-4). Till skillnad från STÖR mäter inte denna utrustning grundvattennivån eller tjällyftningen.



**Figur 10-4** Temperaturgivare TJÄL 98 med automatisk registrering (Svensson, 1999b)

Mätutrustningen kan anpassas till önskat antal mätningar per dygn, exempelvis varje timme. I temperaturstavens standardutförande mäts temperaturen på var femte cm ner till två meters djup. I utrustningen ingår också program för bearbetning och redovisning av inhämtade data. Mätdata överförs från mätlokalen till datorn på kontoret med hjälp av trådlös kommunikation.

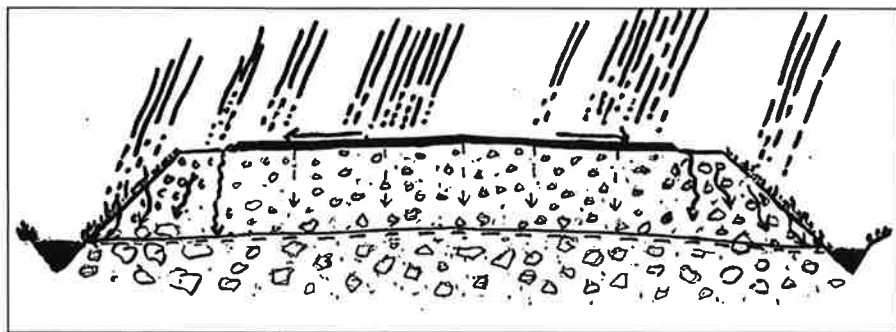
Vid nyinstallation av TJÄL 98 används i stort sett samma utrustning som för Gandahlmätaren. I befintliga Gandahlmätare kan alltså mätröret bytas ut mot den nya temperaturstaven och kopplas in till en databox för vidare dataöverföring till kontorets dator.

Fördelen med denna utrustning är förutom den kontinuerliga mätningen att man slipper gå ut på vägen för att mäta. Utrustningen är också mer driftsäker och kräver mindre underhåll. (Svensson, op. cit.).

## 11 Miljöpåverkan (utlakning)

Texten i detta avsnitt bygger delvis på uppsatsen ”Påverkan på grundvatten från restprodukter i vägar” utförd inom forskarutbildningskursen Tillämpad hydrogeologi 1998–99 (Arm, 1999).

Med miljöpåverkan från vägmateriale menas här att vägmaterialet, när det ligger i vägkroppen, vittrar sönder eller reagerar med vatten och vissa ämnen löses ut. Dessa ämnen kan sedan transporteras genom perkolation och strömmande vatten till grundvattnenytan respektive till ett ytvatten (figur 11-1).



Figur 11-1 Vattnets infiltration i en vägkropp

Följande faktorer påverkar förloppet för utlakning och spridning av ett visst ämne:

- Totalhalt – Hur mycket innehåller restprodukten av det aktuella ämnet?
- Tillgänglighet – Hur löst bundet är ämnet i restprodukten?
- Vattenomsättning – Vilket vattenflöde kommer i kontakt med restprodukten? Det kan vara nederbörd, ytvatten eller mark- och grundvatten i olika mängder. Hur rör sig vattnet?
- Vattnets pH-värde – påverkar metallers löslighet.

- Redoxförhållanden – påverkar vissa metallers löslighet.
- Restproduktens kornstorlek – Hur stor är den specifika ytan som ämnet kan laka ut från?
- Restproduktens och den omgivande markens hydrauliska konduktivitet.
- Omgivande marks reduktions- eller buffringsförmåga.
- Transportavståndet till grundvattenytan.

## Utlakningsbara ämnen

De ämnen som är intressanta i utlakningssammanhang är tungmetaller, salter och en del organiska ämnen. Med salter menas främst klorider, sulfater och natrium. Bland de organiska ämnena är både aromatiska, polyaromatiska och klorerade kolväten aktuella liksom pesticider. Bland tungmetallerna brukar innehållet av följande ämnen undersökas:

Arsenik, As	Kvicksilver, Hg
Kadmium, Cd	Nickel, Ni
Krom, Cr	Bly, Pb
Koppar, Cu	Zink, Zn

Många metallföreningar är starkt giftiga. När de ingår i organiska föreningar blir de fettlösliga och därmed mer tillgängliga för biologiskt liv. Tungmetallernas giftverkan beror på att de konkurrerar med lättare spårmetaller som ingår i enzymer eller som aktiverar enzymer. Ofta finns i något organ ett enzym som är känsligt för tungmetallförgiftning. Då drabbas detta organ i första hand. De flesta organ har så stor reservkapacitet att en liten funktionsnedsättning knappast märks. Hjärnan är ett organ vars kapacitet ofta behöver utnyttjas till 100%. Därför anses hjärnan som det kritiska organet vid liten eller måttlig exponering för t.ex. bly och kvicksilver, fastän dessa metaller påverkar flera organ. Eftersom tungmetallerna konkurrerar med ”nyttiga” spårmetaller, blir individer med brist på dessa metaller mer känsliga för tungmetallförgiftning och vice versa. (Lindberg, 1991).

För att ge uppmärksamhet åt varifrån ovanstående metaller kommer och för att vidga perspektivet lite följer här en presentation av de nämnda ämnena med angivande av förekomst utanför vägbranschen samt vanliga användningsområden. Uppgifterna är hämtade från Pär Åslunds sammanställning *Metaller i vatten* (Åslund, 1994).

Metallen *arsenik, As*, och dess organiska föreningar är giftig, miljöfarlig och cancerframkallande. Den förekommer i bly-, koppar- och guldmalmer (i halter upp till 3%). Stor förekomst även i sulfidmalmer och svartskifferar. Liten förekomst i graniter, sand- och kalksten. Arsenik används som träimpregneringsmedel, i blyhagel och i halvledare (i legering med andra metaller), i läkemedel, glas, bilbatterier mm. Metallen kan spridas till atmosfären vid förbränning av impregnerat trävirke. Den har låg löslighet i närvaro av koppar, järn och mangan. I jord och sediment bildas svårösliga arsenatkomplex med t.ex. kalcium, järn och svavel.

*Kadmium, Cd*, är giftig och cancerframkallande samt miljöfarlig. Metallen förekommer i liten omfattning i graniter, kalk- och sandstenar, men mycket i sul-

fidmalmer och svartskifferar. Den har tidigare använts i färger och som värme-stabilisator i PVC-plast. Den används också i ackumulatörer, bildskärmar mm. Rörligheten hos kadmium i marken styrs av pH- och redoxpotential. Fastläggning sker genom adsorption på lermineral och järn- och manganoxider. Förekomst av kadmium i vatten har starkt samband med pH på så vis att sjunkande pH medför ökande kadmiumhalt.

*Krom, Cr*, används i rostfritt stål, eldfast tegel, träskyddsmedel, målarfärger, rostskyddsfärg, cement, galvaniserad plåt, fyrverkeripjäser mm. Metallen har ringa geokemisk rörlighet. I oxiderande miljö är krom mer lättlöslig. Krom kan oxideras till lättlösliga komplexa anjoner. I vatten dominerar 6-värd krom (Cr VI) som är cancerframkallande. Vattenlösliga kromföreningar är allergiframkallande. I närvaro av organiskt material reduceras 6-värd krom till 3-värd. Krom i formen Cr III är en ofarlig eller snarare en livsnödvändig metall enligt Lindberg (1991). Cr VI däremot är giftig och miljöfarlig.

*Koppar, Cu*, är miljöfarlig, kopparsulfat är hälsofarlig. Sulfidmineral som kopparglans och kopparkis utgör den största delen (75%) av världens koppartillgångar. Metallen används i elektrisk utrustning, legeringar, maskiner, galvanisering, båtbottnfärger, läkemedel, byggnadsmaterial, träimpregnering, pigment mm. Koppar anses vara en av de minst rörliga metallerna i mark.

*Kvicksilver, Hg*, är en giftig, allergiframkallande och miljöfarlig metall. Den används i elektriska apparater, färger, katalysatorer, amalgam, batterier, lysrör och lampor mm. Användningen har minskat kraftigt de senaste årtiondena, men metallen anrikas i näringskedjan och tecken tyder på att en allvarlig kvicksilverförorening redan uppstått. Kvicksilver omvandlas i naturen till mycket giftigt metylkvicksilver. Den binds hårt till organiskt material i mark och sediment.

*Nickelföreningar* är giftiga, cancerframkallande och allergiframkallande. Ren nickel är inte cancerframkallande. Metallen förekommer i sulfid- och oxidmalmer. Den används i legeringar, ytbehandling, mynt, förnickling, verktyg mm. Nickel, Ni, adsorberas huvudsakligen på järn-, aluminium- och manganoxider.

*Bly, Pb*, är en giftig, hälsofarlig och miljöfarlig metall. Den förekommer i stor omfattning i sulfidmalmer och graniter. Bly används som tillsats i bensin, i elektriska ackumulatörer, plåt, färger, glas och plast. I vatten är bly huvudsakligen bunden till partiklar, humusämnen och kolloidkomplex av t.ex. järn och manganföreningar. I mark har bly låg rörlighet på grund av bildning av svårslösligt blyulfat, blyfosfat och blykarbonat. Bly adsorberas också till lermineral. I sura jordar komplexbinds bly starkt till organiskt material. I vatten medför sjunkande pH ökande blyhalt.

*Zink, Zn*, är ett viktigt näringsämne. Det används i korrosionsskydd, legeringar, färgpigment, galvaniseringar mm. Metallens löslighet ökar med sjunkande pH. (Åslund, 1994).

## Vattenomsättning

En viktig parameter som styr lakningsförloppet är vilket vattenflöde som kommer i kontakt med restprodukten. Här spelar *vägens utformning* liksom metodval och kvalitet i *byggskedet* samt *underhåll* av den färdiga vägen stor roll.

Rogbeck och Elander (1995) beräknade att efter sex år skulle materialet under den belagda delen av E4 ha utsatts för vattenomsättningen  $L/S=0,04$  och materialet i vägslänterna för  $L/S=4$ . Uttrycket  $L/S$  anger kvoten mellan mängden vätska (liquid) och mängden material (solid). Vattenomsättningen i beräkningarna byggde på antagandet att nettointiltrationen genom vägbeläggningen var 10 mm/år och motsvarande för slänterna var 600 mm/år. Då beaktades även tillskottet av avrinnande vatten från vägen.

För en provväg i Linköping gjordes en liknande beräkning av Kullberg (1990). Den grundades på SMHI:s nederbördsdata för en närliggande mätstation i Malmslätt samt bedömningen att avdunstningen från den asfaltbelagda ytan var låg på grund av vägytans skevning (tabell 11-1).

**Tabell 11-1 Nederbörd i Linköping 1988–1990 (efter Kullberg, 1990)**

År	Nederbörd (mm)	Bedömd avdunstning (%)		Nettonederbörd (mm)	
		belagd yta	slänt	belagd yta	slänt
1988	578	10	40	520	347
1989	425	10	40	383	255
1990 (jan–april)	100	10	40	90	60

Om endast det vatten som motsvarade den totala nettonederbörden, ca 660 mm, antogs passera genom slänten, motsvarade vattenomsättningen under den aktuella perioden  $L/S=1,5$ . Om man även tog hänsyn till att den nedre delen av slänten tog emot en del av avrinningen från den belagda ytan i en infiltrerande zon, blev  $L/S$ -kvoten ca 40. (Kullberg, op. cit.).

Baldwin et al. (1997) jämförde i några exempel den tid det tar för en viss nederbördsmängd att perkolera genom en vägkonstruktion i olika skeden. Den tänkta vägen var en engelsk motorväg med bankfyllning av olika restprodukter. De fyra fall som jämfördes var en ofärdig vägbank, en vägbank med belagd yta och slänten täckt av ett jordtäckte med två olika permeabiliteter samt slutligen en vägbank med sprucken beläggning. I beräkningen tog man hänsyn till vilken mängd vatten som antas nå fram till restprodukten, hur stor volym av fyllningen som berörs, hur snabbt vattnet når fram till restprodukten och hur snabbt det perkolerar igenom fyllningen.

Författarna betonar att beräkningarna endast utgör exempel, de speglar dessutom engelska förhållanden, men den relativa jämförelsen är ändå intressant. Resultaten visar att den sökta perkolationstiden varierade mellan 2 och 44 år för en bankfyllning med hyttsten och mellan 4 och 60 år för en slaggrusfyllning. Perkolationen gick snabbast i fallet med den ofärdiga vägbanken och hälften så fort i fallet med den spruckna beläggningen. De båda andra fallen hade perkolationstider som var ca en tiopotens längre. Skillnaden mellan dessa avspeglade de olika täckningsmaterialens permeabiliteter.

Åtgärder såsom belagda vägrenar och tätade slänter kan redan vid *projekteringen* väljas för att minska vattenflödet i vägkroppen. I tätbebyggda områden kan täckta diken samt brunnar och ledningar för dagvattnet bli aktuellt i stället för slänter och diken. Djupt liggande grundvatten och byggande på bank istället för i skärning är naturligtvis också gynnsamt.

I *byggskedet* blir den obelagda vägen direkt utsatt för nederbörd. Om inte rätt material och rätt tvärfall säkerställs finns det risk för att vatten blir instängt i vägkroppen. Samma effekt får kvarstående vatten i spår från byggtrafiken. Spröda restprodukter krossas sönder av byggtrafik, vilket gynnar utlakningen både genom ökad specifik yta och ökad vattenhållande förmåga.

*Underhållet* av den färdiga vägen syftar bland annat till att hålla överbyggnaden dränerad, dvs. inget vatten ska tillföras genom yt- eller grundvattentillrinning. I praktiken stämmer inte alltid detta. Diken växer igen eller slammas igen efter erosion i slänterna, vilket medför att vatten däms upp och tränger in i innerslänterna. Beläggningen spricker på grund av ålder och dåligt underhåll.

För att någorlunda försäkra sig om ett torrt läge för en restprodukt i vägens överbyggnad, bör man alltså satsa på ett extra omsorgsfullt underhåll av vägen. Ett annat sätt är att utnyttja restprodukten i högtrafikerade vägar, som har de hårdaste underhållskraven.

## Spridning och transport

För att kunna bedöma vilken miljöpåverkan en restprodukt innebär bör man först veta hur de utlakade ämnena sprids och transporteras. Hur mycket når grundvattenytan? Hur snabbt?

Redan i den omättade zonen begränsas spridningen genom *oxidation*, *vidhäftning* till lermineral eller organiskt mineral och biologisk *nedbrytning*. När lakvattnet sedan tillförs yt- eller grundvattnet späds det ut. Generellt gäller att *utspädningen* är proportionell mot transportavståndet. Stora skillnader finns dock mellan olika jordarters förmåga att reducera eller buffra halterna i grundvattnet. Så länge halterna av reducerande element är högre än motsvarande jämviktshalter i det opåverkade grundvattnet har jorden buffringskapacitet kvar.

Även när det gäller olika ämnens transportförmåga finns stora skillnader. Koppar och bly lakas ut i relativt små mängder och uppträder ofta associerade med mineralkorn och organiska ämnen, vilket gör att dessa metaller inte transporteras så långt i vattensystemen. Däremot förekommer zink och kadmium i löst form och fälls ut långsamt, vilket gör att de kan transporteras långt. (Jacks, 1975).

I Naturvårdsverkets allmänna råd för avfallsdeponering (Naturvårdsverket, 1996) används riktlinjen att det ska ta minst ett år för lakvattnet från en slaggrusdeponi att nå en recipient och att eventuell fastläggning ej får tillgodoräknas. Jordens buffringskapacitet fungerar då som en geologisk barriär.

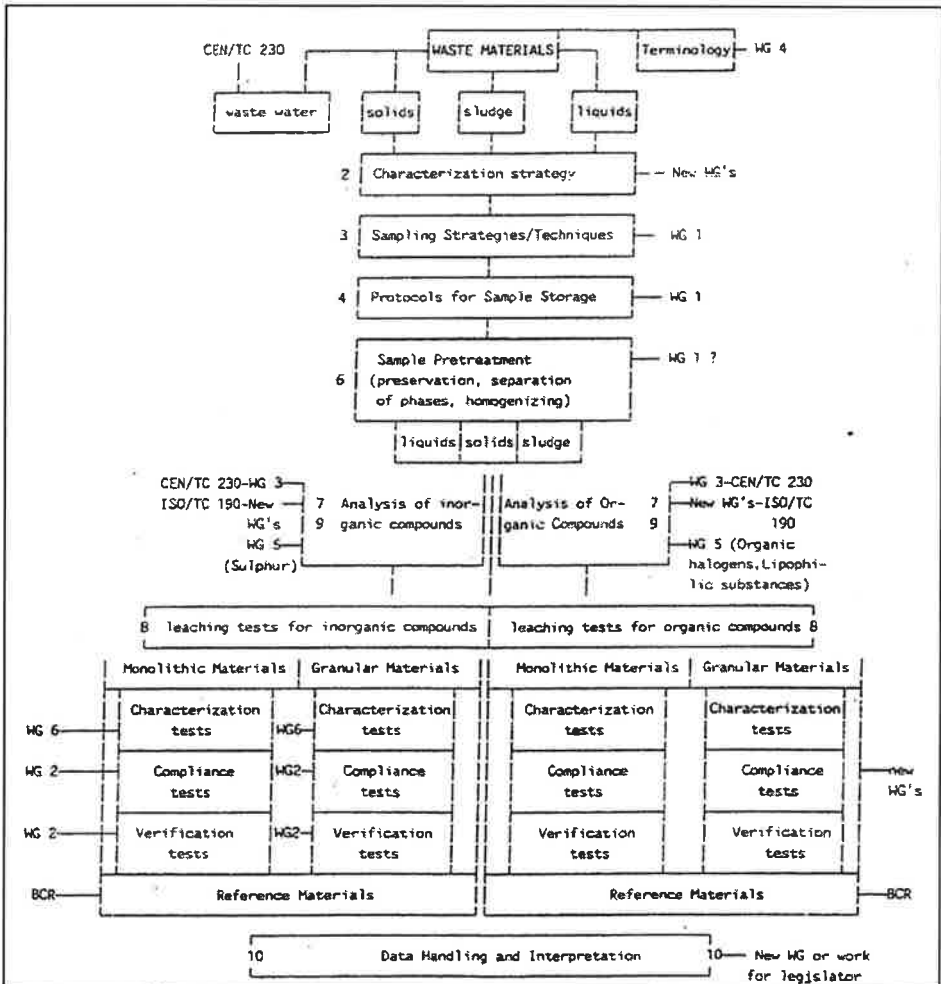
## 11.1 Provningsmetoder i laboratorium

För att ta reda på hur stora halter som kan förväntas laka ut gör man oftast accelererade försök i laboratorium. Fördelen är att man på kort tid och under kontrollerade förhållanden kan undersöka om och hur lakning sker. Nackdelen är att man vanligtvis inte kan variera alla de parametrar som förekommer i naturen



samtidigt med någon större precision, till exempel vattenflöde och vattensammansättning, lufttillgång och dräneringshastighet.

Det finns flera olika metoder för att karakterisera ett materials miljömässiga egenskaper. Eftersom de befintliga laboriemetoderna har en del brister pågår det forskning bland annat på Statens geotekniska institut, SGI, för att designa laborieförsök som visar bättre överensstämmelser med fältresultat. Det pågår också ett försök till europaharmonisering inom detta område, men arbetet går trögt och det finns bara två preliminära europanormer än så länge, Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges (prEN 12457) och Preparation of eluates by leaching of aggregates (prEN 1744-3). Figur 11-2 visar hur harmoniseringsarbetet var strukturerat 1994.



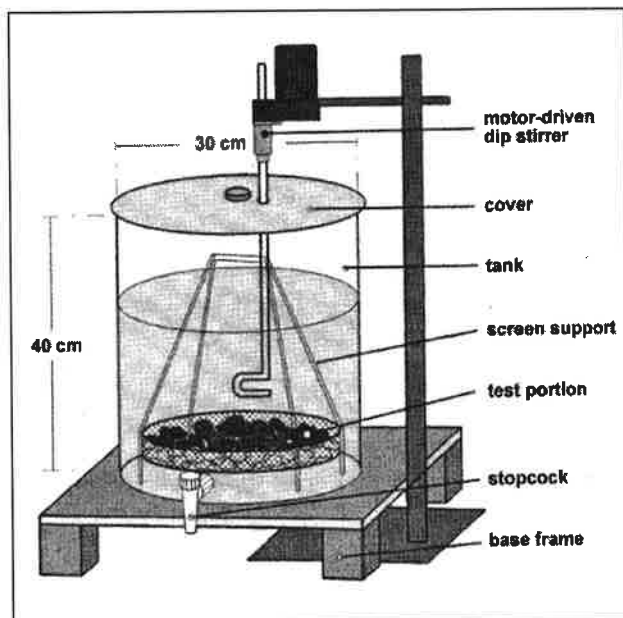
Figur 11-2 Översikt över erforderligt harmoniseringsarbete för karakterisering av avfall (Tukker et al., 1994)

De befintliga metoderna har lite olika användningsområden. Antingen bestämmer man bara ett materials huvudsakliga beståndsdelar eller så bestämmer man

utlakningens förlopp på kort eller lång sikt. Gemensamt för metoderna är dock att *provtagning och provberedning spelar en mycket stor roll för resultatet*, speciellt som det är mycket små prov som analyseras.

Chandler et al. (1997) grupperar lakningsmetoder i två huvudgrupper beroende på om lakningsvätskan förnyas eller inte under försökets gång.

Vid *extraktionsförsök* med eller utan omrörning får en viss mängd material vara i kontakt med en viss mängd vätska under en bestämd tid utan att vätskan byts. Vätskan analyseras då och då under försökets gång eller efteråt. Teorin bakom dessa försök är att jämviktsförhållanden, dvs. konstant koncentration i lakvätskan uppnås vid försökets slut. Skakförsök och tankförsök (figur 11-3) är exempel på den här typen.



**Figur 11-3** Tankförsök med omrörning enligt prEN 1744-3 (Bialucha, 2000)

Vid *dynamiska lakförsök* förnyas lakvätskan kontinuerligt eller då och då. På så sätt upprätthålls en lösningskontrollerad drivkraft för lakning hela tiden. Resultaten erhålls som en funktion av tiden, vilket ger en mer avancerad bild av lakningsmekanismen. Kolonnförsök, lysimetrar och tvåstegs kontrolltest enligt prEN 12457 tillhör den här gruppen.

I den översikt som Chandler et al. (1997) ger över lakningsmetoder som används i Europa och USA ingår 34 st! Här nedan beskrivs de laboratoriemetoder som används i Sverige. Ytterligare kommentarer och jämförelser ges av Fällman (1997).

## Bestämning av totalhalt

Metoden används för att bestämma den *kemiska sammansättningen*, dvs. huvudbeståndsdelar och innehåll av spårämnen. Observera att totalhalten inte säger något om hur mycket som lakar ut. Den här beskrivna metoden är den som SGI använder vid rutinundersökningar. Andra metoder såsom syraextraktion och röntgendiffraktion beskrivs av Fällman & Johansson (1995).

Bestämning görs genom smältning med litiummetaborat kompletterad med syraupplösning i slutna behållare och därefter analys med ICP-teknik (= induktivt kopplad plasma), som bygger på fenomenet att de flesta grundämnen sänder ut ljus av karakteristiska våglängder vid hög temperatur. Upplösning i slutna behållare används därför att vissa grundämnen är flyktiga och går förlorade när smältmetoden används. Halten av arsenik, (As), kadmium (Cd), kobolt (Co), koppar (Cu), kvicksilver (Hg), nickel (Ni), bly (Pb) och zink (Zn) bestäms sålunda efter syraupplösning medan halten av övriga element bestäms efter smältning (Andersson et al., 1999), (SGAB, 2000).

Ett användningsområde för totalhaltsbestämning är för att på ett tidigt stadium bilda sig en uppfattning om t.ex. en rivningsbetongs innehåll. Med hjälp av en slagbormaskin med dammsugare kan små pulverprov tas i betongkonstruktionen redan före rivning av en byggnad. Sedan kan laboratorieanalys av detta pulver ge upplysningar om föroreningar på olika djup från ytan (Molin et al., 1996).

## Bestämning av tillgänglig mängd (NT ENVIR 003)

Metoden används för att bestämma den totalt utlakbara mängden av olika ämnen, dvs. den mängd som kan laka ut då kornstorlek, alkalitet, koncentrationskillnader eller tid inte begränsar utlakningen. Bestämning görs genom ett standardiserat förfarande, ett s.k. *tillgänglighetstest* i två steg. Metoden kallas ibland för *skakförsök* och bygger på den holländska standarden NEN 7341 (1992 och 1995).

Materialet krossas ner så att kornstorleken blir mindre än 125 µm. Det skakas sedan med vatten under vissa tidsperioder eller steg, där förhållandet mellan mängden vätska och mängden material, L/S, är 100 i varje steg. I det första steget hålls pH lika med 7 under tre timmar och i det andra steget är pH lika med 4 i 18 timmar. Lakvätskorna blandas och undersöks därefter med avseende på halten lösta ämnen.

Även oxiderande tillgänglighetstest kan göras. Då mäts och regleras redoxpotentialen så att fullt oxiderande förhållanden för aktuellt pH vidmakthålls. Justringen görs genom tillsats av väteperoxid.

Tillgänglig mängd ger en bild av det värsta som kan hända, dvs. utlakade mängder vid optimala förhållanden för utlakning. Metoden är reproducerbar och snabb.

Observera att ett material med låg totalhalt av ett ämne kan laka ut mer än ett material med hög totalhalt av samma ämne beroende på "instabilitet".

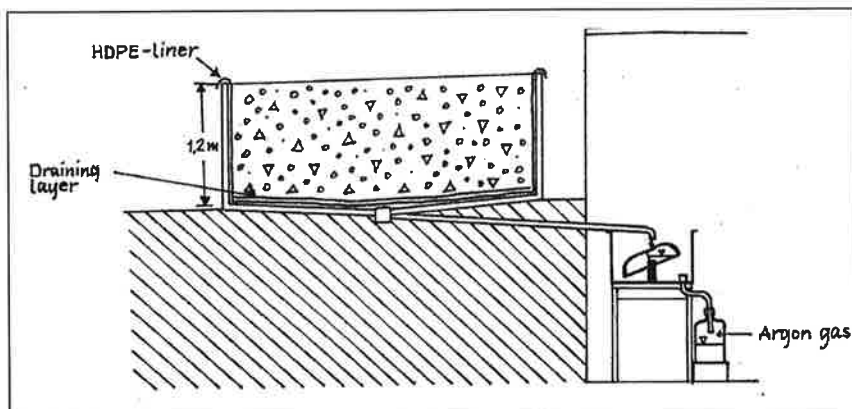
## Bestämning av utlakningens tidsförlopp

Metoden används för att undersöka utlakningens beroende av vattenomsättningen i materialet. Den ger därigenom en uppfattning om utlakningens tidsförlopp. Bestämning görs i laboratorium med kolonnförsök eller i fält med lysimeterförsök.

I *kolonnförsök* får lakvätskan, som är avjoniserat vatten, kontinuerligt passera genom en kolonn fylld med provmaterial. Försöken utförs under vattenmättade förhållanden med uppåtriktat vätskeflöde i kolonnen. (Det finns också kolonnförsök med nedåtriktat flöde). Det bildade lakvattnet tas ut som successiva samlingsprov vid bestämda L/S-förhållanden och analyseras. SGI:s kolonner har bredden 0,1 m och höjden 0,6 m. Största kornstorleken på det undersökta materialet är en tiondel av kolonndiametern (Kälvesten, 1996).

Fördelar med kolonnförsök är att materialet undersöks med dess aktuella kornstorlek och att vatten kan tillföras efter behov för att efterlikna verkligheten. Nackdelar är att metoden kan ge problem med reproducerbarheten. Det bildas lätt kanaler utefter ojämnt packade dränerande partier i kolonnen s.k. kanteffekter. Igensättning med finmaterial kan också vara ett problem (Chandler et al., 1997).

*Lysimeterförsök* kan ses som ett fullskaleförsök utomhus där vätskan utgörs av den aktuella nederbörden på platsen och provmaterialet är utlagt med verklig kornstorlek, lagertjocklek och packningsgrad (figur 11-4).



Figur 11-4 Skiss av SGI:s lysimeter (Fällman, 1997)

Lakvätskan samlas upp under materialskiktet och analyseras med avseende på innehåll. Försöket ger stora möjligheter till simulering, men tar lång tid och kanalbildningar kan inte undvikas (Chandler et al., op. cit.).

## Tvåstegs kontrolltest (prEN 12457)

Försöket kan användas för kontinuerlig kvalitetskontroll vid användning av ett material, efter att totalhalter bestämts och användning godkänts. Bestämning görs med en förenklad utlakningsprocedur i form av ett tvåstegs skakförsök.

Material med korn mindre än 4 mm blandas med avjoniserat vatten i förhållandet L/S=2 i 6 timmar. Lakvätskan avskiljs, varefter ytterligare vätska sätts till materialet så att det ackumulerade förhållandet motsvarar L/S=10 och omblandningen fortgår i ytterligare 18 timmar. Därefter analyseras lakvätskan på ingående ämnen.

Metoden finns föreslagen som europeisk standard och kallas därför CEN-lakning ibland. Den finns också angiven som kontrolltest i Naturvårdsverkets förslag till allmänna råd för deponering (Naturvårdsverket, 1996).

Resultaten från kontrolltest bör normalt jämföras med resultat från kolonnförsök (Fällman et al., 1999).

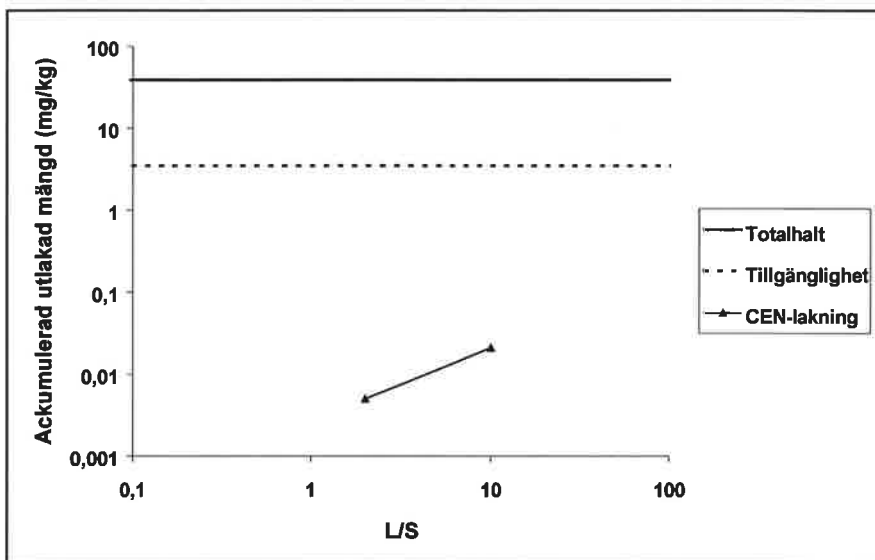
### pH-stat-test (CEN/TC 292 / WG6 Draft)

Metoden används för att undersöka utlakningens pH-beroende.

Material med korn mindre än 4 mm blandas med avjoniserat vatten i förhållandet L/S=5. Försöket utförs med omröring i 24 timmar varvid pH hålls konstant på en viss förutbestämd nivå genom tillsats av salpetersyra eller natriumhydroxid. Därefter analyseras lakvätskan på ingående ämnen.

### Redovisning av totalhalt och lakningsresultat

Figur 11-5 visar hur resultatet från de olika lakförsöken kan redovisas.



Figur 11-5 Principiell redovisning av totalhalt, tillgänglig mängd och CEN-lakning av ett visst ämne för ett material (Carling, personlig kommunikation)

## 11.2 Fullskaleförsök

För att helt förstå effekten på miljön är det viktigt att utvärdera material insitu (Baldwin et al., 1997), (Lindgren, 1998). Ett fåtal fullskaleförsök med restprodukter i vägkonstruktioner har följts upp i Sverige. För att undersöka vilka *metoder* som använts för bedömning av miljöbelastning har ett par utredningar studerats närmare i detta doktorandprojekt.

Den ena behandlar miljökonsekvenser vid användning av hyttsten i en vägöverbyggnad (Rogbeck & Elander, 1995). Det är en översiktlig utredning som Statens geotekniska institut, SGI, gjorde på uppdrag av SSAB Merox inför E4:ans utbyggnad förbi Nyköping 1995. Den andra är ett REFORSK-projekt som bland annat omfattade två provvägar med förstärkningslager av slaggrus (Lundgren & Hartlén, 1991). Provvägarna anlades i Linköping och Malmö i slutet på 1980-talet och utvärderades av SGI och Statens Väg- och Trafikinstitut (VTI).

Utredningarna har i båda fallen omfattat lakningsförsök i laboratorium före objektets byggande och i fallet med slaggrus även uppsamling och analys av lakvatten under ett par år. Därefter har man försökt att jämföra laboratorie- och fältresultat.

I båda projekten gjordes även teoretiska beräkningar av förväntad miljöpåverkan grundat på laboratieförsökens lakningsresultat. I Rogbecks & Elanders utredning (op. cit.) gjordes till exempel en beräkning av vilken ackumulerad utlakning som kunde förväntas de första åren efter färdigställandet, eftersom utlakningen av flera ämnen antogs vara som störst då. Beräkningen baserades på de halter som uppmätts i kolonnförsök.

Den verkliga påverkan på grundvattnet i vägens omgivning har däremot inte undersökts. Orsaken är troligtvis att lakningsförsöken i laboratoriet visat på en mycket långsam utlakning och vägen har anlagts så att avståndet till grundvattnen är långt. Slutligen har det inte funnits ekonomiska möjligheter till längre uppföljningstid än några år. Därför har man inte satsat på några grundvattenrör för uppföljning och kompletterande analyser.

Vägen Kiruna–Narvik är ett av de få projekt där en vägs långtidseffekter på miljön har undersökts (Bäck et al., 1990). Förutom en studie av miljöeffekter under byggnadstiden gjordes en uppföljande studie under fem år från och med vägens öppnande. Studierna omfattade dels analys av lakvatten från en bergbank med mineralrika massor, dels analys av grundvattnet på olika avstånd från vägen. Under byggnadstiden analyserades dessutom bergmaterialet i bergbanken.

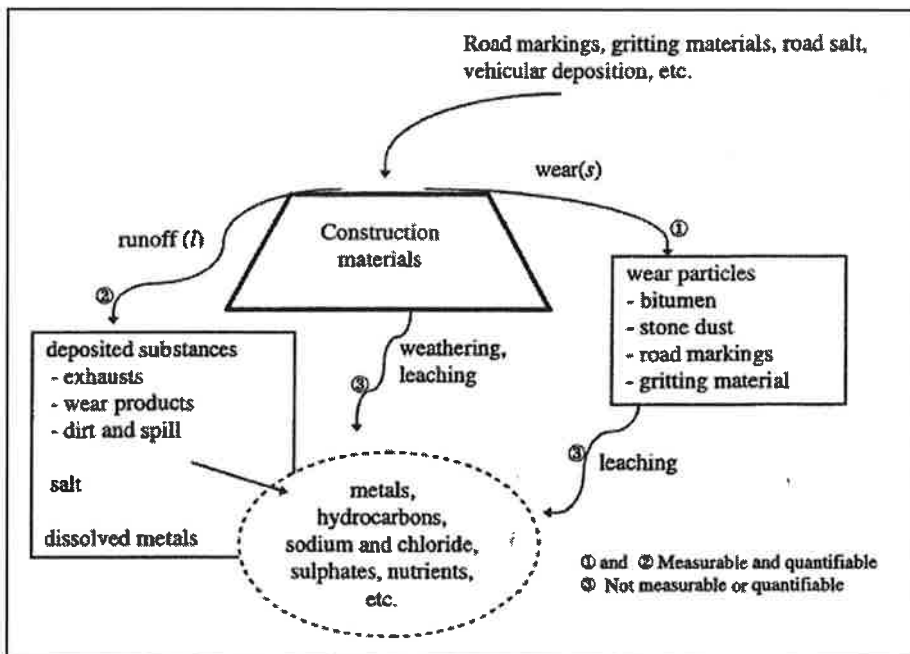
### Erfarenheter från fullskaleförsök

Det är alltså nödvändigt med fullskaleförsök, men det kan också ge upphov till vissa praktiska problem. Ett par av de svårigheter som rapporterats ska belysas här.

I de båda provvägarna i Linköping och Malmö installerades anordningar för att samla upp lakvatten från material inne i vägkroppen och från material i slänten (Lundgren & Hartlén, 1991). I båda provvägarna hade man dock svårigheter

att få ut något lakvatten från materialet inne i vägbanken. Efter att ha perforerat beläggningen på olika sätt erhöll man vatten, men i så små mängder att mätresultaten blev osäkra. Samma problem rapporterar Lindgren (1998). Fenomenet är inte oväntat och skulle kunnat åtgärdas genom en längre uppföljningstid, kanske provtagning vartannat år under en tioårsperiod. Det förutsätter naturligtvis att uppsamlingssystemet hålls intakt under tiden, vilket kräver information till driftansvariga och en ordentlig utmärkning.

En annan svårighet med fullskaleförsök består i att urskilja vilka föroreningar som härrör enbart från vägmaterialet/restprodukten. Orsaken är att det vatten som transporteras från vägen till lakvattenuppsamlingen eller vidare till grundvattnet, även får bidrag från andra föroreningskällor, till exempel biltrafikens utsläpp, slitageprodukter från fordonskomponenter, däck och vägyta samt läckage från vätskor och olyckor (figur 11-6).



**Figur 11-6** Förekomsten av förorenande material eller ämnen och deras transport från en vägkonstruktion (efter Lindgren, 1998)

Detta problem kan man undvika genom att samla upp vatten från en referenssträcka också. Denna ska ligga i direkt anslutning till försökssträckan och vara likvärdigt uppbyggd, fast med konventionellt material. Sedan kan man göra en relativ jämförelse mellan de två sträckorna. Lindgren (op. cit.) anger en noggrannare metod, nämligen att dagvatten från vägytan samlas upp och samma analys görs på vägmaterialet som på de fasta partiklarna i dagvattnet. Därefter jämförs erhållna halter av olika ämnen.

I detta sammanhanget är det också viktigt att skilja på sommar- och vinterförhållanden (Lindgren, op. cit.). Genom att göra uppsamlingarna av vatten sommartid undviks de föroreningar som dubbdäckslitage ger upphov till.

## 11.3 Värdering av lakningsresultat

Sverige har inga riktlinjer eller gränsvärden för vad och hur mycket ett vägmateriäl får innehålla eller laka ut, inte ännu, men mycket arbete har gjorts och pågår. Man tar också hjälp av de länder som har lång erfarenhet av restprodukter i vägbyggnad, t.ex. Nederländerna. Flera förslag har lagts fram, t.ex. av Fällman & Hartlén (1993) och Hartlén et al. (1999), men inte funnit gehör hos berörda myndigheter.

Naturvårdsverkets regler för förorenad jord (Naturvårdsverket, 1999b) kan inte användas direkt för restprodukter i vägbyggande, utan behöver modifieras eftersom föroreningarna uppträder på ett annat sätt och vattenströmningen är olika. Om projektet Miljöanpassad Användning av Restprodukter i Anläggningsbyggande MARA kan finansieras, kan ett underlag för riktlinjer grundat på dessa regler finnas färdigt inom två år (Fällman & Helgesson, 2000).

I värderingen av en restprodukts lakningsegenskaper måste man ta ställning till vad som är en oacceptabel förhöjning av miljöfarliga ämnen i omgivningen. Förhöjning från vad? Vilka bakgrundshalter gäller för det aktuella objektet? I detta sammanhanget bör påpekas att även konventionella vägbyggnadsmaterial lakar ut metaller och salter. En jämförelse med det material som restprodukten ersätter är lämpligt. Dessutom bör en rent toxikologisk värdering göras.

### Skillnader mellan laboratorie- och fältresultat

Vid bedömning av lakningsresultat måste det observeras att laboratorieförsöken är accelererade. Därför kan utlakningen i fält förväntas bli avsevärt mindre än vad som uppmätts i lakförsök. Detta har också visats av Kullberg (1990) som konstaterade att 2% av de tillgängliga mängderna metaller och salter lakade ut från en provväg med slaggrus under första året. Med antagande om en diffusionsstyrd utlakningsprocess beräknades den fortsatta lakningen gå mycket långsamt så att hälften av det lakbara skulle vara utlakat efter ca 600 år.

Bland skillnaderna mellan laboratorie- och fältresultat kan nämnas att *vattenomsättningen* i en väg är mycket mindre än den som används vid lakningsförsöken. Lakningen i fält sker under omättade förhållanden medan det finns få lakdata från försök med låga L/S-förhållanden (L/S mindre än 2) som kan spegla verkligheten. Vidare sker lakningen i fält med en betydligt mindre aktiv lakande specifik *materialyta*. *pH* är en annan viktig faktor. För att ge en realistisk bild av den potentiella lakningen i fält bör beräknat pH under bruksstadiet simuleras vid lakningsförsöket.

### Jämförelse med bakgrundshalter

För att avgöra vad som är acceptabel miljöpåverkan behövs kunskap om naturliga bakgrundshalter för det aktuella objektet, vilket ofta saknas eftersom korrekta värden kräver många analyser under lång tid. De värderingsgrunder för grundvatten som Naturvårdsverket har gett ut kan vara en hjälp i sammanhanget (Naturvårdsverket, 1999a).



## Utlakning från konventionella material

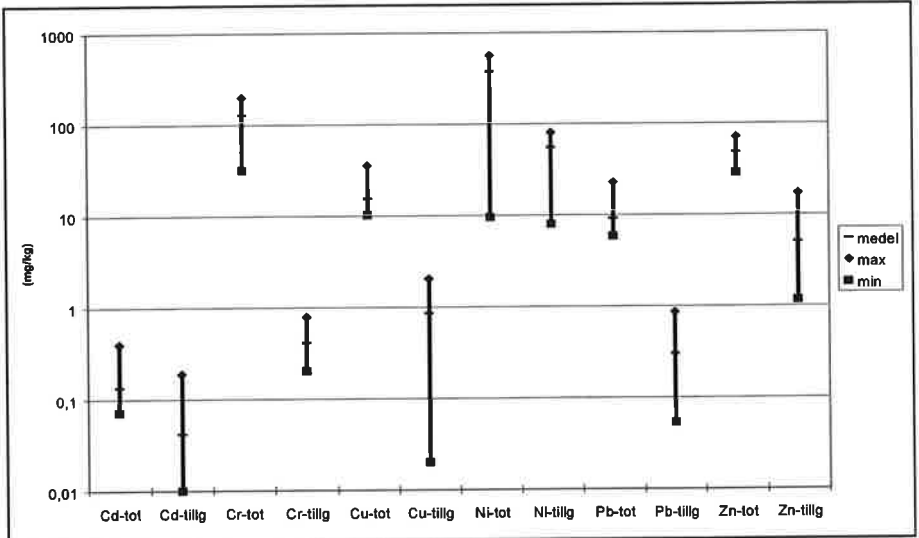
Även konventionella vägbyggnadsmaterial, som ju räknas som naturliga, lakar ut metaller och salter. Till vilken grad har inte varit känt tidigare. Gällande regler och anvisningar har till exempel inga krav på miljöteknisk undersökning av naturliga material. Det är först på senare år som man har intresserat sig för naturliga vägmateriels miljömässiga egenskaper och antalet analysresultat att jämföra med är därför litet.

Resultat från lakförsök som utförts inom ett examensarbete på SGI (Kälvesten, 1996), tyder på att utlakningen från naturmaterial vanligtvis är relativt liten. En jämförelse av *tillgängligheten* för olika ämnen visade att kadmium var lättillgängligt medan krom och koppar var svårtillgängligt. Författaren påpekar dock att endast ett fåtal material omfattas av studien, varför inga långtgående slutsatser kan dras. Relativt stora variationer bör i alla fall kunna förväntas på grund av olika berggrund i olika delar av landet.

Även Tossavainen (2000) anger att totalhalten av tungmetaller är låg och den tillgängliga mängden tungmetaller och svavel är liten i naturmaterial. Vidare visar material från grustäkter större variation i lakningsegenskaper än material från bergtäkter. Slutsatserna bygger på resultat från *totalhaltsbestämning* och *tillgänglighetstester* på sju bergkrossmaterial och två grusmaterial. Variationen mellan olika grusmaterial är egentligen inte förvånande med tanke på grusåsars bildningsprocess.

Tossavainen (op. cit.) påpekar också att ett ämnes tillgänglighet eller lösbarhet beror på vilket mineral det är bundet till. Sulfider är t.ex. mer reaktiva och lösliga än oxider och silikater, speciellt vid oxiderande förhållanden. Sålunda lakade de största mängderna tungmetaller ut från sulfider i de undersökta materialen trots att de totala halterna i dessa var mycket små. På samma sätt lakade försumbara mängder krom och vanadin ut trots höga totalhalter, eftersom dessa metaller var bundna i oxider.

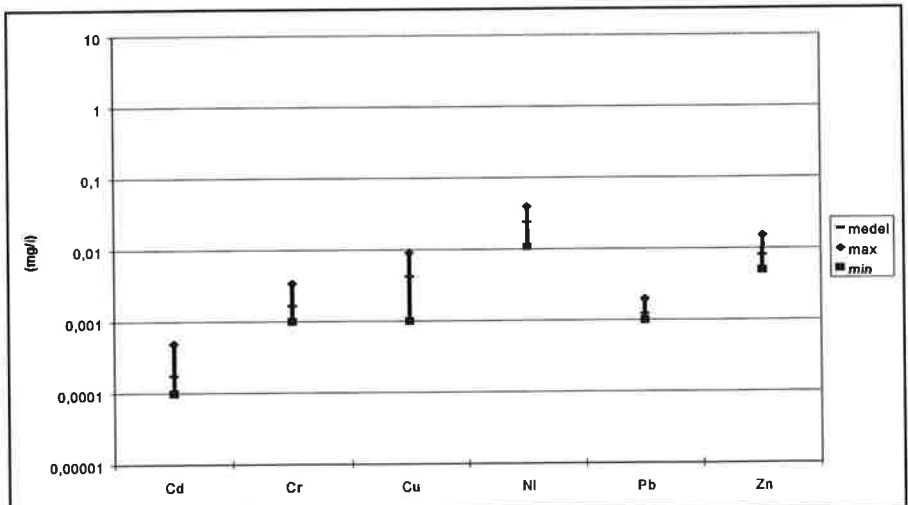
I figur 11-7 redovisas resultat från lakningsförsök i SGI:s laboratorium på några konventionella vägbyggnadsmaterial. Totalhalterna baseras på tolv prov och de tillgängliga halterna på nio prov.



**Figur 11-7** Totalhalt och tillgänglig mängd av Cd, Cr, Cu, Ni, Pb och Zn i morän och bergkross (Andersson et al., 1999)

Av diagrammet framgår att halterna varierar mellan proven. Det syns också att för krom och koppar är den för utlakning tillgängliga mängden flera tiopotenser lägre än totalhalten.

Figur 11-8 visar en sammanställning av uppmätta lakvattenhalter vid skakförsök med  $L/S=2$  på morän och bergkross. Med undantag för koppar ligger halterna, omräknat till ackumulerade mängder mg/kg, mycket lägre än den mängd som uppmätts i tillgänglighetstest. Detta tyder på att utlakningen går långsamt (Andersson et al., 1999).



**Figur 11-8** Halter av spårämnen i lakvatten, skakförsök med  $L/S=2$ , för morän och bergkross (10 prov) (Andersson et al., 1999)

Riksvägen mellan Kiruna och Narvik är ett exempel på hur naturliga vägmateri- al i vissa fall kan laka ut stora mängder av olika ämnen (Bäck et al., 1990). Till bankfyllnadsmaterial användes bergmaterial från väglinjen, till exempel från en bergskärning vid Vassijaure station. Där består berggrunden bland annat av granit och glimmerskiffrar och i glimmerskiffrarna förekommer sulfidmineral. Analys av bergartsprov visade på höga halter av koppar, järn, vanadin, strontium och titan, men normala förekomster av bly, zink och krom. Dessa resultat av- speglades i de lakvattenanalyser som gjordes under byggtiden. Lakvatten från vägbanken innehöll då rikligt med koppar (0,09 mg/l) samt zink, vanadin och järn.

Under snösmältningen fem år senare samlades också lakvatten in. Analyserna visade på mycket högre kalcium- och sulfathalter nedströms vägbanken än upp- ströms, vilket tolkades som en direkt följd av sulfidmineralinnehållet i bergma- terialet. I tabell 11-2 visas analysresultaten. Prov 1 kommer från stillastående vatten som sipprat genom vägbanken, prov 2 från sipprande vatten genom väg- banken och prov 3 är referensprov taget uppströms vägen.

*Tabell 11-2 Kemisk sammansättning av lakvatten från vägbanken vid Vassijaure, fem år efter öppnandet (efter Bäck et al., 1990)*

Prov nr	Lednings- förmåga (mS/m)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)	NO <sub>3</sub> (mg/l)
1	9,5	17	2,0	2,3	1,6	2,9	21	0,29
2	7,2	12	1,9	2,0	2,0	2,3	9	4,4
3	3,0	3,1	0,6	11,7	0,5	2,0	1,6	0,27

Provpumpning i grundvattenrör som installerats 10, 30, 70 och 150 m från väg- banken visade på höga halter av koppar, zink och krom jämfört med normalt nederbördsvatten. Samtliga prov togs vid sommarens slut för att motverka inverkan av lokalt smältvatten. Normala halter i fjällens nederbördsvatten var emel- lertid dåligt kända och man jämförde därför med halterna i södra Sverige, Mel- lansverige och Norrlands inland, vilket kan ha gett missvisande resultat.

Provpumpningarna gjordes vid tre tillfällen under en femårsperiod och man noterade att metallhalterna i rören närmast vägen ökade kontinuerligt över tiden.

Författarna drar trots allt slutsatsen att påverkan från bankmassorna är av lo- kal karaktär och inte har annat intresse än av metodisk art. Detta förklaras av att vägbanken är utfylld i ett myrområde med små horisontella vattenrörelser, vilket begränsar spridningen.

Ett specialfall av utlakning från konventionella material är när material som återvunnits från en gammal väg återanvänds. Påverkan på grundvattnet blir då antagligen inte annorlunda än med konventionellt nytt vägmateri- al. Föroreningar kan dock ha ansamlats och dessa kan eventuellt frigöras vid återanvändningen, som ju innebär en viss bearbetning och kanske ett annat läge i vägkroppen eller terrängen.

## 11.4 Slutsatser – miljöpåverkan

*För det första* är det inte koncentrationen av ett ämne som är avgörande för dess miljöpåverkan utan ämnets rörlighet i vattensystemet samt omgivningens sårbarhet. Ändå är det oftast bara totalhalt och tillgänglig halt av olika ämnen som diskuteras och frågas efter när det gäller restprodukters miljöpåverkan. Av de faktorer som nämndes inledningsvis i detta kapitel är det dessa som är lättast att bestämma. Omgivningens sårbarhet kan variera mycket och bör egentligen bedömas från plats till plats, men en generalisering till vissa typfall är kanske möjlig och helt klart mer realistiskt. Typfall finns angivna i Naturvårdsverkets bedömningsgrunder för grundvatten (Naturvårdsverket, 1999a).

De faktorer som rör vatten (tillgång, omsättning och pH) kräver mer undersökningar och brukar i bästa fall undersökas efteråt. De andra faktorerna, redoxförhållanden, hydraulisk konduktivitet och buffringsförmåga hos omgivande mark samt transportavstånd till grundvattenytan kräver en markkemisk undersökning och hydrogeologisk kartering, vilket inte brukar göras. Restproduktens korstorlek är lätt att bestämma och brukar vara känd, men vid felaktig dimensionering och hantering kan den genom nedkrossning ändras till det sämre.

*För det andra* saknas tillräcklig uppföljning av utförda fältförsök. Lundgren och Hartlén (1991) konstaterade att de uppföljningar som gjorts i fält i Malmö och Linköping efter två och tre år visade att lakvattenproduktionen blivit mindre än väntat. Halterna av förorenande ämnen i lakvattnet hade också blivit mindre än vad som förutsagts av lakförsöken i laboratorium. De rekommenderade därför en fortsatt uppföljning, vilket tyvärr inte gjordes.

*För det tredje* bör rekommendationen att restprodukter helst ska utnyttjas i lågtrafikerade vägar och cykelbanor ändras. Denna rimmar i många fall dåligt med en annan rekommendation, nämligen den att placera materialet där det inte kommer i kontakt med yt- eller grundvatten. Man kan anta att utlakning från väggroppens mitt kommer att vara noll så länge som grundvattenytan ej tillåts stiga upp i materialet och så länge som asfalten behålls tät genom underhåll. Vidare kan man anta att en förhöjd grundvattenyta till följd av igenslammade diken påskyndar utlakningen mycket mer än enstaka sprickor i beläggningsen (Kullberg, 1990). Detta resonemang leder till följande slutsats. Vill man försäkra sig om ett fortsatt torrt läge för restprodukten, dvs. ett gott vägunderhåll även på lång sikt, bör materialet placeras i en högtrafikerad väg som ju har högre underhålls krav än en lågtrafikerad.



# **III Regler och erfarenheter**

Denna del beskriver regler och erfarenheter från användning av materialen i Danmark, Nederländerna, Finland och USA. Även tidigare användning i Sverige samt kommande inverkan från europaharmonisering behandlas.

## **12 Utländska regler och erfarenheter 115**

12.1 Danmark 115

12.2 Nederländerna 121

12.3 Finland 127

12.4 USA 131

## **13 Europaharmonisering 133**

## **14 Svenska erfarenheter 135**

## 12 Utländska regler och erfarenheter

De fyra länder som är representerade i detta kapitel har antingen lång erfarenhet inom området eller har bedömts kunna bidra med något speciellt när det gäller egenskaperna hos de tre studerade materialen.

I Danmark och Nederländerna har alternativa ballastmaterial använts i vägkonstruktioner i många år. Nederländerna kan ses som ett föregångsland på området. Danmark kommer att införa skärpta miljöregler för användning av restprodukter nästa år. Därför har dessa länder studerats med avseende på vilka regler som gäller för användningen och vilka erfarenheter som har rapporterats.

Resultatet beskrivs här tillsammans med en del erfarenheter från Finland och USA. Dessa båda länder rapporterar resultat som ökar kunskapen om krossad betongs hållfasthetsökning. Finland har t.ex. nyligen gett ut dimensioneringsregler för vägar med krossad betong i de obundna lagren.

Observera att de studerade länderna har sinsemellan olika förutsättningar när det gäller ballastförsörjning och även olika förutsättningar jämfört med Sverige. Att Danmark och Nederländerna har kommit så långt inom området förklaras t.ex. av bristen på bra naturligt ballastmaterial, bristen på deponiutrymme samt korta transportavstånd.

### 12.1 Danmark

För att stimulera återanvändning har Danmark använt sig av avgifter för deponering och förbränning sedan 1987. Avgiften har successivt höjts och är idag ett viktigt verktyg i avfallsplaneringen (Lehmann et al., 1997). Tabell 12-1 visar utvecklingen av avgiftsstorleken.

**Tabell 12-1** Avgifter för deponering och förbränning i Danmark. Utveckling sedan 1987. (uppgifter från Lehmann et al., 1997)

År	Avgift (DKK/ton)	Hantering
1987	40	Deponering + förbränning
1990	130	Deponering + förbränning
1993	160 195	Förbränning Deponering
1997	160 (≈183 SEK) 210 (≈240 SEK) 285 (≈325 SEK)	Förbränning med kraft- och värmeproduktion Förbränning med endast värmeproduktion Deponering

Vid återanvändning i t.ex. vägkonstruktioner kan en del av avgiften återbetalas efter ansökan.

*Slaggrus* eller *förbrändingslagge* har använts inom danskt anläggningsarbete sedan 1974. Den övervägande delen (60% 1991) av de 420 000 ton bottenaska som produceras varje år används efter lagring, siktning och sortering. Det vanligaste användningsområdet är som förstärkningslagermaterial i parkerings-

tytor, cykelvägar, belagda och obelagda gator och större vägar (Hjelmar & Ludvigsen, 1992).

*Krossad betong* har återanvänts i ökande omfattning under de senaste tio åren. När betong krossas ned till ett 0–32 mm material får det en kornstorleksfördelning som i det finkorniga registret följer nedersta gränskurvan för s.k. stabilt grus, dvs. är fillerfattigt. Packningsförsök (metod anges ej) har visat nedkrossningstendenser. E-modulen (metod anges ej) ligger normalt från 400 MPa och uppåt, vilket är ca 33% över motsvarande värde för stabilt grus. Möjligheten att cementinnehållet i krossad betong kan bli aktivt har inte undersökts. Inte heller krossad betongs beständighet mot stor dynamisk påverkan. (Haslund et al., 1992).

*Hyttsten* produceras inte alls eftersom inte Danmark har några masugnar.

Samma *krav* som gäller vid användning av naturliga ballastmaterial gäller också vid användning av restprodukter och alternativa ballastmaterial. Dessutom finns ytterligare krav för slaggrus och rent byggavfall när dessa används i bygg- och anläggningsobjekt.

För *miljöpåverkan* ställs inga speciella krav på konventionella material, medan användningen av restprodukter generellt regleras genom miljöskyddslagen. Under 1999 har förslag till nya miljökrav för återanvändning av restprodukter och jord i bygg- och anläggningsarbeten varit ute på remiss och 1 januari 2001 träder de i kraft.

Vid *provning* av alternativa ballastmaterials egenskaper ska samma metoder användas som för naturliga material. I dansk standard (DS 405) anges metoder för indirekt provning av styvhet, stabilitet och tjällyftningsbenägenhet samt direkt provning av beständighet mot mekanisk påverkan.

## Krav på förbränningslagg vid användning i obundna lager

Förutom de allmänna specifikationerna för ballastmaterial gäller nedanstående krav för förbränningslagg när den används i förstärkningslager.

### Vägtekniska materialkrav på förbränningslagg vid leverans (från Pihl & Milvang-Jensen, 1996)

- Slaggen ska vara producerad i en dansk förbränningsanläggning. Den får inte blandas med flygaska som frånskiljts vid förbränningen. Den ska vara lagrad minst en månad.
- Inga partiklar får vara större än 50 mm.
- Vatteninnehållet ska ligga mellan 17 och 25%.
- Av partiklarna i fraktionen 16/50 mm får maximalt 1,5 viktprocent bestå av oförbränt eller dåligt förbränt material (papper, tyg, mat, men inte träkol).

### Utförande

Material som separerats under transport får inte användas.

Packning får bara ske vid rätt vattenkvot, eftersom torrt material krossas lättare än vått. Vattning eller torkning kan behövas. Färdigpackat lager ska inte vara tjockare än 20 cm. Rätt nivå  $\pm 20$  mm ska uppnås. Packning ska göras till 97%



av den maximala densiteten bestämd med vibrationsförsök. Packningskontroll ska göras med sandefterfyllningsmetoden. *Isotopmetoden är inte lämplig för förbränningslagg på grund av materialsammansättningen, men den kan användas som relativ och preliminär bedömning.* För att undvika onödig nedkrossning ska rätt packningsgrad helst uppnås med högst sex vältöverfarter. Av samma skäl ska tung byggtrafik spridas över ytan och begränsas till ett fåtal överfarter. (Pihl & Milvang-Jensen, op. cit.).

## Kontroll

Kontroll av materialet ska ske minst en omgång per levererade 1 000 m<sup>3</sup> material. För material från leverantörer som är anslutna till ”Sand og Stenkontrollen” behövs bara en kontroll per påbörjad leverans. Underkänt material ska tillbakavisas.

Packningsresultatet från det första kontrollavsnittet ska dokumenteras innan fortsatt packning kan ske. Referensvärdet för maximal densitet bestäms på en homogen materialblandning från det aktuella kontrollavsnittet före utläggning. Om materialet är homogent kan detta referensvärde gälla för flera kontrollavsnitt. Packningen är godkänd om medel av fem mätresultat är större än 97% och inget är under 94%.

Nivån kontrolleras i varje 20 m-sektion. Ligger ytan för lågt justeras med bärlager. Ligger ytan för högt rivs materialet bort ned till 15–20 cm djup och ersätts med nytt material. (Pihl & Milvang-Jensen, op. cit.).

## Nuvarande miljötekniska regler och materialkrav för förbränningslagg

Användning av förbränningslagg regleras av §19 i ”Lag om miljöbeskyttelse” plus ”Bekendtgørelse nr 794 från dec 1991”. Amtskommunen bedömer för varje enskilt projekt om det är tillståndspliktigt.

Miljöministeriet har gett ut ”Bekendtgørelse nr 586 1983” om användning av slagg och flygaska som fastställer reglerna för användning av förbränningslagg till vägbyggnad efter miljöskyddslagens §19. Denna anger att förbränningslagg får användas utan speciellt tillstånd enligt miljöskyddslagen om vissa krav uppfylls. Kraven gäller dels materialinnehållet, dels utformningen av själva vägkonstruktionen. Även mängden material som kommer att läggas ut har betydelse.

Kraven på *materialinnehållet* gäller pH, totalalkalinitet, blyhalt, kadmiumhalt och kvicksilverhalt (tabell 12-2).

**Tabell 12-2** Nuvarande krav på slaggrusets innehåll vid användning i danska vägobjekt (Lehmann et al., 1997)

Parameter	Krav
pH (1% slurry)	>9,0
totalalkalinitet	>1,5 ekv/kg TS
blyhalt	<3 000 mg/kg TS
kadmiumhalt	<10 mg/kg TS
kvicksilverhalt	<0,5 mg/kg TS

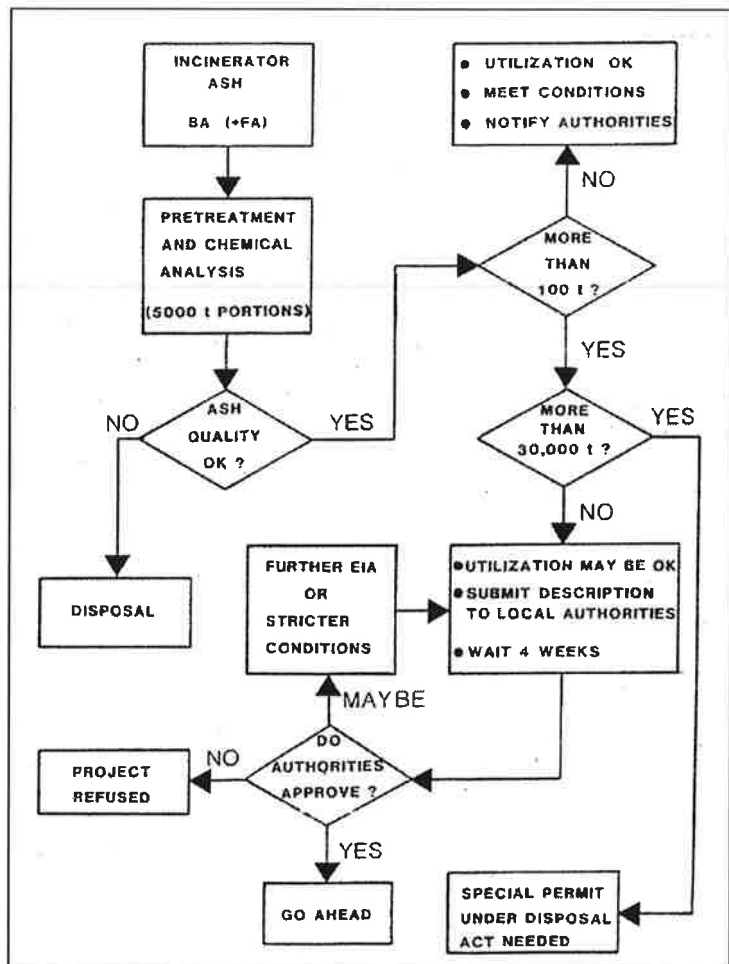
Kraven i tabell 12-2 baseras på totalhalt och ska kontrolleras med standardiserad analysmetod, t.ex. DS 259, som bestämmer bly-, kadmium- och kvicksilverhalt vid en partiell upplösning med kolsyra. I praktiken innebär gränsvärdena att endast bottenaska kan användas och inte flygaska eller blandningar dem emellan.

Vid användning som förstärkningslager får bara bottenaska som lagrats minst en månad användas.

Kraven på *utformning* gäller avståndet till dricksvattenbrunn och grundvattnnivå samt tjockleken hos förbränningslagglaget enligt följande.

- Avståndet till dricksvattenbrunn måste vara minst 20 m och slaggen måste placeras över högsta grundvattnnivån.
- Under belagda ytor får lagertjockleken vara högst 2 m. Medeltjockleken för förbränningslagglaget får inte överskrida 1 m.
- Under obelagda vägar med maximal 4 m vägbredd eller under obelagda ytor med en maximal yta av 2 000 m<sup>2</sup> får lagertjockleken vara högst 0,3 m.

Ovanstående gäller för objekt med mindre än 100 ton förbränningslagg. För objekt med 100–30 000 ton förbränningslagg måste en detaljerad projektbeskrivning lämnas i förväg till lokala myndigheter. Dessa kan stoppa projektet eller kräva en förändring av utformningen eller begära en miljökonsekvensbeskrivning om man anser att projektet står i konflikt med miljöskyddsaspekter. Ett sådant negativt besked måste lämnas inom fyra veckor efter att projektbeskrivningen lämnats in. För objekt med mer än 30 000 ton slaggrus krävs tillstånd enligt miljöskyddslagen. Figur 12-1 beskriver de danska miljöriktlinjerna för förbränningslagganvändning i form av ett flödesschema.



Figur 12-1 Flödesschema för nuvarande miljöriktlinjer vid slaggrus-användning i Danmark (Hjelmar & Ludvigsen, 1992)

### Kommande miljötekniska regler för förbränningslagg

Den 1 januari 2001 börjar nya miljökrav att gälla vid återanvändning av restprodukter och jord i bygg- och anläggningsarbeten. Då träder en ny bekendtgørelse i kraft som ersätter den ifrån 1983. De nya kraven är hårdare än de gamla och skall förebygga att förorenande ämnen i de återanvända materialen kan förorena jorden och eventuellt tränga ner och förorena grundvattnet. Huvudsyftet med de nya kraven är att sätta gränsvärden som skyddar grundvattnet, att precisera vad som menas med återanvändning till bygg- och anläggningsarbeten samt att höja kvaliteten på den återanvändning som sker. (Miljö- og Energiministeriet, 2000).

Den nya bekendtgørelsen omfattar bottenaska från avfalls- och kolförbränning, flygaska från kolförbränning samt förorenad jord. Användning av andra restprodukter omfattas av miljöskyddslagen. Bottenaskan från avfallsförbränning ska metallsepareras och innehålla högst 3% organiskt material, TOC, bestämt enligt prEN 13137 (aug. 1999).

Bekendtgørelsen delar in restprodukter och förorenad jord till bygg- och anläggningsarbeten i tre kategorier. Kategori 1 kan användas fritt, kategori 2 och 3 kan användas om vissa krav uppfylls. För användning av material i kategori 2 och 3 gäller generellt

- att avståndet till skyddsområde för dricksvattentäkt är minst 30 meter,
- att materialet placeras över högsta grundvattennivån,
- att den utlagda jorden är avgränsad med ett markeringsnät och
- att lagertjockleken är högst en meter under vägar och större ytor samt högst 0,3 meter under gator.

Före användning ska materialproducenten utarbeta en deklARATION som innehåller upplysningar om producent, materialtyp, kategori, eventuell utförd rening, provtagningsmetod, lakningsmetod, analysresultat mm.

Anmälningsplikt gäller för objekt med kategori 1–3-material. Den skriftliga anmälan ska bland annat innehålla uppgifter om mängd och typ av material samt en översiktsplan som visar placering i förhållande till dricksvattentäkter, vattendrag, sjöar och hav.

De krav som ställs på material i kategori 2 och 3 gäller koncentrationen av en rad förorenande ämnen främst tungmetaller, som inte får överskrida bestämda nivåer. Det finns angivna gränsvärden för totalhalt och för lakvatteninnehåll (tabell 12-3). Skillnaden mellan kategori 2 och kategori 3 avser lakvatteninnehållet.

*Tabell 12-3 Indelning av restprodukter och jord i kategorier för återanvändning i danska bygg- och anläggningsarbeten. Gäller fr o m 1 jan 2001. (efter Miljö- och energiministeriet, 2000)*

	Kategori 1	Kategori 2	Kategori 3
<b>Ämne</b>	<b>Totalhalt (mg/kg TS)</b>		
Arsenik	0–20	>20	>20
Bly	0–40	>40	>40
Kadmium	0–0,5	>0,5	>0,5
Krom, total	0–500	>500	>500
Krom (VI)	0–20	>20	>20
Koppar	0–500	>500	>500
Kvicksilver	0–1	>1	>1
Nickel	0–30	>30	>30
Zink	0–500	>500	>500
	<b>Koncentration i lakvatten (µg/l)</b>		
Klorid	0–150 000	0–150 000	150 000–3 000 000
Sulfat	0–250 000	0–250 000	250 000–4 000 000
Natrium	0–100 000	0–100 000	100 000–1 500 000
Arsenik	0–8	0–8	8–50
Barium	0–300	0–300	300–4 000
Bly	0–10	0–10	10–100
Kadmium	0–2	0–2	2–40
Krom, total	0–10	0–10	10–500
Koppar	0–45	0–45	45–2 000
Kvicksilver	0–0,1	0–0,1	0,1–1
Mangan	0–150	0–150	150–1 000
Nickel	0–10	0–10	10–70
Zink	0–100	0–100	100–1 500

De analysmetoder som föreskrivs är bestämning av totalhalt efter upplösning enligt DS 259 och bestämning av lakvatteninnehåll efter lakning enligt prEN 12457-3 (utkast juni 1998 med L/S=2 l/kg).

När de nya miljökraven var ute på remiss angav Vejdirektoratet i sitt remissvar att man hade förståelse för de nya kraven. Vidare såg man positiva följder såsom att framtida bruk av restprodukter i vägobjekt kommer att bli "oantastligt" eftersom de nya reglerna bygger på goda beräkningar av miljökonsekvenserna. Däremot förutspådde man en minskning av användningen av vissa restprodukter, t.ex. förbränningsslag, beroende på utökade laboratorieundersökningar. (Vejdirektoratet, 1999).

## Krav på bygg- och rivningsavfall vid användning i obundna lager

Rent, sorterat byggavfall som består av sten, tegel och betong får användas som ersättning för naturliga ballastmaterial i bygg- och anläggningsarbeten utan särskilt godkännande enligt miljöskyddslagen. Det får inte läggas i jordtippor och fyllningar eftersom dessa inte räknas som anläggningsarbeten. Däremot är det tillåtet att bygga tillfartsvägar till sådana tippor av bygg- och rivningsavfall, om avfallsavgift betalas.

Byggavfallet får inte innehålla

- målarfärg eller lack,
- trä eller annat organiskt material,
- tjärhaltigt material,
- PCB-fogmassa,
- skorstensrester eller
- andra förorenande ämnen.

Användningen regleras genom en cirkulärskrivelse från Miljödepartementet, daterad 1990-03-27. (Lehmann et al., 1997).

## 12.2 Nederländerna

Uppgifterna i detta avsnitt har, om inget annat skrivs, hämtats ur muntlig och skriftlig information som samlats in vid studiebesök hösten 1999 på Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM).

Varje år förbrukar Nederländerna ca 140 miljoner ton ballastmaterial. Av denna mängd är ca 16 miljoner ton s.k. sekundära ballastmaterial.

Det uppkommer ca 51 miljoner ton avfall i Nederländerna varje år. Av detta är ca 14 miljoner ton bygg- och rivningsavfall och 7 miljoner ton hushållsavfall.

Man använder sig av flera styrmedel för att uppnå en hög återvinningsgrad, t.ex. deponiförbud och höga deponeringsavgifter. I dagsläget råder deponiförbud för ett 30-tal specificerade materialgrupper. Sedan 1995 är det förbjudet att deponera hushållsavfall och sedan 1997 gäller förbudet även återanvändbart bygg- och rivningsavfall. Om bygg- och rivningsavfall ska få deponeras måste mer än 90% av materialet bestå av vissa specificerade icke återanvändbara produkter eller så ska mindre än 12% bestå av återanvändbara produkter. Icke återanvänd-

bara produkter kan t.ex. vara farligt avfall och takpapp. I praktiken är det svårt att bedöma vad varje avfallsleverans innehåller. Därför är deponering av icke återanvändbart bygg- och rivningsavfall knutet till certifieringen av de företag som levererar avfallet.

Man följer principen att återanvändning och förbränning ska vara billigare än deponering (tabell 12-4). Avfall som går till förbränning beskattas inte. Däremot är förbränningsresten beskattad om den läggs i upplag vid förbränningsanläggningen.

*Tabell 12-4 Kostnader för deponering och förbränning av avfall i Nederländerna (uppgifter från VROM, 1999)*

Avgift + skatt (NLG/ton)	Totalt	Hantering
145 + 142	(≈ 1 105 SEK)	Deponering av brännbart avfall
145 + 27	(≈ 660 SEK)	Deponering av icke brännbart avfall
220 + 0	(≈ 845 SEK)	Förbränning

Användning av avfall som s.k. sekundär råvara ska prövas enligt ett nytt regelverk som har satts upp för *alla* byggmaterial. Detta "byggmaterialdekret" (se nästa avsnitt) anger vilka miljötekniska kvalitetskrav (sammansättning och lakningsegenskaper) som ska uppfyllas av konventionella och alternativa granulära material för att de ska kunna användas som byggnadsmaterial. Dessutom ska materialtekniska krav beskrivna i andra regelverk uppfyllas.

En restprodukt kan certifieras vilket innebär att den uppfyller vissa krav, både materialtekniska och miljötekniska. Certifieringen innebär en kvalitetssäkring och ett verktyg för kvalitetskontroll och dessutom en riksomfattande identitet för produkten.

### Regler för miljöpåverkan från bygg- och anläggningsmaterial (Det holländska byggmaterialdekretet)

Detta regelverk anger vilka *miljötekniska* kvalitetskrav som gäller för *alla* granulära material när de används som bygg- och anläggningsmaterial utomhus. Det trädde i full kraft 1 juli 1999 och innehåller tre huvudpunkter: informationsplikt, anmälningsplikt och borttagningsplikt.

- Informationsplikt: Beställaren eller användaren av ett byggmaterial måste kunna bevisa dess miljökvalitet. Det är nödvändigt för att kunna bedöma vilken kategori materialet tillhör (se nedan). Detta krav går i sin tur vidare till materialproducenten. Informationen ska sparas och finnas tillgänglig upp till fem år efter byggstart.

Det finns tre sätt att visa miljökvaliteten på. För det första kan materialet certifieras. För det andra kan provtagning och kontroll av materialet göras av ackrediterat laboratorium. För det tredje kan en annan provtagning göras som bevisar att samma egenskaper gäller som vid den senaste ackrediterade kontrollen.

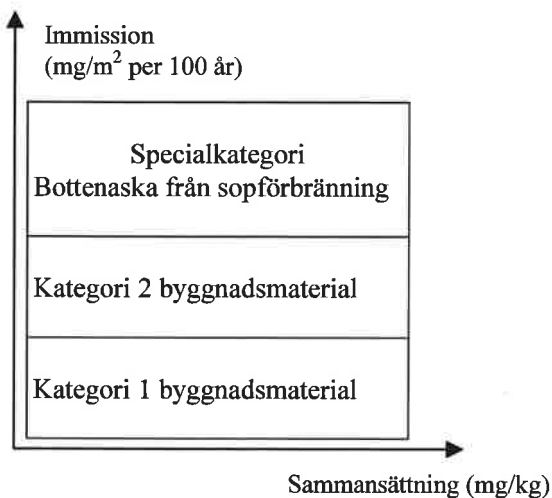
- Anmälningsplikt: Beställaren måste anmäla användningen av vissa anläggningsmaterial i förväg till den lokala myndigheten.

- Borttagningsplikt: När en anläggning inte används längre är byggherren eller beställaren skyldig att ta bort ingående material.

Allt granulärt konstruktionsmaterial för bygg- och anläggningsändamål, både primärt och sekundärt, delas generellt in i tre kategorier. Dessa är byggnadsmaterial kategori 1 och 2 samt jord kategori 1. Dessutom finns två tillfälliga specialkategorier, nämligen bottenaska från sopförbränning samt ballast gjord av tjärhaltigt asfaltgranulat. Material i kategori 1 kan användas utan restriktioner, medan material i de andra kategorierna får användas om vissa tätningsåtgärder vidtas.

De två tillfälliga kategorierna har införts för att tillåta fortsatt användning av bottenaska och tjärhaltig ballast trots att materialen ibland inte klarar immissionsgränsvärdena (se nedan) med de tätningsåtgärder som gäller för kategori 2-material. Vid användning av dessa kategorier måste därför speciella skyddsåtgärder vidtas.

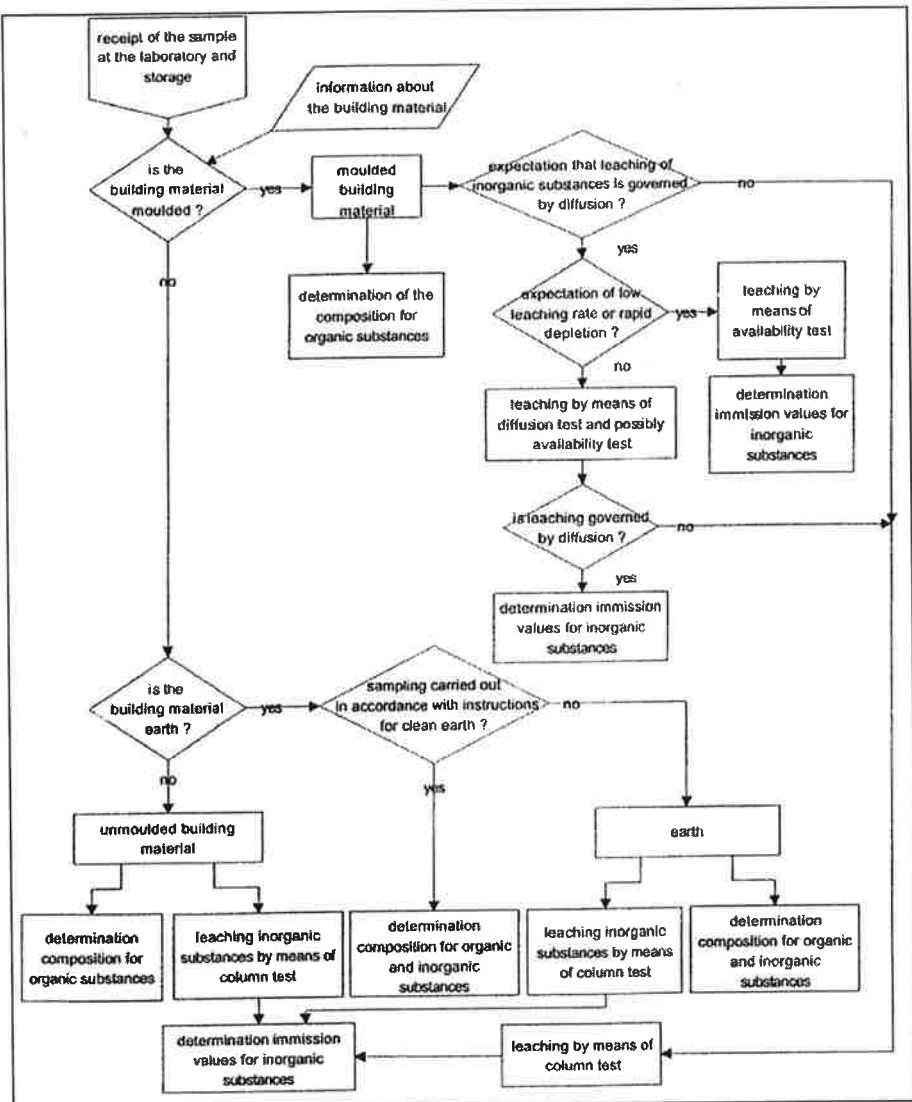
Klassificeringen i kategorier grundar sig på sammansättning och immissionsvärde (figur 12-2).



**Figur 12-2** Princip för klassificering av byggnadsmaterial (efter VROM, 2000)

Sammansättningen bestäms som totalhalt av olika ämnen. Med immission menas den process då de utlakade ämnena tränger in i omgivande jord eller vatten. Immissionsvärdet beror därför på lakningsegenskaperna hos materialet samt på planerad användning t.ex. temperatur, vattentillgång, tätningsåtgärder och lagertjocklek för materialet.

Vilken metod som väljs för att bestämma lakningsegenskaperna beror bl.a. på typ av byggnadsmaterial. Beslutsgången för detta val illustreras i flödesschemat i figur 12-3.



Figur 12-3 Val av analysmetod mm beroende på typ av byggnadsmaterial, enligt det holländska byggmaterialdecretet. Gäller för byggnadsmaterial och ren jord. (VROM, 2000)

Gränsvärden för användning baseras på den merbelastning som är acceptabel för platsen i fråga och definieras som "en procents ökning av föroreningshalterna under 100 år i förhållande till beräknade bakgrundsvärden i en meter jord".

Formler för beräkning av immission, dvs. för översättning av laboratorieresultat till fältförhållanden har hämtats från Aalbers et al. (1993). Än så länge finns bara formuler för oorganiska ämnen. För organiska ämnen bygger gränsvärdena på totalhalter. Detta förklaras med brist på lämpliga lakningsmetoder för dessa ämnen.

För byggnadsmaterial i kategori 1 gäller informationsplikt under fem år samt borttagningsplikt.



För byggnadsmaterial i kategori 2 gäller

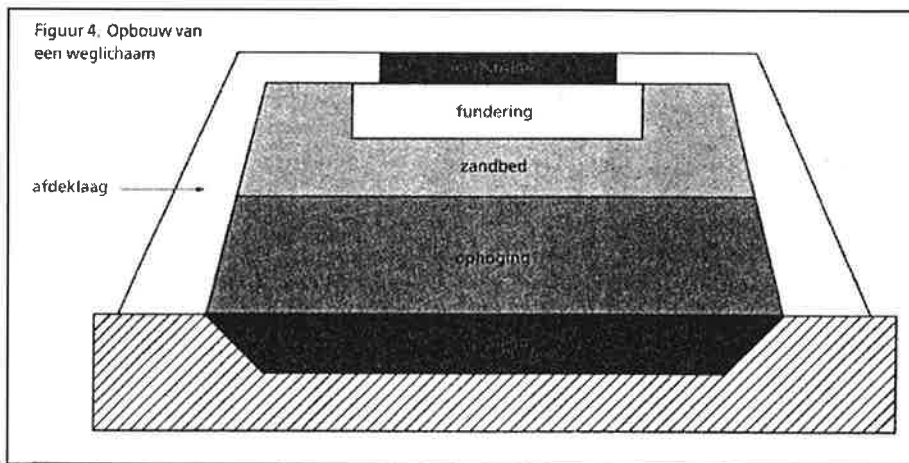
- anmälningsplikt inklusive information om materialet en månad före byggstart (ansvaret ligger på beställaren),
- minst 10 000 ton per objekt ska användas (vid användning som bärlager räcker det med 1 000 ton),
- placering minst 0,5 m över den högsta genomsnittliga grundvattennivån,
- placering under ett tätskikt, t.ex. plastfilm eller bentonitmatta, så att kontakt mellan regnvatten och material förhindras,
- fortlöpande inspektion av tätheten hos den färdiga konstruktionen (ansvaret ligger på anläggningens ägare) samt
- borttagningsplikt.

Motivet till angiven minimimängd per objekt är att man inte vill ha den här typen av material utspritt i småportioner över landet, något som skulle försvåra övervakningen.

För specialkategorin slaggrus gäller samma regler som för kategori 2 bortsett från tätskiktet som ska vara en kombination av plastfilm och bentonit. Dessutom ska grundvattenkvaliteten följas upp.

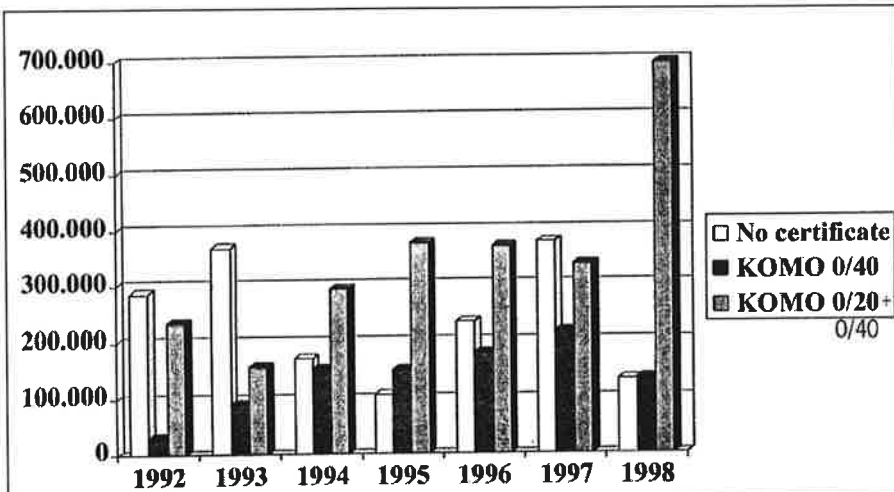
## Bottenaska från avfallsförbränning (AVI-bodemas)

I Nederländerna bränns varje år ca 6 miljoner ton hushållsavfall i 16 anläggningar och ger upphov till 700 000 ton bottenaska och 80 000 ton flygaska. I stort sett all bottenaska återanvänds på något sätt, huvudsakligen som fyllnadsmaterial i vägbankar och bullervallar. I försöksobjekt har materialet också använts som ”fundering”, vilket ungefär motsvarar ett bärlager (figur 12-4). (CROW, 1999).



**Figur 12-4** Uppbyggnad av vägkropp enligt Nederländska dimensioneringsregler (CROW, 1999)

Idag har i stort sett alla förbränningsstationer certifierat sin bottenaska. Utvecklingen när det gäller certifiering framgår av figur 12-5.



Figur 12-5 Produktion och certifiering av AVI-bodemas i Nederländerna (ton). Vit + svart + grå stapel ger total produktion under ett år. Svart + grå stapel visar certifierad mängd. KOMO är en holländsk kvalitetsmärkning. (VROM)

För certifierad bottenaska gäller följande kvalitetskrav:

- Ingen flygaska är inblandad,
- 6 veckors lagring före användning,
- lakningsegenskaper enligt reglerna i ”byggmaterialdekreter”,
- högst 5% metallskrot,
- högst 5,5% organiskt innehåll enligt glödningsförlust,
- krossningsfaktor  $\geq 0,65$  (ett mått på beständighet mot statiskt tryck enligt CROW, 1990) samt
- godkänd gradering för 0–20 mm bärlagermaterial eller 0–40 mm fyllnads-material.

Den största andelen av bottenaskan tillhör specialkategorin, men ungefär 40% uppfyller kraven för kategori 2. Om bottenaskan tillhör specialkategorin ska tätningsskiktet bestå av minst 25 cm bentonitsand täckt med en plastfilm. Bentonitsanden kan bytas ut mot 8 cm bentonit polymergel eller bentonitmatta. Grundvattenrör ska installeras uppströms och nedströms användningsplatsen och provtagning av grundvattnet ska göras två gånger om året.

AVI-bodemas bör packas i lager om 0,4 m. Lämplig släntlutning är 1:2,5. Kritiska miljöpåverkande ämnen är brom, koppar, molybden och antimon. (CROW, 1999).

## Bygg- och rivningsavfall

90% av det bygg- och rivningsavfall som uppkommer i Nederländerna varje år återanvänds. Den höga siffran beror på källsortering, en tillräcklig och god marknadspotential, de finansiella styrmedlen samt deponeringsförbudet. Materialet återanvänds huvudsakligen i form av granulat som säljs som överbyggnadsmaterial till vägar och som ersättning för grus i betong.

*Krossad betong*, ”betonggranulaat”, används bland annat som ballast i betongbeläggningar och i obundna bärlager. En lätt hydraulisk bindningsförmåga har noterats i obundna lager med krossad betong. Vid användning som bärlager (fundering) har minskad spårbildning observerats. Vid sådan användning kan också beläggningstjockleken reduceras. Reduktionens storlek beror på beläggningens ursprungstjocklek och undergrundens styvhet, men minst 12 cm asfaltbetong måste finnas kvar. Inga kritiska miljöpåverkande ämnen i krossad betong är kända. Selektiv rivning har en gynnsam effekt på materialets kvalitet. (CROW, 1999).

Om den krossade betongen består till hälften av annat mineraliskt rivningsmaterial kallas det ”menggranulaat”. Detta material har samma användningsområde och ungefär samma egenskaper som betonggranulaat. För menggranulaat anger man dock några kritiska miljöpåverkande ämnen – molybden, sulfat och polyaromatiska kolväten, PAK. (CROW, op. cit.).

Både betonggranulaat och menggranulaat tillhör normalt kategori 1. Det innebär att de kan användas i vägbyggande såsom de konventionella materialen utan anmälningsplikt eller andra speciella åtgärder.

## Hyttsten

*Hyttsten* blandas oftast med granulerad masugnsslagg och/eller med LD-stålslagg och är lämpligt som bärlager. Hela den inhemska produktionen av hyttsten, 1,2 miljoner ton per år, används för cementtillverkning. Nästan lika mycket, en miljon ton, importeras från Belgien och Tyskland för att användas som bärlager. Precis som för betonggranulaat kan beläggningstjockleken reduceras vid användning av hyttsten som bärlager. (CROW, 1999).

Hyttsten tillhör normalt kategori 1, men kategori 2 kan också förekomma.

## 12.3 Finland

Finland använder sig också av finansiella styrmedel för att öka återvinningen. 1997 var deponiavgiften mellan 20 och 40 FIM per ton och från och med 1 januari 1998 infördes dessutom en deponiskatt på 90 FIM per ton. (Kivekäs, 1997). Det innebär en total kostnad på ca 160–190 SEK per ton deponerat avfall.

Liksom i Sverige saknas lagreglerade miljökvalitetskrav för återanvända restprodukter. Däremot finns riktlinjer för vissa angivna situationer. I framtiden avser man att göra riskbedömningsanalyser istället för bara lakstudier. Därför undersöker man nu metoder för riskbedömning och gör insamling av grunddata som kan användas vid riskanalys av material som ska användas i vägbyggen. (Lehmann et al., 1997).

*Sopförbränningsrester* uppkommer inte i några större mängder enligt Wahlström (personlig kommunikation).

*Krossad rivningsbetong och restbetong* har använts i flera anläggningsarbeten sedan 1994. Precis som i Sverige krävs vid varje rivning en rivningsplan med

angivande av materialtyper och kvantiteter samt hur massorna ska omhändertas. Det finns också en guide för klassificering och selektiv rivning.

All den *hyttsten* som produceras i landet används på något sätt. Inga miljökrav ställs vid användning i vägbyggen enligt Lehmann et al. (op. cit.).

En State of the art-rapport för användning av restprodukter och återvunna material i finska anläggningsarbeten har nyligen getts ut (TEKES, 2000a), men den behandlar inte sopförbränningsrester eller luftkyld masugnsslagg.

## Erfarenheter från användning av krossad betong

Kivekäs (1997) beskriver flera fältförsök som visar att krossad betong uppnår två till tre gånger högre styvhet än konventionellt material. Det första gjordes 1994 på vägen mellan Korso och Nikkilä där förstärkningslagret byttes ut mot krossad betong på en 500 meter lång sträcka. Den beräknade E-modulen för betonglagret varierade mellan 625 och 1 000 MPa jämfört med 280 MPa för krossat berg. Nästa försök gjordes 1995 på 1,5 km av vägen mellan Rusutjärvi–Pajjala. Då ersattes mer än 60 cm förstärkningslager och bärlager med 35 cm krossad betong. Här uppmättes E-modulen till över 1 000 MPa. I båda fallen bestod betongen av ”hollow core slab waste” (ungefär restbetong från betongelementtillverkning).

I ett annat fältförsök användes rivningsbetong (antagligen från byggnader) som bärlager i en gata. E-modulen för detta material uppmättes till 900 MPa. Även betong från järnvägssliprar har krossats och använts i en vägkonstruktion med gott resultat. (Kivekäs, op. cit.).

I samtliga fall har betongens miljöpåverkan undersökts genom lakförsök och jämförelse har också gjorts med uppställda riktvärden. I ett fall överskreds tillåten halt av sulfat, för övrigt uppfylldes kraven (Wahlström et al., 2000).

Enligt Kivekäs (op. cit.) är krossning av betong mycket dyrare än krossning av konventionellt material på grund av armering, orenheter och små volymer. 30–60 FIM per ton kostar själva krossningen vilket är mer än materialpriset för konventionellt material. Prisskillnaden uppvägs dock av deponiavgifter och deponiskatt.

## Regler för dimensionering och byggande med återvunnen betong

Med ledning av forskningsresultaten hittills har finska Vägverket gett ut dimensioneringsregler för konstruktioner med återvunnen betong (FINNRA, 2000). Anvisningarna innehåller materialklassificering, kvalitetskrav, dimensioneringstabeller och byggnadstekniska anvisningar. Utmattningskriterier för användning vid analytisk dimensionering med hjälp av datorprogram håller på att utvecklas.

Enligt de finska anvisningarna kan krossad betong användas i alla obundna väglager. Materialet kan även användas som fyllning i ledningsgravar, men i fuktiga förhållanden finns risk för att betongen genom direktkontakt orsakar korrosion av aluminiumrör eller galvaniserade stålrör på grund av sitt höga pH-värde.

Materialklassificeringen grundar sig på ursprung och tekniska egenskaper. Man skiljer mellan fyra klasser, BeM I–IV, där BeM I har högst kvalitet. BeM I består av ren restbetong medan övriga klasser består av rivningsbetong med olika renhet. I samtliga klasser måste innehållet av orenheter såsom trä och liknande understiga 1 viktprocent. Renheten bestäms enligt nederländsk standard NEN 5942, då viktprocenten av vardera betong, tegel o. dyl. samt övrigt bestäms.

Övriga tekniska egenskaper som undersöks vid klassificeringen och tillika kvalitetskontrollen är kornstorleksfördelning, tjälfarlighet (via kornstorleksfördelningen), maximal torrdensitet och optimal vattenkvot samt lakningsegenskaper i vissa fall (se nästa avsnitt). För att uppskatta eventuell styvhetstillväxt i förväg bestäms tryckhållfasthet vid provtryckning efter 7 och 28 dagars lagring enligt metod i finska betongnormer. Därefter antas E-moduler enligt tabell 12-5.

**Tabell 12-5** *Kvalitetskrav på återvunnen krossad betong (efter FINNRA, 2000)*

Kvalitetsklass	Kornstorlek (mm)	Tegelhalt (vikt-%)	Halt övrigt (vikt-%)	Tjälfarlighetsklass	Tryckhållfasthet (28 d)	E-modul (MPa)
BeM I	0–45	0	≤0,5	icke tjälf.	≥1,2 MPa	700
BeM II	0–45	≤10	≤1	icke tjälf.	≥0,8 MPa	500
BeM III	0–45	≤10	≤1	icke tjälf.	inget krav	280
BeM IV	varierar	≤30	≤1	varierar	inget krav	≤200

I tabellen anges kraven som ställs på de olika kvalitetsklasserna samt de E-moduler som ska användas. Kornstorleksfördelningen ska uppfylla samma krav som konventionella material.

De två högsta kvalitetsklasserna har större E-moduler än konventionella material vilket innebär att överbyggnadstjockleken kan minskas i vissa fall. Minskningen kan dock inte utnyttjas fullt ut eftersom dimensioneringen mot tjäle är avgörande i finska vägkonstruktioner. De E-moduler som ska användas beskrivs som konservativa i anvisningarna, vilket förklaras med kort erfarenhet av materialen. För klass BeM I är det möjligt att välja ett högre värde än tabell 12-5 anger i vissa fall. Observera att man rekommenderar minst 150 mm tjockt betonglager för att någon styvhetstillväxt överhuvudtaget ska kunna utnyttjas.

Krossad betong kan transporteras och läggas ut på samma sätt som konventionellt material, endast packningen är annorlunda. Provpäckning rekommenderas för att bestämma lämpligt packningsarbete och vattenbehov. Om syftet är att dra nytta av bindning och tillhörande styvhetsökning bör materialet packas vid en vattenkvot nära den optimala, dvs.  $10 \pm 2$  %. Då krävs också att den krossade betongen har tillräcklig fuktighet den första månaden efter packning. Detta kan tillgodoses antingen genom täckning med oljegrus eller asfaltbetong eller med bitumenemulsion och bergmaterial direkt efter packning. Ett annat alternativ är vattning av lagret. Behovet av vattning är väderberoende. Om det regnar då och då eller om lagret täcks med ett ca 50 mm tjockt bergkrosslager minskar behovet av vattning.

Tvärfallet på betonglagrets överyta rekommenderas till minst 3% på grund av mindre hydraulisk konduktivitet än krossat berg.

För att kunna utnyttja någon styvhetstillväxt måste betonglagret läggas ut några veckor innan tjalperioden börjar. Efter tjalperiodens slut fortsätter tillväxten.

På arbetsplatsen ska dagbok föras över var olika betongleveranser har lagts ut, t.ex. via sektionsangivelser för varje dag. (FINNRA, 2000).

## Regler för miljöpåverkan från mineraliskt rivningsmaterial

Enligt de finska dimensioneringsanvisningarna för återvunnen betong är det materialleverantören som ansvarar för de miljöpåverkande egenskaperna hos ett betongmaterial (FINNRA, 2000). Om objektet ligger inom skyddsområde för grundvattentäkt måste samråd ske mellan miljömyndigheter och materialleverantör.

För rivningsbetong gäller att eventuella miljöfarliga material ska ha avlägsnats före rivning. Exempel på sådana är impregnerat virke, elektronisk utrustning, plast, (bindemedel), tätningmaterial, asbest, fluorescerande lampor, gipsmaterial och tjärhaltigt material. I tabell 12-6 ges exempel på vilka skadliga ämnen som rivningsmaterial kan innehålla.

*Tabell 12-6 Skadliga ämnen i mineraliskt rivningsavfall (efter Wahlström et al., 2000)*

Skadligt ämne	Finns i
Organiskt bundet kadmium	Stabiliseringsmedel i plast
Metalliskt kadmium	Ytbehandlingsmedel
Metalliskt kvicksilver	Mätare och kretsar i elektriska installationer
Metalliskt bly	Tätning i avloppsledningar
Organiskt bly	Tillsats i plast
PCB-ämnen	Tätningmassor, kondensorer, halkfria golvbeläggningar
CFC-ämnen	Kylmedel, polymeriska isoleringsmaterial
Oljor och PAK	Oljespill t.ex. från maskiner, tjärhaltiga material i takpapp
Krom (molybden)	Betong, murbruk
Koppar	Kablar, kopparvattenledningar
Fenoler	Isoleringsmaterial, bindemedel

Materialets lakningsegenskaper ska undersökas i samband med krossningen. När betongen härrör från rivning av byggnader måste alltid lakförsök utföras. För restbetong från betongelementtillverkning behövs inte det.

Riktvärden för lakning från återvunnen betong och tegel finns föreslagna för vissa ämnen (tabell 12-7).

*Tabell 12-7 Föreslagna finska riktvärden för lakning från mineraliskt rivningsavfall. Lakningsmetod prEN 12457. (efter FINNRA, 2000)*

	sulfat	kadmium	krom	koppar	bly
Riktvärde (mg/kg)	750	0,02	0,5	0,4	1,0

Riktvärdena har tagits fram av Statens tekniska forskningscentral i Finland (VTT) och är under granskning. Eventuella revideringar kommer att redovisas i TEKES (2000b).

Enligt Wahlström et al. (2000) har värdena i tabell 12-7 följande bakgrund. Metallerna är de som oftast förekommer i rivningsavfall och riktvärdena är valda så att de kan underskridas av icke förorenat rivningsavfall. Dessutom överensstämmer riktvärdena med föreslagna holländska värden som beskrivs i Aalbers et al. (1993). Riktvärdet för sulfat är detsamma som gäller i Nederländerna vid obegränsad användning av mineraliska rivningsavfall.

## 12.4 USA

De federala vägmyndigheterna i USA har gett ut en sammanställning och guide över restprodukter som kan användas i vägkonstruktioner (Chesner et al., 1998). Den omfattar ca 20 olika material däribland sopförbränningsrester, krossad betong och hyttsten.

### Bottenaska från sopförbränning

Eftersom USA har begränsad erfarenhet av sopförbränningsrester i obundna väglager bygger den nämnda sammanställningens text om detta material till stor del på europeiska resultat.

### Krossad betong

Krossad betong däremot har använts på flera håll i landet. Enligt ovanstående guide kan krossad betong ge upphov till korrosion i aluminiumrör eller galvaniserade stålrör som kommer i direktkontakt med betongen (jämför finska erfarenheter). På samma sätt kan återvunnen betong som är förorenad med klorid, t.ex. vintersaltad vägbetong, leda till korrosion av stål.

Forskningsrapporter från USA rapporterar blandade erfarenheter från användning av krossad betong i anläggningssammanhang. Nedanstående beskriver användningen i några stater.

*Washington State:* Återvunnen betong från betongbeläggningar används i Seattle med omnejd, bland annat beroende på brist på naturliga ballastmaterial. Dessutom blir den återvunna betongbeläggningen ett utmärkt bärlagermaterial eftersom en andra "cementer" äger rum när materialet packas. Cementet reagerar med vattnet som tillsätts för att förbättra packningen och resultatet blir ett svagt bundet bärlagermaterial som är både hårt och hållbart. (Anderson, 1996).

Washington State Department of Transportation, Washington State DOT, tillåter krossad betong i en mängd applikationer antingen ensam eller i blandning med naturligt material. Den används t.ex. som bärlager; "vägrensballast"; underbyggnad; fyllning; grusmotfyllning vid grundkonstruktioner och ledningsgravar samt som bäddmaterial för styva och böjliga ledningar. Den återvunna betongen måste uppfylla samma krav på nötning och nedbrytning, kornstorleksför-

delning, sandekvivalent och fracture (krossytegrad) som naturmaterial. Entreprenören måste intyga att det återvunna materialet är varken farligt eller giftigt. (Anderson, op. cit.).

*Kalifornien:* 1989 förstörde Loma Prieta-jordbävningen en stor del av den dubbeldäckade betongmotorvägen Cypress Freeway. Rivningen av den kollapsade konstruktionen skapade en stor mängd betongrester som förädlades till användbart bärlagermaterial. Faktorer som gjorde detta möjligt var närheten till nya byggnadsobjekt samt mängden betongmaterial som var stor nog att motivera användningen av en bergkross. Detta eliminerade behovet av deponering av betongen och inköp av nytt material. (Tsztoo, 1996).

Valet att använda återvunnet material är entreprenörens och i fallet "Cypress Freeway" har det varit en ekonomisk fördel att återanvända. Regler håller på att utarbetas som ska kräva att entreprenören anmäler när återvunnet material används. (Tsztoo, op. cit.).

*North Carolina* tillåter krossning av befintliga betongbeläggningar för återanvändning som bärlagermaterial i nya vägar. North Carolina DOT har undersökt möjligheten att använda materialet genom att utnyttja det i en tillfällig förbifart. Funktionen hos det återvunna materialet följdes upp under ett år. När den befanns tillfredsställande byggdes en permanent del av vägen med återvunnen betong som bärlagermaterial. Framtida användning av återvunnen betong kommer att övervägas när det är aktuellt. (Azimi et al., 1996).

I *New York State* är policyn att restprodukter med god kvalitet och uniformitet och som fungerar tillfredsställande samt är kostnadseffektiva ska användas. Restprodukter som uppfyller dessa krav finns vanligtvis listade som alternativ i New York State DOT Standard Specifications. (Wheeler Jr, 1996).

I *Minnesota* har användning av krossad betong satts i samband med minskning av fiberdukars genomsläpplighet samt ackumulering av utfällningar och andra material i täckta vägdräneringssystem (Standard specifications for construction i Minnesota DOT 1983). Det har också lett till oro för miljöpåverkan när det gäller mycket alkaliska dräneringsvatten (Sadecki et al., 1996). Därför begränsar Minnesota och en del andra stater användning av krossad betong i dränerade bärlager eller så kräver man dyra förbehandlingar för att förhindra lakning av kalciumbaserade produkter. Dessa restriktioner och krav på förbehandlingar tenderar att göra krossad betong politiskt och ekonomiskt icke konkurrenskraftigt (Bruinsma et al., 1997). Detta fenomen omnämns inte alls i de europeiska forskningsrapporter som studerats i projektet.

## Hyttsten

Hyttsten används i mycket stor utsträckning i USA. Nästan all hyttsten som produceras används antingen i betong, asfaltbetong eller obundna lager. I flera stater inkluderas hyttsten i de ordinarie reglerna för vägmateriäl. Det är intressant att notera att flera av de stora hyttstensanvändande staterna har tagit bort kravet på Los Angeles-provning för detta material. Skälet är att man inte funnit någon korrelation mellan de dåliga laboratorievärdena och nedbrytning i fält (Chesner et al., 1998).



För att minimera lakning av svavel från hyttstenen ska materialet lagras en månad före användning. Det måste också klara särskilt uppställda krav för lakning. Hyttsten får heller inte användas i dåligt dränerade områden eller komma i kontakt med stillastående vatten. Vid krossning och lagring ska risken för nedkrossning och bildning av finmaterial observeras. Vid utläggning ska risken för separation uppmärksammas. Samma provningsmetoder för kvalitetskontroll kan användas som för naturliga material. Man efterlyser forskning om vilka egenskaper (t.ex. pH och redoxförhållanden) som ger den oönskade lukten och missfärgningen av vatten på grund av lakning från hyttstenen. (Chesner et al., op. cit.).

## 13 Europaharmonisering

Sverige deltar i det Europeiska harmoniseringsarbetet bland annat inom området obundna vägmaterier. Det är både produkter och testmetoder som ska standardiseras inom detta arbete. Två grundläggande *produktstandarder* har varit ute på en första nationell remiss i de olika länderna. Det är

- ”Ballast för obundna och hydrauliskt bundna material – krav” (prEN 13242).
- ”Ballast i blandningar som obundet material till vägar, flygfält mm – Specifikationer” (prEN 13285).

Att standarderna har beteckningen prEN innebär att de är preliminära. Nu pågår ytterligare arbete så att normförslagen ska vara färdiga för formell omröstning i december 2002 och de slutliga europanormerna för ballast och obundna vägmaterier förväntas fastställas i december 2003. Alla motstridande nationella normer upphör då att gälla. Som upplysning kan nämnas att liknande produktstandarder har utarbetats eller kommer att utarbetas för ballast till puts och murbruk, ballast till betong, ballast till asfaltbetong och ballast till järnvägar. Vidare förbereds produktstandarder för lättballast till betong, puts och bruk, övrig lättballast samt ballast för användning som vattenbyggnadssten.

I produktstandarderna hänvisas till flera standards om *provningsmetoder* som utarbetats. Följande berör obundna vägmaterier.

- EN 932 beskriver generella metoder såsom provtagning, neddelning av laborieprov, provningsutrustning och kalibrering samt repeterbarhet och reproducerbarhet. EN 932-3 beskriver förenklad petrografisk undersökning.
- EN 933 behandlar geometriska egenskaper hos ballast. Här beskrivs provningsmetoder för siktnings, kornform och textur (flisighetsindex, LT-index och krossytegrad), innehåll av snäckskal, bedömning av finjordshalt och finjordsegenskaper. EN 933-8 beskriver sandekvivalentmetoden och EN 933-9 beskriver metylenblåmetoden. Metod för bestämning av kornformen hos ballast genom flödestal har varit ute på remiss, men inte genomgått omröstning ännu.
- EN 1097 behandlar mekaniska och fysikaliska egenskaper hos ballast. Här beskrivs provningsmetoder för bland annat motstånd mot nötning och sön-

derdelning, skrymdensitet och hålrum, vattenhalt, korndensitet, vattenabsorption och kapillär stighöjd. EN 1097-1 beskriver micro-Deval, EN 1097-2 beskriver Los Angeles-metoden och EN 1097-9 (kulkvarn) behandlar motstånd mot nötning med dubbdäck. Metod för bestämning av kapillär stighöjd har varit ute på remiss, men inte genomgått omröstning ännu. Metod för bestämning av vattenabsorption har genomgått omröstning men är inte fastställd ännu.

- EN 1367 behandlar termiska egenskaper och vittringsegenskaper hos ballast. Här beskrivs provningsmetoder för bland annat frys-tömotstånd, sönderfallsbenägenhet hos basalt och stålslagg, uttorkning av betongprismor och upphettning till hög temperatur. EN 1367-1 behandlar frostbeständighet (genom frys-töprovning i vatten) och EN 1367-2 beskriver provning med magnesiumsulfat. Koktest för sönderfallsbenägenhet hos basalt och stålslagg samt upphettning till hög temperatur har inte varit föremål för omröstning ännu.
- EN 1744 behandlar kemiska egenskaper hos ballast. Här beskrivs provningsmetoder för bland annat kemisk analys och lakning. EN 1744-3 behandlar lakning av ballast. Provningsmetoder för motstånd mot alkalireaktioner och vattenkänslighet hos filler håller på att utarbetas.

När det gäller bestämning av egenskaper som inte omnämns ovan, hänvisas till nationella metoder tills vidare medan EU-normer är under utveckling. Det gäller t.ex. permeabilitet och tjällyftningsbenägenhet. Samma sak gäller naturligtvis när aktuell EU-metod inte är fastställd ännu.

Metoder för att bestämma miljöpåverkan på grund av lakning från ballastmaterial är ett omtvistat område. CEN/TC 154 har föreslagit metoden Preparation of eluates by leaching of aggregates (prEN 1744-3). Denna har nyligen varit ute på remiss och fått många kritiska kommentarer. Nederländerna anser till och med att metoden är helt olämplig som europainorm. Man hänvisar istället till de testmetoder som redan finns för lakning från avfall (prEN 12457). Dessa är emellertid föreslagna av CEN/TC 292 och samarbetet har tydligen inte varit det bästa mellan de båda tekniska kommittéerna. (CEN står för Comité Européen de Normalisation och TC för Technical Committee).

## Förändringar av de svenska reglerna på grund av europaharmoniseringen

När de ovannämnda EU-normerna fastställts i sitt slutliga skick, vilket redan gjorts för en del provningsmetoder, upphör motstridande nationella regler att gälla. För de produktstandarder som gäller obunden ballast inträffar detta först 2003. Det innebär för Sveriges del bland annat att

- *kornstyrka* hos ballast ska provas med hjälp av micro-Deval (nötning) eller Los Angeles (nedkrossning). Dessa metoder kommer alltså att ersätta kulkvarnen.
- *Organisk halt* ska bestämmas som glödningsförlust i stället för med kolorimeter.
- Kraven på *kornstorleksfördelning* gäller vid leverans, inte utlagt material.

- *Lerhalt* ersätts av Bestämning av sandekvivalentvärde hos finmaterial SS-EN 933-8 och Bedömning av finmaterial – Metylenblåtest SS-EN 933-9.
- *Kornform* ska anges som krossytegrad, flisighetstal eller LT-index.
- *Klimatbeständighet* ska undersökas vid frys-töförsök med vatten eller vid provning med magnesiumsulfat, SS-EN 1367-2. Idag finns inget svenskt krav på dessa egenskaper.

Av ovanstående följer att man kan förvänta sig en omarbetning av de svenska reglerna tills dess.

## Alternativa ballastmaterial och restprodukter i europanormerna

De båda produktstandarderna för ballast till obundna material innehåller i nuvarande versioner ingen tvingande text om alternativa material eller restprodukter. I detta sammanhang kan nämnas att masugnsslagg och även stålslagg anses som likvärdiga med naturmaterial i dessa standarder. Däremot finns en informativ bilaga till den ena produktstandarderna (prEN 13285). Den behandlar hur sammansättningen av blandningar innehållande återvunnen ballast ska bedömas och beskrivas med hjälp av okulär besiktning.

Avsikten är att nästa version av produktstandarderna ska inkludera alternativa ballastmaterial och revideringsarbetet har redan påbörjats. När den nya versionen förväntas komma är ännu okänt.

Nya metoder eller mer information efterlyses för att ange alternativa materials

- beskrivning/sammansättning,
- densitetsfördelning,
- föroreningar/organiskt innehåll,
- finjordshalt (mer information krävs om tillämpbarheten hos de båda metoderna metylenblåtest och sandekvivalent för dessa material),
- klimatbeständighet (mer information krävs om tillämpbarheten hos frys-töförsök för dessa material) samt
- lakningsegenskaper,

men inte för beständighet mot mekanisk påverkan.

## 14 Svenska erfarenheter

Alternativa material används i liten utsträckning i svenskt vägbyggande, med vissa undantag för hyttsten, men forskning inom ämnet har pågått under många år. Hyttsten och slaggrus studerades främst under 1970- och 1980-talen vid laborieförsök och med hjälp av provtytor. Krossad betong har studerats i laboratorium och fält under 1990-talet. Under 1990-talet har också ett par större fältförsök gjorts med slaggrus.

## Slaggrus

Slaggrus har hittills använts inom de olika förbränningsanläggningarnas områden i transportvägar och liknande. Det har också använts i några dokumenterade provtytor eller provvägar vilka nämns här nedan.

- Laboratoriestudie av förbränningsrest från Lövsta (Stockholm) i slutet på 1970-talet (Höboda & Bünsow, 1979).
- Laboratoriestudier och provsträckor i Malmö och Linköping på 1980-talet, bl.a. i Malmö hamn. Slaggruset användes som förstärkningslager. (Höboda et al., 1985), (SYSAV, 1986), (Kullberg, 1990) och (Lundgren & Hartlén, 1991).
- SJ:s kombiterminal i Malmö 1997. En 3,5 m tjock fyllning av slaggrus med 600 x 60 m yta resulterade i 40 000 m<sup>3</sup> material. Fyllningen ersatte en gammal schaktjords- och byggtipp som grävdes ur och omgavs av en tätskärm av packad lermorän. Valet av slaggrus i stället för konventionellt fyllnadsmaterial påverkade både ekonomin och miljön, bland annat därför att upplaget med slaggrus låg betydligt närmare än den täkt som var aktuell. (Evertsson, 2000).
- Törringevägen utanför Malmö 1998. Slaggrus som förstärkningslager i en gata dimensionerad för trafikklass 4.
- Den förbränningsrest som användes vid Malmö hamn 1982 som ersättning för förstärkningslager i olika skiktjocklekar kan beskrivas som ett välgraderat material med ca 10% finjord, en dominerande andel glasfragment samt hög järnhalt (ingen metallavskiljning med magnet). Det var alltså inte samma typ av material som produceras i dag.

Sträckorna i Malmö hamn byggdes av Sydvästra Skånes Avfallsaktiebolag, SYSAV, hösten 1982 och följdes upp av VTI under 1983 och 1984. Bland resultaten kan nämnas krackelering i beläggningen som antagligen berodde på för hög vattenkvot eftersom en plastduk hade lagts under materialet och dräneringen var avstängd under tjällossningen (man ville samla upp lakvattnet). Vidare hade sträckorna med förbränningsrest lägre styvhet mätt med fallvikt än referenssträckorna, men olikheter i uppbyggnad, undergrund och dränering försvårade jämförelser. Dessa erfarenheter visar på vikten av att planera provsträckor noggrant.

SYSAV rapporterar följande arbetstekniska erfarenheter. Lagrad förbränningsrest är lätt att hantera och lasta och har i förhållande till sand och grus en stabilare fukthalt. Materialet torkar ej så snabbt ut eller blir genomblött. Det är lättare än sand och grus, vilket leder till lägre transportkostnad. Vid normala förhållanden är materialet lätt att ta emot, planera och terrassera. Efter en enkel utjämning med traktorgrävare går det att köra och backa på med en lastbil utan föregående packning. Vid packning har vibrovält använts. Vid regn blir materialet slipprigt i ytan och därmed halt. Vid mycket hög fuktighet förlorar slaggruset sin bärighet precis som sand och grus. SYSAV rekommenderar därför att man täcker med minst 5 cm krossgrus för att binda ytan och leda av ytvattnet. (SYSAV, 1986).

De slutsatser som drogs av de första försöken har varit vägledande för de senare undersökningarna, t.ex. lagring viss tid före användning, utläggning vid nära optimal vattenkvot, maximalt 10% finjordshalt samt bortsortering av korn större än 40–50 mm. Höboda rekommenderar att vid användning i bärlager bör en tunn asfaltbeläggning inte läggas direkt på materialet, dels beroende på att packningen blir dålig, dels beroende på risken för skador genom svällande beståndsdelar. Materialet bör användas med försiktighet i vägöverbyggnader som kommer att utsättas för tung trafik (Höboda et al., 1985).

## Krossad betong

De erfarenheter från krossad betong i vägbyggande som har dokumenterats är relativt få och redovisas därför i kapitel 16. Som orientering anges här en förteckning över de försök som VTI varit engagerade i.

- Linköping 1995. Rivningsbetong från en del av St Lars skola i Linköping. Vid denna krossning fanns ingen automatisk avskiljning av järn med magnet utan en man satt och plockade bort de största armeringsbitarna för hand! Materialet användes i en närliggande parkeringsyta och gata. (Johansson et al., 1996).
- Västerås 1996. Rivningsbetong från kvarteret Mimer, ASEA:s gamla byggnader i Västerås. Materialet användes i en närliggande parkeringsyta och gata. (Ydrevik, 1996).
- Ekeby (Helsingborg) 1997. Blandade husrester. Vid den här krossningen användes inte bara metallavskiljning med magnet utan också s.k. "vindsiktning" där lätta partiklar som papper och en del plast och träflis blåses bort. En mycket ren betong blev resultatet. Materialet användes som förstärkningslager i väg 109 utanför Helsingborg. (Grönholm, 1999a).
- Luleå 1997. Rivningsbetong från "lutande husen" i Boden. Materialet användes som bär- och/eller förstärkningslager i väg 597 norr om Luleå. (Grönholm, 1999a).
- Grums 1997. Rivningsbetong från industribyggnad. Materialet användes i en närliggande industriplan och väg. (Johansson, 1998).
- Stenstorp i Västergötland 1998. Betong från krossade järnvägssliprar. Ingen metallavskiljning gjordes vid krossningen. Utrustning för det fanns inte tillgänglig och man hade början inte tänkt använda materialet som kvalificerat vägbyggnadsmaterial. Efter utläggning och packning var det mycket armering som spretade. Det värsta drogs bort av den grävmaskin som lade ut materialet, men en hel del järnskrot finns kvar i väggroppen. Uppföljningen med fallvikt visar att denna sträcka har sämre styvhet än andra betongsträckor, vilket antagligen kan förklaras med järnets fjädrande inverkan. Slutsatsen är att det lönar sig att använda metallavskiljning. Materialet användes som förstärkningslager i väg 869 vid Stenstorp. (Ydrevik, 1999a och b).
- Malmö 1998. Blandade husrester. Materialet användes som bär- och/eller förstärkningslager i Törringevägen utanför Malmö.

En sammanställning av de praktiska erfarenheter som erhållits samt förslag till klassificering av olika kvaliteter på krossad betong har dessutom redovisats av Ydrevik (1999d).

## Hyttsten

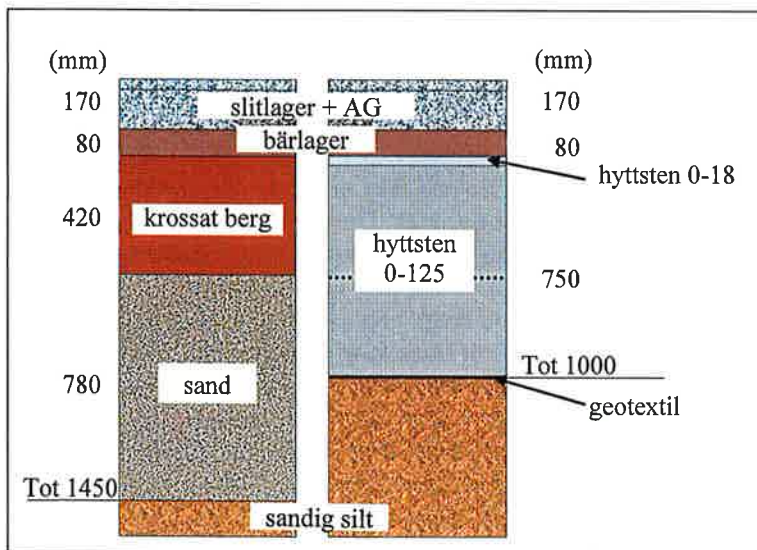
Detta avsnitt är endast en kort orientering. I det fortsatta projektarbetet kommer en mer heltäckande bild att ges.

Hyttsten har sedan länge använts lokalt kring masugnarna i Luleå och Oxelösund. Materialet har använts i interna transportvägar inom anläggningsområdena samt i gator i de båda kommunerna med omnejd. På senare år har hyttsten också använts på längre avstånd från masugnarna, i objekt där materialets speciella egenskaper kunnat utnyttjas.

Höboda (1976) rapporterar från fältförsök med hyttsten från Oxelösund där mätningar med statisk plattbelastning och fallvikt visade högre bärighetsvärden för hyttstensträckor än för sträckor med bärlagergrus av naturmaterial. Materialen hade kornstorlek 0–35 mm.

Hyttsten har också använts i delar av Skavsta flygfält vid Nyköping, i en bit av E4 förbi Nyköping byggd 1996 samt i en provsträcka på väg 597 vid Luleå byggd 1997.

När E4 förbi Nyköping skulle byggas ut från motortrafikled till motorväg bestod undergrunden av mycket tjällyftande material. Därför erfordrades en mycket tjock överbyggnad (1 450 mm). Ett alternativ med förstärkningslager och skyddslager av hyttsten gav en betydligt tunnare överbyggnad tack vare hyttstens isolerande egenskaper. Skyddslagrets tjocklek kunde minskas från 780 mm till 330 mm (figur 14-1).



**Figur 14-1** Jämförelse mellan planerad konventionell konstruktion och utförd konstruktion med hyttsten i E4 vid Nyköping (uppgifter från ALT-MAT, 2000)

**IV**

# IV Studerade materials egenskaper

Denna del presenterar provningsresultat från provningar av de tre materialen slaggrus, krossad betong och hyttsten. Både resultat från egna undersökningar och undersökningar beskrivna i publicerade forskningsrapporter presenteras här.

## 15 Slaggrus 141

- 15.1 Faktorer som påverkar slaggrusets egenskaper 141
- 15.2 Deformation vid belastning 151
- 15.3 Hållfasthetstillväxt 163
- 15.4 Beständighet 165
- 15.5 Vattenabsorption och permeabilitet 168
- 15.6 Tjällyftningsbenägenhet 169
- 15.7 Värmekonduktivitet 169
- 15.8 Miljöpåverkan 173
- 15.9 Sammanfattning – slaggrus 177

## 16 Krossad betong 181

- 16.1 Faktorer som påverkar den krossade betongens egenskaper 181
- 16.2 Deformation vid belastning 188
- 16.3 Hållfasthetstillväxt 198
- 16.4 Beständighet 214
- 16.5 Vattenabsorption och permeabilitet 220
- 16.6 Tjällyftningsbenägenhet 221
- 16.7 Värmekonduktivitet 223
- 16.8 Miljöpåverkan 224
- 16.9 Sammanfattning – krossad betong 236

## 17 Hyttsten 239

- 17.1 Faktorer som påverkar hyttstenens egenskaper 239
- 17.2 Deformation vid belastning 240
- 17.3 Hållfasthetstillväxt 241
- 17.4 Beständighet 241
- 17.5 Tjällyftningsbenägenhet 241
- 17.6 Värmekonduktivitet 242
- 17.7 Miljöpåverkan 242
- 17.8 Sammanfattning – hyttsten 244



## 15 Slaggrus

- 15.1 Faktorer som påverkar slaggrusets egenskaper 141
- 15.2 Deformation vid belastning 151
- 15.3 Hållfasthetstillväxt 163
- 15.4 Beständighet 165
- 15.5 Vattenabsorption och permeabilitet 168
- 15.6 Tjällyftningsbenägenhet 169
- 15.7 Värmekonduktivitet 169
- 15.8 Miljöpåverkan 173
- 15.9 Sammanfattning – slaggrus 177

Några av de faktorer som påverkar slaggrusets egenskaper diskuteras i avsnitt 15.1. I de övriga avsnitten beskrivs materialets egenskaper enligt de resultat som erhållits vid undersökningar inom detta projekt samt undersökningar som beskrivits i olika forskningsrapporter.

### 15.1 Faktorer som påverkar slaggrusets egenskaper

Slaggrus är sorterad och lagrad bottenaska från avfallsförbränning. Därför påverkas slaggrusets egenskaper både av avfallet och förbränningsprocessen. Även sortering och lagring av bottenaskan har stor betydelse.

#### 15.1.1 Avfallets innehåll och homogenitet

Avfallet har mycket stor inverkan på vilka miljöpåverkande ämnen bottenaskan innehåller. Både mängden av olika ämnen i avfallet och fördelningen eller tillgängligheten påverkar. Med tillgängligheten menas här förekomsten i fasta partiklar eller i lätt avgående organiskt och oorganiskt material.

Om *farligt avfall* ingår i råmaterialet försvåras den framtida användningen av bottenaskan. Till exempel innehåller bil- och hushållskemikalier, batterier, färger, elapparater, lysrör och impregnerat virke ämnen som ökar slaggrusets miljöpåverkande egenskaper. Batterier och kretskort innehåller kadmium, bly, kvicksilver och zink. Pigment i färger innehåller kadmium, krom, bly och zink. Samma sak gäller färgat glas och plast. Impregneringsfärger och impregnerat virke innehåller arsenik, koppar och kvicksilver. Avfall med sådant innehåll ska inte brännas om bottenaskan ska användas som vägmateriäl. Under senare år har en positiv utveckling skett på detta område. Enligt RVF (2000) har utsorteringen av batterier ur hushållsavfallet lett till att mängden kvicksilver i detta har minskat med 70% de senaste tio åren.

Chandler et al. (1997) redovisar resultat från flera undersökningar som alla visar att det är avfallets innehåll av finmaterial, organiskt material och eventuella batterier som bidrar mest till mängden metaller och spårämnen i avfallet.

Olika avfallstyper har olika karaktär. Enligt Chandler et al. (op. cit.) innehåller rent *hushållsavfall* mer organiskt material än de flesta andra avfallstyper. *Industriavfall* innehåller mindre organiskt material, men mer glas, trä, byggnadsavfall och övrigt material. Avfall från kontor och handel har störst andel pappers- och plastprodukter. Enligt samma referens kan årstids- och vädervariationer såsom medeltemperatur och nederbörd påverka avfallets sammansättning och dess vatteninnehåll. Vatteninnehållet har betydelse vid förbränningen genom att ett blötare avfall kräver längre uppehållstid i ugnen för att en fullständig förbränning ska uppnås.

Eftersom nästan all avfallsförbränning i Sverige sker med energiåtervinning är en blandning av avfall med högt och lågt energiinnehåll en viktig faktor för att få ett homogent bränsle. Exempel på energirikt avfall är plast, gummi, papper och trä, medan mat och trädgårdsavfall har lågt energiinnehåll. Industriavfall är därför mer energirikt än hushållsavfall.

I det avfall som bränns på de svenska kommunala avfallsanläggningarna idag ingår både hushållsavfall och industriavfall. Begreppet *hushållsavfall* omfattar kärl- och säcksopor, grovavfall inklusive park- och trädgårdsavfall, samt affärs- och kontorsavfall. Mängden hushållsavfall har varit relativt konstant sedan i början av 1990-talet medan industriavfallet har ökat kontinuerligt (RVF, 2000). Andelen hushållsavfall i några stora anläggningar anges i tabell 15-1.

**Tabell 15-1** Andel hushållsavfall av totalt förbränt avfall  
(data från RVF, 1997)

Anläggning	Andel hushållsavfall (%)
Högdalenverket, Stockholm	81
Sävenäverket, Göteborg	60
Malmös Avfallsvärmeverk	59
Gärstadverket, Linköping	76

Det hushållsavfall som eldas idag består både av organiska och oorganiska komponenter. Under förbränningsprocessen oxideras det organiska materialet till bland annat vatten, koldioxid och koloxid medan det oorganiska materialet antingen följer med rökgaserna eller blir kvar som fasta partiklar.

*Homogeniteten* hos avfallet påverkar homogeniteten hos slutprodukten. Blandning av avfallet före inmatning i ugnen är nödvändig. Det vanligaste är att avfallet tippas i en stor bunker och en operatör blandar det med hjälp av en traversmanövrerad gripklo som också används för att mata in lämplig mängd i pannan/ugnen. I små anläggningar tippas däremot avfallet på ett stort golv där det blandas och packas ihop av frontlastare som sedan också matar pannan. Det senare sättet med blandning på plant golv ger mindre risk för separation av finmaterial. Det ger samtidigt mindre risk för variationer i det kemiska innehållet hos slutprodukten, eftersom det har visats att olika miljöpåverkande spårämnen anrikas i finmaterialet (Chandler et al., op. cit.).

Som komplettering till ovanstående kan nämnas regeringens proposition 1996/97:172 som trädde i kraft 1998 och bland annat innebär

- att deponering av utsorterat brännbart avfall förbjuds från och med år 2002 samt
- att det från och med år 2005 införs ett generellt förbud mot deponering av organiskt avfall.

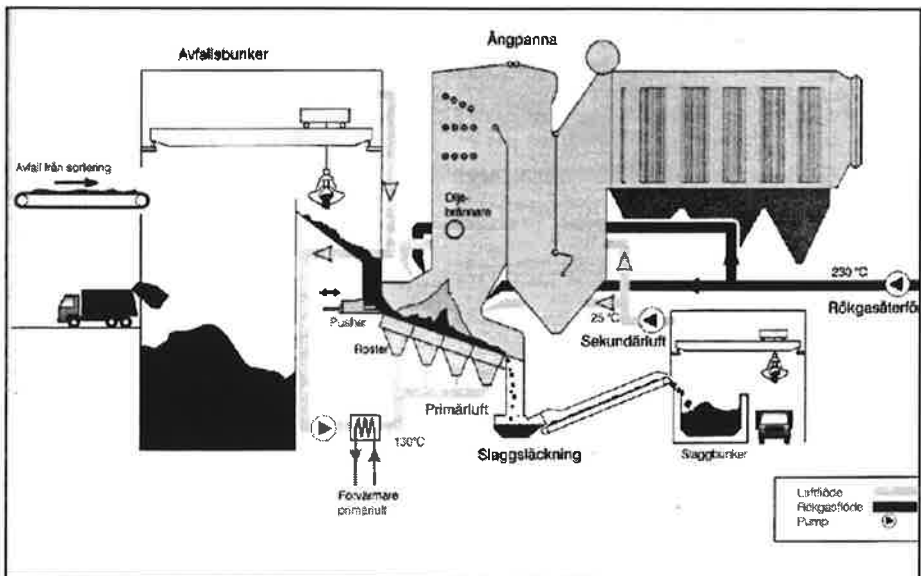
Följden av detta borde bli att en större mängd avfall lämnas till förbränning.

## 15.1.2 Förbränningsprocessen

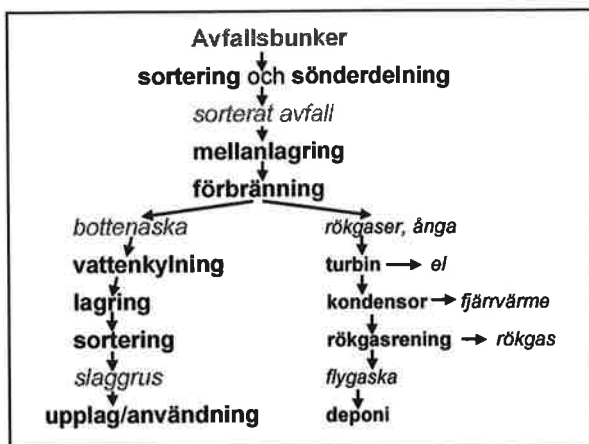
Vid förbränningen upphettas avfallet till mellan 800 och 1 000°C. Detta sker gradvis och gör att avfallet först torkar och vid ca 500°C börjar brinna. Efter förbränningen kyls bottenaskan snabbt med vatten.

Det finns två typer av förbränningssystem för avfall. I det vanligaste, ”mass burning”, matas avfallet direkt in i förbränningsugnen utan någon förbehandling. I det andra, refuse derived fuel (RDF), åstadkoms ett homogent bränsle genom förbehandling såsom sortering, krossning eller metallavskiljning av avfallet. Ibland kan även avfallet omvandlas till briketter eller pellets eller till flytande eller gasformigt bränsle. Ett sådant system gör att en mindre mängd avfall behöver brännas. RDF-bränsle eldas vanligen i förbränningsugnar av typen suspensionsugn, undermatningsugn eller fluidiserande bädd. RDF-systemet har en lägre kapitalkostnad per ton avfall, men driftkostnaden är avsevärt högre än för andra system. En del problem nämns också av Chandler et al. (1997) t.ex. begränsad marknad, haverier i avfallshanteringssystemet, lagringsproblem (risk för spontan förbränning) samt att det höga askinnehållet kan överbelasta askhanteringssystemet i suspensionseldade pannor.

De svenska anläggningarna är alla av typen mass burn. Figur 15-1 och 15-2 beskriver förbränningsanläggningen i Göteborg.



Figur 15-1 Skiss av förbränningsanläggningen i Göteborg (GRAAB, 1996)



**Figur 15-2** Princip för sopförbränningsanläggning (efter GRAAB, 1996)

Avfallet går först till sortering och sönderdelning. Därefter mellanlagras det i avfallsbunkern innan det förbränns. Förbränningen ger upphov till bottenaska och rökgaser (ånga). Bottenaskan kyls i ett vattentråg och lagras. Efter sortering då metallskrot och material större än 50 mm avskiljs erhålls slutprodukten slaggrus. Rökgaserna eller ångan ger elektricitet via en turbin och fjärrvärme via en kondensator. Efter en omfattande rening släpps rökgaserna ut i luften, medan rökgasreningensprodukterna eller den s.k. flygaskan går till deponi.

Den tydligaste effekten av förbränningen är att avfallets volym och vikt reduceras. Enligt Chandler et al. (1997) reduceras avfallsvolymen med 90% och vikten med 60%. I svenska anläggningar uppnås en viktminskning med ca 75%, vilket kan utläsas av tabell 15-2. I tabellen anges också fördelningen mellan bottenaska och flygaska för några anläggningar.

**Tabell 15-2** Produktionsstatistik för sopförbränningsanläggningar (data från RVF, 1997)

Anläggning	Förbränt avfall (ton)	Energiproduktion (MWh)		Restprodukter (ton)	
		Värme	El	Bottenaska	Flygaska
Högdalen, (Stockholm)	263 896	588 473	22 397	51 912	13 263
Göteborg	381 500	1 038 040	129 418	79 302	13 457
Malmö	202 166	573 749		36 850	4 410
Linköping	225 585	655 691	117 852	49 500	9 501

Uppgifterna i tabellen ska tolkas så att förbränningen omvandlar ett ton avfall till ca 200 kg bottenaska, ca 40 kg flygaska och ca 760 kg renad rökgas. Till detta kommer produktion av värme och elenergi.

## Viktiga faktorer

Viktiga faktorer i förbränningsprocessen är *temperatur, redoxförhållanden, klorinnehåll*, innehåll av andra reaktionspartners än syre och klor, *avfallets uppehållstid* samt *blandningsförhållandena* i ugnen (Belevi, 1998). Dessa faktorer påverkar den kemiska sammansättningen och det organiska innehållet i bottenaskan. Även kornstorleken och vatteninnehållet påverkas av förbränningen samt efterföljande *släckning och kylning*.

Belevi (1998 och 2000) undersökte koncentrationer av olika ämnen i bottenaska och rökgasreningsprodukter från en schweizisk förbränningsanläggning. Dessutom gjordes laboratorieförsök med två typer av verkliga bottenaskor samt s.k. syntetiska material. Undersökningarna visade att en höjning av *temperaturen* från 500 via 700 till 900°C tillsammans med *goda oxideringsförhållanden* gynnade förgasningen av koppar och zink från avfallet till rökgaserna. Det innebär en minskad mängd av dessa ämnen i bottenaskan. För omvandlingen av bly och kadmium var hög temperatur den viktigaste faktorn. *Tillsats av klor* i avfallet ökade övergången av alla metaller till gasform. *Uppehållstiden* i ugnen varierades från 10 till 120 min och visade att längre uppehållstid ökade förgasningen av bly och koppar, men inte av zink och kadmium.

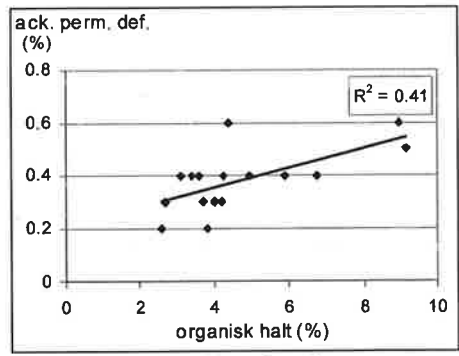
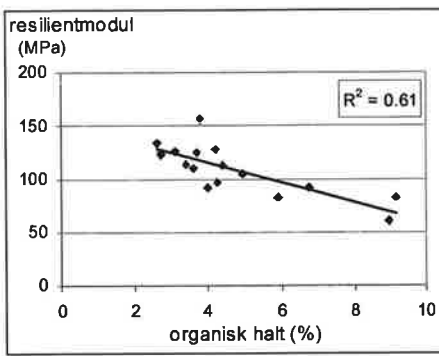
Belevi (2000) hävdar vidare att med en optimering av förbränningsprocessen skulle det gå att producera bottenaska med samma innehåll av kadmium, kobolt, koppar, molybden, mangan, bly, tenn och zink som kristallint berg har. Nickel och krom däremot kan inte förgasas vid förbränningen. De kan istället till en del avskiljas på mekanisk väg.

Det finns få studier av hur typen av förbränningsprocess påverkar de fysikaliska egenskaperna hos bottenaskan, vilket även Chandler et al. (1997) konstaterar. Det enda resultat denna referens rapporterar är skillnaden i halten oförbränt organiskt material för några olika typer av förbränningsystem, se nedan.

## Fullständig förbränning – organisk halt

Det är viktigt att avfallet får tillräcklig uppehållstid i ugnen så att en fullständig förbränning erhålls. *För hög vattenkvot* i det inmatade avfallet, *för snabb inmatning* till ugnen eller *otillräckligt med luft* i förbränningsprocessen ger ofullständig förbränning. Det resulterar i en stor andel organiskt material i bottenaskan.

Organiskt material försämrar styvheten hos naturliga material (Bäckman, 1989). Resultaten från det här projektet visar samma effekt på slaggrus. De visar dessutom att den permanenta deformationen påverkas negativt. I figur 15-3 visas förhållandet mellan halten organiskt material samt styvheten respektive den permanenta deformationen enligt genomförda laboratorieförsök.



**Figur 15-3** Den organiska haltens inverkan på styvhet och ackumulerad permanent deformation hos slaggrus. Organisk halt uttryckt som glödgningsförlust vid 550 °C (data från SGI, 1998) och styvhet uttryckt som resilientmodul från dynamiska treaxialförsök (data från detta projekt).

Observera att den organiska halten i figur 15-3 har mätts med en annan metod än den som anges i VÄG 94. VÄG 94:s krav uttrycks som högst 2% organiskt material mätt med kolorimetermetoden, medan här angivna värden har bestämts med glödning vid 550°C. En liten jämförelse som gjordes på ett par material i detta projekt visar att de båda metoderna ger mycket olika resultat. För det slaggrus som undersöktes gav kolorimetermetoden 1,7% organiskt material, medan glödning vid 550°C gav 4,1%. Se vidare diskussion i kapitel 19.

Förutom försämring av deformationsegenskaperna kan det oförbrända organiska materialet ha andra effekter på bottenaskan eller omgivningen när den används i anläggningssammanhang. Det kan t.ex. innehålla giftiga ämnen såsom polyaromatiska kolväten. Det kan ge upphov till komplexbildningar av å ena sidan löst organiskt kol och å andra sidan metaller eller andra organiska föreningar och på så sätt öka rörligheten och även lakbarheten hos dessa. Detta har särskilt observerats för koppar. Det organiska materialet kan också orsaka bildning av koldioxid under den biologiska nedbrytningen och på så sätt sänka pH, vilket i sin tur minskar buffringskapaciteten i bottenaskan. Slutligen kan det organiska materialet skapa reducerande förhållanden, vilket minskar metallers lakbarhet på grund av bildning av olösliga faser såsom metallsulfider. (Pavasars, 2000).

För att andelen oförbränt organiskt material ska bli liten krävs enligt ovan en god förbränning. Denna beror i sin tur på omrörningen och lufttillförseln. Omrörningen åstadkoms genom ugnsgallrets/bottensystemets rörelser (rotation och skakning). Rörelserna förbättrar samtidigt lufttillförseln till bränslet, men balansen mellan över- och underluft till gallret behöver också styras.

Chandler et al. (1997) beskriver hur typen av förbränningssystem påverkar halten oförbränt organiskt material i bottenaskor. Enligt dessa resultat ger de två systemen "mass burn" och RDF ungefär samma medianvärde för den organiska halten mätt som glödgningsförlust. Ett annat förbränningssystem, det s.k. tvåstegs-systemet, använder halvpyrolytiska förhållanden i den första kammaren för att producera energirika gaser som sedan går in i en högoxiderande andra förbränningskammare. Resultatet blir höga halter av oförbränt material. Detta sy-

stem är inte aktuellt i svenska anläggningar. Chandler et al. visar också att RDF-systemet ger minst spridning i organisk halt.

Vissa länder har regler för matningshastigheten och förbränningstemperaturen för att säkerställa låga halter oförbränt material. Matningshastigheten får t.ex. inte avvika för mycket från den fastställda och det måste finnas reservbrännare. Dessa ska kunna sättas in så att arbetstemperaturen uppnås innan avfallet tillsätts. (Chandler et al., op. cit.)

## Släckning

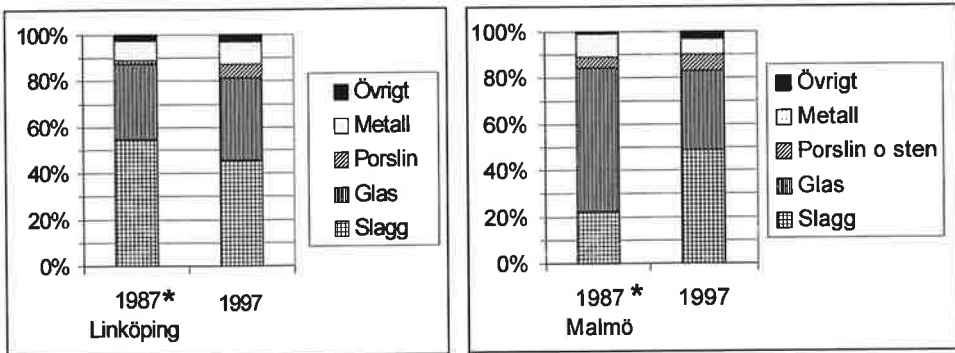
Den sista anhalten på bottenaskans väg genom förbränningen är släckningen. Då faller bottenaskan som samlats på botten av ugnen ner i ett vattentråg, quench, där vattnet släcker eventuellt kvarvarande bränsle och kyler askan. Vid kylningen spricker stora partiklar sönder. *Här påverkas alltså kornstorleken hos slaggruset. Vattnet gör också att askan inte dammar vid transport.*

I släckningstråget hamnar även avfallspartiklar som passerar genom ugnsgallret antingen för att de är så små eller för att de smälter av värmen. De brukar kallas "grate siftings" (ungefär gällersiktresten). Olika utformning av ugnsgaller och deras rörelser ger olika mängd finmaterial som ramlar igenom gallret. Övrigt finmaterial följer med på gallret genom hela ugnen. Det som faller igenom på ett tidigt stadium är inte fullständigt förbränt. Dessa siktresten har också visat sig innehålla aluminium och bly (Chandler et al., 1997). Ugnsgallrets utformning och dess rörelser påverkar alltså det *kemiska innehållet* i bottenaskan.

Det finns olika varianter för att lyfta bort den kylda askan från släckningstråget för vidare transport och lagring före deponi eller användning. Utformningen av släckningstråget och systemet för att ta bort den våta bottenaskan kan påverka *vatteninnehållet* hos det slutliga materialet, men störst påverkan har askan själv. Höga halter av organiskt material i bottenaskan ökar den vattenhållande kapaciteten.

## Förändring av processen under åren

Förbränningsprocessen har förändrats genom åren. Det betyder att de bottenaskor som undersöktes i forskningsprojekt under 1980-talet inte är av samma typ som de som uppkommer vid förbränning i dag. Det framgår om man jämför de innehållsanalyser av slaggrus som gjordes på 1980-talet med de som gjorts nu (figur 15-4). Analyserna är gjorda på material med kornstorleken 4–16 mm.



**Figur 15-4** *Materialsammansättning hos slaggrus från 1987 och 1997, enligt okulär innehållsanalys. \*Observera att ingen metallavskiljning gjorts på materialet från 1987. (data från Lundgren & Hartlén 1991 samt detta projekt)*

Med slagg menas hopsmält material som inte innehåller synligt glas, porslin eller metall. I kategorin övrigt ingår bl.a. oförbränt material såsom papper, plast, tyg och trä.

Det som är mest anmärkningsvärt i figur 15-4 är den stora minskningen i glasandel för Malmömaterialet. En tänkbar förklaring är den ökade insamlingen av returglas.

Även halten oförbränt material mätt med glödgning har förändrats. Emellertid försvåras jämförelser av resultaten av att olika glödgningstemperaturer har använts. 1983 var t.ex. halten oförbränt material i slaggrus från Malmö 8% (LOI vid 800°C) enligt Höboda et al. (1985). 1997 var den 3–5% beroende på årstid (LOI vid 550°C) enligt Fällman et al. (1999) samt 6% (LOI vid 950°C) enligt data från detta projekt. Trots de olika glödgningstemperaturerna kan man antagligen dra slutsatsen, att halten oförbränt är lägre nu än i början av 1980-talet.

## 15.1.3 Efterbehandling

### Sortering

Om bottenaskan ska användas som vägmateriel måste bottenaska och rökgasreningensprodukter *separeras* ordentligt. Det beror på att eventuella föroreningar anrikas i rökgasreningensprodukterna enligt tidigare beskrivning. Chandler et al. (1997) rekommenderar också att "gallersiktresterna" samlas upp och åter tillsätts bränslet.

*Metallavskiljning* är nödvändig både av kvalitetskäl och miljöskäl. Vid användning av bottenaskan i ett obundet lager kan metaller som aluminium, järn och zink korrodera i en alkalisk miljö. Det resulterar i vätgasproduktion och uppkomst av korrosionsprodukter som kan orsaka svällning, vilket ger sprickbildning i ovanförliggande lager. Metallavskiljning förbättrar också lagningsegenskaperna.

Bottenaskan kan också sorteras ytterligare för att få en annan kornstorleksfördelning. Denna kan nämligen påverka styvheten och bärförmågan hos slaggru-



set. Krossning av bottenaska är knappast ekonomiskt försvarbar, men justering av största sten och finjordshalt genom *avskiljning/siktning* kan vara aktuell. Liksom för andra obundna vägmaterier är det fördelaktigt med stora partiklar och lite finjord men ändå en välgraderad kurva. Kantiga partiklar är också fördelaktigt men kornformen påverkas normalt inte av siktningen (om inte vissa partikelformer finns inom en viss fraktion).

*Avskiljning av finjord* har också nämnts som ett sätt att förbättra de miljöpåverkande egenskaperna, eftersom tungmetaller och spårämnen anrikas i de finaste fraktionerna (Chandler et al., op. cit.).

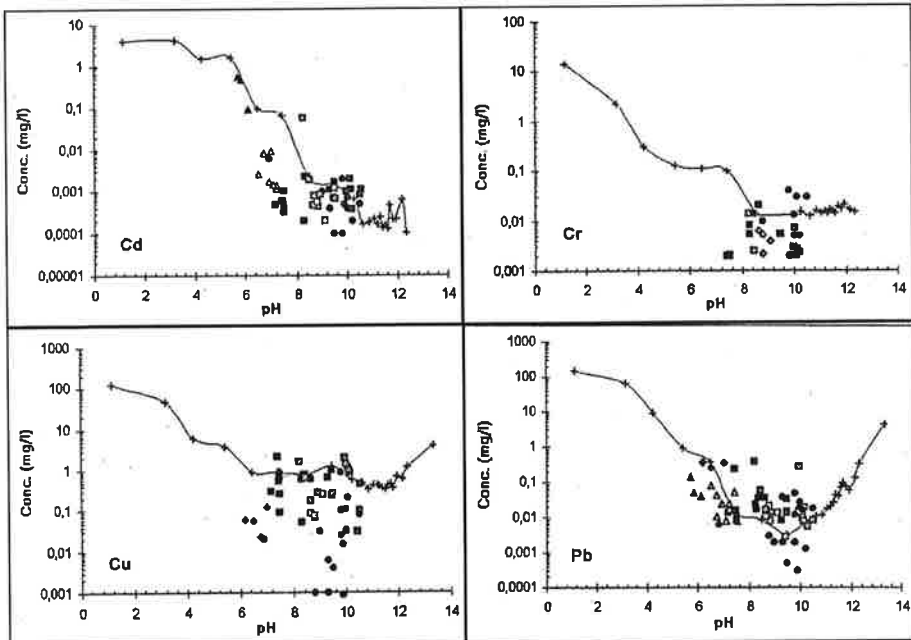
Kornstorleksfördelningen för svenskt slaggrus kan karakteriseras som sandigt grus med mellan 2 och 10% finjord. Det överensstämmer med de finjordshalter som Chandler et al. (op. cit.) rapporterar för tyska och nederländska anläggningar (2–10,1%).

## Lagring

Lagring av bottenaskan påverkar både de miljöpåverkande och de vägtekniska egenskaperna.

Under lagringen åldras askan och pH för materialet sjunker från alkalisk (9,5–10) till neutral. *pH-sänkningen* beror på askans reaktion med koldioxid som härrör antingen från luften eller har bildats vid biologisk nedbrytning av organiskt material. Vidare skapas *reducerande förhållanden* som en följd av att kvarvarande organiskt material bryts ned, vilket t.ex. ger omvandling av sulfat till sulfid. Även oxidering av olika metaller bidrar till de reducerande förhållandena. (Chandler et al., op. cit.).

pH-sänkningen har stor inverkan på lakningsegenskaperna eftersom de flesta metaller har ett pH-beroende lakningsförlopp (figur 15-5).



**Figur 15-5** Lakningsresultat vid olika pH. Den heldragna kurvan representerar pH-stat-försök på bottenaska. De övriga symbolerna betecknar resultat från kolonnförsök på bottenaska samt lakvatten från askdeponier. (Chandler et al., 1997)

Den stora spridningen i lakning av koppar förklaras med närvaro av olika halter av löst organiskt material. Det har visats att löst organiskt material ökar lakbarheten för koppar (Chandler et al., op. cit.).

Att lagringen har en ”gynnsam” effekt på lakningen av vissa ämnen bekräftas i tabell 15-3.

**Tabell 15-3** Jämförelse av lakningsresultat för färsk och lagrad bottenaska. Batch lakning med destillerat vatten vid L/S=10. (Chandler et al., 1997)

Ämne	Metallhalt i lakvatten (mg/kg)	
	Färsk bottenaska	Lagrad bottenaska (10 år)
As	0,18	0,032
Cd	0,069	0,001–0,006
Cr	0,073	0,040–0,059
Cu	4,6	0,50
Mo	3,49	4,56
Ni	0,13	0,15
Pb	0,43	0,006–0,054
Zn	0,41	0,35
pH	9,8–11	7–8

Enligt tabellen har den bottenaska som lagrats utomhus i tio år både lägre pH och signifikant lägre halt koppar och bly i lakvattnet, vilket är rimligt med tanke på pH-beroendet som är illustrerat i figur 15-5.

En del fysiska förändringar äger också rum under lagringen, t.ex. hydratation och bildning av lermineral ("förglasning") beroende på karbonatisering. Vid *hydratationen* binds vatten kemiskt till askpartiklarna, vilket resulterar i en snabb upptorkning. Detta tar högst några veckor. *Karbonatiseringen* ger upphov till kalciumkarbonat och på mycket lång sikt till kalciumsilikathydrat, CSH, genom reaktion mellan kalciumhydroxid och kiseldioxid. (Reichert, 1996). Lagringen har därigenom visats ha en positiv effekt på de vägtekniska egenskaperna. (Chandler et al., op. cit.).

## 15.2 Deformation vid belastning

Vid litteraturstudierna framkom det att sopförbränningsresters deformationsegenskaper inte har undersökts i någon större omfattning varken i laboratorium eller i fält. De uppgifter som förekommer i utländsk litteratur är endast resultat från California Bearing Ratio (CBR)-försök. I svensk litteratur finns bara 20 år gamla resultat från CBR-försök samt från försök med en metod, Swedish Earth Bearing Method (SEB), som inte har använts under de senaste 15 åren.

Eftersom både avfall och förbränningsprocesser har förändrats under årens lopp har det material som undersöktes för 15–20 år sedan inte egenskaper som det material som genereras idag. Det gör att deformationsegenskaperna hos dagens förbränningsrester behöver studeras närmare med bästa tillgängliga metoder.

I det här avsnittet presenteras resultat från dynamiska belastningsförsök utförda i laboratorium och i fält inom detta projekt. Dessutom redovisas några statiska belastningsförsök.

### 15.2.1 Deformation vid statisk belastning

*CBR*-värden för bottenaskor från Nederländerna och USA rapporteras av Chandler et al. (1997). Medelvärdet var 51% för de nederländska materialen och 124% för de amerikanska materialen. Författarna kommenterar den stora skillnaden mellan länderna men har ingen förklaring till den. En skillnad i kornstorleksfördelning mellan materialen är säkert trolig.

*Statisk plattbelastning* har bara gjorts på ett svenskt vägobjekt där slaggrus använts. Det är på en provväg vid Törringe i Skåne där förstärkningslagret består av slaggrus på en av provsträckorna. Tanken var att mätningen skulle göras som en normenlig produktionskontroll enligt VÄG 94, men den sena byggstarten och tidig tjäle förhindrade detta. Istället utfördes den statiska plattbelastningen i april året efter, på framgrävda förstärkningslager- och bärlagerytor. Under perioden däremellan trafikerades vägen av byggfordon till ett angränsande nytt bostadsområde. I tabell 15-4 redovisas resultat från statisk plattbelastning på slaggrussträckan och en referenssträcka.

**Tabell 15-4**  $E_{v2}$  från statisk plattbelastning på provsträckor vid Törringe  
(data från Grönholm, personlig kommunikation)

	Referens	Slaggrus
$E_{v2}$ på bärlagerytan	69,3	73,9
$E_{v2}$ på förstärkningslagerytan	90,3	93,0

Mätresultatet kan tolkas som att de båda sträckorna hade ungefär samma bärlagerytan.

### 15.2.2 Deformation vid dynamisk belastning i laboratorium

Inom detta projekt har *dynamiska treaxialförsök* gjorts på slaggrus från fyra svenska sopförbränningsanläggningar. Styvhet och bärförmåga har sedan utvärderats ur resultaten.

Stora variationer i deformationsegenskaperna förväntades beroende på säsongsvariationer i avfallets sammansättning. Både varierande mängd trädgårdsavfall och varierande vattenkvot kunde antas. Även olika förbränningsanläggningar förväntades inverka. Därför omfattade undersökningen slaggrus från olika anläggningar och från olika tidsperioder under året. De material som studerats härrör från anläggningar i Stockholm, Göteborg, Malmö och Linköping. Dessa bränner både hushålls- och industriavfall och utgör tillsammans med Uppsala de fem största anläggningarna i Sverige.

Resultatet presenteras som styvhet och bärförmåga för respektive anläggningsmaterial i stället för som ett gemensamt värde för slaggrus i allmänhet. Anledningen är att en storskalig användning av slaggrus kommer att kräva någon form av produktcertifiering, vilken lämpligen bör göras för en anläggning i taget.

Styvheten uttrycks som en spänningsberoende resilientmodul och bärförmågan som den last som ger två procent permanent deformation. Även utvecklingen av den permanenta deformationen för olika belastningsfall kan rapporteras.

Resultatet jämförs med motsvarande för konventionellt material som slaggrus kan tänkas ersätta, nämligen sand med olika graderingar och även några finkorniga förstärkningslagermaterial. Dessa material har provats vid VTI inom ramen för andra projekt.

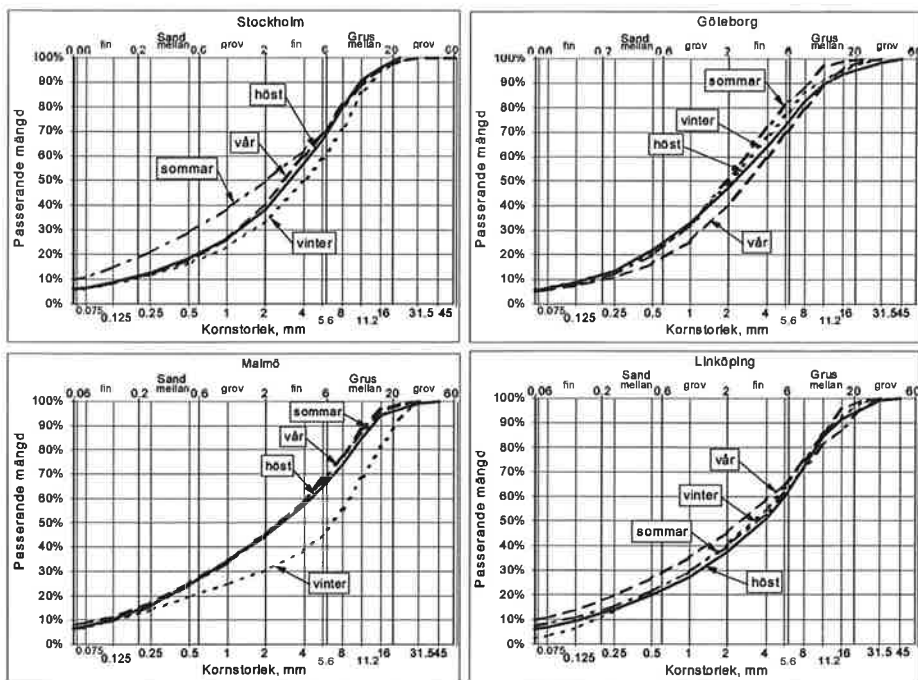
### Undersökt slaggrus

Provtagning på respektive anläggning gjordes av Statens geotekniska institut, SGI, inom ett annat projekt (Fällman et al., 1999). Fyra generalprov, fördelade från hösten 1996 till sommaren 1997, togs från varje anläggning. Därefter sorterades proven i en och samma sorteringsanläggning där magnetiskt material och partiklar större än 50 mm avskiljdes. Slutligen lagrades de 16 materialen utomhus på samma upplagsplats.

Efter 6 månaders lagring togs SGI prov bl.a. för analyser av miljöpåverkan. Dessa resultat redovisas separat av SGI (Fällman et al., 1999), men diskuteras även i avsnitt 15.8. I juni 1998 togs representativa prov för treaxialförsök och andra laboratorieanalyser inom detta projekt. Materialet lagrades sedan inomhus

fram till treaxialprovningen, som utfördes under perioden juni 1998 till september 1999.

Figur 15-6 visar kornstorleksfördelningen för slaggrus från de olika anläggningarna. De fyra kurvorna representerar material som provtagits vid olika tidsperioder under året (ungefär mars, juni, september och december). Dessa tidsperioder kallas i fortsättningen för årstider.



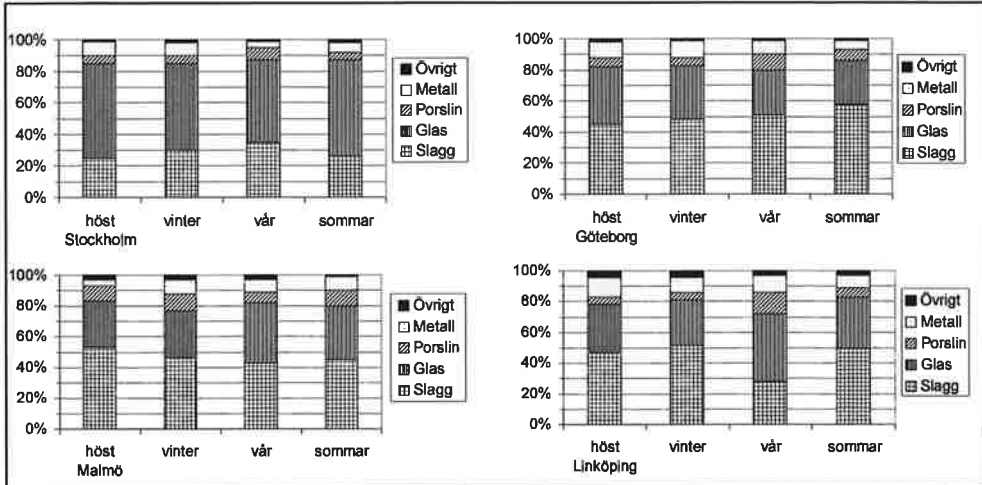
**Figur 15-6** Kornstorleksfördelning för studerade slaggrus, producerade 1996–97 och lagrade i 12–21 månader. Fyra anläggningar och fyra årstider.

Det framgår av figuren att den tidsberoende variationen är liten. Det är endast Stockholms somrarmaterial och Malmös vintermaterial som avviker från de övriga. Även skillnaden mellan anläggningarna är liten. (ej signifikant skillnad i finjordshalt, graderingstal eller  $d_{90}$ ).

Enligt kornstorleksfördelningen kan samtliga material klassificeras som sandigt grus.

Observera att figur 15-6 visar kornstorleksfördelningen för *hela* materialet. SGI utförde siktningsanalys på samma material men redovisar bara resultat för material mindre än 20 mm (Fällman et al., 1999). I det tekniska regelverket för vägbyggnad, VÄG 94, ställs krav på överbyggnadsmaterial med hjälp av olika parametrar som beskriver kornstorleksfördelningen. I detta sammanhang är det hela materialet som avses. För att kunna diskutera användbarhet via t.ex. finjordshalt och graderingstal för ett slaggrus måste således hela kornstorleksfördelningen bestämmas.

Materialsammansättningen har bestämts genom okulärbesiktning. Resultatet visas i figur 15-7.



**Figur 15-7** Materialsammansättning hos studerade slaggrus enligt okulär innehållsanalys. Producerade 1996–97 och lagrade i 12–21 månader.

Kategorierna valdes efter mönster från tidigare undersökningar (Höboda et al., 1985). Med slagg menas hopsmält material som inte innehåller synligt glas, porslin eller metall. I kategorin övrigt ingår bl.a. oförbränt material såsom papper, plast, tyg och trä.

Figuren visar att Stockholmsmaterialet innehöll mycket mer glas än de andra, i medeltal ca 57% jämfört med 34%. I Linköpingsmaterialet fanns mer metall och övrigt material än i de andra. För övrigt var det inte några större skillnader i materialsammansättning mellan anläggningarna.

Den organiska halten, bestämd som glödningsförlust vid 550°C redovisas i tabell 15-5.

**Tabell 15-5** Glödningsförlust vid 550°C för studerade slaggrus, prov A/prov B (data från SGI, 1998)

	LOI vid 550°C, (%)			
	Stockholm	Göteborg	Malmö	Linköping
Höst	3,9/4,1	2,8/4,0	3,8/3,8	6,5/7,0
Vinter	3,2/4,0	2,7/2,7	4,4/4,4	9,1/9,2
Vår	4,1/4,3	3,7/3,7	4,9/5,0	8,9/9,0
Sommar	4,2/4,3	3,1/3,1	2,6/2,6	5,8/6,0
Medel	4,0	3,2	3,9	7,7

Det kan noteras att en anläggning, Linköping, har signifikant högre innehåll av organiskt material än de övriga anläggningarna. Betydelsen av detta för styvhet och bärförmåga kommer att diskuteras senare i detta avsnitt. Däremot är inte skillnaden mellan olika årstider signifikant.

För att materialens deformationsegenskaper skulle kunna provas vid jämförbar packningsgrad och vatteninnehåll behövdes uppgifter om maximal torrdenstet och optimal vattenkvot. Dessa hämtades från de packningsförsök som SGI gjort på samma material (tabell 15-6).

**Tabell 15-6** Packningsegenskaper för studerade slaggrus enligt modifierad proctor (data från SGI, 1998).

	Stockholm		Göteborg		Malmö		Linköping	
	Max. dens (t/m <sup>3</sup> )	Opt. w (%)	Max. dens (t/m <sup>3</sup> )	Opt. w (%)	Max. dens (t/m <sup>3</sup> )	Opt. w (%)	Max. dens (t/m <sup>3</sup> )	Opt. w (%)
Höst	1,61	13,5	1,73	17	1,65	15–18	1,58	18,0
Vinter	1,66	9,0	1,72	16,1	1,63	16,5	1,48	19,5
Vår	1,58	11–19	1,66	17–19	1,64	16,4	1,43	20,5
Sommar	1,62	17,4	1,72	15–17	1,69	11–16	1,57	17,8
Medel	1,62	13,7	1,71	16,8	1,65	15,7	1,52	19,0

Maximal torrdensitet bestämd med tung laboratoriestampning (modifierad proctor) varierade mellan 1,5 och 1,7 t/m<sup>3</sup>. Optimal vattenkvot bestämd med samma metod varierade mellan 14 och 19%. Slaggrus är alltså ett poröst material med mycket lägre torrdensitet och mycket högre optimal vattenkvot än konventionellt vägmateriel. Motsvarande värden för grus brukar ligga runt 2,2 t/m<sup>3</sup> respektive 5%.

Syftet var att treaxialprova alla material vid samma relativa vattenkvot och samma packningsgrad. De förhållanden som valdes var optimal vattenkvot samt 90% packningsgrad dvs. 90% av maximal torrdensitet bestämd med modifierad proctor. De 300 mm höga provkropparna med diametern 150 mm packades i ett lager genom samtidig vibrering och tryck i en Vibrocompreasseur. Det är en metod som har använts med lyckat resultat för naturliga material. Bland fördelarna kan nämnas att materialet blir homogent packat och att vattenkvoten och densiteten för provkroppen kan väljas i förväg. En annan fördel är att den vibrerande packningen är mer skonsam. Denna metod valdes därför att packningsförsöken med modifierad proctor hade visat nedkrossningstendenser för dessa typer av material (Andersson et al., 1999).

Tyvärn uppnåddes inte 90% packningsgrad. Dessutom blev vattenkvoten över den optimala i alla provkroppar utom en. De verkliga provningsförhållandena som användes vid treaxialförsöken är angivna i tabell 15-7.

**Tabell 15-7** Packningsgrad (verklig torrdensitet/maximal torrdensitet från modifierad proctor) och vattenkvot för undersökta material. Medelvärde för tre provkroppar.

	Stockholm		Göteborg		Malmö		Linköping	
	Packn.grad (%)	rel w (%)	Packn.grad (%)	rel w (%)	Packn.grad (%)	rel w (%)	Packn.grad (%)	rel w (%)
Höst	84	96	89	100	85	108	86	105
Vinter	87	101	89	105	90	102	88	103
Vår	88	100	89	105	82	105	80	104
Sommar	86	106	89	105	88	110	83	105
Medel	86	101	89	104	86	106	84	104

Svårigheterna med att packa materialet tillräckligt kan kanske förklaras av innehållet av kantiga partiklar kombinerat med den skonsamma packningen. Resultat från en annan undersökning (Andersson et al., op. cit.) visar att slaggrus har mer

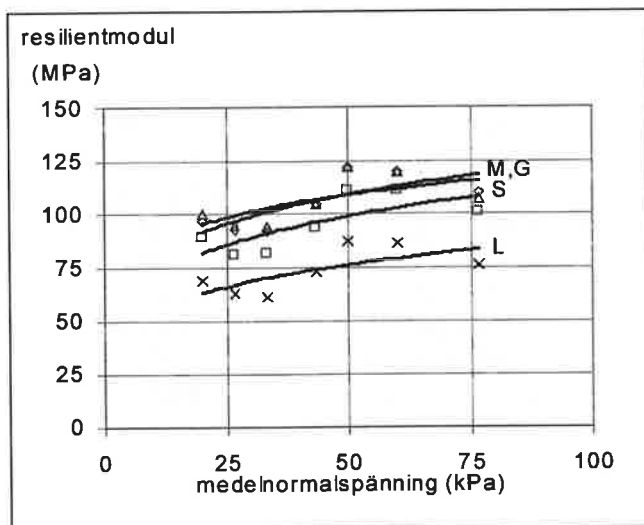
kantiga partiklar än sandigt grus och också mer än flisigast. Det är partiklarna i fraktionen 20–32 mm som är flisigast.

I fält är däremot slaggrus mycket lättpackat (Lundgren & Hartlén, 1991). Det beror antagligen på de tunga laster som har använts. Dessa ska jämföras med den skonsamma vibreringen i laboratoriet.

### Styvhet enligt dynamiska treaxialförsök

Resultaten från de dynamiska treaxialförsöken visade att den *initiala styvheten* uttryckt som resilientmodul varierade mellan 45 och 140 MPa beroende på spänning, anläggning och årstid.

Figur 15-8 visar styvheten vid olika spänningstillstånd för slaggrus från de olika anläggningarna.

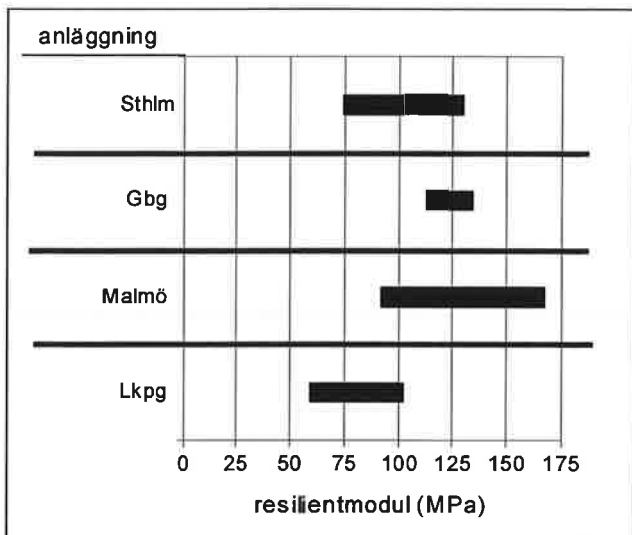


**Figur 15-8** Styvhet uttryckt som resilientmodul från dynamisk treaxialprovning av studerade slaggrus. Medelvärde för fyra årstider.

Två saker kan noteras. För det första är kurvorna ganska flacka. Det tyder på svagt spänningsberoende, vilket är typiskt för sandiga material. För det andra avviker en anläggning klart från de andra.

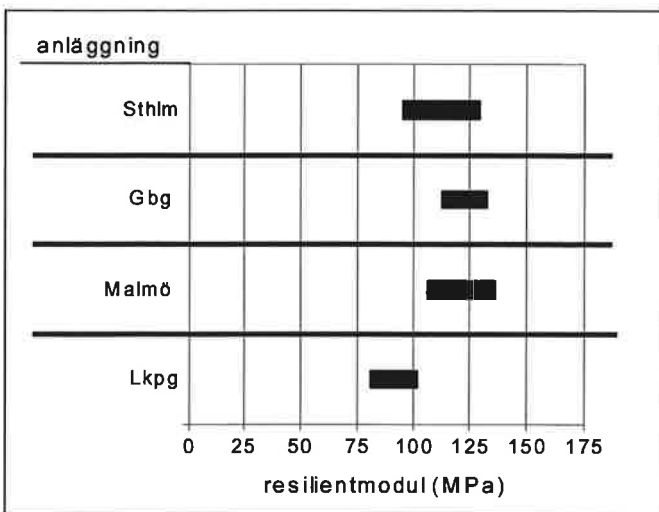
I figur 15-9 jämförs resultatet vid ett valt spänningstillstånd. Spridningen inom varje anläggning beroende på årstid illustreras också.





**Figur 15-9** Resilientmoduler för studerade slaggrus. Medelvärde för fyra årstider. Variation med 5% signifikans. Dynamisk treaxialprovning med medelnormalspänning,  $p_v = 50 \text{ kPa}$  ( $\sigma_v/\sigma_h = 3,5$ ).

Till viss del kan variationerna förklaras av de tidigare nämnda densitets- och vattenkvotsskillnaderna mellan provkroppar. Om inverkan från sådana skillnader filtreras bort blir resultatet enligt figur 15-10.



**Figur 15-10** Resilientmoduler för studerade slaggrus. Medelvärde för fyra årstider. Endast provkroppar med 85–90% packningsgrad och 100–108% relativ vattenkvot. Variation med 5% signifikans. Dynamisk treaxialprovning med medelnormalspänning,  $p_v = 50 \text{ kPa}$  ( $\sigma_v/\sigma_h = 3,5$ ).

En del av den kvarvarande spridningen beror på årstidsvariation, en del på inhomogeniteter i materialet.

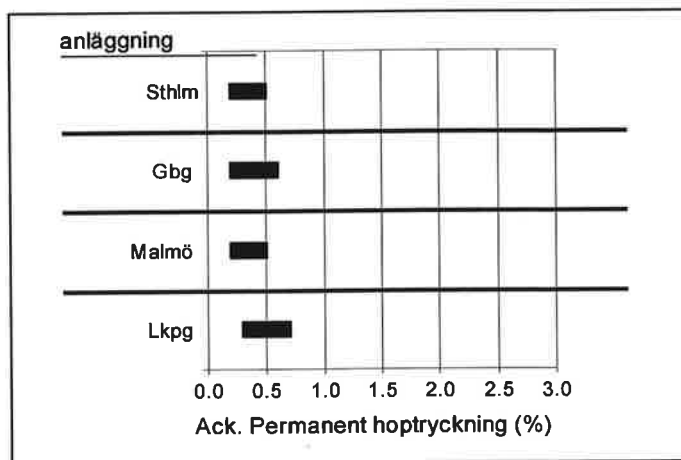
Minst spridning visar slaggruset från Göteborg. Det kan förklaras av att detta material var mycket homogent både avseende organisk halt och kornstorleksfördelning.

Minst styvhet har slaggruset från Linköping. Det förklaras med stor sannolikhet av att detta material har högst organisk halt (6–9% jämförd med 3–5% för övriga). I avsnitt 15.1.2 visas hur den organiska halten inverkar på styvheten.

Resultaten från styvhetsprovningen kan sammanfattas så att ett slaggrus med högst 5% organiskt material (LOI vid 550°C) samt vattenkvot över den optimala får en resilientmodul som ligger över 95 MPa vid medelnormalspänning 50 kPa. Resilientmodulen vid andra spänningsförhållanden kan beräknas med hjälp av spänningsberoendet i figur 15-8.

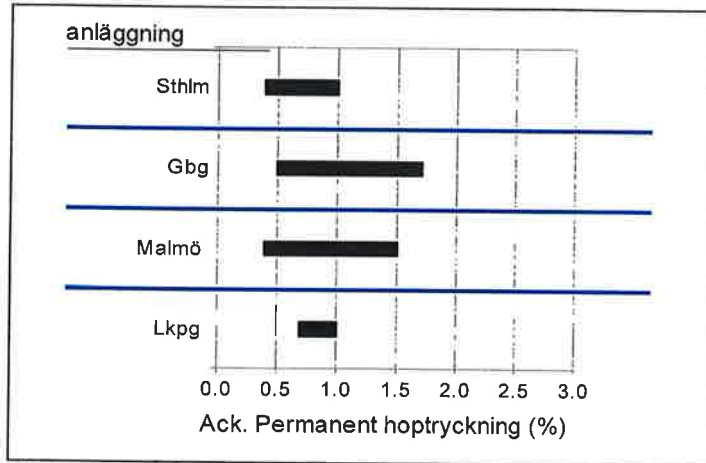
### Stabilitet och bärförmåga enligt dynamiska treaxialförsök

*Stabiliteten* uttryckt som ackumulerad permanent deformation (hoptryckning) har också utvärderats inom projektet. Resultaten visar att de permanenta deformationerna är mycket små så länge medelnormalspänningen är mindre än 60 kPa. I figur 15-11 jämförs deformationerna för olika slaggrus vid medelnormalspänningen 50 kPa.



**Figur 15-11** Ackumulerad permanent hoptryckning för studerade slaggrus. Medelvärde för fyra årstider. Variation med 5% signifikans. Dynamisk treaxialprovning med medelnormalspänning = 50 kPa.

Om medelnormalspänningen höjs, ökar deformationen, vilket visas i figur 15-12.



**Figur 15-12** Ackumulerad permanent hoptryckning för studerade slaggrus. Medelvärde för fyra årstider. Endast provkroppar med 85–90% packningsgrad och 100–108% relativ vattenkvot. Variation med 5% signifikans. Dynamisk treaxialprovning med medelnormalspänning = 77 kPa.

Den permanenta deformationen kan översättas till *bärförmåga*, dvs. den last ett lager av materialet kan bära utan för stora deformationer. Om maximalt 2% deformation tillåts blir bärförmågan mellan 70 och 100 kPa för samtliga undersökta slaggrus.

Med antagande av att trafiklasten utgörs av en standardaxel enligt VÄG 94 och med hjälp av datorberäkningar av hur lasten sprids med djupet kan följande slutsatser dras om de studerade slaggrusmaterialen. I en vägkonstruktion i trafikklass 1 bör slaggrus läggas minst 35 cm från vägytan (jämför avsnitt 18.3.2). I en konstruktion med tjockare beläggning skulle materialet kunna läggas någon decimeter närmare ytan men inte mer, på grund av den låga värmekonduktiviteten (se avsnitt 15.7). Enligt VÄG 94 går gränsen vid 25 cm från vägytan för ett material med slaggrusets värmeledningsegenskaper.

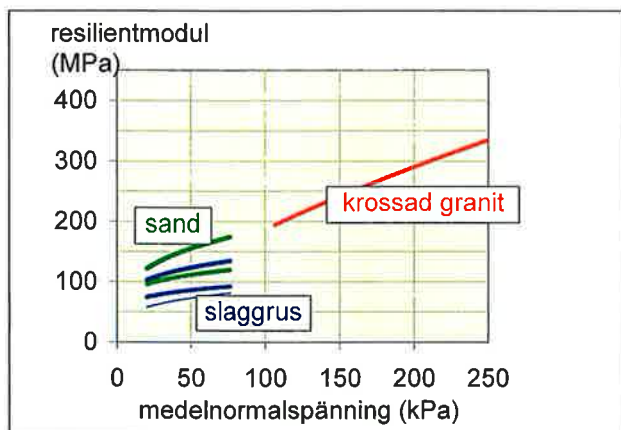
### Jämförelse med naturmaterial

Slaggrusets resultat vid treaxialprovningen har jämförts med motsvarande resultat för naturmaterial som slaggruset skulle kunna ersätta, t.ex. sand med olika graderingar. Sandmaterialen kommer från olika sektioner på vägobjektet E6 Fastarp–Heberg vid Falkenberg. De har provats på samma sätt som slaggruset inom ett annat forskningsprojekt vid VTI (Arm, 2000f).

Jämförelsen visar att slaggruset hade ungefär samma resilientmodul som sandmaterialen men mycket mindre permanenta deformationer. I detalj kan det uttryckas såhär. Slaggruset var mindre styvt än välgraderad fuktig sand, lika styvt som välgraderad blöt sand men mycket styvare än ensgraderad sand. Med fuktig och blöt menas att vattenkvoten är 60 respektive 80 procent av den optimala. Slaggrusets permanenta deformationer var mycket mindre än alla sandmaterials, oavsett vattenkvot och gradering.

För att även visa hur slaggrusets styvhet skiljer sig från grövre vägmateri-  
als, har resultaten också jämförts med motsvarande för ett krossat bergmaterial med  
kornstorlek 0–32 mm.

Ovanstående jämförelser visas i figur 15-13.



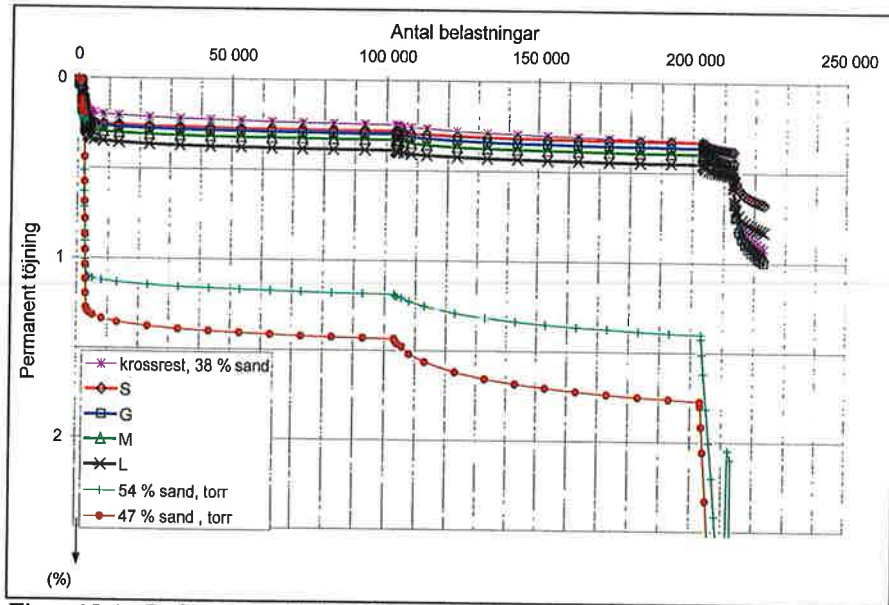
**Figur 15-13** Styvhetsintervall för slaggrus och sand jämfört med ett krossat bergmaterial. Styvhet uttryckt som resilientmodul vid dynamisk treaxialprovning. (data från detta projekt samt Arm 2000f)

I figuren visar de två tjocka blå linjerna styvhetsintervallet för slaggrus med högst 5% organiskt material (LOI vid 550 °C). Om samtliga undersökta slaggrus ska ingå sjunker intervallets undre gräns ned till den tunna blå linjen. I dessa material finns upp till 9% organiskt material.

De gröna linjerna representerar två sandmaterial med en gradering liknande slaggrusets, dvs. välgraderat. Den övre gäller för en fuktig och den undre för en blöt sand. När några ensgraderade sandmaterial provades fick de lägre resilientmoduler och gick till brott innan provningen slutfördes.

Den röda linjen visar styvheten för ett krossat 0–32 material som är godkänt som bärlager enligt VÄG 94. Eftersom det ska läggas direkt under en beläggning har det provats vid högre spänningar.

Jämförelsen av de permanenta deformationerna framgår av figur 15-14 där hela provningsförloppet redovisas. I figuren finns även deformationskurvan för en annan restprodukt, en avskiljningsprodukt från bergkrossning, med ungefär samma gradering.



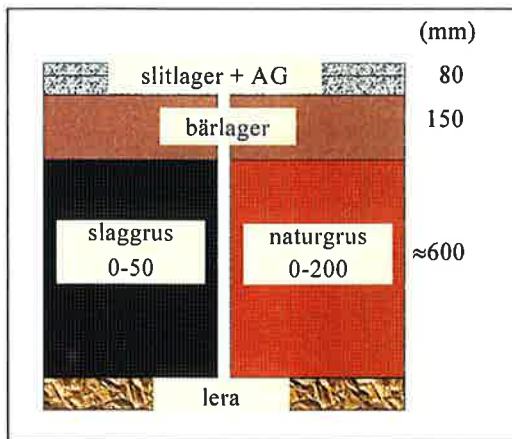
**Figur 15-14** Deformationsförlopp för studerade slaggrus samt två sandmaterial och en krossrest med liknande gradering. Deformation uttryckt som ackumulerad permanent trycktöjning (hoptryckning) vid dynamisk treaxialprovning.

Såsom nämnts tidigare deformeras sandmaterialen mycket mer än slaggruset. Däremot får krossresten och slaggruset ungefär samma permanenta deformation, vilket inte är förvånande med tanke på kornformens betydelse för stabiliteten. Kantiga korn ger stabilare material och båda dessa material har kantiga korn.

### 15.2.3 Deformation vid dynamisk belastning i fält

Här beskrivs fallviktsmätningar som utförts på två provvägar med slaggrus i förstärkningslagret.

Den ena provvägen byggdes 1987 inom projektet "Slagg från avfallsförbränning. Teknik och miljö" (Lundgren & Hartlén, 1991). Den ligger vid Gumpekulla i Linköping och är uppbyggd enligt figur 15-15. Sträckan med naturgrus i förstärkningslagret utgör referenssträcka.



**Figur 15-15** Uppbyggnad av provsträckor vid Gumpekulla i Linköping (uppgifter från Jacobson & Viman, 1989)

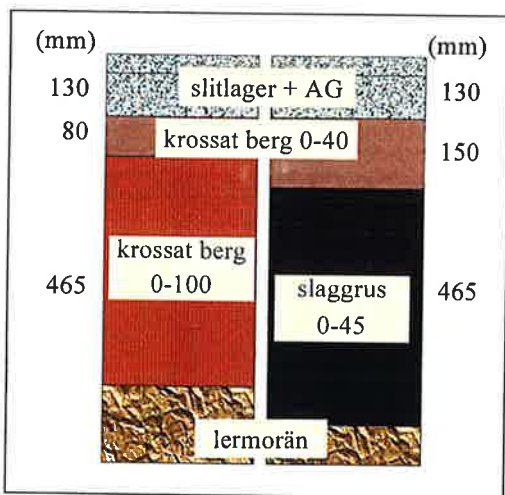
Sträckorna provbelastades med fallvikt strax efter byggandet och slaggrusets lagermodul utvärderades till 50 MPa, vilket var drygt hälften av naturgruslagrets 91 MPa. (Jacobson & Viman, 1989). Den stora skillnaden är naturlig med tanke på skillnaden i kornstorlek. Laboratorieundersökningar på naturmaterial har visat att ju grövre material desto större styvhet kan förväntas (Arm, 2000f).

Jämnhetsmätningar och okulärbesiktningar utförda 1988 visade inga tendenser till spårbildning, sprickor eller andra skador (Jacobsson & Viman, op. cit.). Med åren har dock sprickor börjat uppträda (figur 15-16). Trafikmängden på vägen kan uppskattas till ca 50 fordon per dygn, varav de flesta är tunga.



**Figur 15-16** Provsträckor vid Gumpekulla. Bärighetsskador i vänster hjulspår, som sammanfaller med beläggningens mittskarv. (Foto: VTI Safwat Said, 1999)

Den andra provvägen byggdes sent på hösten 1998 i Törringe utanför Malmö och provbelastades i juni 1999. Uppbyggnaden framgår av figur 15-17.



Figur 15-17 Uppbyggnad av provsträckor på Törringevägen

Här har referenssträckan krossat berg i förstärkningslagret. När sträckorna byggdes betraktades slaggruset som ett okrossat material jämfört med det krossade berget. Därför är bärlagret 150 mm tjockt i slaggrussträckan och 80 mm i referenssträckan, vilket framgår av figuren.

Resultatet från fallviktsmätningen blev lagermodulen 120–160 MPa för förstärkningslagret av slaggrus och 250–300 MPa för förstärkningslagret av bergkross (Ydrevik, 1999e). Det innebär att även på denna väg blev lagermodulen för slaggrus ungefär hälften av lagermodulen för referensen. Också här kan skillnaden förklaras av kornstorleken.

Observera att de mätningar som redovisats här beskriver den initiala styvheten respektive styvheten efter ca sex månader. Eventuell hållfasthetstillväxt med tiden behandlas i nästa avsnitt.

### 15.3 Hållfasthetstillväxt

I båda fältförsöken som beskrivits i förra avsnittet har uppföljande fallviktsmätningar utförts eller kommer att utföras.

I Linköping har mätningar gjorts vid flera tillfällen, dels de två första åren efter byggandet, dels inom detta projekt 1999. Resultaten från de gamla och de nya mätningarna kan emellertid inte jämföras direkt eftersom mätförfarandet och beräkningsförfarandet inte var desamma då som nu.

Däremot kan en relativ jämförelse göras, dvs. relationen mellan slaggrussträckans och referenssträckans styvhet kan jämföras vid olika tidpunkter. Då

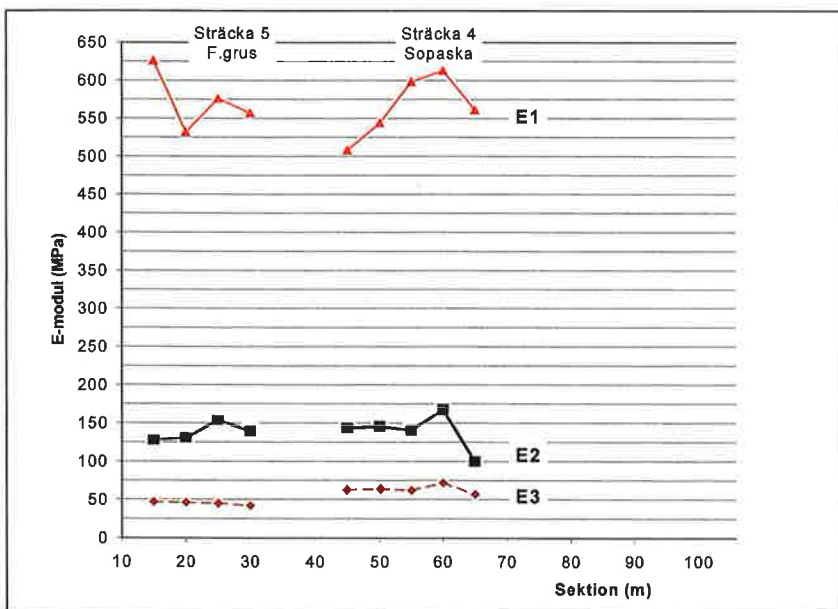
framgår det att en utveckling av slaggrusets hållfasthet har ägt rum (tabell 15-8). I tabellen har lagermodulen för förstärkningslager och undergrund slagits ihop.

**Tabell 15-8** Resultat från fallviktsmätningar på provväg vid Gumpekulla i Linköping. Kvot mellan slaggrussträckans och referenssträckans lagermodul. Förstärkningslager (FL) och undergrund har räknats som ett lager. (data från Jacobson & Viman 1989 samt Jansson 1999)

Mättilfälle	lagermodul (FL av <i>slaggrus</i> + undergrund) / lagermodul (FL av <i>naturgrus</i> + undergrund)
1987-11	55%
1988-05	79%
1988-10	92%
1999-08	101% (relation mellan förstärkningslager) 143% (relation mellan undergrunder)

Värdena ska tolkas så att vid mätningen i november 1987, strax efter färdigställandet, var slaggrussträckans sammansatta lagermodul drygt hälften så stor som referenssträckans. Efter ca ett år var den nästan lika stor och i augusti 1999 hade skillnaden försvunnit helt.

Vid den senaste mätningen som utfördes inom detta projekt, 1999-08, har förstärkningslager och undergrund separerats. Förstärkningslagret av slaggrus hade då i stort sett samma lagermodul som förstärkningslagret av naturgrus, vilket visas i figur 15-18. I figuren betecknar E1 lagermodulen för beläggningen plus bärlagret, E2 betecknar lagermodulen för förstärkningslagret och E3 lagermodulen för undergrunden.



**Figur 15-18** Beräknade E-moduler för tre lager i provsträcka 4 och 5 vid Gumpekulla i Linköping. Lager 1: beläggning plus bärlager, lager 2: förstärkningslager, lager 3: undergrund. Resultat från fallviktsmätning augusti 1999. (Jansson, 1999)



Den ökning av slaggrusets lagermodul som påvisats vid ovanstående fallviktsmätningar är positiv för de vägtekniciska egenskaperna, men den går långsamt. Därför går det knappast att dra nytta av den vid dimensioneringen utan den ökade styvheten får tas som en extra säkerhet i deformationshänseende.

Mot detta kan invändas att ovanstående resultat gäller slaggrus från 1980-talet. Uppföljning av nya provsträckor, t.ex. Törringevägen som beskrevs i föregående avsnitt, får utvisa om styvhetsökningen är mindre eller större för dagens slaggrus.

## 15.4 Beständighet

### Beständighet mot mekanisk påverkan (laboratorieresultat)

Los Angeles-tal för slaggrus kan variera mellan 10 och 90% med typiska värden kring 40–45% enligt Chandler et al. (1997). Enligt samma författare anses dessa värden vara normala för porös lättviktsballast, men höga för konventionell ballast.

Enligt Pihl & Milvang-Jensen (1996) har försök på Vejteknisk Institut på olika typer av slaggrus gett LA-tal mellan 45 och 55%. Som jämförelse kan nämnas att traditionella danska sand och grusmaterial har ett LA-tal på ca 25%.

I en svensk undersökning gjordes olika typer av beständighetsprovningar på slaggrus från Göteborg (Andersson et al., 1999). Resultatet jämfördes med motsvarande värden för ett sandigt grus. I samtliga fall fick slaggruset sämre beständighetsvärden (tabell 15-9).

*Tabell 15-9 Beständighet mot mekanisk påverkan för slaggrus från Göteborg och ett grusmaterial, mätt med tre olika metoder (efter Andersson et al., 1999)*

Provningmetod	Slaggrus	Sandigt grus
Sprödhet enligt FAS 210-98	82	39
Los Angeles-tal <sup>1)</sup> enligt prEN 1097-2	45,4	22,7
micro-Devalvärde enligt prEN 1097-1	26	6

1) Analysfraktion 10–14 mm

Även ALT-MAT-projektet undersökte beständigheten hos olika slaggrusmaterial, två franska och ett danskt, och jämförde med motsvarande för några referensmaterial av naturballast. Slutsatsen blev att hårda material såsom alla referensmaterialen fick bra beständighetsvärden medan slaggrusmaterialen fick dåliga värden. (ALT-MAT, 2000).

Sammanfattningsvis kan sägas att enligt laboratorieprovning med standardmetoder har slaggrus sämre beständighet mot mekanisk påverkan än godkänd naturballast. Orsaken är sannolikt den porösa karaktären.

## Beständighet mot mekanisk påverkan (fältresultat)

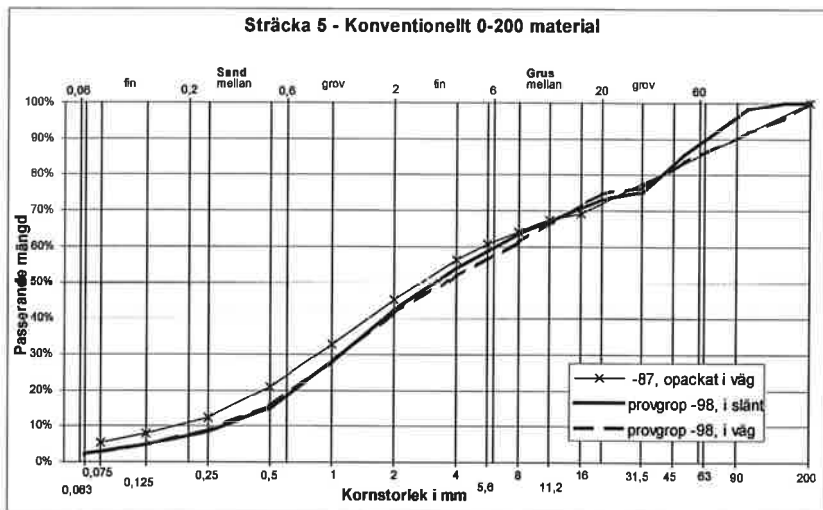
Andersson et al. (1999) undersökte en gammal provväg i Linköping som anlades 1987 med slaggrus respektive naturgrus i förstärkningslagret, se figur 15-15 i tidigare avsnitt. Avsikten var bl.a. att undersöka om kornstorleksfördelningen hade ändrats med tiden. Hösten 1998 togs prov på förstärkningslagermaterialet i de båda sträckorna. För varje sträcka grävdes en provgrop i körbanan vid beräknat hjulspår och en i slänten (figur 15-19). Motivet var att materialet i körbanan skulle ha utsatts för eventuell nedkrossning medan materialet i slänten skulle vara opåverkat av trafik.

Provgroparna grävdes och spettades för hand efter att det asfaltbundna slitlagret och bärlagret bilats bort med handhållen maskin (Pioneer). Sedan det obundna bärlagret grävts bort grävdes förstärkningslagret upp i hela sin tjocklek. Materialet delades ner och erforderlig provmängd togs hem till laboratorium för kornstorleksanalys.

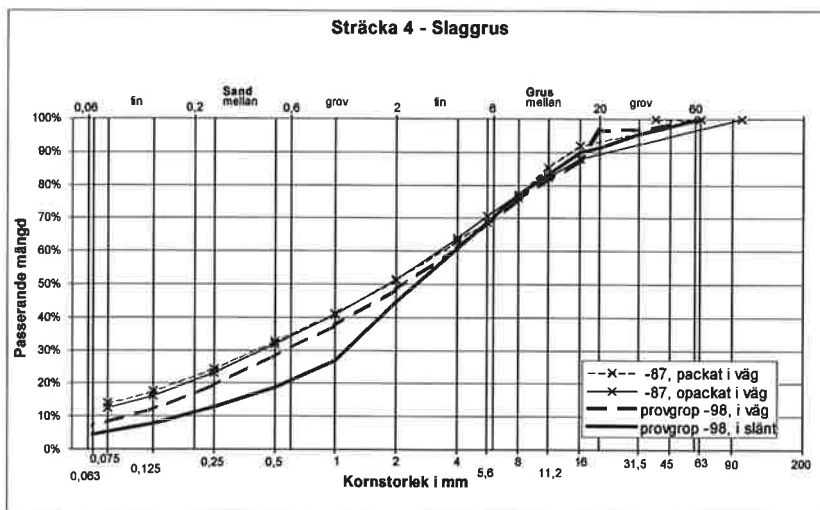


*Figur 15-19 Provgrop i sträcka 5 med fältsiktat förstärkningslagermaterial av naturgrus. Sträckvånster om vägmitt på den enkelriktade provvägen.  
(Foto: VTI Maria Arm, 1998)*

Figur 15-20 a och b visar kornstorleksfördelningar för de upptagna materialen. För jämförelse är även sikt kurvorna från undersökningarna 1987 inritade.



Figur 15-20a Kornstorleksfördelning 1987 och 1998 – sträcka 5 Konventionellt 0–200 material (Andersson et al., 1999)



Figur 15-20b Kornstorleksfördelning 1987 och 1998 – sträcka 4 Slaggrus (Andersson et al., 1999)

Eftersom materialet tvätsiktades 1987, men inte 1998 kan kurvorna då och nu tyvärr inte jämföras direkt. Vid torrsiktning sitter nämligen finmaterialet kvar på de grova partiklarna och finjordhalten blir för låg. Skillnaden i siktningsmetod kan troligen förklara att kurvorna från 1998 ligger lägre än kurvorna från 1987. Naturligtvis varierar materialet inom provsträckorna också.

Däremot kan kurvorna från provgroparna i väg och slänt jämföras. Enligt figur 15-20a hade referenssträckan med naturgrus ingen nämnvärd skillnad mellan materialet i väg och materialet i slänt. För slaggruset däremot är skillnaden tydlig. Figur 15-20b visar att materialet i vägen är finkornigare än materialet i slänten. Detta kan ha flera förklaringar.

- slaggruset har separerat vid utläggningen så att grovt material rullade ut i slänten,
- slaggruset har krossats ner under trafiken eller
- slaggruset i vägen krossades ner vid provtagningen. Materialet i vägen var så hårt packat att det fick spettas och hackas loss med stor ansträngning. Det var hårdare packat än materialet i slänten och hårdare packat än materialet i referenssträckan.

### Beständighet mot klimatpåverkan (laboratorieresultat)

Typiska värden från frys-töförsök med magnesiumsulfat visar att slaggrus är beständigt mot frys-tövaxlingar (Chandler et al., 1997). Det innebär maximalt 18% sönderfall.

När slaggrus från Göteborg provades enligt prEN 1367-1 som innebär frys-tövaxling i avjoniserat vatten blev resultatet 3,9 viktsprocent sönderfall. Motsvarande värde för referensmaterialet, ett sandigt grus, blev 0,1 viktsprocent (Andersson et al., 1999).

### Beständighet mot klimatpåverkan (fältresultat)

Inga resultat har hittats utom möjligen samma som finns beskrivna i avsnittet Beständighet mot mekanisk påverkan. Frågan är vilken beständighet som undersöks när man gräver upp material ur gamla provvägar. Likaså kan man undra om det är möjligt att studera renodlad klimatpåverkan i fält.

## 15.5 Vattenabsorption och permeabilitet

Slaggrus är ett mycket poröst material och har enligt Chandler et al. (1997) högre *absorptionsvärden* än de flesta naturmaterial. 14% absorption anges för ett amerikanskt slaggrus med kornstorlek 0–4,75 mm och 5,7% för grövre material. Anderson et al. (1999) anger 3,7% absorption för slaggrus 4–31,5 mm jämfört med 0,27% för ett sandigt grus med samma kornstorlek.

Eftersom slaggrus är ett välgraderat material kan det förväntas att dess *permeabilitet* är ganska låg i välpackat tillstånd. Så är också fallet, vilket framgår av de permeabilitetsvärden som rapporteras (tabell 15-10).

**Tabell 15-10** Permeabilitet för färskt och lagrat slaggrus samt ett sandigt grus (data från Harilén & Elander 1986 och Andersson et al. 1999)

	Färskt slaggrus Malmö 1980-tal	Lagrat slaggrus Göteborg 1990-tal	Sandigt grus
Permeabilitet, (m/s)	$0,2 \cdot 10^{-6} - 10 \cdot 10^{-6}$	$0,9 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-6}$
Vattenkvot vid packning, (%)	15	17,5	3,0
Torrdensitet, ( $t/m^3$ )	1,78	1,73	2,13

De erhållna värdena är till och med låga för välgraderade material, vilket Chandler et al. (op. cit.) menar beror på finjord som sätter igen hålrummen. I tabellen finns även värden för ett referensmaterial av sandigt grus. Värdena kan också jämföras med erfarenhetsmässiga värden för några andra naturliga material t.ex. grusig morän  $10^{-7}$ – $10^{-5}$  m/s, sandig morän  $10^{-8}$ – $10^{-6}$  m/s och siltig morän  $10^{-9}$ – $10^{-7}$  m/s (Andersson et al., op. cit.).

Av permeabilitetsvärdena kan man dra slutsatsen att slaggrus tillåter en del infiltration (Chandler et al., op. cit.).

## 15.6 Tjällyftningsbenägenhet

Frysförsök i VTI:s laboratorium har använts för att bestämma tjällyftningsbenägenheten för slaggrus från Göteborg (Andersson et al., 1999). Vid denna typ av försök vattenmättas provet under ett dygn före provning. Resultaten redovisas i tabell 15-11.

*Tabell 15-11 Tjällyftningsparametrar bestämda vid frysförsök (efter Andersson et al., 1999)*

	Slaggrus	Sandigt grus	Silt	Sandig siltig morän
Lyftning, (% av frusen provhöjd)	1,4	0,2	38	20
Porvatten, (volymprocent)	46,9	24,5	47	27
Last, (kPa)	7,8	7,8	7,8	7,8

För slaggruset och gruset är de registrerade lyftbeloppen (översta raden i tabell 15-11) mindre än 10% av porvolymen. De kan alltså betecknas som icke tjällyftande, vilket kanske inte var så överraskande när man studerat kornstorleksfördelningarna (0–32 mm med 5–10% finjord). För jämförelse har resultat från frystest på två mycket tjällyftande material tagits med i tabellen. Det ena är en lerig silt och det andra är en sandig siltig morän, båda tagna från provvägar utanför Umeå.

## 15.7 Värmekonduktivitet

### Laboratorieresultat

Vid värmekonduktivetsbestämning i laboratorium fick slaggrus från Göteborg  $\lambda$ -tal mellan 0,2 och 0,5 W/(m $\cdot$ °C) beroende på fukthalt (tabell 15-12).

**Tabell 15-12** Värmeledning för slaggrus och några naturmaterial (efter Knutsson 1981 och Andersson et al. 1999)

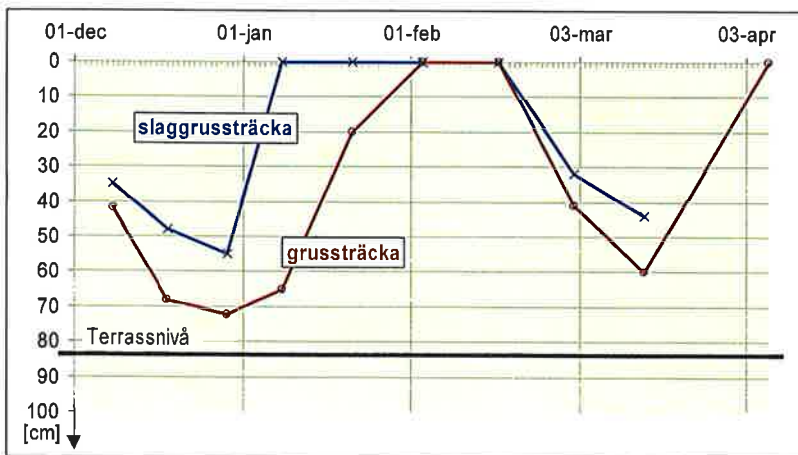
	Slaggrus (Andersson et al.)		Sandigt grus (Andersson et al.)		Berg	Morän, grus	Silt, lera
	(torrt)	(vått)	(torrt)	(vått)			
Värmeledning, (W/m°C)	0,23	0,48	0,55	1,81	3,7	2,1	1,4
Torr densitet, (t/m <sup>3</sup> )	1,37	–	2,04	–			
Skrymdensitet, (t/m <sup>3</sup> )	–	1,37	–	2,22	2,65	2,2	1,95
Fukthalt, (viktprocent)	–	18,5	–	6,4	?	?	?

Av tabellen framgår att slaggruset har låg värmeledning, mycket lägre än naturmaterial. Vad detta betyder för tjälens nedträngningsmöjlighet i en konstruktion med slaggrus framgår av följande avsnitt.

### Tjälgränsmätningar i fält

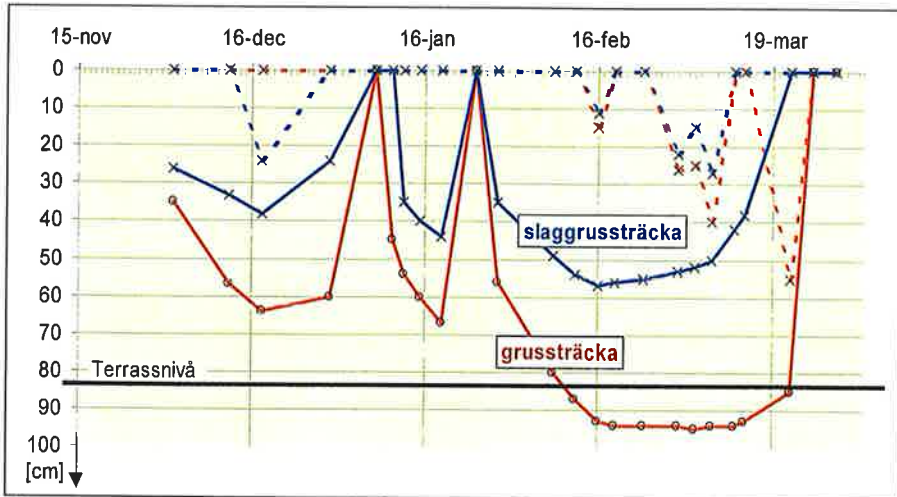
I den tidigare nämnda provvägen i Linköping gjordes tjäljupsmätningar vintern efter vägens färdigställande 1987 (Jacobson & Viman, 1989). Vägens uppbyggnad framgår av figur 15-15 i tidigare avsnitt. Överbyggnaden är ca 85 cm tjock med 8 cm bundet lager och 15 cm obundet bärlager. Förstärkningslagret består av slaggrus med kornstorlek 0–50 mm i provsträckan och naturgrus 0–200 mm i referenssträckan.

Mätningarna gjordes med hjälp av tjälgränsmätare av Gandahl-typ som avlästes ungefär var tionde dag. Dessa visade på en tydlig skillnad mellan tjälnedträngningen i slaggrussträckan och referenssträckan (figur 15-21).



**Figur 15-21** Uppmått tjäljup i Linköping vintern 1987/88 (data från Jacobson & Viman, 1989)

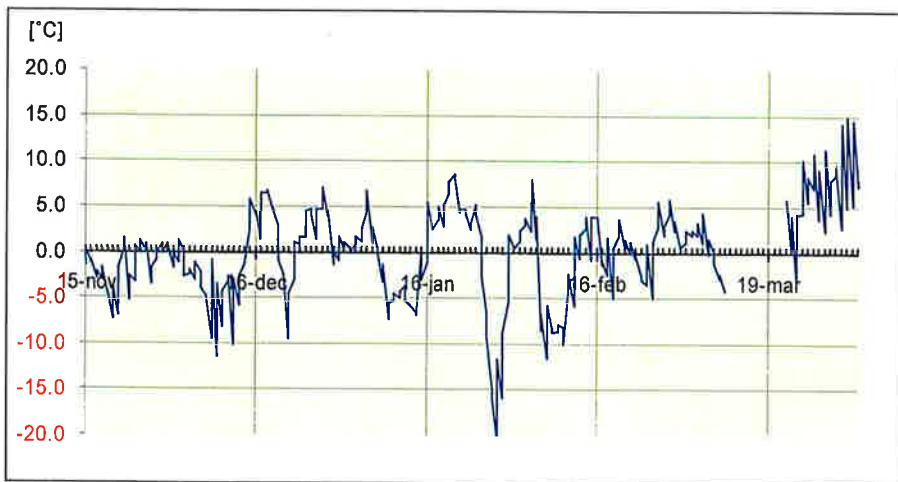
För att få ett större underlag gjordes mätningar inom detta projekt under vintern 1998/99 och 1999/2000. Dessa mätningar gav liknande resultat (figur 15-22 och 15-24).



**Figur 15-22** Uppmått tjäldjup i Linköping vintern 1998/99. De streckade linjerna visar upptiningen från ytan.

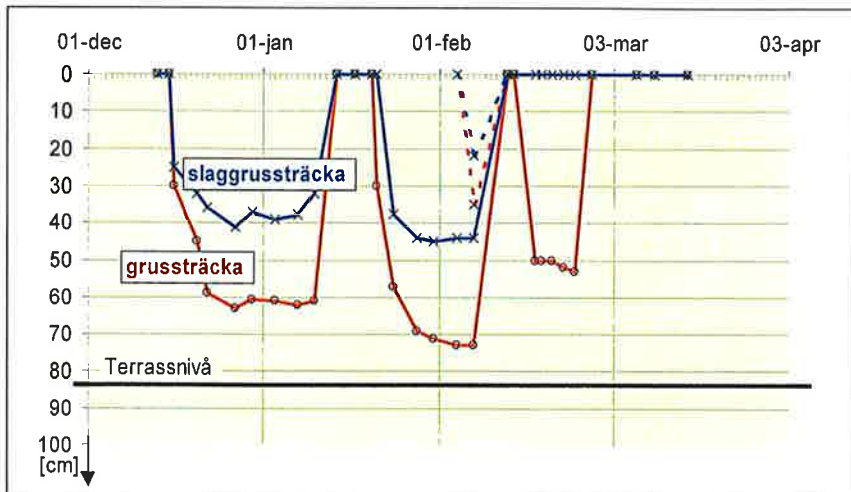
Under perioden 10 februari till 22 mars var hela överbyggnaden samt den översta decimetern av terrassmaterialet tjälad i referenssträckan. I slaggrussträckan var tjäldjupet som mest 57 cm.

Figur 15-23 visar lufttemperaturen under avläsningsperioden.



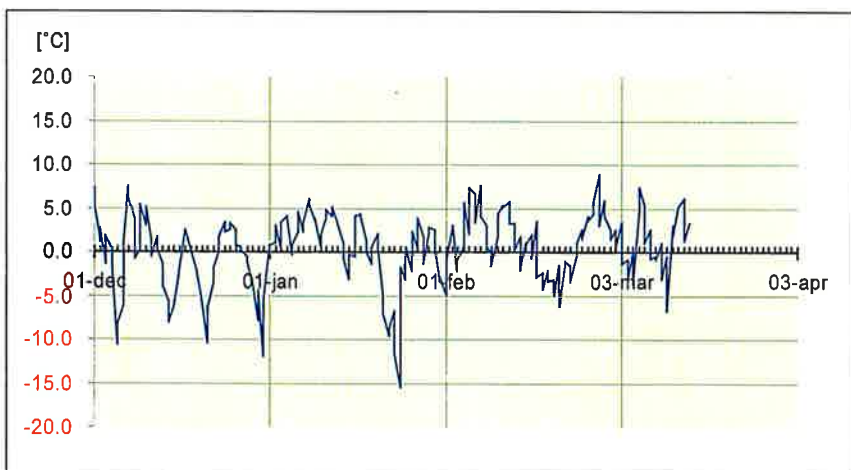
**Figur 15-23** Lufttemperatur i Linköping vintern 1998/99 (data från Svensson, personlig kommunikation)

I figur 15-24 illustreras avläsningarna från vintern 1999/2000.



**Figur 15-24** Uppmätt tjäldjup i Linköping vintern 1999/00. De streckade linjerna visar upptiningen från ytan.

Även denna vintern var skillnaden mellan sträckorna stor. Eftersom vintern inte var så sträng gick inte tjälen lika djupt som vintern 1998/99.



**Figur 15-25** Lufttemperatur i Linköping vintern 1999/00 (data från Svensson, personlig kommunikation)

Även i Törringevägen utanför Malmö har tjälgränsmätningar utförts inom detta projekt. Vägens uppbyggnad framgår av figur 15-17.

Vintern 1998/99 var vägen tjälad vid ett mätstillfälle och vintern 1999/2000 var den tjälad vid fem avläsningstillfällen på slaggrussträckan (mätare 4). Resultatet visas i tabell 15-13.



**Tabell 15-13** Uppmätt tjäldjup i Törringevägen vintern 1998/99 delvis samt vintern 1999/00

Datum	Referenssträcka tjäldjup i cm		Slaggrussträcka tjäldjup i cm	
	mätare 1	mätare 2	mätare 3	mätare 4
1999-02-11	41	45	30	33
1999-12-17	0	0	0	18
1999-12-23	0	32	0	21
1999-12-30	0	0	0	2
2000-01-24	40	42	26	28
2000-02-19	0	0	0	2

Vid två tillfällen, 17 och 23 december 1999, var det mycket stor skillnad mellan mätare i samma sträcka. Skillnaden var till och med större än mellan de båda sträckorna. Ingen bra förklaring har kunnat hittas till detta. En delorsak kan vara att mätare 2 och 4 som har störst tjäldjup vid dessa tillfällen, ligger på norrsidan av vägen. Mätare 1 och 3 ligger på södersidan men bara två meter ifrån sina ”syskonmätare”.

Vid tre av de tillfällen som något tjäldjup har uppmätts var måttet lägre i slaggrussträckan än i referenssträckan. Skillnaden mellan sträckorna varierar mellan 11 och 14 cm. Den största skillnaden uppmättes efter tre dygn med mer än fem minusgrader. Vid två tillfällen var tjäldjupet i stort sett samma i de båda sträckorna och vid ett tillfälle var tjäldjupet 18 cm större i slaggrussträckan.

Sannolikt kan skillnaden i bärlagertjocklek spela in på något sätt. I slaggrussträckan är bärlagret 15 cm tjockt men i referenssträckan är det bara 8 cm.

Det verkar som om tjälen tränger ner långsammare men tinar snabbare i slaggruset. Sambandet mellan lufttemperatur, värmekonduktivitet hos vägmateriäl samt resulterande tjälnedträngning kommer att studeras närmare i fortsättningen av detta projekt. Speciellt kommer eventuellt tillgodogörande av låg värmekonduktivitet hos vissa restprodukter att utredas.

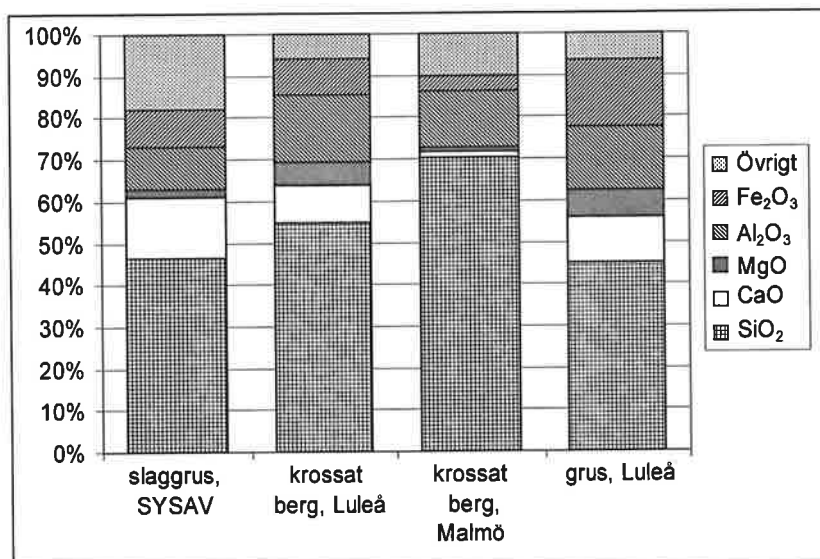
## 15.8 Miljöpåverkan

I detta avsnitt beskrivs dels de kemiska beståndsdelarna i slaggrus, dels resultat från olika typer av lakningsförsök på slaggrus i laboratorium, dels resultat från lakvatteninsamling i fält samt lakförsök på uppgrävt material. Slutligen görs en jämförelse med bakgrundshalter i ett fall och med lakresultat för naturmaterial i ett annat fall.

### 15.8.1 Kemisk sammansättning (”totalhalter”)

Materialsammansättningen hos slaggrus beror naturligtvis på vad som har förbränts, men glas brukar vara en huvudbeståndsdel (jämför figur 15-4 och 15-7 i tidigare avsnitt). Därför dominerar kiseldioxid, kalciumoxid och aluminiumoxid det kemiska innehållet. Även andra alkaliska oxider ingår (Lundgren & Hartlén,

1991). I figur 15-26 anges den kemiska sammansättningen för slaggrus från Malmö tillsammans med några naturmaterial som jämförelse.



**Figur 15-26** Kemisk sammansättning av slaggrus, krossat berg och grus. Övrigt innebär t.ex. Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O och TiO<sub>2</sub>. För slaggruset ingår dessutom 6% oförbränt organiskt material samt ett par procent P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Zn och Cu. (data från Lindgren 1998 samt detta projekt)

Av figuren framgår att huvudbeståndsdelarna i de olika materialen är desamma, men proportionerna varierar.

Chandler et al. (1997) delar upp ingående ämnen i slaggrus i tre delar nämligen "major" (ungefär huvudelement), "minor" samt spårämnen. Till "major" hör syre (O), kisel (Si), järn (Fe), kalcium (Ca), aluminium (Al), natrium (Na), kalium (K) och kol (C). Till "minor" hör magnesium (Mg), titan (Ti), mangan (Mn), barium (Ba), klor (Cl), zink (Zn), koppar (Cu), bly (Pb) och krom (Cr).

Samtliga dessa utom de fem sista förekommer i samma utsträckning i slaggrus som i litosfären eller jordskorpan. De fem undantagna ämnena finns vanligtvis i högre halter i slaggrus. Osaken är att de utgör huvudkomponenter i tillverkade produkter. (Chandler et al., op. cit.)

Bland spårämnena brukar molybden (Mo), kadmium, silver (Ag) och kvicksilver finnas i förhöjda halter.

Observera att det förekommer skillnader i halter både mellan länder, inom länder samt inom en och samma anläggning. Det ges ingen förklaring till detta av Chandler et al. (op. cit.), men både sopsortering och förbränningsutrustning borde ha betydelse.

### Huvudbeståndsdelar i svenskt slaggrus (totalhalt)

Svenskt slaggrus har analyserats av Statens geotekniska institut, SGI, med avseende på metall- och saltinnehåll i olika projekt. Det senaste projektet som omfattar slaggrus från fyra olika förbränningsanläggningar anger att kisel, järn, kal-

cium och aluminium är de huvudsakliga beståndsdelarna medan koppar, bly och zink är de dominerande spårämnen (Fällman et al., 1999). Totalhalterna för de senare är i storleksordningen 0,1–1% av slaggmängden.

Enligt samma undersökning var variationen stor både mellan anläggningar och mellan olika provtagningsomgångar (årstider).

## 15.8.2 Lakningsegenskaper i laboratorium

I följande två delavschnitt redovisas resultaten från SGI:s lakförsök på fyra svenska slaggrusmaterial (Fällman et al., 1999).

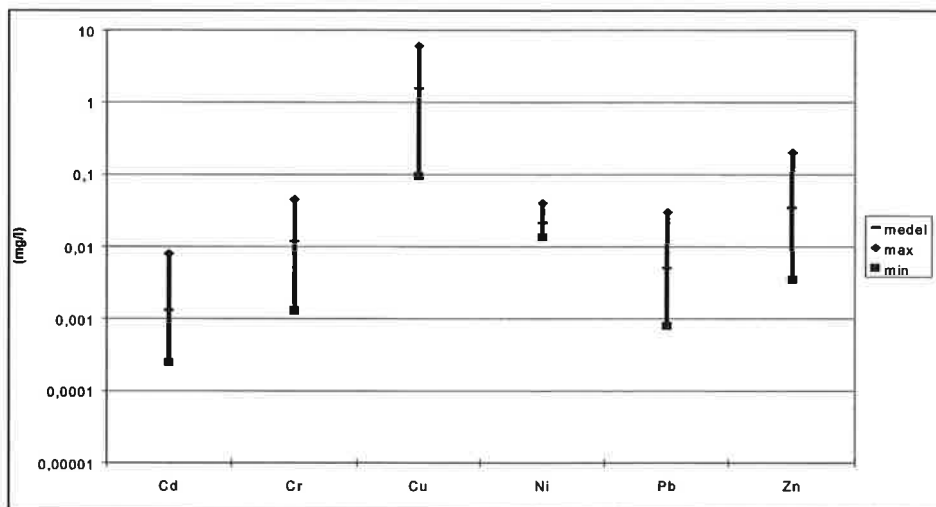
### Utlakbara tungmetaller och spårämnen (tillgänglig mängd)

Enligt Fällman et al. (op. cit.) är det främst zink, koppar och kadmium som är potentiellt lakbara av spårämnen, dvs. de lakade ut i stora mängder vid tillgänglighetstest enligt NT ENVIR 003. Vid oxiderande förhållande ökade den potentiellt lakbara mängden krom markant.

### Utlakning av tungmetaller och spårämnen vid tvåstegs kontrolltest

Vid tvåstegs kontrolltest enligt prEN 12457 part 3 blev resultatet att sulfat och klorid utgjorde de största utlakade mängderna. Den största utlakningen av spårämnen utgjordes av koppar med mängder runt 2–9 mg/kg (figur 15-27). Utlakningen av zink och bly var låg i förhållande till den tillgängliga mängden. Det innebär en långsam utlakningsprocess. (Fällman et al., op. cit.).

I figur 15-27 redovisas halter av spårämnen i lakvatten från CEN-lakningen. Där syns också att spridningen är stor mellan olika prov, vilket är ett tecken på att materialet är inhomogent.



**Figur 15-27** Halter av spårämnen i lakvatten från slaggrus, skakförsök vid  $L/S=2$ . 16–32 st prov, värden under detektionsgränsen har inte tagits med (Andersson et al., 1999)

## Lakförsök på uppgrävt material

På provvägen i Linköping som beskrivits tidigare (bl. a. avsnitt 15.2.3 och 15.4) utfördes en uppföljande undersökning hösten 1998. Anderson et al. (1999) beskriver undersökningen som bland annat omfattade lakförsök på uppgrävt material. Material grävdes upp dels från mitten av vägkroppen, dels från vägslänten och lakförsök utfördes enligt prEN 12457 part 3.

Enligt författarna är det svårt att dra några generella slutsatser av resultaten eftersom materialproven endast utgör stickprov. Följande kunde emellertid noteras. Huvudelement och salter lakade ut i större mängder från materialet under körbanan än från vägslänten. Spårämnen däremot tenderade att laka ut i större mängder från materialet i vägslänten. Materialen i vägslänten uppvisade också tecken på karbonatisering, dvs. att pH-värdet har påverkats av luftens koldioxid.

Kalcium, magnesium och sulfat lakade ut i större mängd från slaggruset än från referensmaterialet. För flertalet av de utlakade spårämnena, till exempel kadmium, krom, nickel och zink, är inte skillnaderna så stora mellan de båda materialen. Utlakningen av koppar är högst från slaggruset samt från referensmaterialet i vägslänten medan den högsta utlakade blymängden noterades för referensmaterialet som låg i vägslänten. (Andersson et al., 1999).

Den större mängden spårämnen från materialet i vägslänten torde kunna förklaras med påverkan från trafiken.

### 15.8.3 Lakningsegenskaper i fält

#### Lakvattenuppsamling

Slaggrus lakningsegenskaper i fält har undersökts vid några få fall i Sverige. Inom ett projekt kallat "Slagganvändning – teknik och miljö" anlades två provvägar med slaggrus i förstärkningslagret, en i Linköping och en i Malmö (Kullberg, 1990). I båda fallen arrangerades lakvattenuppsamling från slaggrussträckorna och tillhörande referenssträckor med naturmaterial. Lakvattnet analyserades med avseende på innehåll av tungmetaller och spårämnen. Eftersom inget vatten erhöles från de partier som var täckta med beläggning kunde endast lakvattenanalyser från slänterna redovisas.

Resultatet blev att lakvattnet från slaggrussträckorna innehöll metaller i samma storleksordning som lakvattnet från referenssträckorna. Vidare var transporten av metaller och salter i dagvattnet av samma storleksordning som utlakningen från slaggruslänterna. Detta förklaras av lakning från olika typer av slitageprodukter t.ex. från fordon, jord- och skogsbruk och allmän stadsbebyggelse. Salterna kan i Linköpingsfallet komma från vägsalt. (Kullberg, op. cit.).

På provvägen i Linköping gjordes ett försök till uppföljande lakvattenuppsamling hösten 1998, som tyvärr misslyckades (Andersson et al., 1999). Det berodde bland annat på inläckage och översvämning i brunnarna, vilket för övrigt utgjorde ett problem även när uppsamlingsarrangemangen var nya (Kullberg, op. cit.).

## 15.8.4 Jämförelser med bakgrundshalter

Även när det gäller bakgrundshalter refereras här till ovan nämnda provvägar i Linköping och Malmö (Lundgren & Hartlén, 1991). Från provvägen i Malmö drar man följande slutsatser. Det viktigaste användningsområdet för slaggrus bör vara inom tätbebyggda områden. Där är omsättningen av metaller redan påverkad av en mängd föroreningskällor, inte minst från de ytliga lagren av jord och fyllning. Därför kommer sannolikt inte tillskotten av metaller från fyllningar med slaggrus att medföra någon negativ inverkan.

Man jämför också utlakningen av klorid från slaggrusfyllningar med spridningen av vintervägsalt och konstaterar att mängden vintervägsalt per löpmeter väg är mer än tio gånger högre än vad som kan beräknas laka ut från motsvarande sträcka med slaggrusfyllning.

Lundgren & Hartlén (op. cit.) beräknar slaggrusfyllningens förhöjning av salt- och metallhalter i mindre, lokala vattendrag (utanför tätortsbebyggelse) till maximalt 10–60% beroende av ämne. Beräkningen baseras på konservativt valda förutsättningar och hänsyn har inte tagits till reduktion av halterna på grund av fastläggning. Man jämför med Naturvårdsverkets anvisningar, där förhöjningar upp till 50% anges generellt resultera i ”ingen eller obetydlig påverkan” i naturmark. ”Betydlig påverkan” bedöms erhållas vid förhöjningar mellan 50 och 200%.

## 15.9 Sammanfattning – slaggrus

Slaggrus är sorterad och lagrad bottenaska från avfallsförbränning. Därför påverkas slaggrusets egenskaper både av avfallet och förbränningsprocessen. Även sortering och lagring av bottenaskan har stor betydelse. *Avfallet* påverkar slaggrusets homogenitet och innehåll av miljöbelastande ämnen. Viktiga del-faktorer är avfallets kemiska sammansättning, tillgänglighet eller fördelning av olika ämnen samt kornstorlek och homogenitet. *Förbränningsprocessen* påverkar slaggrusets kemiska sammansättning, organiska innehåll, kornstorlek och vatteninnehåll. Viktiga faktorer är ugnstyp och utformning av ugnen, inmatningshastighet för bränslet, lufttillförsel, lufttemperatur och ugnsgallrets rörelse-hastighet samt släckningen. *Sorteringen/siktningen* påverkar slaggrusets kornstorlek. *Sorteringen* påverkar tillsammans med *lagringen* slaggrusets styvhet och bärförmåga samt lakningsegenskaper.

### Deformationsegenskaper och hållfasthetstillväxt

Enligt laboratorieförsök har slaggrus initialt samma *styvhet* som sand och troligtvis samma styvhet som grus vid små belastningar. Den ökar något vid belastning och är ungefär lika lastberoende som den är för sand. Styvhet uttryckt som resilientmodul från treaxialförsök varierar mellan 45 och 140 MPa för undersökta material beroende på lastförhållanden, anläggning och tidsperiod. Styvhe-

ten varierar signifikant mellan anläggningar och tidsperioder, men variationen är inte större än den är för undersökta naturmaterial.

*Bärförmågan* är bättre än för sand. Om maximalt 2% deformation tillåts, blir bärförmågan mellan 70 och 100 kPa för samtliga undersökta slaggrus.

Enligt fältförsök har slaggrus, som enligt definition har kornstorleken 0–50 mm, naturligt nog initialt sämre styvhet än ett naturmaterial med kornstorlek 0–200 mm uttryckt som *lagermodul* från fallviktsmätning. Statisk plattbelastning efter ett halvår visade likvärdiga lagermoduler för slaggrus och ett naturmaterial med kornstorlek 0–100 mm.

Deformationsegenskaperna påverkas mycket av den *organiska halten*. Hög halt oförbränt material försämrar. En sänkning av den organiska halten från 9 till 4% (bestämd med glödning vid 550°C) kan ge en fördubbling av styvheten.

Slaggrus *styvhet ökar* med tiden enligt fältmätningar på slaggrus från 1980-talet. Styvheten uttryckt som lagermodul från fallviktsmätningar hade fördubbats efter ca ett år, vilket gjorde att den initiala skillnaden gentemot naturmaterial hade försvunnit. Motsvarande ökning har inte noterats ännu på material från senare års förbränning.

### Beständighet mot mekanisk påverkan och klimatpåverkan (temperaturväxlingar)

Vid provning med standardiserade laboriemetoder får slaggrus sämre beständighetsvärden i form av större finmaterialbildning och större sönderfall än godkänd naturballast. När det gäller *mekanisk påverkan* kan Los Angeles-tal för slaggrus variera mellan 10 och 90% med typiska värden kring 40–55%. Exempel på micro-Devalvärde är 26. Tung instampning vid bestämning av packningsegenskaper ger betydande nedkrossning.

Ett försök att påvisa nedkrossning i fält genom att gräva upp gammalt slaggrus gav svårtolkade resultat, eftersom själva grävningen av det med tiden delvis bundna lagret kan ha lett till nedbrytning.

Ett resultat från *frys-töprovning* med vatten är 4% sönderfall.

### Permeabilitet

Slaggrus har ganska låg permeabilitet i packat tillstånd. Den är av samma storleksordning som i grusig morän med värden mellan  $10^{-7}$  och  $10^{-5}$  m/s beroende på anläggning. Dessa värden är till och med låga för ett välgraderat material vilket kan bero på att finmaterial sätter igen hålrummen.

### Tjällyftningsbenägenhet

Slaggrus är inte tjällyftande vid *frysförsök* i laboratorium.

*Vattenabsorption* är en egenskap som har anknytning till tjällyftningsbenägenheten. Slaggrus är ett mycket poröst material och har enligt litteraturen högre absorptionsvärden än de flesta naturmaterial. 14% absorption har uppmätts för kornstorlek 0–4,75 mm (ett material) och 4–6% för grövre material (två värden). Provningsmetoden ifrågasätts dock.

## Värmekonduktivitet

Slaggrus har mindre värmekonduktivitet än naturballast. I torrt tillstånd är värmekonduktiviteten hälften så stor som för grus och i vått tillstånd är den mycket mindre. Exempel på  $\lambda$ -tal är 0,2–0,5 W/(m·°C).

Sträckor med slaggrus i förstärkningslagret, beläget ca 25 cm under vägytan, har betydligt mindre tjäldjup än sträckor med naturgrus i förstärkningslagret.

Den låga värmekonduktiviteten kan ge fördelar i form av tjälisolering. Den gör också att materialet enligt nuvarande svenska regler måste placeras minst 25 cm från vägytan för att inte ge frosthalka. Detta utgör ingen begränsning för användningen eftersom andra egenskaper såsom bärförmågan och beständigheten gör att slaggrus ändå måste placeras på detta djup.

## Miljöpåverkan

*Huvudbeståndsdelarna* i slaggrus utgörs av kisel, järn, kalcium och aluminium. Ämnena anges i storleksordning med det största först. Dessa och andra ämnen förekommer i samma utsträckning i slaggrus som i litosfären eller jordskorpan. Klor, zink, koppar, bly och krom finns ofta i högre halter i slaggrus eftersom de utgör huvudkomponenter i tillverkade produkter som så småningom blir avfall. Totalhalterna för zink, koppar, bly och krom är i svenskt slaggrus av storleksordningen 0,1–1% av slaggmängden. Det är stor variation mellan olika anläggningar och mellan olika årstider.

Lakningsförsök i laboratorium visar att det är främst zink, koppar och kadmium som är *potentiellt lakbara spårämnen*. Vid oxiderande förhållanden ökar den potentiellt lakbara halten krom. Det är också dessa ämnen tillsammans med bly som skiljer mest vid en jämförelse med potentiellt lakbara ämnen från ett naturmaterial såsom granit.

Vid lakningsförsök som tar hänsyn till vattentillgång och därigenom beaktar tidsaspekten lakar zink och bly ut i mycket små mängder, dvs. ett långsamt lakningsförlopp. Sulfat och klorid som är lättlösliga joner lakar ut snabbt.

Vid lakvatteninsamling i fält innehöll lakvattnet från en slaggrussträcka och en bergkrossträcka ungefär samma mängd metaller. Vidare var transporten av metaller och salter i dagvattnet av samma storleksordning som utlakningen från slaggruslämnarna. Fältförsöket gjordes i Malmö i slutet på 1980-talet.

## Användning

Det uppstår årligen ca 400 000 ton bottenaska i Sverige som efter sortering och lagring till slaggrus skulle kunna användas som ersättning för naturmaterial i olika tillämpningar. Förbränningsanläggningarna är spridda över landet, men de fem största ligger naturligt nog i anslutning till storstadsområdena.

Enligt nuvarande regler kan inget slaggrus användas som vägbyggnadsmaterial om inte halten organiskt material ligger under 2% mätt med kolorimetermetoden! Bottenaska från förbränning av farligt avfall kan inte heller användas till slaggrus.

De vägtekkniska egenskaperna gör att slaggrus kan läggas 25–35 cm under vägytan beroende på beläggningstyp och beläggningstjocklek. Samma styvhet som för sand kan förväntas. Enligt nuvarande VÄG 94 kan slaggrus användas som fyllnadsmaterial (materialtyp 2) och skyddslager. Materialtyp 2 innebär ett bra fyllnadsmaterial liknande grus och sand. Eventuellt kan slaggrus också användas som förstärkningslager. Det beror på hanteringen av materialet samt beläggningstjockleken i konstruktionen.

De miljötekkniska egenskaperna gör att speciella åtgärder krävs. Eftersom slaggrusets innehåll och lakningsegenskaper varierar bör materialet kvalitetssäkras med en serie provningar som karakteriserar det aktuella slaggruspartiet. Fällman et al. (1999) anger ett förslag till vilka provningar som bör ingå i en sådan kvalitetssäkring. Dessa är bestämning av kornstorleksfördelning och totalt organiskt innehåll samt tillgänglighetstest enligt (NT ENVIR 003) och tvåstegs kontrolltest enligt (NT ENVIR 005). Resultatet bildar underlag för ett godkännande där de kriterier som ska gälla för godkänt material varierar med användningsområdet. Eftersom generella gränsvärden saknas ännu är det respektive tillsynsmyndighet som avgör användningsmöjligheten.



## 16 Krossad betong

- 16.1 Faktorer som påverkar den krossade betongens egenskaper 181
- 16.2 Deformation vid belastning 188
- 16.3 Hållfasthetstillväxt 198
- 16.4 Beständighet 214
- 16.5 Vattenabsorption och permeabilitet 220
- 16.6 Tjällyftningsbenägenhet 221
- 16.7 Värmekonduktivitet 2223
- 16.8 Miljöpåverkan 224
- 16.9 Sammanfattning – krossad betong 236

Den betong som är aktuell för krossning och användning som obundet vägmaterial uppkommer antingen vid rivning av en betongkonstruktion eller som restmaterial vid produktion av betong och betongvaror. Man kan därför tala om rivningsbetong eller restbetong.

Många faktorer påverkar vilka egenskaper betongen får i krossat tillstånd. Några av de viktigaste behandlas i avsnitt 16.1. I övriga avsnitt beskrivs krossad betongs egenskaper i form av resultat från svenska och utländska undersökningar. En del av de svenska resultaten har analyserats särskilt inom detta projekt (avsnitt 16.2, 16.3 och 16.4).

### 16.1 Faktorer som påverkar den krossade betongens egenskaper

Betongens ursprung har betydelse för de egenskaper betongen får i krossat tillstånd. Det är både själva *materialet* och *användningsområdet för den ursprungliga konstruktionen* som har betydelse. Materialet påverkar t.ex. genom ballastens och cementpastans kvalitet liksom vidhäftningen dem emellan. Även betongens åldrande har betydelse. Ursprungligt användningsområde påverkar genom olika karboniseringsgrad, olika föroreningar samt eventuellt saltangrepp på betongen. Dessutom har hanteringen av betongen, t.ex. *krossning och rensning* stor betydelse för vilka de slutliga egenskaperna blir.

#### 16.1.1 Ursprunglig betong

*Ballasten* i den ursprungliga betongen bestämmer i hög grad den krossade betongens egenskaper. Däremot påverkar inte ursprungsbetongens styrka vilka egenskaper den krossade betongen får. Detta hävdar Kaga et al. (1988) och grundar sig på undersökningar av tre betongmaterial med vattencementtal, vct, varierande mellan 0,45 och 0,68. Betongen krossades till maximal kornstorlek 25 mm och bestämning av crushing value, soundness (med kaliumsulfat) och nedbrytning med Los Angeles-trumma gjordes. Vid höga tryckpåkänningar bröts cementpastan sönder, medan det var svårt att bryta sönder det ursprungliga

stenmaterialet. I Los Angeles-testet påverkades de stora partiklarna mest. En förbättring uppnåddes när ballasten "rördes om" före användning eftersom cementpastan därvid nöttes bort.

Eftersom den krossade betongen består av en blandning av ballast och korn av krossad cementpasta påverkas hållfasthetsegenskaperna av om ursprunget är *vägbetong* eller *husbyggnadsbetong* anser Bauchard (1988). Hållfasthetsegenskaperna uttrycks i dennes undersökning som Los Angeles-tal och micro-Devalvärde. Kawamura & Torii (1988) konstaterar samma sak och hävdar att krossad vägbetong får bättre fysikaliska egenskaper än krossad husbyggnadsbetong. De egenskaper som undersökts hos tre betongmaterial är absorptionskapacitet, abrasion loss, crushing value och finess modulus. Bedömningen "bättre" innebär här "lämpligare som betongballast" men resultaten är intressanta även vid användning som vägballast. Crushing value var t.ex. högre för de två vägbetongmaterialen än för husbetongen. Det är också intressant att notera att betongen med högst ursprunglig hållfasthet hade störst abrasion loss. En orsak till att krossad husbyggnadsbetong och vägbetong får olika egenskaper kan vara att husbyggnadsbetongen innehåller mer främmande material från rivningen, men i Kawamuuras & Toriis undersökning verkar det bara handla om det rena stenmaterialets egenskaper. Orsaken kan då vara att vägbetongen har högre kvalitet.

Ydrevik et al. (1996) menar att *cylindertryckhållfastheten* hos utborrade provkroppar av betongen före rivning kan ge en grov uppskattning av materialets användbarhet i krossad form. Det är däremot inte så enkelt att högst tryckhållfasthet ger styvast och stabilast krossat material. Slutsatsen bygger på beständighetsprovningar samt belastningsförsök i laboratorium med hjälp av dynamisk treaxialprovning av tre material med olika tryckhållfasthet hos ursprungsbetongen. Betong med tryckhållfasthet 7, 30 respektive 73 MPa krossades i laboratoriekäftkross och undersöktes. Resultaten visade att materialet med tryckhållfasthet 7 MPa hade sämst styvhet, stabilitet och kulkvarnsvärde. Materialet med tryckhållfasthet 30 MPa hade bäst styvhet och stabilitet, medan 73 MPa-betongen hade bäst kulkvarnsvärde. Av beständighetsprovningarna drar man slutsatsen att det förmodligen krävs tryckhållfasthet 70 MPa och däröver för att få ett kulkvarnsvärde under 30.

Författarna förklarar bristen på tydligt samband mellan tryckhållfasthet och styvhet med att tryckhållfastheten i huvudsak styrs av cementpastans kvalitet medan styvheten styrs även av ballasten och vidhäftning mellan pasta och ballast. Detta får betydelse i och med att krossad betong är ett heterogent material. Det består av dels ren sten, dels sten + cementpasta, dels enbart cementpasta.

Det är därför intressant att studera sammansättningen av de undersökta materialen för att ytterligare förklara resultaten. I tabell 16-1 är uppgifter från Ydrevik et al. (op. cit.) sammanställda.

**Tabell 16-1** Jämförelse mellan krossade betongmaterial med olika tryckhållfasthet hos ursprungsbetongen (efter Ydrevik et al., 1996)

Tryckhållfasthet (MPa)	Cementpasta: andel (%) och kvalitet	Andel cement + ballast (%)	Andel ballast (%)	Typ av ballast	Styvhet treax 400/120 (MPa)	Kulkvarnsvärde (%)
7	12 porig	51	37	okrossad natursten	320	52,2
30	17 tät	61	22	krossad natursten	480	36,6
73	13 mycket tät	74	13	krossad natursten	380	25,8

Av tabellen följer att cementpastans kvalitet verkar styra kulkvarnsvärdet. En rangordning efter nötningsbeständighet följer rangordningen i cementpastans kvalitet enligt okulär besiktning. Ju tätare cementpasta desto större nötningsbeständighet, dvs. krossprodukten av en höghållfast betong borde ge bäst nötningsbeständighet. Detta resultat överensstämmer inte med Kawamuuras & Toriis (op. cit.) resultat, där högst ursprunglig hållfasthet gav störst abrasion loss.

Ballasttypen har vid undersökning av naturliga obundna material visat sig ha betydelse för styvhet och stabilitet (Arm, 2000f). Till exempel ger okrossad ballast sämre värden än krossad ballast och kubiska partiklar ger sämre värden än "relativt" flisiga partiklar (flisighetstal 1,4). Detta gäller även för materialen i tabell 16-1 enligt följande resonemang. Det är troligt att samtliga ursprungliga betongmaterial har tillverkats med okrossad ballast men vid laboratoriekrossningen av betongstyckena har ballasten blivit krossad i två av fallen. Detta kan bero på att cementpastan är hårdare än ballasten i dessa fall. Betonghandbok (1997) anger att med höjd tryckhållfasthet följer ökad sprödhet. Vidare brukar eventuella brott i s.k. högpresterande betong gå genom ballastkornen till skillnad från i normalbetong, där brottet huvudsakligen går i fasgränsen mellan ballastkornen och cementfasen. Med högpresterande betong avses i detta sammanhang tryckhållfastheter över ca 80 MPa, dvs. egentligen högre än vad som angivits för de här undersökta materialen.

Slutsatsen blir att styvhetsskillnaderna i tabell 16-1 kan förklaras med att 30 MPa-materialet har en högre andel ren sten än 70 MPa-materialet, vilket är en fördel när ballasten är krossad. För 7 MPa-materialet däremot är den höga andelen ren sten en nackdel, eftersom partiklarna är okrossade.

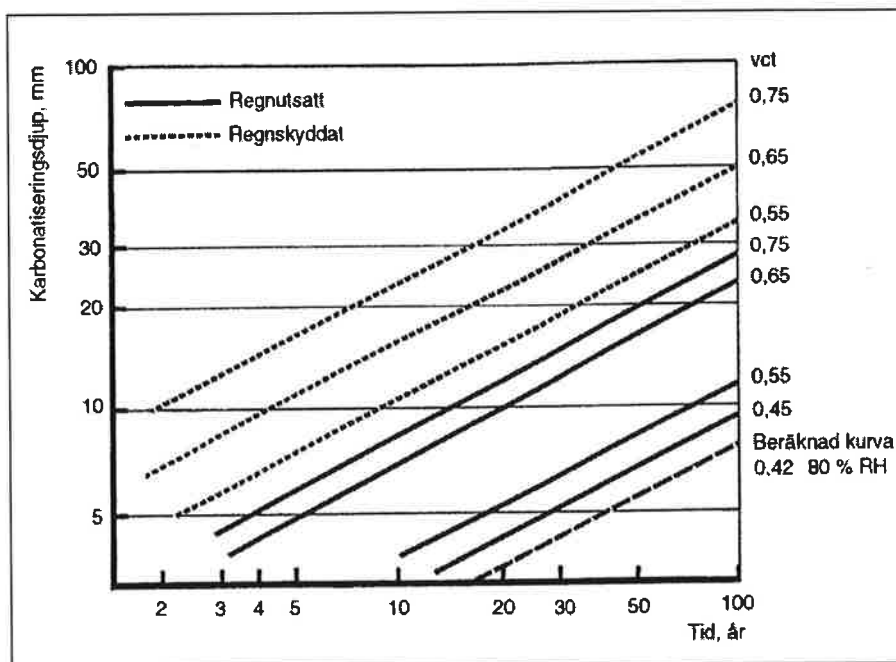
## 16.1.2 Ursprungsmiljö

Den krossade betongens ursprung har betydelse för de *miljöpåverkande* egenskaperna. Om betongen härstammar från en riven byggnad har byggnadens ålder och användningsområde en tydlig inverkan på mängden skadliga ämnen. Till exempel kan kadmium förekomma i plastrester i rivningsbetong. Det beror på att kadmium användes som stabilisering och färgpigment i PVC-plast under 1960- och 1970-talen. Ett annat exempel är användningen av PCB-haltiga tätningemedel för väggelement av betong. Vidare tyder analyser på betong från gara-

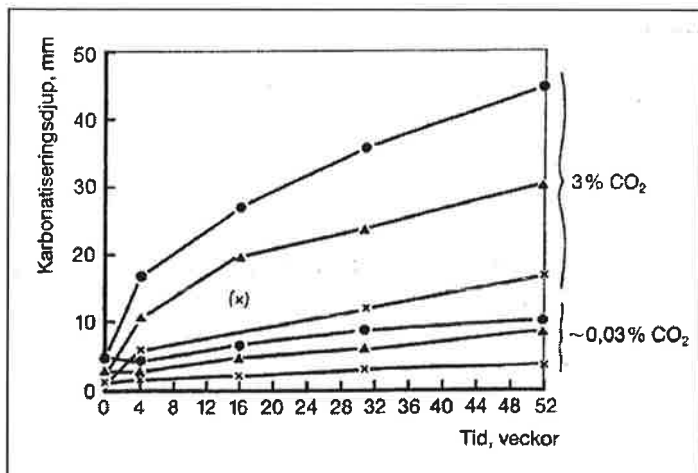
ge/parkeringshus, broar och industribyggnader på att bly, zink och alifatiska kolväten finns i ytskiktet, dock bara på några mm djup (Molin et al., 1996). I ytskiktet på vägbroars översida finns ofta klorider. Oljor däremot tränger in djupt i betonggolven på garage och vissa industribyggnader.

Ursprungsmiljön påverkar också betongens *karbonatiseringsgrad*. Vid karbonatiseringen tränger koldioxid från luften in i betongen och reagerar med hydroxyljonerna så att karbonat bildas. Detta sker även i ett lager med krossad betong. Karbonatbildningen i det krossade betongmaterialet resulterar i en ökad styvhet med tiden (jämför avsnitt 5.1). För att betongen ska karbonatiseras snabbt i sitt krossade tillstånd i vägen bör den inte ha karbonatiserats i någon större omfattning tidigare, varken när den ingick i en betongkonstruktion eller låg som krossat material i upplag. I den ursprungliga betongkonstruktionen har karbonatiseringen fördröjts om betongen

- är tät,
- har hög halt av karbonatiserbar kalk,
- har lågt vattencementtal,
- har vattenhärdats,
- har försetts med någon typ av ytskydd eller
- har varit utsatt för fuktig miljö och omgivning med låg koldioxidhalt (figur 16-1 och 16-2).



Figur 16-1 Övre gräns för uppmätta medelkarbonatiseringsdjup i portlandcementbetong (Tuutti 1982, citerad efter Betonghandbok 1997)



**Figur 16-2** Uppmätta karbonatiseringsdjup för betong som härdat på olika sätt. ● = luft, ▲ = folie under 5 dygn därefter luft, x = vatten under 5 dygn därefter luft. (Andersson & Petersson 1987, citerade efter Betonghandbok 1997)

Utomhuskonstruktioner har därför ofta litet karbonatiseringsdjup. Inträngningsdjupet ligger oftast mellan några mm och några cm. Inomhus och särskilt i betong med högt vattencementtal (högre än 0,7–0,8) är djupet flera gånger större (Molin et al., op. cit.). Karbonatiseringsbromsande ytskydd används i första hand på betong utomhus i miljö med växlande fuktbelastningar, t.ex. husfasader, bropelare och silor, men även inomhus om hög luftfuktighet kan förväntas (Betonghandbok, 1997). Generellt sett har karbonatiseringshastigheten i betongkonstruktioner ökat de senaste åren (Bjurulf 1993, citerad efter Betonghandbok 1997).

Av ovanstående kan man dra slutsatsen, att karbonatiseringen av det krossade betongmaterialet fördröjs om det lagras i fuktig miljö och i en omgivning med låg koldioxidhalt.

### 16.1.3 Renhet

Flera undersökningar visar att hög renhet i det krossade betongmaterialet är en förutsättning för att goda egenskaper ska erhållas. Kalisch (1998) visade med ett omfattande fältförsök att rivningsmaterial med en stor andel svaga material (lättbetong, gips och puts) var olämpligt som obundet bärlager. Materialet blev tjälfarligt på grund av *nedkrossning* under packningsarbetet. Försöket gjordes på provytor som byggdes upp med obundet bärlager av olika återvunna material och provningar genomfördes under tre olika förhållanden eller faser. Konstruktionerna var 3 m tjocka med 160 mm bundet lager och 250 mm bärlager på 1 250 mm grus samt 1 140 mm silt. Underst lades 200 mm filtergrus.

Åtta material undersöktes. Två typer av vägbetongkross med ca 70 respektive 95% betong, två typer av blandat rivningsmaterial med liten respektive stor an-

del svaga partiklar samt två typer av asfaltkross med ca 40 respektive 70% asfalt. Gråvacka och basalt utgjorde referensmaterial. De olika materialsammansättningar framgår av tabell 16-2.

**Tabell 16-2** *Materialsammansättning hos undersökta bärlager, angiven i viktprocent (efter Kalisch, 1998)*

Betong 70	Betong 95	Rivningsmaterial I	Rivningsmaterial II
71,5 betongkross 26,5 grus 1,5 asfalt 0,5 tegel	98 betongkross 2 grus	47 tegel, murverk 46 betong 4 grus 1,5 slagg 1 asfalt 0,5 bergkross	46 betong, lättbetong 42,5 tegel, murverk, gips, puts 5,5 grus 4,0 slagg 1,0 asfalt 0,5 trä, plast, glas, metall 0,5 bergkross

Gråvacka (ref)	Basalt (ref)	Asfalt 40	Asfalt 70
		42,5 asfalt 31,5 betong 10,5 grus 5,5 tegel, murverk 5 bergkross 4,5 slagg 0,5 trä, plast	73 asfalt 9 betong 8 tegel, murverk 4 grus 3,5 slagg 2,5 bergkross

Provytorna instrumenterades och mätningar utfördes dels på nypackad konstruktion, dels på konstruktion som belastats med 6,2 miljoner belastningar, dels på konstruktion som belastats i tjällossningstillstånd. De parametrar som mättes var jämnhet i tvär- och längdled samt deflektion från statisk plattbelastning, Benkelmanbalk, fallvikt etc.

Bland observationerna under byggfasen kan nämnas att rivningsmaterial II krossades ned under packningen så att finjordshalten ökade från 1 till över 8%. Dessutom kan nämnas att packningen av asfalt 70 resulterade i större korn på grund av ”hopklumpning”. Efter denna första fas fick samtliga ytor utom den med Asfalt 70 godkända  $E_{v2}$ -värden enligt tyska regler.

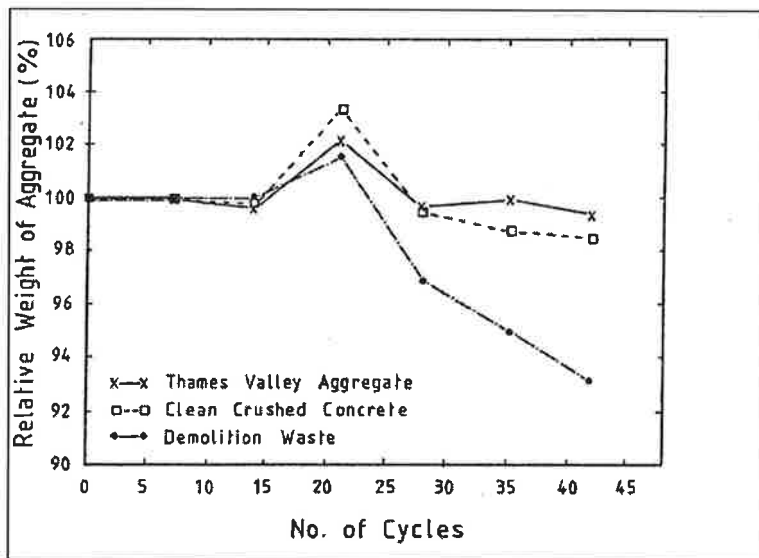
Efter fas två, som innebar simulerad trafikbelastning, uppvisade de båda ytorna med rivningsmaterial högre deflektioner vid fallviktsbelastning än de andra ytorna gjorde.

Fas tre omfattade först höjning av grundvattenytan till fullständig dränkning av bärlagret. Sedan sänktes den till ca 25 cm under underkanten på bärlagret. Därefter utfördes åtta frys-töväxlingar med belastning under upptinningsförloppet. Under denna fas noterades att rivningsmaterialet hade lägre vattenomsläpplighet än de övriga materialen och även högre vattenkvot. Vidare utlöste frys-töväxlingarna en konsolidering av bärlagret med störst uppmätt sättning i rivningsmaterialen. Tjällyftningar förekom på samtliga ytor, dock störst på rivningsmaterialen, 20–25 mm jämfört med 5–8 mm för övriga. Lyftningarna gick tillbaka efter fas tre på alla ytor utom på rivningsmaterialen, vilka

behöll ca 5 mm lyftning. Inga andra ojämnheter eller sprickor noterades på någon yta.

Från försöket drogs slutsatserna, att betong- och asfaltmaterialen kan användas som bärlager i den undersökta konstruktionen, att rivningsmaterial I kan användas om klimatet är mildt och slutligen att rivningsmaterial II inte duger alls som bärlager i denna konstruktion.

Även Mulheron & O'Mahony (1988) har visat hur beständigheten försämras när orenheterna ökar. Av figur 16-3 framgår att blandad rivningsbetong har sämre *frostbeständighet* än "ren" betong har vid upprepad frys-tövaxling med fri vattentillgång.



**Figur 16-3** Nedbrytning uttryckt som den relativa vikten material >2,5 mm efter olika antal frys-tövaxlingar. (Ökningen efter 21 cykler kommenteras ej). (Mulheron & O'Mahony, 1988)

Ett svenskt försök med förstärkningslager av krossade betongsliprar visade att kvarbliven vajerarmering försämrar styvheten (Ydrevik, 1999a+b).

Renheten har också stor inverkan på de *miljöpåverkande* egenskaperna. I dåligt rensat rivningsmaterial förekommer flera skadliga ämnen, vilka inte tillhör själva betongen. Dessa kan t.ex. finnas i impregnerat virke, elektronisk utrustning, plast, tätningsmaterial, asbest, fluorescerande lampor, gipsmaterial och järnhaltigt material (Wahlström et al., 2000).

Även om ren betong, t.ex. kasserade betongelement, är idealisk för återvinning kommer den betongtypen att utgöra en liten andel för återvinning i Sverige. Antalet gamla betongvägar är också litet och därför kommer troligen den största andelen återvinningsbetong i Sverige att härstamma från rivning av byggnader. Motsvarande andel för Finland antas vara 60–80% enligt Kivekäs (1997). De svenska undersökningar, som redovisas i de följande avsnitten, behandlar därför främst rivningsbetong från byggnader.

## 16.2 Deformation vid belastning

Här redovisas resultat från svenska och utländska undersökningar på krossad betong i laboratorium och fält, dels statiska belastningsförsök, dels dynamiska provningar. Resultaten jämförs också med motsvarande för naturmaterial.

### 16.2.1 Deformation vid statisk belastning

#### Laboratorieresultat

Bestämningar av CBR-värde, California Bearing Ratio, har gjorts på krossad betong i Danmark, Finland och Nederländerna.

Koch (1996) undersökte tre rena betongmaterial och rapporterade CBR-värden mellan 30 och 100% beroende på vatteninnehåll. FINNRA (2000) anger intervallet 90–140% som CBR-värde för krossad betong i allmänhet.

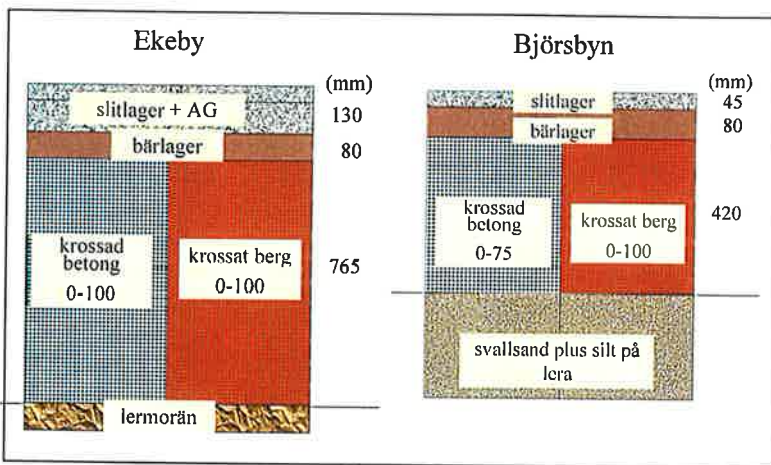
I Nederländerna anges två CBR-värden för krossad betong, 75% för fraktionen 0–4 mm och 95–112% för fraktionen 0–22,4 mm (CROW, 1999). Värdena gäller material med en viss renhet, t.ex. ska betongandelen vara minst 80% och föroreningar såsom plast, gips etc. ska vara högst 1% samt organiskt material högst 0,1%. Samma källa anger också CBR-värde för rivningsmaterial med ca hälften betong och hälften övrigt stenmaterial. Ett sådant material får lägre CBR-värde än den ”rena” betongen, nämligen 50–80%.

I Sverige används normalt inte CBR-metoden för bedömning av ballastmaterials deformationsegenskaper. Däremot har metoden använts i samband med olika forskningsprojekt för att kunna jämföra svenska och utländska provningsresultat. På uppdrag av Chalmers har VTI bestämt CBR-värdet för krossad betong med kornstorlek 0–19 mm och vattenkvot 11% (Svensson, 1999a). Resultatet blev 135% enligt metod ASTM D1883 utan överlast och föregående vattenmättnad. En annan betong som utsatts för medveten karbonatisering genom lagring i kolsyra fick CBR-värde 155% vid vattenkvoten 10%.

#### Fältresultat

Statisk plattbelastning har gjorts på lager av krossad betong i ett par svenska provvägar (Grönholm, 1999a). Uppbyggnaden av de aktuella konstruktionerna illustreras i figur 16-4.





**Figur 16-4** Konstruktioner med krossad betong där statisk plattbelastning har utförts (Ydrevik, personlig kommunikation)

Vid mätning på förstärkningslagret i Ekeby blev resultatet att sträckan med betong i förstärkningslagret hade *initialt* något lägre styvhet, uttryckt som  $E_{v2}$ -värden och bärlighetskvoter, än referenssträckan. Samma resultat erhöles vid mätning på bärlagret. I båda fallen uppfylldes VÄG 94:s krav på  $E_{v2}$  och bärlighetskvot.

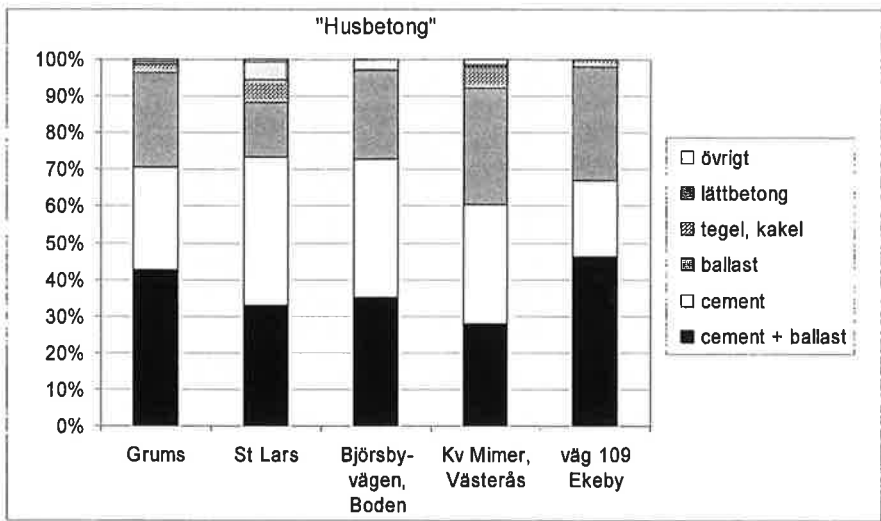
I Björnsbyn gjordes bara statisk plattbelastning på bärlagret. Där fick sträckan med betong i förstärkningslagret klart högre värden än referenssträckan. Möjligt kan det bero på att mätningen inte gjordes direkt efter packningen. Det finns inga uppgifter om mättidpunkten, men den fallviktsmätning som också utfördes på obelagda ytor gjordes ungefär en månad efter utläggningen. Ingen av Björnsby-sträckorna uppfyllde VÄG 94:s krav på  $E_{v2}$  eller bärlighetskvot, men kraven var inte heller tillämpliga i detta fall eftersom vägen var ett förstärkningsobjekt.

## 16.2.2 Deformation vid dynamisk belastning i laboratorium

VTI har i flera projekt undersökt hur krossad betong deformeras under dynamisk last (Johansson et al. 1996, Ydrevik et al. 1996, Ydrevik 1999a–d). Undersökningarna har gjorts med hjälp av dynamiska treaxialförsök. Resultat i form av "rådata" från dessa provningar samt övriga laboratorieundersökningar av materialet ligger till grund för text, figurer och tabeller i detta avsnitt 16.2.2.

### Undersökta betongmaterial

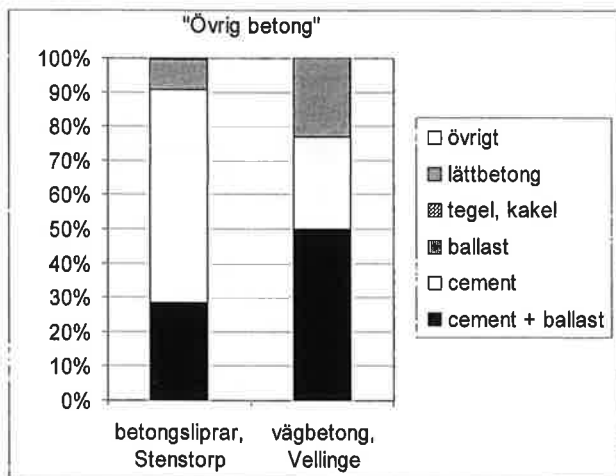
Tio betongmaterial med olika ursprung har undersökts. Begreppet krossad betong används i dessa undersökningar i stället för bygg- och rivningsavfall eftersom innehållsanalyser visar att det undersökta materialet är mycket rent (figur 16-5).



**Figur 16-5** Innehållsanalys av studerade material. Andel i viktprocent. Krossad betong från fem olika rivningsobjekt.

Samtliga material i figuren kommer från rivna byggnader. Observera att inget av materialen innehåller mer än ca 11% "föroreningar", dvs. tegel, lättbetong, trä, plast, papper, bitumen etc. Vid krossningen av Ekeby-betongen användes inte bara metallavskiljning med magnet utan också s.k. "vindsiktning" där lätta partiklar som papper och en del plast och träflis blåses bort, varvid en mycket ren betong erhålls.

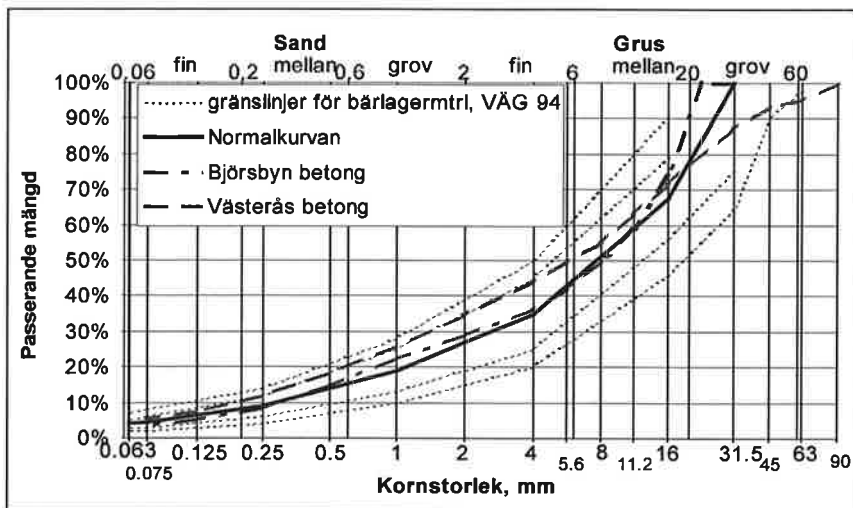
Figur 16-6 visar innehållet i två material med annat ursprung.



**Figur 16-6** Innehållsanalys av studerade material. Andel i viktprocent. Krossad betong från betongsliprar och vägbetong.

Det är en vägbetong samt järnvägssliprar av betong som har krossats. Dessa båda har naturligt nog en mindre andel främmande material än husbetongen.

Alla betongmaterial utom två – Västerås och Björnsbyn – har samma kornstorleksfördelning, nämligen en kurva som ligger mitt emellan de inre gränslinjerna för godkänt bärlagermaterial enligt VÄG 94. Denna kurva kallas här för Normalkurvan (figur 16-7).



Figur 16-7 Kornstorleksfördelning för studerade betongmaterial

Kornstorleksfördelningen för krossad betong går naturligtvis att påverka via krossning och siktningsförfarande, men i VTI:s undersökningar har målet varit att kunna jämföra provningsresultaten med motsvarande för naturliga material som undersökts i andra forskningsprojekt. I dessa har kornstorleksfördelningen enligt Normalkurvan använts.

För att kunna treaxialprova materialen vid jämförbar packningsgrad och vatteninnehåll gjordes först packningsförsök. Optimal vattenkvot bestämdes med tung laboratoriestampning (modifierad proctor) och den varierade mellan 8 och 12% (tabell 16-3). Maximal torrdensitet bestämdes både med tung laboratoriestampning och vibrobord. Den varierade i båda fallen mellan 1,8 och 2,0 t/m<sup>3</sup>.

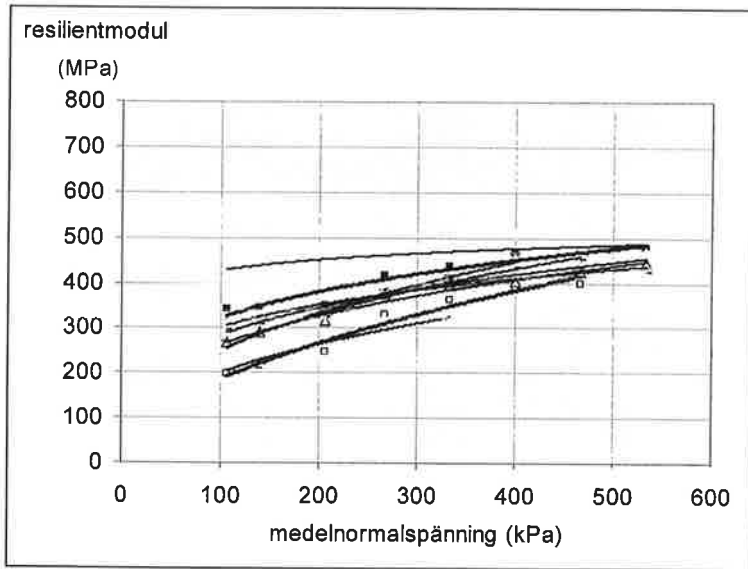
**Tabell 16-3 Packningsegenskaper för studerade betongmaterial**

Material	Max. torrdensitet (Vibrobord) (t/m <sup>3</sup> )	Max. torrdensitet (mod. proctor) (t/m <sup>3</sup> )	Opt. vattenkvot (%)
<b>Husbetong</b>			
S:t Larsskolan	1,77	1,83	12,5
Golv på mark, 7 MPa	1,94		11,2
Vägg/bjälklag, 30 MPa	1,80		13,2
Prefab.-vägg, 73 MPa	1,79		12,5
Kvarteret Mimer, Västerås	1,88	1,89	11,2
Industribyggnad, Grums	1,96	1,96	9,4
Blandat fr SYSAV, Ekeby	1,98	1,98	10,1
Bodenhusen, Björnsbyn	1,72	1,85	12,0
<b>Övrig betong</b>			
Vägbetong, Vellinge	1,77	1,90	7,7
Järnvägssliprar, Stenstorp	1,97	1,96	9,7

I tabellen kan två saker noteras. För det första är densitetsvärdena lägre och de optimala vattenkvoterna högre än för konventionellt bär- och förstärkningslagermaterial. Normalvärden för krossat berg brukar ligga runt 2,3 t/m<sup>3</sup> respektive 6%. För det andra har betongen från Björnsbyn och Vellinge stor skillnad mellan vibrobordsdensitet och proctordensitet. Det tyder på nedkrossningsbenägenhet vid de laster som är aktuella vid inpackning enligt modifierad proctor. Denna laboratoriemetod motsvarar emellertid ett större packningsarbete än vad som används i fält.

### Styvhet bestämd med dynamiska treaxialförsök

För de undersökta materialen varierade *initial* styvhet, angiven som resilientmodul, mellan 200 och 480 MPa beroende på spänning och material (figur 16-8). Alla material provades vid samma vattenkvot och densitet. Vattenkvoten var ca 65% av den optimala och densiteten var ca 96% av maximal torrdensitet.



**Figur 16-8** Resilientmodul för studerade betongmaterial. Resultat från dynamiska treaxialförsök.

Av figuren kan utläsas att vid de spänningsnivåer som är aktuella för ett svenskt förstärkningslager, dvs. medelnormalspänning 100–200 kPa, varierade resilientmodulen mellan 200 och 450 MPa. Bland de tio material som har undersökts utmärker sig tre stycken. Störst styvhet och samtidigt minst spänningsberoende styvhet har husbetongen med tryckhållfasthet 30 MPa. Mindre styvhet än de övriga har husbetongen med tryckhållfasthet 7 MPa samt husbetongen från Bodenhusen. I tabell 16-4 har alla materialen rangordnats efter styvhet vid en vald spänningsnivå.

**Tabell 16-4** Beräknade resilientmoduler för studerade material. Resultat från dynamiska treaxialförsök med medelnormalspänning 140 kPa ( $\sigma_v/\sigma_h = 5$ ).

Rangordnade material	Styvhet (MPa)
Vägg/bjälklag, 30 MPa	424
Blandat fr SYSAV, Ekeby	344
Vägbetong, Vellinge	322
Industribyggnad, Grums	308
Kvarteret Mimer, Västerås	294
Järnvägssliprar, Stenstorp	291
S:t Larsskolan	285
Prefab.-vägg, 73 MPa	283
Golv på mark, 7 MPa	222
Bodenhusen, Björnsbyn	217

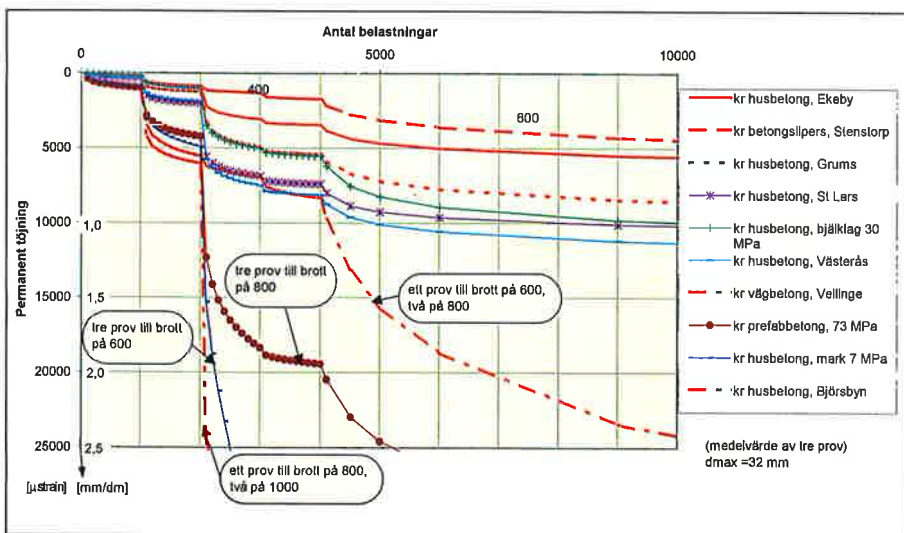
Att husbetongen med tryckhållfasthet 30 MPa är så mycket styvare än de andra materialen kan bero på att denna betong har tät cementpasta och krossade ball-

astkorn (jämför avsnitt 16.1.1). På samma sätt kan den sämre styvheten hos husbetongen med tryckhållfasthet 7 MPa förklaras av cementpastans sämre kvalitet och ballastens rundare kornform.

En orsak till Björnsby-betongens dåliga styvhet kan vara låg densitet. Skrymdensiteten vid treaxialprovningen var för denna betong 1,67 t/m<sup>3</sup>, vilket kan jämföras med medelvärdet 1,79 t/m<sup>3</sup> för samtliga material. En annan orsak är antagligen kornstorleken, som påverkar styvheten så, att ju mindre den största stenen är desto mindre blir styvheten (Arm, 2000f). De största stenarna i Björnsby-betongen var mindre än i de andra materialen, 22 mm i jämförelse med 32 mm.

## Stabilitet och bärförmåga bestämd med dynamiska treaxialförsök

Stabilitet uttryckt som ackumulerad permanent deformation bestämdes också vid de dynamiska treaxialförsöken och den varierade mellan 1 och drygt 7% efter 100 000 belastningar med normalspänningen 330 kPa (spänningskvot = 5). Figur 16-9 visar början av deformationsförloppet.



**Figur 16-9** Detaljbild av deformationsförloppet upp till 10 000 belastningar. Permanent töjning (hoptryckning) vid dynamiska treaxialförsök på studerade betongmaterial. Teckenförklaringen visar rangordningen efter avslutad provning.

Även här avviker husbetongen med låg tryckhållfasthet och rivningsbetongen från Björnsbyn påtagligt.

För naturmaterial har det konstaterats, att stabiliteten påverkas framförallt av kornstorleksfördelningen (formen på kurvan) men också av vattenkvoten (Arm, 2000f). För krossad betong har tydligen även cementpastans kvalitet samt andelen rena ballastkorn betydelse.

Ett materials bärförmåga har tidigare definierats i avsnitt 4.1, som den last ett lager av materialet kan bära utan att deformeras mer än tillåtet. Med den defini-

tionen och med tillåten deformation satt till två procent av lagertjockleken kan resultatet i figuren ovan omsättas till en tabell över bärförmågan hos de undersökta betongmaterialen (tabell 16-5).

*Tabell 16-5* *Bärförmåga för studerade betongmaterial. Beräknat ur resultat från dynamiska treaxialförsök med varierande medelnormalspänning.*

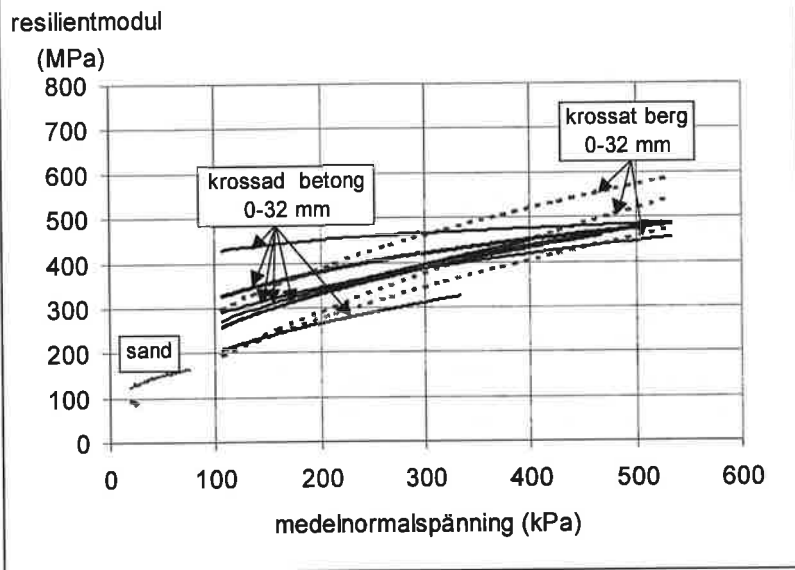
Rangordnade material	Bärförmåga (kPa)
Blandat fr SYSAV, Ekeby	400
Järnvägssliprar, Stenstorp	400
Industribyggnad, Grums	400
S:t Larsskolan	400
Vägg/bjälklag, 30 MPa	400
Kvarteret Mimer, Västerås	400
Vägbetong, Vellinge	200
Prefab.-vägg, 73 MPa	200
Golv på mark, 7 MPa	200
Bodenhusen, Björnsbyn	200

Eftersom trafiklasten i en väg är störst vid vägytan och minskar med djupet kan bärförmågan översättas till lämpligt läggningsdjup i en vägkonstruktion. Det förutsätter att trafiklasten samt det bundna lagrets styvhet och tjocklek i den projekterade konstruktionen är känd.

Med antagande av att trafiklasten utgörs av en standardaxel enligt VÄG 94 och med hjälp av datorberäkningar av hur lasten sprids med djupet kan följande slutsatser dras om materialen i tabell 16-5. I en vägkonstruktion i trafikklass 1 bör materialen med bärförmåga 400 kPa läggas minst 10 cm från vägytan och 200 kPa-materialen minst 20 cm från vägytan. I en konstruktion med tjockare beläggning gäller andra mått eftersom det bundna lagret har en stor lastspridande förmåga (jämför avsnitt 18.3.2).

## Jämförelse med naturmaterial

Eftersom VTI även har gjort dynamiska treaxialprovningar på en lång serie naturmaterial (Ydrevik 1995 och Arm 2000f) är det intressant att jämföra resultaten för betongen med resultaten för dessa material. I figur 16-10 är resilientmoduler för en rad material sammanställda och kurvanpassningar har gjorts. Den krossade betongen i figuren har olika ursprung, t.ex. järnvägssliprar, rivna byggnader och en riven betongväg. Det krossade naturmaterialet representeras av granit, gnejs och kalksten. Alla material har samma kornstorleksfördelning, packningsgrad och relativ vattenkvot. Provkropparna har provats utan föregående lagring.



**Figur 16-10** Jämförelse av styvhet hos krossad betong och krossat berg med olika ursprung (data från VTI:s dynamiska treaxialförsök inom olika projekt)

Av figuren framgår att den krossade betongen har ungefär samma styvhet som krossade bergmaterial. Det framgår också att betongen har en mindre spänningsberoende resilientmodul än vad bergmaterialet har. Det innebär att vid låga spänningsnivåer är modulen för betong högst medan vid höga spänningsnivåer är modulen för berg högst. Detta kan bero på att vid höga spänningar trycks betongpartiklarna mot varandra så att kvarstående cementpasta nöts bort och bildar mer finmaterial mellan de grövre partiklarna. På så sätt blir materialet mer sandliknande. Från andra projekt där naturmaterial med olika graderingar har treaxialprovats har det visats att resilientmodulen för sand är mindre spänningsberoende än den är för krossat berg och grus. Siltjordars resilientmodul är inte spänningsberoende alls medan kohesionsjordar som lera är spänningsberoende på omvänt sätt, dvs. de blir mindre styva när spänningen ökar.

Figur 16-10 visar också att resilientmodulen för krossad betong med olika ursprung har en viss spridning, men det har även modulen för krossat berg från olika bergtäkter. Ett mer exakt värde på modulen kräver en undersökning av det aktuella betongmaterialet och kunskap om den projekterade konstruktionen. Till exempel har tjockleken hos och typen av bundna lager stor inverkan på spänningstillståndet i en vägkonstruktion.

Jämförelse av bärförmåga hos krossad betong och naturmaterial behandlas i avsnitt 18.3.2.

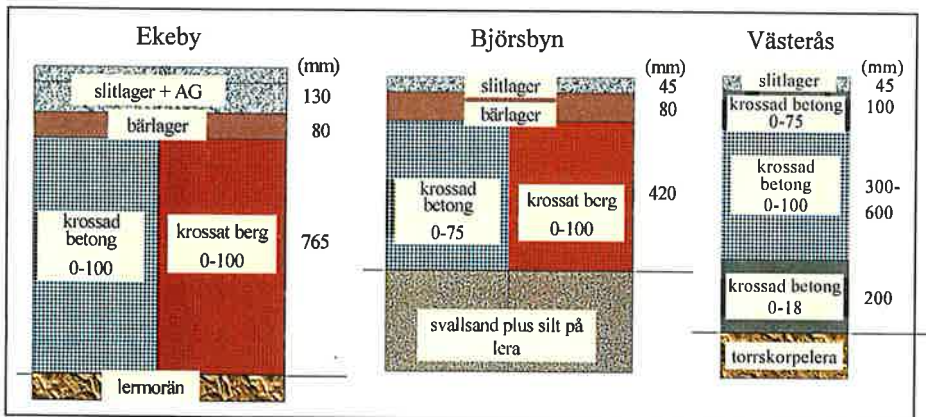
### 16.2.3 Deformation vid dynamisk belastning i fält

Dynamiska belastningsförsök med hjälp av fallviktsdeflektometer har utförts på flera vägsträckor med krossad betong i de obundna lagren. Inom ett projekt som

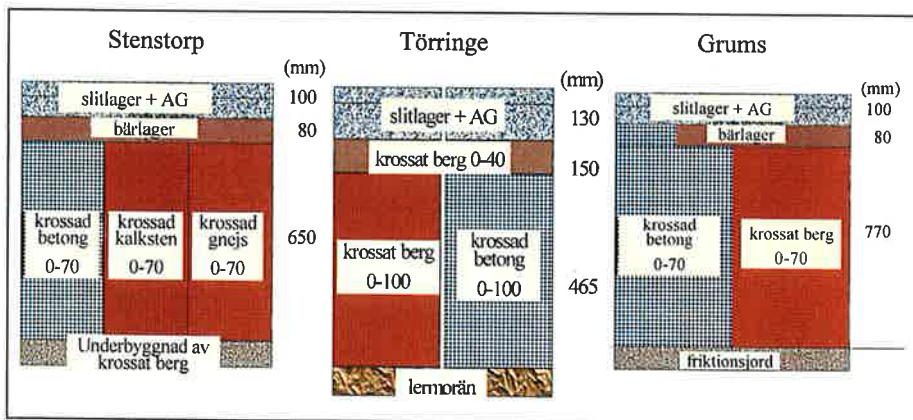


drevs av SYSAV och delfinansierades av Boverket gjordes mätningar på provsträckor i Ekeby och Björnsbyn (Grönholm, 1999a). Inom ett annat projekt som finansierades av GMF gjordes mätningar på provsträckor i Västerås, Grums och Stenstorp (Ydrevik 1996, 1999a+b och Ydrevik & Jansson 1998). Fallviktsmätningar har också utförts inom detta doktorandprojekt, nämligen på provsträckor i Törringe i Skåne.

Några av de konstruktioner som har studerats beskrivs i figur 16-11 a och b och resultaten från fallviktsmätningarna visas i tabell 16-6. Observera att här redovisas de *initiala* modulvärdena som uppmättes i samband med byggandet av sträckorna eller strax därefter. På vissa platser har upprepad mätning utförts för att om möjligt kunna påvisa någon hållfasthetstillväxt i obundna lager av krossad betong. Resultaten från sådana upprepade mätningar beskrivs i avsnitt 16.3.



Figur 16-11a Uppbyggnad av fallviktsmätta konstruktioner. Ekeby, Björnsbyn och Västerås (Ydrevik, personlig kommunikation)



Figur 16-11b Uppbyggnad av fallviktsmätta konstruktioner. Stenstorp, Törringe och Grums (uppgifter från Ydrevik 1999a, detta projekt samt Johansson 1998)

**Tabell 16-6** Utvärderade lagermoduler från fallviktsmätningar på nya sträckor med krossad betong respektive krossat berg i förstärkningslagret (data från Grönholm 1999a+personlig kommunikation, Ydrevik 1999a och 1999d samt detta projekt)

Sträcka	Lagermodul för förstärkningslagret (MPa)	
	krossad betong	krossat berg
Väg 109, Ekeby höger sida	120	123 (granit)
Väg 109, Ekeby vänster sida	133	136 (granit)
Väg 597, Björsbyn	348	253
Västerås	140	—
Stenstorp	170	180 (gnejs) / 250 (kalksten)
Törringevägen	150*	150*

\*Justerat värde med anledning av låga lagermoduler hos AG-lagret.

I samtliga fall utom ett är de utvärderade lagermodulerna för betong och krossat berg likvärdiga. I Björsbyn fick förstärkningslagret av krossad betong betydligt högre lagermodul än naturmaterialet. Orsaken till detta är troligtvis att mätningen i Björsbyn gjordes ungefär en månad efter utläggningen, medan den i de andra fallen gjordes direkt efter utläggningen. Tidpunkten för fallviktsmätningen har stor betydelse, vilket framgår av nästa avsnitt 16.3. Det har visat sig att redan efter en månad har hållfasthetstillväxten påbörjats.

På konstruktionen i Grums har det också utförts fallviktsbelastning, men lagermoduler har inte utvärderats utan mätresultaten redovisas som deformationer på olika avstånd från belastningscentrum (Johansson, 1998). Resultatet visar att vid mätning strax efter beläggning var deformationen i belastningscentrum ca 20% större på betongsträckor med krossad betong i alla obundna lager jämfört med referenssträckorna. På sträckor med krossad betong i alla lager utom bärlagret var deformationen 10% större.

## 16.3 Hållfasthetstillväxt

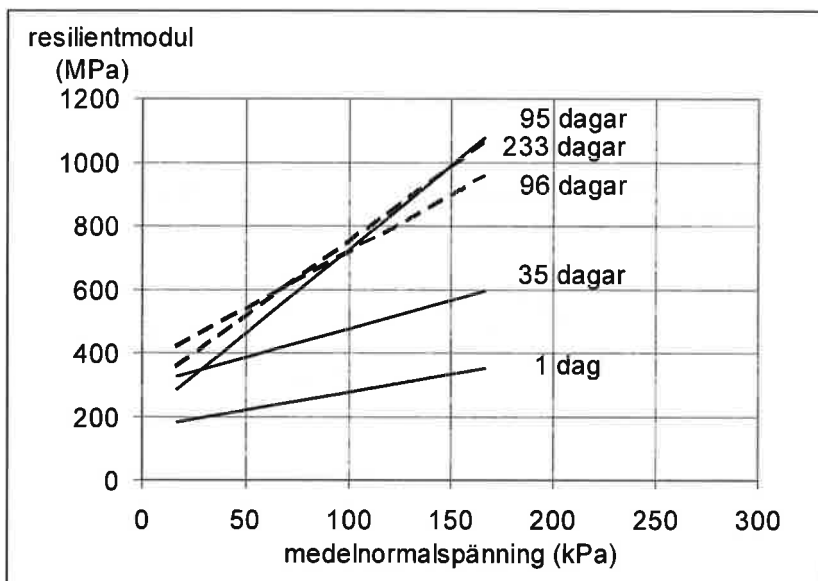
Erfarenheter i bl.a. Nederländerna, Belgien, Japan och Finland visar att en styvhetsökning kan förväntas i lager med krossad betong (Sweere & Henny 1987, Gorle & Sayes 1988, Yoshikane 1988, Sweere 1990, Kivekäs 1997). Enligt avsnitt 5.1 beror denna styvhetsökning på urlakning och utfällning av kalk i det krossade betongmaterialet.

### 16.3.1 Utländska undersökningar

Sweere har studerat styvhetsökning i krossad betong genom treaxialförsök i laboratorium och mätningar på provtytor (Sweere & Henny 1987, Sweere 1990).

Treaxialförsöken gjordes på kommersiellt tillverkad krossad betong, 0–40 mm, med maximal torrdensitet 1,9 t/m<sup>3</sup> enligt modifierad proctor och optimal vattenkvot 9,0%. Provning direkt efter inpackning samt efter 35 dagar och 95 dagar visade att den färskas provkroppen hade lägst resiliensmodul, den 35 dagar

gamla provkroppen hade högre modul och den 95 dagar gamla provkroppen hade ännu högre samt mer spänningsberoende modul (figur 16-12).



**Figur 16-12** Resilientmodul som funktion av medelnormalspänningen. Resultat från dynamiska treaxialförsök på krossad betong med olika ålder efter inpackning. Streckade linjer visar resultat från förnyad provning efter långtidsbelastning. (data från Sweere & Henny, 1987)

Efter 95 dagar utsattes betongen för 100 000 belastningar (frekvens 5 Hz) med kammartryck 12 kPa, kontakttryck 6 kPa och dynamisk vertikalspänning 60 kPa. Förnyad provning visade minskat spänningsberoende men ingen försämring av modulen. Slutligen gjordes treaxialförsök efter sex månaders lagring, vilket visade att styvhetsökningen inte hade fortsatt.

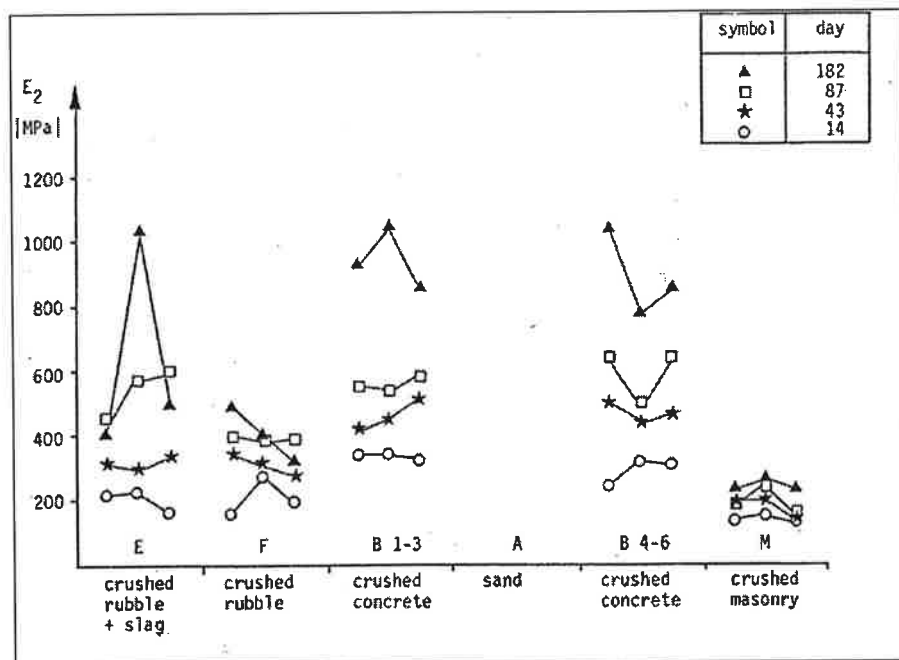
Sweere och Henny (op. cit.) använde låga spänningar jämfört med svenska förhållanden. Det är naturligt eftersom holländska vägar har tjockare asfaltlager än svenska vägar, men det talar för att provning behövs med "svenska" påkänningar, vilket också har gjorts vid VTI, se avsnitt 16.3.2.

Sweere gjorde också fältförsök (Sweere, op. cit.). På en undergrund som bestod av 5 m sand byggdes flera provytor upp. De saknade förstärkningslager men hade olika typer av bärlager. En yta hade 25 cm krossad betong som bärlager, en annan 25 cm krossad tegel och en tredje hade 25 cm blandning av krossad betong och tegel. En provyta lämnades utan bärlager. På dessa ytor gjordes olika typer av deformationsmätningar direkt på bärlagrets överyta, bland annat statiska och dynamiska plattbelastningsförsök samt fallviktsmätningar. Mätningarna gjordes vid tre tillfällen, direkt efter färdigställandet, efter drygt en månad samt efter drygt tre månader.

Resultaten från de dynamiska plattförsöken visade att styvheten för betongbärlagret och undergrunden tillsammans hade fördubblats efter tre månader.

Motsvarande styvhetsökning uppmättes inte vid dynamisk plattbelastning direkt på undergrunden.

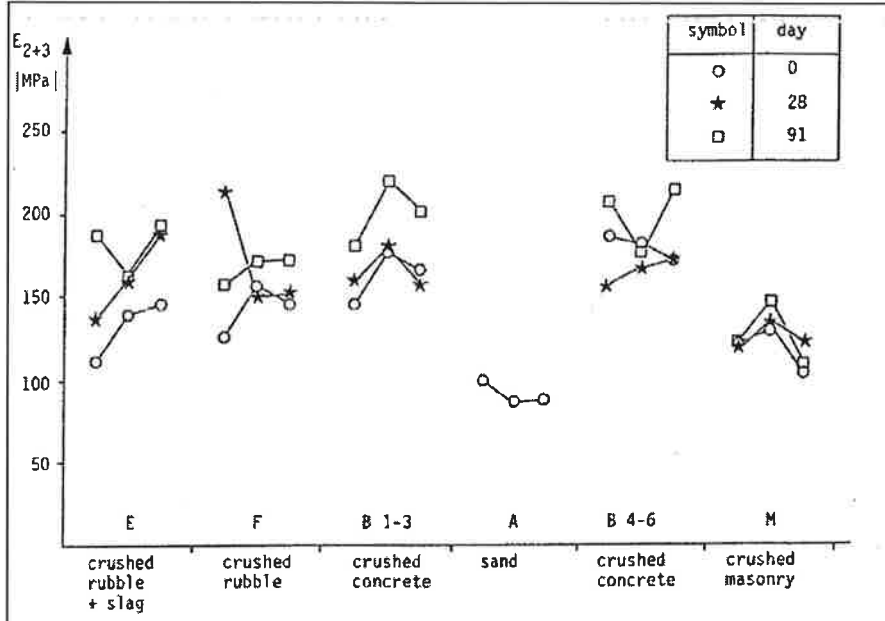
Figur 16-13 visar resultatet från fallviktsmätningen på betong- och tegelsträckorna. Mätning på sanden gick inte att utföra, eftersom ytan deformerades av mätfordonet.



Figur 16-13 Beräknad lagermodul för bärlager av krossad betong, krossad tegel respektive en 50/50-blandning av krossad betong och tegel. Resultat från fallviktsmätning direkt på bärlagret. (Sweere, 1990)

Av figuren framgår att enligt fallviktsmätningarna fortsatte den krossade betongen att bli styvare även efter tre månader. Efter sex månader hade lagermodulen trefaldigats och uppgick till närmare 1 000 MPa.

De statistiska belastningsmätningarna visade däremot inte samma relativa ökning (figur 16-14).



**Figur 16-14** Beräknad E-modul ( $E_{v2}$ ) för bärlager+undergrund i sträckor med bärlager av krossad betong, krossat tegel respektive en 50/50-blandning av krossad betong och tegel. Resultat från statisk plattbelastning direkt på bärlagret. (Sweere, 1990)

Sweere förklarar skillnaden med att de dynamiska belastningarna gjordes direkt efter packning av lagret medan de statiska belastningarna inte gjordes förrän efter 7 dagar. Då hade en stor del av styvhetsökningen redan uppkommit (dag 0 innebär 7 dagar efter packning). Denna förklaring håller emellertid inte riktigt. De dynamiska plattbelastningsförsöken gjordes direkt efter packning, men fallviktsmätningarna, som också är en dynamisk belastningsmetod, gjordes först 7 + 14 dagar efter packning och även dessa visar större relativ ökning än de statiska plattbelastningsförsöken.

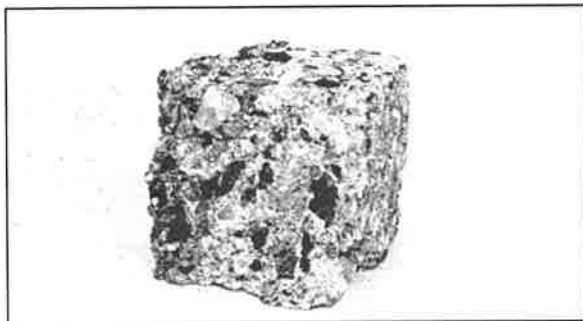
En liknande skillnad mellan statiska och dynamiska mätningars resultat har även noterats i de svenska fältförsöken. Således visade återkommande statisk plattbelastning på bärlager av krossad betong (framgrävda bärlagerytor i Ekeby) ingen skillnad i deformation. Däremot visade fallviktsmätningarna på beläggningsytan och tillhörande beräkning av lagermodulen för bärlagret en tydlig styvhetsökning med tiden (Hagert, personlig kommunikation).

Sweeres provtytor belades senare med 12 cm asfalt och utsattes därefter för simulerad trafikbelastning med hjälp av upprepade dynamiska plattbelastningar med en 50 kN last och 0,2 sekunders belastningstid. Via töjningsgivare i beläggningsens underkant mättes asfالتöjningen vid belastningen. Även dessa resultat visade på styvhetsökning. Strax efter anläggandet var asfالتöjningen 120  $\mu\text{m}$  och efter knappt 3 månader hade den sjunkit till 60  $\mu\text{m}$ .

Gorle & Sayes (1988) har gjort dynamisk plattbelastning på bär- och förstärkningslager av krossad vägbetong på flera provvägar. De rapporterar att omedelbart efter packning har betonglagren lägre lagermodul än lager med krossad

kalksten, 410 MPa jämfört med 680 MPa. Fältresultaten bekräftar de laboratorieförsök i form av dynamiska treaxialförsök som har gjorts på samma material. Flera veckor efter byggandet däremot visar dynamisk plattbelastning, att vissa av betonglagren har fått en betydlig ökning av lagermodulen, vilket författarna förklarar med kvarvarande (residual) cement i den krossade betongen.

Även japanska undersökningar redovisar styvhetsökning med tiden. Figur 16-15 visar en kub som har sågats ut ur ett tre år gammalt bärlager av krossad betong.



**Figur16-15** Foto av material som har sågats ut ur ett tre år gammalt obundet bärlager av krossad betong (Yoshikane, 1988)

Det ursprungliga materialet hade kornstorlek 0–40 mm med 3% fillerhalt, dvs. andel material  $<0,074$  mm, och packningsgraden 98%. Den utsågade kuben hade tryckhållfastheten 4 MPa (Yoshikane, 1988).

Finska resultat från flera provvägar under 1990-talet visar på en betydande styvhetsökning i bär- och förstärkningslager av krossad betong. Ökningen har uppmätts till 2–3 gånger jämfört med värdet för krossat berg (Kivekäs, 1997). Både statisk plattbelastning och fallvikt har använts för att mäta styvheten, men av rapporten framgår inte vilka tidsrymder som är aktuella.

Kalisch (1998) nämner inget om hållfasthetstillväxt i sina fältstudier med bärlager av betong och rivningsmaterial. Syftet var inte heller att studera just hållfasthetstillväxt utan att allmänt bedöma om och i vilken utsträckning återvunna material kan användas i obundna bärlager. Kalisch (op. cit.) utförde statisk plattbelastning på provytor, dels direkt efter packning, dels efter ca 1 års belastning. Av resultaten kan utläsas att alla undersökta material ökar sin styvhet under det första året (tabell 16-7 och 16-8).

**Tabell 16-7** Resultat från statisk plattbelastning på belagda provytor med olika bär-lagermaterial. (I) direkt efter packning och (II) efter ca 1 års belastning. (efter Kalisch, 1998)

Provyta	I Nollmätning			II Mätning efter belastning			III Förändring
	$E_{v2}$ (MPa)	$E_{v1}$ (MPa)	$E_{v2}/E_{v1}$	$E_{v2}$ (MPa)	$E_{v1}$ (MPa)	$E_{v2}/E_{v1}$	$E_{v2}$ (%)
Gråvacka	220	125	1,76	279	189	1,48	+27
Basalt	211	115	1,84	261	200	1,31	+24
Asfalt 30	174	69	2,55	262	190	1,38	+51
Asfalt 60	95	29	3,28	—	—	—	—
Betong 50	233	109	2,14	306	227	1,36	+31
Betong 100	224	100	2,24	265	207	1,28	+18
HBS I	156	63	2,49	226	180	1,26	+45
HBS II	168	85	1,99	194	170	1,15	+16

Materialen Beton 50 och Beton 100 innehåller ca 70 respektive 95% krossad betong. HBS I och HBS II består av blandat rivningsmaterial med liten respektive stor andel svaga partiklar. Betongandelen är ca 45% i båda rivningsmaterialen. Även Asphalt 30 innehåller betong, ca 30% är betong och 40% är asfalt.

Kolumnen längst till höger i tabell 16-7 visar styvhetsförändringen mellan de två mättillfällena. Samtliga material har fått ökad styvhet efter ett års belastning. Det är förvånande att ökningen är minst för Beton 100 och HBS II, men relativt hög för HBS I.

Tabell 16-8 visar styvheterna efter ytterligare 8 veckors belastning, men i detta fall med frysning och tining av konstruktionen.

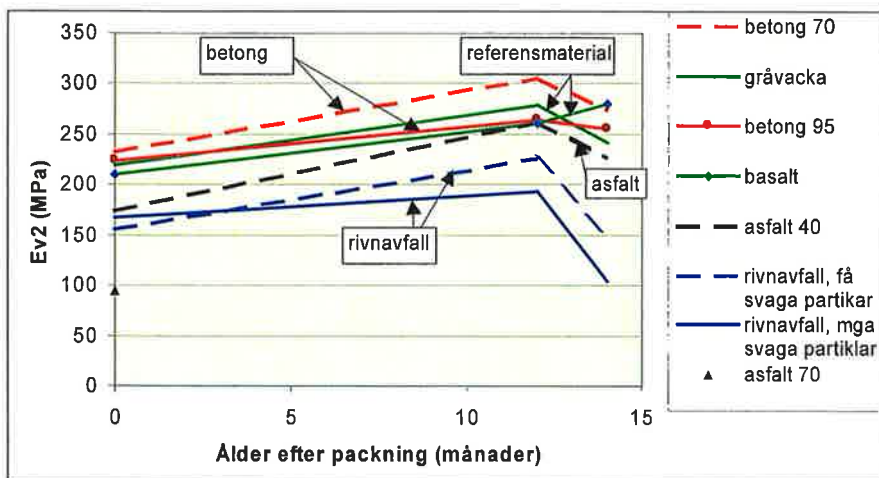
**Tabell 16-8** Resultat från statisk plattbelastning på belagda provytor med olika bär-lagermaterial. (I) direkt efter packning och (III) efter ca 1 års belastning samt 8 veckors frys-töväxling i fält med belastning under töperioderna. (efter Kalisch, 1998)

Provyta	I Nollmätning			III Mätning efter frysning/tining med belastning			III Förändring
	$E_{v2}$ (MPa)	$E_{v1}$ (MPa)	$E_{v2}/E_{v1}$	$E_{v2}$ (MPa)	$E_{v1}$ (MPa)	$E_{v2}/E_{v1}$	$E_{v2}$ (%)
Gråvacka	220	125	1,76	242	151	1,60	+10
Basalt	211	115	1,84	280	231	1,21	+33
Asfalt 30	174	69	2,55	227	143	1,59	+30
Asfalt 60	95	29	3,28	—	—	—	—
Betong 50	233	109	2,14	275	221	1,24	+18
Betong 100	224	100	2,24	255	159	1,60	+14
HBS I	156	63	2,49	149	52	2,87	- 5
HBS II	168	85	1,99	105	26	4,04	-38

Nollmätningen som visas till vänster i tabellen är densamma som i tabell 16-7 och kolumnen längst till höger betecknar här förändringen relativt nollmätningen.

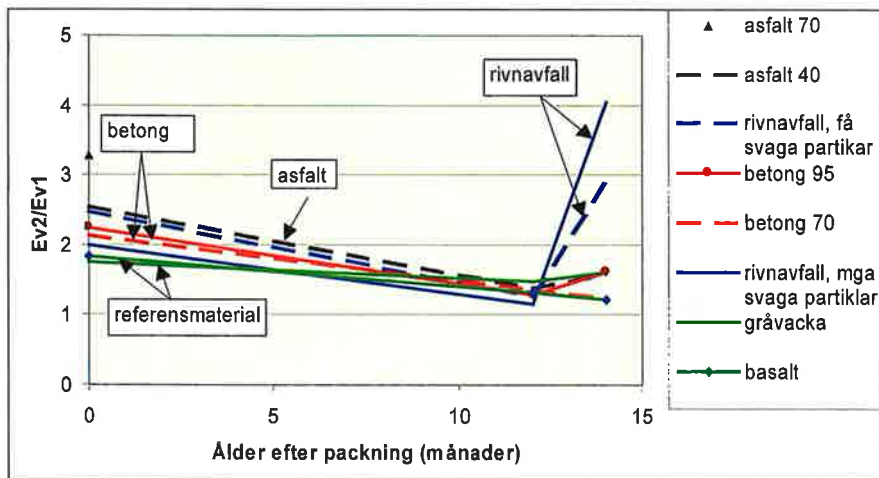
Jämförs värdena från det andra och tredje mättillfället visar det sig, att det material som har påverkats minst av frys-töbehandlingen med belastning under

tiningsperioden är Beton 100. Referensmaterialet Basalt har fått ökad styvhet medan alla andra har fått minskad styvhet. De båda rivningsmaterialen HBS I och II har till och med fått sämre styvhet än de hade vid första mätningen. Detta syns tydligare i figur 16-16, där styvhetsutvecklingen har illustrerats grafiskt.



**Figur 16-16** Lagermodul,  $E_{v2}$ , vid statisk plattbelastning på belagda provytor med olika bärlagermaterial. Resultat vid tre tillfällen: direkt efter packning, efter 1 års belastning och efter ytterligare 8 veckors frys-töväxling i fält med belastning under töperioderna. (data från Kalisch, 1998)

I figur 16-17 visas bärlighetskvotens utveckling för de olika provytorerna.



**Figur 16-17** Bärlighetskvot,  $E_{v2}/E_{v1}$ , vid statisk plattbelastning på belagda provytor med olika bärlagermaterial. Resultat vid tre tillfällen: direkt efter packning, efter 1 års belastning och efter ytterligare 8 veckors frys-töväxling i fält med belastning under töperioderna. (data från Kalisch, 1998)



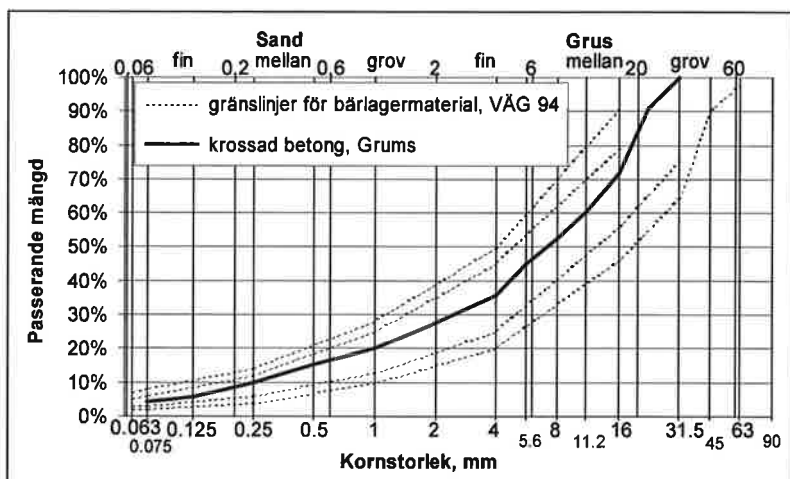
Här syns tydligt att de båda rivningsmaterialen har "luckrats upp" under frys-tö-behandlingen.

### 16.3.2 Undersökningar vid VTI

Hållfasthetstillväxt hos lager med krossad betong har också studerats vid VTI i ett projekt finansierat av Grus- och Makadamföreningen, GMF (Ydrevik, 1999d). Projektet bestod av undersökningar i laboratorium och fält. Resultat i form av "rådata" från dessa undersökningar ligger till grund för text, tabeller och figurer i detta avsnitt.

#### Laboratorieförsök

I laboratorium undersöktes hållfasthetsegenskaper med hjälp av dynamiska treaxialförsök. Dessutom undersöktes sammansättning, optimal vattenkvot och maximal torrdensitet. Provkroppar med krossad betong från ett rivningsobjekt, en industribyggnad i Grums, tillverkades och provades efter olika lagringstid. Provkropparna tillverkades enligt följande. Materialet proportionerades till en förutbestämmd gradering, nämligen en kurva som ligger mitt emellan de inre gränslinjerna för godkänt bärlagermaterial enligt VÄG 94 (figur 16-18).

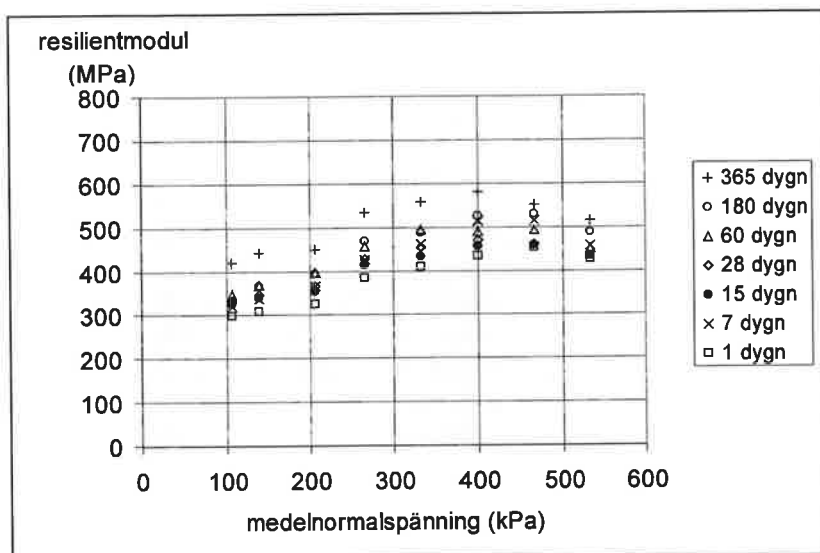


Figur 16-18 Kornstorleksfördelning för betongmaterial i studie om hållfasthetstillväxt (data från VTI, 1999)

Vattenkvoten valdes till 60% av den optimala som var 9,4%. Provkroppar med höjden 300 mm och diametern 150 mm packades in i ett lager i en Vibrocompressor genom samtidigt tryck och vibration. Densiteten valdes till 97% av den maximala torrdensiteten, som var ca 2,0 t/m<sup>3</sup> (bestämmd med tung instampning). Därefter sveptes provkropparna in i plastfolie och lagrades inomhus. Efter en viss lagringstid (1, 7, 15, 28, 60, 180, 365 eller 730 dygn) utsattes provkropparna för dynamisk last i treaxialförsök och resilientmodulen beräknades för olika

lastförhållanden. Jämförelse med motsvarande egenskaper hos konventionella material såsom krossad granit gjordes också.

I figur 16-19 har resultaten från de dynamiska treaxialförsöken plottats som beräknad resilientmodul vid olika spänningsförhållanden. Resultaten kommer att kompletteras med data för två år gamla provkroppar men tendensen är redan en ökning i resilientmodul med lagringstiden.



**Figur 16-19** Ökning av resilientmodulen för krossad betong från Grums. Resultat från dynamiska treaxialförsök efter varierande lagringstid. (data från VTI, 1999)

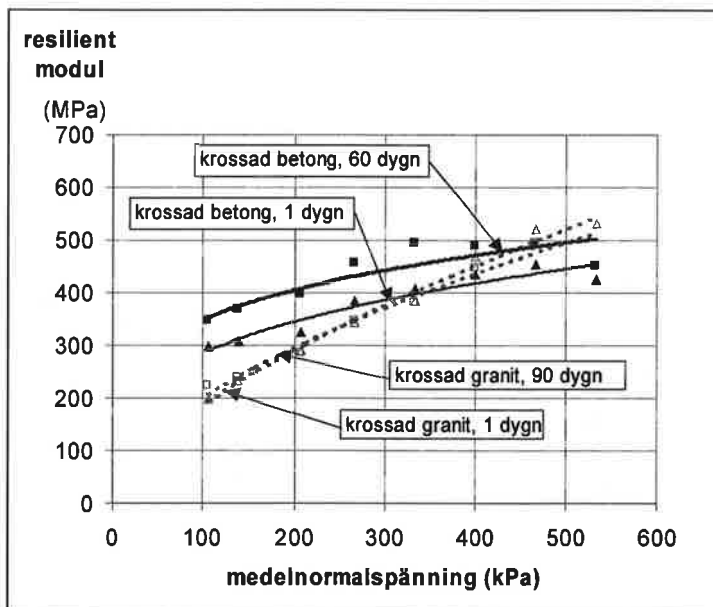
VTI:s resultat visar inte lika stor relativ ökning som de holländska undersökningar som beskrivits tidigare (Sweere & Henny, 1987). Förklaringar till detta kan vara både skillnader i provningsförfarande och material. VTI använde olika, dvs. tidigare obelastade provkroppar för varje ålder, medan Sweere och Henny lät samma provkropp provas vid alla åldrar. Det borde bidra till en successivt högre modul för de holländska provkropparna (jämför figur 16-12). En annan skillnad är att det holländska betongmaterialet provades vid en mycket högre relativ vattenkvot än det svenska, nästan optimal vattenkvot jämfört med 60% av optimal. En tredje skillnad är provkroppsstorleken, som Sweere själv påpekar har betydelse för provningsresultatet (Sweere, 1990). De holländska provkropparna var större än de svenska. Höjden var 800 mm och diametern 400 mm jämfört med 300 mm respektive 150 mm för de svenska provkropparna.

Eftersom finska fälterfarenheter (Kivekäs, 1997) har visat en positiv effekt av vattning av betonglagret, har provningar vid VTI också gjorts på provkroppar som har lagrats i våt sand de första dagarna. Preliminära resultat visar emellertid en mycket liten ökning av resilientmodulen, i motsats till vad som hade förväntats.

## Jämförelse med grus och krossat berg

Arvidsson (1995) studerade lagringstidens effekt på hållfastheten hos krossad och okrossad granit. Undersökningen bestod av dynamiska treaxialförsök på tillverkade provkroppar som lagrats i 1, 3, 7, 28 och 90 dygn. Resultaten från dessa försök visade ingen ökning av resilientmodulen med tiden varken för det krossade eller det okrossade materialet.

Eftersom alla provningsparametrar och till och med kornstorleksfördelningen var desamma som för betongen är det intressant att jämföra de beräknade resilientmodulerna. I figur 16-20 har värden för färskt och lagrat material plottats och kurvanpassningar har även gjorts.

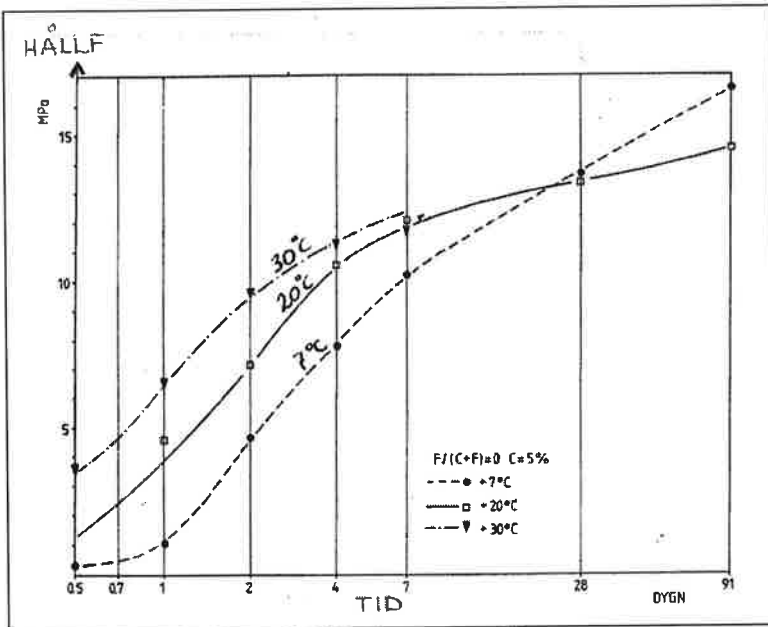


**Figur 16-20** Jämförelse av styvhetsförändring. Resilientmodul från dynamiska treaxialförsök på krossad granit och krossad betong. (data från VTI, 1995 och 1999)

Det framgår av figuren att modulen för betong ökar vid alla spänningsnivåer, vilket modulen för granit inte gör.

## Jämförelse med CG

Ett lager av cementstabiliserat grus, CG, får liksom krossad betong ökad hållfasthet med tiden. En riktig jämförelse mellan de båda materialen kan emellertid inte göras här eftersom inget dynamiskt treaxialförsök har gjorts på CG. Däremot har Petersson & Karlsson (1987) bestämt cylindertryckhållfasthetens utveckling med tiden för CG. Resultat från provningen vid 7, 20 och 30°C visas i figur 16-21.

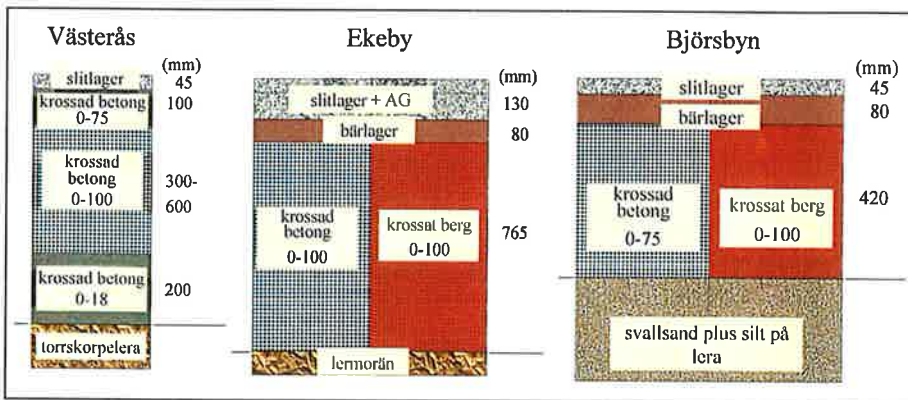


Figur 16-21 Cylindertryckhållfasthetens utveckling med tiden för cementstabiliserat grus (efter Petersson & Karlsson, 1987)

Figuren visar att hållfastheten ökar snabbt i ett CG-prov. Vid 7°C ökar tryckhållfastheten från 1 MPa till ca 16,5 MPa under de första 91 dyggen. Vid 20°C är hållfastheten uppe i 4,5 MPa efter ett dygn och når 14,5 MPa efter 91 dygn. Hållfastheten ökar alltså relativt sett mycket snabbare i CG än i krossad betong. Det måste dock poängteras att det inte går att göra direkta jämförelser mellan mätvärden från tryckhållfasthetsprovning och dynamisk treaxialprovning, eftersom metoderna är alltför olika.

### Fältförsök

I fält har fallviktsmätningar gjorts på ett antal provsträckor med krossad betong runt om i landet och vid olika tid efter utläggning (Ydrevik 1996, Jansson & Ydrevik 1998). Uppbyggnaden av tre av provsträckorna framgår av figur 16-22.

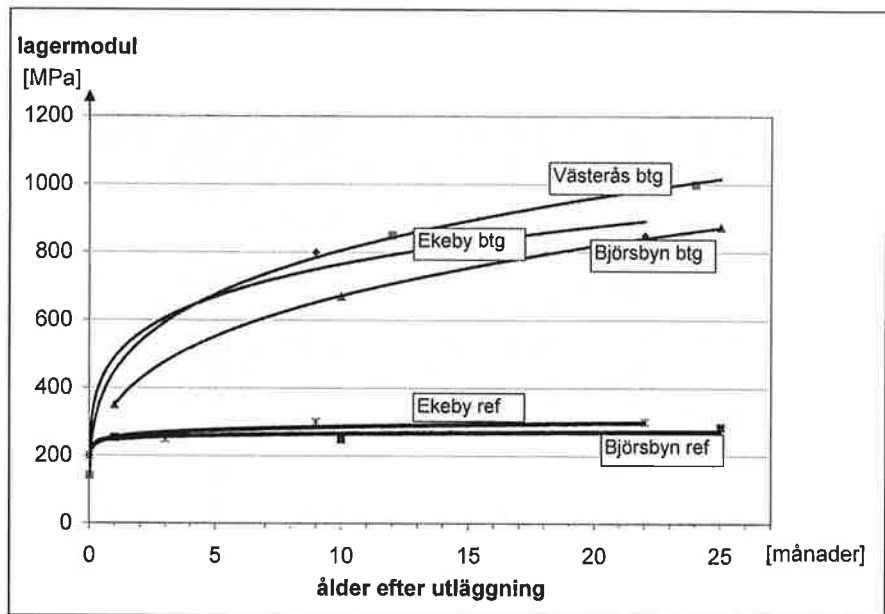


**Figur 16-22** Uppbyggnad av provsträckor vid Västerås, Ekeby och Björnsbyn (Ydrevik, personlig kommunikation)

I Västerås består alla obundna lager av krossad betong, medan i Björnsbyn och i Ekeby är det bara förstärkningslagret som innehåller betong. I samtliga fall är det betong från rivna huskonstruktioner som har använts. Det bör också noteras att även om det är betong med olika ursprung har alla mycket lite föroreningar, i samtliga fall mindre än 10% (figur 16-5 i tidigare avsnitt).

Betonglagret i Västerås är tjockast, ca 600–900 mm, och ligger även ytligast, endast 45 mm slitlager ovanpå. I Ekeby är också betonglagret tjockt, ca 765 mm, men här ligger det 210 mm från ytan, varav 130 mm är slitlager och bundet bärlager. Konstruktionen i Björnsbyn har det tunnaste betonglagret, bara 420 mm tjockt.

I Ekeby och Björnsbyn finns även referenssträckor med krossad berg i förstärkningslagret. Resultaten från fallviktsmätningarna på betongsträckor och referenssträckor visas i figur 16-23.

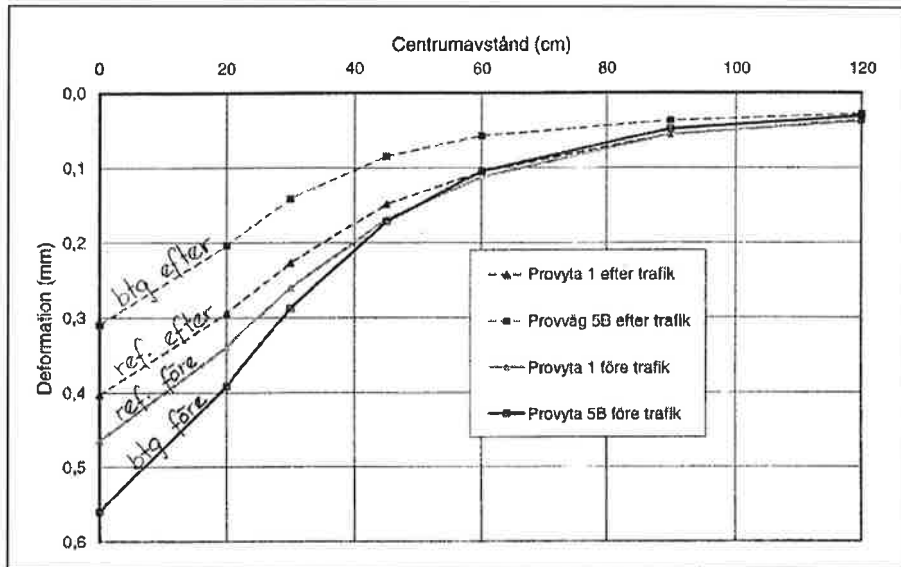


**Figur 16-23** Styvhetstillväxt i lager med krossad betong och krossad granit. Lagermoduler utvärderade från fallviktsmätningar. (data från VTI, 2000)

Vid utvärderingen har lagermodulen för hela betonglagret i Västerås beräknats. I Ekeby och Björnsbyn har det tunna bärlagret av naturmaterial slagits ihop med förstärkningslagret till ett lager.

Det framgår av figuren att de tre provplatserna visar ungefär samma resultat trots att betongens ursprung, betonglagrets tjocklek och belastningen på det varierar. Figuren visar också tydligt att lagermodulen ökar för lager med krossad betong. Ökningen är markant den första månaden och avtar sedan. Modulen efter två år är ungefär dubbelt så hög som efter en månad. Lagermodulen för motsvarande lager i referenssträckorna ökar däremot inte alls eller mycket lite under samma period. Detta resulterar i stora skillnader i lagermodul mellan betongsträckorna och referenssträckorna redan efter de första månaderna.

Fallviktsmätning har också utförts på provsträckor uppbyggda av den betong som användes i de tidigare beskrivna laborieförsöken med lagrat material. Johansson (1998) beskriver provsträckornas uppbyggnad och resultatet av mätningarna. Fallviktsmätningarna gjordes på nybelagd väg samt efter 6 månaders trafikbelastning. Resultaten redovisas som deformation av vägytan på olika avstånd från belastningscentrum. I figur 16-24 jämförs en provsträcka med krossad betong i alla obundna lager och en referenssträcka med krossat berg (gnejs och mylonit).



**Figur 16-24** Fallviktsmätning på provsträckor i Grums, före och efter 6 månaders trafik. Provyta 1 med krossat berg i alla obundna lager, provyta 5B med krossad betong i alla obundna lager. Deformation på olika avstånd från belastningscentrum. (efter Johansson, 1998)

Figuren visar att betongsträckan initialt deformeras mer än referenssträckan. Vid det andra mätillfället deformeras båda sträckorna mindre än vid det första. Deformationsminskningen är mycket kraftig för betongsträckan, vilket gör att den är styvare än referenssträckan efter 6 månaders trafik. Denna studie visar alltså samma styvhetsutveckling för krossade betonglager som övriga fältförsök gör.

För att visuellt undersöka hur krossad betong ser ut efter att ha legat i vägen några år grävdes material från förstärkningslagret i Björnsbyn upp. Figur 16-25 visar ett foto av det uppgrävda materialet.



**Figur 16-25** Material som grävts upp ur ett två år gammalt förstärkningslager av krossad betong. (Foto: VTI Jörgen Svensson, 1999)

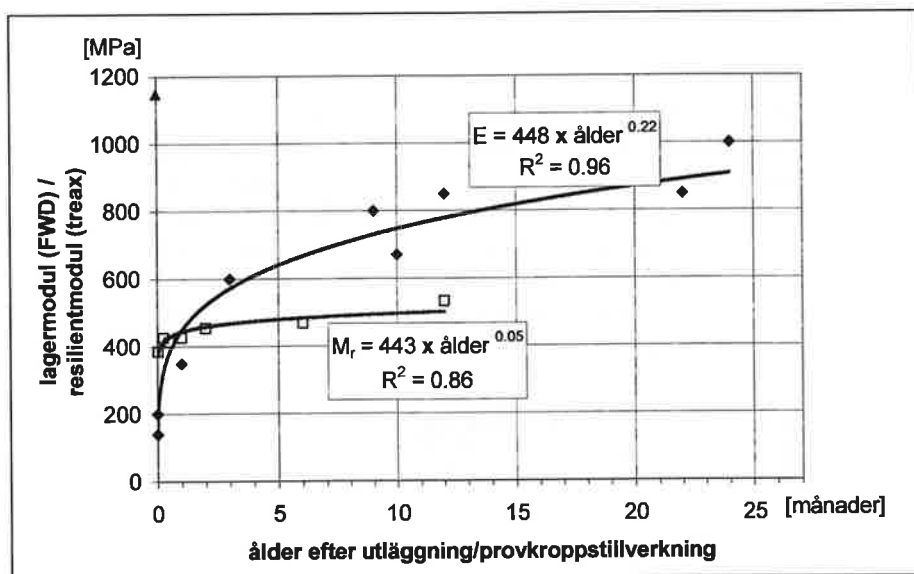
Det ursprungliga materialet hade kornstorleken 0–75 mm och pennan på bilden är ungefär 13 cm lång. En påtaglig bindning av materialet kan alltså konstateras. Resultatet kan jämföras med de japanska erfarenheter som beskrivits i avsnitt 16.3.1 (Yoshikane, 1988), med den skillnaden att i Björnsbyn spettades materialet loss i stället för att sågas.

### 16.3.3 Diskussion – hållfasthetstillväxt hos krossad betong

För att kunna utnyttja hållfasthetstillväxten vid dimensionering av vägar med krossad betong i de obundna lagren behövs kunskap om materialets styvhet uttryckt som en modul och dess ökningstakt.

#### Skillnad mellan laboratorieresultat och fältresultat

VTI:s undersökningar i laboratorium och fält visar både aktuell modul och ökning med tiden. Ökningen är avsevärt större i fältförsöken än i laboratorieförsöken, vilket framgår av figur 16-26, där mätvärden har plottats och kurvanpassningar har gjorts.



**Figur 16-26** Styvhetsökning i krossad betong. I fält: Lagermoduler från fallviktsmätningar på tre platser. I laboratorium: Resilientmoduler från dynamiska treaxialförsök på ett material (provning med normalspänning 270 kPa och spänningskvot = 3,5). (data från VTI, 2000)

Den övre kurvan visar styvheten i fält uttryckt som lagermodul, E, från fallviktsmätningar på tre platser (Västerås, Ekeby och Björnsbyn). Den undre kurvan visar styvheten i laboratorium uttryckt som resilientmodul,  $M_r$ , från treaxialförsök på ett material (Grums).



De båda kurvornas ekvationer har olika exponenter. Fältförsöken gav exponenten 0,22 för alla objekt tillsammans och exponenterna 0,19; 0,25 och 0,28 för de tre enskilda objekten, medan laborieförsöken gav exponenten 0,05.

En tänkbar förklaring till skillnaden mellan laborieresultatet och fältresultatet är att betongen i laborieförsöken var insvept i plastfolie från och med andra veckan av lagringstiden. Då kunde inte materialet reagera med luftens koldioxid och styvhetsutvecklingen avstannade. En annan förklaring kan vara att betongen i laborieförsöken redan var starkt karbonatiserad och därför visar en långsammare hållfasthetstillväxt än den som användes i fält. Betongen kom från en industribyggnad, men vilken del av byggnaden är okänt. Provningsen av de två år gamla provkropparna kommer att visa i vilken takt hållfasthetstillväxten fortsätter. Laborieprovning av annat betongmaterial med säkert "utomhus-ursprung" planeras för att få ett bättre bedömningsunderlag. Effekten av ett annat lagringssätt kommer därvid också att undersökas.

## Utnyttjande av hållfasthetsökningen

Hur kan den uppmätta hållfasthetsökningen utnyttjas vid dimensionering av en väg? Normalt sett används en styvhet eller modul för varje material i en konstruktion under hela dimensioneringsperioden. Det leder till frågan vilket värde som ska väljas för krossad betong – den initiala modulen eller en modul som uppnås först efter en viss tid.

Med ledning av de resultat som beskrivits här finns det två sätt att välja dimensionerande modul för krossad betong:

1. Ett generellt värde utan någon speciell hållfasthetsundersökning av betongmaterialet. I detta fall kan samma modulvärde väljas som för naturliga material. Det förutsätter att den krossade betongen innehåller maximalt 10 viktprocent främmande material där tegel och liknande utgör huvuddelen.
2. Ett detaljerat värde där styvhetsökningen utnyttjas. Det kräver dels en hållfasthetsundersökning av betongmaterialet, dels kännedom om den planerade konstruktionen. Det behöver t.ex. klargöras på vilket djup betongen ska ligga och hur stora spänningarna kan vara där.

Om ekvationerna i figur 16-26 används för att räkna ut en dimensionerande modul, till exempel den dimensionerande modulen efter de två första månaderna, skulle detta ge en ökning av startmodulen med:  $(2 \text{ månader})^{0,22} = 16\%$  respektive  $(2 \text{ månader})^{0,05} = 4\%$ . På samma sätt ökar modulen med 48 respektive 9% om värdet efter sex månader väljs i stället.

Man kan tycka att det är självklart att hållfasthetstillväxten ska utnyttjas. Det måste dock uppmärksammas att om dimensioneringen görs med ett modulvärde som uppnås först efter sex månader finns det en risk att konstruktionen bryts ned på grund av underdimensionering under det första halvåret. Detta kan troligen undvikas genom en noggrann planering av själva byggnadsarbetena, t.ex. omdirigering av byggnadstrafiken.

I både Finland och Nederländerna utnyttjar man hållfasthetstillväxten vid dimensionering. I Finland använder man högre modulvärden för krossad betong än för krossat berg, om det kan visas att materialet har styvhetsökande egenska-

per. Det visas med tryckhållfasthetstester av samma slag som för hel betong. De moduler som används, 700 MPa för restbetong och 500 MPa för rivningsbetong, är inte lika höga som de uppmätta värdena vid fältförsök. Detta förklaras som en försiktighetsåtgärd på grund av den korta erfarenheten av användning av detta material (FINNRA, 2000). För jämförelse kan nämnas att E-modulen 280 MPa används för krossat berg.

I en holländsk handbok om s.k. sekundära vägbyggnadsmaterial anger man E-modulen 600 MPa för obundna lager av krossad betong (CROW, 1999). För rivningsmaterial med hälften betong och hälften annat stenmaterial anges E-modulen 400 MPa. E-modul för ”vanliga” obundna stenmaterial t.ex. lavasten och krossat tegel anges i holländska dimensioneringsföreskrifter till 150 MPa (DWW, 1998).

## 16.4 Beständighet

### 16.4.1 Beständighet mot mekanisk påverkan

#### Laboratorieresultat

När krossad betong provas med de standardiserade metoder som finns för beständighet mot mekanisk påverkan blir resultatet sämre än för godkända naturmaterial.

Andersson et al. (1999) utsatte en krossad rivningsbetong med blandat ursprung för provning med bl.a. följande tre metoder: Los Angeles- och micro-Deval-provning enligt förslag till europanormer samt sprödhetstal enligt FAS. Resultatet för betongen och ett sandigt grus, vilket användes som referensmaterial visas i tabell 16-9.

*Tabell 16-9 Beständighet mot mekanisk påverkan för en krossad betong med blandat ursprung och ett grusmaterial, mätt med tre olika metoder (efter Andersson et al., 1999)*

Metod	Krossad betong	Sandigt grus
Sprödhet (FAS)	63	39
Los Angeles-tal <sup>1)</sup> (prEN 1097-2)	35,0	22,7
micro-Devalvärde (prEN 1097-1)	23	6

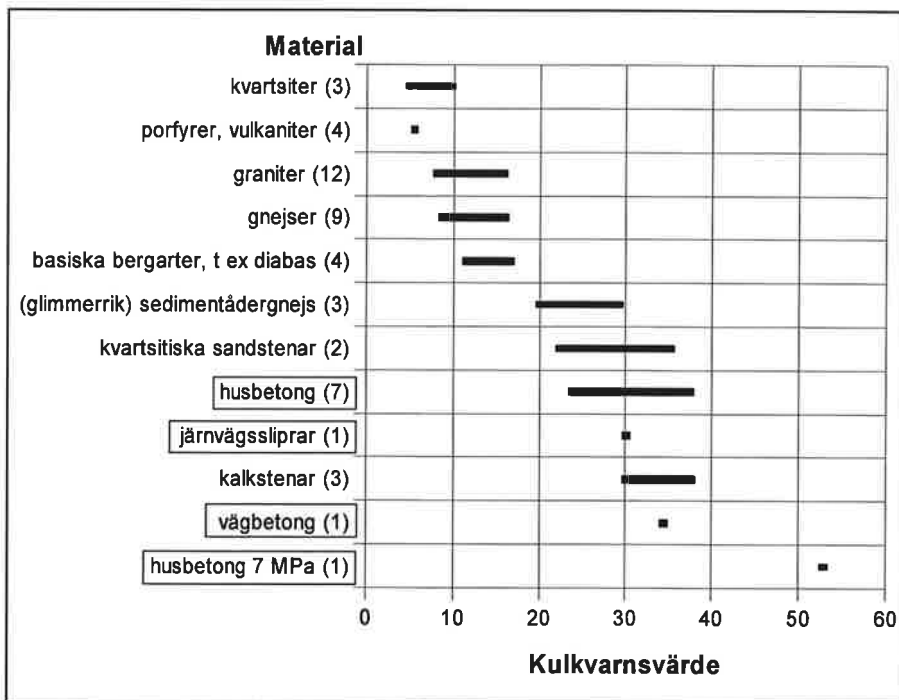
1) Analysfraktion 10–14 mm

Det framgår att betongen fick sämre beständighetsvärden i samtliga fall. Störst relativ skillnad blev det vid provning med micro-Deval.

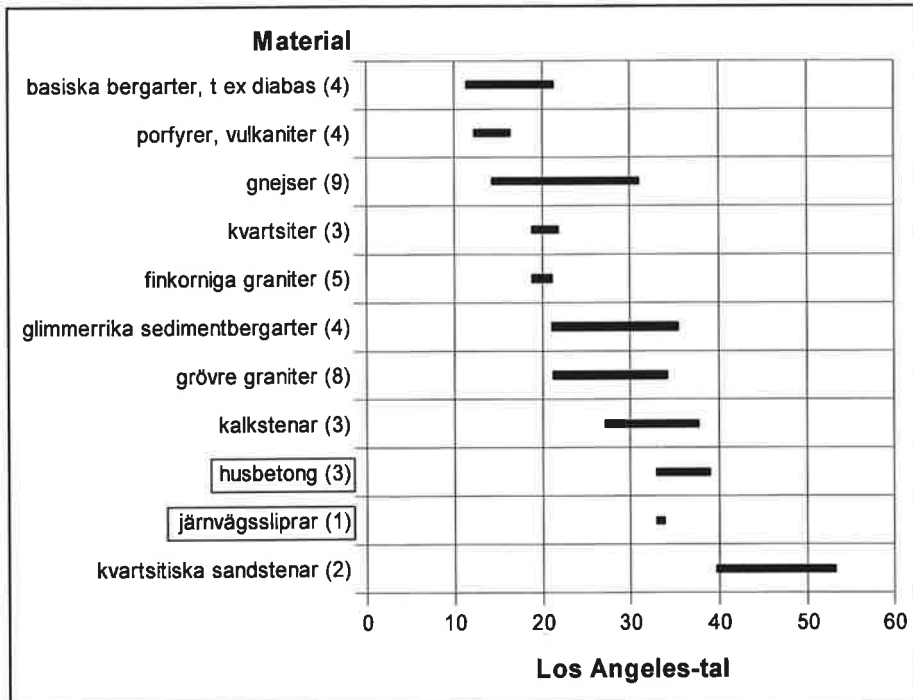
Även vid packning av krossad betong enligt tung laboriестampning erhålls viss nedkrossning. Metoden används när maximal torrdensitet ska bestämmas. I ett fall visar värden på kornstorleksfördelningen före och efter instampning en höjning av kurvan med upp till femton procentenheter, medan ett san-

digt grus inte krossades ned nämnvärt (Andersson et al., 1999). I andra fall har kurvan höjts med 3 till 15 procentenheter (VTI:s provningsresultat för Västerås, Ekeby, Grums, Vellinge och Björnsbyn, 2000).

Kulkvarnsvärden och Los Angeles-tal har bestämts för flera olika betongmaterial (VTI:s provningsregister, 2000). I figur 16-27 och 16-28 jämförs resultaten med värden för några svenska bergarter som Stenlid (1996) undersökt.



**Figur 16-27** Kulkvarnsvärde för krossad betong och några svenska bergarter. Bestämt enligt VVMB 610 ej korrigerat, med analysfraktion 10–16 mm. Inom parentes anges antalet prov. (data från VTI samt Stenlid 1996)



**Figur 16-28** Los Angeles-tal för krossad betong och några svenska bergarter. Enligt prEN 1097-2 med analysfraktion 10–14 mm. Inom parentes anges antalet prov. (data från VTI samt Stenlid 1996)

I båda figurerna placerar sig den krossade betongen bland de svaga bergarterna. Kulkvarnsvärden och Los Angeles-tal ligger i nivå med motsvarande för kalkstenar och sandstenar.

Kulkvarnsvärden för olika återvunna betongmaterial har också bestämts av Hellström & Svensson (1995). Resultatet blev 16,5 för en gammal österrikisk motorvägsbetong med dolomitisk kalkstensballast och cylindertryckhållfasthet 92 MPa. För en gammal svensk brobetong med tryckhållfasthet 65 MPa varierade kulkvarnsvärdet med krossningsmetoden. Vid laboratoriekrossning med käftkross blev värdet 25,6 och med stor slagkross blev det 32. Slutligen blev kulkvarnsvärdet 34 för ett gammalt betongfundament med tryckhållfasthet 48 MPa. Författarna konstaterar att krossningsmetoden spelar en viktig roll för resultatet. En slagkross ger ett mer kubiskt material och därmed ett högre nötningsmotstånd. (Man kan dock inte förklara den svenska brobetongens motstridande värde).

Utländska forskningsrapporter anger liknande värden. Bauchards undersökningar på vägbetong och husbyggnadsbetong (1988) resulterade i Los Angeles-tal mellan 29 och 35 och micro-Devalvärden mellan 15 och 24. Kaga et al. (1988) rapporterar Los Angeles-talet 25 för en ren betong med ursprungligt vattementtal mellan 0,45 och 0,68. En krossad betong med danskt ursprung erhöll Los Angeles-tal 38 och micro-Devalvärde 14,4 (ALT-MAT, 2000). FINNRA (2000) påpekar att Los Angeles-talet är mycket beroende av kvaliteten

hos materialet (t.ex. renhet och tryckhållfasthet). Man anger intervallet 22–29 för de två högsta kvalitetsklasserna för återvunnen betong i Finland.

## Fältresultat

Även i fält kan en sämre beständighet mot nedkrossning förväntas för vissa krossade betongmaterial.

Johansson (1998) visade att bärlager av krossad betong krossades ned mer än bärlager av krossat berg. Bergmaterialet var ett relativt grovt 0–30 mm material som bestod av gnejs och mylonit. Betongen kom från en riven industribyggnad i Grums och hade varierande tryckhållfasthet mellan 39 och 89 MPa. Den krossades i två steg och proportionerades till samma kurva som bergmaterialet. Därefter placerades ca 100 kg av vardera materialet i ett fem cm tjockt bärlager i en provväg.

För att kunna skilja proven från omgivande material sveptes de in i geotextil. Proven var ca två meter långa och 0,5 meter breda och placerades i hjulspåren. Bärlagret packades genom sex överfarter med en 15 tons vibrerande vält och belades sedan med en fem cm tjock beläggning. Efter nio månaders trafik, då ca 27 000 timmertransporter i form av lastbil med släp hade passerat, grävdes proven upp och siktades på nytt.

Resultaten visade ingen nämnvärd förändring av bergmaterialet, medan betongmaterialet hade blivit finkornigare. Störst var förändringen i intervallet 2–22 mm. Bland annat sjönk halten material >16 mm från 40 till 30%. Det kan tolkas som att de stora partiklarna har krossats eller nötts ned. Om detta har hänt vid packningen av bärlagret eller vid trafikeringen av den belagda vägen är svårt att säga. I båda fallen utsattes materialet för stora laster. Johansson (op. cit.) drar slutsatsen att nedkrossningen har inträffat under trafikbelastningen, eftersom det uppstod skador på asfalten efter färdigställandet. Johansson menar också att materialet inte varit stabilt på grund av en mindre välgraderad kurva.

Det är intressant att även jämföra den laboratoriebestämda beständigheten för dessa båda material. Johansson (op. cit.) anger kulkvarnsvärdet 16,5 för bergmaterialet, men tyvärr inget värde för betongen. Däremot bestämde VTI kulkvarnsvärdet för betong med samma ursprung i samband med de treaxialförsök som VTI utförde i projektet. Värdet var 23 dvs. godkänt enligt VÄG 94, om bärlagret inte trafikeras före beläggning.

Med stöd av de dynamiska treaxialförsök som utförts borde nedkrossningen av betongmaterialet kunna förklaras med en kombination av ett dåligt graderat material och en stor trafikbelastning på ett tunt lager krossad betong insvept i fiberduk. Att bergmaterialet inte krossades ner lika mycket beror antagligen på dess högre styvhet vid stora laster (jämför figur 16-10).

## 16.4.2 Beständighet mot klimatpåverkan

### Laboratorieresultat

Vid provning av beständigheten mot klimatpåverkan med standardiserade metoder får krossad betong sämre resultat än godkända naturmaterial.

Engelska försök visar att när ballast av återvunnen betong utsätts för upprepade frys-töväxlingar har den sämre beständighet, dvs. större sönderfall, än naturligt flodgrus (figur 16-3 i tidigare avsnitt). (Mulheron & O'Mahony, 1988).

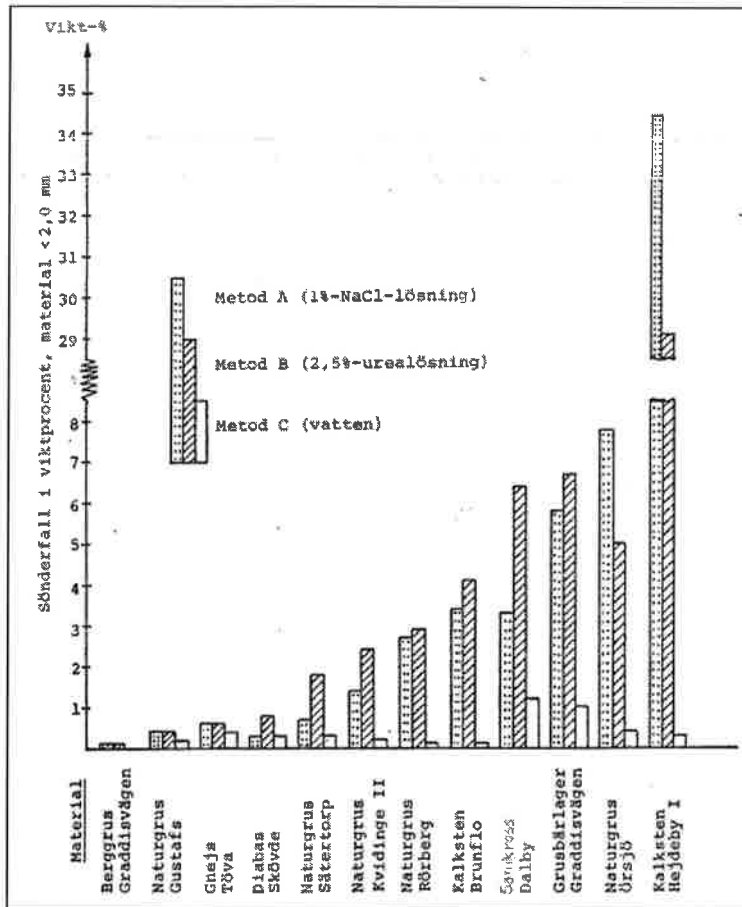
Andersson et al. (1999) provade krossad betong med blandat ursprung enligt prEN 1367-1 med resultatet 8,2 viktsprocent sönderfall. Motsvarande värde för referensmaterialet, ett sandigt grus, blev 0,1 viktsprocent.

I tabell 16-10 anges resultatet av provningar enligt den s.k. VTI-metoden (svag saltlösning). Några material har också resultat från provning med vanligt vatten. VTI:s metod, som utvecklades av Höboda och Jacobson på 1980-talet skiljer sig från prEN-metoden genom att materialet vattenmätas med hjälp av vakuumpump (Höboda & Jacobson, 1981).

*Tabell 16-10 Sönderfall vid frys-töprovningar av krossad betong  
(data från VTI:s provningsregister)*

<b>Material</b>	<b>VTI-metod (med salt) (viktsprocent)</b>	<b>VTI-metod (utan salt) (viktsprocent)</b>
<b>Husbetong</b>		
Vägg/bjälklag, 30 MPa	15	
Blandat fr SYSAV, Ekeby	21–31	9–12
Golv på mark, 7 MPa	36	
Bodenhusen, Björnsby	41	13
Industribyggnad, Grums	43	17
S:t Larsskolan	50	
Prefabvägg, 73 MPa	59	
<b>Övrig betong</b>		
Vägbetong, Vellinge	36	
Järnvägssliprar, Stenstorp	56	<1

Vid jämförelse med naturmaterial kan värden i figur 16-29 användas.



Figur 16-29 Sönderfall vid frys-töväxlingsförsök (10 cykler) med olika stenmaterial 11,2–16 mm. Med saltlösning, urealösning och vanligt vatten. (efter Höboda & Jacobson, 1981)

Resultatet av jämförelsen blir att betongmaterial fryser sönder mycket mer än vanligt stenmaterial vid frys-töförsök, såväl när saltlösning som när rent vatten används. Denna känslighet för saltvatten tar man hänsyn till i de finska bestämmelserna för återvunnen betong i vägkonstruktioner, genom att rekommendera ett tätare slitlager när bärlager av "självhårdnande" betong används i vintersaltade vägar (FINNRA, 2000).

## Fältresultat

Det har inte gjorts någon direkt mätning av klimatbeständigheten i fält, men de mätningar som har gjorts i andra syften tyder inte på någon nedbrytning av krossad betong på grund av klimatet. Exempel på sådana mätningar är fallviktsmätningar vid olika tillfällen på provsträckor i Luleå. Provsträckorna har förstärkningslager av krossad betong och har ökat sin styvhet med tiden. Uppgrävning

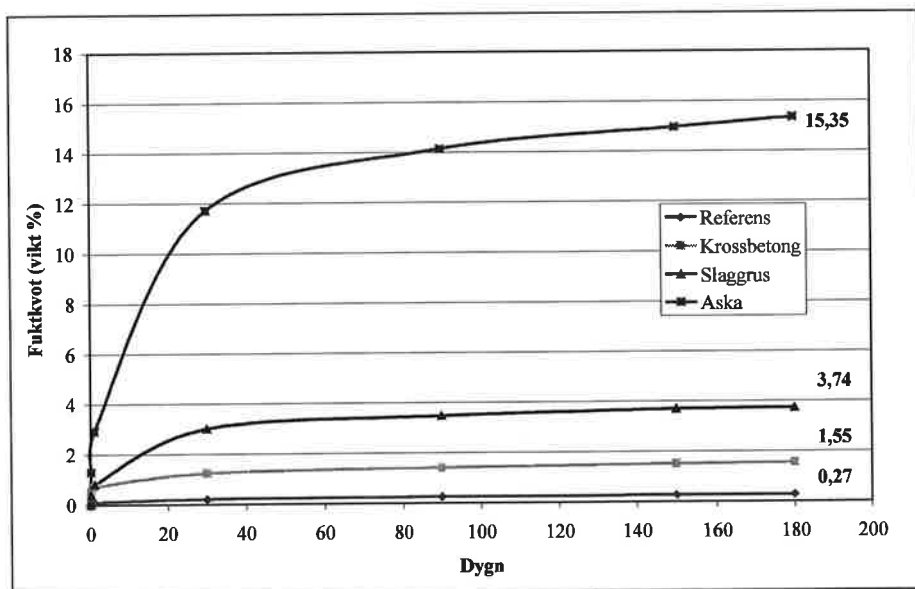
av material från betonglagret visar också på en bindning i stället för nedbrytning (figur 16-25 i tidigare avsnitt).

## 16.5 Vattenabsorption och permeabilitet

Vattenabsorptionen hos krossad betong är avsevärt högre än för naturmaterial. Det beror på att cementbruket som sitter kvar på stenmaterialet har stor vattenabsorberande förmåga.

Mulheron och O'Mahony (1987) anger att vattenabsorptionen för grov (5–20 mm) krossad betong är 5,3–8,3 viktprocent jämfört med 1,5–3,1 viktprocent för jämförbart naturligt grus. Liknande resultat presenterar Hansen & Narud (1983).

Även Andersson et al. (1999) visar på större vattenabsorption hos krossad betong än hos naturmaterial (figur 16-30).



**Figur 16-30** Vattensugande förmåga hos olika material med kornstorlek 4–31,5 mm. Referens betecknar ett sandigt grus. (Andersson et al., 1999)

I figuren representerar de två nedersta kurvorna ett referensmaterial av sandigt grus samt ett krossat betongmaterial. Den krossade betongen erhöll värdet 1,55% och det sandiga gruset 0,27%.

Enligt Andersson et al. (op. cit.) tenderar provning där finmaterialet ingår, att överskatta vattenabsorptionen då den också inkluderar adsorberat vatten på partiklarnas ytor. Även Puckman & Henrichsen (1988) varnar för att vattenabsorption enligt standardmetoden ISO 6783 ger för höga värden för krossad betong. De föreslår därför en ny grafisk metod för att bestämma när återvunnen betong är vattenmättad men torr på ytan. Metoden baseras på desorptionskurvan för materialet vid en viss temperatur och användning av denna metod gav betydligt



lägre absorptionsvärden än ISO-metoden. För fyra material noterades absorptionsvärden i intervallet 3,6–4,5% i stället för 7,4–11,4%.

*Permeabiliteten* hos ett välgraderat krossat betongmaterial med maximal kornstorlek 20 mm bestämdes av Andersson et al. (op. cit.) till värdena i tabell 16-11. Bestämningen gjordes i en rörpermeameter med provdiametern 101 mm och provhöjden 124 mm.

**Tabell 16-11** Permeabilitet för krossad betong och sandigt grus vid bestämd vattenkvot och densitet (efter Andersson et al., 1999)

	<b>Krossad betong</b>	<b>Sandigt grus</b>
Permeabilitet, (m/s) (2 provomgångar)	$1 \cdot 10^{-6}$ – $5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$ – $4 \cdot 10^{-6}$
Vattenkvot vid packning, (%) (medelvärde)	6,0	3,0
Torrdensitet, (t/m <sup>3</sup> ) (medelvärde)	1,88	2,13

Enligt Andersson et al. (op. cit.) kan de erhållna permeabiliteterna jämföras med följande erfarenhetsmässiga värden för några naturliga material: grusig morän  $10^{-7}$ – $10^{-5}$ , sandig morän  $10^{-8}$ – $10^{-6}$  och siltig morän  $10^{-9}$ – $10^{-7}$ .

## 16.6 Tjällyftningsbenägenhet

Eftersom kapillariteten har betydelse för tjällyftningsbenägenheten redovisas här resultat från kapillaritetsbestämningar på krossad betong, utöver resultat från direkta frysförsök i laboratorium och fält.

*Kapillaritet* för krossad betong med kornstorlek 0–4 mm blev 97 cm i en dansk undersökning. Materialet som undersöktes hade maximal torrdensitet 1,67 t/m<sup>3</sup> och optimal vattenkvot 18% och var aktuellt som fyllnadsmaterial i ledningsgravar. Resultatet innebar ungefär dubbelt så stor kapillaritet som för naturgrus med samma kornstorlek (danska Miljøstyrelsen, 1993). Författarna tolkar det som en risk för tjällyftning om materialet används nära markytan.

Kapillaritet har också bestämts av Ydrevik (1999d), men enligt svensk standard 13 21 03 för ballastmaterial. Då kontrolleras kornstorleken 8–32 mm. Resultatet blev 38 mm stighöjd för krossad betong (Grums), vilket kan jämföras med 203 mm för krossad granit (Steninge). Bestämningar av kapillariteten hos finkornig svensk krossad betong saknas.

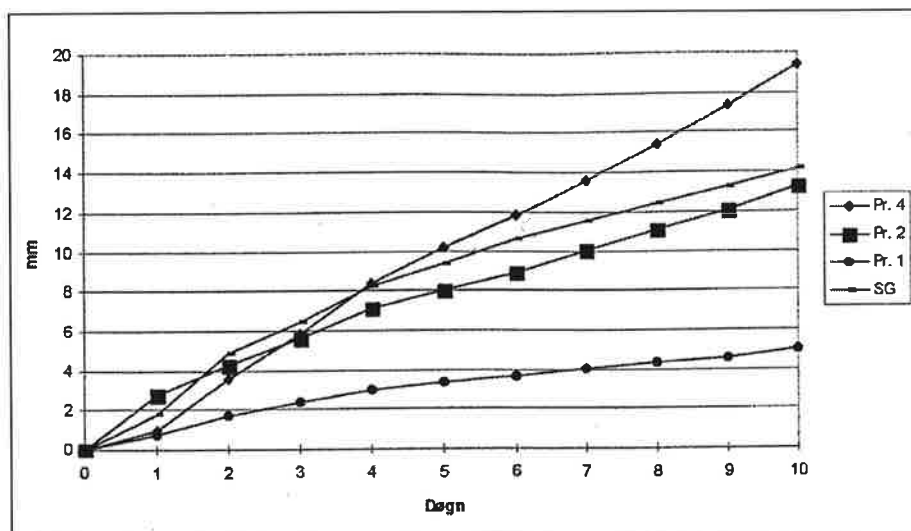
*Direkta frysförsök i laboratorium* med FTU –94 utfördes av Andersson et al. (1999) för att bestämma tjällyftningsbenägenheten hos krossad husbetong med blandat ursprung. Ett sandigt grus användes som referensmaterial. Resultaten redovisas i tabell 16-12.

**Tabell 16-12 Tjällyftningsparametrar bestämda vid frysförsök**  
(efter Andersson et al., 1999)

	Krossad betong	Sandigt grus	Silt	sa si Mn
Lyftning, (% av frusen provhöjd)	1,7	0,2	38	20
Porvatten, (volymprocent)	35	24,5	47	27
Last, (kPa)	7,8	7,8	7,8	7,8

För betongen och gruset är de registrerade lyftbeloppen som står i tabellens översta rad mindre än 10% av porvolymen. Det innebär att båda kan betecknas som *icke tjällyftande*, vilket kanske inte är så överraskande om man studerar kornstorleksfördelningarna som var 0–32 mm med mellan 5 och 10% finjord. För jämförelse har resultat från frystest på två riktigt tjällyftande material tagits med i tabellen. Det ena är en lerig silt och det andra en sandig siltig morän, båda från provvägar utanför Umeå.

I ett examensarbete vid Danmarks Tekniska Universitet (Koch, 1996) gjordes frysförsök på tre rena betongmaterial och ett referensmaterial av s.k. stabilt grus. Samtliga hade godkänd kornstorleksfördelning enligt danska bestämmelser. Provkropparna var inte vattenmättade från början, men hade fri tillgång till vatten under hela försöket. Resultatet av frysnigen visas i figur 16-31.



**Figur 16-31** Tjällyftning i tre betongmaterial (1, 2 och 4) och ett "stabilt grus" (SG) vid frysförsök i laboratorium. Medelvärden av dubbelprov. (Koch, 1996)

Betongmaterial 1 får betydligt mindre lyftning än de övriga tre materialen, mindre än hälften. Det beror sannolikt på att material 1 hade lägre finjordshalt än de andra, 2% jämfört med 4 och 5% (Koch, 1996). Koch summerar försöket med att det kan "inte avgöras om krossad betong är mer eller mindre tjälfarligt än stabilt grus".

Kalisch (1998) gjorde *fältförsök med frysning* och tining av vattenmättade konstruktioner med olika bärlagermaterial, bl.a. krossad betong och rivningsmaterial. Försöken, som beskrivs närmare i avsnitt 16.3.1, visade att krossad betong med högst 5% främmande material lyfte 5–8 mm jämfört med 5 mm för referensmaterialen basalt och gråvacka. Rivningsmaterial med liten andel svaga partiklar lyfte 20 mm och rivningsmaterial med stor andel svaga partiklar lyfte 25 mm. Lyftningarna på betongytorna och referensytorna gick tillbaka efter försökets slut, men ytorna med rivningsmaterial fick en kvarstående lyftning på 5 mm.

## 16.7 Värmeledning

Värmeledningen för hel betong är i första hand beroende av materialets densitet, av cementpastans och ballastens ledning samt av betongens fuktinnehåll. Därutöver inverkar härdningsgraden och temperaturnivån.

Cementpastans ledning är mycket fuktberoende, medan ledningen hos (vanlig) ballast i huvudsak är oberoende av fukt på grund av dess låga porositet. Betongballast av basalt har låg ledning medan dolomit och kalksten intar ett mellanläge och kvarts har hög ledning. (Ericsson 1985 och Betonghandbok 1997).

### Laboratorieresultat

Andersson et al. (1999) har bestämt värmeledning för krossad betong med blandat ursprung. Resultatet blev  $\lambda$ -tal mellan 0,5 och 1,12 W/(m·°C) beroende på fukthalt (tabell 16-13).

**Tabell 16-13** Värmeledning för krossad betong och några naturmaterial (data från Knutsson 1981 och Andersson et al. 1999)

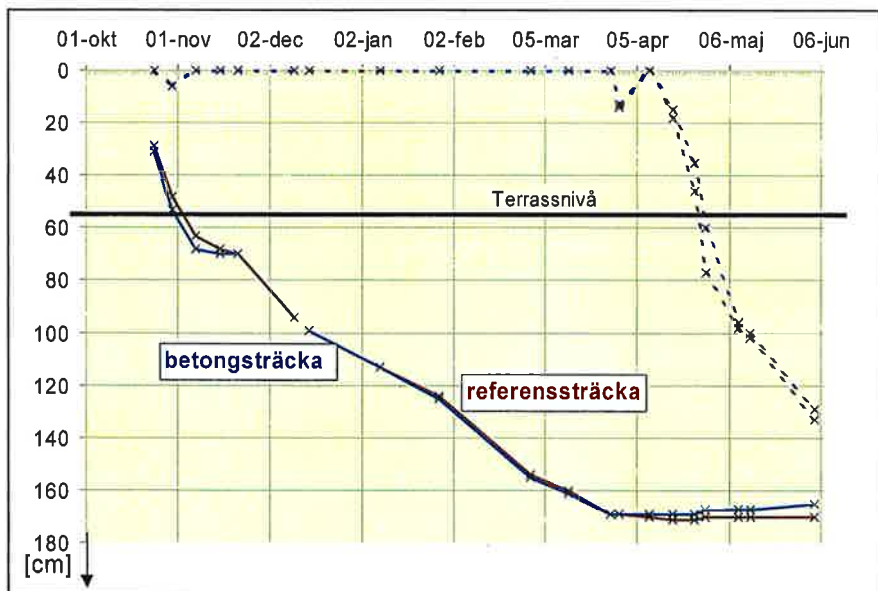
	Krossad betong (Andersson et al.)		Sandigt grus (Andersson et al.)		Berg	Morän, grus	Silt, lera
	(torr)	(våt)	(torrt)	(våt)			
Värmeledning, (W/m·°C)	0,50	1,12	0,55	1,81	3,7	2,1	1,4
Torr densitet, (t/m <sup>3</sup> )	1,76	—	2,04	—			
Skrymdensitet, (t/m <sup>3</sup> )	—	1,75	—	2,22	2,65	2,2	1,95
Fukthalt, (viktprocent)	—	12,2	—	6,4	?	?	?

För jämförelse har även värden för några naturmaterial angivits i tabellen. Skillnaden mellan den krossade betongen och de obundna naturmaterialen är inte så markant. I torrt tillstånd får betongen och gruset i stort sett samma  $\lambda$ -tal. Slaggrus och hyttsten som också studeras i detta projekt avviker betydligt mer, se kapitel 15 och 17.

## Tjälgränsmätningar i fält

För att undersöka vilken effekt en låg värmekonduktivitet har på tjäl djupet i vägen gjorde Vägverket Region Norr tjälgränsmätningar i väg 597 vid Luleå under vintern 1997/98. Där har flera provsträckor byggts med alternativa material i förstärkningslagret. Förutom krossad betong studerades hyttsten och järnsand – två material med dokumenterat låg värmekonduktivitet.

I samtliga provsträckor gjordes manuella mätningar med hjälp av tjälgränsmätare av typ Gandahl (1957) som monterats i vägkroppen. Resultatet av mätningarna i betongsträckan och i en referenssträcka med krossat berg i förstärkningslagret redovisas i figur 16-32.



*Figur 16-32 Tjäl djup Luleå vintern 1997/98 i provsträcka med förstärkningslager av krossad betong jämfört med referenssträcka med krossat berg. Streckad linje visar upptinningsdjupet. (data från Ihs, personlig kommunikation)*

Enligt mätningarna kan ingen skillnad utläsas mellan de båda materialen. Den skillnad i värmekonduktivitet som fanns i vått tillstånd vid laboratorieförsöken återspeglas inte här. Det beror antagligen på att materialen ligger torrt i provsträckorna.

## 16.8 Miljöpåverkan

Här diskuteras resultat från SGI:s totalhaltsbestämningar och lakförsök på krossad betong. Underlaget är ganska litet och resultaten varierande. Resultatet från några utländska undersökningar används också som jämförelse.

Syftet med redovisningen i detta avsnitt är att visa vilka ämnen som krossad betong kan innehålla. Vidare visas hur stora halter av dessa ämnen, som kan förväntas laka ut vid användning i vägkonstruktioner. Syftet är också att genom jämförelse med motsvarande resultat för naturmaterial visa vilken eventuell merbelastning som den krossade betongen ger. Någon värdering av sådana merbelastningar görs inte på annat sätt än genom jämförelser med gränsvärden för förorenat yt- och grundvatten.

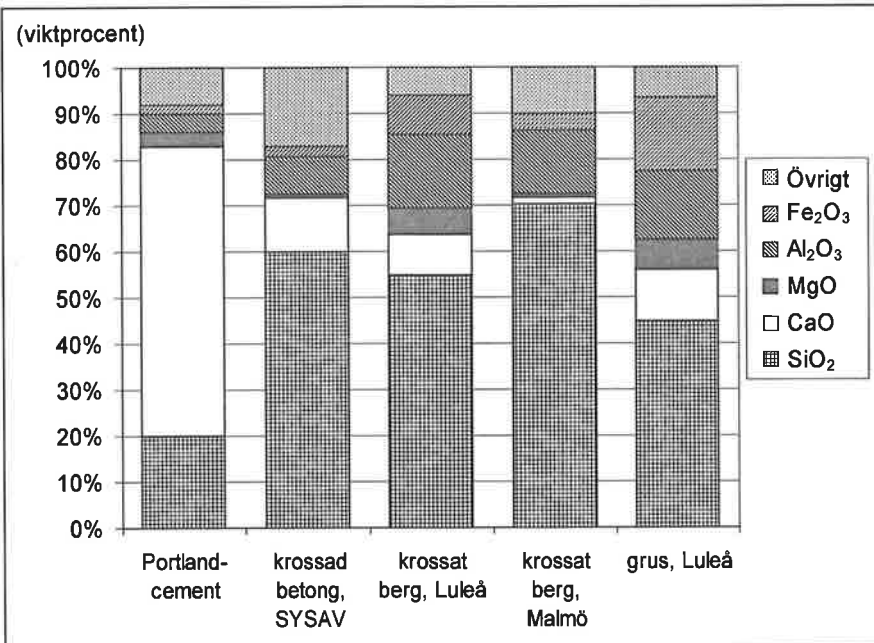
Slutsatserna från SGI:s provningar inom ALT-MAT-projektet är att utlakningen från icke förorenad betong är jämförbar med krossat berg och morän (Nilsson & Håkansson, 2000). Lakförsök och analys av totalhalt har gjorts på rivningsbetong med blandat ursprung. Resultaten har sedan jämförts med motsvarande för krossat berg (granit) och morän (granit och porfyr enligt Johansson, personlig kommunikation). Jämförelsen visar att av de undersökta ämnena arsenik, kadmium, kobolt, krom, koppar, nickel, bly och vanadin förekommer några i högre halter i de undersökta betongmaterialen än i naturmaterial. Dessa är i första hand krom, nickel och bly men ingen halt är alarmerande hög.

I en holländsk handbok om s.k. sekundära vägbyggnadsmaterial anger man att inga kritiska ämnen är kända i krossad betong. För rivningsmaterial med hälften betong och hälften annat stenmaterial anges att de kritiska ämnena är molybden, sulfat och polyaromatiska kolväten. (CROW, 1999).

För att bättre förstå vilka ämnen som kan förväntas laka ut från krossad betong följer här ett resonemang om de kemiska beståndsdelarna i betong och cement.

### **16.8.1 Kemisk sammansättning ("totalhalter")**

Betong består till ca en tredjedel av cement. Cement i sin tur har en kemisk sammansättning enligt figur 16-33. I figuren har också angivits sammansättningen för ett grus och två krossade bergmaterial som jämförelse. Det måste dock påpekas att stora naturliga variationer förekommer.



**Figur 16-33** Kemisk sammansättning av standard portlandcement, krossad betong, krossat berg och grus. Övrigt innebär t.ex.  $SO_3$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$  och  $TiO_2$ . (data från *Betonghandbok 1997*, *Lindgren 1998* samt detta projekt)

Figuren visar att huvudbeståndsdelarna är desamma, men att proportionerna varierar mellan materialen.

Förutom de ämnen som ingår i standard portlandcement är det intressant att studera vilka typer av tillsatsmedel som används och vad de innehåller. Följande uppgifter är hämtade från *Betonghandbok (1997)*:

- *Accelererande tillsatsmedel*: Lättlösliga oorganiska salter t.ex. klorider.  $CaCl_2$  är mycket effektivt och sedan länge det mest använda. Numera används det endast i inomhuskonstruktioner på grund av korrosionsrisk på armeringen. Aktuell halt är 0,2–0,7% av cementvikten. ( $CaCl_2$  ökar emellertid krympningen och krympningen hos betongen).
- *Retarderande tillsatsmedel*: Lättlösliga, organiska föreningar speciellt lignosulfonater och salter av hydroxykarboxylsyror eller på fosfater. Socker.
- *Vattenreducerande och flyttillsatsmedel*: Lignosulfonat. Sulfonerade melamin- eller naftalenformaldehydkondensat.
- *Luftporbildande tillsatsmedel*: Vinsolharts eller tensid. Tidigare även lignosulfonat. (En nackdel är dock att tryckhållfastheten minskar.)
- *Frysponktnedsättande tillsatsmedel* (s.k. köldbetsong): Kalciumkarbonat, natrium- och kalciumnitrat, urea.
- *Expanderande tillsatsmedel*: Aluminiumpulver.
- *Korrosionsinhiberande tillsatsmedel*: Kromat, dikromat, molybdat, volframot och nitrit.

Klorider är relativt vanliga i betongkonstruktioner. Antingen har de tillförts i den färska betongen i form av accelererande tillsatsmedel eller så har de använts

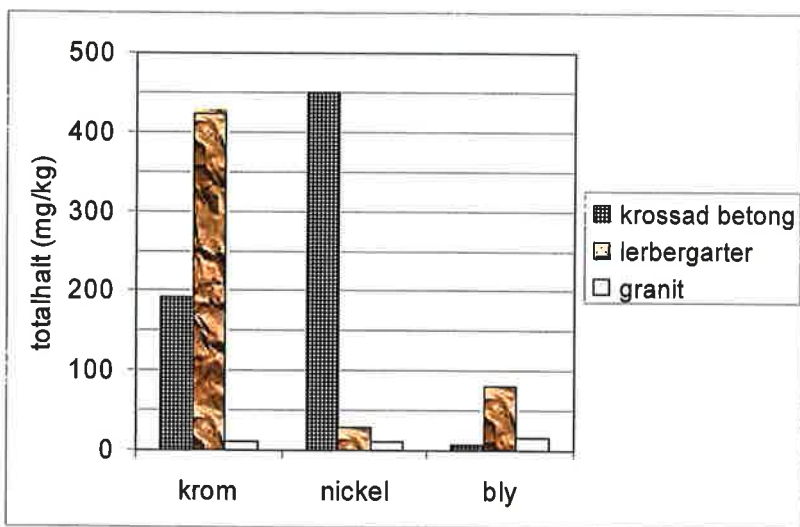
för halkbekämpning på eller kring konstruktionen. Borring genom betongen och analys av borrhaxet kan ge en s.k. kloridprofil, vilken visar om kloriderna kommer inifrån eller bara finns i ytskiktet.

Okarboniserad betong har högt pH-värde och kan därmed neutralisera försurade jordar (Molin et al., 1996). Vid karboniseringen som sker i betonglagret inne i vägkonstruktionen sjunker pH-värdet.

En rivningsbetong kan innehålla en viss andel föroreningar både i "makroformat" och "mikroformat". Exempel på makroföroreningar är gips, plast, gummi, trä och växter. Exempel på mikroföroreningar är tungmetaller, polyaromatiska kolväten (PAK) och olja.

## Tungmetaller och spårämnen (totalhalt)

Innehållet av mikroföroreningar i krossad betong har analyserats i flera fall. Det är främst den totala halten tungmetaller och spårämnen som brukar studeras. Till exempel gjordes inom ramen för detta projekt totalhaltsbestämning på den krossade betong, som levererades av SYSAV till provsträckor utanför Malmö (Törningevägen). Resultatet från dessa undersökningar visas i figur 16-34. (Observera skalan, 500 mg/kg = 0,05%).



**Figur 16-34** Innehåll av krom, nickel och bly i en krossad rivningsbetong med blandat ursprung. Jämförelse med några bergarter. Totalhalt i torr substans. (data från detta projekt samt Åslund 1994)

Figuren jämför *totalhalter* av krom, nickel och bly i krossad betong med medeltotalhalter i några geologiska bildningar angivna av Åslund (1994). Betongen innehöll mycket mer nickel än de båda bergmaterialen, medan lerbergarter såsom sedimentära skiffrar innehöll mer än dubbelt så mycket krom och bly som betongen. Graniten innehöll små halter av alla tre ämnena.

Figur 16-34 visar bl.a. innehållet av krom, nickel och bly i *en* svensk rivningsbetong. För att illustrera vilka variationer som förekommer mellan olika betongmaterial har en sammanställning gjorts i tabell 16-14. Den visar skillnaden mellan olika länders betong, men också mellan olika betongmaterial inom ett land samt mellan olika betongleveranser från samma leverantör och mellan två betongprov från samma byggnad.

**Tabell 16-14** Sammanställning av totalhalt i mg/kg torr substans för olika krossade betongmaterial (data från CROW 1994, Kälvesten 1996, Wahlström et al. 2000, Grönholm 1999a samt detta projekt)

Ämne	Nederl. (CROW)	Nyköping (Kälvesten)		Finland (Wahlström et al.)		Ekeby (Grön- holm)	Björnsby (Grön- holm)	Törringev. (detta projekt)
	Blandat rivning	Industri Prov A	Industri Prov B	hus- rivn	"slab"	Blandat SYSAV	Boden- husen	Blandat SYSAV
Al	25 300			12 900	14 400	48 700	68 800	
Cd	0,13–1	2,75±0,14	0,137±0,002	2,6	3,3	0,22	0,11	0,154±0,005
Cr	30–160	87,9±9,0	55,5±5,0	20	29	178,88	90,85	191±2
Cu	7/20	9,82±0,37	7,63±0,15	15	18	22,46	21,40	17,4±0,1
Hg	0,10	<0,0433	<0,0438	<0,02	<0,02	<2,26	<0,0398	<0,570
Mo	2/3	<6,18	<6,18	<2	<2	<6,00	<5,72	<5,46
Ni						417,94	21,35	449±1
Pb	11–50	6,36±0,19	5,91±0,03	11	10	9,78	13,35	7,43±0,78
Zn	51–100	52,3±0,7	41,8±1,1	59	44	49,53	85,40	37,1±0,2

Tecknet < har använts när halten varit lägre än detektionsgränsen.

Av tabellen framgår att variationerna mellan olika betongmaterial är stora. Störst verkar skillnaderna vara inom respektive land. Det gäller både de svenska och de holländska resultaten. De finska däremot visar en liten spridning, trots att det är betong med olika ursprung. Det ena är en rivningsbetong och det andra är en s.k. restbetong från en betongvarufabrik. Möjligheten finns dock att samma ballast- och cementtyp har använts i de båda betongmaterialen.

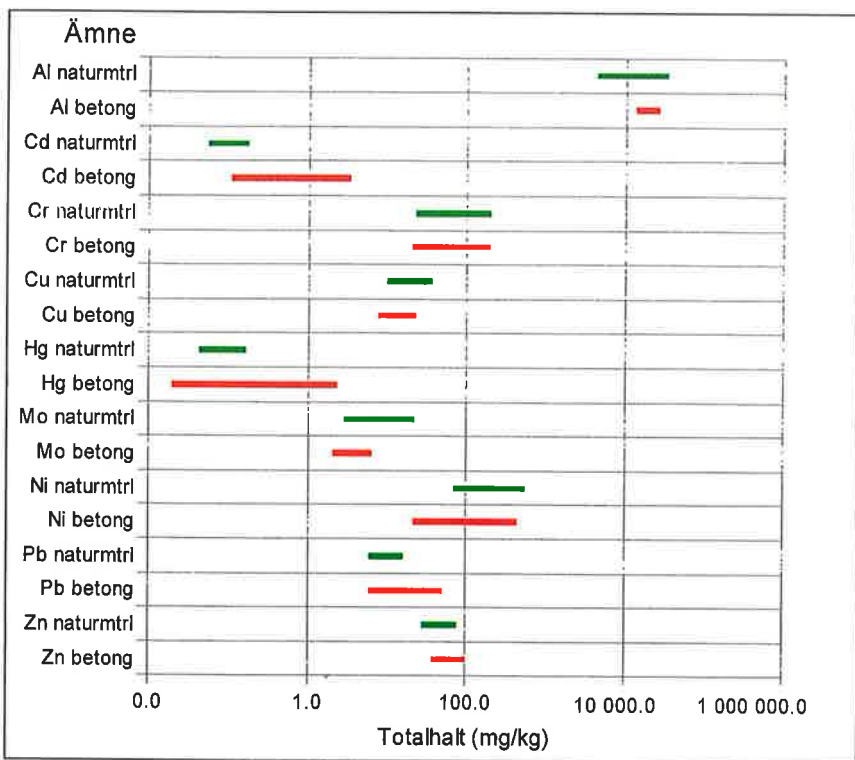
Det är intressant att jämföra materialen från Ekeby och Törringevägen. De kommer båda från SYSAV:s upplag av rivningsbetong och kan alltså ha haft mycket olika användningsområde, men de har samma geografiska ursprung (sydvästra Skåne). Det är därför troligt att ballasten i dessa betongmaterial har mer gemensamt med varandra än de har med ballasten i Bodentrakten. Enligt tabellen innehåller Skånematerialen mer krom och nickel, men mindre zink än Bodenmaterialiet. Nyköpingsmaterialiet innehåller mindre krom, koppar och bly än de båda andra svenska materialen. De använda cementsorterna spelar naturligtvis också en roll. Det skulle vara intressant att kartlägga varifrån de olika betongstationerna tar sina råvaror, dvs. både ballast och cement.

När de svenska och de utländska materialen jämförs är det endast innehållet av aluminium och bly som skiljer dem markant. Förklaringen ligger troligtvis även här i de olika råvarorna.

Det är också intressant att göra en större jämförelse mellan krossad betong och naturmaterial än den i figur 16-34. Därför har totalhalter av olika ämnen i några naturmaterial samlats från olika forskningsrapporter. I figur 16-35 jämförs



dessa totalhalter med de i tabell 16-14 angivna totalhalterna för betongmaterial. Observera den logaritmiska skalan på x-axeln.



**Figur 16-35** Intervall för totalhalt av olika ämnen i åtta krossade betongmaterial och tolv naturmaterial. (data från CROW 1994, Åslund 1994, Kälvesten 1996, Wahlström et al. 2000, Lindgren 1998, Grönholm 1999a samt detta projekt)

I figuren ingår också analysresultat från detta projekt, nämligen analyser på det krossade berg som levererades av SYSAV till referenssträckor på Törningevägen.

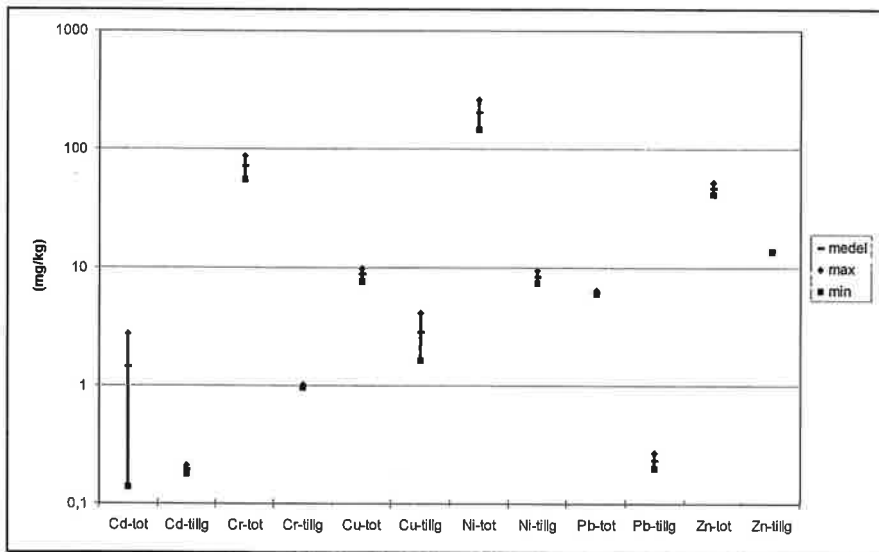
Av figuren framgår att betongen visar större spridning för totalhalter av kadmium, kvicksilver, nickel och bly och kan också innehålla mer av dessa ämnen än vad naturmaterialen (tio bergkrossmaterial och två moräner) gör. Betongens totalhalt av övriga ämnen ligger på samma nivå eller lägre än motsvarande för naturmaterialen.

Såsom tidigare betonats i avsnitt 11.1 om provningsmetoder för miljöpåverkan säger inte totalhalt något om hur mycket av ett ämne som verkligen kommer att laka ut. Därför har *lakningsresultat* från laboratorie- och fältförsök, vilka har beskrivits i olika publikationer, sammanställts i de två följande avsnitten.

## 16.8.2 Lakningsegenskaper i laboratorium

### Utlakbara tungmetaller och spårämnen (tillgänglig mängd)

Den mängd som är tillgänglig för lakning är inte samma sak som total halt. Det framgår tydligt av den sammanställning av totalhalt och tillgänglig mängd av några tungmetaller i två betongmaterial som har gjorts av Andersson et al. (1999) (figur 16-36).



Figur 16-36 Totalhalt och tillgänglig halt av Cd, Cr, Cu, Ni, Pb och Zn i två betongkrossmaterial (Andersson et al., 1999)

Figuren visar data för dels rivningsbetong från en industribyggnad i Nyköping (Kälvesten, 1996), dels rivningsbetong från St Larsskolan i Linköping (Johansson et al., 1996). Av diagrammet framgår att för krom, nickel och bly är skillnaden stor mellan totalhalt och tillgänglig halt, dvs. dessa ämnen är hårt bundna till materialet.

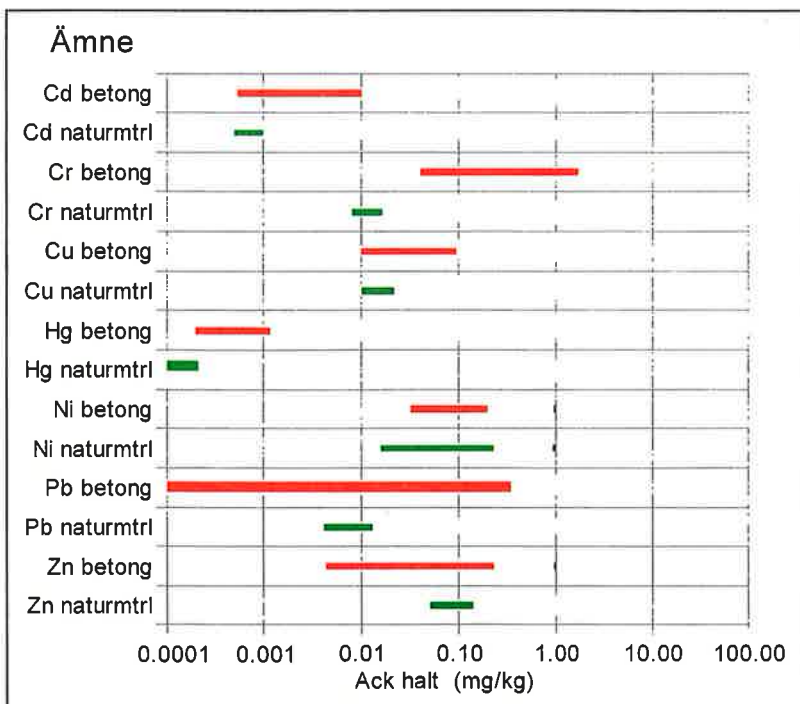
### Utlakning av tungmetaller och spårämnen vid tvåstegs kontrolltest och kolonnförsök

Det har också gjorts tvåstegs kontrolltest (prEN 12457) på ovanstående två material. Resultaten visar en tydlig skillnad mellan materialen. Betongen från St Larsskolan lakar ut mer Cd, Cr, Cu, Pb och Zn än betongen från industribyggnaden i Nyköping. I tabell 16-15 har resultaten för de två materialen kompletterats med resultaten för några andra betongmaterial.

**Tabell 16-15** Sammanställning av ackumulerad halt i mg/kg torr substans vid lakning enligt prEN 12457 av olika krossade betongmaterial (data från Johansson et al. 1996, Kälvesten 1996, Wahlström et al. 2000, Grönholm 1999a samt detta projekt)

Ämne	Linköping (Johansson et al.)	Nyköping (Kälvesten)	Finland (Wahlström et al.)			Ekeby (Grönholm)	Törringe (detta projekt)
	husrivn	Industri, 2 prov	husrivn	"slab"	Jnv- sliprar	Blandat SYSAV, 4 prov	Blandat SYSAV
Cd	0,01	0,001 0,001	<0,001– 0,02	<0,001– 0,005	<0,001	0,0007±0,00016	<0,0005
Cr	1,71	0,148 0,157	0,12–0,42	0,22–0,29	0,04	0,527±0,31461	0,2864
Cu	0,12	0,01 0,0121	0,10–0,27	0,05–0,08		0,069±0,02873	0,019
Hg	0,00216					0,001±0,00077	<0,0002
Ni	0,06	0,2 0,36				0,063±0,02473	0,0323
Pb	0,05	0,011 0,01	<0,02– 0,05	<0,02– 0,03	<0,02	0,139±0,26352	0,00733
Zn	0,31	0,05 0,05	0,04–0,5	<0,1–0,5	<0,05	0,017±0,01268	0,0108

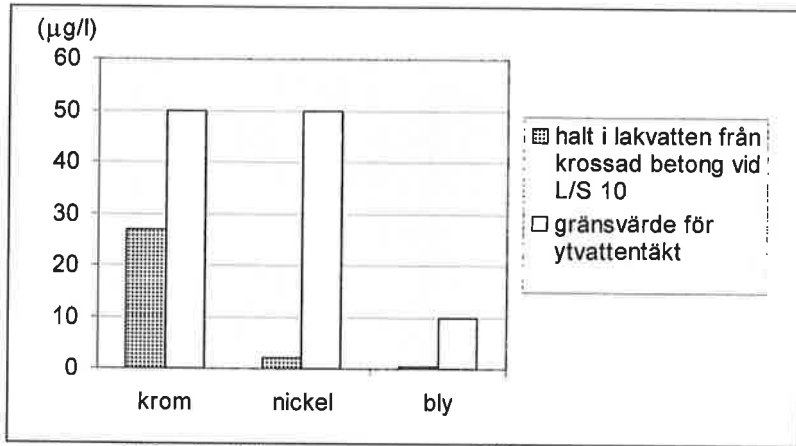
I tabellen kan framförallt noteras att de utlakade halterna är åtminstone en tiopotens lägre än de tillgängliga halterna som redovisats i figur 16-36. Spridningen är fortfarande stor. Även för resultaten från denna lakningsmetod har en jämförelse gjorts med naturmaterial, vilken redovisas i figur 16-37.



**Figur 16-37** Intervall för ackumulerad halt av några tungmetaller vid lakning enligt prEN 12457 på sju betongmaterial och fem naturmaterial (data från Johansson et al. 1996, Kälvesten 1996, Wahlström et al. 2000, Grönholm 1999a samt detta projekt)

Figuren anger aktuella intervall för de utlakade mängderna från krossad betong och några naturmaterial (tre bergkrossmaterial och två moräner). För samtliga undersökta ämnen utom nickel visar betongmaterialen större spridning än naturmaterialen. För krom och kvicksilver ligger betongens intervall klart högre än för naturmaterial. För övriga ämnen är betongens intervall så stort att det täcker in de undersökta naturmaterialens variation.

En jämförelse av resultaten från kolonnförsök kan också göras. Kolonnförsök med L/S 10 anses simulera lagningsförloppet på en plats under flera hundra år. I figur 16-38 jämförs halten krom, nickel och bly från en krossad betong med de gränsvärden som anges för ytvattentäcker. Dessa värden används här, eftersom det inte finns några svenska gränsvärden för hur mycket vägmateriäl får laka ut.



**Figur 16-38** Resultat från kolonnförsök med L/S 10 på rivningsbetong med blandat ursprung, material till Törringevägen. Jämförelse med SLV:s gränsvärde för ytvattentäkt. (data från detta projekt samt Åslund 1994)

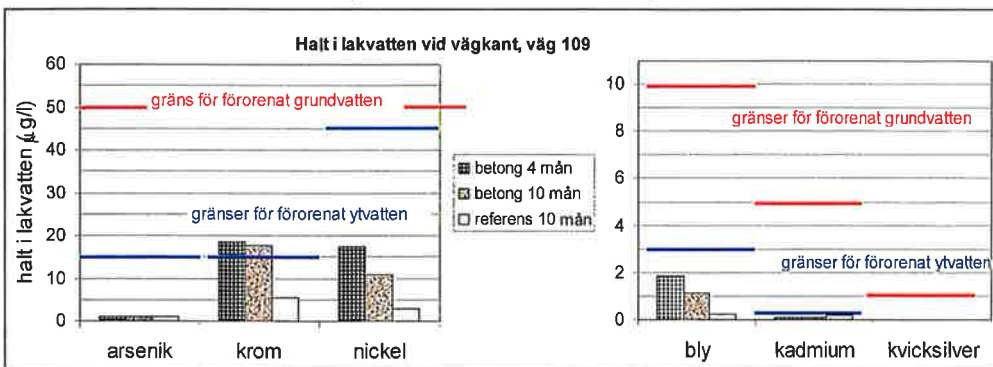
Resultatet blir att lakvattnet som hämtas direkt från kolonnförsöken klarar Livsmedelsverkets gränsvärden för ytvattentäkt (SLV, 1993). Därutöver förekommer utspädning och fastläggning innan dessa föroreningar når en vattentäkt.

### 16.8.3 Lakningsegenskaper i fält

#### Tungmetaller och spårämnen

Krossad betongs lakningsegenskaper i fält har bara undersökts i ett fåtal fall i Sverige. Två undersökningar beskrivs av Grönholm (1999a). I båda fallen handlar det om provsträckor med krossad betong i förstärkningslagret, där lakvatten samlades in från provsträckorna och från närliggande referenssträckor. Konstruktionerna har beskrivits i avsnitt 16.2.3 och betongmaterialet i avsnitt 16.2.2.

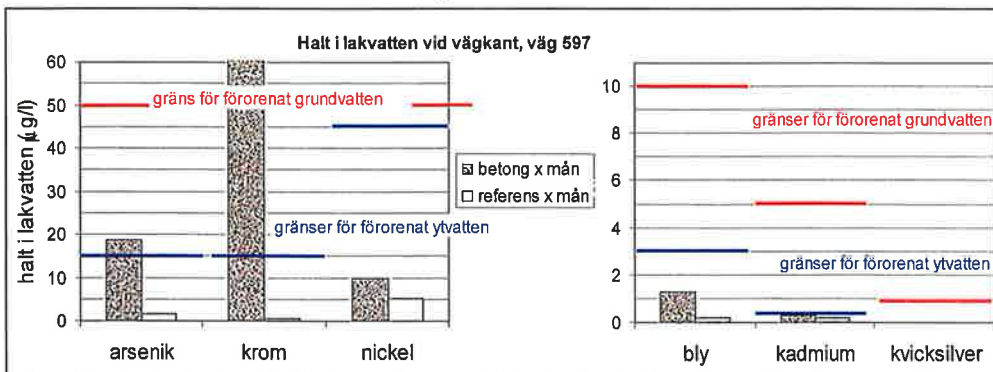
Lakvattnet analyserades därefter med avseende på tungmetallinnehåll. Figur 16-39 visar resultatet för väg 109 vid Ekeby där lakvattnet analyserades vid två tillfällen, 4 och 10 månader efter utläggning av betongmaterialet. För referenssträckan finns bara resultat från provtagning efter 10 månader.



**Figur 16-39** Halt av tungmetaller i lakvatten från provsträckor med krossad betong och referenssträckor med krossat berg på väg 109 vid Ekeby. (Gränser för förorenat grundvatten och ytvatten enligt Livsmedelsverket. Lakdata från Grönholm, 1999a)

För jämförelse är Livsmedelsverkets gränser för förorenat grundvatten och ytvatten inlagda. Av figurerna kan utläsas högre halter av krom, nickel och bly i betongsträckans lakvatten än i referenssträckans lakvatten. Kromhalten i betongsträckans lakvatten överstiger gränsen för förorenat ytvatten ( $18 > 15 \mu\text{g/l}$ ). Övriga halter ligger under eller långt under de angivna gränserna. Halten kvicksilver låg under detektionsgränsen i båda sträckorna.

Resultat från lakvatteninsamlingen vid Björnsbyvägen och efterföljande analyser illustreras i figur 16-40.



**Figur 16-40** Halt av tungmetaller i lakvatten från provsträckor med krossad betong och referenssträckor med krossat berg på väg 597 vid Luleå. Uppgift om provtagningstidpunkt saknas. (Gränser för förorenat grundvatten och ytvatten enligt Livsmedelsverket. Lakdata från Grönholm, 1999a)

Även här uppmättes högre halter av krom, nickel och bly och dessutom arsenik i lakvattnet från betongsträckan jämfört med lakvattnet från referenssträckan. Arsenik- och kromhalterna översteg gränsen för förorenat ytvatten. Kromhalten översteg dessutom gränsen för förorenat grundvatten. Nickel-, bly- och kadmiumhalterna ligger under eller mycket under gränsvärdena. Kviksilverhalten låg under detektionsgränsen för båda sträckorna.

Observera att i båda fältförsöken togs lakvattenproven i brunnar vid vägkan- ten, dvs. ingen hänsyn har tagits till efterföljande utspädning eller fastläggning.

## Kalkutfällningar och alkaliskt dräneringsvatten

Enligt amerikanska undersökningar i laboratorium och fält ger krossad återvun- nen betong i vägkroppen upphov till kalkutfällningar samt höjt pH i dränerings- vattnet. Bruinsma et al. (1997) redogör för egna och andras försök bl.a. Ford 1987, Muethel 1989 och Tamirisa 1993 vilka beskriver förhållanden i Ohio, Mi- chigan och Minnesota.

Kalkutfällningarna, som enligt författarna är ett oundvikligt resultat av kom- binationen krossad betong, vatten och luft, har visat sig reducera fiberdukars genomsläpplighet. Krossad betong har också åstadkommit ackumulering av ut- fällningar och andra material i täckta vägdräneringssystem (Standard specifica- tions for construction i Minnesota DOT 1983). Emellertid kan mängden kalci- umhydroxid, som är tillgängligt för lösning, reduceras genom att den reaktiva ytarean i betonglagret minskas t.ex. genom att finjorden elimineras.

De amerikanska fältstudierna visar att pH-värdet i dräneringsvatten från bär- lager av krossad betong initialt är mycket alkaliskt med värden mellan 10 och 12. Med tiden sjunker pH-värdet till samma nivå som dräneringsvatten från na- turmaterial, dvs. ca 8. Sänkningen av pH återspeglar utfällningen av kalk. Man har uppmätt förhöjda pH-värden under långvariga våta perioder, t.ex. vår och höst, vilket pekar på att kontakttiden mellan vatten och betong är en viktig fak- tor. Därför gör användningen av öppna graderingar, som minimerar uppehålls- tiden för dräneringsvattnet i bärlagret, att pH-nivån och utfällningarna minskas.

Fenomenet med kalkutfällningar är intressant, eftersom dessa utgör en nack- del för fiberdukar och ledningar i angränsande dräneringssystem, men samtidigt är det antagligen just dessa utfällningar som ger hållfasthetsökningen vilken har noterats i olika försök.

### 16.8.4 Jämförelse mellan laborativvärden och fältvärden

Det vore önskvärt att för ett och samma vägobjekt kunna jämföra resultatet från lakvatteninsamling i fält med laboratorielakning (kolonnförsök) på betongen som levererats till vägobjektet. Tyvärr kan det inte göras för väg 597 eftersom inga lakförsök gjordes på den betongen. Egentligen går det inte heller att göra för väg 109 eftersom inga kolonnförsök utfördes på det materialet.

Eventuellt kan en jämförelse tillåtas mellan väg 109:s fältresultat (figur 16- 39) och de kolonnförsök som utfördes på betongen till Törringevägen (figur 16- 38). Anledningen är att båda materialen härrör från SYSAV:s upplag av krossad betong.

En sådan jämförelse visar lägre kromhalt, men högre nickel- och blyhalt i lakvattnet från fältförsöket än i lakvattnet från laboratieförsöket. Skillnaden i blyhalt kan kanske bero på trafikens inverkan. Den kan också bero på en pH- sänkning i lakvattnet eftersom sjunkande pH medför ökande blyhalt enligt Ås- lund (1994) m. fl. Eller så är det helt enkelt skillnad på betongmaterialen. Den

senare förklaringen är kanske mest trolig eftersom lakförsök enligt tvåstegs kontrolltest visade högre nickel- och blyhalter för Ekeby-materialen, dvs. väg 109 (tabell 16-15).

## 16.9 Sammanfattning – krossad betong

Termen krossad betong används här när materialet innehåller maximalt ca 10% föroreningar (t.ex. lättbetong, tegel, trä, papper, plast och bitumen) även om ursprunget är bygg- och rivningsavfall.

Det går inte att fastställa egenskaper som gäller för alla typer av krossad betong klassificerad som en enda materialgrupp. Betongens *ursprung* och betongens *hantering* påverkar det krossade materialets egenskaper.

Med ursprung menas den ursprungliga betongens materialparametrar såsom tryckhållfasthet och ingående ballast och cementtyp men också åldern, användningsområdet och miljön för den ursprungliga konstruktionen. Det kan till exempel vara betong från bostadshus, industribyggnader eller vägbeläggningar. Det kan vara betong från utomhus- eller inomhuskonstruktioner.

I hanteringen är rivnings sätt, krossning och rensning viktiga faktorer. Andelen *främmande material* i den krossade produkten har stor betydelse för dess egenskaper. Svaga partiklar såsom lättbetong och tegel men även trä, gips och armering försämrar kvaliteten. För att rivningsbetong ska kunna användas för högkvalitativa ändamål måste därför selektiv rivning genomföras. Kemiskt förorenad betong ska inte användas för återvinning.

### Deformationsegenskaper och hållfasthetstillväxt

Enligt laboratorieförsök har krossad betong initialt ungefär samma *styvhet* som krossat berg och är mycket styvare än sand. Styvheten uttryckt som resilientmodul från treaxialförsök varierar mellan 200 och 480 MPa för undersökta betongmaterial beroende på lastförhållanden. Styvheten ökar vid belastning men är inte så lastberoende som hos krossat berg. *Bärförmågan* varierar med ursprunget och är lika bra eller sämre än för krossat berg.

Enligt fältförsök har krossad betong initialt ungefär samma styvhet som krossat berg uttryckt som *lagermodul* från fallviktsmätning. Statisk plattbelastning har gett blandade resultat.

Deformationsegenskaperna varierar med ursprunget. Porös cementpasta liksom orenheter försämrar. Kornstorleksfördelning med stor största kornstorlek liksom bra gradering (krökningstal runt två) är positiv precis som för naturballast.

Krossad betongs *styvhet ökar med tiden* både vid laboratorie- och fältförsök. I laboratorium har 11–76% ökning av resilientmodulen uppmätts under den första månaden. Spridningen beror troligen på olika provningsförfarande vid holländska respektive svenska försök. I fält visar fallviktsmätningar och dynamisk plattbelastning att styvheten uttryckt som lagermodul fördubblas eller trefaldigas un-



der de första tre månaderna. Resultaten från statisk plattbelastning är inte lika entydiga.

Låg karbonatiseringsgrad i den ursprungliga betongen ger snabbare karbonatisering och resulterande styvhetsökning i vägen. Mycket tegel och mycket naturmaterial försämrar eftersom dessa material inte karbonatiseras själva. Lång kontakttid mellan vatten och betongmaterial samt stor partikelyta dvs. en tät gradering med mycket finmaterial är gynnsamt.

### Beständighet mot mekanisk påverkan och klimatpåverkan (temperaturväxlingar)

Krossad betong får sämre beständighetsvärden i form av större finmaterialbildning och större sönderfall än grus och krossat berg vid provning med standardiserade laboratoriemetoder.

Exempel på värden vid *mekanisk påverkan* är kulkvarnsvärde 23–53 och Los Angeles-tal 17–39 beroende på ursprung samt micro-Devalvärde 14–23 (två värden). Tung instampning vid bestämning av packningsegenskaper ger betydande nedkrossning. Beständigheten mot mekanisk påverkan beror på kornform och indirekt på krossningssätt, typ av kross och antalet krossteg. Ju flisigare partiklar desto sämre beständighet. Beständigheten påverkas också av renheten så att mycket tegel och lättbetong försämrar återvinningsprodukten. Högre hållfasthet i ursprungsbetongen ger bättre nötningsbeständighet.

Exempel på värden vid *frys-töprovning* med vanligt vatten är 8–17% sönderfall beroende på ursprung och vid provning med saltvatten 15–59%.

Om betongmaterialet är rent blir finmaterialet som bildas inte plastiskt utan deltar istället i den hållfasthetsökning som nämnts tidigare.

I de provsträckor som följs upp i Sverige uppvisar lager av krossad betong ännu inga tecken på nedbrytning eller anrikning av finmaterial. De äldsta har funnits under tre år. I stället har en ökning av kornstorleken noterats, som en följd av karbonatisering.

### Tjällyftningsbenägenhet

Krossad betong utan föroreningar är inte tjällyftande vid *frysförsök* i laboratorium om kornstorleksfördelningen är gynnsam, dvs. andelen finmaterial är mindre än 10%.

Vattenabsorption och kapillaritet är egenskaper som har anknytning till tjällyftningsbenägenhet. Krossad betong har enligt litteraturen ca tio gånger högre *vattenabsorption* än naturmaterial. Olika källor hävdar dock att vattenabsorption bestämd enligt standardmetoder ger för höga värden för krossad betong, eftersom även adsorberat vatten på partiklarnas ytor inkluderas.

Grov krossad betong (8–32 mm) har mycket lägre *kapillaritet* än krossat berg, medan fin betong (0–4 mm) har ungefär dubbelt så stor kapillaritet som naturgrus. (Resultat från en provning).

I *fält* ger krossad betong ungefär samma tjällyftning som krossat berg. Rivningsavfall med ca 45% främmande material, t.ex. tegel och gips, ger däremot mycket större lyftning varav en del är kvarstående. Förstärkningslager av krossad betong visar ingen försämring av styvheten under tjällossning.

## Värmekonduktivitet

Krossad betong har i torrt tillstånd ungefär samma värmekonduktivitet som grus ( $\lambda = 0,5 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ ). I vått tillstånd är betongen lite mer isolerande än gruset. (Resultat för ett material).

Vid tjäldjupsmätning i sträckor med krossad betong i förstärkningslagret var tjäldjupet detsamma som i sträckor med krossat berg.

Värmekonduktiviteten hos lager av krossad betong ger ingen anledning att begränsa användningen, men heller ingen extra fördel, t.ex. isolerande effekt, jämfört med naturmaterial.

## Miljöpåverkan

Betong består av ballast, cement och eventuella tillsatsmedel. Det som skiljer i innehåll mellan krossad betong och krossat berg är därför cementet, eventuella tillsatsmedel samt eventuella föroreningar.

En rivningsbetong kan innehålla en viss andel föroreningar både i "makroformat" och "mikroformat". Exempel på makroföroreningar är gips, plast, gummi, trä och växter vilka blandats med betongen vid rivning eller annan hantering. Exempel på mikroföroreningar är tungmetaller, polyaromatiska kolväten (PAK) och olja vilka kan härröra från den ursprungliga betongkonstruktionens användning. Klorider kan ha tillförts som accelererande tillsatsmedel eller använts vid halkbekämpning av den ursprungliga konstruktionen.

Enligt laboratorieförsök har krossad betong utan föroreningar lakningsegenskaper som motsvarar de för krossat berg och morän.

Vid insamling och analys av lakvatten från två provsträckor med husrivningsbetong var halten krom, nickel och bly, och i ena fallet även arsenik, större i lakvatten från betongsträckor än från sträckor med krossat berg. Lokalt kan alkaliskt dräneringsvatten uppkomma.

## Användning

Enligt nuvarande VÄG 94 kan ren krossad betong användas som bankfyllnads-material av materialtyp 2, som skyddslager och som förstärkningslager. Krossad betong kan också användas i bärlager men inte generellt. Det bör inte användas i konstruktioner med tunna bundna lager, där stora trafikbetingade laster kan förväntas i bärlagret.

När krossad betong används som förstärkningslagermaterial kan samma E-moduler användas vid dimensionering som för krossat berg. En särskild undersökning av det aktuella materialet, tillsammans med kunskap om den planerade konstruktionen kan dessutom ge möjlighet att använda ett högre värde på modulen. Därigenom kan den hållfasthetstillväxt som materialet uppvisar utnyttjas.

## 17 Hyttsten

- 17.1 Faktorer som påverkar hyttstenens egenskaper 239
- 17.2 Deformation vid belastning 240
- 17.3 Hållfasthetstillväxt 241
- 17.4 Beständighet 241
- 17.5 Tjällyftningsbenägenhet 241
- 17.6 Värmeledning 242
- 17.7 Miljöpåverkan 242
- 17.8 Sammanfattning – hyttsten 244

Detta kapitel ska endast ses som en inledning till fortsatt arbete. Avsikten är att i fortsättningen inventera både svensk och utländsk litteratur om hyttstens egenskaper samt bearbeta resultat från utförda och planerade provningar av materialet vid VTI.

Följande citat från 1987 får tjäna som bevis för att hyttsten sedan gammalt betraktas som ett (nästan) konventionellt vägmateriäl. "...it can be said of these materials that they have almost entirely lost their 'marginal' quality. This is the case with blast furnace slag and steel wastes." (Giannattasio & Marchionna, 1987).

### 17.1 Faktorer som påverkar hyttstenens egenskaper

Hyttsten är luftkyld masugnsslagg, dvs. en restprodukt från järnframställning. Därför har råvarorna och tillverkningsprocessen, framförallt avkyllningen, betydelse för den slutliga produktens egenskaper.

*Råvarorna* t.ex. karaktären hos järnmalm och tillsatt slaggbildare påverkar den kemiska sammansättningen. Den kemisk-mineralogiska sammansättningen påverkar i sin tur hållfasthetstillväxten. Enligt Höbeda (1976) kunde svensk hyttsten på 1970-talet vara ganska porös och ha dålig hållfasthet, vilket berodde på att högvärdiga malmer användes.

Kalkrik basisk slaggsälta kan ge obeständig hyttsten och bör istället avkylas snabbt till hyttsand eller pelletiserad masugnsslagg. För svensk hyttsten är emellertid risken för kalksönderfall liten eftersom den i regel inte är höggradigt basisk (Höbeda, op. cit.).

*Avkyllningssättet* vid framställningen påverkar både kornstorlek, porositet och hållfasthetstillväxt.

Den valda *graderingen* har stor betydelse för det färdiga hyttstenslagrets nedkrossningsbenägenhet. Betydelsen är större för ett lager med hyttsten än för ett lager med konventionellt bär- eller förstärkningslagermaterial (Höbeda, op. cit.).

Korttidsvariationen hos hyttstenens egenskaper är inte större än hos krossmaterial från bergtäkter. Detta förklaras av en kontrollerad tillverkningsprocess.

Långtidsvariationen (månadsvis) kan däremot vara större beroende på förändringar i råvarorna, vilket går att förutse i viss mån. (Höbeda, op. cit.).

### Tillverkningsprocess (efter Höbeda, 1976)

Vid masugnsprocessen matas koks, järnmalm i form av sintrad slig samt slaggbildare (oftast kalk) in i toppen på masugnen medan het blästerluft blåses in i dess nedre del. Koksen fungerar som bränsle och åstadkommer en reducerande atmosfär. Kalken sänker smältpunkten hos de silikatiska beståndsdelarna i malmen och resultatet blir att en lättflytande slaggsmlta bildas, som tar upp oönskade komponenter som finns i järnet. Slaggsmltan är lättare än det smälta järnet och flyter ovanpå detta. Med jämna intervall tappas slaggen från masugnen in i skänkar som fraktas bort. Alternativt får slaggen rinna kontinuerligt ner i en ränna med strömmande vatten.

Avkylningssättet bestämmer vilken typ av slaggsprodukt som uppkommer. *Lufkyld masugnsslagg (hyttsten)* erhålls när smältan hålls ut lagervis i öppna bassånger och varje lager får svalna långsamt. Vattensprutning av den varma slaggen utförs ofta för att skapa temperaturspänningar som leder till sprickbildning och enklare losstagning. Den färdiga hyttstenen bearbetas sedan ytterligare genom krossning och siktning till önskvärd kornstorlek.

Vid direkt vattenkylning av slaggen t.ex. i strömmande vatten erhålls en hastig avkylning som spränger sönder slaggen i små partiklar. Denna produkt kallas *vattenkyld granulerad masugnsslagg (hyttssand)*.

*Expanderad masugnsslagg* är en porös produkt med goda isoleringsegenskaper som erhålls om kylningen görs med en kontrollerad liten mängd vatten.

*Pelletiserad masugnsslagg* bildas också genom expansion vid lätt vattenbesprutning. Pelletiseringen utförs i en roterande skovelförsedd trumma som slår sönder slaggen till små kulformade partiklar.

Mängden masugnsslagg som bildas beror på malmens järnhalt. Ju lägre järnhalt desto mer slaggs erhålls.

## 17.2 Deformation vid belastning

Hyttsten från SSAB i Luleå har undersökts med hjälp av dynamiska treaxialförsök. Materialet var mycket styvt och erhöll minst lika höga resilientmoduler som referensmaterialet som var krossad granit. Stabiliteten uttryckt som ackumulerad permanent deformation var åtminstone initialt betydligt sämre än för referensmaterialet. Med ledning av provningsresultaten rekommenderas materialet i första hand till förstärkningslager. (Ydrevik, 1998).

Hyttsten från SSAB Merox i Oxelösund har också provats med dynamiska treaxialförsök. Resultatet blev även här resilientmoduler av samma storlek som för krossad respektive okrossad granit. Det noterades att hyttstenen var mindre spänningsberoende än de båda bergmaterialen. Stabiliteten var även för denna hyttsten sämre än för den krossade graniten. Däremot var stabiliteten bättre än för det okrossade bergmaterialet. (Höbeda et al., 1995).

## 17.3 Hållfasthetstillväxt

Lagrad hyttsten får förbättrad styvhetsutveckling än olagrad hyttsten och krossat berg. De bindningar som uppkommer vid lagringen är emellertid svaga. Detta kan konstateras av de laboratorieförsök som gjorts på hyttsten från Oxelösund av Höbeda et al. (1995).

Vid låga spänningsnivåer ökade styvheten med spänningen, vilket inte händer i ett väl bundet material. Vid höga spänningsnivåer, där summa huvudspänning är 1 000 kPa och högre, minskade styvheten vilket författarna tolkar som partikelkrossning och nedbrytning av uppkomna bindningar.

Den permanenta deformationen förbättrades markant genom lagringen.

Lagringen i ovannämnda försök uppnåddes genom förvaring i värmeskåp under 28 dygn. En längre lagringstid hade varit önskvärt eftersom hyttsten binder långsamt (Höbeda et al., op. cit.).

Den uppnådda styvhetsökningen beror på att finmaterialet i hyttstenen fungerar som en med tiden cementerande substans och inte som ett smörjmedel vid vattenöverskott, såsom ofta är fallet i bergmaterial (Höbeda et al., op. cit.).

Även i fält ökar hyttstenslagers hållfasthet med tiden. Det visar resultat från fallviktsmätningar och provgrovsgrävningar på en provväg vid Nyköping med hyttsten i förstärkningslagret (ALT-MAT, 2000).

## 17.4 Beständighet

*Beständighet mot mekanisk påverkan:* Kulkvarnsvärdet för hyttsten från SSAB i Luleå har bestämts till 22,4, (Ydrevik, 1998) samt 26,2 (Lindgren, 1998).

För hyttsten från SSAB Merox i Oxelösund har också kulkvarnsvärde bestämts. Resultatet blev 22,5. (Eriksson, 1994).

Samtliga kulkvarnsvärden visar att materialet är godkänt enligt VÄG 94 för användning i förstärkningslager samt bärlager som ej ska utsättas för byggtrafik.

Beständigheten vid frysning (inte frys-töförsök) undersöktes av Lindgren (op. cit.) genom kontroll av kulkvarnsvärdet samt siktning före och efter frysning i vatten. Ingen större skillnad kunde noteras mellan materialets nötningsbeständighet före och efter behandlingen. Lindgren påpekar dock att det finns risk för nedbrytning vid upprepad frysning och tining.

## 17.5 Tjällyftningsbenägenhet

Hyttsten är ett poröst material, men absorptionen av vatten är ändå låg, eftersom vattnet stannar kvar på ytan istället för att absorberas in i materialet (Lindgren, 1998). Detta kan tolkas som att tjällyftningsbenägenheten är låg, men fortsatta undersökningar bör göras.

## 17.6 Värmekonduktivitet

### Bestämning i laboratorium

Värmeledningstal för hyttsten från Luleå har bestämts till  $0,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$  (Ihs, 1998). Tyvärr finns ingen uppgift om fukthalten. Det är antagligen torrt material som avses. För hyttsten från Oxelösund har  $\lambda$  bestämts till  $0,38\text{--}0,67 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$  beroende på fukthalt (SP, 1994). Värdena kan jämföras med  $0,2\text{--}0,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$  för slaggrus,  $0,55\text{--}1,81 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$  för sandigt grus samt  $0,5\text{--}1,12 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$  för krossad betong som rapporterats av Andersson et al. (1999).

Enligt VÄG 94 ska material som ligger inom en halvmeter från vägytan ha värmeledningstal som är bättre (större) än  $0,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$  i torrt tillstånd. Kravet motiveras av risken för frosthalka på vägytan.

### Tjälgränsmätningar i fält

Tjälgränsmätningar har genomförts i provsträckor längs Björbyvägen belägen norr om Luleå. Dessa visade en liten skillnad mellan sträckor med hyttsten i förstärkningslagret och referenssträckor med krossat berg i förstärkningslagret (Ihs, 1998). Resultatet är förvånande med tanke på det låga värmeledningstal som uppmätts för hyttstenen i laboratorium. En förklaring skulle kunna vara att vägen ligger väldigt torrt och att referensmaterialet är grovkornigt eller dåligt packat. Båda dessa faktorer ger lågt värmeledningstal för referensmaterialet.

På dessa provsträckor gjordes även registreringar av temperaturen i luften och på vägytan. Mätningarna var emellertid för begränsade i tid för att man ska kunna göra några vidare tolkningar. Följande slutsats görs dock: Sammantaget kan man säga att typen av material i förstärkningslagret har mycket stor betydelse för yttemperaturen och halkutsattheten (Ihs, 1998). Denna slutsats måste kommenteras, eftersom den inte är allmängiltig. I det här speciella fallet med 10 cm avstånd mellan förstärkningslagret och vägytan har materialet i förstärkningslagret mycket stor betydelse. I en annan konstruktion där avståndet är t.ex. 30 cm minskar betydelsen.

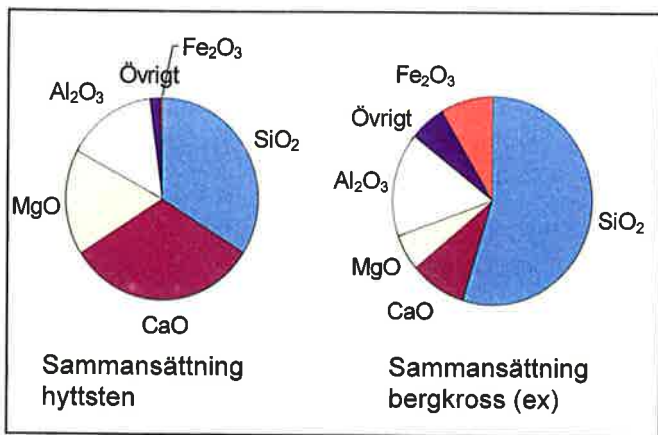
## 17.7 Miljöpåverkan

Resultat från projektet ALT-MAT (Nilsson & Håkansson, 2000) tyder på att hyttsten är jämförbar med krossat berg och morän när det gäller lakning av tungmetaller. Lakförsök och analys av totalhalt har utförts och resultaten har jämförts med motsvarande för "bärlager" och morän. (Bergart anges ej men är troligen granit och porfyr enligt Johansson, personlig kommunikation). Jämförelsen visar att av de undersökta ämnena arsenik, kadmium, kobolt, krom, koppar, nickel, bly och vanadin förekommer några i högre halter i den undersökta hyttstenen än i naturmaterial. Detta gäller i första hand vanadin. Vanadin finns som spårämne i magnetit och biotit och tillhör inte de ämnen som livsmedelsverket har satt något gränsvärde för.

Efter olika typer av laktförsök drar Tossavainen (2000) slutsatsen att hyttsten kan användas i vägbyggande utan risk för skadlig miljöpåverkan på grund av utlakning av tungmetaller.

Fältförsök i form av provtagning i grundvattenrör vid hyttstensvägen utanför Nyköping visar inga förhöjda värden för något ämne (Håkansson, personlig kommunikation). Dessa provtagningsresultat kommer att analyseras ytterligare i det fortsatta arbetet.

Enligt en innehållsanalys gjord av Lindgren (1992) består hyttsten från Luleå främst av kisel, kalcium, magnesium och aluminium (figur 17-1). I figuren finns även en innehållsanalys av granit som jämförelse.



Figur 17-1 Huvudbeståndsdelar i hyttsten och krossad granit (data från Lindgren, 1998)

Svavelhalten i hyttstenen är ca 1,3%, medan halterna av järn, kalium och natrium är av storleksordningen 0,5%. Bland spårämnena har barium och vanadin de högsta halterna, 300–600 mg/kg (= 0,03–0,06%). Halterna av övriga spårämnena är lägre än 100 mg/kg (= 0,01%). Ungefär samma sammansättning gäller för hyttsten från Oxelösund (Rogbeck & Elander, 1995).

## Lakningsresultat

Texten i detta och nästa avsnitt bygger på uppsatsen ”Påverkan på grundvatten från restprodukter i vägar” utförd inom forskarutbildningskursen Tillämpad hydrogeologi 1998–99 (Arm, 1999).

Enligt tillgänglighetstester på hyttsten är de lakbara mängderna av flertalet metaller betydligt lägre än totalinnehållet. Dessutom är utlakningen vid kolonnförsök liten i förhållande till de tillgängliga mängderna. Endast en hundradel av den tillgängliga mängden har lakat ut efter några år. Detta innebär att utlakningen sannolikt kommer att pågå under mycket lång tid och på en låg nivå efter den inledande perioden. Undantag är dock vanadin och aluminium (Rogbeck & Elander, 1995). Utlakningen av vanadin kommer troligen att ligga på samma nivå under en längre tid medan utlakningen av aluminium kan öka.

Att utlakningen av aluminium kan komma att öka är förvånande. Antagandet bygger på resultat från kolonnförsök där aluminiumhalterna visat sig öka med ökande L/S-förhållanden, vilket är ovanligt. En tänkbar förklaring kunde vara surt lakvatten, men pH varierade mellan 11,1 och 11,4 och ingen tendens till sjunkande värden noterades under försökets gång. I detta sammanhang bör nämnas att hyttsten har mycket hög pH-buffrande kapacitet (Lindgren, 1998). Därför skulle låga pH-värden vara överraskande. Hyttsten är också ett s.k. hydrauliskt material där bland annat aluminium deltar i bindningsreaktionerna. Man ifrågasätter därför om kolonnförsöken verkligen simulerar vad som händer i ett härdat material (Rogbeck & Elander, op. cit.).

För några metaller, främst kadmium samt koppar och vanadin, ökar den tillgängliga mängden om de lakas ut under fullt oxiderande förhållanden.

Ingen hänsyn har tagits till fastläggningsprocesser i jorden som sannolikt kommer att reducera halterna innan lakvattnet når någon grundvattenrecipient. Ej heller har hänsyn tagits till förändringar i materialet under vägens livslängd, till exempel nedkrossning under byggnadstiden eller hydraulisk bindning under brukstiden.

Masugnsslagg innehåller vattenlösliga svavelföreningar i små halter. Eftersom endast substanser i partikelytorna kan gå i lösning rör det sig om en kortvarig utlakning som snabbt avklingar. Förutsättningen för att problem med lakning ska uppstå är troligen när hyttstenen läggs på dåligt dränerad undergrund så att materialet kommer att ligga i stillastående vatten (Höbeda, 1976). Resultat av lakningsförsök på hyttsten från Luleå visar att 50% av svavlet har avgetts efter 197 dagar (Lindgren, 1998).

## Jämförelse med bakgrundshalter

Rogbeck & Elander (1995) har jämfört hyttstens metallinnehåll med Naturvårdsverkets bedömningsgrunder för metaller i sediment hos sjöar och vattendrag. De konstaterade då att halterna i hyttsten var låga eller mycket låga för samtliga av de metaller för vilka haltnivåer anges (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb och Zn). Vidare beräknade de att lakvatten från hyttsten efter några år skulle vara jämförbart med normalt ytwater när det gäller innehåll av flertalet metaller.

Rogbeck & Elander (op.cit.) har även gjort en jämförelse mellan mängden bly från transportemissioner från trafiken och mängden bly i lakvatten från en väggkropp byggd av hyttsten. Resultatet blev att transportemissionerna beräknades ge större mängder bly per km väg än väggmaterialet hyttsten beräknades göra.

## 17.8 Sammanfattning – hyttsten

Hyttsten är ett material som sedan gammalt behandlas i stort sett som ett konventionellt naturmaterial i såväl andra europeiska länder som i USA.

Eftersom materialet är en restprodukt från järnframställning har råvarorna, t.ex. karaktären hos järnmalmen och tillsatt slaggbildare, betydelse för den slutliga produktens egenskaper. Lite förenklat kan det sägas att ju högvärdigare



malm desto sämre hållfasthet hos hyttstenen. Även tillverkningsprocessen framförallt avkylningen har stor betydelse. *Råvarorna* påverkar den kemiska sammansättningen och hållfasthetstillväxten. *Avkylningssättet* vid framställningen påverkar både kornstorlek, porositet och hållfasthetstillväxt. Den valda *grade-ringen* påverkar det färdiga hyttstenslagrets nedkrossningsbenägenhet.

En mycket *liten variation* mellan egenskaperna för hyttsten från de två anläggningarna i Sverige har konstaterats. Det gäller både kemisk sammansättning, deformation vid belastning, beständighet mätt med kulkvarnsförsök samt värmekonduktivitet. Den uteblivna variationen kan förklaras av en kontrollerad tillverkningsprocess.

### Deformationsegenskaper och hållfasthetstillväxt

Hyttsten och krossad granit med samma kornstorlek får ungefär samma *styvhet* vid dynamiska treaxialförsök. Hyttstens *stabilitet* uttryckt som ackumulerad permanent deformation är initialt betydligt sämre än för krossad granit men bättre än för okrossad granit. Hyttstenen är mindre spänningsberoende än konventionellt bergmaterial.

Hyttsten som utsatts för accelererad lagring i laboratorium får förbättrad *styv-hetsutveckling* jämfört med olagrad hyttsten och krossat berg. De bindningar som uppkommer vid lagringen är emellertid svaga. Den permanenta deformationen förbättras markant genom lagring. Hållfasthetstillväxt har också uppmätts vid fallviktsmätning och provgroppgrävning i fält.

### Beständighet

*Beständighet mot mekanisk påverkan* i form av kulkvarnsvärde har bestämts till 22–26. Värdena representerar hyttsten med olika ursprung och från olika tidpunkter, vilket tyder på ett homogent material. Beständighet mot klimatpåverkan kommer att undersökas i fortsättningen av projektet.

### Tjällyftningsbenägenhet

Hyttsten är ett poröst material, men absorptionen av vatten är ändå låg, eftersom vattnet stannar kvar på ytan istället för att absorberas in i materialet. Detta kan tolkas som att tjällyftningsbenägenheten är låg, men fortsatta undersökningar bör göras.

### Värmekonduktivitet

Hyttsten har liten värmekonduktivitet med värmeledningstal mellan 0,3 och 0,7 W/(m·°C) beroende på vatteninnehåll. Det är därför förvånande att ingen effekt i form av minskad tjälnedträngning har kunnat bekräftas vid tjälgränsmätningar i en provväg utanför Luleå. Fortsatt undersökning behövs.

Den dåliga värmeledningsförmågan bör kunna utnyttjas som tjälisolering. Den gör också att lager med hyttsten inte får placeras för nära vägytan på rund av risken för frosthalka. Aktuellt djup är minst 0,25 eller 0,5 m beroende på värmeledningstal.

## Miljöpåverkan

Hyttsten består liksom krossat berg främst av kisel, kalcium, magnesium och aluminium. Det som skiljer är den låga järnhalten som är ca 0,5% och den höga svavelhalten som är ca 1,5%. Bland spårämnen har barium och vanadin de högsta halterna, 0,03–0,06%.

Resultat från flera laboratorieundersökningar visar att hyttsten är jämförbar med krossat berg, grus och morän när det gäller lakning av tungmetaller. Enligt tillgänglighetstester på hyttsten är de *potentiellt lakbara mängderna* av flertalet metaller betydligt lägre än totalinnehållet. Vid oxiderande förhållanden ökar den potentiellt lakbara mängden kadmium, koppar och vanadin. *Kolonnförsök* visar att utlakningen kommer att pågå under mycket lång tid och på en låg nivå efter den inledande perioden. Undantag är dock vanadin där utlakningen troligen kommer att ligga på samma nivå under en längre tid. Det svavel som är lakbart lakar ut under en kort tid och klingar av snabbt, t.ex. under lagring före användning.

Provtagning i *grundvattenrör* vid en hyttstenssträcka på E4:an utanför Nyköping visar inga förhöjda värden för något ämne.

## Användning

Även om hyttstens egenskaper kommer att studeras närmare i det fortsatta projektarbetet, torde det kunna sägas redan nu att varken de tekniska eller miljöpåverkande egenskaperna utgör några hinder för normal användning i svenska vägkonstruktioner.

Enligt nuvarande VÄG 94 kan hyttsten användas som fyllnadsmaterial (materialtyp 2), skyddslager och förstärkningslager. Bäst utnyttjas egenskaperna i ett förstärkningslager. Eventuellt kan hyttsten också användas som bärlager. Det beror på konstruktionens beläggningstjocklek. Den låga densiteten är gynnsam vid användning i bankfyllnader och den låga värmekonduktiviteten ger en isole-ringseffekt vid byggande på tjälfarlig undergrund.

Om olagrad hyttsten läggs på dåligt dränerad undergrund så att materialet kommer att ligga i stillastående vatten kan problem med svavellakning uppstå.

**V**

# **V Funktionsbaserad vägdimensionering**

Denna del presenterar ett förslag till metodik för att dimensionera en väg utifrån vägmateriels olika förutsättningar. Dimensioneringsvillkor, provningsmetoder och materialkaraktisering behandlas. Begreppet bärförmåga beskrivs och exemplifieras.

- 18 Förslag till metodik 249**
- 18.1 Deformationsvillkor 249
- 18.2 Nya provningsmetoder 251
- 18.3 Förslag till ny materialkaraktisering 252

## 18 Förslag till metodik

För att kunna utnyttja alternativa *och* konventionella vägmaterials egenskaper optimalt bör vägkonstruktionen kunna utformas efter dessas möjligheter och begränsningar. Man brukar kalla detta funktionsbaserad vägdimensionering. Ett förslag till metodik för detta beskrivs här.

### 18.1 Deformationsvillkor

Vid analytisk dimensionering av vägkonstruktioner behövs deformationsvillkor för vägkonstruktionens olika ingående material. I nuvarande VÄG 94 anges deformationsvillkor för asfaltbundna lager, för cementbundna lager och för undergrundsmaterial. Hittills har inte några deformationsvillkor angivits för obundna överbyggnadslager. I stället har typkonstruktioner beskrivits där hänsyn till de obundna materialens egenskaper finns "inbyggd", till exempel genom fasta lagertjocklekar för olika material och trafikbelastning.

#### 18.1.1 Viktiga parametrar

Enligt resultatet av de laboratorieundersökningar som gjorts (Ydrevik 1995, Arm 2000f) är det en mängd parametrar som påverkar ett obundet materials deformationsegenskaper. Nedanstående ekvation anger vad som skulle behöva klargöras för varje obundet överbyggnadsmaterial innan man kan uttala sig om hur det deformeras.

$$\text{Deformation} = \text{belastning}^a \cdot \text{kornstyrka}^b \cdot \text{organisk halt}^c \cdot \text{gradering}^d \cdot \text{kornform}^e \cdot \text{packningsgrad}^f \cdot \text{relativ vattenkvot}^g$$

Ekvationen är flexibel men samtidigt omständlig varför man frestas till att göra vissa förenklingar.

- Om man förutsätter en väl dränerad konstruktion med ett tätt ytskikt, kan man anta att den *relativa vattenkvoten* i det obundna överbyggnadsmaterialet är i stort sett konstant. Då försvinner denna variabel från ekvationen.
- Om man föreskriver en viss *packningsgrad* i fält med resultatkontroll på det färdiga lagrets yta, så blir denna parameter också konstant.
- Om man föreskriver ett visst flisighetstal eller en viss krossningsgrad hos materialet, blir *kornformen* ingen variabel.
- Om man föreskriver en begränsad tillåten zon för *graderingen* eller kornstorleksfördelningen så försvinner graderingens påverkan.
- Om man begränsar den tillåtna *organiska halten*
- och om man kräver en viss *kornstyrka* hos materialet så försvinner dessa två variabler också.

- Då finns bara en variabel kvar, *belastningen*. Den kan tas bort genom att man bestämmer hur långt ner ifrån lasten eller vägytan som materialet måste läggas. Med andra ord det som brukar kallas minsta överbyggnadstjocklek.

Det här verkar säkert bekant, eftersom det är så här reglerna ser ut idag. VÄG 94:s och även ATB VÄG:s fasta regler kan tyckas stelbenta, men de innebär samtidigt en förenkling. Man måste också komma ihåg att många års erfarenhet av vägbyggande har lett fram till kunskap om hur ett bra obundet material är sammansatt, vilket avspeglas i de indirekta materialkrav som finns angivna.

Vilka parametrar är då rimliga att ta hänsyn till i ett flexibelt dimensioneringssystem? Självklart ska någon eller några parametrar som beskriver materialet finnas med. Dessutom ska "externa" faktorer som har stor inverkan på deformationsegenskaperna ingå, men hänsyn måste samtidigt tas till användbarheten av deformationsmodellen.

## Externa parametrar

Allteftersom vägens beläggning bryts ned kan man förvänta sig att *trafikbelastningen* på det underliggande obundna lagret ökar. Å andra sidan blir en bituminös beläggning styvare när den åldras, dvs. får bättre lastspridande förmåga, vilket borde resultera i en mindre last. Man kan också förvänta sig att *vattenkvoten* ökar på grund av ytvatteninträngning genom en sprucken beläggning. För de undre obundna lagren i en väggropp kan vattenkvoten öka på grund av ytvatteninträngning från slänter och dåligt underhållna diken. För dessa lager finns också risk för kapillär uppsugning av vatten om det ursprungliga materialet har för hög finjordshalt eller innehåller svaga mineral som krossats ned under byggnadstiden.

Ovanstående resonemang liksom resultatet i de nämnda laboratorieundersökningarna visar att trafikbelastning och vattenkvot är två viktiga externa faktorer. Det är vanligt att deformationsvillkor innehåller en faktor för antalet belastningar, men här väljs i stället den belastning som ger en konstant deformation. Alltså en last där deformationen i stort sett är oberoende av antalet belastningar. Det innebär att det inte blir någon skillnad för hög- och lågtrafikerade vägar. Skälet är att det inte alltid handlar om utmattningsbrott för dessa obundna material, utan i många fall kan några enstaka stora laster förstöra lagret.

En annan viktig parameter är densiteten eller packningsgraden. Denna parameter går emellertid att påverka vid byggandet. Att packningen har betydelse visar resultat från dynamiska treaxialförsök på ett krossat bergmaterial med 0–32 mm kornstorlek. Den permanenta deformationen blev ungefär dubbelt så stor vid 92% packningsgrad som vid 97% packningsgrad (Ydrevik, 1995). Packningsgraden är här relaterad till tung laboratoriestampning.

## Materialkrav, direkta eller indirekta?

En allmän strävan är att gå mot mer funktionsinriktade materialkrav och kontroller, men hur ska kraven formuleras för ett obundet material? Jo, istället för dagens indirekta krav på kornstorleksfördelning, andel krossat material, kul-

kvarnsvärde osv. kunde det ställas ett direkt krav på *bärförmågan*. Det kunde uttryckas så här: Hur stor belastning kan materialet bära utan att deformeras mer än  $x$ ? Belastningen skulle vara angiven i kPa och  $x$  kunde uttryckas i %.  $x$  skulle innebära ett maximalt värde för deformationen i obundna lager och som sådant vara angivet i regler och anvisningar.

Problemet när man går mot direkta funktionsrelaterade krav istället för indirekta produktkrav är att man då förutsätter en kunskap om olika material, t.ex. de alternativa, som kanske inte finns ännu. Vad har det aktuella materialet för bärförmåga? Hur är funktionen efter några vintrar? Man förutsätter också att den grundläggande kunskapen om vad som påverkar ett materials funktion i vägen finns hos alla utförande parter.

Även om funktionsrelaterade krav införs kommer troligen de indirekta metoderna för att bestämma enskilda materialparametrar att finnas kvar parallellt. Praktiska skäl talar för detta. De behövs t.ex. som kvalitetskontrollmetoder hos producenter och utförare.

## 18.2 Nya provningsmetoder

Funktionsrelaterade krav innebär alltså att nya provningsmetoder behöver införas. Exempelvis bör en metod som ska ange ett materials bärförmåga ta hänsyn till det sammansatta obundna materialet som ingår i ett lager, i stället för till enskilda partiklar.

De direkta materialkraven på ett obundet material skulle kunna vara knutna till följande egenskaper och metoder.

- Bärförmåga enligt belastningsförsök,
- beständighet enligt gyratorisk packning,
- klimatbeständighet enligt modifierat frys-töförsök,
- tjällyftningsbenägenhet enligt frys-försök,
- värmekonduktivitet enligt sondmetoden samt
- miljöpåverkan enligt SGI:s karakterisering.

Belastningsförsök bör göras som *dynamiska treaxialförsök*. Flera skäl talar för det. Det är en laboratoriemetod som utsätter ett material för trafikliknande laster. Hela det sammansatta materialet, upp till en viss kornstorlek, provas istället för att enskilda partiklar utsätts för påfrestningar. Man kan därför påstå att provkroppens funktion provas. Dynamisk treaxialprovning har för övrigt den fördelen att deformationernas spänningsberoende kan utredas. Denna kunskap kan sedan användas när lämplig placering i väggkroppen ska anges. Resultat från treaxialprovning av godkända material kan användas som referens när alternativa material ska introduceras och visas ha samma egenskaper som de material de ersätter.

*Gyratorisk packning* är egentligen en metod för att tillverka provkroppar av bitumenbundna material. Den har emellertid bl.a. använts i ett projekt för alternativa material (ALT-MAT, 2000) och bedöms ha utvecklingsmöjligheter för att kunna användas för obundna material, se avsnitt 7.1.2.

Med *modifierade frys-töförsök* menas att provning inte görs enbart på vattenmättat material.

SGI:s *miljökaraktisering* görs med hjälp av flera provningsmetoder, t.ex. bestämning av totalhalter, bestämning av tillgängliga halter, tvåstegs kontrolltest och pH-stat-test.

Det är viktigt att påpeka att samtidigt som nya provningsmetoder utvecklas behöver också nya gränsvärden eller kravnivåer anges. Då är det viktigt att nivån på de krav som ställs är ordentligt relaterade till användningsområdet, dvs. ju större påkänningar desto högre nivå på deformationsmotstånd och beständighet.

## 18.3 Förslag till ny materialkaraktisering

Karakteriseringen av ett material skulle kunna gå till så här:

- Bärförmågan bestäms vid vissa lastförutsättningar och vattenkvoter med hjälp av dynamiska treaxialförsök. Resultatet ger upplysningar om var i konstruktionen materialet kan läggas. Även eventuell hållfasthetsutveckling med tiden bör klargöras här.
- Beständigheten mot mekanisk påverkan bestäms med hjälp av gyratorisk packning. Den avgör om packning och byggtrafik behöver anpassas. När väl konstruktionen är färdigbyggd ska dimensioneringen säkerställa att någon nedkrossning inte kan ske.
- Beständigheten mot klimatpåverkan bestäms genom modifierat frys-töförsök. Den bestämmer om begränsningar finns för användningsområdet, både geografiskt och i konstruktionen. Nära vägytan finns till exempel salt som kan förvärra.
- Tjällyftningsbenägenheten och även dess lastberoende bestäms med frys-försök i laboratorium under olika vertikallaster.
- Värmeledningseffekten bestäms i de fall ett avvikande värde kan misstänkas, t.ex. för porösa material.
- Miljöpåverkan bestäms genom en serie provningar då den kemiska sammansättningen och lakbar halt av olika ämnen bestäms liksom lakningens beroende av vattenmängd, pH och redoxpotential. Även innehållet av organiskt material bestäms.

Det som skiljer ovanstående förslag från dagens förfarande är:

Istället för bärförmåga används idag flera indirekta metoder såsom kornstorleksfördelning, andel krossat material och organisk halt. Istället för gyratorisk packning används idag en annan metod, kulkvarn, som provar enskilda partiklar i stället för hela materialet. Frys-töförsök krävs inte idag. Frys-försök görs sällan idag. För bestämning av värmeledningseffekt finns ingen generell metod angiven idag. Test av miljöpåverkan görs inte alls idag.

Observera att de här beskrivna undersökningarna skulle vara en *grundläggande* karakterisering av ett nytt material. En karakterisering som skulle ligga till grund för ett "typgodkännande". Produktionskontroll eller kvalitetskontroll



måste ske med andra snabbare och enklare metoder. Dock bör även s.k. gamla material undersökas med lakförsök innan de används inom ett särskilt skyddsvärt område.

### 18.3.1 Bedömning av bärförmåga

Enligt det förslag som beskrivits ovan skulle bärförmågan för ett obundet vägmateriale bestämmas med hjälp av en serie dynamiska treaxialförsök där spänningstillståndet och vattenkvoten varieras. Detta skulle gälla både för konventionella och alternativa material. Här beskrivs hur man kan gå till väga.

Resultatet från de dynamiska treaxialprovningarna redovisas som elastisk och permanent deformation vid olika belastningsförhållanden. För det här ändamålet är det den ackumulerade permanenta deformationen som ska studeras vid olika vertikalspänningar. Den spänning som ger en viss ackumulerad permanent deformation benämns bärförmågan vid denna deformationsnivå. Bärförmågan måste alltså knytas till ett definierat värde för permanent deformation i det obundna lagret.

Det måste poängteras att de deformationer som bestäms med treaxialförsök är resultatet av laboratorieprovningar och kan inte förväntas direkt i verkliga fältförhållanden. Däremot kan de användas för att rangordna material. De kan även användas som ett första försök för att bestämma bärförmåga och lämplig placering i en vägkropp. Fortsatt forskning får utvisa hur översättningen mellan resultat från laboratorium och fält ska se ut. I detta arbete kan t.ex. Heavy Vehicle Simulator, HVS, användas. Även mindre och mer lätthanterliga bärighetsmätare för fältbruk bör verifieras gentemot laboratorieresultaten, se kapitel 4.

Bärförmågan anger vilken maximal last som materialet får utsättas för om inga otillåtna deformationer ska uppstå i det obundna lagret. Lasten kan uttryckas som maximal vertikalspänning på nivån för det obundna lagrets överyta. Den kan också uttryckas som ett visst avstånd från vägytan, men då måste trafiklasten standardiseras liksom ovanförliggande lagrets tjocklek och styvhet. Härvid har beläggningsens tjocklek störst betydelse eftersom bundna lager har stor lastspridande förmåga.

Därefter kan en deformationsutveckling på grund av nedbrytning av det skyddande bundna lagret beräknas. I denna ekvation bör vertikalspänning och vattenkvot i det obundna lagret ingå.

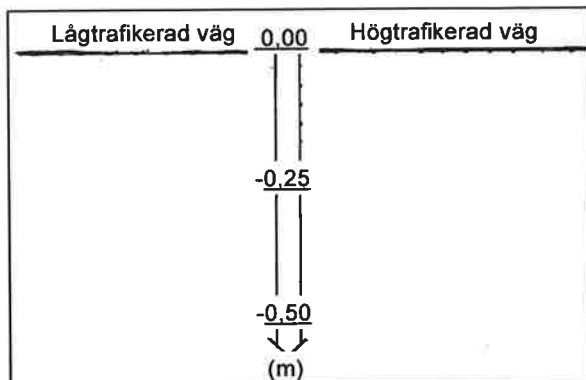
Enligt de provningar som gjorts inom flera forskningsprojekt vid VTI varierar bärförmågan för konventionella obundna material mellan 30 och 1 000 kPa om 5% deformation tillåts (Arm, 2000b). Variationen beror framför allt på vilken kornstorleksfördelning materialet har, men också på dess relativa vattenkvot. Packningsgraden har här filtrerats bort.

I detta doktorandprojekt har det visats att bärförmågan för alternativa material också varierar, men inte lika mycket eftersom de inte har samma spännvidd i kornstorleksfördelning som de undersökta konventionella materialen, vilka utgjordes av allt från ensgraderad sand till välgraderat krossat bergmaterial 0–64 mm.

### 18.3.2 Praktisk användning av begreppet bärförmåga

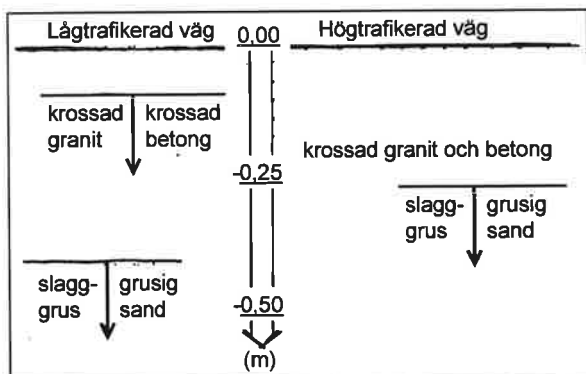
För att visa hur kunskap om bärförmågan kan användas praktiskt följer här ett exempel. Det är ett resonemang kring användning eller placering i vägkroppen av olika obundna material grundat på bärförmåga. Som stöd för resonemanget ligger resultat från belastningsförsök i laboratorium i form av dynamiska treaxialförsök samt beräkningar av hur trafikbelastningen fördelar sig på olika djup. Resultatet av lastberäkningen redovisas i nästa avsnitt "Underlag för exemplet".

Utgångspunkten för exemplet är två stycken vägkonstruktioner. Den ena är lågtrafikerad och den andra är högtrafikerad med avseende på tung trafik. Det är de tunga fordonen som är intressanta när det gäller bärförmåga. En tänkt gemensam z-axel får markera avståndet från vägytan i de båda konstruktionerna (figur 18-1a).



Figur 18-1a

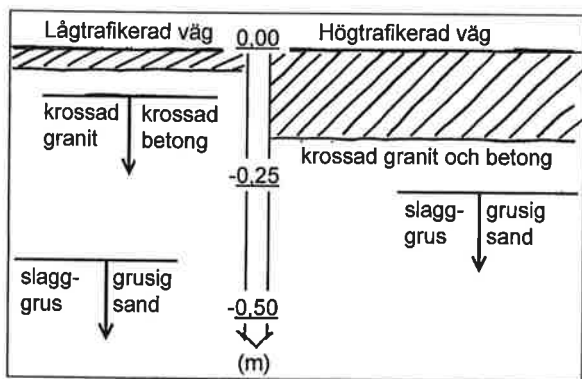
I konstruktionerna placeras några olika obundna material ut på ett sådant djup att den last de förväntas utsättas för motsvarar deras bärförmåga (figur 18-1b). Bärförmåga är sedan tidigare definierad som den last ett lager av materialet kan bära utan att det deformeras mer än tillåtet. Här har två procents deformation valts.



Figur 18-1b

Figuren visar hur de olika materialen hamnar på olika djup. Både på olika djup sinsemellan och på olika djup i de båda konstruktionerna. Att slaggrus och sand generellt måste läggas längre ned än krossat berg och krossad betong beror på att de har sämre bärförmåga samt att trafiklasten är störst vid vägytan och avtar med djupet.

Att slaggruset och sanden kan läggas ytligare i den högtrafikerade vägen förklaras av beläggningstjockleken. Högtrafikerade vägar har enligt VÄG 94 tjockare bundet lager (figur 18-1c) och ett bundet lager har mycket större lastspridningsförmåga än ett obundet. Det gör att trafiklasten avtar mycket snabbare med djupet i den högra konstruktionen i figur 18-1c.



Figur 18-1c Exempel på beräknat erforderligt läggningsdjup

I det här exemplet har den vänstra konstruktionen 4 cm asfaltbundet lager och den högra 17 cm. Det gör att på samma djup är effekten av trafiklast mycket mindre i den högra sektionen än i den vänstra. På ca 20 cm djup är trafiklasten ungefär dubbelt så stor i den lågtrafikerade vägen som i den högtrafikerade vägen. Att det krossade bergmaterialet och den krossade betongen inte ligger närmare vägytan i den högra sektionen beror helt enkelt på att beläggningen är ”i vägen”.

Ett sådant här resonemang kan också förklara varför man i andra länder kan använda alternativa material högt upp i vägkonstruktioner, i t.ex. bärlagret direkt under beläggningen. I de flesta andra europeiska länder används tjockare bundna lager än i Sverige. Högt upp i dessa vägkonstruktioner innebär ett läge precis under ett bundet lager som ofta är både 20 och 30 cm tjockt. I Sverige är det tjockaste asfaltbundna lagret 23 cm enligt VÄG 94.

Det sägs ofta att de alternativa materialen är lämpliga att användas i lågtrafikerade vägar. Har man då beaktat att risken för överbelastning är större där än i en väg med tjock beläggning? Kanske man har gjort det, men ansett att det inte gör något eftersom man inte har samma krav på ytjämnhet på dessa vägar. Är man också medveten om att en stor deformation i det obundna lagret inte bara ger sättningar utan också skador i form av krackeleringar i beläggningen på grund av att underlaget ger efter?

I det här sammanhanget passar det att påpeka att funktionstänkande inte passar ihop med benämningar som ”bärlager enligt VÄG 94”, ”normenligt förstärk-

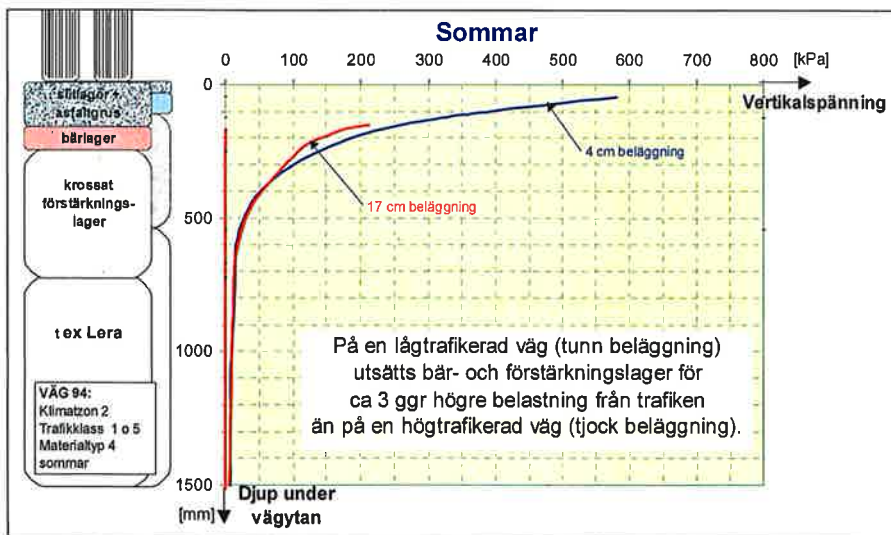
ningslager” osv. I stället bör de nya materialen benämnas efter vilken bärförmåga de har, t.ex. B200 och B400, enligt det mönster med hållfasthetsklasser som används inom betongbranschen.

## Underlag för exemplet

### Trafikbelastning på obundna vägmaterial vid olika beläggningstjocklek

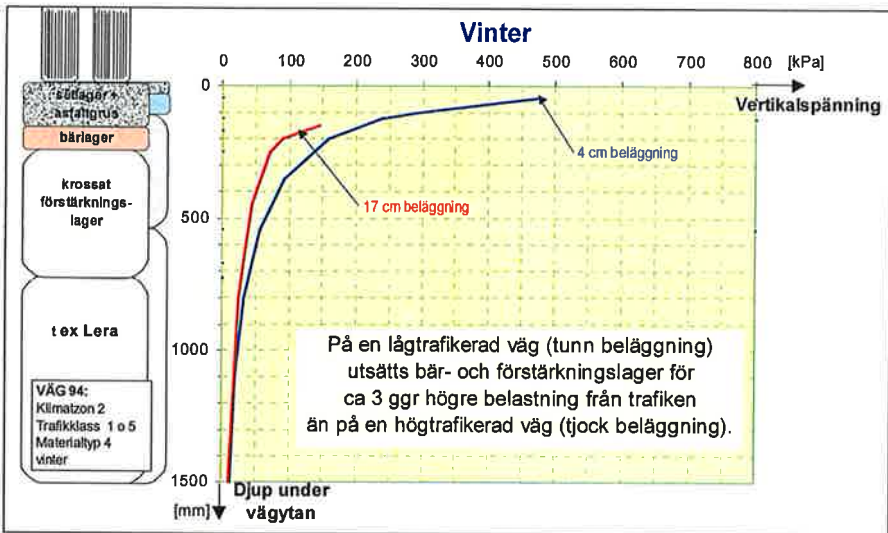
För att utröna vilka påkänningar de obundna materialen i en väg utsätts för har enkla spänningsberäkningar med datorprogrammet BISAR utförts inom detta projekt. Resultatet presenteras i figur 18-2a och b, där spänningsfördelningen vid belastning med ett tungt fordon har beräknats för några olika konstruktioner. Samtliga beräkningsförutsättningar är hämtade från VÄG 94 och anges i figurerna. Observera att trafiken representeras av en standardaxel enligt VÄG 94.

Beräkningar har gjorts för samtliga årstider som anges i VÄG 94, men här redovisas bara sommar- och vinterförhållanden.



**Figur 18-2a** Beräknad vertikalspänning från trafiken på olika djup i en grusbitumenöverbyggnad sommartid. Beräknat med BISAR. Trafik uttryckt som en standardaxel enligt VÄG 94

Eftersom beläggningen, dvs. slitlager och asfaltgrus, består av asfaltbundet material blir den mycket styvare vid låga temperaturer. Detta resulterar i en lägre belastning på de underliggande obundna lagren under vintern (figur 18-2b).



**Figur 18-2b** Beräknad vertikalspänning från trafiken på olika djup i en grusbitumenöverbyggnad vintertid. Beräknat med BISAR. Trafik uttryckt som en standardaxel enligt VÄG 94.

Figurerna visar också hur beläggningstjockleken påverkar den trafikbetingade belastningen på de obundna vägmaterialet. Skillnaden i belastning under en tunn och en tjock beläggning beror såsom tidigare nämnts på att de asfaltbundna materialen har mycket större lastspridningsförmåga än de obundna materialen. (Samma sak gäller i ännu högre grad för cementbundna material.)

### Bärförmåga – läggningsdjup

Om beräknad vertikalspänning från figur 18-2a och b kombineras med uppgifter om bärförmåga från dynamiska treaxialförsök kan värden för erforderligt läggningsdjup konstrueras. I tabell 18-1 finns sådana värden angivna för olika material med förutsättningen att trafiklasten sprids ut av ett fyra cm tjockt slitlager av mjuk asfaltbetong.

**Tabell 18-1** Läggningsdjup för olika material med hänsyn till bärförmåga. Beläggningstjocklek 4 cm. Resultat från dynamiska treaxialförsök och spänningsberäkningar med BISAR. (data från Arm 2000b samt detta projekt)

Material/gradering	Läggningsdjup (cm)					
	Om 2% deformation			Om 5% deformation		
	0,4 w <sub>opt</sub>	0,6 w <sub>opt</sub>	0,8 w <sub>opt</sub>	0,4 w <sub>opt</sub>	0,6 w <sub>opt</sub>	0,8 w <sub>opt</sub>
<b>Krossat material 0–32 mm</b>						
"övre BL-gräns VÅG 94"	—	10	14	—	0–4**	8
"mitt i BL-zonen VÅG 94"	—	7	10	—	0–4**	0–4**
"undre BL-gräns VÅG 94"	—	10	—	—	4	—
<b>Krossat material 0–64 mm</b>						
"fd FL", cu 53	10	14	19	4	7	14
"mitt i FL-zonen VÅG 94", cu 23	14	10	10	7	4	4
"brant FL", cu 6	14	10	—	10	7	—
<b>Okrossat material 0–32 mm</b>						
mitt i BL-zonen VÅG 94	—	14	—	—	7	—
35% sand, cu 25 (krossrest 0–8 mm)	—	25	—	—	25	—
45% sand, cu 61	—	33	53	—	28	33
47% sand, cu 23	—	47	72	—	33	39
54% sand, cu 14	—	47	72	—	33	72
70% sand, cu 7	—	72	72	—	62	72
91% sand, cu 3	—	85	108	—	85	85
<b>Alternativa material</b>						
Slaggrus		35				
Krossad betong		10–20				
Hyttsten						
XX						

(w<sub>opt</sub> = optimal vattenkvot, c<sub>u</sub> = graderingstal)

\*\*beror på beständighet mot mekanisk påverkan också.

Erforderligt läggningsdjup anges för en rad konventionella material som har undersökts i tidigare projekt vid VTI (Ydrevik 1995, Arm 2000f). Dessutom anges beräknat läggningsdjup för slaggrus och krossad betong vars deformationsegenskaper har analyserats i detta projekt. Motsvarande beräkning kommer att göras för fler material, t.ex. hyttsten.

I beräkningarna har två nivåer på tillåten permanent deformation använts, två och fem procent. För en del av de konventionella materialen har dessutom uppgifter om vattenkvotens inverkan på bärförmågan funnits och därför angivits i tabellen. Sådana uppgifter återstår att ta reda på för de alternativa materialen också, vilket ingår i planerna för det fortsatta arbetet.

Djupangivelsen i tabellen ska tolkas så att på detta djup eller längre ner överskrider inte materialets bärförmåga. Den beräknade variationen på grund av årstid har försumrats i redovisningen på så sätt att det "sämsta" värdet har valts, dvs. det största djupet.

För två av bärlagermaterialen ("övre BL" och "mitt i BL") är tillåten spänning i vissa fall så hög att materialen skulle kunna ligga i vägytan. Det finns dock andra egenskaper som behöver kontrolleras då, t.ex. beständigheten mot nötning från trafik.

I tabell 18-2 finns motsvarande resultat för en konstruktion med 17 cm asfaltbeläggning.

**Tabell 18-2** Läggningsdjup för olika material med hänsyn till bärförmåga. Beläggningstjocklek 17 cm. Resultat från dynamiska treaxialförsök och spänningsberäkningar med BISAR. (data från Arm 2000b samt detta projekt)

Material/gradering	Läggningsdjup (cm)					
	Om 2% deformation			Om 5% deformation		
	0,4 w <sub>opt</sub>	0,6 w <sub>opt</sub>	0,8 w <sub>opt</sub>	0,4 w <sub>opt</sub>	0,6 w <sub>opt</sub>	0,8 w <sub>opt</sub>
<b>Krossat material 0–32 mm</b>						
"övre BL-gräns VÄG 94"	—	17*	17*	—	17*	17*
"mitt i BL-zonen VÄG 94"	—	17*	17*	—	17*	17*
"undre BL-gräns VÄG 94"	—	17*	—	—	17*	—
<b>Krossat material 0–64 mm</b>						
"fd FL", cu 53	17*	17*	17*	17*	17*	17*
"mitt i FL-zonen VÄG 94", cu 23	17*	17*	17*	17*	17*	17*
"brant FL", cu 6	17*	17*	—	17*	17*	—
<b>Okrossat material 0–32 mm</b>						
mitt i BL-zonen VÄG 94	—	17*	—	—	17*	—
35% sand, cu 25 (krossrest 0–8 mm)	—	19	—	—	19	—
45% sand, cu 61	—	27	39	—	22	27
47% sand, cu 23	—	36	52	—	27	32
54% sand, cu 14	—	36	52	—	27	52
70% sand, cu 7	—	52	52	—	42	52
91% sand, cu 3	—	69	103	—	69	69
<b>Alternativa material</b>						
Slaggrus		≈25				
Krossad betong		17*				
Hyttsten						
XX						

(w<sub>opt</sub> = optimal vattenkvot, c<sub>u</sub> = graderingstal)

\*direkt under beläggningen.

Naturligtvis bör fler konstruktioner beräknas för att ge en bra översikt. Detta får ses som ett första steg.





**VI**

# **VI**   **Diskussion och slutsatser**

Denna del innehåller diskussion av de funna resultaten samt slutsatser som kan dras av dessa. Här ges också förslag till fortsatt forskning inom området.

## **19   Diskussion   263**

19.1 Slaggrus 263

19.2 Krossad betong 265

19.3 Hyttsten 266

19.4 Provningsmetoders lämplighet – gränsvärden 266

19.5 Dimensionering – Materialkaraktisering – Produktcertifiering 269

## **20   Slutsatser   270**

**21   Förslag till fortsatt forskning   272**

## 19 Diskussion

Syftet med projektet var att öka kunskapen om krossad betongs, slaggrus och hyttstens egenskaper samt att göra det enklare att dimensionera vägar med dessa material. Dessutom valdes följande områden ut för närmare studier: Variabilitet, värmekonduktivitet, långtidsegenskaper och hållfasthetstillväxt hos obundna lager av de återvunna materialen samt metodik för funktionsbaserad dimensionering av vägar.

I det här kapitlet diskuteras resultatet av det utförda arbetet för *slaggrus* och *krossad betong* och *hyttsten*. Dessutom kommenteras en del *provningmetoder* utöver det som redan sagts tidigare samt den föreslagna *materialkaraktiseringen*.

### 19.1 Slaggrus

#### Provningresultat

Vid litteraturgenomgången framkom det att deformationsegenskaper hos förbränningsrester eller slaggrus endast har studerats med hjälp av CBR-försök. För att underlätta dimensionering av svenska vägar med detta material har en omfattande serie dynamiska belastningsförsök och jämförelse av resultaten med svenska konventionella material utförts inom projektet.

När det gäller *variabiliteten* visar resultaten att de mekaniska egenskaperna uttryckta som uppmätt permanent deformation och beräknad resilientmodul från treaxialförsök är relativt lika för de fyra slaggrus som har studerats. Det är en signifikant skillnad mellan anläggningarnas material och även inom respektive anläggnings produktion, men spridningen är inte större än den är för de undersökta naturmaterialen. Försöken visade också att den organiska halten har en begränsande effekt på resilientmodulen, vilket var väntat.

De tjäldjupsmätningar som har utförts inom projektet visar en tydlig isolerande egenskap hos slaggruset. Resultatet rimmar väl med den laboratoriebestämning som gjorts av materialets *värmekonduktivitet*. Observera att det är tre olika slaggrus som har undersökts, både olika anläggningar och olika tillverkningsår. Tjäldjupsmätningarna har gjorts i Malmö-slaggrus från 1990-talet och i Linköping-slaggrus från 1980-talet, medan bestämningen av värmekonduktivitet gjordes på Göteborg-slaggrus från 1990-talet. Fortsatta studier får utvisa hur denna egenskap ska utnyttjas.

De studier av *långtidsegenskaper* som har kunnat utföras är begränsade till två fältförsök. Vid det ena är prov- och referenssträckorna tolv år gamla och den 8 cm tjocka beläggningen har på senare år uppvisat skador i form av sprickor och krackeleringar. Omfattningen är större på slaggrussträckan än på referenssträckan. Tyvärr är inte sträckornas utformningar helt jämförbara eftersom slaggrussträckan byggts i kurva och referensen i raksträcka. Dessutom är vägen enkelriktad, vilket resulterar i att den tunga trafiken kört med vänster hjulpar på

slaggrussträckans mittskarv under hela perioden. Det gör att förklaringen till skadorna kan finnas i lagren över slaggruset, t.ex. belastningsspricka i beläggningen med efterföljande vatteninträngning i bärlagret, krackelering osv. Detta visar hur viktigt det är med väl planerade fältförsök för att riktiga slutsatser ska kunna dras.

I det andra fältförsöket har den två år gamla provsträckan 13 cm beläggning. Den visar som väntat inga skador ännu, men kommer att följas upp vidare.

Vid båda fältförsöken har sträckorna provbelastats med fallvikt. I det första fallet hade slaggruslagret inklusive undergrunden en initial styvhet som var drygt hälften av motsvarande för referenssträckan. Efter knappt ett år hade skillnaden nästan utjämnats och efter tolv år var styvheterna på samma nivå. Detta kan tolkas som en tydlig men långsam *hållfasthetsökning*. Observera att dessa resultat gäller för ett slaggrus från 1980-talet. Därför bör uppföljande mätningar göras på nya fältförsök.

Den två år gamla provsträckan har provbelastats med fallvikt en gång, ca sex månader efter byggandet. Styvheten för slaggruslagret var då ungefär hälften av referensmaterialets styvhet. Med tanke på att materialet legat ett halvår skulle man kunna förvänta sig en viss hållfasthetsökning. En delförklaring skulle kunna vara att provbelastningen gav en mindre last på slaggruset eftersom det ligger längre ned än referensmaterialet. Inverkan bör dock vara marginell eftersom laborieförsöken visade ett litet spänningsberoende för slaggrus. Fortsatt uppföljning får visa om hållfasthetsökningen uteblir även i fortsättningen. I det här sammanhanget bör nämnas att provsträckor med krossad betong på samma väg inte heller visade någon hållfasthetstillväxt vid fallviktsmätning såsom varit fallet vid andra försök.

Här har bara resultat från detta projekt diskuterats och inga jämförelser har gjorts med utländskt slaggrus. Det beror på att det är vanskligt att jämföra avfallsförbränningsrester när återvinningspolicy och därmed också avfallssammansättning inte är densamma.

## Framtidens slaggrus

På sikt kan en ökning av avfallsförbränningen förväntas med anledning av olika politiska styråtgärder. Detta leder till att mer bottenaska behöver deponeras, vilket ger större skäl till att hitta användningsområden för slaggrus. För att slippa fördyrande tätningsåtgärder som erfordras av miljöskäl kommer emellertid en *förädling* av produkten att krävas. En sådan förädling gynnar även de tekniska egenskaperna även om de redan idag räcker till användning relativt högt upp i vägkroppen, 25–35 cm under vägytan beroende på beläggningstjocklek och materialkvalitet.

Stora forskningsinsatser har ägnats åt att undersöka den bottenaska som produceras idag. Tyngdpunkten har då lagts vid att karakterisera askan med avseende på miljöpåverkande ämnen. När man försöker hitta olika tekniker att använda bottenaskan stupar man ibland på att den lakar ut för stora halter av något eller några ämnen. Man går då över till att isolera eller innesluta materialet på något sätt, men dessa åtgärder är *passiva* och angriper inte själva problemet. Var

kommer de farliga ämnena ifrån? Vad innehåller avfallet? Vad händer vid förbränningen? Hur anrikas ämnena i bottenaskan? Hur kan avfallets sammansättning förändras? Hur kan förbränningsprocessen förändras för att gynna kvaliteten på bottenaskan?

Kunskaperna och tekniken för *rökgasrening* på avfallsförbränningsanläggningar har utvecklats kraftigt det senaste decenniet beroende på de omfattande krav som är knutna till vilka utsläpp som görs till luften i form av rökgaser. Tekniker för att förbättra bottenaskan har inte alls fått samma uppmärksamhet hittills. Endast ett fåtal studier av förbränningsprocessen har gjorts i laboratorieskala och genom teoretiska resonemang (Belevi 1998 som refererar till Fernandez et al. 1992 och Verhulst et al. 1996). Det finns heller inga krav på denna restprodukt, antagligen för att den ju ändå bara ska läggas på deponi.

Med de krav som ställs från ett kretsloppsanpassat samhälle kommer inte framtidens förbränningsanläggningar att kunna se sig själva enbart som energiproducenter. Det behövs grundliga praktiska studier av förbränningsprocessen för att *öka användbarheten* för slaggrus och därigenom minska behovet av deponering.

## 19.2 Krossad betong

Krossad betongs egenskaper *varierar* med flera parametrar. Därför går det inte att betrakta krossad betong som en enda materialgrupp. Det är inte entydigt om det är ursprungsmaterialet eller hanteringen, t.ex. krossning och rensning som påverkar egenskaperna mest.

Renheten, dvs. frånvaron av trä, papper, plast, bitumen, lättbetong, tegel etc. har stor betydelse för deformationsegenskaperna, tjälfarligheten och även de miljöpåverkande egenskaperna. Den borde emellertid inte utgöra något problem i Sverige idag eftersom s.k. selektiv rivning redan tillämpas i stor utsträckning.

Krossningen har liksom för konventionella ballastmaterial stor betydelse eftersom den erhållna kornstorleksfördelningen påverkar styvheten, stabiliteten, tjälfarligheten etc. Krossning i flera steg kan kanske med tanke på resultat från beständighetsprovningar ge upphov till onödigt stora mängder finmaterial.

Från litteraturstudierna har dragits slutsatsen att mekanismen bakom krossad betongs *hållfasthetstillväxt* är en urlakning av kalk med efterföljande utfällning av kalciumkarbonat. Med kännedom om detta bör lämpligt hanteringssätt och byggnadssätt kunna bestämmas för bästa möjliga utnyttjande av egenskapen. Betongen bör t.ex. lagras utomhus och fuktigt för att undvika för tidig karbonatisering, men omsorgsfull packning och vattning är nödvändig när materialet väl byggs in i en konstruktion och karbonatiseringen är önskvärd.

Inom projektet har hållfasthetstillväxtens storlek och förlopp utvärderats både ur laboratorieförsök och fältförsök. Det visade sig då att tillväxten var betydligt mindre i laboratoriet än i fält. En förklaring kan vara att laboratorieprovkropparna var insvepta i plastfolie under lagringen vilket hindrade den önskade karbonatiseringen. När de svenska resultaten jämförs med holländska laboratorie- och

fältresultat (Sweere, 1990) samt finska fältresultat (Kivekäs, 1997) visar det sig att fältresultaten överensstämmer i stort sett mellan länderna. De holländska fältförsöken gav en något snabbare ökning av styvheten. Laboratorieresultaten däremot skiljer sig på så sätt att de svenska visar betydligt mindre ökning av styvheten än de holländska gör. Förutom ovanstående förklaring med lagringssättet kan även provningsförfarandet med belastningshistoria, vattenkvot och provkroppstorlek förklara skillnaden.

Andra *långtidsegenskaper* än hållfasthetstillväxt har inte visat sig skilja från konventionella materials ännu, varken enligt svenska eller utländska erfarenheter. De svenska objekt som följts är som äldst tre år gamla.

### 19.3 Hyttsten

Hyttsten är ett material som behandlas i stort sett som ett konventionellt naturmaterial i såväl andra europeiska länder som i USA. Även om materialets egenskaper kommer att studeras närmare i det fortsatta projektarbetet, torde det kunna sägas redan nu att varken de vägtekniska eller miljötekniska egenskaperna utgör några hinder för normal användning i svenska vägkonstruktioner.

Hittills kan konstateras att hyttsten uppvisar hållfasthetstillväxt och låg värmekonduktivitet samt liten variation i egenskaper.

*Hållfasthetstillväxt* har uppmätts efter accelererad lagring i laboratorium samt vid fallviktsmätning och provgroppgrävning i fält (ALT-MAT, 2000).

Låg *värmekonduktivitet* har bestämts vid laboratorieförsök, men förvånande nog inte kunnat bekräftas vid tjalgränsmätningar i en provväg utanför Luleå (Ihs, 1998). Fortsatt undersökning behövs.

En mycket liten *variation* mellan egenskaperna för hyttsten från de två anläggningarna i Sverige har konstaterats när det gäller kemisk sammansättning, deformation vid belastning, beständighet mätt vid kulkvarnsförsök samt värmekonduktivitet. Den uteblivna variationen kan förklaras av en kontrollerad tillverkningsprocess.

### 19.4 Provningsmetoders lämplighet – gränsvärden

Ett stort antal provningsmetoder samt inverkan från europaharmoniseringen på detta område har studerats i projektet. Vid genomgång av de metoder som används eller föreslås användas för provning av olika egenskaper hos obundna material framkom det att flera är mer eller mindre olämpliga för alternativa ballastmaterial. Vilka och varför diskuteras här. Ytterligare diskussion förs i del II.

#### Bestämning av deformationsegenskaper

*Sandekvivalent* och *metylenblåvärde* är båda indirekta metoder för att bedöma bärighet. Dessa är enligt flera källor olämpliga för alternativa ballastmaterial så-

som slaggrus, krossad betong och hyttsten eftersom de är avsedda för lerhaltiga material.

De resultat från *dynamisk treaxialprovning* som presenteras i denna rapport visar på möjligheten att med sådana försök värdera nya ballastmaterial genom att jämföra dem med välkända. Även möjligheten att jämföra tillåten belastning med beräknad verklig belastning har demonstrerats i projektet.

## Bestämning av organisk halt

Eftersom *glödgningsförlust* vid 975°C utgör den europannormerade metoden för organiskt innehåll i ballastmaterial kommer den metoden att gälla som svensk standard från och med 2003. Härvid måste beaktas att glödning inte är lämpligt för t.ex. slaggrus och krossad betong eftersom den viktförlust som uppstår inte bara speglar det organiska innehållet.

När den organiska halten ska jämföras med tillåtet värde är det självklart att den provningsmetoden som anges i aktuell regel eller föreskrift ska användas. I litteraturen förekommer dock *felaktiga uppgifter* då ett alternativt material sägs vara godkänt eller underkänt enligt VÄG 94. Man har därvid bestämt den organiska halten genom glödning, antingen vid 550°C eller 850°C och därefter jämfört resultatet med VÄG 94:s gränsvärde på 2%. VÄG 94 och ATB VÄG anger emellertid att organisk halt ska bestämmas med kolorimetermätning (SS 02 71 07). En jämförelse som utförts inom detta projekt visar att de båda metoderna ger mycket olika resultat för krossad betong och slaggrus. Följden blir att materialet ifråga kanske har underkänts på felaktiga grunder.

## Bestämning av beständighet mot mekanisk påverkan

För att ett obundet ballastmaterials beständighet mot mekanisk påverkan verkligen ska kunna karakteriseras bör hela materialet undersökas med olika typer av nedbrytningsmetoder såsom krossning, nötning och slag.

Samtliga nu använda standardmetoder studerar bara enskilda partiklars beständighet. Det har antagligen sitt ursprung i att metoderna utvecklats för bundna lager där korta fraktioner är vanliga. Sådan beständighet eller kornstyrka beror på den enskilda partikelns geometriska form, mineralsammansättning och mineralsammanfogning, struktur och textur. Det kan emellertid ifrågasättas hur väl det traditionella provningssättet speglar beständigheten hos ett *lager* med obundet material. I ett sådant inverkar nämligen också hur partiklarna har kontakt med varandra, t.ex. hur tätt packat materialet är, vilket i sin tur är beroende av kornstorleksfördelningen mm.

Observera att de båda amerikanska standarderna för Los Angeles-provning varnar för att Los Angeles-talet används för något annat ändamål än att visa den relativa kvaliteten hos ballast från källor med liknande mineralsammansättning. *Alltså tillåter inte provningsresultat (Los Angeles-tal) automatiskt giltiga jämförelser mellan ballastmaterial som är klart olika i ursprung, sammansättning eller struktur.* (The Aggregate handbook, 1991). Detta bör betäckas innan Los

Angeles införs som standardmetod för alla ballastmaterial inklusive de alternativa.

Såsom påpekats i avsnitt 7.1.1 om provningsmetoder för beständighet, är de metoder som utvecklats för konventionella material ofta olämpliga för alternativa material. Vid provning av dessa bildas mer finmaterial eftersom de innehåller mer porösa och svaga partiklar, men det är detta finmaterial som deltar i den bindning som konstaterats hos vissa återvinningsprodukter och som ger upphov till bärighetsökning.

Det pågår flera försök för att hitta alternativa metoder för beständighetsprovning. Metodutveckling efterfrågas starkt på det här området. Provning med hjälp av *gyratorisk packning* har gett lovande resultat, men behöver utvecklas ytterligare. En nackdel med den nuvarande versionen är att den inbegriper siktningsanalys som i sig kan påverka nedbrytningen av svaga material.

Vid angivandet av *gränsvärden* för användning bör beaktas att det finmaterial som bildas vid provning av många återvinningsprodukter inte är plastiskt såsom fallet är vid dåligt beständiga naturmaterial (Höbeda & Chytla, 1999). Detta har redan beaktats i en del amerikanska stater när det gäller hyttsten då man helt enkelt har slopat kravet på Los Angeles-provning för detta material (Chesner et al., 1998). De gränsvärden som slutligen införs i Sverige bör också varieras beroende på hantering eller användning i vägen.

## Bestämning av beständighet mot klimatpåverkan

Med klimatpåverkan avses här temperaturväxlingar. Enligt de standardiserade laboriemetoderna, vanligtvis frys-töförsök, har flera alternativa material på grund av sin porösa natur sämre klimatbeständighet än de flesta svenska naturmaterial. Men hur fungerar de alternativa materialen i verkligheten? Den väg som byggts utanför Luleå, där bland annat sträckor med hyttsten och krossad rivningsbetong i förstärkningslagret har lagts in, kommer att bli mycket intressant att följa upp. Ännu har ingen skillnad i beständighet rapporterats jämfört med referensmaterialen.

Det kan ifrågasättas om provningsmetoderna för klimatbeständighet speglar verkliga förhållanden. Frys-töförhållanden finns för obundna lager på många håll i Sverige, men frågan är hur vattenmättade förhållandena är när lagret ingår i en överbyggnad. En annan fråga är vad det innebär att bara en viss fraktion av materialet provas.

Sverige har hittills inte haft några krav på frys-töbeständighet för obundna ballastmaterial. När det nu via EU förs in sådana krav måste det beslutas vilka gränsvärden som ska gälla. Liksom för övrig beständighet bör gränsvärdena varieras beroende på användningsområde.

## Bestämning av miljöpåverkan

Med miljöpåverkan menas här utlakning av miljöpåverkande ämnen. Av litteraturstudierna framgår att det har utvecklats en mängd olika lakförsök. Det fram-



går också att det pågår ett omfattande och svårt arbete att försöka harmonisera metoderna inom Europa.

Det kommer att behövas olika typer av lagningsmetoder för olika syften. De förslag som har lagts fram skiljer på grundläggande karakterisering och kontinuerlig kvalitetskontroll av ett material.

Framtiden får utvisa vilka metoder man enas om. Här kan bara poängteras att det inte är koncentrationen av ett ämne som är avgörande för dess miljöpåverkan utan ämnets rörlighet i vattensystemet samt omgivningens sårbarhet. Därför bör den grundläggande provningsmetoden som används ta hänsyn till exempelvis lakningens pH-beroende.

*Gränsvärden* för olika användningsområden bör bygga på en riskbedömning för den aktuella platsen eller området, där hänsyn tas till bakgrundshalter av olika föroreningar. En rimlig arbetsgång vid bestämning av gränsvärden är en s.k. omvänd exponeringsanalys. Det innebär att först bestäms tillåten exponeringsnivå för olika typer av recipienter. Därefter beräknas vilken lakning av föroreningar från det aktuella materialet som motsvarar denna exponeringsnivå. Till hjälp vid beräkningen används en transportmodell för föroreningarna och uppgifter om olika användningssätt/scenarier för materialet, t.ex. lagertjocklek och vägutformning. Ett material kan då certifieras för användning i vissa tillämpningar.

## 19.5 Dimensionering – Materialkarakterisering – Produktcertifiering

Alternativa material kan inte alltid ersätta de konventionella materialen i varje avseende. För att ändå kunna utnyttja de alternativa materialen måste ibland en annorlunda konstruktion väljas där hänsyn tas till materialets egenskaper. I denna rapport föreslås ett sätt att klassificera obundna material efter bärförmåga och utifrån det välja rätt *läggningsdjup* för materialet.

Begreppet *bärförmåga* definieras som den maximala last eller spänning som ett lager av materialet kan bära utan oacceptabla permanenta deformationer. Ett materials bärförmåga måste alltså knytas till ett definierat gränsvärde för permanent deformation i lagret. Erforderligt *läggningsdjup* beror förutom på materialets bärförmåga på trafiklastens storlek och de bundna lagrens styvhet och tjocklek.

Ett förslag till *materialkarakterisering* ges också i rapporten. Det omfattar bärförmåga, beständighet, tjällyftningsbenägenhet och miljöpåverkan. Även om förslaget innehåller en del nya moment och nya provningsmetoder jämfört med nuvarande praxis behöver det inte innebära en mer omfattande provning. Tanken är att materialkarakteriseringen ska utgöra en grundläggande undersökning som leder till ett "typgodkännande" eller *produktcertifiering* både för konventionella och alternativa material. Även blandningar mellan naturmaterial och alternativa material bör certifieras eftersom det inte är självklart att blandningens egenskaper utgör ett medelvärde av ingående materials egenskaper.

Produktionskontroll eller kvalitetskontroll kan sedan utföras med andra och snabbare metoder då endast vissa kritiska parametrar undersöks och jämförs med den grundläggande karakteriseringen för att säkerställa att materialet motsvarar det som certifierats. Observera att alla material bör omfattas av kravet på undersökning av miljöpåverkan.

I funktionsbaserade dimensioneringssystem hör inte termer som “normenligt bärlager” eller “förstärkningslager enligt VÄG 94” hemma. Materialen kan istället benämnas efter vilken bärförmåga det har, t.ex. B200 eller B400 i stil med de hållfasthetsklasser som används inom betongbranschen.

## 20 Slutsatser

Följande *principiella* slutsatser kan dras av det genomförda projektet.

- Alternativa ballastmaterial bör användas nära produktionskällan eftersom det är då de kan konkurrera i pris. Dessutom försvinner miljövinsten om transporterna blir alltför långa. I praktiken innebär det att användningen blir störst i tätorter med omnejd.
- Vid användning måste hänsyn tas till det alternativa materialets begränsningar. Risken finns annars att det blir materialets fel när vägen går sönder, fast det egentligen är en feldimensionering som är orsaken. Följden blir att materialet får dåligt rykte och att ingen vill använda det. Inget av de tre studerade materialen bör därför läggas som bärlager under en tunn beläggning och byggtrafik bör undvikas på slaggrus.
- De alternativa materialens egenskaper bör utnyttjas så högkvalitativt som möjligt. Det innebär att materialen bör läggas i vägöverbyggnader på det djup som deras bärförmåga tillåter. De speciella tjälisolerande egenskaperna hos hyttsten och slaggrus samt hållfasthetsökningen hos betong och hyttsten bör utnyttjas.

Med nuvarande dimensioneringsregler betyder det att från hållfasthetssynpunkt kan

- slaggrus användas som fyllnadsmaterial (materialtyp 2) och skyddslager. I vägar med tillräckligt tjock beläggning kan det även användas som förstärkningslager.
- Krossad betong och hyttsten kan användas som fyllnadsmaterial (materialtyp 2), skyddslager och förstärkningslager. I vägar med tillräckligt tjock beläggning kan de även användas som bärlager.

Materialtyp 2 innebär ett bra fyllnadsmaterial. I den kategorin hamnar grovkorniga jordarter som grus, sand, grusmorän, sandigt grus osv.

Vidare kan följande slutsatser dras av projektet när det gäller *provningsmetoder*.

- Vid bedömning av alternativa materials deformationsegenskaper i laboratorium är dynamiskt treaxialförsök en lämplig metod.

- CBR-försök bör ej användas som standardmetod i Sverige. (Den kommer antagligen att bli aktuell som EU-metod.)
- Det behövs metodutveckling inom området provning av beständighet, både mot mekanisk påverkan och klimatpåverkan. Denna rapport anger några förslag.
- Gränsvärden för miljöpåverkan från ballastmaterial i form av största tillåtna lakning vid vissa förhållanden måste införas snarast. På detta område kan man lite tillspetsat säga att det fattas inte förslag men heller inga beslut. De förslag som lagts fram har fastnat i olika instanser. De gränsvärden som så småningom införs bör bygga på en riskbedömning av förväntad påverkan med hänsyn tagen till den aktuella platsens sårbarhet. Samtliga ballastmaterial ska omfattas av gränsvärdena.

Nedanstående slutsatser gäller *materialegenskaper*.

- Uppgifter om miljöpåverkan bör krävas för samtliga ballastmaterial.
- Materialcertifiering av slaggrus och hyttsten bör genomföras snarast. Certifieringen bör göras anläggningsvis.
- För att höja kvaliteten på slaggrus behöver förbränningen i avfallsvärmeverken trimmas. Efter en flerårig satsning på rökgasrening är det nu dags för en satsning på bottenaskans kvalitet.
- Slaggrusets deformationsegenskaper försämras mycket av en hög halt oförbränt material, som väntat.
- Slaggrus har mycket låg värmekonduktivitet vilket ger dokumenterat minskad tjälnedträngning när materialet används i en vägöverbyggnad.
- Om krossad rivningsbetong ska kunna utnyttjas till högkvalitativa ändamål är en långt gången selektiv rivning av byggnader och anläggningar nödvändig. Detta genomförs i stor utsträckning redan i dag.
- Krossad betong har påtagligt hållfasthetsökande egenskaper. En beskrivning av mekanismen bakom hållfasthetsökningen refereras i denna rapport. Kunskap om mekanismen kan utnyttjas för att optimera hållfasthetsökningen.
- Hyttsten har mycket låg värmekonduktivitet, men laboratorieresultat och fältresultat från tjäldjupsmätningar är ej samstämmiga utan fortsatta studier bör göras.
- Systematisk provning av hyttstens lagringsegenskaper bör göras.
- För att kunna utnyttja både ”bra” och ”dåliga” ballastmaterial rätt måste ett nytt dimensioneringssätt införas snarast. Ett förslag som bygger på s.k. B-klassning (bärighetsklassning) presenteras i denna rapport.
- En databas för objekt med alternativa material (även blandningar) bör inrättas. Den bör innehålla uppgifter om plats, material, resultat från provningar och mätningar mm. En sådan databas skulle vara ett mycket värdefullt hjälpmedel vid erfarenhetsåterföring, men även som informationskälla vid ett framtida borttagande eller återanvändning på nytt.

Sammanfattningsvis gäller att om alternativa ballastmaterial används med förnuft kan både naturresurser, miljö, pengar och utrymme sparas.

## 21 Förslag till fortsatt forskning

Följande områden är angelägna och kommer också att behandlas i fortsättningen av detta projekt.

### Utnyttjande av alternativa materials speciella egenskaper

I detta och andra forskningsprojekt har visats att alternativa ballastmaterial såsom slaggrus, krossad betong och hyttsten kan ersätta naturliga vägmateriell i flera tillämpningar. Detta leder till billigare material, kortare transporter eller minskade kostnader för deponering. Det leder också till minskat uttag från grus- och bergtäkter, minskade deponeringsbehov och mindre luftföroreningar från transporter.

Det finns emellertid fler vinster att hämta om man kan utnyttja de speciella egenskaper som vissa alternativa material har. Ett exempel är låg värmekonduktivitet som kan utnyttjas i isolerande syfte och därigenom ge tunnare vägöverbyggnad. Ett annat exempel är ökning av hållfastheten med tiden, vilket kan utnyttjas där styva konstruktioner erfordras.

Det behövs mer detaljerad forskning på dessa områden för att i förväg kunna bedöma hur mycket av egenskapen som kan utnyttjas. Några exempel är

- laboratorie- och fältförsök där slaggrus och hyttsten används som isolerande lager,
- provvägar där lager av krossat berg ersätts av tunnare lager med krossad betong samt
- accelererad metod för bedömning av hållfasthetstillväxt. Befintliga metoder kan vidareutvecklas.

### Förbättring av slaggrusets egenskaper

Det behövs grundliga praktiska studier av avfallsförbränningsprocessen för att identifiera åtgärder som förbättrar kvaliteten hos bottenaskan. Detta ökar användbarheten för slaggrus och minskar därigenom deponeringsbehovet.

### Ny metod för provning av beständighet mot mekanisk påverkan

Det behövs en metod som efterliknar verkliga förhållanden i *obundna* lager och som provar hela materialet. Kanske kan någon av de befintliga metoderna modifieras. En metod utan siktningsmoment bör utvecklas.

Alternativa materials beständighet mot kemisk påverkan bör undersökas.

Ett område som också är mycket angeläget men som inte behandlas inom detta projekt är utvecklandet av

Gränsvärden för miljöpåverkan från ballastmaterial.

## 22 Referenser

- Aalbers Th.G. et al. 1993. Milieuhygiënische kwaliteit van primaire en secundaire bouwmaterialen in relatie tot hergebruik en bodem- en oppervlaktewaterenbescherming. RIVM-rapport no 771 402 006. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiene, Bilthoven, Nederländerna.
- The Aggregate handbook. 1991. (ed. Barksdale). National Stone Association, Washington D.C.
- Aggregates. Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes (2nd edition). 1993. (ed. Smith & Collis). Geological Society Engineering Geology Special Publication No 9. The Geological Society, London, England.
- Alavi S., Merport T., Wilson T., Groeger J. & López A. 1997. LTPP Materials characterization program: Resilient modulus of unbound materials (LTPP Protocol P46) Laboratory startup and quality control procedure. Publ no FHWA-RD-96-176. Federal Highway Administration, Georgetown Pike, Virginia, USA.
- ALT-MAT. 2000. Deliverable D/, Draft final report for publication, Version 1.1 daterad 2000-02-25. Report No WP6.TRL.001. Transport Research Laboratory (TRL), Crowthorne, England.
- Andersson C. & Petersson P-E. 1987. Härdningens inverkan på betongs permeabilitet och beständighet. SP-rapport 1987:07. Statens Provningsanstalt, Borås.
- Anderson K.W. 1996. Advocates & Aggregates, Washington State includes new partners in recycling. TR News nr 184. Maj-juni 1996. Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
- Andersson H., Arm M., Carling, M. & Schouenborg B. 1999. Provningsmetoder för alternativa material till vägunderbyggnad, undersökning av rostereldad kolbottenaska, slaggrus och krossad betong. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Arell L. 1997. Sekundära ballastmaterial. Licentiatavhandling vid avdelningen för Mark- och vattenresurser. TRITA-AMI LIC 2022. Institutionen för anläggning och miljö, KTH, Stockholm.
- Arm M., Svensson J. & Ydrevik K. 1995. Deformationsegenskaper hos finkornig jord. VTI meddelande 770. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Arm M. 1998a. Återvinning. Föredrag vid Naturvårdsverkets/GMF:s miljöutbildning, Stockholm 14 maj 1998. Naturvårdsverket, Stockholm.
- Arm M. 1998b. Användning av återvunnen betong på väg. Artikel i AMA-nytt Informationsdel AF • Mark • Hus 1/98. Svensk Byggtjänst, Stockholm.

- Arm M. 1999. Påverkan på grundvatten från restprodukter i vägar. Tillämpad hydrogeologi – Uppsatser i forskarutbildningskurs vid avdelningen för mark- och vattenresurser 1998–99. (ed. Knutsson). Teknisk rapport 3062. Institutionen för anläggning och miljö, KTH, Stockholm.
- Arm M. 2000a. Produktkrav – funktionella egenskaper, nuläget för alternativa material. Användning av alternativa material som fyllnings- och vägbyggnadsmaterial, Seminarium i Lund 28–29 oktober 1998. (ed. Sigfrid). AFR Rapport 276. Avfallsforskningsrådet, Stockholm.
- Arm M. 2000b. Bärförmåga hos obundna vägmateriäl bestämd med hjälp av dynamiska treaxialförsök, PM daterat 2000-05-05. Dnr 2000/0337-6. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Arm M. 2000c. Variation in mechanical properties of MSW incinerator bottom ash: results from triaxial tests. Waste materials in construction, Science and engineering of recycling for environmental protection, Proceedings of the WASCON 2000. (ed. Woolley, Goumans & Wainwright). Elsevier Science Ltd, Oxford, England.
- Arm M. 2000d. Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests. Waste materials in construction, Science and engineering of recycling for environmental protection, Proceedings of the WASCON 2000. (ed. Woolley, Goumans & Wainwright). Elsevier Science Ltd, Oxford, England.
- Arm M. 2000e. Alternativa material i vägkonstruktioner. Vägingenjören nr 3, Sept 2000. Sollentuna.
- Arm M. 2000f. Obundna vägmateriäls deformationsegenskaper, Utvärderade med dynamiska treaxialförsök. VTI meddelande xxx 2000. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping. (opubl. manuskript)
- Arvidsson H. 1995. Dynamisk treaxiell provning för bedömning av lagringstidens inverkan på styvhets- och deformationsegenskaper hos bärlagergrus. VTI notat nr 10-1995. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Azimi A., Draper F. & Casey M. 1996. Reevaluate, research, renew; Recycling philosophy in North Carolina. TR News nr 184, Maj–juni 1996. Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
- Baldwin G., Addis R., Clark J. & Rosevear A. 1997. Use of industrial by-products in road construction – water quality effects. CIRIA Report 167. Construction Industry Research and Information Association, London.
- Bauchard M. 1988. The use in roads of aggregates made from demolition materials. Proceedings of the Second International RILEM Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry. Vol 2, sid 721–725. (ed. Kasai). Chapman & Hall, London.
- Belevi H. 1998. Environmental engineering of municipal solid waste incineration. Hochschulverlag AG an der Eidgenössische Technische Hochschule ETH, Zürich.

- Belevi H. 2000. Factors that control the quality of municipals solid waste incineration residues. Proceedings of the International symposium on Sustainable construction: Use of incinerator ash in Dundee, 20–21 mars 2000, sid 19–31. (ed. Dhir, Dyer & Paine). Thomas Telford, London.
- Beskow G. 1929. Dräneringens betydelse för vägarnas tjälförhållanden. Meddelande 15. Svenska Väginstitutet, Stockholm.
- Beskow G. 1935. Tjälbildningen och tjällyftningen med särskild hänsyn till vägar och järnvägar. Meddelande 48. Statens Väginstitut, Stockholm.
- Betonghandbok Material. Utgåva 2. 1997. AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, Stockholm.
- Bialucha R. 2000. Leaching standard for quality control of aggregates. Waste materials in construction, Science and engineering of recycling for environmental protection, Proceedings of the WASCON 2000. (ed. Woolley, Goumans & Wainwright). Elsevier Science Ltd, Oxford, England.
- Bjarnason G., Erlingsson S. & Petursson P. 1999a. COURAGE – Aggregate resistance to fragmentation, weathering and abrasion – comparison of different test methods. BUSL report no E-37. Icelandic Building Research Institute, Reykjavik.
- Bjarnason G., Erlingsson S., Petursson P. & Thorisson V. 1999b. COURAGE – Icelandic Final Report, September 1999. Document No 8/7, WP2/4, WP3/6. Public Roads Administration, Reykjavik.
- Bjurulf H. 1993. Karbonatiseringsdjup, en sammanställning. CBI Uppdragsrapport nr 93060. Cement och Betong Institutet, Stockholm.
- Boverket. 1998. Gruvavfall från norr blir ballastmaterial i söder; Ekonomi och transport sjövägen. Boverket, Karlskrona.
- Bruinsma J.E., Peterson K.R. & Snyder M.B. 1997. Chemical approach to formation of calcite precipitate from recycled concrete aggregate base layers. Transportation Research Record nr 1577. Transportation Research Board, National research council, Washington, D.C.
- Bäck L., Jonasson C. & Strömquist L. 1990. Miljökonsekvensundersökningar kring väg 98 Kiruna–Riksgränsen, uppföljande studier 1985–1989. UNGI Rapport Nr 75. Naturgeografiska Institutionen, Uppsala Universitet, Uppsala.
- Bäckman L. 1989. Bestämning av organisk halt i grovkorniga material (bärlager). VTI notat V84. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Casagrande A. 1934. Bodenuntersuchung im Dienste des neuzeitlichen Strassenbaues. Der Strassenbau 3/1934.
- Chaddock B. & Brown A. 1995. In-situ tests for road foundation assessment. Unbound Aggregates in Roads, Proceedings of the UNBAR4. (ed. Dawson & Jones). Department of Civil Engineering, University of Nottingham, England.

- Chandler A.J., Eighmy T.T., Hartlén J., Helmar O., Kosson D.S., Sawell S.E., van der Sloot H.A. & Vehlow J. 1997. Municipal Solid Waste Incinerator Residues. Studies in Environmental Science 67. The International Ash Working Group (IAWG), Elsevier, Amsterdam.
- Chesner W.H., Collins R.J. & MacKay M.H. 1998. User Guidelines for Waste and By-Product Materials in Pavement Construction. Publ FHWA-RD-97-148. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Georgetown Pike, Virginia.
- CROW. 1990. Verbrijzelingsfactor, prov 17 i Standaard RAW Bepalingen. Ede, Nederländerna.
- CROW. 1994. Uitloggen op karakter, Handboek Uitloogkarakterisering II Materialen. Ede, Nederländerna.
- CROW. 1999. Secundaire bouwstoffen voor de wegenbouw. Publicatie 143. Ede, Nederländerna.
- DWW. 1998. Handleiding Wegenbouw, Ontwerp Verhardingen. Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Rijkswaterstaat, Delft, Nederländerna.
- Drever J. I. 1988. The geochemistry of natural waters. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Dunn J.R & Hudec P.P. 1965. The influence of clays on water and ice in rock pores. State of New York. Physical Research, Report RP 65-5.
- Ericsson L.O. 1985. Värmeutbyte mellan berggrund och borrhål vid bergvärme-system. Dissertation. Publ. A52. Geologiska institutionen, Chalmers Tekniska Högskola och Göteborgs Universitet, Göteborg.
- Eriksson L. 1994. Utlåtande om korndensitet och kulkvarnsvärde för hyttsten från Merox, daterat 1994-11-17. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Evertsson U. 2000. Slaggrus som fyllnadsmaterial i terminalområde. Användning av alternativa material som fyllnings- och vägbyggnadsmaterial, Seminarium i Lund 28–29 oktober 1998. (ed. Sigfrid). AFR Rapport 276. Avfallsforskningsrådet, Stockholm.
- FAS. 1995. FAS Asfaltbok. Föreningen för asfaltbeläggningar i Sverige, Stockholm.
- Fernandez M.A., Martinez L., Segarra M., Garci J.C. & Espiell F. 1992. Behavior of heavy metals in the combustion gases of urban waste incinerators. Environmental Science & Technology 26, sid 1040–1047.
- Ford G.R. 1987. Geotextile/Crushed concrete study – Preliminary summary. Minnesota Department of Transportation, Maplewood, USA.
- Fällman A. 1997. Characterisation of residues; Release of contaminants from slags and ashes. Dissertation No 486. Department of Physics and Measurement Technology, Linköping University, Linköping.



- Fällman A-M. & Hartlén J. 1993. Karakterisering och klassificering av avfall. Naturvårdsverket rapport 4226. Naturvårdsverket, Stockholm.
- Fällman A-M. & Johansson L. 1995. Provtagning och karakterisering av restprodukter. Del 3: Metoder för bestämning av totalhalter av några miljöskadliga ämnen i aska och slagg. Nordtest Techn Report 273. Espoo, Finland.
- Fällman A-M., Larsson L. & Rogbeck J. 1999. Slaggrus Miljömässiga och materialtekniska egenskaper. Svenska Renhållningsverksföreningen RVF + Statens geotekniska institut, Malmö + Linköping.
- Fällman A-M. & Helgesson H. 2000. Utveckling av miljöriktlinjer för nyttiggörande av restprodukter i anläggningsbyggande (MARA). Projektförslag daterat 2000-03. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Galjaard P.J. & Cools P. 1995. Analysis of in-situ measurements on a full-scale test pavement. Unbound Aggregates in Roads, Proceedings of the UNBAR4. (ed. Dawson & Jones). Department of Civil Engineering, University of Nottingham, England.
- Gandahl R. 1957. Bestämning av tjälgräns med enkel typ av tjälgränsmätare. Rapport 30. Statens väginstitut, Stockholm.
- Gandahl R. 1987. Tjäle och tjälskydd. Erfarenheter från FoU-verksamheten vid SVI och VTI. VTI meddelande nr 546. Statens väg- och trafikinstitut, Linköping.
- Giannattasio P. & Marchionna A. 1987. Non-traditional materials – residuary products. Technical Committee Report No 8 (Flexible Roads), sid 73–88. Permanent International Association of Road Congresses, XVIII World Road Congress, Brussels.
- Gorle D. & Saeys L. 1988. Reuse of crushed concrete as a road base material. Proceedings of the Second International RILEM Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry, Vol 2, sid 736–745. (ed. Kasai). Chapman & Hall, London.
- GRAAB. 1996. Avfallskraftvärmeverket i Sävenäs, Göteborg. Broschyr. Göteborgsregionens Avfalls AB, Göteborg.
- Gribble C. 1990. The sand and gravel deposits of the Strathkelvin valley. Quarry Management and Products, Volume (July) 29–31.
- Grönholm R. 1999a. Betong i vägar – materialstudie. Om möjligheterna att återvinna betong från husrivning. Boverket, Karlskrona.
- Hansen T. C. & Narud H. 1983. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. Concrete International – Design and Construction 5(1).
- Hansen T.C. 1992. Setting and hardening of crushed concrete fines. RILEM Report 6 Recycling of Demolished Concrete and Masonry, sid 105–106. (ed. Hansen). E & F N Spon/Chapman & Hall, London.

- Hartlén J. & Elander P. 1986. Residues from waste incineration – chemical and physical properties. SGI varia 172. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Hartlén J., Fällman A-M., Back P-E. & Jones C. 1999. Principles for risk assessment of secondary materials in civil engineering work. AFR-rapport 250. Naturvårdsverket, Stockholm.
- Haslund J., Berg F., Pihl K. & Milvang-Jensen O. 1992. Alternative materialer i vejbefæstelser i Danmark, statusrapport. Notat 235. Vejdirektoratet, Statens Vejlaboratorium, Roskilde.
- Henneveld R. 1995. In-situ measurements of the bearing capacity of granular base courses. Unbound Aggregates in Roads, Proceedings of the UNBAR4. (ed. Dawson & Jones). Department of Civil Engineering, University of Nottingham, England.
- Hermansson Å. 2000. Frost modelling and pavement temperatures. Licentiate thesis 2000:18. Department of Civil and Mining Engineering, Division of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Luleå University of Technology, Luleå.
- Hjelmar O. & Ludvigsen K. 1992. Management of MSWI Residues in Denmark. Waste Management International, Vol 2, pp 133–144 (ed. Thomé-Kozmiensky). EF-Verl. für Energie und Umwelttechnik, Berlin.
- Hjelmar O., Holm P.E., Asmusen O. & Isaksen J. 1998. Karakterisering af affald. Miljöprojekt nr 414, 1998. Miljöstyrelsen, Köpenhamn.
- Hoff I. & Natvik J. 2000. Undersøkelser i laboratoriet. KPG-Prosjektet. Våre Veger nr 2B februari 2000, Oslo.
- Höboda P. 1972. Provning av svaga stenmaterial till vägars bär- och förstärkningslager genom våtnötningsförsök. Internrapport nr 80. Statens väg- och trafikinstitut, Stockholm.
- Höboda P. 1976. Masugnsslagg som vägmateriel, en litteraturstudie. Rapport nr 111. Statens väg- och trafikinstitut, Linköping.
- Höboda P. & Bünsov L. 1979. Slagg från förbränning av hushållsavfall som vägmateriel. VTI meddelande nr 180. Statens väg- och trafikinstitut, Linköping.
- Höboda P. & Jacobson T. 1981. Frystövaxlingsförsök på stenmaterial med svaga lösningar av halkbekämpningsmedel. VTI meddelande nr 244. Statens väg- och trafikinstitut, Linköping.
- Höboda P. & Chytla J. 1985. Nötning av beläggingssten i kulkvarn. VTI notat nr 444, Statens väg- och trafikinstitut, Linköping.
- Höboda P., Jacobson T. & Viman L. 1985. Undersökning av förbränningsrest från SYSAV, Malmö, genom laboratorie- och provvägsförsök. VTI meddelande nr 413. Statens väg- och trafikinstitut, Linköping.

- Höbeda P. 1988. Nötningsegenskaper. Aktuell metodutveckling – kulkvarnen. Föredrag vid vägmaterialdagarna i Linköping 1987. Ingår i VTI meddelande nr 559. Statens väg- och trafikinstitut, Linköping.
- Höbeda P. 1995. Europastandarder för stenmaterial till asfaltbeläggningar. VTI notat nr 1-1995. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Höbeda P., Ydrevik K. & Arvidsson H. 1995. Bedömning av hyttsten som förstärkningslager genom dynamiskt treaxialförsök. VTI notat nr 9-1995. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Höbeda P. & Chytla J. 1999. Undersökning av ”finmaterialkvalitet” hos vägmateriäl i synnerhet hos obundna material. VTI notat nr 60-1999. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Ihs A. 1998. Halkbenägenhet hos olika överbyggnadstyper. VTI notat nr 63-1998. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Jacks G. 1975. Tungmetaller från sulfidmalmsupplag. Institutionen för kulturteknik, KTH, Stockholm.
- Jacobsson T. & Viman L. 1989. Provvägsförsök Gärstad –87, Slagger från kol- och sopförbränning, Lägesrapport 8901. VTI notat nr V80. Statens Väg- och trafikinstitut, Linköping.
- Jansson H. & Ydrevik K. 1998. Utvärdering av fallviktsmätning våren 1998 på Björnsbyvägen, provsträckor med krossad betong. VTI utlåtande nr 664. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Jansson H. 1999. Fallviktsmätning Gumpekulla 19 augusti 1999. Manuskript daterat 1999-10-08. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping. (opubl.)
- Johansson B. 1998. Krossad betong som överbyggnadsmaterial – fullskaleförsök. Rapport B 1998:8. Institutionen för geoteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Johansson H., Ydrevik K. & Arvidsson H. 1996. Krossad betong – ett material för användning i vägar och gator. VTI notat nr 1-1996. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Kaga H., Kasai Y., Takeda K. & Kemi T. 1988. Properties of recycled aggregate from concrete. Proceedings of the Second International RILEM Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry, Vol 2, sid 690–698. (ed. Kasai). Chapman & Hall, London.
- Kalisch H. 1998. Untersuchungen an Asphaltbauweisen mit wiederverwendeten Baustoffen in der ungebundenen Tragschicht des Oberbaus. Rapport från projektnr 94 340. Bundesanstalt für Strassenwesen BAST, Bergisch Gladbach, Tyskland.
- Karlsson M. 2000. Application technology in recycling concrete. Licentiatavhandling, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

- Kappel F. 1987. Untersuchungen zur Bestimmung des Mineralbestandes in der Fraktion <0,02 mm in ungebundenen Tragschichten. Strassenforschung Heft 322. Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien.
- Kawamura M. & Torii K. 1988. Reuse of recycled concrete aggregates for pavement. Proceedings of the Second International RILEM Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry Vol 2, sid 726–735. (ed. Kasai). Chapman & Hall, London.
- Keto E. 1995. Estimating the compactibility of the crushed rock aggregates based on IC-testing. Master thesis, Tampere University of Technology, Finland.
- Kivekäs L. 1997. The use of concrete and brick demolition wastes in earth constructions. Artikel i tidskriften Rakennustekniikka nr 4 1997, Finland.
- Kleyn E.G. & Van Heerden. 1983. Using DCP soundings to optimize pavement rehabilitation. Paper submitted for Annual Transportation Convention in Johannesburg July 1983. Report LS/83 Materials Branch. Transvaal Roads Department, Pretoria South Africa.
- Knutsson S. 1981. Tjälningsprocessen – beräkning av tjäldjup. Skrift 1981:5. Avdelningen för geoteknik, Tekniska Högskolan i Luleå, Luleå.
- Koch L. 1996. Anvendelse af betonaffald som ubundet vejbygningsmateriale. Eksamensprojekt vid Institut for Veje, Trafik og Byplan. Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby.
- Kullberg S. 1990. Slagganvändning – teknik och miljö. SGI varia 321. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Kälvesten E. 1996. Miljömässig kartering av vägbyggnadsmaterial. SGI Varia 452. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Laaksonen R., Nordenswan E., Paakinen I., Alkio R. & Törnqvist J. 1999. ICT-moduuli. Tutkimusraportti 365/1999. Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland.
- Larsson R., Nilsson G. & Rogbeck J. 1985. Bestämning av organisk halt, karbonathalt och sulfidhalt i jord. Rapport No 27. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Lehmann N.K.J., Hjelmar O., Wahlström M., Hrolfsdottir H.B., Nesgård B.S., Carling M. 1997. Oversigt over nordiske metoder til miljømæssig testning af affald til genbrug. Nordtest-projekt 1312-96. VKI, Danmark.
- Lindberg E (red). 1991. Kemikalier i arbetsliv och miljö. Natur och Kultur, Lund.
- Lindgren Å. 1992. Laboratorieundersökningar av masugnsslagg. Teknisk rapport 1992:09T. Luleå tekniska universitet, Luleå.

- Lindgren Å. 1998. Road Construction Materials as a Source of Pollutants. Doctoral Thesis. Division of Traffic Engineering, Department of Environmental Engineering, Luleå Tekniska Universitet, Luleå.
- Lundgren T. & Hartlén J. 1991. Slagg från avfallsförbränning., Teknik och Miljö. REFORSK rapport FoU nr 61. REFORSK, Malmö.
- Miljø- og Energiministeriet. 2000. Bekendtgørelse om genanvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder. BEK nr 655 af 27/06/2000. Miljø- og Energiministeriet, København.
- Miljøstyrelsen. 1993. Anvendelse af knust tegl og beton som fyld i ledningsgrave. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, Nr 41 1993. Miljøministeriet Miljøstyrelsen, København.
- Molin C., Larsson K. & van Meer P. 1996. Rivning av betong med tanke på återanvändning, Steg 3. SBUF rapport från projekt 5044. Sveriges bygg-entreprenörers utvecklingsfond, Stockholm.
- Muethel R.W. 1989. Calcium carbonate precipitate from crushed concrete. Michigan Department of Transportation, Lansing.
- Mulheron M. & O'Mahony M. 1988. The durability of recycled aggregates and recycled aggregate concrete. Proceedings of the Second International RILEM Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry. Vol 2, sid 633–642. (ed. Kasai). Chapman & Hall, London.
- Naturvårdsverket. 1996. Deponering av avfall : förslag till Allmänna råd. Rapport 4610. Naturvårdsverket, Stockholm.
- Naturvårdsverket. 1999a. Bedömningsgrunder för miljö kvalitet. Grundvatten. Rapport 4915. Naturvårdsverket, Stockholm.
- Naturvårdsverket. 1999b. Bedömningsgrunder för miljö kvalitet. Metodik för inventering av förorenade områden. Rapport 4918. Naturvårdsverket, Stockholm.
- Natvik J. 1998. Alternative testmetoder i undersøkelser av tilslagsmaterialer. Doktor ingeniøravhandling 1998:27. Institutt for geologi og bergteknikk. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet NTNU, Trondheim.
- Nilsson U. & Håkansson K. 2000. Miljöpåverkan vid användning av hyttsten och krossad betong i väg. Föredrag vid Transportforum 2000, Linköping 12–13 januari 2000.
- Nunes M.C.M. 1997. Enabling the use of alternative materials in road construction. Doctoral thesis, Department of Civil Engineering, University of Nottingham, Nottingham, England.
- OECD. 1997. Recycling strategies for road works. OECD Publications, Paris.
- Pavasars I. 2000. Composition of organic matter in bottom ash from MSWI. Waste materials in construction, Science and engineering of recycling for

- environmental protection, Proceedings of the WASCON 2000. (ed. Woolley, Goumans & Wainwright). Elsevier Science Ltd, Oxford, England.
- Petersson Ö. & Karlsson B. 1987. Undersökning av tid-hållfasthets samband för cementbundet grus vid olika temperaturer. VTI meddelande nr 522. Statens väg- och trafikinstitut, Linköping.
- Pihl K. & Milvang-Jensen O. 1996. Bundsikringslag af forbraendingslagge. Vejteknisk Institut Rapport 78 1996. Vejdirektoratet, Roskilde.
- Proposition 1992/93:180. Riktlinjer för en kretsloppsanpassad samhällsutveckling. ("Kretsloppspropositionen"). Riksdagen, Stockholm.
- Proposition 1996/97:172. Vissa avfallsfrågor. (bl.a. förbud mot brännbart eller organiskt avfall). Riksdagen, Stockholm.
- Proposition 1997/98:145. Svenska miljömål. Miljöpolitik för ett hållbart Sverige. ("Miljöpropositionen"). Riksdagen, Stockholm.
- Puchman K. & Henrichsen A. 1988. Reuse of concrete pavements. Proceedings of the Second International RILEM Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry, Vol 2, sid 746-755. (ed. Kasai). Chapman & Hall, London.
- Reichelt J. 1996. Mineralogische Aspekte bautechnischer und umweltrelevanter Eigenschaften von Müllverbrennungsschlacken. Institut für Strassen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Tyskland.
- Rogbeck J. & Elander P. 1995. Väg E4 Nyköpingsbro-Jönåker. Miljökonsekvenser vid användning av hyttsten. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Rogers C.D.F., Brown A.J. & Fleming P.R. 1995. Elastic stiffness measurement of pavement foundation layers. Unbound Aggregates in Roads, UNBAR4 Symposium 1995, pp 331-338, (ed. Dawson & Jones). University of Nottingham, Nottingham, England.
- Rosenthal G. 1962. Über das Gefrierverhalten von Wasser in Ziegeln. Berichte Deutscher Keramischer Gesellschaft, Heft 5.
- RVF. 1997. Statistik 1997. Renhållningsverksföreningen, RVF Service AB, Malmö.
- RVF. 2000. Svensk Avfallshantering 2000. Renhållningsverksföreningen, Malmö.
- Sadecki R.W., Busacker G.P., Moxness K.L., Faruq K.C. & Allen L.G. 1996. An investigation of water quality in runoff from stockpiles of salvaged concrete and bituminous paving. Report MN/PR-96/31. Minnesota Department of Transportation, Maplewood.
- Schmith N.B. 1984. Incinerator Residue as a Pavement Material III. Notat 176. Statens Vejlaboratorium, Roskilde.

- SFS 1999:673. Lag om skatt på avfall. ("Avfallsskatten"). Ändrad genom SFS 1999:1321. Fritzes, Stockholm.
- SGAB. 2000. SGAB Analytica Prislista 2000, Miljö. Luleå Tekniska Universitet, Luleå.
- SGU. 1996. Grus, sand och industrimineraler. Produktion och tillgångar år 1996. SGU PM 1997:3. Sveriges Geologiska Undersökning, Uppsala.
- Shell Pavement Design Manual. 1978. Shell International Petroleum Company Limited, London.
- Sjöholm M., Carlsten P., & Elander P. 1994. Bestämning av permeabilitet hos restprodukter och jord, in situ och på laboratorium. NORDTEST rapport 254. SGI Varia 424. Statens geotekniska institut, Linköping.
- SLV. 1993. Dricksvattenkungörelse. SLV FS 1993:35. Livsmedelsverket, Uppsala.
- Smith R.B. & Pratt D.N., 1983. A field study of in situ California Bearing Ratio and dynamic cone penetrometer testing for road subgrade investigations. Australian Road Research 13(4) December 1983, pp 285–294. Australian Road Research Board.
- SOU 2000:52. Framtidens miljö – allas vårt ansvar. Betänkande från Miljömålskommittén. Fritzes offentliga publikationer, Stockholm.
- SP. 1994. Bestämning av värmekonduktivitet hos hyttsten. Utlåtande daterat 1994-07-28. Sveriges provnings- och forskningsinstitut, Borås.
- Stenberg L. 1997. Frystest för dimensionering av tjälskydd. Studier avseende avvärdets definition. VTI notat nr 42-1997. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Stenlid L. 1996. Klassificering av bergarter med Los Angeles-trumma. Slutrapport SBUF projekt nr 2135. Sveriges byggtreprenörers utvecklingsfond, Stockholm.
- Sundberg J. 1988. Thermal properties of soils and rocks. Publ. A5, Dissertation. Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Svensson J. 1997. Fuktmätning i väg, En kunskapsöversikt samt utveckling av en enkel fuktmätningstrustning. VTI meddelande nr 809. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Svensson J. 1999a. Undersökning av krossad betong enligt California Bearing Ratio, CBR. Utlåtande daterat 1999-06-09. Dnr 644/98-6. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Svensson J. 1999b. TJÄL 98 – en ny utrustning för mätning av tjäldjupet samt temperaturen i väg och undergrund. Manuskript daterat 1999-12-30. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping. (opubl.)

- Svensson J. 1999c. Schaktmassor – en nyttjad eller outnyttjad resurs, Inledande inventering. VTI notat nr 56-1999. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Sweere G.T.H & Henny R.J. 1987. Toename van de elastische stijfheid van betongranulaat met de tijd. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Laboratorium voor Weg- en Spoorwegbouwkunde, Delft.
- Sweere G.T.H. 1990. Unbound granular bases for roads. Dissertation. Delft University of Technology, Delft.
- SYSAV. 1986. Utnyttjning av slagg från avfallsförbränning, Vägtekniska och miljömässiga undersökningar samt praktiska erfarenheter. REFORSK FoU-rapport 06. En förstudie utförd av Sydvästra Skånes Avfallsaktiebolag. SYSAV, Malmö.
- Tamirisa R. 1993. Study of highway base/subbase aggregates that cause depositions of calcareous "tufa" in drains. Master's thesis. Department of Civil Engineering, University of Toledo, Ohio.
- TEKES. 2000a. By-products and recycled materials in earth structures, Materials and applications. (ed. Mäkelä & Höynälä). Technology Review 92/2000. TEKES, Helsinki, Finland.
- TEKES. 2000b. By-products in earth construction, Assessment of acceptability. Technology Review 96/2000. TEKES, Helsinki, Finland.
- Tielaitos Geokeskus. 1994. Kalliomurskeiden tilvistyminen ja hienoneminen, Loppuraportti, ISBN 0788-3722, Oulu, Finland.
- TNC. 1975. TNC 59 Geoteknisk ordlista. Tekniska nomenklaturcentralens publikationer. TNC, Stockholm.
- Tossavainen M. 2000. Leaching behaviour of rock materials and a comparison with slag used in road construction. Licentiate Thesis. Division of Mineral Processing, Department of Chemical and Metallurgical Engineering, Luleå Tekniska Universitet, Luleå.
- Tsztoo R.D. 1996. Transportation Transformation, Recycling and conservation in California. TR News nr 184, Maj-juni 1996. Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
- Tukker A., van den Berg M. & van der Sloot H.A. 1994. State of the art document Waste characterization. CEN/TC 292, Final draft May 31 1994, Apeldoorn, Nederländerna.
- Tuutti K. 1982. Corrosion of steel in concrete. CBI Research fo 4.82. Cement och Betong Institutet, Stockholm.
- Van Vuuren. 1969. Rapid determination of CBR with the portable dynamic cone penetrometer. Reprint from "The Rhodesian Engineer", September 1969.



- Vejdirektoratet. 1999. Remissvar till Offentlig höring vedr. bekendtgørelse om genanvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsformål. J.nr. A50-D 0100-3 daterat 20 april 1999.
- Verhulst D., Buekens A., Spencer P.J. & Eriksson G. 1996. Thermodynamic behavior of metal chlorides and sulfates under the conditions of incinerator furnaces. *Environmental Science & Technology* 30, sid 50–56.
- VROM. 1999 + 2000. Application of waste materials a success now, a success in the future (av J Th van der Zwan), Sustainable development and road construction; sustainable building in the Netherlands (av J Th van der Zwan och R J P Henneveld), Bottom ash in the Netherlands (av Vereniging van Afvalverwerkers), Waste products and the Building Materials Decree (av J G ten Wolde), Dutch (environmental) policy concerning the use of secondary materials (av J Th van der Zwan). Waste in the Netherlands (VROM), The Building Materials Decree affects the entire building industry (VROM).
- Vägverket. 1996. Kretsloppsanpassad väghållning. Handlingsplan. Publ 1996:29. Vägverket, Borlänge.
- Vägverket. 2000. Inriktningsprogram för mark- och vattenfrågor i Vägverket. Publikation 2000:85. Vägverket, Borlänge.
- Wahlström M., Laine-Ylijoki J., Määttänen A., Luotojärvi T. & Kivekäs L. 2000. Environmental quality assurance system for use of crushed mineral demolition wastes in earth constructions. *Waste Management* 20 (2000) sid 225–232.
- Waibel P. 1975. Der Einfluss der mineralogischen Zusammensetzung der Feinanteile auf die Frostsicherheit von Kiestragschichten. *Strassenforschung*, Heft 47. Bundesministerium für Bauten und Technik, Wien.
- Wheeler Jr. J.J. 1996. Waste materials in highway construction. Lessons from New York State. TR News nr 184. Maj–juni 1996. Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC.
- Ydrevik K. 1995. Dynamisk treaxiell provning av bär- och skyddslagermaterial. VTI notat nr 58-1995. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Ydrevik K. 1996. Krossad rivningsbetong som bär- och förstärkningslager i gatubyggnad, McDonalds hamburgerrestaurang i kvarteret Elstolpen i Västerås. VTI notat nr 54-1996. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Ydrevik K., Hellström V. & Molin C. 1996. Krossad betong som vägbyggnads-material, Samband mellan cylindertryckhållfasthet och vägtekniska egenskaper. VTI notat nr 46-1996. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Ydrevik K. 1998. Utlåtande angående några sekundära mineraliska materials mekaniska egenskaper, Järnsand, masugnsslagg samt gråberg. VTI utlåtande nr 652. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.

- Ydrevik K. 1999a och 1999b. Förstärkningslagermaterial av krossade betongslipers. Erfarenheter från provsträckor på väg 869 vid Stenstorp. Del 1: Byggnadsrapport. VTI notat nr 5-1999 och del 2: Resultatrapport hösten 1999. VTI notat nr 45-1999. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Ydrevik K. 1999c. Utlåtande beträffande krossad vägbetongs mekaniska egenskaper och lämplighet som användning i bär- och förstärkningslager. VTI utlåtande nr 644. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Ydrevik K. 1999d. Återvägen, Råd och vägledning för återvinning av krossad betong som ballast i gator och vägar. VTI notat nr 67-1999. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Ydrevik K. 1999e. Fallviktsmätning på Törringevägen, Malmö stad. PM daterat 1999-07-07. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping. (opubl.)
- Yoshikane T. 1988. The instances of concrete recycled for base course material in Japan. Proceedings of the Second International RILEM Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry, Vol 2, sid 756–765. (ed. Kasai). Chapman & Hall, London.
- Åslund P. 1994. Metaller i vatten. VA-Hygien, Hofors.

#### Personlig kommunikation

- Carling Maria. 1998. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Carlsson Håkan. 2000. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Grönholm Raul. 1999. SYSAV, Malmö.
- Hagert Christer. 2000. Vägverket, Borlänge.
- Håkansson Karsten. 2000. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Ihs Anita. 1999. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Johansson Hans G. 2000. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Svensson Jörgen. 2000. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.
- Wahlström Margaretha. 2000. VTT, Helsingfors, Finland.
- Ydrevik Krister. 2000. Väg- och transportforskningsinstitutet, Linköping.

#### Standards och metodbeskrivningar

- AS 1289.6.8.1 - 1995. Determination of the resilient modulus and permanent deformation of granular unbound pavement materials. ISBN 0 7262 9515 9. Standards Australia.

**ASTM American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA:**

ASTM C131. 1996. Test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. Annual book of ASTM standards, Volume 04.02.

ASTM C535. 1996. Test method for resistance to degradation of large-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. Annual book of ASTM standards, Volume 04.02.

ASTM D1883. 1987. Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory compacted soils. Annual book of ASTM standards, Volume 04.08.

ASTM D4429. 1993. Test method for CBR (California Bearing Ratio) of soils in place. Annual book of ASTM standards, Volume 04.08.

ASTM P233. 1992. Proposed test method for compaction and strength properties of graded aggregate using the gyrator testing machine (GTM). Annual book of ASTM standards, D-4 proposal.

**AASHTO TP4-97.** Method for preparing and determining the density of hot mix asphalt specimens by means of the SHRP gyratory compactor. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

**ATB VÄG.** Allmän teknisk beskrivning för vägkonstruktioner. Publ BY20A 2000:30050. Kapitel A, C och E. Vägverket, Borlänge.

**British Standards Institution, London:**

BS 812. Testing aggregates.

Part 110:1990. Method for determination of aggregate crushing value.

Part 111:1990. Method for determination of ten percent fines.

Part 112:1990. Method for determination of aggregate impact value.

Part 113:1990. Method for determination of aggregate abrasion value.

Part 124:1989. Method for determination of frost-heave.

BS 1377. Methods of testing soils for engineering purposes.

Part 4:1990. Compaction related tests.

**Dansk Standardiseringsråd, Köpenhamn:**

DS 259:1982. Vandundersøgelse. Metal ved atomabsorptionspektrofotometri i flamme.

DS 401:1992. Dansk Ingeniørforenings norm for sand-, grus- og stenmaterialer.

DS 405.0–5:1978. Prøvningsmetoder for sand-, grus- og stenmaterialer.

**Deutsche Normen, Köln:**

DIN 52 115. 1988. Prüfung von Gesteinskörnungen: Schlagversuch. Teil 1–3.

DIN 18 134. 1990. Plattendruckversuch: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte.

**FAS Metoder 1998. Metodbeskrivningar för provning av stenmaterial, bituminösa bindemedel, asfaltbeläggningar och -massa. Föreningen för asfaltbeläggningar i Sverige, Stockholm:**

FAS Metod 210-98. Bestämning av sprödhetstal.

FAS Metod 231-98. Bestämning av slipvärde.

FAS Metod 259-98. Bestämning av kulkvarnsvärde.

**FINNRA. 2000. Use of Reclaimed Concrete in Pavement Structures, Design Manual and Construction Specifications. Lohja Envirotec + Viatek + VTT m. fl. Finnish Road Administration, Helsingfors.**

**EN, SS-EN, prEN och draft prEN. CEN. Standardiseringskommissionen i Sverige (SIS), Stockholm. Byggstandardiseringen (BST), Stockholm:**

SS-EN 932. Ballast – Generella metoder –

Del 3: Petrografisk analys, förenklad metod. SS-EN 932-3.

SS-EN 933. Ballast – Geometriska egenskaper –

Del 8: Bestämning av sandekvivalentvärde hos finmaterialet. SS-EN 933-8.

Del 9: Bedömning av finmaterial – Metylenblåtest. SS-EN 933-9.

EN 1097. Ballast – Mekaniska och fysikaliska egenskaper –

Del 1: Bestämning av nötningsmotstånd (micro-Deval). SS-EN 1097-1.

Del 2: Bestämning av motstånd mot sönderdelning. EN 1097-2.

Del 6: Bestämning av vattenabsorption och korndensitet. EN 1097-6.

Del 9: Bestämning av motstånd mot nötning av dubbdäck. SS-EN 1097-9.

Del 10: Provning av kapillärlåshöjd. prEN 1097-10.

EN 1367. Ballast – Beständighetsegenskaper –

Del 1: Frostbeständighet. EN-1367-1.

Del 2: Provning med magnesiumsulfat. SS-EN 1367-2.

EN 1744. Tests for chemical properties of aggregates –

Part 1: Chemical analysis. SS-EN 1744-1.

Part 3: Preparation of eluates by leaching of aggregates. prEN 1744-3.

prEN 12457. 1999. Characterisation of waste, Leaching, Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges.

Part 1: One-stage batch test at a liquid to solid ratio of 2 l/kg with particle size below 4 mm (without or with size reduction). prEN 12457-1.

Part 2: One-stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg with particle size below 4 mm (without or with size reduction). prEN 12457-2.

Part 3: Two-stage batch test at a liquid to solid ratio of 2 and 8 l/kg with particle size below 4 mm (without or with size reduction). prEN 12457-3.

Part 4: One-stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg with particle size below 10 mm (without or with limited size reduction). prEN 12457-4.

Draft prEN. pH-stat-test. CEN/TC 292/WG6.

prEN 12524. Värmekonduktivitet.

prEN 13137. August 1999. Characterization of waste, Determination of total organic carbon (TOC) in waste, sludges and sediments.

prEN 13242. Ballast för obundna och hydrauliskt bundna material – krav.

prEN 13285. Unbound mixtures – Specifications.

Draft prEN 13286-7. 2000. Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures.

Draft prEN (WI 00227139). 1993. Gyrotory compactor, test reference nr 3.2.

Draft pr EN (WI 00227412). 1998. Unbound and hydraulically bound mixtures – Test method for bearing capacity – Determination of California Bearing Ratio, immediate bearing index and linear swelling.

#### **Netherlands Standardisation Institute (NNI), Delft, Nederländerna:**

NEN 7341. 1995. Leaching characteristics of building and solid waste materials – Determination of the availability of inorganic components for leaching. Draft 1992 och First edition, February 1995.

NEN 7343. 1995. Leaching characteristics of building and solid waste materials – Leaching tests – Determination of the leaching of inorganic components from powder and granular building and waste materials.

#### **NORDTEST, Espoo, Finland:**

NT BUILD 485. 1998. Aggregates: Frost resistance test using 1% NaCl.

NT ENVIR 003. 1995. Solid waste, Granular inorganic material: Availability test.

NT ENVIR 005. 1998. Solid waste, Granular inorganic material: Compliance batch leaching test.

SHRP M002. Preparation of compacted specimens of modified and unmodified hot mixed asphalt by means of the SHRP gyrotory compactor. Strategic Highway Research Program, Washington, D.C.

Standard Specifications for Construction. 1983. Minnesota Department of Transportation, St. Paul, USA.

#### **Svensk standard Standardiseringskommissionen i Sverige (SIS), Stockholm:**

SS 02 42 11. 1980. Värmeisolering – Bestämning av värmemotstånd eller värmekonduktivitet (värmeledningsförmåga) med värmeflödesmätarapparater.

SS 02 71 05. 1990. Geotekniska provningsmetoder – Organisk halt i jord – Glödgningsförlustmetoden. (Glödning vid 950°C).

SS 02 71 07 utgåva 3. 1991. Geotekniska provningsmetoder – Organisk halt i jord – Kolorimetermätning.

SS 02 71 09 utgåva 4. 1994. Geotekniska provningsmetoder – Packningsegenskaper – Laboratoriepackning.

SS 02 71 24. 1992. Utgåva 2. Geotekniska provningsmetoder – Kornfördelning – Sedimentering, hydrometermetoden.

SS 02 81 13. 1981. Vattenundersökningar – Bestämning av torrsubstans och glödgningsrest i vatten, slam och sediment. (Glödning vid 550°C).

SS 13 21 03. 1987. Stenmaterial (ballast) för byggnads- och anläggningsändamål – Bestämning av övre kapillär stighöjd vid stigande fuktkvot.

**VÄG 94.** Allmän teknisk beskrivning för vägkonstruktioner. Kap 1–5. Publ 1994:21–23, 1994:86, 1994:25. Vägverket, Borlänge.

**Vägverkets metodbeskrivningar, VVMB. Vägverket, Borlänge:**

36:1977. Jordmaterial: tung instampning. Publ 1987:158.

34:1984. Jordmaterial: glödgningsförlust. Publ 1987:168.

606:1993. Jord- och vägbyggnadsmaterial: Bestämning av bärighetsegenskaper med statisk plattbelastning. Publ 1993:019.

609:1994. Jord- och vägbyggnadsmaterial: Bestämning av tjällyftningsparametrar. Publ 1994:44.

610:1997. Jord- och vägbyggnadsmaterial: Provberedning och bestämning av kulkvarnsvärde för obundna överbyggnadsmaterial. Publ 1997:127.

112:1998. Deflektionsmätning vid provbelastning med fallviktsapparat. Publ 1998:80.

# Bilagor





# Variation in mechanical properties of MSW incinerator bottom ash. Results from triaxial tests.

Maria Arm

Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), Linköping, Sweden

## ABSTRACT

This study deals with laboratory testing of municipal solid waste (MSW) incinerator bottom ash. The aim was to investigate the mechanical properties such as stiffness and stability of the ash for future use in unbound road layers. Especially the effect of the material variation on the mechanical properties was analysed. Specimens of bottom ash from four different plants and four seasons were tested by repeated load triaxial tests. Results so far suggest that there is a significant variation in the mechanical properties, both seasonal fluctuations and differences between incinerator plants. However, the variation is not greater than for studied natural aggregates. It is also shown that the organic content has a limiting effect on the resilient modulus, as expected. If MSWI bottom ash is utilised instead of sand in a capping layer, the same design modulus could be used as for the sand. All tested materials are stable and give reasonable permanent deformations at the stress level that is relevant for a Swedish capping layer.

## 1. INTRODUCTION

Despite Sweden's relative richness in natural aggregate reserves, there is a governmental ambition to facilitate and increase the use of alternative materials in Swedish road constructions. Several research projects are going on in purpose to establish both design and environmental guidelines. One material that has not been used in Sweden in large-scale projects yet, is bottom ash from incineration of municipal solid waste, here called MSWI bottom ash.

This study deals with laboratory testing of unbound MSWI bottom ash. The aim was to investigate the mechanical properties of the ash when used in unbound road layers, at first hand in capping layers. Great variations in the ash properties were expected, due to seasonal variations in the waste. Different incineration processes could also be expected to have an influence on the mechanical properties of the bottom ash. Therefore, ashes from different seasons and different incineration plants were studied.

MSWI bottom ash from four plants was chosen, namely from Stockholm, Gothenburg, Malmö and Linköping. These plants incinerate both municipal and industrial wastes. They are among the largest in Sweden and produce both heat and electricity.

The production of bottom ash for each of the stations is between 35 000 and 80 000 metric tons per year, as can be seen in table 1. This can be compared to the total amount for Sweden, which was about 340 000 metric tons in 1997.

Table 1. Production statistics for incineration stations (1)

Station	Incinerated waste (1 000 kg)	Energy production (MWh)		Remainder (1 000 kg)	
		Heat	Electricity	Bottom ash	Fly ash
Högdalen, (Stockholm)	263 896	588 473	22 397	51 912	13 263
Gothenburg	381 500	1 038 040	129 418	79 302	13 457
Malmö	202 166	573 749	No prod. 1997	36 850	4 410
Linköping	225 585	655 691	117 852	49 500	9 501

## 2. METHODS

The Swedish Geotechnical Institute (SGI) made sampling in the plants as part of another study. The sampling was carried out during different times of the year, approximately every third month. Then, the 16 materials were stored outdoors for at least six months in wooden boxes without roofs. From these boxes representative samples were taken for this study.

The mechanical properties were studied using repeated load triaxial tests. Complementary properties such as composition, particle size distribution, organic content, optimum water content and maximum dry density were also investigated. Comparison with corresponding properties of conventional materials, such as different sandy materials was made. SGI has done chemical and environmental characterisation on the same material and those results will be reported separately.

In the repeated load triaxial tests, the material deformation under simulated traffic conditions is investigated. The resilient strain is used to calculate the stiffness expressed as resilient modulus and the accumulated permanent deformation can be used for classification purpose. Since the specimen exposed to loading consists of the whole composite material up to a certain grain size, it is in fact the function of the material that is tested. The method is well known both for fine-grained and coarse-grained materials and a CEN standard is under development.

The tests were carried out on undrained specimens with the dimensions of 150 mm diameter and 300 mm height in VTI:s servo-hydraulic material testing system (VMS). This allowed ashes with maximum particle size up to 30 mm to be tested. The specimens were undrained since this is most similar to reality. The traffic load is quick compared to the long time loading that is used in soil mechanics. The specimens were manufactured in *one* layer by means of vibrating compacting equipment called Vibrocompresseur in a special cylinder. This is a "friendly" method that was chosen because earlier experiments showed crushing tendency for these materials. After compaction the specimens were

pushed out of the cylinder and equipped with platens in both ends and a thin rubber membrane around.

The aim was to test all materials at the same relative water content and the same relative density. The conditions that were chosen were optimum water content and 90% of maximum dry density from modified proctor. However, problems in compacting some of the specimens resulted in differences in the attained compaction degree. The impact this fact has had on the test results is discussed later.

For each material investigated, three specimens were compacted and tested. The results that are discussed here are averages for these three specimens. The tests are still carried on and will be finished during this year.

### 3. RESULTS

The stations produce bottom ash with grain size distributions according to figure 1.

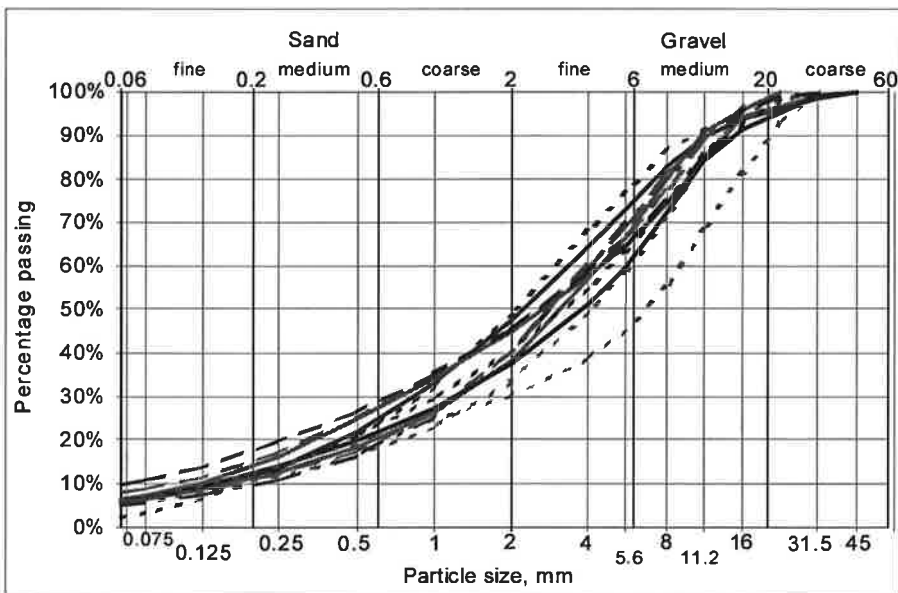


Figure 1. Grain size distribution for MSWI bottom ash from four different stations and three different seasons.

SGI has carried out compaction tests on the materials by means of modified proctor. The same institute has also reported organic content measured as loss on ignition (LOI) for the studied materials. Table 2 and 3 summarises the results so far.

Table 2. Maximum dry density and optimum water content, from modified Proctor tests (from SGI).

Season	Stockholm		Gothenburg		Malmö		Linköping	
	Max dens (t/m <sup>3</sup> )	Opt w (%)	Max dens (t/m <sup>3</sup> )	Opt w (%)	Max dens (t/m <sup>3</sup> )	Opt w (%)	Max dens (t/m <sup>3</sup> )	Opt w (%)
Autumn	1,61	13,5	1,73	17	1,65	15-18	1,58	18,0
Winter	1,66	9,0	1,72	16,1	1,63	16,5	1,48	19,5
Spring	1,58	11-19	1,66	17-19	1,64	16,4	1,43	20,5

Table 3. Loss on ignition (LOI) in %, sample A/sample B. (from SGI)

	Stockholm	Gothenburg	Malmö	Linköping
Autumn	3,9/4,1	2,8/4,0	3,8/3,8	6,5/7,0
Winter	3,2/4,0	2,7/2,7	4,4/4,4	9,1/9,2
Spring	4,1/4,3	3,7/3,7	4,9/5,0	8,9/9,0

Furthermore, SGI has investigated the environmental properties by leaching tests on the same materials. Results from these investigations will be reported separately by Dr. Ann-Marie Fällman.

### 3.1. Stiffness and stability

Data from triaxial tests on bottom ash from four stations and three seasons are presented here. In figure 2 the stiffness expressed as resilient modulus for different stresses is plotted for one of the stations. Results from the other stations showed the same pattern.

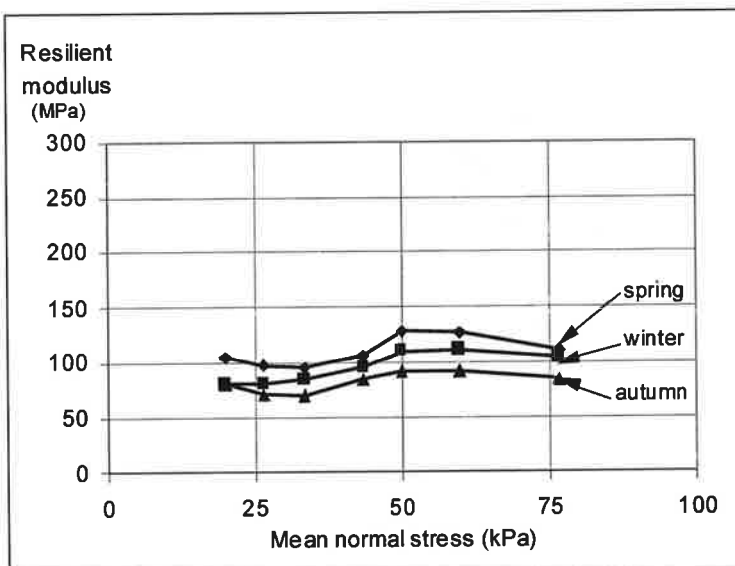


Figure 2. Stiffness expressed as resilient modulus for MSWI bottom ash from Stockholm.

Two things can be noticed. First, the curves are rather flat, which indicates a weak stress dependency and is typical for sandy materials. Second, the differences between “spring”, “winter” and “autumn” ashes are significant.

However, the relative position of curves, with the “spring” modulus being higher than “winter” and “autumn” modulus, is not general. This is illustrated in figure 3, where the results from one stress condition are compared for all four stations. The scatter among the three specimens tested for each material is also illustrated. Some of this scatter and also the variation between materials can be explained by unintended differences in density of the specimens. This is discussed in a subsequent chapter.

The stability expressed as permanent compressive deformation will also be evaluated within this project. Preliminary results suggest that the permanent deformations are very small as long as the mean normal stress is less than 60 kPa. In figure 4 the deformations at a mean normal stress of 50 kPa are compared.

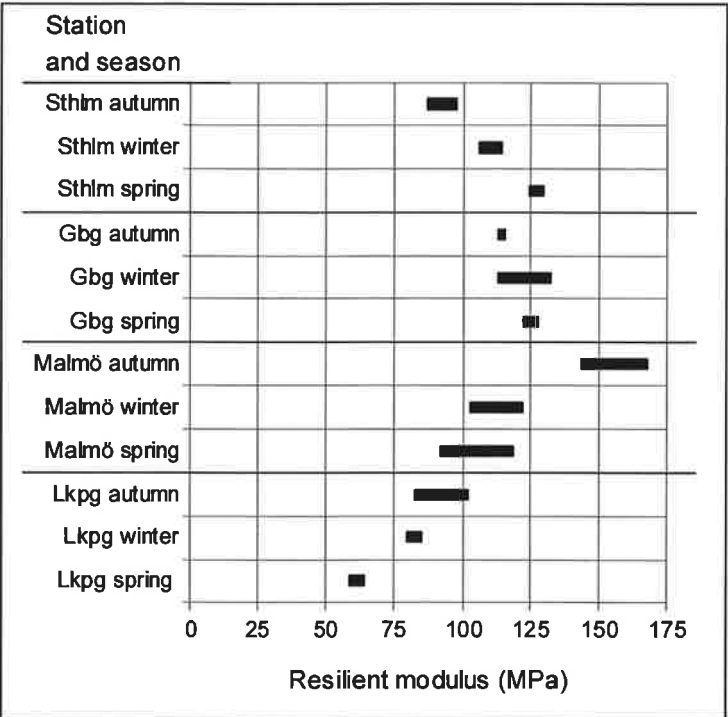


Figure 3. Variation in resilient modulus at one stress condition. 5% significance. Mean normal stress = 50 kPa.

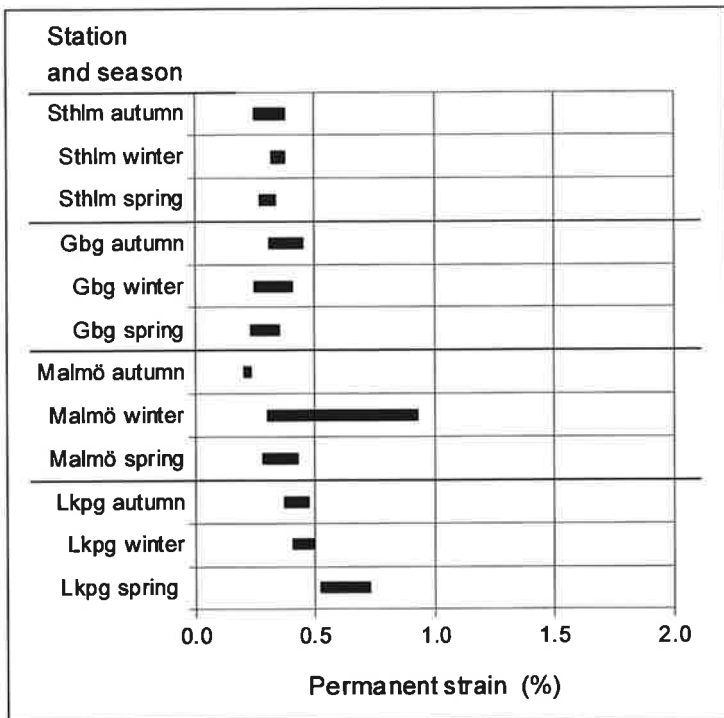


Figure 4. Variation in accumulated axial permanent compression. 5% significance. Mean normal stress = 50 kPa.

### Comparison with conventional materials

The test results have been compared with the corresponding results for natural aggregates that the bottom ash could possibly replace, such as sand with different grading. Those sandy materials were all taken from a construction site, from different sections of the new E6 at the west coast of Sweden. They have been tested in the same way within another research project at VTI (2). In all, it was twelve sandy materials with a sand content between 45 and 91% and with a water content of ca  $0,6 \times \text{opt w}$ .

The MSWI bottom ash showed about the same resilient modulus as the sand, but much smaller permanent deformations, see figure 5 and 6.

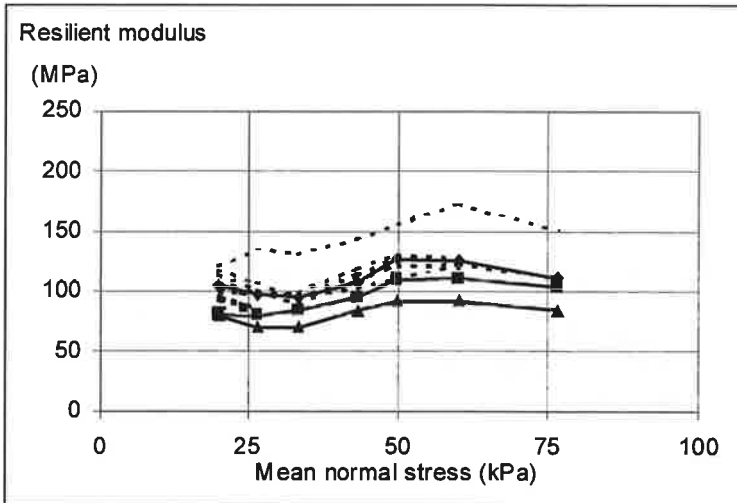


Figure 5. Resilient modulus for bottom ash from Stockholm and different sandy materials. Dotted lines represent sand.

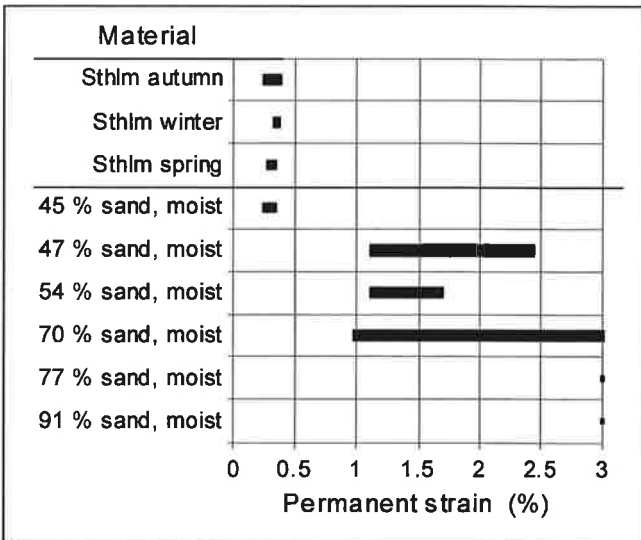


Figure 6. Variation in acc. perm. compression for bottom ash from Stockholm and different sandy materials. 5% sign. Mean normal stress = 50 kPa.

The fact that the sandy materials showed greater permanent deformations was not surprising since many of the sands were rather even-grained, see figure 7. Nevertheless, they were all “real” material that is being used in road constructions.

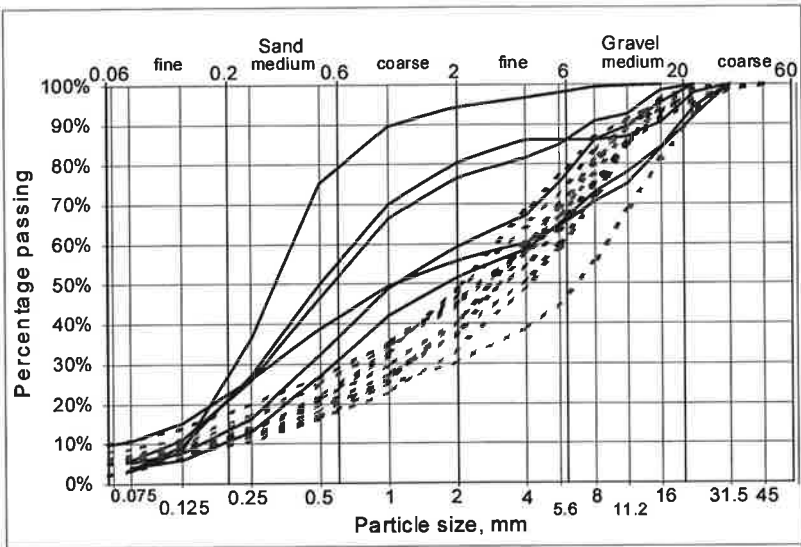


Figure 7. Grain size distribution for twelve bottom ash types and six sandy materials. Dotted lines represent bottom ash.

#### 4. DISCUSSION

Mechanical properties of a pavement layer is very much depending on how well the compaction work has succeeded and this in turn is depending on the grain size distribution and the grain shape of the compacted material. Compaction tool and water supply are other important parameters, but they are no material properties. Furthermore, if the mechanical properties should be kept during the lifetime of the road, the grains must be resistant to both mechanical and climate wear, but that is not discussed in this paper.

A property that is seldom problematic for Swedish conventional road materials, but could be crucial for an incineration bottom ash, is the organic content. Beside the raw material, it is the manufacturing process that controls the organic content and other properties of the ash.

Variations in mechanical behaviour are therefore depending on variation in some or several of the properties mentioned above. These properties are discussed further here below.

##### 4.1. Raw material and organic content

As earlier mentioned, the four incineration stations incinerate both municipal and industrial wastes. The proportions are listed in table 4.



Table 4. (RVF 1997), (from SGI)

Station	Proportion municipal waste (%)	Organic content (LOI) (%)
Stockholm	81	3,6–4,2
Gothenburg	60	2,7–3,7
Malmö	59	2,6–4,9
Linköping	76	5,9–9,1

According to the table the plants can be grouped into two, namely Gothenburg and Malmö with about 60% municipal waste and Stockholm and Linköping with ca 80%. Bottom ash from Linköping has the highest organic content. The ash from this station also turned out to have the lowest stiffness expressed as resilient modulus. An attempt to relate the resilient modulus and the permanent deformation to the organic content has been made in figure 8.

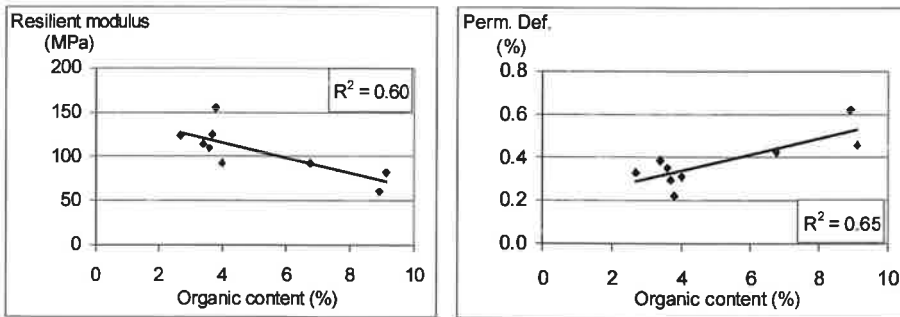


Figure 8. Organic content measured as LOI as a function of resilient modulus and accumulated permanent compression respectively.

It is generally agreed that organic matter has a bad impact on the stiffness. Most country has limited the organic content in road materials. An early Swedish study (3) shows that already a small proportion of organic matter, 6% of the material with grain size less than 2 mm, deteriorates the E-modulus greatly. The study in this paper suggests that even the permanent deformation is influenced in a negative way.

Also, the material composition has been defined through visual observation. The results are shown in figure 9.

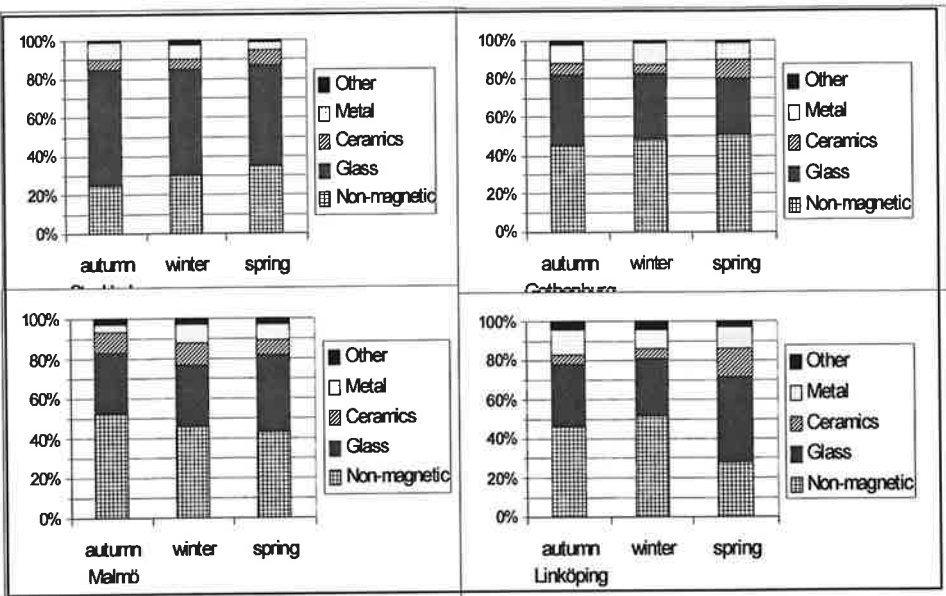


Figure 9. Main constituents of bottom ash from Stockholm, Gothenburg, Malmö and Linköping

From the diagrams it can be seen that there are no great differences between the ashes except for one of the plants, Stockholm, whose ash contains a lot more glass than the other do, about 50% compared to ca 35%.

#### 4.2. Grain size distribution

In figure 10 the grain size distribution for the ash from each of the studied stations is plotted. The three curves represent material sampled at different seasons.

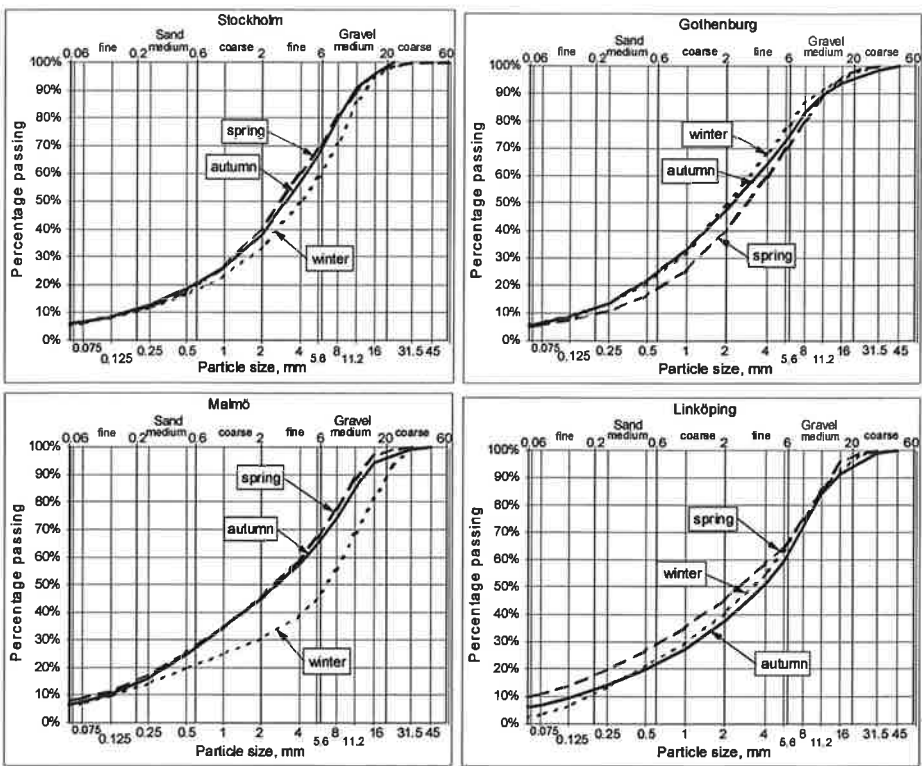


Figure 10. Grain size distribution for studied materials.

According to the grain size distribution all materials can be classified as sandy gravel. It can also be seen that the time dependent variation is small. Even between the stations the differences are small.

Table 5 contains some of the parameters describing the grain size distribution for studied materials.

Table 5.  $D_{90}$ ,  $c_u$  and fines content for studied bottom ash. (autumn, winter and spring ash)

	Stockholm			Gothenburg			Malmö			Linköping			
	Season:	a	w	s	a	w	s	a	w	s	a	w	s
$d_{90}$		11	14	13	13	10	13	14	21	12	15	15	14
$c_u$		27	32	23	22	21	19	37	68	43	39	26	72
Fines content		6	6	6	6	6	5	7	6	8	6	2	10

Nevertheless, from figure 10 and table 5 a few things can be pointed out.

First, the “winter” ash from Malmö contains more coarse particles (>6 mm) than the other ashes. This should be favourable for the stiffness.

Second, the “winter” ash from Malmö and the “spring” ash from Linköping have the flattest curve shape. The curve shape can be characterised by a uniformity coefficient,  $c_u$ , that is the ratio of  $d_{60}$  to  $d_{10}$ .  $D_{60}$  means the mesh of the

sieve through which 60% of the material pass. For conventional materials, it has been shown that the less steep the curve is, the more stable is the material (2).

Third, the fines content is between 5 and 8% for all materials with two exceptions, Linköping “winter” with 2% and Linköping “spring” with 10%. The fines content allowed in road materials is usually limited because of the risk of frost heave. In Sweden the limit is 8%. However, a certain amount of fines is essential for a good compaction result.

### **4.3. Grain shape**

The grain shape can be rounded or more or less angular, which has influence on the deformation properties. A more angular material requires a bigger compaction effort, which in its turn can create crushing and an increase of fines. Conversely, a material with rounded particles is generally easy to compact but is also more unstable than an angular material.

Results from another investigation (4) show that MSWI bottom ash has more angular particles than conventional sandy gravel and also more than crushed concrete. It is mostly the particles in the fraction 20–32 mm that are flaky. The content of angular particles could explain the difficulties in compacting the material to laboratory specimens. Field experiences, however, have reported that the bottom ash is very easy to compact (5). This is probably because of the heavy loads that have been used.

### **4.4. Compaction degree**

The fact that the specimens were not tested at the same compaction degree and the same relative water content must be analysed. The 300-mm high specimens with a diameter of 150 mm were compacted in one layer by simultaneous vibration and compression in a Vibrocompresseur. It is a method that has been used with success for conventional materials. Among the advantages can be mentioned that the material is homogeneous compacted and that the water content and density for the specimen can be chosen in advance. Another advantage is that the vibrating compaction is more “friendly” This method was chosen because the modified proctor tests showed a certain crushing tendency for these materials.

However, the target density of 90% compaction degree was not reached and the water content was above the optimum in all materials except one. The reason for this was probably too angular material and too “careful” compaction. The actual values are given in table 6.

Table 6. Compaction degree (actual dry density/max. dry density from modified proctor tests) and water content for tested materials. Average of three specimens.

	Stockholm		Gothenburg		Malmö		Linköping	
	Compact. degree (%)	w (%)	Compact. degree (%)	w (%)	Compact. degree (%)	w (%)	Compact. degree (%)	w (%)
Season								
Autumn	84	Opt -0,5	89	Opt +1,4	85	Opt +1,8	86	Opt +0,8
Winter	87	Opt +1,0	89	Opt +0,8	90	Opt +0,4	88	Opt +0,7
Spring	88	Opt -0,1	89	Opt +0,7	82	Opt +0,6	80	Opt +0,8

All the materials from Gothenburg, which had the smallest  $d_{90}$  and favourable water contents, were well compacted. They also had resilient modulus above 110 MPa (at a mean normal stress of 50 kPa). Stockholm's "autumn" ash had about the same grain size distribution but was too dry. This is the only material that was tested at water content below optimum. The compaction degree was therefore considerably lower, 84% instead of 89%. The resilient modulus for this ash was below 95 MPa.

The different compaction degree and the resulting variation in stiffness show the importance of a good compaction.

## 5. CONCLUSIONS

The experiments are still going on, but the results so far suggest that the mechanical properties expressed as measured permanent deformation and calculated resilient modulus from triaxial tests are reasonably uniform for each incineration station. There is a significant difference between the stations and even within a station. However, the scatter is not bigger than for the studied natural aggregates.

The value of a relevant design modulus usually depends on where in the construction a material is utilised. Though, it seems that the stress level is not that important for MSWI bottom ash since the tests showed a weak stress dependency for the resilient moduli. From the comparison with some natural aggregates it may be said that if MSWI bottom ash is utilised instead of sand in a capping layer, the same design modulus could be used as for the sand.

All tested materials are stable and give reasonable permanent deformations at the stress level that is relevant for a Swedish capping layer. Furthermore, a better stability expressed as a smaller permanent deformation could be expected if an even-grained sand is replaced by MSWI bottom ash.

It is shown (as expected) that the organic content has a limiting effect on the resilient modulus.

Finally, it can be said that it is possible to create a stiff and stable unbound capping layer of MSWI bottom ash if the organic content is low and the right compaction procedure is used.

## ACKNOWLEDGEMENTS

In this research several colleagues at the Swedish Road and Transport Research Institute have taken part. The author wish to express her appreciation for the co-operation, especially to Håkan Arvidsson who did most of the laboratory tests.

The Swedish Transport and Communications Research Board (KFB) provided funding of the study.

## REFERENCES

1. RVF Statistik 1997. Renhållningsverksföreningen, RVF Service AB, Malmö.
2. Arm M. 2000. Mechanical properties of unbound road materials. Swedish Road and Transport Research Institute, Linköping. (will be published during spring 2000, in Swedish with an English summary)
3. Bäckman L. 1989. Bestämning av organisk halt i grovkorniga material (bärlager). VTI notat V84. Swedish Road and Transport Research Institute, Linköping. (in Swedish)
4. Andersson H., Arm M., Carling M. & Schouenborg B. 1999. Provningmetoder för alternativa vägmateriäl i underbyggnader. Swedish Road and Transport Research Institute, Linköping. (in Swedish)
5. Lundgren T. & Hartlén J. 1991. Slagg från avfallsförbränning - Teknik och Miljö. REFORSK rapport FoU 61, Malmö. (in Swedish with an English summary)

# Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests.

Maria Arm

*Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), SE-581 95 Linköping, Sweden*

---

## Abstract

A 2-year study is underway to evaluate the expected growth in stiffness in layers of crushed concrete from demolished structures. This growth is said to be a result of self-cementing properties. The study consists of repeated load triaxial tests on manufactured specimens after different storing time together with falling weight deflectometer, FWD, measurements on test sections. Results so far show a clear increase with time in resilient modulus and in back-calculated layer modulus for all concrete materials. The increase is largest in the first months and then diminishes. The field measurements show a more considerable growth in stiffness than the laboratory tests, with a doubled value two years after construction. Comparative investigations on natural aggregates, mostly crushed granite do not show any growth in stiffness, neither in the laboratory nor in the field. Consequences for the choice of design modulus are discussed.

*Keywords: recycling, reuse, recycled aggregates, demolition waste, self hardening, stiffness increase, strength, design modulus, resilient modulus, sub-base, base*

## 1. Introduction

Several research projects are ongoing in Sweden with a view to facilitate and increase the use of alternative materials in Swedish roads [1–5]. Both design and environmental guidelines are under development. This study deals with the use of crushed demolished concrete in unbound layers. According to experiences in other countries [6,7] a growth in stiffness, depending on self-cementing properties could be expected in layers with crushed concrete. The aim with this project was therefore to study the stiffness evaluation in unbound layers of crushed concrete in the laboratory and in the field. Later on, the results will help to establish design manuals where the specific properties of crushed concrete are utilized.

## 2. Methods

In the laboratory, the strength properties were studied using repeated load triaxial tests. Complementary properties such as composition, optimum water

content and maximum dry density were also investigated. Specimens of crushed concrete from one source, a demolished industrial building in Grums, were manufactured and then tested after different storing periods. The specimens were prepared according to the following routine. First, the material was proportioned to a chosen grading, which was a well-graded curve in the centre of the approved zone for base course material in the Swedish guidelines, ROAD 94, [8] as shown in Fig. 1.

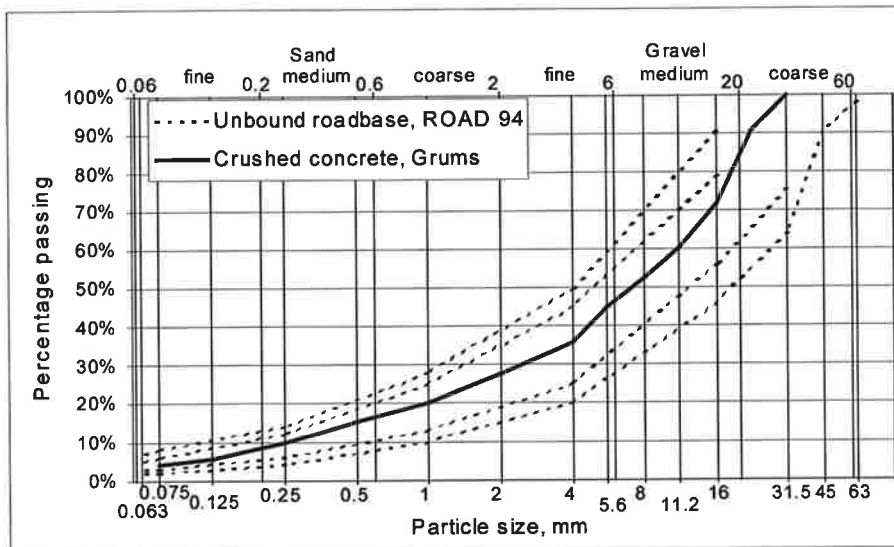


Fig. 1. Grain size distribution for material tested in repeated load triaxial tests.

The water content chosen was 60% of optimum. Then, 300-mm high specimens with a diameter of 150 mm were compacted, in one layer by simultaneous vibration and compression in a Vibrocompresseur, to 97% degree of compaction. Finally, the specimens were wrapped in plastic foil and stored indoors. After a certain storing time (1, 7, 15, 28, 60, 180, 365 or 730 days) the specimens were exposed to repeated load in triaxial tests and the resilient moduli for different stress conditions were calculated. Comparison with corresponding properties of natural aggregates, such as crushed granite was made.

In the field, test sections with crushed concrete in the sub-base or base course have been constructed at different places in Sweden [9–12]. These are monitored by FWD measurements and for the purpose of this study the layer moduli have been evaluated by means of back-calculation. For comparison, values from reference sections at the same site with natural aggregates in the unbound layers have been used.

The tests are continuing and will be finished during this year.



### 3. Results

#### 3.1. Laboratory tests

The material used in the laboratory tests was considered very pure, since more than 95% consisted of concrete (Fig. 2).

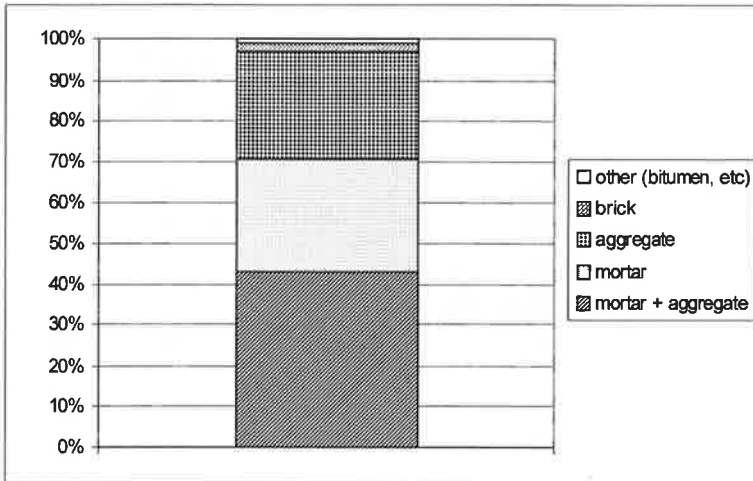


Fig. 2. Main constituents of crushed concrete from Grums, wt.% of washed material >4 mm.

The compaction tests gave an optimum water content for the material of 9.4% and maximum dry density from both modified proctor and vibrator table of  $2.0 \text{ t/m}^3$ .

In Fig. 3, the results of the repeated load triaxial tests are plotted as the calculated resilient moduli at different stress conditions. Each point represents the mean value of three specimens. The results will be completed with data from 2-year-old specimens, but the tendency so far is a growth in resilient modulus with age.

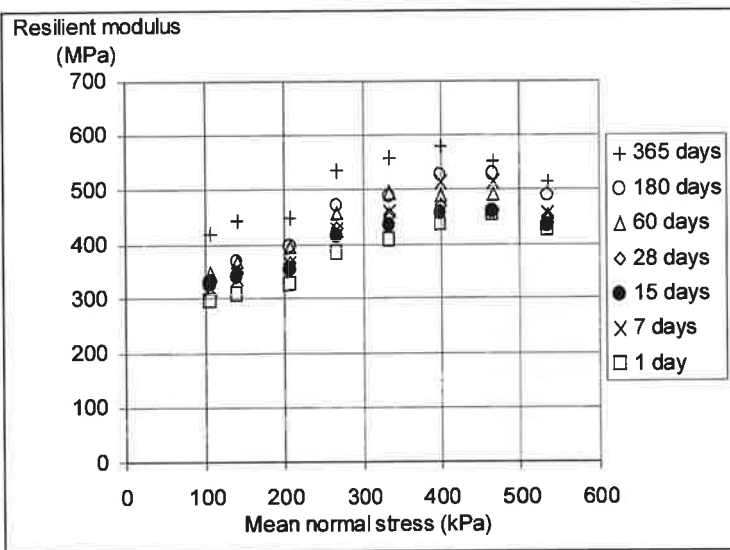


Fig. 3. Growth in resilient modulus for crushed concrete from Grums. Results from repeated load triaxial tests after different storing time.

Tests have also been performed on specimens that were stored in wet sand during the first 30 days, since previous Finnish field experiences have shown a positive effect of watering the surface of the concrete layer. Preliminary results, however, suggest a very small increase in resilient modulus for these specimens, which is the opposite of what was expected.

The permanent deformations have not been analysed yet.

### 3.1.1. Comparison with natural aggregates

The effect of storing time was studied in a small investigation on natural aggregates some years ago [13]. In that investigation, specimens of crushed and uncrushed granite were tested in repeated load triaxial tests after 1, 3, 7, 28 and 90 days and the resilient moduli were calculated. The results of those tests showed no increase in the resilient modulus, neither for the crushed material nor for the uncrushed material.

Since all the testing parameters and even the grain size distribution were the same for the granite as for the concrete, it is interesting to compare the calculated resilient modulus. In Fig. 4, values for “fresh” and stored material are plotted and curve fits are made.

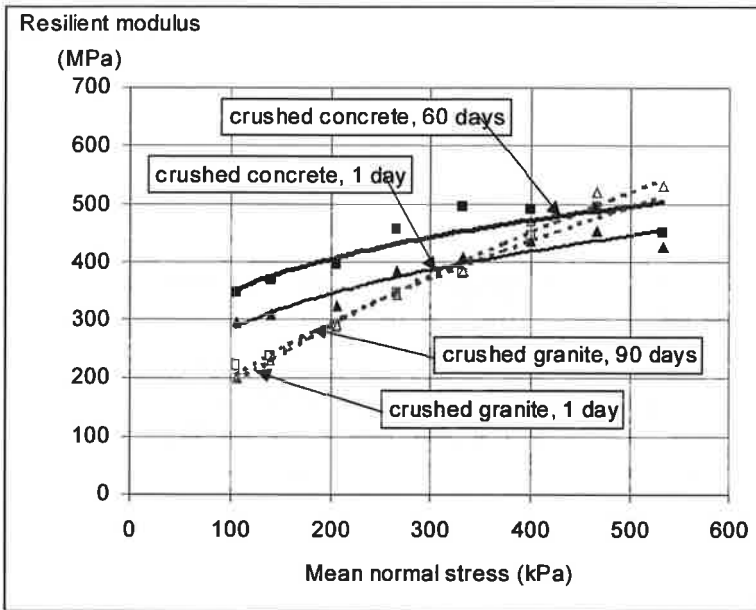


Fig. 4. Comparison of modulus change. Resilient modulus from repeated load triaxial tests on granite and concrete.

Two things can be observed. First, the modulus for concrete shows a clear growth at all stress levels, which the modulus for granite does not. Second, the concrete has a less stress dependent resilient modulus than the granite has, which means that at lower stress levels the modulus for the concrete is the highest, while at higher stress levels the modulus for granite is the highest.

### 3.2. Field tests

Results from FWD measurements at three different sites and at different age after construction are shown in Fig. 5. In Västerås all the unbound layers consist of crushed concrete [10], while in Björnsbyn [11] and in Ekeby it is only the sub-base that contains concrete. Furthermore, at all sites it is concrete from demolished buildings that has been used. It should be noticed that even though it is concrete from different sources, they all have very little impurities, in all cases less than 10%.

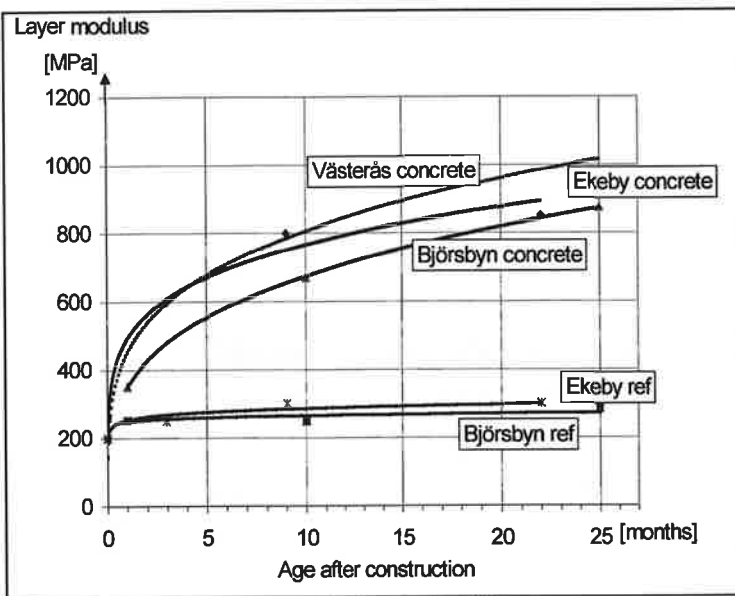


Fig. 5. Increase in stiffness. Back-calculated layer moduli for unbound layers of crushed concrete. From FWD measurements.

The results from the FWD measurements show a clear growth in layer moduli for the layers with crushed concrete. The growth is largest the first months and then diminishes. The modulus after 2 years is about twice as high as that is reached after one month.

However, the layer moduli for the unbound layers in the reference sections, do not increase at all or very little during the same period. This results in very big differences in layer modulus between concrete sections and reference sections after the first months.

#### 4. Discussion

To make use of the self-cementing properties in the design process, there is a need of knowledge of the material stiffness, expressed as a modulus and its growth rate.

Experiences from this study as well as from other laboratory tests at VTI [9–12,14] show that crushed concrete from demolished structures has equal or higher stiffness than natural aggregates, expressed as calculated resilient modulus from triaxial tests. (This is true for lower and medium high stress levels, that is, for stress levels relevant for a Swedish sub-base. The use of crushed concrete in a base course can also be suitable, but not in general, due to the fact that some of the tested concrete materials showed greater sensitivity to high stresses than the natural aggregate did. A fact that is significant in a construction with thin bound layers, where high traffic induced stresses could be expected in the base course.) In Fig. 6, the results from these triaxial tests, namely resilient moduli for a range of materials, are plotted and curve fits are made. The crushed concrete originates from different sources, such as

from different sources, such as demolished buildings, a demolished concrete road and railway sleepers. Granite, gneiss and limestone represent the crushed rock. For all materials the grain size distribution, compaction degree and relative water content is the same. The specimens have been tested without previous storing.

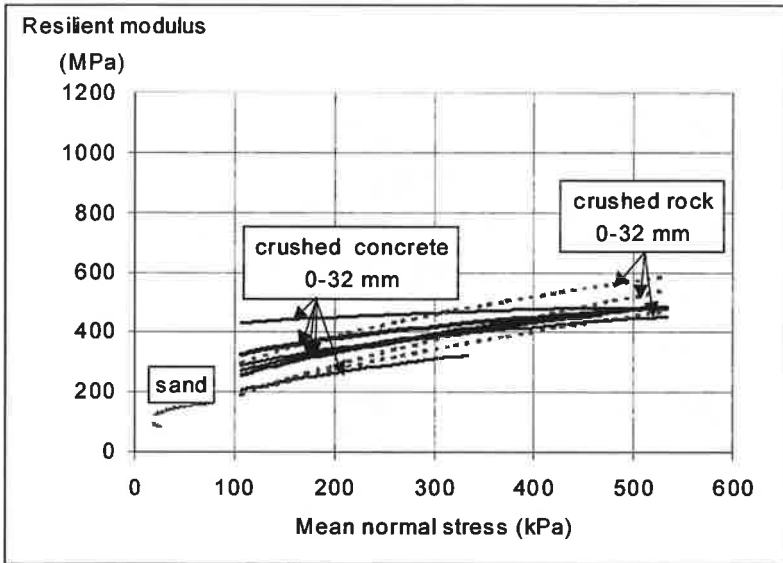


Fig. 6. Comparison of stiffness. Crushed concrete and crushed rock with different origin.

There is a certain range in the resilient modulus for different concrete types. However, this is also the fact for different rock type. A more detailed value of the modulus requires an investigation of the specific concrete material and knowledge of the construction that is planned. For example the thickness and type of bound layers have great impact on the stress conditions in the construction.

In this study, both laboratory and field results show a growth in stiffness with time, which is not present for natural aggregates. The growth is considerably larger in the field tests than in the laboratory test. The question is how much of the growth that can be taken into account in the design process.

In Fig. 7, curve fits have been made with equations on the form  $M = A \times (\text{age in months})^B$ .

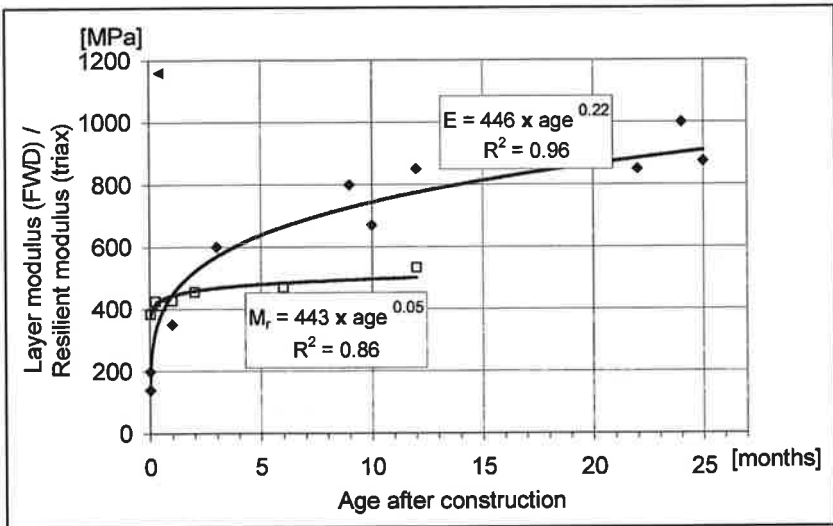


Fig. 7. Increase in stiffness. In the field: back-calculated layer moduli from FWD measurements at three sites. In the laboratory: resilient modulus for crushed concrete from Grums. Results from repeated load triaxial tests with vertical stress 400 kPa and horizontal stress 120 kPa. Mean value of three specimens.

The field tests gave  $B$  values of 0.19, 0.25 and 0.28 for separate sites and 0.22 for all sites together, while the laboratory tests gave the  $B$  value 0.05. If, for example, the design modulus should include the increase in stiffness during the first 2 months, this would give an increase of the start value with  $(2 \text{ months})^{0.22} = 16\%$  and  $(2 \text{ months})^{0.05} = 4\%$  respectively. Similarly, the modulus increases with 48 and 9%, respectively, if the value after 6 months is chosen.

However, if the design is made with a modulus value that is reached first after 6 months, there is a risk that the construction will deteriorate, being “under-designed” the first half year. This can probably be solved during the design or the planning phase.

The analyses and discussions on this subject are continued and will hopefully help to form the base for design manuals for constructions with crushed concrete in the unbound layers. A first step is taken by the guide for recycled crushed concrete as aggregate in roads, which will be published during winter 1999/2000 [15].

## 5. Conclusions

In this study, both laboratory and field results show a growth in stiffness for unbound layers with crushed concrete, which is not present for unbound layers with natural aggregates. This growth is considerably larger in the field tests than in the laboratory test. The growth is largest the first months and then diminishes. This means that the layer modulus 2 years after construction is about twice as high as that is reached after 1 month.

Even though this is a limited study, some general conclusions can be drawn about the choice of design modulus for crushed concrete. For example, when crushed concrete with very little impurities is used as a Swedish sub-base material, at least the same design modulus can be used as for natural aggregates. However, a special investigation of the specific concrete material, together with knowledge of the planned construction, can give the opportunity to use a higher value on the modulus and by that benefit from the increasing stiffness caused by self-cementing.

## Acknowledgements

In this research several colleagues at the Swedish National Road and Transport Research Institute have taken part. The author wishes to express her appreciation for the co-operation, especially to Krister Ydrevik who planned and led the investigations, to Håkan Arvidsson who did most of the laboratory tests and to Håkan Carlsson and Anders Swenson who did the FWD measurements. The Swedish National Sand, Gravel and Crushed Stone Association (GMF) and the Development Fund of the Swedish Construction Industry (SBUF) provided funding of the study.

## References

- [1] Aréll L. Sekundära ballastmaterial. Licentiate thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1997 (in Swedish with an English summary).
- [2] Johansson HG. Återanvändning och återvinning av restprodukter, vägbyggnadsmaterial och sekundära, mineraliska material i vägar och gator. (KFB & VTI forskning/research 21). Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute, 1997 (in Swedish with an English summary).
- [3] Betong i vägar – förstudie. Om möjligheterna att återvinna betong från husrivning. Karlskrona: Boverket, 1998 (in Swedish).
- [4] Andersson H, et al. Provningsmetoder för alternativa material till vägunderbyggnad – Undersökning av rostereldad kolbottenaska, slaggrus och krossad betong. Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute, 1999 (in Swedish).
- [5] ALT-MAT. Alternative Materials in Road Construction. Interim report 18 May 1999. Project funded by European Commission 4<sup>th</sup> Framework Programme. Crowthorne: TRL, 1999.
- [6] Sweere GTH. Unbound granular bases for roads. Dissertation, Delft University of Technology, Delft, 1990.

- [7] Kivekäs L. Recycling of concrete and bricks. Oral contribution at Nordic seminar on sustainable use of materials in road constructions, Copenhagen, 11–12 October 1999.
- [8] ROAD 94. Unbound pavement layers. In: General technical construction specifications for roads. (Publ 1994:86E). Borlänge: Swedish National Road Administration, 1994 (Chapter 5).
- [9] Johansson HG, et al. Krossad betong – ett material för användning i vägar och gator (VTI notat no. 1-1996). Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute, 1996 (in Swedish).
- [10] Ydrevik K. Krossad rivningsbetong som bär- och förstärkningslager i gatubyggnad. McDonalds hamburgerrestaurang i kvarteret Elstolpen i Västerås. (VTI notat no. 54-1996). Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute, 1996 (in Swedish).
- [11] Jansson H, Ydrevik K. Utvärdering av fallviktsmätning våren 1998 på Björsbyvägen, provsträckor med krossad betong (VTI utlåtande no. 664). Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute, 1998 (in Swedish).
- [12] Ydrevik K. Förstärkningslagermaterial av krossade betongslipers. Erfarenheter från provsträckor på väg 869 vid Stenstorp. Del 1: Byggnadsrapport (VTI notat no. 5-1999). Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute, 1999 (in Swedish).
- [13] Arvidsson H. Dynamisk treaxiell provning för bedömning av lagringstidens inverkan på styvhets- och deformationsegenskaper hos bärlagergrus (VTI notat no. 10-1995). Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute, 1995 (in Swedish).
- [14] Ydrevik K. Utlåtande beträffande krossad vägbetongs mekaniska egenskaper och lämplighet som användning i bär- och förstärkningslager (VTI utlåtande no. 644). Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute, 1999 (in Swedish).
- [15] Ydrevik K. Återvägen. Råd och vägledning för återvinning av krossad betong som ballast till gator och vägar (VTI notat no. 67-1999). Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute, 1999 (in Swedish).



# VÄG 94:s föreskrifter om användning av restprodukter i obundna lager (ATB VÄG, se sid 322)

För närvarande står följande skrivet om restprodukter i VÄG 94.

## 1 Gemensamma förutsättningar

### 1.3 Krav på vägkonstruktion

#### 1.3.2 Bärförmåga och beständighet

Vägkonstruktion, övrig väganordning och sidoanläggning skall utformas och utföras så att den och dess närmaste omgivning får tillfredsställande bärförmåga och stabilitet under såväl byggskedet som under hela den tekniska livslängden, så att den får tillfredsställande beständighet och så att användningen av angränsande mark inte onödigtvis försvåras.

Väganordning skall utföras så att kravet på bärförmåga uppfylls under hela den tekniska livslängden, se 1.3.1.1. Detta tillförsäkras genom erforderlig dimensionering samt val av material och materialkombinationer som behåller sina egenskaper under perioden utan att omlagras, sönderfalla eller brytas ner av klimatets och andra miljöfaktorer påverkan.

#### 1.3.3.1 Allmänt

Kraven på bärförmåga och beständighet skall anses vara uppfyllda om:

- kraven på stabilitet, säkerhet mot uppflytning, erosionssäkerhet och sättning i längsled i kapitel 2 uppfylls för där angivna lastförutsättningar och för aktuell säkerhetsklass och jämnhetsklass
- krav på överbyggnad i kapitel 3 för där angivna lastförutsättningar uppfylls
- krav på tjällyftning enligt 1.3.3.6 uppfylls.

#### 1.3.3.2 Tillåten känslighet för frosthalka

Material i överbyggnad till belagd väg skall, för att minska känsligheten för frosthalka, uppfylla krav enligt tabell 1.3-3. Kraven avser torrt material med temperatur överstigande  $\pm 0^{\circ}\text{C}$ .

**Tabell 1.3-3** Krav på värmeledningstal och värmekapacitet hos lager nära vägytan

Avstånd till vägytan, m	Värmeledningstal W/(m·K)	Värmekapacitet kWh/(m <sup>3</sup> ·°C)
<0,25	>0,6	>0,35
<0,5	>0,3	—

Termiska egenskaper kan bestämmas genom beräkning eller genom bestämning i laboratorium. Bestämning skall göras vid relevant packningsgrad. Bestämning av värmeledningstal skall utföras enligt ISO 8301 eller ISO 8302. Värmekapacitet kan bestämmas genom beräkning där hänsyn tas till ingående materials andel av vikten.

#### **1.3.4 Hygien, hälsa och miljö**

Restprodukter som t.ex. slagg får användas om de accepteras av beställaren och:

- är acceptabla ur miljö- och hälsosynpunkt
- inte ger problem vid återanvändning, deponering eller destruktion
- kan visas ha minst lika goda egenskaper ur bland annat bärformåge-, stabilitets- och beständighetssynpunkt som de material de ersätter.

Restprodukter skall analyseras med avseende på kemisk sammansättning och risk för urlakning. Krav på placering och eventuella skyddsåtgärder skall utredas. Samråd skall ske med länsstyrelsens naturvårdsenhet.

### **1.4 Dimensioneringsförutsättningar**

#### **1.4.2.3 Indelning av jord- och bergmaterial**

...För klassificering av syntetiska material, restmaterial, slaggar etc. skall särskild utredning för bestämning av stabilitet, hållfasthet, beständighet och eventuell miljöpåverkan utföras, se 1.3.4.

### **1.7 Dokumentation**

#### **1.7.2 Relationshandling**

... Sådana material som kan påverka miljön på ett negativt sätt skall dokumenteras med avseende på kemisk sammansättning och krav på hantering. Närmare beskrivning av krav på dokumentation framgår av respektive kapitel.

Användning av nya material som, från miljösynpunkt bedömts godtagbara, skall dokumenteras om betryggande bevisning om materialets oskadlighet saknas.

Material som kan orsaka skada vid oriktig behandling skall dokumenteras med avseende på läge, sammansättning, skyddsåtgärder och krav på behandling.

## 2 Konstruktiv utformning av underbyggnad

### 2.4 Dimensioneringsförutsättningar

#### 2.4.3.3 Hållfasthets- och deformationsegenskaper hos särskilda material

Hållfasthets- och deformationsegenskaper hos särskilda material, t.ex. lättklinker, cellplast, skumbetong och jordarmering skall bestämmas med relevanta provningsmetoder och under förhållanden som är representativa för vägkonstruktionen under dess tekniska livslängd.

Egenskaper hos lättklinker, cellplast och jordarmering av syntetmaterial kan bestämmas enligt VV publ "Lättklinker som lättfyllning i vägbankar", Cellplast som lättfyllning i vägbankar" och "Jordarmering, dimensionerande draghållfasthet för syntetmaterial".

Hos packad fyllning av lättklinker beror sättningsgraden efter vägens färdigställande på material och utförande. Hänsyn härtill skall tas vid val av dimensioneringsförutsättningar för lättklinker.

Cellplastfyllning utförd enligt ovan refererade publikation får förutsättas vara sättningsfri efter vägkonstruktionens färdigställande.

### 2.11 Dokumentation

För utförande och skötsel av konstruktionen redovisas följande:

...

- ritningar/materialspecifikationer
- använda materials eventuella miljöpåverkan.

...

## 3 Konstruktiv utformning av överbyggnad

### 3.5 Konstruktiv utformning

#### 3.5.7 Särskilda underlag

Överbyggnad på särskilda underlag förutsätter att krav enligt kapitel 1, 2 och 4 uppfylls, vilket skall visas med särskild utredning.

Val av tjälfarlighetsklass för särskilda underlag skall visas med särskild utredning.

Underbyggnad av lättklinker, cellplast med betongplatta eller skumbetong skall hänföras till materialtyper enligt tabell 3.5-3. Materialtyp för andra särskilda underlag skall visas med särskild utredning.

**Tabell 3.5-3** Materialtyper för speciella underbyggnadsmaterial

Material i underbyggnad	Materialtyp
Cellplast med betongplatta	2
Lättklinker	3
Skumbetong	3

## 4 Utförande av underbyggnad

### 4.5 Fyllning

#### 4.5.2 Fyllning med jord

##### 4.5.2.1 Material

Fyllning skall utföras med mineraljord. Organisk halt får vara högst 2 viktprocent i fyllning till ett avstånd av

- 1 m från terrassyta när flexibel överbyggnadskonstruktion skall utföras.
- 2 m från terrassyta när styv överbyggnadskonstruktion skall utföras

### 4.6 Tjälskydd

#### 4.6.1 Isolerad terrass

Nedan beskrivet material avser extruderad polystyren (XPS). Andra isoleringsmaterial får användas om likvärda egenskaper kan påvisas...

## 5 Obundna överbyggnadslager

### 5.3 Krav på obundna överbyggnadslager

...Material till bär- och förstärkningslager får även utgöras av slagger och andra restprodukter. Dessa skall vara volymbeständiga och får inte visa tendenser till sönderfall. För hyttsten får kulkvarnsvärdet inte överstiga 30. Se kapitel 1, "Bärförmåga och beständighet", "Hygien, hälsa och miljö" och "Tillåten känslighet för frosthalka".

När risk föreligger att material i under- och överbyggnad blandar sig med varandra så att formförändringar eller konsekvenser för bärigheten uppstår skall materialskiljande lager användas. Se kapitel 2, ”Materialskiljande lager”.

# ATB VÄG:s föreskrifter om användning av restprodukter i obundna lager

Från och med 2001-01-01 ersätts VÄG 94 av ATB VÄG. Där står följande skrivet om restprodukter.

## A Gemensamma förutsättningar

### A5 Dimensionering

#### A5.2 Bärförmåga och beständighet

Vägkonstruktion, övrig väganordning och sidoanläggning skall utformas och utföras så att den och dess närmaste omgivning får tillfredsställande bärförmåga och stabilitet under såväl byggskedet som under hela den dimensioneringsperioden, så att vägkonstruktionen får tillfredsställande beständighet

Väganordning skall utföras så att kravet på bärförmåga uppfylls under hela den avsedda dimensioneringsperioden, se A5.1.

### A6 Krav efter åtgärd

#### A6.1 Tillåten känslighet för frosthalka

Material i överbyggnad till belagd väg ska, för att minska känsligheten för frosthalka, uppfylla krav enligt Tabell A6.1-1. Kraven avser torrt material med temperatur överstigande  $\pm 0^{\circ}\text{C}$ .

**Tabell A6.1-1** Krav på värmeledningstal och värmekapacitet hos lager nära vägytan

Avstånd till vägytan, m	Värmeledningstal, W/(m K)	Värmekapacitet kWh/(m <sup>3</sup> °C)
< 0,25	> 0,6	> 0,35
< 0,5	> 0,3	-

Termiska egenskaper kan bestämmas genom beräkning eller genom bestämning i laboratorium. Bestämning skall göras vid relevant packningsgrad. Bestämning av värmeledningstal skall utföras enligt ISO 8301 eller ISO 8302. Värmekapacitet kan bestämmas genom beräkning där hänsyn tas till ingående materials andel av vikten.

## **A8 Verifiering av att produkter uppfyller ställda krav**

### **A8.2 Hygien, hälsa och miljö**

Material får användas om de accepteras av beställaren och:  
är acceptabla ur miljö- och hälsosynpunkt  
inte ger problem vid återanvändning, deponering eller destruktion

## **A9 Dokumentation**

### **A9.2 Relationshandling**

...Sådana material som kan påverka miljön på ett negativt sätt skall dokumenteras med avseende på kemisk sammansättning, placering vidtagna skyddsåtgärder och krav på hantering.

Närmare beskrivning av krav på dokumentation framgår av respektive kapitel i ATB VÅG.

Användning av nya material, som från miljösynpunkt bedömts godtagbara, skall dokumenteras om betryggande bevisning om materialets oskadlighet saknas.

Material som kan orsaka skada vid oriktig behandling skall dokumenteras.

## **A12 Jord- och bergarter**

### **A12.1 Indelning av jord- och bergmaterial**

A12.1.1.1.6 För klassificering av syntetiska material, restmaterial, slagger etc skall särskild utredning för bestämning av stabilitet, hållfasthet, beständighet och eventuell miljöpåverkan utföras.

## **C Dimensionering**

### **C2 Undergrund**

#### **C2.1.5 Dimensioneringsförutsättningar**

##### **C2.1.5.3 Materialegenskaper**

###### **C2.1.5.3.3 Hållfasthets- och deformationsegenskaper hos särskilda material**

Hållfasthets- och deformationsegenskaper hos övriga material, t.ex lättklinker, cellplast, skumbetong och jordarmering skall bestämmas med relevanta provningsmetoder och under förhållanden som är representativa för vägkonstruktionen under dess tekniska livslängd.

Egenskaper hos lättklinker, cellplast och jordarmering av syntetmaterial kan bestämmas enligt VV publ "Lättklinker som lättfyllning i vägbankar", "Cellplast som lättfyllning i vägbankar" och "Jordarmering, dimensionerande draghållfasthet för syntetmaterial".

Hos packad fyllning av lättklinker beror sättningen efter vägens färdigställande på material och utförande. Hänsyn härtill skall tas vid val av dimensioneringsförutsättning för lättklinker.

Cellplastfyllning utförd enligt ovan refererad publikation får förutsättas vara sättningsfri efter vägkonstruktionens färdigställande.

## **C2.3 Tjäle**

### **C2.3.3 Konstruktiv utformning av tjälskydd**

#### **C2.3.3.1 Isolerad terrass**

...Isoleringens värmemotstånd är kvoten mellan isoleringstjocklek och isoleringens praktiska värmekonduktivitet. Denna skall bestämmas enligt VV publ "Tjälisolering. Metod för bestämning av värmekonduktivitet hos cellplast". För andra material än cellplast skall bestämningen göras enligt särskild utredning.

## **C3 Överbyggnad**

### **C3.1 Gemensamma förutsättningar**

Typkonstruktioner beskrivs och benämns i avsnitt C3.3.1, C3.3.2, C3.4.2 – C3.4.5. Ändringar av de i Figur C3–11 – Figur C3–17 redovisade tjocklekarna godtas inte. Om justeringar av dessa tjocklekar görs skall konstruktionerna dimensioneras och inte benämnas enligt avsnitt C3.3.1, C3.3.2, C3.4.2 – C3.4.5

#### **C3.1.1 Dimensioneringsförutsättningar**

C3.1.1.1.4 Vid beräkning av töjningar och spänningar skall en linjärelastisk materialmodell ansättas. Samtliga material i modellen skall betraktas som homogena med isotropa egenskaper. Materials egenvikter kan försummas. Värden på materialegenskaper kan väljas enligt bilaga 1 eller bestämmas med hjälp av särskild utredning.

#### **C3.2.7 Särskilda underlag**

Överbyggnad på särskilda underlag förutsätter att krav enligt kapitel A, C och E uppfylls, vilket skall visas med särskild utredning.

Val av tjälfarlighetsklass för särskilda underlag skall visas med särskild utredning.

Underbyggnad av lättklinker, cellplast med betongplatta eller skumbetong skall hänföras till materialtyper enligt Tabell C3.2–1 Materialtyper för speciella underbyggnadsmaterial. Materialtyp för andra särskilda underlag skall visas med särskild utredning.



**Tabell C3.2–1** Materialtyper för speciella underbyggnadsmaterial

Material i underbyggnad	Materialtyp
Cellplast med betongplatta	2
Lättklinker	3
Skumbetong	3

## **E Obundna material**

### **E3 Generella krav**

#### **E3.1 Gemensamt för nybyggnad, bärighetsförbättring och underhåll.**

##### **E3.1.2 Obundna överbyggnadslager**

Ingående material skall ha sådana egenskaper att överbyggnadskonstruktionen i allt väsentligt behåller sina hållfasthetsegenskaper under hela den förutsatta tekniska livslängden. Överskott av vatten, till exempel vid tjällossning, skall snabbt kunna dräneras bort.

Material till obundna överbyggnadslager skall vara volymbeständiga och får inte visa tendenser till sönderfall. De skall dessutom uppfylla kraven i kapitel A, "Bärförmåga och beständighet ", "Tillåten känslighet för frosthalka" och "Hygien, hälsa och miljö".

Material till obundna överbyggnadslager framställs vanligen genom krossning och sortering av sprängsten, naturgrus eller morän.

Exempel på godkända material till obundna överbyggnads konstruktioner är grusslitage, obundet bärlager, förstärkningslager och skyddslager som uppfyller kraven i avsnitt E11 och E12.

När risk föreligger att material i under- och överbyggnad blandar sig med varandra så att formförändringar eller konsekvenser för bärigheten uppstår skall materialskiljande lager användas. Se kapitel C, "Materialskiljande lager".

Materialiet skall vara fritt från jordrester, växtrester och andra föroreningar vid okulär bedömning.

#### **E11 Överbyggnadsmaterial till belagda vägar**

...Andra material, som t.ex. krossad betong och hyttsten, kan användas efter att den tekniska funktionen uppfyller kraven i kapitel A och i avsnitt E3.1. Materialets tekniska funktion skall då vara dokumenterad i genomförda undersökningar (laboratorie och/eller fält). Materialets funktion i vägkroppen skall motsvara det lager det ersätter. Mätbara krav på färdig produkt (lager) skall definieras om de frångår kraven i avsnitt E11. En uppföljning av dessa krav skall genomföras. Materialet och planen för uppföljningen skall godkännas av beställaren.

Är materialet produktcertifierat för andel okrossat material, organisk halt, och nötningsegenskaper anses dessa krav vara uppfyllda.

Inom ett kontrollobjekt får inte förutsättningarna ändras väsentligt, såsom genom byte av täkt, tillverkningsförfarandet eller bergart.

## **E11.1 Bärlager till belagda vägar**

### **E11.1.1 Andel helt okrossat material**

För annat material än krossat berg skall andelen helt okrossat material (> 16 mm) undersökas enligt VVMB 602. Andelen helt okrossat material skall då vara < 30 viktprocent. Kontroll skall göras minst en gång per 10 000 m<sup>2</sup>, dock minst två gånger per objekt.

### **E11.1.2 Organisk halt**

För annat material än krossat berg skall förekomst av organiska föreningar undersökas enligt SS 13 21 20 (provfraktion < 8 mm). Indikeras förekomst av organiska föreningar med denna metod (prov med mörkare vätska än jämförelse-provet) skall den organiska halten bestämmas enligt SS 02 71 07 (provfraktion < 2 mm). Organisk halt får då högst vara 2 viktprocent. Kontroll skall göras minst en gång per objekt.

### **E11.1.3 Nötningsegenskaper**

**Micro Deval-värdet** får inte överstiga 17. Värdet skall bestämmas enligt SS-EN 1097-1. Kontroll skall göras minst en gång per objekt.

Som alternativt till micro Deval-värdet kan **kulkvarnsvärde** bestämmas. Kulkvarnsvärdet får då inte överstiga 23. Kulkvarnsvärdet skall bestämmas enligt VVMB 610. Kontroll skall utföras minst en gång per objekt.

Om bärlagret inte trafikeras skall inte micro Deval-värdet överstiga 30 eller kulkvarnsvärdet överstiga 37.

*Kulkvarnsvärdet för obundna material kommer helt att ersättas med micro Deval-värdet. Detta planeras genomföras år 2003.*

### **E11.1.4 Kornstorleksfördelning**

Kornstorleksfördelningen skall uppfylla krav enligt Tabell E11.1-1 och Tabell E11.1-2 samt tilläggskraven nedan. Ej uppfyllt tilläggskrav betraktas som grovt fel.

...

## **E11.2 Förstärkningslager till belagda vägar**

### **E11.2.1 Andel helt okrossat material**

Krav på andel helt okrossat material (> 16 mm) till flexibla konstruktioner anges i Tabell 11.2-1. Andelen skall bestämmas enligt VVMB 602. Kontroll skall göras minst en gång per 15 000 m<sup>2</sup>, dock minst

två gånger per objekt. När materialet utgörs av krossat berg anses kravet uppfyllt.

...

### **E11.2.2 Organisk halt**

För annat material än krossat berg skall förekomsten av **organiska föroreningar** undersökas enligt SS 13 21 20 (provfraktion < 8 mm). Indikeras förekomst av organiska föroreningar med denna metod (prov med mörkare vätska än jämförelseprovet) skall den **organiska halten** bestämmas enligt SS 02 71 07 (provfraktion < 2 mm). Organisk halt får då högst vara 2 viktprocent. Kontroll skall göras minst en gång per objekt.

### **E11.2.3 Nötningsegenskaper**

Micro Deval-värdet får inte överstiga 30. Värdet skall bestämmas enligt SS-EN 1097-1 och skall kontrolleras minst en gång per objekt. Som alternativt till micro Deval-värde kan kulkvarnsvärde bestämmas. Kulkvarnsvärdet får då inte överstiga 37. Värdet skall bestämmas enligt VVMB 610 och skall kontrolleras minst en gång per objekt.

*Kulkvarnsvärdet för obundna material kommer helt att ersättas med micro Deval-värdet. Detta planeras genomföras år 2003.*

*Om förstärkningslagret trafikerats bör inte micro Deval-värdet överstiga 17 eller kulkvarnsvärdet överstiga 23. Se även tabell 5.3-1.*

### **E11.2.4 Kornstorleksfördelning**

Kornstorleksfördelningen skall bestämmas enligt VVMB 619. Prov skall tas på hela lagertjockleken minst en gång per 15 000 m<sup>2</sup>, dock minst två gånger per objekt.

Kornstorleksfördelningen för förstärkningslager till flexibla konstruktioner skall uppfylla kraven enligt Tabell E11.2-2. Kornstorleksfördelningen skall ligga inom den mellersta och får vara i någon av de yttre zonerna. En illustration av tabellen ses i Figur E11.2-1.

Kornstorleksfördelningen för förstärkningslager till styva konstruktioner skall uppfylla kraven enligt Tabell E11.2-3. Detta illustreras av den övre begränsningslinjen i Figur E11.2-1.

...

## **E11.3 Skyddslager till belagda vägar**

### **E11.3.1 Organisk halt**

För annat material än krossat berg skall förekomsten av **organiska föroreningar** undersökas enligt SS 13 21 20 (provfraktion < 8 mm). Indikeras förekomst av organiska föroreningar med denna metod (prov med mörkare vätska än jämförelseprovet) skall den **organiska halten** bestämmas enligt SS 02 71 07 (provfraktion < 2 mm). Orga-

nisk halt får då vara högst 2 viktprocent. Kontroll skall göras minst en gång per objekt.

### **E11.3.2 Kornstorleksfördelning**

Skyddslager skall utgöras av icke tjällyftande friktionsjord.

Kornstorleksfördelningen skall bestämmas enligt VVMB 619. Prov skall tas på hela lagret minst en gång per 15 000 m<sup>2</sup>, dock minst två gånger per objekt.

Skyddslager som skall fungera som materialskiljande lager skall även uppfylla krav enligt avsnitt E10, "Materialskiljande lager".

*Alternativt får skyddslager för belagda vägar utgöras av material till förstärkningslager i flexibla respektive styva konstruktioner, enligt avsnitt E11.2.*

#### **Tilläggskrav på alla prover:**

- Finjordshalten (0,063/totalt) får inte överstiga 11 viktprocent. Alternativt skall krav på kapillaritet uppfyllas, se nedan.
- Kapillariteten skall underskrida 1 m. Kapillariteten bestäms enligt VVMB 24. Alternativt skall krav på finjordshalten uppfyllas, se ovan.

## **E12 Överbyggnadsmaterial till grusvägar**

Avsnittet är gemensamt för nybyggnad, bärighetsförbättring och underhåll.

Materialen till grusvägar är sammansatta för att uppfylla krav på både bärighet och fukthållande egenskaper.

All provtagning skall utföras på färdig lageryta. Provtagning av obundna överbyggnadslager skall utföras enligt VVMB 611.

Andra material, som t.ex. krossad betong och hyttsten, kan användas efter att den tekniska funktionen uppfyller kraven i kapitel A och i avsnitt E3.1. Materialets tekniska funktion skall då vara dokumenterad i genomförda undersökningar (laboratorie och/eller fält). Materialets funktion i vägkroppen skall motsvara det lager det ersätter. Mätbara krav på färdig produkt (lager) skall definieras om de frångår kraven i avsnitt E12. En uppföljning av dessa krav skall genomföras. Materialet och planen för uppföljningen skall godkännas av beställaren.

Är materialet produktcertifierat för andel okrossat material, organisk halt, och nötningsegenskaper anses dessa krav vara uppfyllda.

*Bästa resultat uppnås om materialet framställs av morän eller en blandning av morän och bergkross.*

*För enskilda vägar, där inga krav ställs på dammbindning, kan material till belagda vägar användas till grusväg.*

## A

AAV. *Se* aggregate abrasion value  
ACV. *Se* aggregate crushing value  
Aggregate abrasion value, 70  
Aggregate crushing value, 71  
Aggregate impact value, 70  
AIV. *Se* aggregate impact value  
alternativa ballastmaterial, producerad mängd, 37  
ALT-MAT, 42, 74, 80, 165, 225, 241, 242, 273  
armering, 128, 137, 187  
arsenik, 97  
ASTM C131, Los Angeles, 70  
ASTM C535, Los Angeles, 70  
avfall, 38, 101, 141, 142, 143, 265  
avfallsdeponering, allmänna råd, 100, 105  
avfallsmängder, 144  
Avfallsskatten, 34  
avgifter för deponering och förbränning, Danmark, 115  
AVI-bodemas (bottenaska i Nederländerna), 125

## B

bakgrundshalter, 108, 177, 244, 269  
ballasttyp, 183  
batterier, 141  
bergkross  
frys-töförsök, 219  
hållfasthetsökning, 210  
innehållsanalys, 243  
kulkvarnsvärde, 215  
lakning, 110  
Los Angeles-tal, 216  
producerad mängd, 37  
Beskows kapillaritetskriterium, 87  
beständighet  
**def**, 49  
beständighet mot klimatpåverkan, 81  
beständighet mot mekanisk påverkan, 70  
Bg-index, 74  
metodbeskrivning, 77  
blandningar, 269  
bly, 98, 100, 141, 184  
borttagningsplikt, 124

bottenaska, 38, 141, 144, 148, 150, 264  
Danmark, 115  
produktionsstatistik, 37, 39, 144  
brännbart avfall, 143  
byggmaterialdecretet, Nederländerna, 122  
**bärförmåga**, 253, 254, 257  
**def**, 49  
krossad betong, 194  
slaggrus, 158, 159  
bärlager, 270

## C

California Bearing Ratio, CBR, 50  
Casagrandes tjälfarlighetskriterium, 87  
CBR, 188  
figur, 51  
insitu, 52  
krossad betong, 64, 188  
metodbeskrivning, 50  
redovisning, 52  
slaggrus, 151  
CBR, – DCP, 57  
cellpermeameter, 85  
cementpasta, 64, 182, 183, 193, 196  
cementstabiliserat grus, CG, 207  
CEN, **def**, 134  
CEN-lakning, 105  
certifiering av bottenaska, Nederländerna, 125  
CFC, 130  
CG, 207  
CROW, 42

## D

dagvatten, 99, 107, 176  
DCP, metodbeskrivning, 56  
deformationsmodul, 55  
deponiavgift  
Danmark, 115  
deponiavgift+skatt  
Finland, 127  
Nederländerna, 122  
**Deponiskatten**. *Se* Avfallsskatten  
direkta krav, 251  
Dynamic Cone Penetrometer, DCP, 56  
Dynamisches Plattendruckgerät, minifallvikt, 61

dynamisk plattbelastning, metodbeskrivning, 59  
dynamisk treaxialprovning, 77, 208, 267  
dynamiska lakförsök, 102  
dynamiskt treaxialförsök, 54, 67  
figur, 53  
metodbeskrivning, 52

## E

efterbehandling, slaggrus, 148  
E-modul, 49  
E-modul, – CBR, 52  
energiinnehåll, 142  
ensondsmetoden. *Se* sondmetoden  
E<sub>v2</sub>, 55  
extraktionsförsök, 102

## F

fallviktsapparat, 57  
fallviktsmätning, metodbeskrivning, 57  
farligt avfall, 141, 179  
fenolfaltainprov, 67  
filterspetsar, 85  
finmaterial, 135  
flersondsmetoden. *Se* sondmetoden  
flisighetstal, 71, 135, 183  
flygaska, 38, 64, 144  
produktionsstatistik, 39, 144  
frostbeständighet, 82  
frosthalka, 92, 179, 245, 317, 321  
frysförsök, 83  
krossad betong, 222  
slaggrus, 169  
frystest  
enligt FTU –94, direkt frysförsök, 88  
enligt Hermansson, direkt frysförsök, 89  
enligt self-refrigerated unit, direkt frysförsök, 88  
frys-töbeständighet. *Se* beständighet mot klimatpåverkan  
frys-töförsök  
enligt NORDTEST, 83  
enligt VTI, 83  
krossad betong, 218  
med vatten, 81  
frys-tömotstånd, 134  
fullständig förbränning, 142, 145

färg, 98, 121, 141  
färsk bottenaska, 150  
färskt slaggrus, 168  
förbränning, 143, 145, 146, 147  
förbränningsprocess, slaggrus, 143, 145  
föroreningar, 107, 188, 233, 269  
i betong, 103  
i krossad betong, 130, 181, 227  
i slaggrus, 148  
förstärkningslager, 270

## G

gips, 227  
glödgning, 67, 69, 146, 148, 267  
metodbeskrivning, 67  
glödgningsförlust, 67, 69, 146, 267  
slaggrus, 154  
gradering. *Se* kornstorleksfördelning  
graderingstal, 258, 259  
def, 49  
granit, värmekonduktivitet, 92  
Grums  
fältförsök, 137, 197, 198, 211, 217  
fältförsök, figur, 197  
labförsök, 205, 206, 221  
grus  
beständighet, 214  
CBR-värde, 51  
kapillaritet, 87  
kemisk sammansättning, 174  
klimatbeständighet, 218  
lakning, 109  
Los Angeles-tal, 165  
organisk halt, 69  
packningsegenskaper, 155  
permeabilitet, 168  
tjällyftning, 169  
vattenabsorption, 168, 220  
värmekonduktivitet, 170  
gränsvärden för användning  
Nederländerna, 124  
gränsvärden, beständighet, 268  
gränsvärden, miljöpåverkan, 269  
gyratorisk packning, 74, 80, 268  
metodbeskrivning, 74

## H

homogenitet, 141, 142  
husbetong, 191, 192, 193

husbyggnadsbetong, 182, 216  
hushållsavfall, 142  
huvudelement, 174  
huvudspänning, 53  
hydratation  
  **def**, 63  
  slaggrus, 151  
hydraulisk konduktivitet. *Se* permeabilitet  
hyttsten  
  **def**, 39  
  tillverkningsprocess, 240  
hållfasthetsklass, 270  
hållfasthetsökning, 235  
  krossad betong, 115  
  utnyttjande, 213

## I

icke hydrauliskt bindemedel, 62  
ICT. *Se* Intensive Compaction Tester  
immissionsvärde, 123  
Impact test, metodbeskrivning, 74  
impregnering, 97, 98, 141  
indirekta krav, 250  
industriavfall, 142  
infiltrimetrar, 85  
informationsplikt, 124  
innehållsanalys  
  hyttsten, 243  
  krossad betong, 190  
  slaggrus, 147, 154  
Intensive Compaction Tester, ICT, 76  
isländskt Bg-index. *Se* Bg-index  
isolering, 85, 92, 130, 138, 179, 245, 246, 320

## J

järnvägssliprar, 128, 137, 191, 193, 195

## K

kadmium, 97, 100  
Kalifornien, krossad betong, 132  
kalkutfällning  
  i naturen, 65  
  krossad betong, 64, 235  
kapillaritet, 87  
kapillär stighöjd, 87  
karbonatisering, 62, 188

betongkonstruktion, 63  
krossad betong, 64, 181, 184, 265  
slaggrus, 151, 176  
karbonatiseringsdjup, 185  
kemisk sammansättning. *Se* totalhalt  
  krossad betong, 226  
  slaggrus, 174  
klassificering av byggnadsmaterial, Nederländerna, 123  
klimatbeständighet, 135  
klor, 145  
klorid, 97, 131, 175, 177, 179, 184, 226  
kolonnförsök, 102, 104  
kolorimetermetoden, 67, 68, 69, 146  
kolorimetermätning, 267  
  metodbeskrivning, 68  
koppar, 98, 100  
kornform, 41, 49, 133, 135, 149, 194  
kornstorlek, 66  
kornstorleksfördelning, 35, 87, 134, 194, 214, 253, 267  
  slaggrus, 148, 153, 167  
korrosion, 128  
kostnader för deponering och förbränning av avfall, Nederländerna, 122  
krav på bygg- och rivningsavfall  
  Danmark, 121  
Kretsloppsanpassad väghållning, 33  
Kretsloppspropositionen, 33  
krom, 98  
krossad betong, **def**, 39  
krökningstal, **def**, 49  
kulkvarn, 71, 134  
  – Los Angeles, 79  
kulkvarnsvärde, 182, 183, 216, 321  
  hyttsten, 245  
  krossad betong, 215, 237  
  metodbeskrivning, 71  
kvalitetskontroll, 270  
kvalitetskrav på återvunnen krossad betong, Finland, 129  
kvalitetssäkring, 122, 180  
kvicksilver, 98, 141  
kylning, slaggrus, 145

## L

L/S, liquid/solid, **def**, 99  
lagrad bottenaska, 150  
lagrad krossad betong, 199

lagrat slaggrus, 168  
lagring, 141, 188  
  hyttsten, 245, 246  
  krossad betong, 63, 64  
  slaggrus, 38, 137, 149  
lakvatten, 106, 111, 150, 244  
lakvattenuppsamling, 107  
lera  
  spänningsberoende, 196  
  värmekonduktivitet, 170, 223  
LOADMAN, minifallvikt, 60  
LOI, 67  
Los Angeles, 134  
  – kulkvarn, 79  
  metodbeskrivning, 73  
Los Angeles-tal, 182, 267  
  krossad betong, 216, 237  
  slaggrus, 165  
Loss on ignition, 67  
lysimeterförsök, 102, 104  
långtidsegenskaper  
  krossad betong, 266  
  slaggrus, 263  
läggningsdjup, 257, 269  
  def, 49  
lätt instampning, 78  
lättbetong, 185, 186  
Lövsta, 136

## M

magnesiumsulfat  
  provning med, 81, 82  
mass burn, 143, 146  
materialinventeringar, 33  
materialkaraktisering, 269  
materialkaraktisering, förslag, 252  
materialklassificering, krossad betong  
  Finland, 129  
materialmängder, alternativa ballast-  
  material, 37  
MB-test, metylenblåmetoden, 62  
M<sub>DE</sub>. *Se* micro-Deval, metodbeskriv-  
  ning  
M<sub>DS</sub>. *Se* micro-Deval, metodbeskriv-  
  ning  
metallavskiljning, 137, 143, 148, 190  
metylenblåmetoden, 133, 135  
  metodbeskrivning, 62  
metylenblåvärde, 266

micro-Deval, 79, 134  
  krossad betong, 214  
  metodbeskrivning, 72  
  slaggrus, 165  
miljökaraktisering, 252  
Miljömålskommittén, 34  
Miljöpropositionen, 34  
miljötekniska regler för förbrännings-  
  slag  
  Danmark, 119  
minifallvikt, 59  
Minnesota, krossad betong, 132, 235  
modifierad proctor, 78  
morän, 33  
  lakning, 110  
  permeabilitet, 169  
  tjällyftning, 169  
  utnyttjad mängd, 37

## N

naturgrus, 33, 34  
  utnyttjad mängd, 37  
Naturgrusskatten, 33  
New York State, krossad betong, 132  
nickel, 98  
North Carolina, krossad betong, 132  
nötningsmotstånd. *Se* micro-Deval

## O

oförbränt material, 116, 145, 146, 148,  
  174  
  def, 148  
olagrad krossad betong, 198, 207  
organisk halt, 35, 69, 134, 267  
  slaggrus, 145, 154, 158  
organiska ämnen, 97  
organiskt avfall, 143  
organiskt material, 49, 66, 67, 119, 121,  
  141, 145, 146, 147, 149, 150, 188  
oxiderande tillgänglighetstest, 103

## P

packningsegenskaper  
  krossad betong, 192  
  slaggrus, 155  
packningsgrad, 250, 318  
PAK. *Se* polyaromatiska kolväten  
papper, 137, 142, 148  
PCB, 121, 130, 183



petrografisk analys, 81, 82, 133  
pH, 96, 108, 112, 269  
  betong, 63, 66, 128, 227, 235  
  slaggrus, 146, 149, 150, 176  
pH-beroende, 105  
pH-stat-test, metodbeskrivning, 105  
piezometrar. *Se* filterspetsar  
plast, 98, 130, 137, 141, 142, 148, 183, 227  
plattapparat, 92  
  metodbeskrivning, 93  
polyaromatiska kolväten, PAK, 127, 146, 225, 227  
Portlandcement, 62  
produktcertifiering, 269  
provning med magnesiumsulfat, 135  
provväg  
  Björnsbyn (Luleå), 137, 138, 189, 197, 198, 209, 210, 219, 224, 234, 242, 268  
  Björnsbyn (Luleå), figur, 189, 197  
  Björnsbyn (Luleå), foto, 211  
  Ekeby, 137, 189, 190, 197, 198, 201, 209, 210, 228, 231, 233  
  Ekeby, figur, 189, 197  
  Gumpekulla (Linköping), 43, 99, 106, 112, 136, 161, 164, 166, 170, 171, 172, 176, 177  
  Gumpekulla (Linköping), figur, 162, 163  
  Gumpekulla (Linköping), foto, 162, 166  
  Malmö, 106, 112, 136, 176, 177  
  Nyköping, 138, 241, 243  
  Nyköping, figur, 138  
  St Lars (Linköping), 137  
  Stenstorp, 137, 197, 198  
  Stenstorp, figur, 197  
  Törringe, 43, 69, 136, 137, 151, 163, 172, 197, 227, 228, 229, 231, 233, 235  
  Törringe, figur, 163, 197  
  Västerås, 137, 197, 198, 209, 210  
  Västerås, figur, 197

## R

RDF, refuse derived fuel, 143, 146  
regler

för användning av alternativa vägmaterial i Sverige, 35  
för bygg- och rivningsavfall i Danmark, 121  
för dimensionering och byggande med återvunnen betong i Finland, 128  
för miljöpåverkan från bygg- och anläggningsmaterial i Nederländerna, 122  
för miljöpåverkan från förbränningslagg i Danmark, 119  
för miljöpåverkan från krossad betong i Finland, 130  
renhet, krossad betong, 185, 188, 217  
rensning, krossad betong, 181  
resilientmodul, 49  
restbetong, **def**, 39  
rivningsbetong, **def**, 39  
rökgasrening, 144, 265  
röntgendiffraktion. *Se* totalhalt  
rörpermeameter, 85

## S

salter, 97  
sandezkvivalentmetoden, 133, 135, 266  
  metodbeskrivning, 61  
schaktmassor, 39  
SEB-metoden, 151  
selektiv rivning, 128, 236, 265  
self-refrigerated unit, direkt frysförsök, 88  
siktning, 80, 133  
  bottenaska, 149  
silt  
  spänningsberoende, 196  
  tjällyftning, 169  
  värmekonduktivitet, 223  
SJ kombiterminal  
  Malmö, 136  
skakförsök, 102, 103  
slaggrus  
  **def**, 38  
  tillverkningsprocess, figur, 143  
släckning, slaggrus, 145, 147  
sondmetoden, 92  
  metodbeskrivning, 92  
sopförbränningsanläggning, figur, 143  
sortering

avfall, 143, 144  
slaggrus, 141, 148  
Soundness test, 84  
spridning, 100  
sprödhetstal  
    krossad betong, 214  
    slaggrus, 165  
spårämnen, 103, 174  
    hyttsten, 243  
    krossad betong, 227, 230, 233  
    slaggrus, 141, 149, 174, 175  
spänningsberoende, 52, 53, 251  
    hyttsten, 240  
    krossad betong, 193, 196, 199  
    slaggrus, 156, 264  
    vid fallviktsmätning, 58  
SRU. *Se* self-refrigerated unit  
stabilitet, def, 49  
standard proctor, 78  
statisk plattbelastning, metodbeskrivning, 55  
styvhet  
    **def**, 49  
    hyttsten, 240  
    krossad betong, 192  
    slaggrus, 156  
styvhetsintervall  
    slaggrus, 160  
styvhetsökning, krossad betong Finland, 129  
STÖR 99, 91  
sulfat, 149, 175, 176, 225  
sulfatlösning  
    vittring med, 83  
sulfattest, 83  
sulfidmalmer, 97, 98  
sulfidmineral, 98  
syraextraktion. *Se* totalhalt  
syraupplösning. *Se* totalhalt  
SYSAV, 44, 136

## T

tankförsök, 102  
tegel, 98, 121, 130, 186, 190, 199, 200, 201, 213, 214, 265  
Ten per cent fines value, 71  
tillgänglig mängd, metodbeskrivning, 103  
tillgänglighet, 96

tillgänglighetstest, 103  
tillsatsmedel i betong, 226  
TJÄL 98, tjälgränsmätare, 95  
tjälldjup, 92  
tjälldjupsmätare, 92  
tjälgränsmätare, enligt Gandahl, metodbeskrivning, 94  
tjälgränsmätningar  
    hyttsten, 242  
    krossad betong, 224  
    slaggrus, 170  
tjärhaltigt material, 121  
TOC, metodbeskrivning, 69  
Total Organic Carbon, TOC, 69  
totalhalt, 96  
    metodbeskrivning, 103  
treaxialförsök. *Se* dynamiskt treaxialförsök, dynamisk treaxialprovning  
TRL Foundation Tester, minifallvikt, 59  
tryckhållfasthet, 129, 182, 183, 193, 194, 216, 217  
trä, 121, 142, 148, 227  
tung instampning, 78  
tungmetaller, 97  
tvåstegs kontrolltest, 102  
    metodbeskrivning, 104  
tyg, 148

## U

uppehållstid  
    dräneringsvatten, 66, 235  
    förbränning, 142, 145  
utlakning från konventionella material, 109

## V

variation  
    hyttsten, 245, 266  
    krossad betong, 265  
    slaggrus, 152, 263  
Washington State, krossad betong, 131  
vattenabsorption, 84  
vattenabsorptionsförsök, 81, 82  
vattencementtal, 63, 64, 184, 185  
vattenomsättning, 98  
vindsiktning, 190  
VROM, 42  
våtnötningsförsök i vändskak, 74

metodbeskrivning, 79  
vägbetong, 131, 182, 191, 201, 216  
Vägtekniska materialkrav på förbrän-  
ningsslagg  
  Danmark, 116  
värmekonduktivitet, def, 91  
värmeledningsförmåga. *Se* värmekon-  
duktivitet

## Z

zink, 98, 100, 141

## Å

återanvändning, 40, 111, 318  
återanvändning, Danmark, 115  
återvinning, Finland, 127  
återvinning, Nederländerna, 121

## Ö

österreichiska mineralkriteriet, 87

$\lambda$ . *Se* värmekonduktivitet











SVENSKA BYGGBRANSCHENS UTVECKLINGSFOND

Projektet har finansierats av Kommunikationsforskningsberedningen (KFB), Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och Väg- och transportforskningsinstitutet (VTI) och utförts på Väg- och transportforskningsinstitutet (VTI) i Linköping.

TRITA-AMI LIC 2063  
ISSN 1400-1292  
ISRN KTH/AMI/LIC 2063-SE  
ISBN 91-7283-017-4

