

Kvalitetskriterier för bottenaskor till väg- och anläggningsbyggnad – etapp II - Bottenaskors tekniska egenskaper

Bo von Bahr, Håkan Arvidsson, Annika Ekvall, Karl-Johan Loorents

Kvalitetskriterier för bottenaskor till väg- och anläggningsbyggnad

Etapp II - Bottenaskors tekniska egenskaper

Quality criteria for bottom ashes for civil construction

Part II – Technical characteristics of bottom ashes

Bo von Bahr
Karl-Johan Loorents
Annika Ekvall
Håkan Arvidsson

Projektnummer Q4-282

VÄRMEFORSK Service AB
101 53 STOCKHOLM · Tel 08-677 25 80
Januari 2006
ISSN 1653-1248

Förord

Denna rapport utgör redovisningen projektet Q4-282, vilket är etapp II i projektet Kvalitetskriterier för bottenaskor till väg- och anläggningsbyggnad och alltså är en fortsättning på Q4-143 [1]. Båda projekten finansieras av Värmeforsks Askprogram och Ångpanneföreningens Forskningsstiftelse. Projektets långsiktiga syfte är att bottenaskor skall etableras som ett accepterat material till väg- och anläggningsbyggnad genom att alla aktörer vet vad bottenaskan har för egenskaper, både som material i sig och hur det fungerar i tillämpningen. Detta är en förutsättning för att alternativa material skall kunna ta steget från småskaliga engångsprojekt till ett material som är välkänt och används rutinmässigt.

Den första etappen inventerade generella funktionskrav på ett väg- och anläggningsbyggnadsmaterial samt lämpliga provningsmetoder för askor för att verifiera dessa krav. I föreliggande etapp provas bottenaskorna i laboratorium enligt den plan som föreslås i den första etappen. Resultatet av detta projekt är ett provningsprogram för framtida karakterisering av aska, ett förslag till i vilken ordning provningarna bör göras då en aska skall undersökas samt naturligtvis ett antal värden på dessa parametrar för de tre ingående askorna.

Rapporten har arbetats fram av en arbetsgrupp på SP och VTI. Den är skriven både för de aktörer som har askorna och för de aktörer som bygger vägar och anläggningar. Beroende på läsarens bakgrund kommer alltså olika delar av rapporten att vara av olika intresse.

Referensgruppen i detta projekt består av sju personer, David Bendz från SGI, Magnus Berg från ÅF (numera Vattenfall Utveckling, ersattes av Henrik Bjurström i juni 2005, ÅF), Henrik Bristav från Umeå Energi, Leonard Dahlberg från Holmen Paper AB i Norrköping, Jan Hartlén från LTH, Klas Hermelin från VV samt Hanna Munde från Vattenfall i Uppsala. Claes Ribbing från Svenska Energiaskor har också bidragit med synpunkter. Stort tack till er för gott samarbete och värdefulla synpunkter.

Borås november 2005

Bo von Bahr, Håkan Arvidsson, Annika Ekvall, Karl-Johan Loorents

Abstract

Detta projekt redovisar en uppsättning provningsmetoder särskilt utformade för att testa alternativa materials, t ex askors, funktionsegenskaper i allmänhet och lämplighet som vägbyggnadsmaterial i synnerhet. Tre askor har testats enligt dessa metoder, vara en bedöms vara möjlig att använda till väg- och anläggningsbyggnad. De andra två får användas i mindre krävande konstruktioner där frostresistens och tjällyftning inte är kritiska parametrar.

Sammanfattning

Denna rapport utgör redovisning av den andra av två etapper. Etappen har huvudsakligen handlat om att prova tre stycken olika askor samt att utvärdera funktionen och lämpligheten hos de provningsmetoder som använts för detta. Projektet behandlar enbart tekniska aspekter på askor. Rapporten är skriven så att den skall vara meningsfull att läsa både för de som har askor (t ex energibolag) och de som bygger vägar och anläggningar (entreprenörer).

Alla provningsmetoder som används för traditionella material (naturgrus och krossat berg) passar inte för t ex askor. Nya provningsmetoder för en del av de egenskaper som skall provas måste därför tas fram, provas praktiskt och utvärderas. Projektet omfattar både väg- och anläggningsbyggnad men har tyngdpunkten mot vägområdet eftersom detta ställer högst och mest omfattande krav.

Tre bottenaskor av olika typ har undersökts m a p ett drygt tiotal mekaniska/fysikaliska parametrar, väsentliga för askans funktion som konstruktionsmaterial. En viktig slutsats är att aska är ett, ur funktions- och karaktäriseringssynpunkt, odefinierat begrepp som innefattar material med vitt skilda egenskaper. Trots att bara tre askor undersökts är spridningen i resultat för vissa egenskaper stor då askorna undersökts. Detta gäller t ex för skrymdensitet, vattenabsorption och kornstorleksfördelning. Det framgår också tydligt att en del av de ordinarie ballasttestmetoderna i vissa fall med nödvändighet måste ersättas av andra metoder, anpassade efter alternativa material. Ett exempel är vattenabsorptionen, som i sin tur påverkar frostbeständighet, tjällyftning mm.

Alla provningsmetoder som föreslagit och använts i projektet bedöms vara relevanta för ändamålet. Provningsmetoderna kan delas upp i två kategorier – dels de som ger ett resultat som är lätt att tolka, dels de som ger ett resultat som är svårt att tolka. Till den förstnämnda gruppen hör kornstorleksfördelning, skrymdensitet, värmekonduktivitet, permeabilitet och tjällyftning. Till den andra gruppen hör organisk halt, vattenabsorption, frostbeständighet, kapillär höjd, dynamiskt treaxialtest, modifierad kompressibilitet och packningsegenskaper. Att det är svårt att tolka resultatet beror inte på metoderna i sig, t ex att de skulle vara särskilt komplicerade, utan på att det finns för lite data, framför allt data som jämför laboratorium och fält, för att man skall kunna säga vad ett visst provresultat betyder i praktiken.

Rapporten ger ett förslag till provningsordning för bottenaskor i två olika fall, se avsnitt 7.2. Ett mindre omfattande förslag för provning för allmän karaktärisering och ett mer omfattande förslag för provning då askan avser användas som ett konstruktionsmaterial till väg- och anläggningsbyggnad. En väsentlig slutsats är att askornas stora variation gör det svårt att generalisera resultat från försök på enstaka askor. En noggrann karaktärisering av askor, t ex enligt denna rapports förslag, skulle möjliggöra att enskilda lab- och fältförsök kan infogas i ett större sammanhang och skapa generellt giltiga slutsatser.

Nyckelord: aska, bottenaska, alternativa material, provningsmetoder, ballast

Summary

This report is the presentation of the second of two stages. This stage deals mainly with the testing of three different types of ashes and the evaluation and suitability of the chosen test methods. The project only relates to the technical aspects of ashes. The report is written in such a way that both ash owners (e.g. Energy companies) and they who build roads and constructions (contractors) will find it meaningful.

All test methods that are used for traditional materials (gravel and crushed rock) is not fitting for ashes. New test methods for some properties that will be tested must therefore be presented, tested practically and evaluated. The project encompasses both road- and construction building but has a focus on road construction since there the highest and comprising demands are defined.

Three bottom ashes of different types have been studied regarding some tenfold mechanical/physical parameters, essential for the functionality of the ash as a construction material. An important conclusion is that ash is from a functionality and characterisation point of view, an undefined concept that encloses materials with widely different properties. Despite that only three ashes have been looked into the range of results are varying large for some properties. This is especially true for the loose bulk density, water absorption and grain size distribution. It is also clear that some of the standard test methods for aggregates need to be exchanged by other methods, which are more adapted to alternative materials. One such example is water absorption, a property that further influences frost resistance, frost heave and such.

All the proposed test methods that been used in the project is considered fitting for its purpose. The test methods can be divided into two categories – the ones that yield easy assessable results and those that yield results hard to appraise. To the first group belong grain size distribution, loose bulk density, thermal conductivity, permeability and frost heave. To the other group belong organic content, water absorption, frost susceptibility, water suction height, cyclic load triaxial test, modified compressibility and compactability. The difficulty in interpreting the results do not depend on the methods themselves, i.e. that the method would be particularly complex, but rather due to limited data, in particular data that compares field and laboratory testing, so that one can say what a particular test result has in practise.

The report forwards a suggestion for a control procedure for bottom ashes in two different cases; a less comprising suggestion for common characterisation and also an extensive suggestion for testing when the ash is to be used as a material for road- or construction building. An essential conclusion is that the ashes large variation makes it difficult to generalize results based on testing single ashes. A thoroughly characterisation of ashes, e.g. according to the proposition of this report, would enable a single laboratory or field trial to be incorporated into a wider context and help create general conclusions.

Keyword: ash, bottom ash, alternative materials, test methods, aggregate

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.1.1	<i>Disposition av rapporten.....</i>	<i>2</i>
1.2	AVGRÄNSNINGAR I PROJEKTET	2
1.3	KOPPLINGAR TILL ANDRA PROJEKT INOM VÄRMEFORSKS PROGRAM "MILJÖRIKTIG ANVÄNDNING AV ASKOR"	2
1.4	KOPPLINGAR TILL ANDRA PROJEKT PÅ SP	3
1.5	KOPPLINGAR TILL ANDRA PROJEKT PÅ VTI	4
1.6	STATUS FÖR ASKOR I ANDRA LÄNDER	6
1.7	FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSOMRÅDET	6
1.8	SYFTE	7
1.9	MÅL OCH MÅLGRUPP	7
2	BOTTENASKOR I PROJEKTET	8
2.1	TORVPULVERASKA, VATTENFALL AB VÄRME UPPSALA	9
2.2	PROCESSASKA, HOLMENS BRUK	9
2.3	SLAGGRUS, UMEÅ ENERGI	10
3	PROJEKTETS GENOMFÖRANDE	13
3.1	PROVTAGNING	13
3.1.1	<i>Provuttag.....</i>	<i>13</i>
3.1.2	<i>Dokumentation av provuttag.....</i>	<i>14</i>
3.1.3	<i>Provtransport.....</i>	<i>14</i>
3.2	PROVNEDDELNING.....	15
3.2.1	<i>Neddelning på SP</i>	<i>15</i>
3.2.2	<i>Neddelning på VTI</i>	<i>16</i>
3.3	PROVNING PÅ SP	16
3.4	PROVNING PÅ VTI	16
3.4.1	<i>Utvärdering och sammanställning</i>	<i>16</i>
4	RESULTATREDOVISNING	17
4.1	GRUNDLÄGGANDE KARAKTÄRISERING.....	17
4.1.1	<i>Visuell bedömning av askorna och kornstorleksfördelning</i>	<i>17</i>
4.1.2	<i>Skrymdensitet (lös torr)</i>	<i>18</i>
4.1.3	<i>Organisk halt.....</i>	<i>19</i>
4.2	FUKTRELATERADE PARAMETRAR	20
4.2.1	<i>Vattenabsorption.....</i>	<i>20</i>
4.2.2	<i>Kapillär höjd</i>	<i>21</i>
4.2.3	<i>Värmekonduktivitet</i>	<i>23</i>
4.2.4	<i>Frostbeständighet</i>	<i>24</i>
4.2.5	<i>Permeabilitet.....</i>	<i>26</i>
4.2.6	<i>Tjällyftning.....</i>	<i>26</i>
4.3	MEKANISKA EGENSKAPER.....	27
4.3.1	<i>Packningsegenskaper</i>	<i>27</i>
4.3.2	<i>Dynamiska treaxialförsök</i>	<i>27</i>
4.3.3	<i>Modifierad kompressibilitet</i>	<i>32</i>
5	RESULTATANALYS	35
5.1	GRUNDLÄGGANDE KARAKTÄRISERING.....	35
5.1.1	<i>Visuell bedömning av askorna och klassificering av askorna med avseende på kornstorleksfördelning</i>	<i>35</i>
5.1.2	<i>Skrymdensitet (lös torr)</i>	<i>35</i>
5.1.3	<i>Organisk halt.....</i>	<i>35</i>

5.2	FUKTRELERADE PARAMETRAR	37
5.2.1	Vattenabsorption	37
5.2.2	Kapillär höjd	38
5.2.3	Värmekonduktivitet	39
5.2.4	Frostbeständighet	40
5.2.5	Permeabilitet	41
5.2.6	Tjällyftning	41
5.3	MEKANISKA EGENSKAPER	43
5.3.1	Packningsegenskaper	43
5.3.2	Dynamiska treaxialförsök	43
5.3.3	Modifierad kompressibilitet	46
6	SLUTSATSER	47
6.1	GENERELLA SLUTSATSER	47
6.1.1	Stor variation	47
6.1.2	Rättvisande provningsmetoder väsentligt	47
6.1.3	Konsekvenser för andra projekt, inom och utom askprogrammet	47
6.2	PROVNINGSMETODERNAS FUNKTION OCH RELEVANS	48
6.3	TILLÄMPNINGAR OCH NYTTIGGÖRANDET AV ASKORNA I PROJEKTET	50
6.3.1	Slaggrus från Umeå Energi, aska C	52
6.3.2	Processaska från Holmen Paper, aska B	53
6.3.3	Torvpulverbottenaska från Vattenfall värme, aska A	53
6.4	SAMMANFATTNING AV KAPITLET SLUTSATSER	54
7	KONTROLLORDNING OCH PROVNINGSORDNING	56
7.1	OLIKA TYPER AV PROVNING	56
7.1.1	Typprovning	56
7.1.2	Löpande kontroll - Egenkontroll	56
7.1.3	Löpande kontroll - Övervakande kontroll	57
7.2	PROVNINGAR FÖR ATT UTRÖNA LÄMPLIGHETEN FÖR ÄNDAMÅLET	57
7.2.1	Krav på aska för olika tillämpningar	57
7.2.2	Rätt provningsordning ger bättre ekonomi	58
7.2.3	Förslag till provningsordning för allmän karakterisering	59
7.2.4	Förslag till provningsordning för väg- och anläggningsbyggnadsändamål	59
8	DISKUSSION	61
8.1	PÅVERKAN AV FUKT	61
8.2	HETEROGEN MATERIALGRUPP	61
8.3	RESULTATTOLKNING – DEN SVÅRA BITEN	61
8.4	INVERKAN AV ORGANISK HALT	61
9	FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE	63
9.1	FRÅGOR MED DIREKT KOPPLING TILL GENOMFÖRT PROJEKT	63
9.1.1	Förfining och utveckling av testmetoderna	63
9.1.2	Vidareutveckling av kontrollordning och definition av gränser för olika parametrar kopplat till olika användningsområden	64
9.1.3	Koppling mellan inneboende egenskaper och funktion	64
9.2	FRÅGOR SOM UPPKOMMIT UNDER PROJEKTETS GENOMFÖRANDE	64
9.2.1	Ökad koppling mellan laboratoriemätningar och fältförsök	64
9.2.2	Samband mellan askans ursprung och dess egenskaper	65
9.2.3	Upparbetning och förädling	65
9.2.4	Egenskapernas beroende av tid och andra faktorer	65
9.2.5	Koppling till miljöegenskaper	66
9.2.6	Hanterbarhet och utläggningsteknik	66
10	LITTERATURREFERENSER	67

Bilagor

VISUELL BEDÖMNING AV ASKORNA	BILAGA A
KORNSTORLEKSFÖRDELNING	BILAGA B
SKRYMDENSITET (LÖS TORR)	BILAGA C
ORGANISK HALT	BILAGA D
VATTENABSORPTION	BILAGA E
KAPILLÄR HÖJD VID STIGNING OCH DRÄNERING	BILAGA F
FROSTBESTÄNDIGHET	BILAGA G
TJÄLLYFTNINGSEGENSKAPER	BILAGA H
VÄRMEKONDUKTIVITET	BILAGA I
PERMEABILITET	BILAGA J
PACKNINGSEGENSKAPER	BILAGA K
DYNAMISKT TREAXIALTEST	BILAGA L
KOMPRESSIBILITETSTEST	BILAGA M

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Askprogrammets grundtanke är att hitta lämpliga användningsområden för askorna. Om dessa kan användas istället för att hamna på en deponi kan naturresurser sparas samtidigt som minskat deponiutrymme tas i anspråk. Ett stort område som askor kan användas till är till väg- och anläggningsbyggnad. De traditionella ballastmaterialen (naturgrus och krossat berg) har dominerat under mycket lång tid, varför det inte är helt okomplicerat att introducera alternativa ballastmaterial på marknaden. Det finns många hinder för de nya materialen [2] men de två viktigaste som berörs i detta projekt är att:

- Provningsmetoderna är utvecklade för traditionella material.
- Kopplingen mellan vägens funktionskrav och materialprovningens metodernas resultat bygger på erfarenhet och praxis. Motsvarande koppling för de alternativa materialen har hittills i stort sett saknats.

De viktigaste kraven vid vägbyggnad är att funktionskraven skall uppfyllas, dvs vägen skall hålla för avsedd trafik under den dimensionerade livslängden. Detta behöver utvärderas såväl i fält som på laboratoriet.

Provvägar har ibland byggts för att utforska de alternativa materialen vilket gett ny kunskap. I många fall har dock uppföljningen och dokumentationen kring dessa vägar varit bristfällig. Ett exempel på en bra uppföljning är SGIs projekt Q4-271 Uppföljning av befintliga slaggrusprovvägar [3].

De provningsmetoder som används rutinmässigt på laboratoriet är ofta fokuserade på materialkornens egenskaper och inte på hur hela materialet fungerar i sin tillämpning. Detta projekt skall studera funktionskraven och undersöka hur askor kan uppfylla dessa, bl a genom att använda de mest lämpade provningsmetoderna och jämföra resultaten med de funktionskrav som finns. I vissa fall kan man behöva använda andra eller modifierade provningsmetoder än för de traditionella materialen.

Föreliggande projekt omfattar både väg- och anläggningsbyggnad men inventering av funktionskrav och provningsmetoder har tyngdpunkten mot vägområdet eftersom kraven är mest omfattande och högst i detta område. Detta innebär att alla typer av funktionskrav blir inventerade. Angående tillämpningar så är de mest intressanta tillämpningarna de där man kan visa att askorna fungerar lika bra eller bättre än de traditionella materialen.

För att askor på sikt skall kunna användas som ett etablerat konstruktionsmaterial behöver kunskaperna öka hos både de som har askorna och de som skall använda askorna. Rapporten är skriven så att den skall vara meningsfull att läsa både för de aktörer som har askor (förbränningsanläggningar) och de aktörer som bygger vägar och anläggningar (entreprenörerna). Detta innebär att en del avsnitt kan läsas översiktligt av vissa läsare.

Då termerna *traditionella material* eller *naturliga material* används i rapporten avses grus eller krossat berg. Materialtypen lättballast (även kallad lättklinker) intar en särställning men bör sorteras till gruppen traditionella (eller naturliga) material eftersom det är ett väldefinierat material tillverkat för ett visst syfte och således inte kan betraktas som en rest- eller biprodukt.

1.1.1 Disposition av rapporten

Rapporten inleds med ett kapitel som beskriver bakgrund, definierar avgränsningar och kopplingar till andra projekt mm. Kapitel 2 beskriver de tre olika askorna som ingått i denna projektdel. Kapitel 3 beskriver hur provuttag och neddelning gått till samt beskriver de provningar som utförts både på SP och på VTI. I kapitel 4 redovisas sedan resultaten för varje provningsmetod för sig. Dessa resultat analyseras närmare i kapitel 5, för att utmynna i slutsatser i kapitel 6 som också innehåller en bedömning om användning av askorna. Kapitel 7 handlar om kontrollordning och provningsordning. Kapitel 8 är ett diskussionskapitel och kapitel 9 ger förslag till fortsatt forskningsarbete. Referenserna avslutar huvuddelen av rapporten under kapitelrubrik 10. Efter detta ligger bilagor A-M med en stor mängd provningsresultat.

1.2 Avgränsningar i projektet

Detta projekt behandlar enbart tekniska aspekter på askan. En annan viktig aspekt är askans miljöegenskaper, och dessa egenskaper studeras i ett annat projekt som fortlöper parallellt med detta projekt. Det projektet drivs av SGI och heter Q4-104, Miljöriktlinjer för nyttiggörande av askor i anläggningsbyggande - etapp 1 (rapporterat) [4] samt Q4-238, Miljöriktlinjer för nyttiggörande av askor i anläggningsbyggande - etapp 2 (rapport beräknas 2005).

Detta projekt är också främst inriktat på bottenaskor från rostpannor och pulverpannor. Detta beror på att:

- denna asktyp, bottenaska (icke- eller svagt puzzolan) är mer lik traditionella ballastmaterial än flygaska, och det regelverk som existerar för vägbyggnadsmaterial är helt uppbyggt på obundet material utan eller med svagt puzzolana egenskaper.
- de stora mängderna av vägbyggnadsmaterial används till större vägar där man bygger med obundet material
- för flygaskor så pågår det många andra projekt inom askprogrammet som handlar både om vägbyggnad och andra tillämpningar, t ex tätskikt och tätskikt.
- bottenaska från olika typer av fluidiserande bäddar har en betydligt finkornigare kornstorleksfördelning än traditionella material.

1.3 Kopplingar till andra projekt inom Värmeforsks program "Miljöriktig användning av askor"

Ett flertal andra projekt (förutom Q4-104 och Q4-238) inom askprogrammet har kopplingar till föreliggande projekt. Bl a kan nämnas:

- Q4-148, En förenklad testmetodik för kvalitetssäkring – etapp 1, rapport nr 856. Projektet handlar om hur askans egenskaper varierar från en och samma anläggning beroende på hur driften av anläggningen varierat [5].
- Q4-107, FACE Flygaska i geotekniska anläggningar, Etapp1 Inventering/Tillämplighet, rapport nr 870 [6] och Q4-229, Flygaska som förstärkningslager i grusväg (pågår).
- Q4-144 Krav och riktlinjer vid återbruk och återvinning av avfall till anläggningsändamål, SGF, rapport nr 839 [8].
- Q4-207, Förutsättningar för att askor kommer till användning i vägar, som bl a belyser avvägningen mellan eventuella miljörisker och god hushållning med naturresurser, rapport nr 849 [9].
- Q4-215 Stabilisering av bottenaska med skumbitumen, Etapp 1 (pågår).
- Q4-216 Utvärdering av utveckling av system för kvalitetssäkring av askor och slaggar (pågår).
- Q4-220, Pannsand som kringfyllning i rörgravar för fjärrvärmerör, rapport nr 852 [10].
- Q4-224 Askors materialtekniska funktion – VTIs materialdatabas. Projektet sammanställer provdata från tidigare tester, främst treaxialtest, för att göra dessa överskådliga, rapport nr 930 [11].
- Q4-228, Produkter baserade på blandningar av flygaska och fiberslam (fiberaska) för vägbyggande, rapport nr 915.
- Q4-241 Projekt Vändöra-TVL: En studie av långtidsegenskaper och förutsättningarna för återvinning av vägar anlagda med bottenaska (pågår).

Ett speciellt betydelsefullt projekt av de ovan nämnda är i detta sammanhang det första, Q4-148, eftersom det behandlar omfattningen av kvalitetsvariationer för askor, som kan användas till väg- och anläggningsbyggnad. Bo von Bahr från föreliggande projekt finns med i referensgruppen till Q4-148. Annika Ekvall är med i referensgruppen för Q4-104 och Q4-238 Miljöriktlinjer för nyttiggörande av askor i anläggningsbyggande etapp 1 och 2.

1.4 Kopplingar till andra projekt på SP

För närvarande drivs flera andra projekt på SP inom området alternativa material. Ett projekt inom ramen för VINNOVA-programmet Aktiv Industriell Samverkan (AIS) färdigställdes nyligen. Det handlar om karaktärisering av alternativa material, främst gjuterisand men även aska och stenmjöl. Både miljö och funktion testades i samarbete mellan SP, CTH-Geoteknik, NCC, Gjuteriföreningen och ett antal företag. [12][13][14][15][16].

SP har precis avslutat ett projekt inom ramen för Nordtest som handlade om vattenabsorption. Projektet utfördes som ett samnordiskt projekt mellan SP, IBRI (Icelandic Building Research Institute) på Island och SINTEF i Norge. Bakgrunden till projektet är observationer att alternativ ballast och en del traditionell ballast absorberar vatten under mycket lång tid, ibland under längre tid än ett år, varför den relativt nya EN-standarden för vattenabsorption, SS-EN1097-6, inte fungerar tillfredsställande för sådana material. Detta medför att även då man följt SS-EN1097-6 så blir resultaten

missvisande för alternativa material, om vattenmättat tillstånd krävs [17]. Liknande projekt har också genomförts för både kornstorleksfördelning och sprödhet [18][19].

I samband med att alternativa material långsamt blir mer etablerade så kommer de också in i befintliga regelverk, t ex ATB VÄG [20]. En remiss för krossad betong i ATB VÄG har cirkulerat under våren 2003, på vilken SP lämnade omfattande remissvar. Dessutom har SP på Vägverkets uppdrag skrivit en instruktion angående masugnsslagg (Publikation 2005:39, publiceras oktober 2005 [46]) som ATB VÄG hänvisar till.

Tillsammans med NCC har SP sjösat en databas med miljö- och funktionskriterier för alternativa deponitäckningsmaterial. Pilotskivan skickades till MinBaS i mars 2005 [22]

Projekt inom alternativa material och produktcertifiering förekommer också, t ex P-märkning av masugnsslagg och stålslag. Stålslagsprojektet innefattar en mängd olika typer av slag med olika egenskaper, t ex ljusbågsugnsslagg, järnsand och ferrokromslag. Projekten beräknas avslutas 2005.

Även inom angränsande materialtyper så bedriver SP Bygg och Mekanik produktcertifiering. T ex så drivs ett projekt för att fastställa kvalitetskriterier för anläggningsjord där råvarorna bl a består av alternativa återvunna material [23][24]. I ett annat projekt arbetade SP, tillsammans med RVF (Renhållningsverksföreningen) och ett antal andra parter, fram ett certifieringssystem för kompost och rötrest (= den fraktion som återstår då man rötat biologiskt avfall och fått ut metangas) [25]. Detta system finns främst för att säkerställa att rötresten är en bra gödselprodukt utan risk för förorening och smittspridning på åkermarken. RVF äger certifieringsmärket. SP Bygg och Mekanik är besiktningsorgan och SP certifiering är det certifierande organet, på uppdrag av RVF.

1.5 Kopplingar till andra projekt på VTI

SAMARIS (Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructures) är ett EU-projekt som påbörjades 2003 och ska avslutas i december 2005. Målet med SAMARIS är att öka användningen av återvunnet material i vägar och att kunna minska underhåll och reparationer av broar. VTI har varit verksam i en arbetsgrupp (WP3) där man har utvärderat olika alternativa material för att se om de fungerar tekniskt i en vägkonstruktion och i så fall var i vägens olika lager ett visst material kan användas, men också om materialen kan medföra några miljömässiga risker i en specifik applikation. Arbetet har resulterat i en matris där 8 alternativa materials tekniska och miljömässiga egenskaper karakteriseras utifrån 5 olika applikationer. Matrisen har legat till grund för en metod, med slutanvändaren i fokus, till att utvärdera ”nya” konstruktionsmaterial utifrån tekniska och miljömässiga kriterier. Resultat från WP3 är redovisade i tre stycken s.k. deliverables, vilka kommer att sammanfattas i en SAMARIS slutrapport tillgänglig under början av 2006.

Värmeforsk projekt Q4-224 ”Askors materialtekniska funktion – VTI:s materialdatabas” [11] har sammanställt och analyserat data ifrån materialprovning utförd vid Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI). Huvuddelen av materialen är askor vilka provats i dynamiska treaxialförsök. Materialprovning har pågått under en

längre tid vilket betyder att provserien är omfattande, både i avseende på sort av material och i antal enskilda prov. Provningsdata har varit inriktad mot att prova askors materialtekniska funktion som ballastmaterial. Provningsdata har lagrats i databasen AllAska, en databas vilken tagits fram inom Värmeforsks delprogram "Miljöriktig användning av askor". AllAska skall säkerställa lagring och tillgänglighet av FoU-programmets resultat.

Värmeforsk projekt "Askors materialtekniska funktion - VTI:s materialdatabas" [11] har sammanställt och analyserat data ifrån materialprovning utförd vid Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI). Huvuddelen av materialen är askor vilka provats i dynamiska treaxialförsök. Materialprovning har pågått under en längre tid vilket betyder att provserien är omfattande, både i avseende på sort av material och i antal enskilda prov. Provningsdata har varit inriktad mot att prova askors materialtekniska funktion som ballastmaterial. Provningsdata har lagrats i databasen AllAska, en databas vilken tagits fram inom Värmeforsks delprogram "Miljöriktig användning av askor". AllAska skall säkerställa lagring och tillgänglighet av FoU-programmets resultat. Sammanfattningsvis noterar rapporten att användningen av askor som konstruktionsmaterial är inte lika bred som för krossat berg och naturgrus. Men med materialparametrar som exempelvis låg densitet och god bärförmåga gör de sig särskilt lämpliga i vissa applikationer. Bestämda askor är tekniskt ett materialalternativ till naturgrus. Men användningen är begränsad, kanske främst pga. okunskap om askor. För föreliggande arbete så har rapporten "Askors materialtekniska funktion - VTI:s materialdatabas" använts som referensmaterial, särskilt för att bedöma materialparametrar som till exempel densitet och vattenkvot men också provningsresultat.

Ett annat projekt är "Vägledning – Alternativa material i väg- och anläggningsbyggnad". Syftet med projektet är att förbättra möjligheten för användning av alternativa material i väg- och anläggningsverksamhet och därmed spara naturresurser. Målsättningen är att ta fram en vägledning som kan ligga till grund för att ett gemensamt förhållningssätt skapas till de processer som ska föregå utveckling, användning och återbruk av "nya" material. Vägledningen ska på så vis, oavsett material, ge aktörerna hjälp med processen att hantera frågeställningarna.

VTI har deltagit i referensgruppen för SBUF-projekt nr 11444 "Återvunnen betongs kvalitet och möjligheter" av Christer Molin. Projektets syfte var att belysa återvunnen betongs kvalitet och möjligheter sammanfattade i rekommendationer användbara vid upphandling. En del av projektet ledde till ett paper "Quality of reused crushed concrete strength, contamination and crushing technique" på "International Rilem conference on the use of recycled materials in building and structures" 2004. Håkan Arvidsson, VTI, stod som medförfattare till Rilem-inlägget. Det bygger bl.a. på treaxialförsök utfört på VTI i tidigare projekt.

Under 2004 fastslogs en europastandard för treaxialförsök: EN 13286-7 "Cyclic load triaxial test for unbound mixtures". SINTEF, Norge, arrangerade en ringanalys som VTI deltog i. Resultaten redovisades på BCRA05 i juni 2005. VTI:s del finansierades av

VV. VTI finansierade sedan fortsatta jämförelser mellan VTI-metoder och europastandarden.

1.6 Status för askor i andra länder

Askor som konstruktionsmaterial används i olika stor utsträckning i andra länder. De länder som har dålig tillgång på naturlig ballast har i de flesta fall hunnit ganska långt på området, eftersom drivkrafterna för nyttiggörande/användning av alternativ ballast har varit större i dessa länder. I rapporten från etapp 1 i detta projekt, Kvalitetskriterier för askor till väg- och anläggningsbyggnad - inventering av provningsmetoder och funktionskrav (Q4-143) [1] finns en noggrannare redogörelse av läget i andra länder. Dessutom behandlas övriga länder i rapporten från Värmeforskprojekt Q4-207 [9].

1.7 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

Om man skall kunna använda alternativa material, t ex askor, i väg- och anläggningsbyggnad måste man veta säkert att materialen i kombination med konstruktionen fungerar så att slutresultatet, dvs vägen, husgrunden eller parkeringsplatsen, kan fylla sin funktion med avseende på hållfasthet och beständighet. Detta är väsentligt även för traditionell ballast. Därför provas en rad egenskaper som man sedan länge känner till har betydelse för funktionen. Dessa egenskaper provas med metoder som utvecklats under lång tid för just naturlig ballast. Kopplingen mellan de egenskaper som mäts i laboratoriet och de faktiska egenskaperna i fält har testats i årtal och sambanden är väl kända.

För material som inte har samma inneboende egenskaper passar inte självklart dessa testmetoder. De alternativa materialen, t ex askor, har en rad egenskaper som delvis skiljer dem från naturballast:

- De är ofta porösa, vilket påverkar bl a förmågan att suga upp vatten, motståndskraften mot deformation vid belastning och densiteten.
- De är ofta lättare, somliga t o m så lätta att de flyter i vatten, vilket påverkar t ex utläggningstekniken, men också sänker belastningen på underliggande lager.
- De kan ha isolerande egenskaper, vilket gör att man kan använda tunnare skikt som tjälskydd, men samtidigt kan risken öka för plötslig halka vid frost.
- De enskilda kornen är ofta mindre motståndskraftiga för nötning, vilket gör att testmetoder med roterande trummor inte alltid är rättvisande.
- De kan efterbinda, dvs hållfastheten ökar med tiden, särskilt om andelen finmaterial är hög
- De kan innehålla oförbränt organiskt material, vilket påverkar en hel rad egenskaper.
- De kan, särskilt om returbränslen av olika slag använts, innehålla skrot, glas och annat obrännbart som kraftigt försvårar både neddelning och upparbetning. Dessa ovidkommande föremål måste också ofta tas bort för att askan skall kunna användas.
- De har en annan kornform.
- Packningsegenskaperna skiljer sig gentemot traditionella material.
- De är sinsemellan mer olika än de traditionella materialen.

Allt detta gör att man inte okritiskt kan anamma de provningsmetoder som utvecklats för traditionell ballast. Exempelvis finns metoder fastslagna för bl a siktning [26], nötningsmotstånd [27], frys-tö-beständighet [28] och vattenabsorption [29], som av olika skäl inte kan användas. Siktning av ett alternativt material producerar i många fall en hel del finmaterial som inte fanns där från början, och ger alltså ett inkorrekt resultat [18]. Roterande trummor nöter kornen ett och ett, medan väggkroppen består av korn som ligger relativt still, vilket gör t ex Micro-Deval-metoden missvisande [19]. Även vattenabsorptionen måste provas med andra metoder, eftersom den går så mycket långsammare än i traditionella material, vilket också påverkar frostprovningsmetoden [17]. Traditionella provningsmetoder måste därför utvärderas noga och kompletteras med provningsmetoder som bättre speglar de önskade fältegenskaperna.

1.8 Syfte

Detta projekt syftar till att

1. Utvärdera och rekommendera ett antal provningsmetoder som kan vara aktuella för askor
2. Analysera och egenskaperna hos ett antal (tre st) askor med dessa metoder
3. Föreslå ett urval provningsmetoder, sk provningspaket, utifrån dessa resultat
4. Föreslå en provningsordning, dvs vilka parametrar som bör provas i vilken ordning

Det hade varit önskvärt att kunna föreslå kriterier som materialen måste uppfylla för att anses lämpliga som ballastmaterial för väg- och anläggningsbyggnad. För att kunna åsätta de olika metoderna bestämda värden vid vilka man kan anse att kraven för en viss applikation är uppfyllda vore dock fler provningar av olika askor önskvärt. Framför allt krävs en koppling mellan värden erhållna med en provningsmetod på laboratoriet med materialets faktiska prestanda i fält. Denna uppgift måste därför anstå i väntan på fler data.

1.9 Mål och målgrupp

Målgruppen är tvådelad. Den ena målgruppen är planerare och entreprenörer inom väg- och anläggningsbyggnad. Den andra är producenterna av askor. Det är projektgruppens förhoppning att båda grupperna skall finna rapporten intressant och begriplig.

Det övergripande målet för askoprogrammet är att få ut askor i praktisk användning. För att detta skall bli verklighet måste användaren veta att materialet håller måttet. Tillverkaren måste i sin tur ha klart för sig vilka krav som gäller och hur man visar att de uppfylls. En standardiserad procedur med ett testpaket bestående av väl utprovade och lämpliga metoder tillsammans med adekvata kravnivåer är ett kommunikationsverktyg mellan producent och användare som väsentligt underlättar användandet av dessa material. Detta projekt syftar till att uppfylla åtminstone det första av dessa krav, nämligen testpaketet för applikationen väg- och anläggningsbyggnad.

2 Bottenaskor i projektet

För att erhålla goda resultat från projektet måste ett urval ske från den totala mängden bottenaskor som produceras i Sverige. Detta urval kan göras med hjälp av olika kriterier. T ex bör askorna komma från både pappersindustri och energiproduktion, inte härröra från samma typ av bränsle osv. I delrapport 1 [1] presenteras följande kriterier för askurval, vilka är rangordnade i fallande skala med avseende på betydelse:

- Urvalet skall återspegla olika typer av askor i Sverige, både från energiproduktion och från processindustri, främst pappersindustrin
- Urvalet skall motsvara askor som finns i stora mängder i Sverige
- De ingående bränslena i askan skall vara vanligt förekommande
- Askans avsättning bör i dagsläget vara relativt odefinierad
- Askorna bör komma från finansiärer till Värmeforsks askprogram

En grov systematisk uppdelning av bottenaskor är:

- bottenaskor från rostpannor (t ex kolbottenaskor, slaggrus, pappersindustri mm)
- bottenaskor från pulverpannor (t ex kolpulver, torvpulver mm)
- bottenaskor från fluidbäddpannor (PCFB, BFB, CFB)

I detta projekt undersöks tre olika bottenaskor från två av de ovan nämnda grupperna, nämligen två askor från rostpannor och en aska från en pulverpanna, se Tabell 1.

Tabell 1. Bottenaskor som undersöks i projektet. I vissa provningsprotokoll etc så används beteckningarna A, B och C vilket visas i tabellen nedan.

Table 1. Bottom ashes investigated in the project. In some of the test protocols, the letters A,B and C are used, which is shown in the table below.

Benämning	Typ av aska	Bränsle	Ursprung	Beteckning i rapporten
Torvpulveraska	Bottenaska från pulverpanna	Torv	Vattenfall Värme i Uppsala	A
Processaska	Bottenaska från rostpanna	Bark, returpappersslam, returträflis	Holmen Paper i Norrköping	B
Slaggrus	Bottenaska från rostpanna	Hushållsavfall	Umeå Energi i Umeå, Dåva kraftvärmeverk	C

Det är många askor som är tänkbara utifrån dessa kriterier, så i praktiken har det kriterium som fällt det slutliga avgörandet varit viljan att medfinansiera projektet. Urvalet har dock blivit en bra spegling av den variation som finns inom de bottenaskor som faller i Sverige. Ett större urval, så som planerades ursprungligen, hade naturligtvis givit säkrare resultat.

Nedan kommer en beskrivning av de processer som genererat askorna i detta projekt.

2.1 Torvpulveraska, Vattenfall AB Värme Uppsala

Vattenfall AB Värme Uppsala använder normalt cirka 200 000 ton torv som bränsle i kraftvärmeverket i Uppsala. Torven är i briketterad form och importeras huvudsakligen från Östeuropa. Pannan byggdes av Burmeister & Wein Energy 1972 och då för förbränning av olja men under 1984 byggdes pannan om till en fastbränslepanna anpassad efter bränslena kol och torv. Ångpannan genererar cirka 350 MWh el och 850 MWh värme per år.

Rökgaserna renas i elektrofilter och spärffilter varvid det avskiljs cirka 30 000 ton (TS) flygaska och 10 000 ton (TS) bottenaska per år. Askmängderna kan variera något beroende på väderleksförhållanden då pannan fungerar som spetslast i fjärrvärmesystemet med en drifttid på cirka 4000 h/år.

Vid eldning i ovan nämnd panna tillsätts dolomitpulver i eldstaden samt släckt kalk före spärffiltret för att rena rökgaserna från svaveloxider. Ett överskott av dolomit och släckt kalk hamnar därför också i askorna. Eftersom förbränningstemperaturen är ca 1100 °C förligger överskottet av dolmiten i askan som bränd dolomit, dvs fri CaO och MgO.

Bottenaskan släcks i en vattenfylld slaggutmatare ansluten under pannan. Slaggen dras med skraptransportör uppför en plåt för avrinning och faller ner på ett transportband för transport till en invallad platta för ytterligare avrinning. Vattnet från plattan leds tillbaka till slaggutmataren. Verksamheten sker inomhus för att minska frysning etc.

Torvbottenaskan använd huvudsakligen som utjämningsmaterial inne på deponiområde eller i samband med vägarbeten där askan kan placeras långt ner i väggroppen. Det på grund av att materialet innehåller en del organiskt material som kan orsaka frostsador.

2.2 Processaska, Holmens bruk

Holmen Paper AB driver en panna vid Bravikens pappersbruk. Det är en rosterpanna från Maskinverken med Kablitzrost på 65 MW. Pannan producerar ånga för papperstillverkningen och går därför nästan alltid med konstant last. Samtidigt nyttiggörs en rad restprodukter från bruket, främst bark och returpappersslam, men även returträflis eldas i pannan. Årligen eldas ca 240 000 m³ bark från vedhanteringen, ca 160 000 m³ returträflis (ej impregnerat eller färgat trä) och ca 180 000 m³ returpappersslam (avsvärtningslam) från returpappersanläggningen. Bränslena varierar inom relativt snäva ramar och blandas i samma proportioner.

SNCR-teknik (Selective Non-Catalytic Reduction) med ammoniakinsprutning används i syfte att minska utsläpp av NO_x och CO. Rökgaserna renas i ett elfilter och därefter i ett textilfilter med additivdosering av hydratkalk och aktivt kol. Flygaskan från elfiltret befuktas något för att inte damma och förvaras i container. Rökgasreningsprodukten, som alltså mest består av kalk och kol, samlar i en sluten container och går direkt på deponi.

Bottenaskan går via en utmatningsskruv till container. I samband med släckningen, som sker i vattenbad, flyter en del oförbränt bränsle upp och återförs till förbränningen. Årligen produceras ca 29 000 ton bottenaska (våtvikt), ca 13 000 ton flygaska och ca 500 ton rökgasreningsprodukt. Bottenaskan nyttjas för närvarande som konstruktionsmaterial för verksamhetsytor på egen deponi.

2.3 Slaggrus, Umeå Energi

Umeå Energi AB har ett kraftvärmeverk för avfallsförbränning, fjärrvärmeproduktion och elproduktion vid namn Dåva Kraftvärmeverk. Pannan är en kyld roter (AquaRoll) från VonRoll med rökgaskondensering. Effekten, inklusive rökgaskondenseringen, är 55 MW värme och 12 MW el.

Bränslet som används är dels verksamhetsavfall, dels hushållsavfall. Ca 160 000 ton per år tas emot. Max 20 ton per timme matas in med en kran ifrån bränslebunkern. Proportionerna ca 60 % verksamhetsavfall och 40 % hushållsavfall varierar något för att få ett så jämnt energiinnehåll i bränslet som möjligt.

Bottenaskan matas ut från rostern direkt ned i ett vattenbad för att släckas. Sedan går den på en conveyor till slagghuset för en första grovseparering av magnetiskt metallskrot. Askan mellanlagras på en asfaltplan innan den siktas på en 60 mm sikt. Därefter separeras ytterligare metall bort med magnetseparator. Vid denna punkt tas proverna ut för analys (tillgänglighetstest) som behövs för kvalitetssäkringen. Askan lagras slutligen i mellan tre och sex månader innan den lämnar verket.

Flygaskan har en komplicerad sammansättning. I den torra rökgasreningen tillsätts aktivt kol och kalciumkarbonat i form av kalkstenspulver, vilka båda hamnar i flygaskan. Därefter vidtar en skrubber-rening där saltsyra och natriumhydroxid tillsätts. Dessutom tillsätts ammoniaklösning för kvävereningen. Den våta fasen från skrubbern renas med TMT-15 som är en syntetisk sulfid, Magnafloc och järnklorid för att flokka och separera ut partiklarna. Dessa partiklar blandas sedan med flygaskan till en s k Bambergkaka och deponeras idag.

Bottenaskan har däremot använts i en rad projekt. Två rapporter är publicerade om fältförsöken: "Energiaska som vägbyggnadsmaterial - urlakning och miljöbelastning från en provväg" från SGI [30] och Värmeforskrapporten Uppföljning av befintliga slaggrusvägar [31]. Dessutom finns en hel del forskning sammanhållen av Holger Ecke på Luleå Tekniska Universitet [32]. Detta projekt, förkortat BARC, pågick från 1 dec 2000 till 31 dec 2004 och berörde framför allt fyra områden:

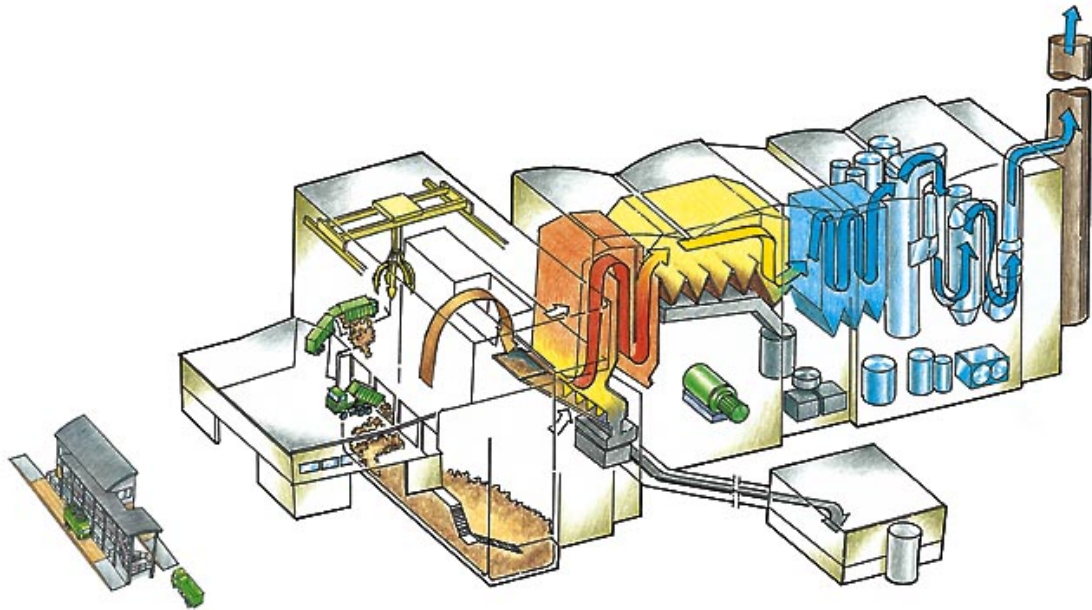
- Användning av vägdikey för att behandla lakvatten
- Stabilisering av bottenaska genom karbonatisering
- Utveckling av metoder för att bestämma långtidseffekter av emissioner
- Hantering av miljöinformation

En slutrapport är nyligen publicerad, i vilken alla delrapporterna finns listade [32]. Ett intressant resultat är att man inte kan säga något generellt om askornas miljöeffekter, eftersom dessa beror både på platsspecifika parametrar och på askornas egenskaper.



Figur 1. Dåva kraftvärmeverk, Umeå Energi

Figure 1. Dåva powerplant, Umeå Energi



Figur 2. Layout av Dåva kraftvärmeverk. Från tippfickan lyfts avfallet ner i pannan via inmatningstratten. Förbränningen sker på rostern. Slaggen släcks i vattenbad och transporteras ut till slagghuset. Värmen utvinns ur rökgaserna innan de går in i den torra rökgasreningen (textilt spårfilter). Efter det så kyls och befuktas rökgaserna och passerar sedan en surskrubber, svavelreningsskrubber och rökgaskondensering innan de släpps ut i den 100 meter höga skorstenen.

Figure 2. Layout of Dåva combined heat and power plant. The waste is lifted from the bunker with cranes, and fed into the furnace through a fuel hopper. The waste is incinerated upon the furnace grate. The hot slag is quenched in water and transported to the slag house. Most of the heat in the fluegas is recovered in the boiler before the dry step of the flue gas cleaning (fabric filter). After the dry step the flue gas is cooled and saturated with moisture before continuing to the acid scrubber, the SO₂-scrubber and flue gas condenser before it is emitted through the 100 meter high smokestack.

3 Projektets genomförande

3.1 Provtagning

3.1.1 Provuttag

Vid all provtagning så är det övergripande målet att få ut ett prov som är representativt för det parti ur vilket provet tas. Oftast används tekniker med flera delprov som sammansätts till ett samlingsprov. Dessutom kan man ta provet på olika ställen i processen där de två huvudalternativen (då man syftar på ballast-liknande material) är ur ”fallande ström” i produktionsprocessen eller från upplag. Det första alternativet ”fallande ström” bör väljas i första hand, men av praktiska och andra skäl går det ej alltid att genomföra.

För bottenaskor, som ju lagrats i flera månader innan provtagning, var enbart provuttag ur upplag aktuellt. Provuttag ur upplag gjordes enligt SS-EN 932-1 tillsammans med SPs generella provtagningsplan för ballastmaterial. Det gick till som följer:

Upplaget inspekterades med hjälp av produktionspersonal för att man skulle kunna bilda sig en uppfattning om hur upplaget är uppbyggt. Med frontlastare togs minst tre skopor ut från tre olika ställen (totalt 3 skopor ur upplaget) både i höjddled och i längsled. Varje skopa lades vid sidan av upplaget och drogs ut till en ca 50 cm tjock ”vägbana” med kanten av skopan, en ”vägbana” per skopa. Prov togs ur ”vägbanan” väl fördelade, dvs ej nära kanterna och med ett djup som gjorde att både stora och små korn kom med. Proven togs med en skyffel enligt SS-EN 932-1. Resultatet blev alltså 3 samlingsprover. Dessa delades ned med fraktionerad skyffling (för beskrivning av denna, se kap 3.2 neddelning). Se Figur 3 och Figur 4 som illustrerar ovanstående.



Figur 3. Provuttag av slaggrus hos Umeå Energi

Figure 3. Test sampling of MSWI-bottom ash from Umeå Energy



Figur 4. Provuttag av processaska hos Holmen Paper

Figure 4. Test sampling of process ash from Holmen Paper

3.1.2 Dokumentation av provuttag

För provuttaget i detta projekt har askinnehavarna gjort en beskrivning hur provuttaget gått till med avseende på de specifika förhållanden som råder vid provtagningsplatsen. Följande parametrar angavs i denna beskrivning:

- Benämning på materialupplaget/partiet
- Ballastens största kornstorlek (ungefärlig)
- Provtagningsställenas läge i upplaget
- Partiets storlek
- Datum och klockslag för provtagning
- Hänvisning till provtagningsplanen. Avvikelser från denna noterades.
- Väderleksförhållanden
- Använd utrustning
- Antal delprov
- Andra anmärkningar
- Metod för neddelning av prov
- Provtagarnas namn och befattning

Provuttaget dokumenterades i vissa fall med digitalkamera.

3.1.3 Provtransport

Omkring 300 liter aska behövdes för all provning utom för en metod (kapillär höjd) där det går åt ca 700 liter. Provtagningen gick till så att prov togs ur vägbanorna enligt

tidigare instruktion i tre kärl: ett till VTI på, ett till SP för kapillär höjd på ca 700 liter och ytterligare ett till SP på ca 300 liter för resterande provningar. Proverna transporterades i låga vida kärl med stenull i botten för att minimera nedkrossning och ihoppackning under transporten.

3.2 Provneddelning

3.2.1 Neddelning på SP

När proverna kom in fick de först delas ned med hjälp av fraktionsskyffling enligt SS-EN 932-2 [7]. Detta går till på följande sätt: Provet hålls ut och formas till en konformad hög med en skyffel. Högen delas mitt över med två korsande snitt med skyffeln så att fyra lika fjärdedelar erhålls. Två motstående delar tas bort och två återstår. Dessa två fjärdedelar, som då motsvarar halva den ursprungliga mängden, blandas ihop med skyffeln och proceduren börjar om från början till dess att man fått en lagom mängd prov. Provet blandas genom att man håller varje skyffel mitt på konens topp så att provet rasar ut jämnt nedför konens hela sidoyta.

När provet nått hanterlig volym delades det ner i en roterande provneddelare (Gilson) enligt en metod som återfinns i samma standard, SS-EN 932-2 [7]. Provet hålls på ett skakbord och faller ner över en roterande platta med åtta tårtsbitsformade kärl om ca 3 liter vardera. På så sätt får man åtta delprov. Proceduren kan göras om tills önskad provvolym erhålls. För små provvolymmer kan neddelningen fortsätta i en likadan roterande provneddelare som ger delprov på upp till 100 ml.

För samtliga tre askor gjordes neddelning i flera steg och olika delprov togs ut till olika provningar. Den minsta mängden är i storleksordningen 100 g och är avsedd för analyser av organisk halt. Totalt behövdes det en mängd av ca 160 kg ordentligt neddelad aska av vardera sorten för alla provningarna.



Figur 5. Neddelning av prov vid SP med hjälp av fraktioneringsskyffling

Figure 5. Reducing of samples with fractionized shoveling

3.2.2 Neddelning på VTI

Materialen hälldes ut på plan yta och homogeniserades med skyffel. Neddelning av material skedde med hjälp av s.k. fraktionsskyffling (se 3.2.1), materialet formades till en kon och delades in i fjärdedelar varpå två motstående fjärdedelar togs undan, momentet upprepades en till två gånger. Därefter användes ”stor” laboratorieneddelare tills nära lämplig mängd för respektive delprov/analys framställts. En sista justering gjordes manuellt med skopa. Under hela processen kontrollerades materialet okulärt för att det till synes skulle bli representativa delar.

VTI har utfört neddelning för permeabilitetsprovningen på SGI.

3.3 Provning på SP

SP har utfört följande provningar:

- Kornstorleksfördelning
- Skrymdensitet
- Organisk halt
- Värmekonduktivitet
- Modifierad kompressibilitet
- Kapillär höjd
- Vattenabsorption
- Frostbeständighet

Enheten för Bygg- och mekanik (BMm) har utfört de flesta provningarna. Vid sektionen för byggnadsmaterial, BMm utfördes kornstorleksfördelning, skrymdensitet, kapillär höjd, vattenabsorption (tre olika metoder) och frostbeständighet, samt neddelningen. Sektionen för hållfasthet, BMh, utförde modifierad kompressibilitet. ETf, dvs Energiteknik - byggnadsfysik, utförde värmekonduktivitetmätningarna. Organisk halt mättes på Kemi- och Materialteknik, oorganisk kemi (KMoo).

Prover för permeabilitetsmätning har skickats till SGI för analys.

3.4 Provning på VTI

Provning utförda av Väglaboratorium, VTI:

- Packningsegenskaper
- Tjälfarlighet
- Dynamiska treaxialförsök
- Kornstorleksfördelning

3.4.1 Utvärdering och sammanställning

Utvärdering av resultaten och sammanställningen av denna rapport har gjorts gemensamt av SP och VTI, med SP som huvudförfattare av rapporten.

4 Resultatredovisning

Askornas egenskaper kan delas in i ett antal grupper. Här sorteras egenskaperna in under följande rubriker

- Grundläggande karaktärisering
- Fuktrelaterade egenskaper
- Mekaniska egenskaper

4.1 Grundläggande karaktärisering

Vissa parametrar måste man känna till värdena på för att vara bekant med sitt material och för att de är nödvändiga att ha kunskap om inför andra provningar. Hit hör exempelvis kornstorleksfördelning, skrymdensitet, organisk halt samt askornas allmänna innehåll och utseende.

4.1.1 Visuellt bedömning av askorna och kornstorleksfördelning

Askornas utseende är mycket olika. Torvpulveraskan är mycket mörk till färgen, nästan svart och ganska finkornig. Den dammar en del och är svårare att väta än de andra askorna.

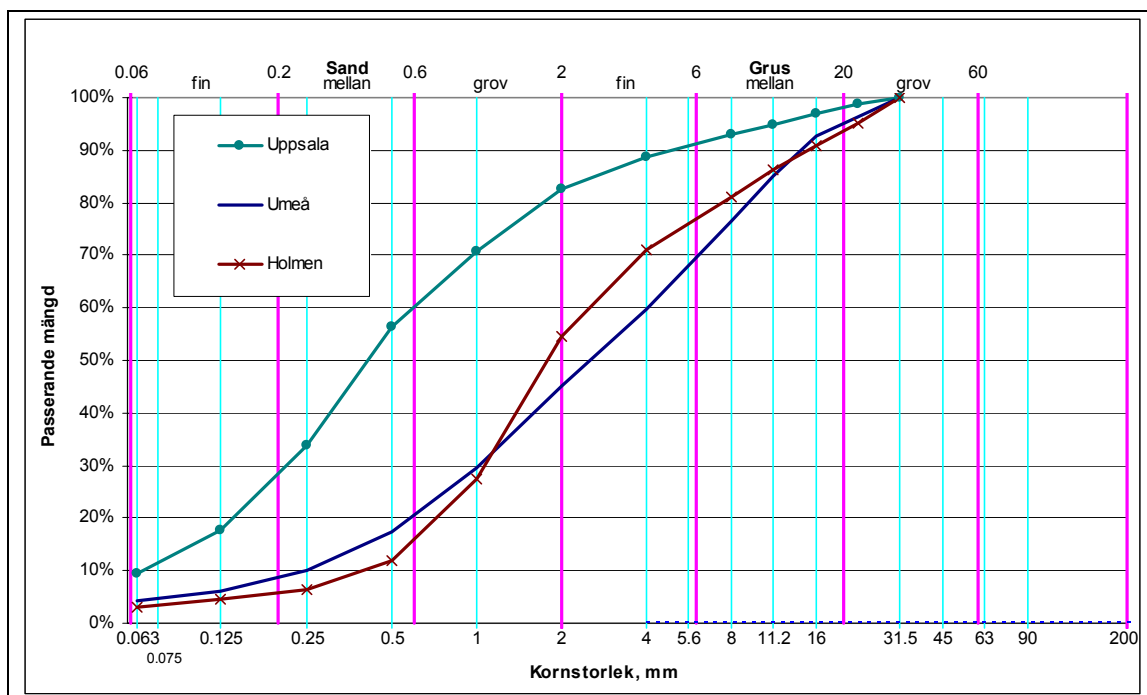
Processaskan är också finkornig men innehåller en del större klumpar som lätt faller isär vid tryck med handen. Den är ljus (grå-vitaktig) till färgen.

Slaggruset skiljer sig tydligt från de andra askorna genom sin höga halt av skrot. Ingen plockanalys har gjorts för att kvantifiera detta, men vid provning av organisk halt plockades 16 g metallskrot ut ur 176 g prov, vilket närmar sig 10 %.

I vanliga fall siktar man ballast enligt en standardmetod, EN 933-1 för att fastställa kornstorleksfördelningen. Varje siktning innebär dock en viss nötning av materialet och fler fina partiklar bildas under provningens gång. De bottenaskor som ingår i projektet har lägre nötningsbeständighet än naturliga material. För att få relevanta resultat för kornstorleksfördelningen måste mer skonsamma metoder användas. Tidigare erfarenhet finns från projektet Provningsmetoder anpassade för återvinningsmaterial - Kornstorleksfördelning, vilka tillämpas här [2]. När det gäller siktningen för att få fram kornstorleksfördelning är det en balansgång mellan kravet på god rensiktning och kravet på att minimera nedbrytning under själva siktningen.

Efter statistisk analys av detta fall beslutades att analysprovet skall delas upp i två analysprov, samt att sikttiden skall vara 2 minuter och att maximal kvarstannande mängd får vara högst 1/5 av den mängd som anges i standarden för naturliga material. Ytterligare information om detta finns i Bilaga B.

De tre askornas kornstorleksfördelning framgår av Figur 6 nedan.



Figur 6. Kornstorleksfördelning för torvpulveraska (Uppsala), processaska (Holmen) och slaggrus (Umeå).

Figure 6. Grain size distribution for peat ash (Uppsala), process ash (Holmen) and MSWI-ash (Umeå)

En materialklassificering av askorna ger att torvpulveraskan klassificeras som motsvarande sand. Processaskan är då motsvarande grusig sand och slaggruset, som är något grövre än processaskan, motsvarar sandigt grus.

Av diagrammen i Bilaga B framgår att SP och VTI fått något olika resultat på kornstorleksfördelningen. Detta beror på ett något olika praktiskt utförande av siktningen. Båda instituten har dock följt de i Bilaga B angivna kraven på skonsam siktning. SP utförde bl a handsiktning för maskvidden 8 mm och uppåt, och utförde siktning för de andra maskvidderna med en Pascalsikt. Detta medförde att SP har ett ”knä” på kurvan vid övergången mellan handsiktning och maskinsiktning samt att SPs kurva hamnar under VTIs kurva på de maskvidder där SP utfört handsiktning.

4.1.2 Skrymdensitet (lös torr)

Den lösa, torra skrymdensiteten är massan per kubikmeter av materialet då man håller materialet försiktigt i ett, relativt kornstorleken, stort kärl utan ytterligare packning. Denna är intressant både ur konstruktions- och transportsynpunkt. Skrymdensiteten beror på flera olika parametrar. Låg kompaktdensitet, hög porositet, hög grad av ensgraderat material, oregelbunden och kantig kornform är faktorer som minskar skrymdensiteten. Skrymdensiteten innefattar alltså en hel del luft, vilket betyder att den alltid är lägre än korndensiteten och kompaktdensiteten. Torra material har i regel lägre skrymdensitet än våta, eftersom vattnet ersätter luften i materialet. Därför måste fuktkvot alltid anges när skrymdensiteten redovisas.

Tabell 2. Skrymdensitet (lös torr) samt fukthalt (vid leverans till SP) för de tre askorna.

Table 2. Loose bulk density and moisture content (when delivered to SP) for the three ashes

Asktyp	Torvpulveraska	Processaska	Slaggrus
Skrymdensitet (lös torr), kg/m ³	940	690	1180
Fukthalt, vikts- %	9	9	7

Resultatet visar att den lösa, torra skrymdensiteten är mycket olika för de tre olika materialen. Slaggruset är tyngst och väger nästan dubbelt så mycket som det lättaste materialet, trots att det innehåller en del skrotbitar som bidrar till att materialet bitvis är dåligt packat. Processaskan är den lättaste askan.

Fuktkvoten visar att alla tre materialen innehöll nästan lika mycket fukt vid leverans till SP. Skrymdensiteten i fuktigt tillstånd, dvs det tillstånd som man troligtvis har i fält vid användning, är alltså knappt 10 % högre än den torra skrymdensiteten angiven i Tabell 2 ovan, se Bilaga C.

Detta är ett tydligt exempel på att askor är sinsemellan mycket olika och att en noggrann karakterisering av askorna är nödvändig för alla användningsområden.

4.1.2.1 Partikeldensitet

I samband med att vattenabsorptionen analyseras så tas även partikeldensiteten fram, dvs den densitet som partiklarna har inklusive hålrum inuti partikeln.

Partikeldensiteterna framgår av Tabell 23 i Bilaga E.

4.1.3 Organisk halt

Analys av organisk halt gjordes med två olika metoder, dels med SS-EN 13137, dels med glödförlust. Resultatet framgår av Tabell 3 som även visar kvoten mellan resultaten från de två analyserna. Se även Bilaga D.

Tabell 3. Organisk halt med två olika metoder och kvoten mellan dessa resultat.

Table 3. Organic content measured with two different methods and the ratio between these results

EN 13137	TC	TIC	TOC
Torvpulveraska	6,24	0,37	5,87
Processaska	1,54	1,10	0,44
Slaggrus	0,94	0,38	0,56
Glödförlust	105°C-550°C	105°C-850°C	105°C-975°C
Torvpulveraska	8,36	10,0	10,1
Processaska	1,96	5,95	6,00
Slaggrus	2,54	3,01	2,82
Kvoter mellan glödförlust och EN13137	105°C-550°C	105°C-850°C	105°C-975°C
Torvpulveraska	1,34	1,60	1,62
Processaska	1,27	3,86	3,90
Slaggrus	2,70	3,20	3,00

Av Tabell 3 framgår att torvpulveraskan har högst organisk halt, varav det mesta är organiskt (TOC). Processaskan har lägre halt av organiskt material och i detta fall är det mesta ickeorganiskt kol (TIC). Slaggruset har den lägsta organiska halten och värdet är beräknad på den fraktion som återstår då metallbitarna plockats bort (knapp 10 % metallbitar) vilket innebär att den organiska halten är något överskattad i denna analys.

Angående glödförlusten så visar den genomgående högre värden än metoden EN13137. En jämförelse mellan TC och glödförlusten för 975°C visar att glödförlusten är en faktor 1,5 till 4 högre än TC.

4.2 Fuktrelaterade parametrar

4.2.1 Vattenabsorption

Vattenabsorptionen har provats på tre sätt på fraktionen 4-31,5 mm och resultatet framgår av Tabell 4 nedan. I Bilaga E finns bl a information om bakgrunden till varför dessa metoder valts, samt hur provningen har gått till och grafer över vattenabsorptionen. Se också Figur 7.



Figur 7. En av de använda testmetoderna för vattenabsorption var långtidsprovning med pyknometrar

Figure 7. One of the test methods used was longtime testing with pycnometers.

Tabell 4. Vattenabsorption analyserat på tre olika sätt samt den analyserade fraktionens massandel i askan.

Table 4. Water absorption analyzed in three different ways, and the share of the analyzed fraction of the ash.

Vattenabsorption i vikts-%	Pyknometer 300 dygn	Semipermeabla påsar 300 dygn	Pyknometrar under vakuum	Mass-andel av askan i fraktionen 4-31,5 mm, %
Torvpulveraska	21	18	19	11
Processaska	20	20	21	30
Slaggrus	10	11	9,4	40

4.2.2 Kapillär höjd

För vägbyggnad är det väsentligt att veta hur vatten förflyttar sig uppåt och nedåt i väggkroppen. Två provningar handlar om detta, en för den uppåtgående rörelsen och en för den nedåtgående.

Kapillär höjd (EN 1097-10) går till så att man sätter ett rör packat med provmaterialet i torrt skick så att nedre änden står i vatten, se Figur 8. Sedan mäter man hur högt vattnet stiger ovanför den fria vattenytan.



Figur 8. Kolonner för provning av kapillär höjd

Figure 8. Columns for testing of capillar height

Den andra metoden, kapillär höjd vid dränering (EN 1097-10, modifierad), går ut på att fylla röret med vatten och låta det rinna ut. Vattenytan inuti röret kommer då att sjunka nedåt. Eftersom materialet i viss grad håller kvar vattnet kommer vattennivån i röret att stanna en bit ovanför den fria vattenytan. Detaljerad information om hur provningen har genomförts finns i Bilaga F.

Materialet ovanför vattenytan är dock inte torrt. Förutom de kapillära krafterna suger askan åt sig fukt från den omgivande luften, som ju är vattenmättad eller så gott som vattenmättad i försöken. Det betyder att fukthalten planar ut vid en viss höjd. Denna fukthalt kallas hygroskopisk fuktupptagning. Den kapillära höjden för både stigning och dränering är den höjd där kurvan över fuktkvoten skär den hygroskopiska fuktupptagningen.

Tabell 5. Kapillär höjd vid stigning och dränering

Table 5. Capillary height when rising and draining

Kapillär höjd (mm)	Stigning, EN 1097-10	Dränering, EN 1097-10 modifierad
Torvpulveraska	300	350
Processaska	>800	>800
Slaggrus	75	275

Dessa resultat visar att processaskan har en kapillär uppsugningsförmåga som överstiger rörets höjd. Det går alltså inte att säga hur högt stigningen kan fortsätta. Detta är ett extremt högt resultat. Holmens processaska har förmåga att suga upp till nästan dubbla sin vikt, vilket ger en fuktkvot på 90 % längst ner i röret. Sedan sjunker detta till runt

35-40 % längre upp i röret. Ned till den hygroskopiska fuktupptagningen på 17 % når dock inte fuktkvoten någon gång under rörets längd.

Torvpulveraskan hade ganska lika resultat för stigning och dränering. Slaggruset hade större skillnad på stigning och dränering, där kapillär höjd vid dränering var drygt tre gånger så hög som kapillär höjd vid stigning.

4.2.3 Värmekonduktivitet

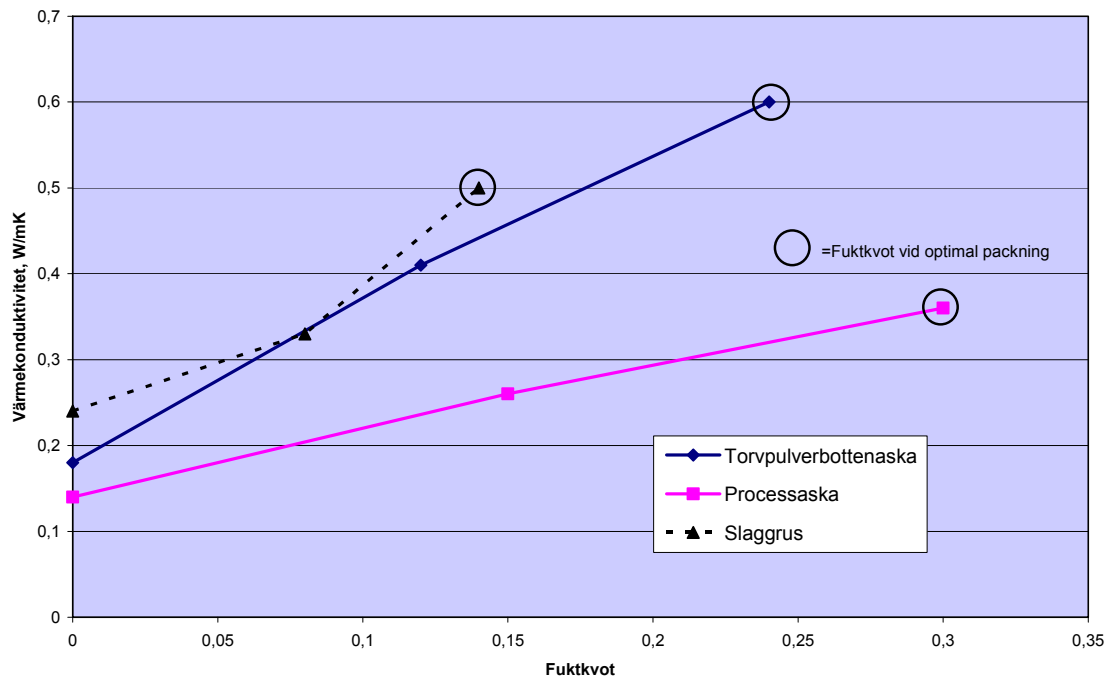
Resultaten för de olika askorna redovisas i Tabell 6 nedan. Se även Bilaga I.

Tabell 6. Uppmätt värmekonduktivitet för de tre askorna vid tre olika fuktkvoter, samt kraven i ATB-VÄG.

Table 6. Heat conductivity for the three ashes at three different moisture contents, and the requirements in ATB-VÄG

Prov nr	Värmekonduktivitet torrt prov, W/(m*K)	Värmekonduktivitet fuktigt prov, W/(m*K) / fuktkvot kg/kg		Krav ATB- Väg 0-0,25 m under vägytan	Krav ATB- Väg 0,25- 0,5 m under vägytan
Torvpulv eraska	0,18	0,41/0,12	0,60/0,24	>0,6	>0,3
Process- aska	0,14	0,26/0,15	0,36/0,30	>0,6	>0,3
Slaggrus	0,24	0,33/0,08	0,50/0,14	>0,6	>0,3

Ovanstående resultat i diagramform visas i Figur 9.



Figur 9. Diagram över de tre askornas värmekonduktivitet vid tre olika fukttillstånd.

Figure 9. Figure of the heat conductivity of the three different ashes for three different contents of moisture.

Provningsen av värmekonduktivitet visar att askornas värmekonduktivitet är i det närmaste linjär i det provade fukthaltsintervallet.

4.2.4 Frostbeständighet

Askornas frys-tö-motstånd kontrollerades med metod prEN13055-1, Bilaga C (frostbeständighetsprovning avsedd för lättklinker, 20 cykler). Frostbeständigheten provades på askor som har fått suga vatten på vanligt sätt (1 dygn) samt med den accelererade vakuummetoden som beskrivs i [17]. Provningsen går till så att provet fryses och tinas 20 gånger, och sedan mätes hur mycket av provet som frusit sönder. Se Figur 10 som är från frostprovningen.



Figur 10. Bilden visar askorna i frostprovningen. Trippelprov utfördes på askorna.

Figure 10. The picture shows the ashes in the frost resistance testing. Triple tests was used.

Resultaten visar att askornas frys-tö-motstånd är relativt lågt, dvs det är höga värden på resultaten. Torvbottenaska från Uppsala uppvisar exempelvis, för vakuummetoden ett resultat på 12,5 % i genomsnitt, vilket alltså betyder att 12,5 % av provet fryst sönder i så små bitar att det passerar en 4 mm sikt (provningen gjordes på sorteringen 8/16 mm). Med traditionell metod är resultatet ännu sämre, 18,5 %. Vakuum-metoden gav genomgående bättre värden på frostbeständigheten än den metoden prEN13055-1, Bilaga C.

Tabell 7. Resultatet av frys-tö-test för de tre askorna med två olika metoder.

Table 7. Result from freeze-thawing test for the three ashes with two different methods

Asktyp	prEN13055-1, Bilaga C	Vakuummetoden
Torbottenaska Uppsala	18,5	12,5
Processaska Holmen	10,1	5,3
Slaggrus Umeå	6,8	6,6

Av ovanstående tabell kan konstateras att dels att resultaten blir olika mellan askorna, samt att även resultatet skiljer för samma aska då de två olika metoderna har jämförts (i två fall av tre). Av Bilaga G framgår också att spridningen mellan trippelproven var stor, men att spridningen mellan de olika typerna av askorna var större.

4.2.5 Permeabilitet

Analys av permeabilitet gjordes enligt metod Nordtest Technical report 254 (rörpermeameter) samt skrymdensitet bestämdes enligt SS 027114. Analysen har utförts av SGI. Resultatet framgår av Tabell 8 nedan. Se även Bilaga J

Tabell 8 Permeabilitet

Table 8. Permeability

	Torvpulveraska, Uppsala	Processaska, Holmen	Slaggrus, Umeå
Prov 1			
Permeabilitet m/s	$7,1 \cdot 10^{-8}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Skrymdensitet	1,92	1,43	1,95
Prov 2			
Permeabilitet m/s	$4,2 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Skrymdensitet t/m³	1,95	1,38	1,86
Medelv. Permeab. m/s	$5,7 \cdot 10^{-8}$	$9,3 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$

4.2.6 Tjällyftning

Föreliggande bottenaskor har frystestat i enlighet med Vägverkets metodbeskrivning VVMB 301:2001 [38] för bestämning av tjällyftningshastighet. Frystestet avbryts efter tre dygn och lyftningshastigheten bestäms som medelvärdet under sista dygnet. För mer information om hur provningen gått till, se Bilaga H.

Bestämning av tjällyftningshastighet har utförts för Uppsala och Holmens bottenaska. För bottenaskan ifrån Umeå har inte tjällyftningshastigheten bestämts på grundval av askans kornstorleksfördelning och permeabilitet samt att tidigare arbeten (VV Publ 2001:34) har visat att slaggrus med jämförbara tekniska egenskaper inte är tjällyftande.

Bottenaskan från Uppsala lyfte 0,07 mm/h i snitt det sista av tre dygns tjälförsök, se Tabell 9. Vattenkvoten var ca 28 %, vilket var något över optimal, 24 %.

Packningsgraden blev ca 84 %. Tjällyftningshastighet 0,07 mm/h under testets sista dygn innebär att bottenaskan ifrån Uppsala är jämförbar med de mindre tjälfarliga i klassen av mest tjälfarliga jordarter.

Holmens bottenaska med lägre finjordshalt ($m_{tr1} < 0,063$ mm) kontrollerades först med optimal vattenkvot och frystestet visade en obetydlig lyftning. Därefter blöttes provet och resultatet för det sista dygnet visade en tjällyftning om 0,05 mm/h. En tjällyftningshastighet om 0,05 mm/h är jämförbart med lyfthastigheten hos vissa material i den mest tjälfarliga klassen enligt Vägverkets klassificering.

Tabell 9. Resultat av tjällyftningsegenskaper för torvpulveraska och processaska

Table 9. Result of frost heave tests for the peat ash and the process ash

	Torvpulveraska Uppsala	Processaska Holmen "torr"	Processaska Holmen "våt"
Finkornhalt (mtrl < 0,063 mm)	9,4 %	3,0 %	3,0 %
Packningsgrad	84,3 %	83,3 %	83,3 %
Vattenkvot	28,4 %	28,4 %	40,4 %
Tjällyftning sista dygnet	0,07 mm/h	Obetydligt	0,05 mm/h

4.3 Mekaniska egenskaper

4.3.1 Packningsegenskaper

Packningsegenskaper har utförts enligt SS-EN 13286-2:2004 "Provningsmetod för laboratoriemässig bestämning av referensdensitet och vatteninnehåll -Proctorinstampning", se även Bilaga K. Packningsarbetet har gjorts enligt (standard) Proctor med packningscylinde "B" med en volym på ca 2,1 dm³. Referensdensitet och optimal vattenkvot för de tre materialen finns i Tabell 10 nedan.

Tabell 10 Packningsegenskaper för de tre askorna

Table 10. Packing characteristics of the three ashes

Material	Optimal vattenkvot	Referensdensitet	Anmärkning
Slaggrus Umeå	15 %	1,69 Mg/m ³	Medelvärde för de två högsta densiteterna utan vattenseparation
Processaska Holmen	28 %	1,12 Mg/m ³	
Torvpulveraska Uppsala	24 %	1,46 Mg/m ³	

Kontroll av nedkrossningen har gjorts genom siktning enligt Bilaga B på ett slumpmässigt utvalt prov före och efter Proctorinstampning. "Före Proctor" gjordes med Gilsontsiktning ned t.o.m. 1 mm, kurvan mindre än 1 mm är beräknad från kornkurva innan provning. "Efter Proctor" gjordes med Gilsontsiktning ned t.o.m. 1 mm och material mindre än 1 mm tvättsiktades vid 0,063 mm och Pascalsiktades. Resultaten redovisas i Figur 41 till Figur 43 i Bilaga K.

Kornkurva före och efter proctorförsök skiljer sig maximalt för; Umeå: 6 % vid 2 mm, Holmen: 17 % vid 0,5 mm och Uppsala 6 % vid 0,5 mm (se Bilaga K).

4.3.2 Dynamiska treaxialförsök

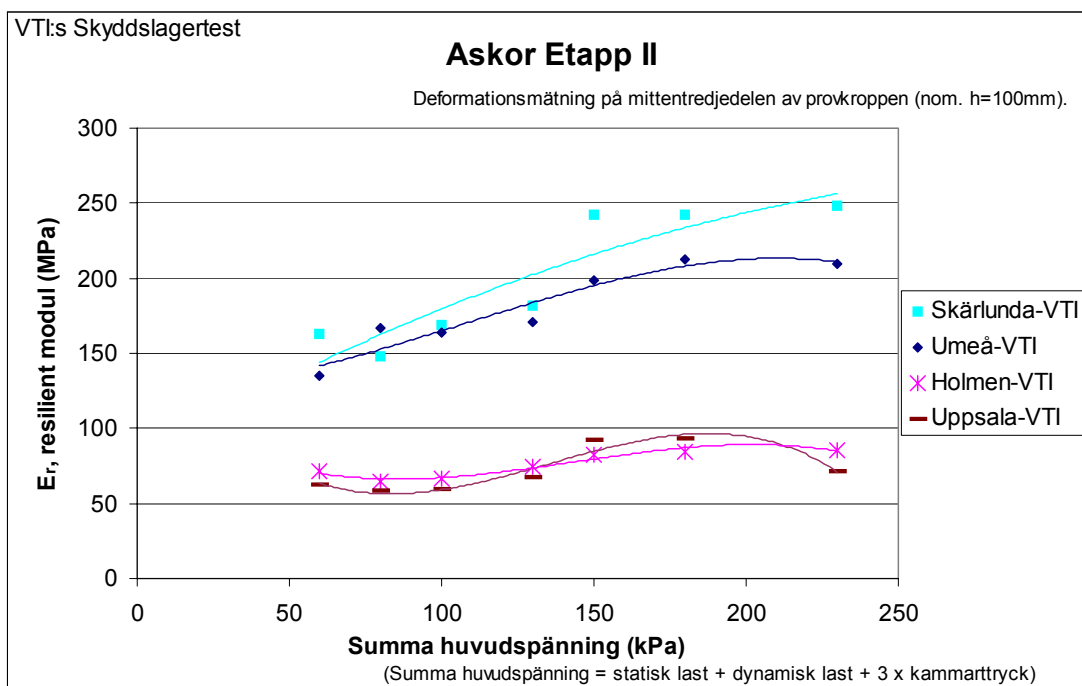
Dynamiska treaxialförsök är en provningsmetod för att bestämma resilienta och permanenta egenskaper för obundna material, under förhållanden som efterliknar de tillstånd vilka råder under trafikbelastning i en väganläggning. Provningsmetoden bestämmer

ett materials mekaniska egenskaper vilket kan användas till att prestationsranka material och att beräkna strukturell respons i en vägöverbyggnad. I testet används cylindriska provkroppar av obundna material färdigställda genom laboratoriepackning, med en största kornstorlek mindre än en femtedel av provkroppens diameter (EN 13286-7 och Bilaga L).

Treaxialprovningen har i föreliggande projekt dels syftat till att bestämma resilienta och permanenta egenskaper för rådande bottenaskor, och dels till att jämföra provningsresultat ifrån treaxialförsök utfört enligt VTI-metoden samt metoden EN 13286-7 (Bilaga L). Som referens redovisas i diagrammen ett material "Skärlunda" vilket är ett krossat berg. Materialet Skärlunda är proportionerat, med avseende på kornstorleksfördelning, att ligga mitt i bärlagerzonen enligt VÄG 94 (Allmän teknisk beskrivning för vägkonstruktioner. 1994. Vägverket, Borlänge).

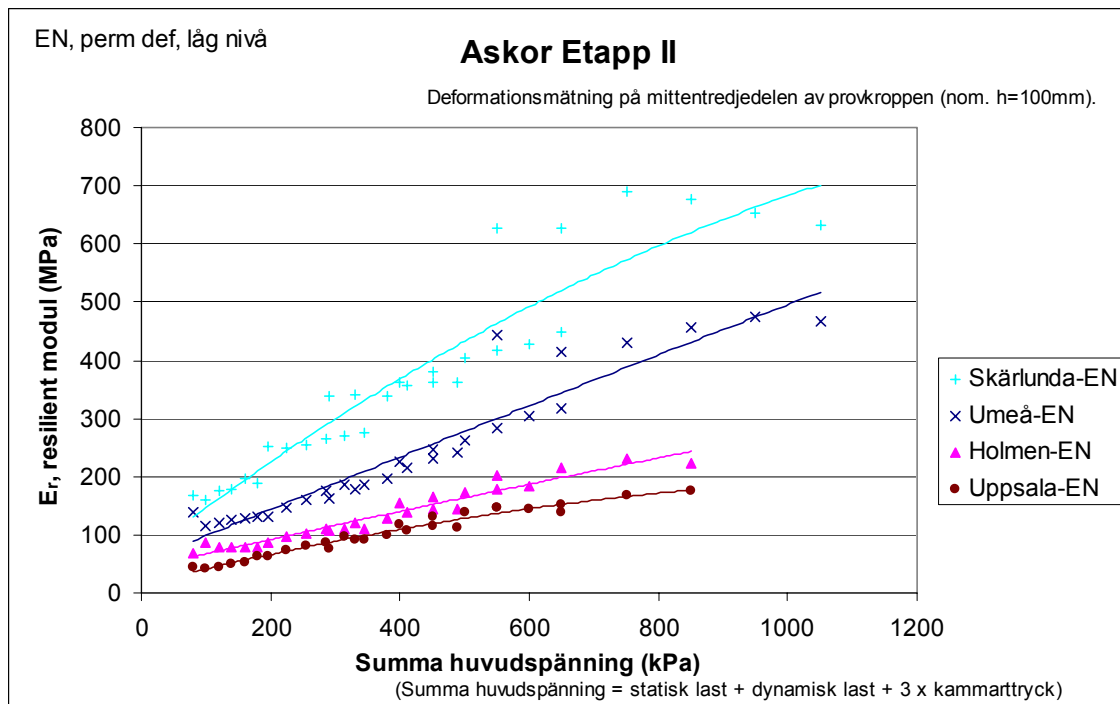
4.3.2.1 Resilient modul

Styvheten, eller förmågan att fördela lasten, anges som ett värde – E-modul (E_r – resilient modul). Ju högre E-modul desto styvare är materialet. Resilientmodulen beräknas som den dynamiska lasten dividerat med den elastiska (resilienta) töjningen (dynamisk vertikalspänning (kPa)/elastisk töjning ($\mu\text{m}/\text{mm}$)) och anges i föreliggande dokument i MPa. Figur 11 och Figur 12 nedan redogör för resultat ifrån dynamisk treaxialförsök med avseende på resilient modul, se även Bilaga L.



Figur 11. Resilient modul som funktion av summa huvudspänning från VTI:s skyddslagertest.

Figure 11. Resilient modulus as a function of total stress for VTI:s Capping layer test.

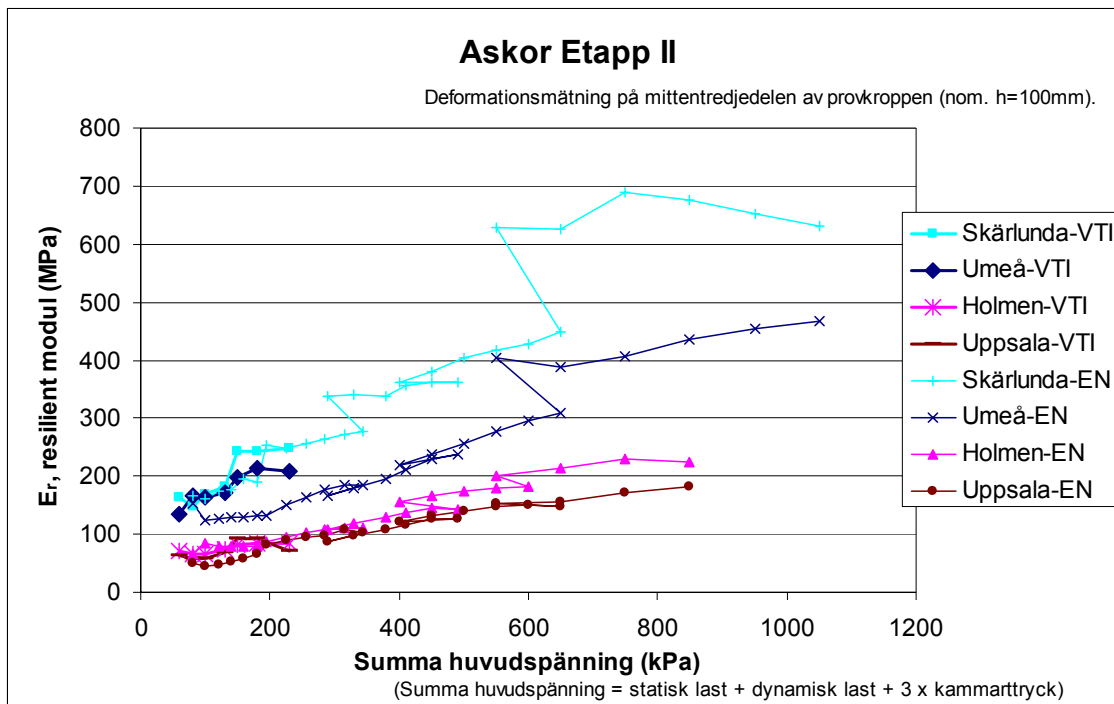


Figur 12. Resilient modul som funktion av summa huvudspänning från Europans test för permanent deformation, låg nivå.

Figure 12. Resilient modulus as a function of total stress for the European Standard (EN 13286-7). Test for permanent deformation – low stress level.

4.3.2.2 Jämförelse mellan VTI-metod och Europannorm för resilient modul

För den här delen av projektet så har föreliggande bottenaskor samt referensmaterial Skärlunda provats dels enligt VTI:s skyddslagertest (jmf Bilaga L) och dels enligt Europannorm EN 13286-7 permanent deformationstest för låg nivå. I Figur 13 redovisas resultaten enligt alla lastfall (jmf Bilaga L) för föreliggande material och belastningsfall.



Figur 13. Resilient modul för både VTI-metod och Europanormen.

Figure 13. Resilient modulus according to VTI-method and European standard.

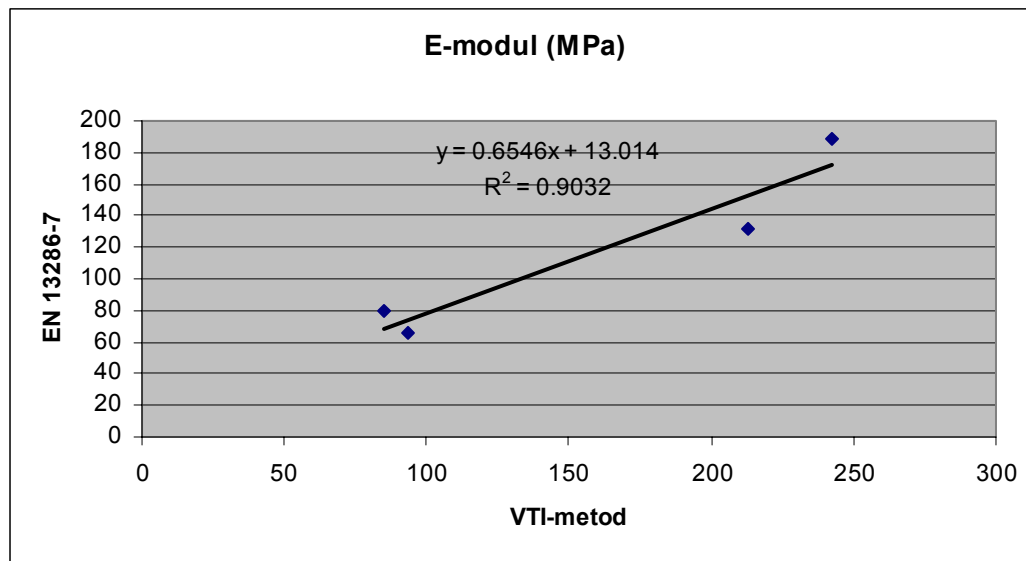
I Tabell 11 och Figur 14 studeras sambandet mellan resultaten av VTI:s skyddslagertest och Europanormens test för permanent deformation, låg nivå.

Tabell 11. Samband mellan VTI-metod och Europanorm för lastfallet: kammartryck 20 kPa, max deviatorspänning 120 kPa (summa huvudspänning 180 kPa).

Table 11. Relation between VTI-method and European Standard for the loading case: confining pressure 20 kPa and maximum deviator stress 120 kPa (total stress 180 kPa)

	Holmen	Uppsala	Umeå	Skärlunda	Antal pulser
EN E-modul MPa	80	66	132	189	50 100
VTI E-modul MPa	85	93	213	243	204 000
EN / VTI	0,94	0,71	0,62	0,78	
Ack perm. töjning EN – VTI	3,2-4,2	8,0-6,1	4,5-3,8	2,0-4,2	

Medel av kvoterna (EN/VTI) för askorna blir 0,76 vilket är att jämföra med 0,78 för referensmaterialet.

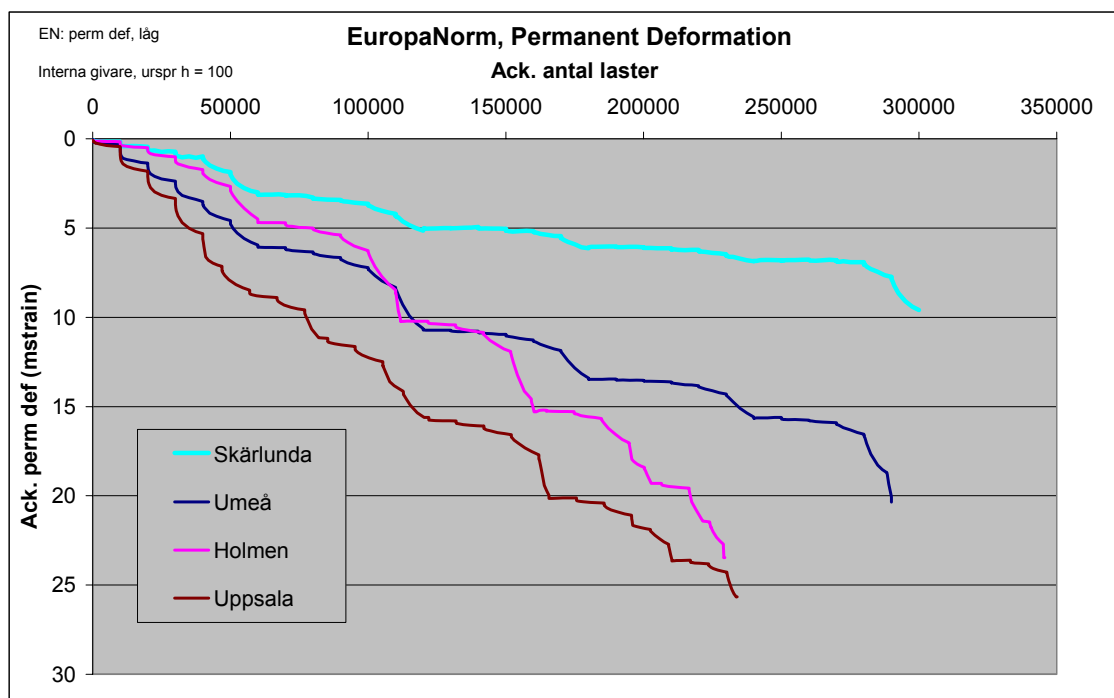


Figur 14. Samband mellan VTI-metod och Europainorm för lastfallet: kammartryck 20 kPa, max deviatorspänning 120 kPa (summa huvudspänning 180 kPa).

Figure 14. Relation between VTI-method and European Standard for the loading case: confining pressure 20 kPa and maximum deviator stress 120 kPa (total stress 180 kPa)

4.3.2.3 Permanenta deformationer

Stabiliteten, eller förmågan att motstå omlagringar, anges som den ackumulerade permanenta töjningen. Ju mindre den permanenta töjningen är desto stabilare är materialet. Permanent töjning redovisas som relativ deformation ($mstrain = \text{kvarvarande deformation } (\mu m) / \text{ursprunglig höjd (mm)}$). Figur 15 nedan redogör för resultat ifrån dynamisk treaxialförsök med avseende på permanent deformation, se även Bilaga L.



Figur 15. Ackumulerad permanent töjning som funktion av ackumulerat antal pulser

Figure 15. Accumulated permanent strain as a function of accumulated number of loadings.

4.3.2.4 Packning av provkroppar

Resultat av packningen av provkroppar redovisas i Tabell 12, jmf Bilaga L. Referensmaterialet från Skärlunda är inpackat med en packningsgrad = 97 % relativt modifierad Proctor och en vattenkvot relativt optimal på 60 %.

Tabell 12. Medelvärde för packningsgrader och vattenkvoter för treaxialtest.

Table 12. Mean value for compaction degree and water content for triaxial test samples

Materialccc	Referens- densitet	Uppnådd packningsgr.	Vattenkvoter		
			Optimal	Rel. före	Rel. efter
	Mg/m ³	%	%	%	%
Umeå	1,69	99	15	98	93
Holmen	1,12	87	28	101	99
Uppsala	1,46	95	24	100	98

4.3.2.5 Kontroll av nedbrytning under dynamiska treaxialförsök

Kontroll av nedkrossningen har gjorts genom siktning enligt kapitel 4.1.1 och Bilaga L på ett utvalt prov före och efter treaxialförsök. Kornkurva före och efter treaxialförsök skiljer sig maximalt för slaggrus från Umeå med 4 % vid 0,5 mm, processaska från Holmen med 14 % vid 1 mm och torvpulveraska från Uppsala med 6 % vid 0,5 mm.

4.3.3 Modifierad kompressibilitet

Test av modifierad kompressibilitet utfördes med SP-metod 2670. Metoden ger ett mått på E-modulen och kompressibiliteten för askorna. Proven utfördes på de tre askorna i

två olika tillstånd, dels torrt prov, dels vid optimal vattenkvot som bestämdes vid packningsförsöken (se Bilaga M).

4.3.3.1 Kompressibilitet

Kompressibiliteten definieras som den procentuella deformationen vid en viss belastning. Denna framgår av Tabell 13 nedan och i Bilaga M i form av Figur 55 (för optimal vattenkvot) och Figur 56 (för torrt tillstånd) i Bilaga M.

Tabell 13. Kompressibiliteten definieras som deformationen vid en viss belastning.

Table 13. Compressibility is defined as the deformation at a certain load

	Torvpulveraska	Processaska	Slaggrus
Optimal vattenkvot			
Deformation, %	10	10	10
Belastning, MPa	0,63	0,46	1,46
Torrt tillstånd			
Deformation, %	3	3	10
Belastning, MPa	1,2	1,8	1,30

Askorna var betydligt lättare att komprimera vid optimal vattenkvot, jämfört med att komprimera askorna vid torrt tillstånd. Vid optimal vattenkvot hade torvpulveraskan och processaskan ganska lika kurvor, medan slaggruset var lite svårare att komprimera.

Vid torrt tillstånd är lutningen betydligt kraftigare för alla tre kurvorna, dvs det krävs en större kraft för att få till en önskad deformation jämfört med fallet med optimal vattenkvot. I det torra fallet så var torvpulveraskan och slaggruset ganska lika medan processaskan skilde ut sig, i och med att den var betydligt lättare att komprimera, och i detta fall kunde 10 % komprimering uppnås.

4.3.3.2 E-modul

E-modulen är den kraft per ytenhet som krävs för att komprimera provet. Denna varierar stort med belastningen. I Figur 57 och Figur 58 i Bilaga M beräknas E-modulen i varje punkt under försöket.

E-modulen för askorna vid optimal vattenkvot uppvisade ungefär samma tendens med ett stort värde i början som sedan sjunker och därefter ökar långsamt.

E-modulen vid torrt tillstånd visar ett annat mönster än vid optimal vattenkvot. Inledningen av kurvorna ser ganska lika ut men därefter så sjunker inte E-modulen så långt ner utan stabiliserar sig på ett betydligt högre värde då belastningen ökar.

4.3.3.3 Prov av "collapsible soil"

Efter diskussion på ett referensgruppsmöte så genomfördes prov av "collapsible soil"-egenskaper, dvs kontroll huruvida askan skulle kollapsa då den blev mycket blöt och samtidigt komprimerades. Askkan som var mest intressant att studera var processaskan. Resultatet blev att askkan i torrt tillstånd komprimerades 10 mm då ett tryck på 0,31 kN lades på. Därefter komprimerades askkan endast 2 mm till (upp till 12 mm) då vatten

tillsattes i överflöd. Askan har alltså inga tendenser till “collapsible soil”. En figur över förloppet, Figur 59, återfinns i Bilaga M.

4.3.3.4 Provningsförfarenheter

Provningsförfarenheterna visade att det var svårt att uppnå en deformation på 10 %, vilket stipuleras i metoden (som ursprungligen utvecklades för lättklinker). Detta uppnåddes bara för en av askorna, processaskan. Det har ingen större betydelse eftersom krafterna som används i testet vida överstiger den belastning som är relevant i en vägkropp på det djup som kan vara aktuellt för askan.

5 Resultatanalys

5.1 Grundläggande karaktärisering

5.1.1 Visuell bedömning av askorna och klassificering av askorna med avseende på kornstorleksfördelning

Torvpulveraskan är mörk till färgen och ganska finkornig, vilket medför att den klassificeras som sand enligt jordartsklassificeringssystemet.

Processaskan är ljus till färgen och har grövre korn än torvpulveraskan. Processaskan klassas som grusig sand.

Slaggruset klassificeras också som grusig sand. Slaggruset innehöll en del metallskrot. Mängden är inte kvantifierad, men ett stickprov om ca 160 g innehöll ca 10 % metallskrot. Det bör dock framhållas att detta stickprov (gjort i samband med provuttag för organisk halt) är alldeles för litet för att någon kvantifiering av andelen metallskrot skall kunna göras. Intrycket vid visuell bedömning är att skrothalten är mindre än så. Dock finns det en del metallskrot kvar, vilket försvårar analyser och provning av materialet. Skrotet kan även försvåra arbetet då slaggruset skall användas.

5.1.2 Skrymdensitet (lös torr)

Askornas lösa torra skrymdensitet är mellan 700 och 1200 kg/m³. Det innebär att askorna är relativt sett lättare än traditionella material. Exempelvis har referensmaterialet i projektet Alternativa material till vägunderbyggnad [2] en skrymdensitet på 2000 kg/m³. Detta referensmaterial klassades som ett sandigt grus.

Detta är en av fördelarna med askor jämfört med traditionella material. Vid vissa konstruktioner kan man dra fördel av att konstruktionsmaterialet är lätt.

Skrymdensiteten är alltid lägre än korndensiteten, eftersom volymen som vägs innehåller en del luft emellan kornen. Man bör dock observera att material som är mycket lättare än vatten, som t ex processaskan, (670 kg/m³) riskerar att ha en korndensitet som också är lägre än vattnets densitet. Det innebär att kornen flyter och kan ställa till problem vid utläggning av materialet. Särskild hänsyn bör tas dels när det regnar och dels vid arbete vid och under grundvattenytan. Om man lägger ut så lätta askor på rätt sätt finns det dock stora fördelar att vinna i och med att underliggande lager kan minskas i omfattning.

5.1.3 Organisk halt

5.1.3.1 Resultat jämfört med normen i ATB-väg

I ATB VÄG 2003 [20] finns ett krav på att obundet material till överbyggnadslager högst får innehålla 2 vikts- % organiskt material på en provfraktion <2 mm mätt med kolorimetermetoden, eftersom organiskt material mellan ballastpartiklarna kan sänka friktionen mellan dessa och därmed minska hållfastheten på överbyggnadslaget.

I askorna, där det organiska materialet är helt integrerat i kornen, kan man inte på motsvarande sätt mäta den organiska halten genom att sikta ut en finfraktion. En hel del organiskt material finns i de grövre partiklarna och det organiska materialet har en helt annan karaktär än det organiska materialet i naturballast.

Kolorimetermetoden är jämförbar med den ena metoden som använts i föreliggande projekt, EN 13137. Detta skulle innebära att Umeås slaggrus och Holmen Papers processaska skulle klara kraven på 2 %. Torvpulveraskan från Vattenfall har halter som överskrider normen med en faktor 3. Glödförlustmetoden ger i detta sammanhang inte relevanta värden.

5.1.3.2 Provningsmetodens och kravets relevans

En traditionell ballast har bara en liten andel av kornen som är mindre än 2 mm. Det betyder att om 2 % av denna fraktion får vara organiskt kol så är den totala andelen organiskt kol mycket liten. Alla större partiklar är fria från organiskt kol.

För askor gäller inte detta alls. En aska kan ha oförbränt organiskt kol i vilken storleksfraktion som helst. Även relativt väl utbrända askor innehåller betydligt mer oförbränt kol än något bergmaterial. Kravet i ATB-Väg kan alltså inte i detta sammanhang anses vara särskilt relevant, och det gäller dessutom för överbyggnadslager, vilket är en tillämpning som kanske inte i första hand är lämplig för askor, slaggrus till förstärkningslager undantaget. Dessutom föreligger kolet i olika former och fungerar olika i traditionell ballast och i askor. Stora mängder oförbränt material inuti större partiklar har ingenting att göra med den ”glidmedelseffekt” som åstadkoms av ett tunt lager organiskt material på en gruspartikel.

Detta hindrar inte att denna friktionsminskning kan uppstå även när det gäller askor. Det kan dessutom vara så att höga organiska halter kan ställa till andra bekymmer, såsom minskad beständighet mot mikrobiell nedbrytning, lägre hållfasthet, ökat vattenupptag etc. Det kan dock slås fast att effekterna av organiskt material i en aska är betydligt mer komplicerade än effekterna av små mängder organiskt material på ytan av gruskorn. För att förutsäga effekten av det organiska materialet behövs en betydligt noggrannare genomgång. Man kan med olika metoder fastslå vilken typ av organiskt material som finns och hur det föreligger i materialet (t ex inuti partiklarna, på ytan, som egna helt igenom organiska partiklar). Den befärade påverkan på t ex vattenabsorption, stabilitet etc får mätas med metoder avsedda för mätning av just detta, eftersom den organiska halten inte på ett tillräckligt säkert sätt förutsäger dessa egenskaper.

Av de provningsmetoder som använts kan man säga att kolorimetermetoden är avpassad för helt andra förhållanden och saknar relevans för askor. Glödförlusten har den dubbla olägenheten att dels vara väldigt odefinierad (det finns en uppsjö metoder med olika temperaturer som allihopa ger olika resultat) och dels innehålla betydande felkällor för alla material som innehåller andra oxiderbara ämnen än kol, vilket är fallet för många askor. Den bästa metoden förefaller vara TOC.

Mer forskning behövs som visar sambandet mellan hur olika egenskaper påverkas för en och samma aska då andelen organiskt material varierar.

5.2 Fuktrelaterade parametrar

5.2.1 Vattenabsorption

Vattenabsorptionen i den provade fraktionen låg på ungefär 10 % för slaggruset och 20 % för de två andra askorna, för alla tre provningsmetoder. Överensstämmelsen mellan långtidsprovningen i pyknometrarna och långtidsprovningen i de semipermeabla påsarna visade på en mycket god överensstämmelse för alla tre askorna. De två långtidsmetoderna jämfört med vakuum-metoden visade också en god överensstämmelse - endast någon procentenhet skilde mellan långtidstesterna och vakuum-metoden.

Eftersom långtidsprovningen med pyknometrarna upplevdes av provande personal som betydligt lättare och smidigare att utföra – och resultatet är lika – så är metoden med pyknometrar att föredra framför metoden med de semipermeabla påsarna. Om snabba resultat eftersträvas fungerar vakuum-metoden bra. Man går dock miste om kurvans form (vattenabsorptionens utveckling över tid) om vakuum-metoden används, utan får bara dess högstanivå.

Tidigare resultat i andra projekt kan till viss del bekräftas i denna studie. Nordtestprojektet om vattenabsorption [17] visade att en kolbottenaska och en krossad krossad betong behövde ca tre månaders vattenabsorption för att uppnå mättnad. Detta överensstämmer med föreliggande projekt där alla tre askornas vattenabsorption nästan har planat ut vid 100 dygn. Överensstämmelse mellan långtidsabsorption och den accelererade vakuum-metoden var god i Nordtestprojektet om vattenabsorption [17]. Lika god överensstämmelse kunde påvisas i föreliggande projekt.

Angående vattenabsorptionens nivå jämfört med tidigare studier så kan bedömningen göras att askorna i detta projekt hade en vattenabsorption i ungefär samma nivå som då andra liknande askor studerats. I projektet om alternativa material till vägunderbyggnad [2] och Nordtestprojektet om vattenabsorption [17], hade en kolbottenaska vattenabsorptionen 15 vikts-% vatten (efter 200 dygn) i den förstnämnda studien och en annan kolbottenaska 35 vikts-% enligt den andra studien. Resultatet i detta projekt visar på vattenabsorptioner på ca 20 % för två av askorna och ca 10 % för slaggruset, dvs samma storleksordning som i tidigare studier.

Som framgår av Tabell 4 så har vattenabsorptionen analyserats på fraktionen 4-31,5 mm som utgör mellan 11-40 % av den totala mängden för de olika askorna. Om analysen gjorts för hela fraktionen hade vattenabsorptionen blivit större eftersom vatten då i större utsträckning sugits upp på partiklarnas ytor.

Sammanfattningsvis om vattenabsorption:

- För alla tre askorna var det mycket god överensstämmelse mellan långtidstesterna (i pyknometrar och semipermeabla påsar) och vakuummetoden
- Resultatet var ca 10 % för slaggruset och ca 20 % för de andra två askorna
- För att plana ut men inte uppnå mättnad, så krävs cirka 3 månaders vattenabsorption
- Resultaten i detta projekt stämmer bra med tidigare projekt

5.2.2 Kapillär höjd

Den kapillära höjden vid stigning och dränering varierade från 75 mm till över 800 enligt Tabell 5 i kapitel 4.

Den kapillära höjden är hos traditionella material relativt låg. Vanlig tvättad makadam har en kapillär höjd på 100-200 mm. Man kan specialbehandla material så att det fungerar extra bra som kapillärbrytande skikt. McDrain, en makadam, har normalt en kapillär höjd på mellan 30 och 70 mm, och specialbehandlad lättklinker ligger runt 50-60 mm [47].

Vid husbyggnad lägger man ibland t ex lättklinker under plattor, och då dimensionerar man så att lager som skall verka kapillärbrytande, dvs inte föra vatten uppåt i konstruktionen, håller en tjocklek på åtminstone två gånger den kapillära höjden.

Den kapillära höjden för torvaskan (både stigning 300 mm och dränering 350 mm) och slaggruset (dränering 275 mm) är alltså något högre än för traditionell makadam (100-200 mm) och betydligt högre än för de material som designats för att vara kapillärbrytande. Dock är den kapillära stigningen för slaggruset jämförelsevis låg, 75 mm, vilket är i klass med kapillärbrytande material.

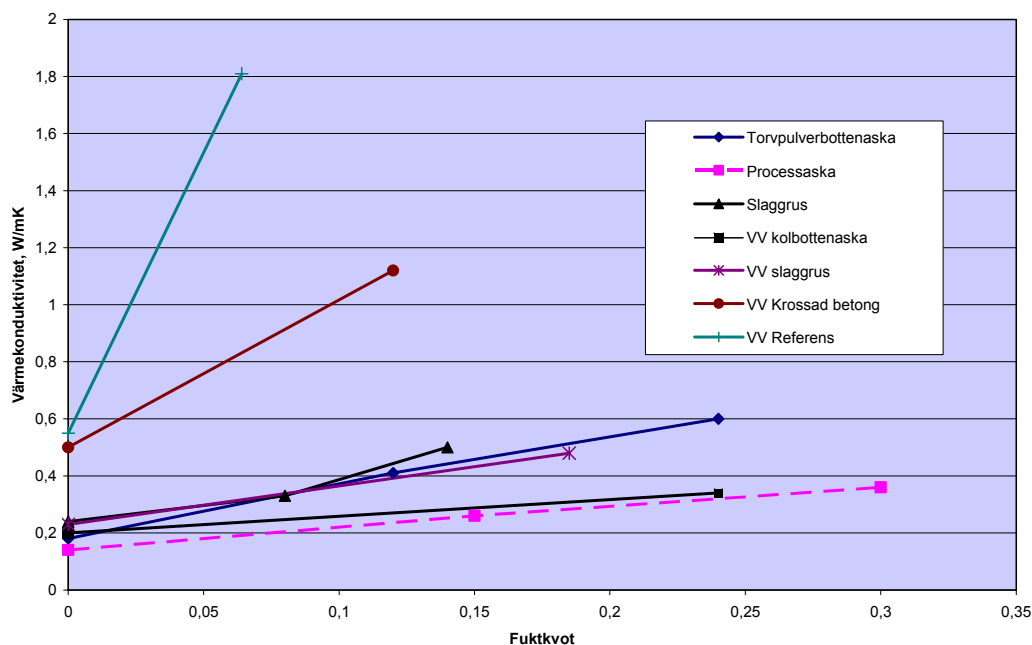
Slaggruset har betydligt högre värden på dräneringshöjd jämfört med stigning, 275 resp 75 mm. Detta är inte ovanligt och har att göra med att ytegenskaperna kan ändras före och efter vätning. Det är alltid lättare att hålla kvar vatten än att få det att stiga uppåt. Det omvända, att dräneringshöjden skulle understiga stighöjden, inträffar aldrig.

Eftersom en del alternativa material är porösare och kan förväntas suga upp mer vatten mäter man kapillär höjd för dessa material med ett extra högt rör, hela 850 mm. Inte ens denna höjd är tillräcklig för kapillär höjd vid stigning och dränering för processaskan från Holmen. Denna aska uppvisar alltså extremt hög kapillär höjd. >800 innebär att hela rörets längd använts, men på g a metoden för fuktmätningen (man tar ut 5 cm skivor av provet och mäter fukten) så kan man inte ange värden över 800 mm trots att röret är 5 cm till.

I praktiken innebär detta att om den nedersta delen av ett lager med processaska sätts i kontakt så transporteras fukten från underliggande lager och upp genom processaskan till en höjd av minst 80 cm, troligen mer. Detta innebär att man också kan räkna med att processaskan är konstant fuktig i många fall och också effektivt suger upp vatten vid regn.

5.2.3 Värmekonduktivitet

Analysen av värmekonduktivitet visar att alla tre askorna har högre isolerande förmåga än traditionella material. En jämförelse med tidigare analyser i projektet om alternativa material till vägunderbyggnad [2] framgår av Figur 16 nedan.



Figur 16. Värmekonduktiviteter för de tre askorna jämfört med några andra material i projektet Alternativa material till vägunderbyggnad [2].

Figure 16. Heat conductivity for the three ashes compared to some other materials in the project "Alternative materials for roadconstruction" [2].

Av figuren framgår att alla de alternativa materialen har en betydligt högre isoleringsförmåga än traditionella material. Dessutom är resultatet av mätningarna för kolbottenaskan och slaggruset från projekt alternativa material till vägunderbyggnad [2] helt i linje med resultaten i föreliggande projekt. Alla mätningarna visar att sambandet mellan fukttinhåll och värmekonduktivitet är i det närmaste linjärt, förutsatt att packningen är oförändrad. Både lutningen och startvärdet vid torrt prov är väsentliga för fältegenskaperna.

Det positiva med hög isoleringsförmåga (om vissa mekaniska egenskaper och fukrelaterade parameterar undantas) är att man kan använda tunnare lager av askor som tjälskydd och ändå få samma isolerande effekt. Med tanke på askornas relativt låga densitet kan man alltså sänka vikten på en vägkonstruktion avsevärt, inte bara i det isolerande lagret utan också i underliggande lager.

Värmekonduktiviteten är en av de få egenskaper som har ett väldefinierat krav. (oberoende av materialets ursprung). I ATB Väg [20] står att om materialet skall ligga närmare ytsiktet än 0,5 m så måste värmekonduktiviteten vara $>0,6 \text{ W/mK}$ för 0-0,25 m

från vägytan samt $>0,3 \text{ W/mK}$ för 0,25-0,50 m från vägytan (Dessa krav framgår av Tabell 6 i kapitel 4). Syftet med detta krav är att undvika material högt upp i en vägkonstruktion med hög isolerande förmåga, vilket kan leda till oväntade effekter med avseende på frosthalka.

Detta innebär att samtliga askor är för isolerande för att godkännas i torrt tillstånd. Våta askor kan dock läggas 0,25-0,5 meter under vägytan för båda testade fuktkvoterna utom för Holmens processaska som bara klarar sig vid den högre fuktkvoten. Det återstår då att visa hur processen där fukten lämnar askan ser ut, eftersom det inte är känt hur mycket vatten som kvarhålls i askan vid olika förhållanden och hur fort vatteninnehållet förändras.

Det är alltså viktigt att veta vilken värmekonduktivitet som önskas till olika applikationer. Sedan får man använda materialet där det passar bäst, dvs där de positiva egenskaperna kommer till sin rätt och de negativa minimeras.

5.2.4 Frostbeständighet

Att askorna visade olika resultat var ett väntat resultat eftersom de är tre helt olika typer av askor.

Att det var stor skillnad mellan den accelererade vakuum-metoden och den traditionella var heller inte oväntat, men det var oväntat att frostbeständigheten var sämre då askorna bara fått suga vatten 1 dygn, jämfört med vakuummets forcerade uppsugning. Alla askorna som absorberat vatten under kort tid visade sämre frostbeständighet än då de utsatts för vakuum-metoden, dock var skillnaden mellan metoderna för slaggruset försumbar.

Det förväntade resultatet vore att den aska som utsatts för vakuum skulle ha sämst frostbeständighet eftersom den har betydligt större grad av vattenfyllda porer (vilket konstaterades i avsnittet om vattenabsorption) än den aska som bara fått suga vatten i 1 dygn. Varför resultatet blev det omvända är svårt att uttala sig om med de ganska lilla underlag som provning av tre askor utgör. En säker slutsats är i alla fall att metoden ger olika resultat beroende på hur proven har konditionerats. Vidare provning på fler askor kan ge mer kunskaper.

Det var stora skillnader i resultat för varje asktyp inom varje metod (framgår av Bilaga G). Detta innebär att dubbel- eller trippelprov rekommenderas. Ju mer inhomogen askan är desto fler delprov behövs för att ge säkra svar.

5.2.4.1 Provresultatet i sitt sammanhang

Svenskt bergmaterial till vägar anses vara frostbeständig och testas därför sällan. Det finns därför inte heller något krav i ATB Väg på frostbeständighet. Ett referensmaterial av traditionell typ i projektet om alternativa material till vägunderbyggnad hade t ex ett resultat på 0,1 %. Andra material, t ex krossad betong och lättklinker har sämre frostbeständighet än det nämnda referensmaterialet (krossad betong 8,2 %, fast inte fullt vattenmättat [2]). Dock anses båda dessa material vara frostbeständiga i realiteten och

varken ATB Väg Lättklinker [34] eller ATB Väg för krossad betong [35] ställer krav på frostprovning.

5.2.5 Permeabilitet

Permeabiliteten talar om hur väl genomsläppligt materialet är. Bygg- och anläggningsmaterial bör inte vara för tätt, eftersom vatten som kommit in i konstruktionen på ett eller annat sätt då riskerar att bli kvar i konstruktionen och påverka denna negativt. Nedan analyseras resultaten från permeabilitetsprovningen. Som jämförelse finns permeabiliteterna hos ett antal andra material angivna i Bilaga J.

Observera att den skrymdensiteten som anges i Tabell 8 visar att materialet är ganska väl packat, eftersom den är ca en faktor två högre än lös torr skrymdensitet (se Tabell 2).

Ju mer man packar materialet (högre skrymdensitet) desto lägre blir permeabiliteten.

Torvpulveraskan var det tätaste av de tre studerade askorna, med ett medelvärde på $5,6 \cdot 10^{-8}$ m/s, vilket ungefär motsvarar permeabiliteten hos en siltig morän [1]. Med denna hastighet tar det ca 7 månader att tillryggälägga sträckan 1 meter.

Processaskan var inte lika tät som torvpulveraskan. Permeabiliteten var i snitt $0,9 \cdot 10^{-5}$ m/s, vilket ungefär motsvarar permeabiliteten hos en grusig morän [1]. Det tar cirka 1 dag för vattnet att transporteras 1 meter med denna hastighet i askan. Värdet kan jämföras med det uppmätta värdet för kolbottenaska i projektet Provningsmetoder för alternativa material till vägunderbyggnad [2] som angav $2 \cdot 10^{-5}$ - $4 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Slaggruset är den aska som är minst tät av de tre askorna och har ett medelvärde på $1,2 \cdot 10^{-5}$ m/s, vilket är ungefär samma som för processaskan, dvs motsvarar permeabiliteten hos en grusig morän [1]. Även här tar det ca 1 dag för vattnet att transporteras i ett 1 m tjockt lager av askan. Jämfört med projektet Provningsmetoder för alternativa material till vägunderbyggnad [2] så uppvisar detta slaggrus en något högre permeabilitet. Permeabiliteten hos slaggruset i nämnda projekt uppmättes till $9 \cdot 10^{-7}$ - $2 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Slutsatsen av permeabilitetsprovningen är att torvpulveraskan är ganska tät ($5 \cdot 10^{-8}$ m/s) och de andra två askorna betydligt mindre täta (ca $1 \cdot 10^{-5}$ m/s), vid den skrymdensitet som askorna provats vid. Korrelationen till andra studier är hög.

5.2.6 Tjällyftning

Tjällyftning behöver endast undersökas för tjälfarliga material. Ofta kan denna bedömas med ledning av kornstorleksfördelningen. Finkorniga, s k siltiga material (majoriteten av materialet ligger i siltfraktionen som ligger mellan 2 och 60 μm), är oftast tjälfarliga. Om finjordshalten, dvs andelen material $<0,063$ mm överstiger vissa procenttal (se ATB-väg kap A, 1.1.2) delas materialet in i olika tjälfarlighetsklasser. Även om finjordshalten är hög kan materialet vara ej tjällyftande om materialet är välgraderat, dvs tillräckligt många grova korn.

Utiifrån en första bedömning av materials kornstorleksfördelning rådde viss tveksamhet om materialen var tjällyftande. Därför gjordes först bedömningen att provning av tjällyftning inte var nödvändigt. I ljuset av kompletterande resultat ifrån bottenaskornas permeabilitet och vattenabsorption gjordes en ny bedömning och två av askorna, processaskan från Holmen och torvpulveraskan från Uppsala testades för tjällyftning.

Torvpulveraskan från Uppsala har frystestats i enlighet med Vägverkets metodbeskrivning för bestämning av tjällyftningshastighet. Provresultat visar att bottenaska ifrån Uppsala lyfte ungefär 6 mm under testets tre dygn (jmf Bilaga H). Tidigare har en stor mängd material tillhörande olika tjälfarlighetsklasser, enligt Vägverkets klassificering, testats vid VTI. Material tillhörande den högsta tjälfarlighetsklassen har då visat lyftningshastigheter ungefärligen i intervallet 0,04 – 0,25 mm/h. Det nu aktuella materialet lyfte 0,07 mm/h under testets sista dygn vilket innebär att det är jämförbart med de mindre tjälfarliga i klassen av mest tjälfarliga jordarter. Materialen i den högsta tjälfarlighetsklassen har testats ostörda med den vattenkvot de hade i fält medan material från Uppsala testats vid vattenkvot 28 %. Det är mycket sannolikt att materialet kan hålla en väsentligt högre vattenkvot i fält beroende på var i vägkroppen det används, beläggningens och slänternas permeabilitet, dränering mm. Med en högre vattenkvot följer i allmänhet också högre tjällyftning vilket belyses nedan för processaskan från Holmen som testats vid två olika vattenkvoter.

Material från Holmen testades först vid vattenkvot 28 % och lyfte då obetydligt (jmf Bilaga H). Utan ompackning dränktes sedan provet i vatten under 1 dygn och fick därefter stå upprätt och dränera under 3 dygn. Provets vattenkvot hade då ökat till 40 %. Förfarandet kan tänkas efterlikna att materialet används i en väl-dränerad vägkonstruktion men utsätts för mycket vatten till exempel genom sprickor i beläggningen. Det följande frystestet gav en väsentlig lyftning, tre mm totalt under tre dygn och 0,05 mm/h i genomsnitt under det sista dygnet (jmf Bilaga H). Även detta är jämförbart med lyfthastigheten hos vissa material av de mindre tjälfarliga i den mest tjälfarliga klassen enligt Vägverkets klassificering.

Det är svårt att göra en riktigt rättvis jämförelse med de naturliga material i tjälfarligaste klassen som testats förut. De naturliga materialen har som sagt testats ostörda med den vattenkvot som de hade vid provtagningstillfället. De mest tjälfarliga naturliga materialen som till exempel siltar håller i naturen höga vattenkvoter även i mycket väl dränerade miljöer. Dessutom antyder preliminära tester av Å Hermansson [39] att det krävs extremt höga grundvattennivåer för att väsentligt öka en silts lyfthastighet. Man kan alltså med visst fog påstå att testerna av naturliga material gjorts vid representativa vattenkvoter. Vad som är representativt för askorna från Uppsala och från Holmen är svårare att säga. Material från Holmen dränktes och ställdes sedan att dränera under 3 dygn. För naturliga material är detta tillräcklig tid för att dränera och nå en gradient som är nära ett fortvarighetstillstånd.

En rimlig slutsats är alltså att torvpulveraskan från Uppsala och processaskan från Holmen kan ge betydande tjällyftning i en vägkropp och att material från Uppsala är mer tjälkänsligt än materialet från Holmen.

5.3 Mekaniska egenskaper

5.3.1 Packningsegenskaper

Slaggrus ifrån Umeå har tidigare provats på VTI (se Värmeforsksprojekt Q4-224, avsnitt 1.3), och packades då enligt modifierad Proctor med följande resultat; referensdensitet 1,83 Mg/m³ och optimal vattenkvot 13,5 %. Motsvarande resultat för standard Proctor (föreliggande projekt) är; Referensdensitet 1,69 Mg/m³ och 15 % optimal vattenkvot. Kontroll av nedkrossning visar att kornkurva före och efter standard Proctor skiljer sig maximalt 6 % vid 2 mm och för modifierad Proctor 19 % vid 4 mm. Resultaten indikerar en marginell höjning av packningsgrad, men en markerad nedkrossning av materialet då modifierad Proctor används. Ovanstående jämförelse är begränsad i omfång men också med hänsyn till slaggrusets inneboende variation, men det undantar inte rekommendationen att beakta packningsarbetet under byggtiden för att undvika en ”större” nedkrossning av materialet. Stor nedkrossning ger för hög referensdensitet som kan leda till problem med att uppnå önskade packningsgrader i andra analyser och i fält.

5.3.2 Dynamiska treaxialförsök

De dynamiska treaxialförsöken har genomförts med dubbelprov, detta för att beskriva möjlig spridning av provningsresultat relaterad till material och provningsmetod. För tester utförda enligt europanorm varierade provningsresultat för främst bottenaskor Umeå och Uppsala. En kontroll av spridningen för redovisade medelvärden har gjorts enligt formeln: $\pm (\text{maxvärde} - \text{minvärde}) / (2 \times \text{medelvärde})$ för varje ”mät punkt”.

Tabell 14. Kontroll av spridning för treaxialförsök

Table 14. Spreadings for the result of triaxial tests

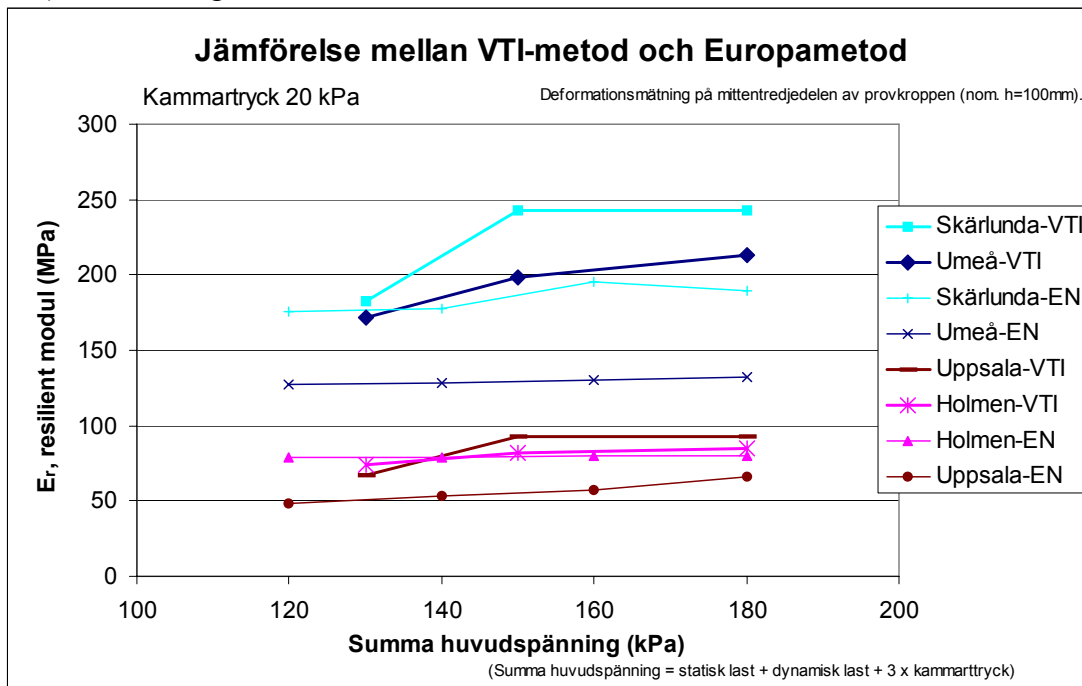
	Permanent deformation		Resilient modul	
	VTI	EN	VTI	EN
Umeå	± 29 %	± 58 % (±14%)	± 5,5 %	± 10 % (±3,6%)
Holmen	± 23 %	± 17 %	± 13 %	± 8,8 %
Uppsala	± 14 %	± 32 % (±5,1%)	± 3,7 %	± 14 % (±10%)

Inom parentes är extremprovet struket från max- eller minvärde, men med i medelvärdet.

”Extremvärdena” i EN-testet för Umeå och Uppsala är inte strukna från resultatredovisningen i kapitel 4 och Bilaga L då det är osäkert om det beror av spridning i materialets sammansättning, att neddelning genererat ett prov som inte är representativt eller bara fel relaterad till mätmetoden.

Att direkt jämföra resultat för VTI-metod och Europannormen är svårt då de belastar proverna olika på olika nivåer med i regel olika antal pulser. Plottar man resilient modul som funktion av summa huvudspänning (kan beräknas som: max deviatorspänning + 3 x kammartrycket) stämmer metoderna hyggligt överens utom för slaggruset från Umeå, se Figur 13 i avsnitt 4.3.2.

Figur 12 utgör den del av Figur 8 där belastningsnivåerna går omlott, kammartryck 20 kPa och maximal deviatorspänning 60-120 kPa (summa huvudspänning 120-180 kPa). Se även Figur 45.



Figur 17. Resilient modul för både VTI-test och Europametoden. Spänningsnivåer är valda där metoderna går omlott. Kammartryck 20 kPa och maximal deviatorspänning 60-120 kPa (summa huvudspänning 120-180 kPa).

Figure 17. Resilient modulus as a function of total stress. Both VTI-test and European Standard. Stress levels: confining pressure 20 kPa and maximum deviator stress 60-120 kPa (total stress 120-180 kPa).

När lastfallen stämmer bra överens finns ett bra samband mellan VTI- och Europametod. I Tabell 15 och Figur 18 studeras sambandet mellan resultaten från VTI:s skyddslagertest och Europametoden för permanent deformation, låg nivå, där kammartryck (20 kPa) och max deviatorspänning (120 kPa) är lika. De ackumulerat permanenta töjningarna är relativt små (och lika) trots olika antal lastpulser vid bestämmandet av resilient modul.

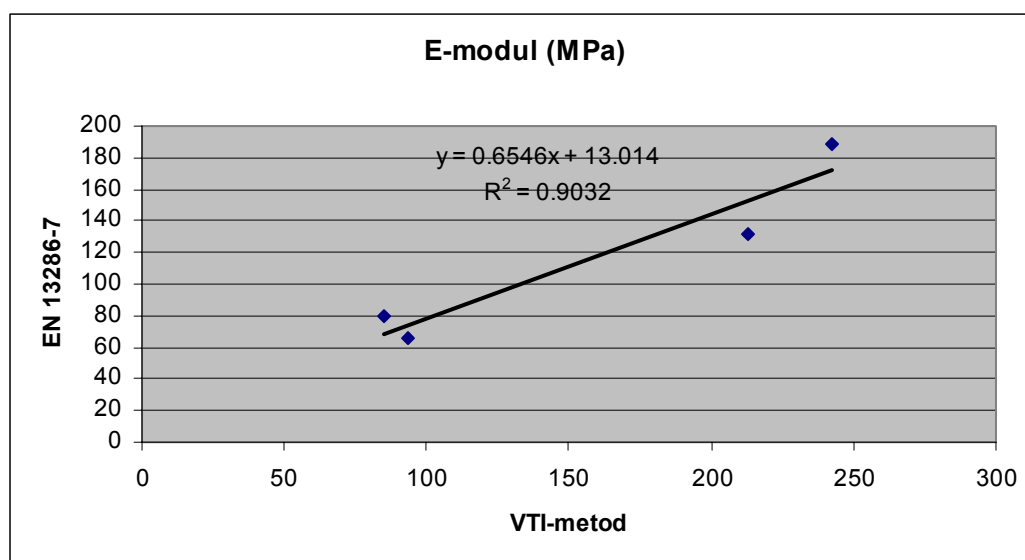
Tabell 15 Samband mellan VTI-metod och Europametod för lastfallet: kammartryck 20 kPa, max deviatorspänning 120 kPa (summa huvudspänning 180 kPa).

Table 15. Relation between VTI-method and European Standard for the loading case: confining pressure 20 kPa and maximum deviator stress 120 kPa (total stress 180 kPa)

	Holmen	Uppsala	Umeå	Skärlunda	Antal pulser
EN E-modul MPa	80	66	132	189	50 100
VTI E-modul MPa	85	93	213	243	204 000

EN / VTI	0,94	0,71	0,62	0,78	
Ack perm. töjning EN – VTI (mstrain)	3,2-4,2	8,0-6,1	4,5-3,8	2,0-4,2	

Medel av kvoterna (EN/VTI) för askorna blir 0,76 att jämföra med 0,78 för referensmaterialet.



Figur 18. Samband mellan VTI-metod och Europannorm för lastfallet: kammartryck 20 kPa, max deviatorspänning 120 kPa (summa huvudspänning 180 kPa).

Figure 18. Relation between VTI-method and European Standard for the loading case: confining pressure 20 kPa and maximum deviator stress 120 kPa (total stress 180 kPa).

Jämförelse mellan VTI-test och Europannorm är ännu svårare att göra för permanenta töjningar än för resilient modul. Belastningshistorien påverkar de permanenta töjningarna väldigt mycket och det finns ingen likvärdig nivå i början av testerna.

Att packa proverna från Umeå var inga problem vilket uppnådda packningsgrader visar (Bilaga L). Däremot hade Umeå-proverna lite problem att hålla vatten, viss vattenseparation vid packning och ytterligare vatten dränerades ut ur proverna under dynamisk treaxialförsök. Särskilt ett av de tre proverna som provades enligt EN-metoden, som också upplevdes som grövre än normalt, tappade 14 % av den relativa vattenkvoten under försöket. Det provet sänker också medelvärde för EN-test från ca 95 % till 92 %.

Packning av proverna från Holmen var svårare att utföra än jämfört med bottenaskor ifrån Uppsala och Umeå. Packningsgraden för bottenaska Holmen nådde upp till 87-88 %. Denna ”lägre” packningsgrad kan bero av att optimal vattenkvot ligger långt ifrån vattenseparation, vilket i så fall innebär att materialet var relativt torrt under provning (se Bilaga K). Det kan också vara så att packningsförfarandet inte är optimalt för material med så låg densitet i jämförelse med ”naturligt” berg och grus. Att de håller vatten bra är troligen även relaterad till att marginalen till vattenmättnad är stor (jmf vattenabsorption).

Uppsala-proverna var lite svåra att packa än jämfört med Umeå men rimliga packningsgrader uppnåddes. En anledningen till att torvpulverbottenaskan var ”svårare” att packa kan bero av samma anledning som för Holmen om materialens låga densitet.

Kontroll av nedkrossningen har gjorts genom siktning (Bilaga L). Nedbrytningen kan ha skett vid två olika stadier, dels vid packningen av provkroppen och dels vid det dynamiska treaxialförsöket. Nedbrytning antas ske främst under packning av provkroppar. Detta antagande baseras främst på en jämförelse mellan kornstorleksfördelningskurvor ifrån Packningsegenskaper (Bilaga L) och motsvarande kornkurvor ifrån dynamiska treaxialförsök, väl medvetna om att packningsarbetet skiljer sig åt mellan Proctorinstampning och s.k. Vibrocompresseur.

5.3.3 Modifierad kompressibilitet

Den tydligaste resultatet från provningen av modifierad kompressibilitet var att askorna i torrt tillstånd var betydligt svårare att komprimera och hade högre E-modul. Detta är ett väntat resultat eftersom optimal vattenkvot är just det vatteninnehåll då packningen skall fungera bäst, dvs materialet går att packa och därmed komprimera. Vid torrt tillstånd blir den inre friktionen i materialet så stor att materialet inte kan packas tillfredsställande.

Ett annat viktigt resultat var att resultatet vid torrt tillstånd var mycket olika mellan askorna. Det var bara en aska som utrustningen lyckades komprimera till 10 % vid torrt tillstånd.

Kurvornas form på E-modulen i början av proven är ganska lika. De går snabbt upp till en ganska hög nivå (eller börjar på en hög nivå i fallen med torrt prov). E-modulen är ju kvoten mellan spänningen och deformationen, och eftersom deformationen är mycket låg i början då spänningen byggs upp så blir E-modulen hög. Vid en viss spänning (belastning) så omlagras kornen och viss nedkrossning sker, varför E-modulen sjunker kraftigt pga av att deformationen ökar (materialet upplevs som mer elastiskt). När omlagringen och nedkrossningen har avtagit så ökar E-modulen något vid ökande belastning, vilket är tydligast i fallet med blöt aska. För den torra E-modulen är linjerna nästan horisontella då belastningen ökar.

I ”collapsible soil”-försöket så skedde en viss packning i den första torra fasen av provningen. Därefter medförde vattentillförseln (vattenkvot knappt 40%) att packningen kunde fortgå lite till, innan deformationen upphörde. Detta var ett förväntat resultat med hänsyn till packningskurvans utseende. Processaskan klassas som grusig sand, vilket visade sig i detta försök – innehållet av få porösa partiklar gör att deformationen blir ganska liten, även i fuktigt tillstånd.

6 Slutsatser

Föreliggande projekt har genererat en hel rad resultat på flera nivåer. Dels har provningsmetoderna undersökts och dels har tre material karakteriserats. Utifrån dessa resultat kan man dock dra ytterligare slutsatser som berör askor generellt. Det är vår förhoppning att dessa viktiga slutsatser skall påverka fortsatt forskning inom området i riktning mot ökad effektivitet och relevans.

6.1 Generella slutsatser

6.1.1 *Stor variation*

En viktig slutsats är att aska är ett, ur funktions- och karakteriseringssynpunkt, odefinierat begrepp som innefattar material med vitt skilda egenskaper. Vissa askor är mycket finkorniga och har så låg korndensitet att de t ex flyter i vatten och kan packas hårt. Andra askor består av grova korn med hög densitet, med inslag av t ex skrot. Dessutom finns en betydande variation inom samma askprov, beroende på både variationer i bränslet och i temperatur, syrehalt och andra processparametrar [5]. Det är sedan tidigare känt att askorna dessutom ofta varierar med lagringstiden. Inte minst gäller detta för slaggrus.

En aska beskrivs ofta utifrån bränsle och panntyp, t ex ”rosteldad kolbottenaska”. Det är dock osannolikt att alla askor som går in under samma beteckning verkligen är lika med avseende på tekniska egenskaper. Dessutom saknas kopplingen mellan dessa beteckningar byggda på ursprung och de mekaniska och miljömässiga parametrar som en användare av materialet måste känna till.

6.1.2 *Rättvisande provningsmetoder väsentligt*

För att kunna använda en aska praktiskt krävs en noggrann karakterisering av ett antal väsentliga parametrar. Detta projekt har, liksom ett antal tidigare [2][17][18][19], visat att traditionella provningsmetoder inte alltid kan användas. Behovet av metodutveckling finns fortfarande, särskilt med tanke på hur fukthalten påverkar viktiga parametrar.

6.1.3 *Konsekvenser för andra projekt, inom och utom askprogrammet*

Föreliggande resultat har den begränsande konsekvensen att det är mycket svårt att generalisera andra försök, bl a från Värmeforsks askprogram, till att gälla andra askor än den som ingått i själva försöket. För att kunna dra slutsatser om ett laboratorie- eller fältförsök krävs att man noggrant har definierat vad man har för typ av aska genom att mäta en rad parametrar. Dessutom krävs det kunskap om hur variation i provningsresultaten för dessa parametrar påverkar askans egenskaper i olika sammanhang.

Utan säker koppling mellan egenskaper mätta i laboratorium, funktion mätt i fält och askans ursprung reduceras möjligheterna att bedriva en strukturerad och generaliserbar forskning avsevärt och man riskerar att åstadkomma en rad enstaka försök utan större

nytta för någon annan än den som äger den aktuella askan, förutsatt att denna inte varierar med lagringstid och driftsvariationer.

Det finns alltså ett kvarstående behov av att karakterisera alla askor som ingår i praktiska försök ingående. Utan omfattande kunskap om den aska som ingår i fältförsök så är det svårt att generalisera resultaten från försöken.

6.2 Provningsmetodernas funktion och relevans

Alla de provningsmetoder som användes för att prova askorna bedömdes vara relevanta, dvs de uppfylla ändamålet. Detta betyder dock inte att alla provningar måste utföras i alla lägen, utan provningen kan börja med ett antal inledande provningar som utvärderas innan man eventuellt fortsätter med resterande provningar. Utifrån erfarenheterna från provningen med dessa metoder på bottenaskor så kan följande principiella indelning av provningsmetoderna göras:

- Provningsmetoder vars resultat är lätt att tolka för askorna
- Provningsmetoder vars resultat är svårt att tolka för askorna

Till den första kategorin (lätt att tolka resultatet) hör kornstorleksfördelning, skrymdensitet, värmekonduktivitet, permeabilitet och tjällyftning. När väl utförandet av **kornstorleksfördelningen** anpassades till de speciella krav (skonsam siktning) som askorna hade, så var det inga problem med att få fram relevanta resultat, som var lätta att tolka. Angående **skrymdensitet** så behövde inte metoden anpassas överhuvudtaget. Mätning av **värmekonduktivitet** är i princip oberoende av materialet, varför det inte heller här var några problem med mätningar eller resultattolkning. Provning av **permeabiliteten** gick lätt att utföra och att tolka. Dock är det viktigt att man är observant på vilken packningsgrad (skrymdensitet) som föreligger i provningen eftersom den påverkar permeabiliteten. VTIs metod för att mäta **tjällyftning** fungerade också bra för askorna (som ju är ganska finkorniga) och resultatet var lätt att tolka och jämföra med tidigare tester av olika material.

Till den andra kategorin (svårt att tolka resultatet) hör resten av provningsmetoderna, dvs organisk halt, vattenabsorption, frostbeständighet, kapillär höjd, dynamiskt treaxialtest, modifierad kompressibilitet och packningsegenskaper. Detta beror inte på metoderna i sig, t ex att de skulle vara särskilt komplicerade eller så, utan på att det finns för lite data, framför allt data som jämför lab och fält, för att man skall kunna säga vad ett visst provresultat betyder i praktiken.

Svårigheten att tolka resultatet beror på att den erfarenhetsåterkoppling som finns mellan materialens beteende i fält och provningsresultaten i laboratoriet, är betydligt mindre för askor än för naturliga material. Mer provning av flera askor och mer erfarenhet från deras egenskaper i fält kommer successivt att öka denna koppling, vilket gör att det blir lättare att tolka provningsresultat.

Organisk halt mättes utan svårighet med den standardiserade metoden SS-EN 13137, och den visade som väntat lägre men sannolikt korrekta värden jämfört med

glödförlustmetoden. En svårighet som återstår är dock hur dessa värden (mellan 0,94 och 6,24 % TC) skall tolkas och vad de har för innebörd då askan skall användas.

Vidare forskning bör utreda vad en viss organisk halt har för betydelse för en aska, dvs hur påverkas andra egenskaper då den organiska halten varierar för en viss aska, och vad händer med egenskaperna över tiden, då det organiska materialet eventuellt bryts ned. Ökad kunskap om den organiska haltens betydelse bör också kunna erhållas vid fältförsök där samma aska men med olika organisk halt används.

Vattenabsorptionen undersöktes med tre olika metoder som alla fungerade bra och gav likartat resultat. Överensstämmelsen mellan de två långtidsprovningarna i 300 dygn (pyknometer och semipermeabla påsar) var mycket god. Samma jämförelse mellan långtidsprovningarna och vakuum-metoden visade också god överensstämmelse – endast någon procentenhet skiljde åt ena eller andra hållet. Eftersom pyknometerprovningarna för långtidstest är smidigare att utföra enligt provande personal bör denna metod användas framför de semipermeabla påsarna. Om snabba resultat önskas kan vakuum-metoden användas – dock går man miste om kurvans form vid denna metod, utan man får enbart slutresultatet.

Det är viktigt att komma ihåg att vattenabsorptionen har analyserats på sorteringen 4/31,5 mm, vilken bara utgör en andel av den totala askan (mellan 11-40 %). Den verkliga vattenabsorptionen på de osiktade materialen skiljer sig alltså från vattenabsorptionen enligt dessa tre metoder. Resultatet från provning av vattenabsorption bör jämföras med provningen av kapillär höjd (som görs på materialet i sin helhet) som ger ytterligare information om materialets benägenhet att suga upp vatten.

För att värdera vad en viss siffra på vattenabsorptionen har för betydelse krävs mer forskning som kopplar ihop om information om vattenabsorptionen i laboratoriet med hur askan beter sig i fält.

Frostbeständighet. Det högsta värdet på frostbeständigheten (sämsta frostbeständigheten) erhöles då askorna fått suga vatten 1 dygn. Man kan tolka detta som att vattenabsorptionen i 1 dygn bör användas som konditioneringsmetod då detta verkar ge ett ”worst case”. Nordtestprojektet om vattenabsorption [17] ger motsatt resultat. Detta gör att man behöver utföra fler test innan man kan säga något bestämt om vilken konditioneringsmetod som är mest relevant.

För frostbeständigheten är det inte givet hur siffrorna skall tolkas, utan mer forskning behövs även här. Den sortering som har provats är 8/16 vilket innebär att det bara är en andel av askan som provats för frostbeständighet (jämför provningen av vattenabsorption). I en verklig applikation så kommer dessa grövre (provade) korn att ligga inbäddade i finare korn. De utförda provningarna bör kompletteras med erfarenhet från fältförsök som visar hur en viss aska påverkas av frost och vad det har för betydelse för konstruktionen.

Provningsmetoden fungerade mycket bra och gav intressanta och mycket skiftande resultat för askorna. Vid kommande provningar bör man förlänga rören eftersom en av de provade askorna visade mycket hög kapillär höjd både vid stigning och dränering. Kopplingen till askans tillämpning i fält är i detta fall hög eftersom askan provas med hela sin ursprungliga sortering och i packat tillstånd, och man kan förvänta sig att motsvarande kapillära sugning sker i fält om askan utsätts för vatten i samma utsträckning som vid provningen. Det återstår dock att värdera hur en aska påverkas av att suga upp mycket vatten då den används i en konstruktion. Sådan kunskap kan bara erhållas från fältförsök för varje enskild aska.

Packningsegenskaper är en viktig egenskap för varje obundet material. Denna utfördes med standard proctor-metoden vilken fungerade bra generellt. Det var dock vissa svårigheter att avgöra vid vilken vattenkvot som optimal packning erhöles (dock ej för slaggruset), eftersom packningskurvan inte hade en lika tydlig topp, som erhålls då man packar naturliga material. Med mer erfarenhet av både metoden och att packa just askor så bör metoden standard proctor kunna användas utan problem.

Dynamiskt treaxialtest visade sig som väntat vara väl lämpat för att prova askornas mekaniska egenskaper. Värdefull information erhöles också mellan VTIs metoder och EN-metoderna eftersom båda dessa metoder kördes på alla tre askorna.

Modifierad kompressibilitet

Provningsmetoden fungerade generellt sett bra med askorna både i torrt och fuktigt tillstånd. Att två av de tre askorna inte gick att komprimera 10 % som metoden stipulerar, utan bara 3 % saknar betydelse - metoden går att använda ändå.

6.3 Tillämpningar och nyttiggörandet av askorna i projektet

Föreliggande arbete har genomförts med den långsiktiga målsättningen att bottenaskor skall etableras som ett konstruktionsmaterial till väg- och anläggningsbyggnad. För att möta denna målsättning har ett materialkaraktiserande provningsprogram nyttjats som syftar till att bedöma bottenaskors tekniska funktion och lämplighet. I och med att användningsområdet är definierat – konstruktionsmaterial – så är också krav på materialegenskaper för tillämpningen (väg eller anläggning) deklarerade (ex ATB Väg, Anläggnings-AMA). Följande bedömning av aktuella bottenaskor utgår ifrån att användningsområdet är konstruktionsmaterial till vägbyggnad, detta då strängare krav är deklarerade för vägbyggnadsmaterial än jämfört med material till anläggningsbyggnad.

För andra material än bergkross, naturgrus eller morän till vägbyggnad ställs det generella kravet ”För klassificering av syntetiska material, restmaterial, slaggrus etc skall särskild utredning för bestämning av stabilitet, hållfasthet, beständighet och eventuell miljöpåverkan utföras” (ATB VÄG [20] kapitel A11.1). Härutöver ställs ytterligare krav på material beroende av var i en vägkonstruktion material är tänkt att användas – ju högre upp i en vägkonstruktion desto strängare krav på materialegenskaper – samt vägkonstruktionens funktion och säkerhet samt miljö och hälsa vid materialhantering. Vad det gäller torvpulveraskan, processaskan och slaggruset i föreliggande arbete kan inget sägas om eventuell miljöpåverkan eller långtidsegenskaper (tekniska och

miljömässiga), utan bedömningen av nyttiggörandet begränsas till de provningsresultat som framkommit i föreliggande arbete.

Erfarenheten ifrån tidigare arbeten ([2] [44] [45]) och föreliggande projekt begränsar användningsområdet för bottenaskor till över- eller underbyggnadsmaterial i en vägkonstruktion. Bitumenbundna lager, högt upp i en vägkonstruktion, är inte realistiska att ta hänsyn till då bottenaskors tekniska egenskaper inte når de krav som ställs på materialkvalitet. Även cementbundna tillämpningar är inte möjliga att ta hänsyn till här, då inga undersökningar av beståndsdelar som kan försämra det cementbundna grusets egenskaper eller funktion (se ATB VÄG kapitel G3.2) har genomförts.

Principen för användning av andra material i obundna lager (överbyggnadsmaterial) definieras som ”Materialets funktion i väggroppen skall motsvara det lager det ersätter” (ATB VÄG [20] kapitel E11). För att genomföra en bedömning av teknisk funktion behövs dels en kontrollordning för utvärdering av testresultat och dels en beskrivning av de krav som ställs på tillämpningen (ex ett lager i vägkonstruktionen). För en vägkonstruktion skall de valda undersökningarna (laboratorie och/eller fält) visa på om den tekniska funktion är uppfylld eller inte enligt de krav som ställs i ATB VÄG [20] för varje användningsområde. Kontrollordningen för bedömning av bottenaskorna i föreliggande arbete är uppdelade i tre steg;

- Mekaniska egenskaper
- Fuktrelaterade egenskaper
- Beständighet

För de mekaniska egenskaperna bedöms bottenaskorna utifrån dess respektive kornstorleksfördelning, packningsegenskaper och dynamisk treaxialprovning. Det följande bedömningssteget har baserats på egenskaperna värmekonduktivitet och tjällyftning. Det sista steget innefattar en bedömning av frostbeständighet. Dessutom har hänsyn tagits till ”övriga” egenskaper där det är behövligt (ex. vattenabsorption och permeabilitet kopplat till tjällyftning).

Tabell 16 är en sammanställning av provningsresultat och är ämnat som ett stöd för bedömning av bottenaskorna.

Tabell 16. Sammanfattning av provningsresultat

Table 16. Overview of testing results

Metod	Egenskap	Slaggrus Umeå C	Processask a Holmen B	Torvpulver- bottenaska Uppsala A
Kornkurva	Pass 2 mm	46 %	55 %	83 %
	Pass 0,063 mm	4 %	3 %	9 %
Lös skrymdensitet		1,18	0,69	0,94
Organisk halt	TC	0,94	1,54	6,24
	TIC	0,38	1,1	0,37
	TOC	0,56	0,44	5,87
	Glödgnförlust 850 °C	3,01	5,95	10
Vattenabsorption	Vakuum	9 %	21 %	19 %
Partikeldensitet	Ugnstorr	2,17	1,65	1,83
	Fuktig men yttorr	2,37	1,99	2,19
Kapillär stighöjd		75 mm	> 800 mm	300 mm
	Vid dränering	275 mm	> 800 mm	350 mm
Frostbeständighet	2 dygn vattenmättn.	6,8	10,1	18,5
	Vakuum	6,6	5,3	12,5
Tjällyftning	Vid optimal vattenkvot	-	0 mm/h	0,07 mm/h
	Våtare	-	0,05 mm/h	-
Värmekonduktivitet	Torrt	0,24	0,14	0,18
	"Fuktig"	0,33	0,26	0,41
	Våt	0,50	0,36	0,60
Permeabilitet	Medelvärde	$1,3 \times 10^{-5}$	$9,3 \times 10^{-6}$	$5,7 \times 10^{-8}$
Packningsegenskaper	Referensdensitet	1,69	1,12	1,46
	Optimal vattenkvot	15 %	28 %	24 %
Dynamiska treaxialförsök	Res.modul VTI	130-210	65-85	60-95
	Res.modul EN	105-480	80-220	60-190
	Kvot EN/VTI (maxDev 120, k.tr 20)	$132/213 = 0,62$	$80/85 = 0,94$	$66/93 = 0,71$
	Perm def VTI max	8 mstr	13 mstr	18 mstr
	Perm def EN max	21 mstr	23 mstr	26 mstr
Kompressibilitet	Bel. vid deform 2 %	0,4 MPa	0,18 MPa	0,2 MPa
	Bel. vid deform 10 %	1,45 MPa	0,44 MPa	0,62 MPa
	E-modul vid bel 0,08 Mpa	75	58	43
	E-modul vid bel 0,08 Mpa	17	3	4

6.3.1 Slaggrus från Umeå Energi, aska C

Bottenaska ifrån Umeå Energi (slaggrus) utgör ett välgraderat, dränerande material som enligt de dynamiska treaxialförsöken visar mekaniska egenskaper som är jämförbara med naturmaterial som används till förstärkningslager. Begränsningar i användning/lager i en konstruktion gäller dels ett minsta avstånd till vägytan (värmekonduktiviteten), och dels frostbeständighet.

Den organiska halten i slaggruset är relativt hög. Det saknas dock bestämda relationer mellan den organiska halten och de prestanda som man är intresserad av i en vägkonstruktion. Hur man mäter organisk halt i askor till vägbyggnad och vilka gränser som bör tillåtas är för närvarande föremål för diskussion i den europeiska standardiseringskommitten CEN/TC 154/TG 10. Från Sverige har ett förslag kommit att sätta en gräns för TOC som sammanfaller med deponidirektivets, implementerat i svensk lagstiftning som deponiförordningen, NFS 2004:10. För deponier finns bestämda gränser för halten TOC för olika deponityper (inert avfall skall ha $\text{TOC} < 3\%$, icke-farligt avfall 5% och farligt avfall 6%). Analogt med detta har en gräns på 3% diskuterats. Dessa gränser har dock ingenting med vägbyggnad att göra och underlaget för att fatta ett sådant beslut är bristfälligt. Denna gräns skulle diskvalificera slaggruset.

Så länge kopplingen mellan TOC och funktionsegenskaper är dåligt utredd kan man inte sätta någon gräns för den organiska halten: Istället får man prova de egenskaper som man primärt är intresserad av, såsom styvhet och stabilitet. Dock är det troligt att chansen för förändrade egenskaper under konstruktionens livslängd ökar med stigande organisk halt. Det kan alltså finnas anledning att vara försiktig med material med höga halter organiskt material.

Provningen i laboratoriet visar också att slaggruset är den aska av de tre analyserade som mest liknar traditionella vägmateriäl.

6.3.2 Processaska från Holmen Paper, aska B

Bottenaska ifrån Holmens Bruk (processaska) är med avseende på de mekaniska egenskaperna lämplig att användas till underbyggnadsmateriäl, särskilt med hänsyn till dess densitet. Men användningsområdet är trots allt begränsat med hänsyn till resultaten ifrån de fuktrelaterade egenskaperna och då speciellt bottenaskans tjällyftande egenskaper i fuktigt tillstånd.

Provresultat för Holmens processaska låg ofta mitt emellan de andra två askorna. Några observationer angående provningsresultaten av denna aska är:

- Skrymdensiteten är lägst av de tre askorna
- Värmekonduktiviteten är lägst av de tre askorna
- Askan har mycket hög kapillärl höjd. Processaskan suger vatten från underliggande lager till högre höjder än vad som kan mätas i provningsutrustningen.
- Askan går att komprimera även i torrt tillstånd

6.3.3 Torvpulverbottenaska från Vattenfall värme, aska A

Utiifrån torvpulveraskans mekaniska men i synnerhet dess tjällyftande egenskaper är bedömning den att den inte är lämplig till underbyggnadsmateriäl för vägkonstruktion.

Några observationer angående provningsresultaten av denna aska är:

- den är betydligt mer finkornig än övriga material i studien,
- den har en tiopotens mer organiskt material mätt som TOC än de övriga två askorna
- den har lägst frostresistens (dvs sämst frostegenskaper) av de undersökta askorna
- 30 cm kapillär höjd vilket är ganska mycket men inte högst i studien
- Bra isoleringsförmåga
- Ganska tät
- Tjällyfter
- Optimal vattenkvot 24 %
- Svår att komprimera i torrt tillstånd

6.4 Sammanfattning av kapitlet slutsatser

- Bottenaskor är en mycket heterogen grupp av material. Askorna som ingick i projektet var olika till ursprung och karaktär och det syns tydligt i resultaten. De flesta egenskaperna var mycket varierande mellan askorna.
- Alla provningsmetoder som användes i projektet bedömdes vara relevanta, dvs de uppfyllde ändamålet.
- Provningsmetoderna kan delas upp i två kategorier, dels de som är lätta att tolka, dels de som är svåra att tolka.
- I den första kategorin provningsmetoder (lätt-tolkade) hör kornstorleksfördelning, skrymdensitet, värmekonduktivitet, permeabilitet och tjällyftning.
- Till den andra kategorin (svår-tolkade) hör organisk halt, vattenabsorption, frostbeständighet, kapillär höjd, dynamiskt treaxialtest, modifierad kompressibilitet och packningsegenskaper. Detta beror inte på metoderna i sig utan på att det finns för lite kunskap om kopplingen mellan resultat i laboratoriet och askornas egenskaper i fält.
- En bedömning av askornas användbarhet har utförts i projektet utifrån mekaniska egenskaper (främst kornstorleksfördelning, packningsegenskaper och dynamisk treaxialprovning), fuktrelaterade egenskaper (främst tjällyftning och värmekonduktivitet) och beständighet (främst frostbeständighet). I vissa fall har även ytterligare egenskaper legat till grund för bedömningen:
 - Utifrån torvpulveraskans mekaniska men i synnerhet dess tjällyftande egenskaper är bedömningen att den inte är lämplig till underbyggnadsmaterial för vägkonstruktion
 - Bottenaska ifrån Holmens Bruk (processaska) är med avseende på de mekaniska egenskaperna lämplig att användas till underbyggnadsmaterial, särskilt med hänsyn till dess densitet. Men

användningsområdet är trots allt begränsat med hänsyn till resultaten ifrån de fuktrelaterade egenskaperna och då speciellt bottenaskans tjällyftande egenskaper i fuktigt tillstånd

- Bottenaska ifrån Umeå Energi (slaggrus) utgör ett välgraderat, dränerande material som enligt de dynamiska treaxialförsöken visar mekaniska egenskaper som är jämförbara med naturmaterial som används till förstärkningslager. Begränsningar i användning/lager i en konstruktion gäller dels ett minsta avstånd till vägytan (värmekonduktiviteten), och dels frostbeständighet.
- Mer kunskap behövs i form av väldokumenterade fältförsök med ett större antal väl kontrollerade askor för att kunna göra kopplingen mellan egenskaperna i laboratoriet och beteende i fält.

7 Kontrollordning och provningsordning

7.1 Olika typer av provning

Ett av målen med föreliggande projekt är att avgöra huruvida ingående askor skall kunna användas eller inte som ett konstruktionsmaterial för väg- och anläggningsbyggnad.

För att kunna använda ett material till ett visst ändamål krävs först och främst att man en gång visat att det är möjligt att hålla den kvalitet som krävs. Om detta är fallet går man vidare och visar att askan håller en tillräckligt jämn kvalitet för att man skall kunna lita på att all aska lämpar sig lika väl som den aska man först provade. Om askan varierar inom för vida ramar skall detta upptäckas och den undermåliga askan skiljas av. Det krävs alltså dels en typprovning, dels en löpande kontroll.

7.1.1 Typprovning

En typprovning är en omfattande provning av flera olika väsentliga egenskaper som syftar till att slå fast huruvida materialet över huvud taget kan användas för sitt ändamål, i detta fall väg- och/eller anläggningsbyggnad. Här provas en rad olika egenskaper med noggranna metoder.

7.1.2 Löpande kontroll - Egenkontroll

En typprovning är för dyr och omfattande för att kunna utföras kontinuerligt av producenten. Dock måste man ändå visa att den produkt man har är likadan som den man typprovade. För detta ändamål kan man prova en rad parametrar med ibland, betydligt enklare, snabbare och billigare metoder än vid typprovningen.

Dessa prover syftar främst till att kontrollera om materialet förefaller variera inom fastslagna gränser. Det väsentliga är ofta inte själva värdet på det man mäter upp, utan att värdet håller sig inom givna intervall. Skulle provningsresultatet avvika från det förutbestämda intervallet tas materialet åt sidan och en utförligare provning, liknande typprovningen, utförs för att säkerställa att funktionen kan upprätthållas.

För att detta skall fungera krävs att man redan vid typprovningen jämför resultaten av den omfattande provningen och provningen med den metod som man avser att använda för egenkontrollen.

Ibland innefattar egenkontrollen en metod som mäter samma, eller nästan samma, parameter som vid typprovningen. Exempel på detta är att man vid typprovning av styvhet och stabilitet kan använda sig av dynamisk treaxialprovning. På samma gång provar man även enligt modifierad kompressibilitet. Om resultaten är jämförbara kan man som alternativ använda kompressibilitetsprovning för att följa upp materialets egenskaper vad gäller styvhet och stabilitet.

Ibland har metoderna inget självklart samband, men kan samvariera. Exempelvis kan man inte med någon större säkerhet förutsäga materialets egenskaper utifrån endast en

kornstorleksfördelning, så som man kan med den välkända traditionella ballasten. Däremot är en stabil kornstorleksfördelning med liten variation en indikation på att andra parametrar troligen inte heller varierar särskilt mycket. Om kornkurvan däremot plötsligt ändrar sig radikalt kan man utgå ifrån att något inträffat som sannolikt påverkar även andra parametrar. En sådan händelse utgör grund för att genomföra en utökad provning innan material kan användas.

7.1.3 Löpande kontroll - Övervakande kontroll

Denna kontroll syftar till att visa om tillverkarens egenkontroll fungerar. Ett oberoende organ provar materialet med samma provningsmetoder som används i egenkontrollen. Dessutom kan andra provningar göras på stickprov eller samlingsprov av materialet för att kontrollera produktkvaliteten.

Ofta utförs den övervakande kontrollen på så sätt att ett prov tas ut av kontrollanten eller av tillverkaren under kontrollantens överinseende. Detta prov delas i två delar och kontrollorganet och tillverkaren tar varsin halva och utför samma provningar på. Ibland sparas ett tredje delprov för den händelse att man misstänker att något blivit fel och behöver göra om något prov.

7.2 Provningar för att utröna lämpligheten för ändamålet

Det som gjorts i detta projekt kan sägas vara en form av typprovning på de tre ingående askorna. De metoder som använts kan också användas för löpande kontroll, både egenkontroll och övervakande kontroll.

7.2.1 Krav på aska för olika tillämpningar

I den rapporten från etapp 1 [1] redovisades följande krav på material till en vägkonstruktion, se nedan.

Tabell 17. Funktionskrav på vägbyggnadsmaterial

Table 17. Functional requirements for road building materials

	Funktionskrav
1a	materialet måste ha en acceptabel bärförmåga och stabilitet
1b	materialet måste ha en acceptabel sättning och kompression
2	materialet måste vara frost-, mekaniskt- och kemiskt beständigt
3	materialet får ej orsaka oacceptabel tjällyftning
4	materialet får ej bidra till att öka risken för att frosthalka uppstår
5	materialet måste vara dränerande, dvs hålla tillräckligt hög permeabilitet
6	Utförande - materialet måste gå att hantera och packa

Olika tillämpningar kräver olika provningar. Regeln är att ju högre upp i vägen, desto högre krav på både provning och provningsresultat. Tabell 18 ger ett förslag på vad som kan vara lämpligt att prova för olika tillämpningar. Kunskapen om materialet och den tilltänka användningen avgör hur mycket provningar som behöver genomföras. Tabellen skall betraktas som ett principiellt förslag inför fortsatta undersökningar.

Tabell 18. Funktionskrav som kan ställas på väg- och anläggningsbyggnadsmaterial vid olika tillämpningar. Kryssens placering är bara ett förslag för hur det skulle kunna se ut. Kryss inom parentes kan eventuellt tas bort då större kunskap om materialen föreligger

Table 18. Functional requirements that road- and civil construction materials have to fulfil for different applications. The positions of the X are only a suggestion. X within brackets can maybe be taken away when more knowledge of the materials exists.

Funktionskrav som bör kontrolleras	Bär och Förstärkningslager	Skyddslager väg	Underbyggnad väg	Lätfyllnad	Utfyllnad under konstruktion	Utfyllnad parkmark, Bullervallar
1a. Bärförmåga och stabilitet	X	X	(X)	(X)	(X)	-
1b. Sättning och kompression	X	X	(X)	(X)	(X)	-
2. Beständighet						
frost-	X	X	X	X	X	-
mekanisk-	X	X	(X)	-	-	-
3. Tjällyftning	X	X	X	(X)	(X)	-
4. Frosthalka (se värmekonduktivitet)	X	X	-	-	-	-
5. Dränering	X	X	-	-	-	X
6. Packnings-egenskaper	X	X	(X)	-	(X)	(X)
Kornstorleksfördelning	X	X	(X)	(X)	-	-
Vattenabsorption	(X)	(X)	-	X	-	(X)
Kapillär höjd	X	X	(X)	(X)	-	-
Organisk halt	X	X	(X)	(X)	(X)	-
Värme-konduktivitet	X	X	(X)	(X)	-	-
Skrymdensitet (löst utfyllnad)	X	X	X	X	X	X

7.2.2 Rätt provningsordning ger bättre ekonomi

Alla provningar behöver inte utföras för alla material, och det finns vinster att göra med att testa egenskaperna i rätt ordning.

Principen är att i ett tidigt skede upptäcka om viss egenskap diskvalificerar hela materialet för en tänkt användning. Det innebär att man inte behöver prova mer om man konstaterat att en vital egenskap inte uppfyller kraven. T ex så kan en mycket hög vattenabsorption försvåra användningen av materialet.

Provning av askors egenskaper kan göras på flera sätt beroende på tänkt tillämpning. Här presenteras två exempel. Dels en provning i form av allmän karaktärisering av askan för att klassificera den, något som är viktigt för att skapa en sammanhängande bild av resultaten från enskilda fält- och labbförsök, dels en provning för att avgöra om askan passar till vägbyggnad. Provningsomfattningen bör avgöras beroende på den tänkta tillämpningen samt i samråd med askinnehavaren, som förmodligen har samlat på sig en del erfarenhet om askans egenskaper med tiden.

7.2.3 Förslag till provningsordning för allmän karaktärisering

För att känna till askornas egenskaper i stort behöver vissa grundläggande data tas fram. Syftet med denna karaktärisering är att slå fast vissa grundläggande parametrar för att man senare skall kunna dra slutsatser om hur andra askor skulle bete sig i samma situation utifrån hur lika eller olika de är den provade askan.

Förslagsvis provas följande parametrar:

- Kornstorleksfördelning
- Organisk halt
- Kapillär höjd vid stigning och dränering
- Packningsegenskaper (Standard Proctor (lätt instampning)): ger optimal vattenkvot och referensdensitet (max torr skrymdensitet).

Dessa parametrar kan provas i valfri ordning och bör provas för flera delprover för att fastslå variationen inom samma aska.

De ovanstående parametrarna är att betrakta som ett minimum. Vill man veta ytterligare data om askan är det bara att välja fler intressanta parametrar.

7.2.4 Förslag till provningsordning för väg- och anläggningsbyggnadsändamål

Denna provning har som primärt mål att så snabbt och billigt som möjligt avgöra om askan går att använda i en konstruktion. Det gäller här att prova den egenskap först som är den mest kritiska för funktionen. På så sätt slipper man lägga resurser på provningar av askor som ändå inte håller måttet. Följande provningsordning föreslås:

1. Först måste **kornstorleksfördelningen** vara känd, eftersom denna påverkar senare provningar och vissa provningar kräver att man siktar fram en delfraktion.

2. Därefter provas **packningsegenskaper** mha Proctorpackning. Detta ger viktig information om optimal vattenkvot och packningsgrader, som också behövs i vidare provning.

3. Därefter provas **kapillär höjd**. Resultat från packningsförsöken ovan kan användas för att packa kolonnen på ett bra sätt. Metoden är enkel och ger ett bra mått på vilken benägenhet som askan har att suga upp vatten när askan används som ett konstruktionsmaterial. Eventuellt kan man göra prov av **vattenabsorption** i samband

med kapillär höjd, men denna görs bara på en fraktion av askan. En aska som suger stora mängder vatten måste troligtvis genomgå ganska omfattande provningar vid olika vattenhalter för att man skall våga använda den i en väg. En aska som suger obetydligt med vatten är mer förutsägbar.

4. Om askan är relativt finkornig så bör man redan i detta skede prova **tjällyftningsförmågan** ev också **permeabiliteten**. Det har visat sig att askor kan vara tjällyftande trots att kornstorleksfördelningen tyder på att de inte skulle vara detta. Även organisk halt bör provas i detta skede.

5. Askans motstånd mot frost bör nu provas i ett test av **frostbeständighet**. Denna görs bara på en fraktion av askan och provningen har större betydelse ju mer den fraktionen utgör av askan som helhet.

6. Om ingen av ovanstående prov tenderar att bedöma askan som mindre lämplig så kan provningen fortsätta med mekaniska egenskaper, dvs askan provas med **dynamiskt treaxialförsök** och **modifierad kompressibilitet**. Resultatet från packningsförsöken bör användas här. Om askan suger mycket vatten enligt provning av kapillär höjd bör provningen göras både på torrt och vått prov.

7. Om alla prov utfallit till belåtenhet bör **skrymdensiteten** (lös) mätas.

8. Endast i vissa fall, då materialet håller en så hög klass att det kan läggas högt upp i vägen eller om man speciellt önskar ett isolerande lager, behövs test av **värme-konduktivitet**.

7.2.4.1 Kommentarer till ovanstående provningsordning

I dagsläget så är det som tidigare sagts svårt att tolka resultaten från en del av provningarna. Så länge kopplingen mellan resultat i laboratoriet och beteende i fält är bristfällig så är det svårt att dra definitiva slutsatser av provningsresultaten. Det man kan göra tills vidare är att vara observant på extrema resultat från labprovningarna, eftersom det kan vara en indikation på att askan kan uppföra sig mindre lämpligt i fält.

Speciellt observant bör man vara på höga siffror på **kapillär höjd** eftersom det ger en genomfuktning av hela askkroppen, och fukt påverkar många av askans andra egenskaper. Även **tjällyftningsförmågan** bör ägnas uppmärksamhet eftersom den provas med en mycket verklighetsnära metod – om askan lyfter i laboratoriet gör den detta i fält också. Projektet har visat att det är svårt att förutsäga askans tjällyftning utifrån kornstorleksfördelning. Test av **mekaniska egenskaper** i form av dynamiskt treaxialförsök och modifierad kompressibilitet är ett måste om man vill använda materialet som ett konstruktionsmaterial. Man bör också vara observant på innehållet av **organiskt material** i form av TOC, eftersom nedbrytning av detta organiska material på sikt kommer att påverka askans beteende i fält.

8 Diskussion

8.1 Påverkan av fukt

Vad kan då sägas utifrån utförda labundersökningar i detta projekt? En observation är att vatteninnehåll, eller fukt, har en väldigt stor betydelse. Fukthalten påverkar så många parametrar (skrymdensitet, värmekonduktivitet, kompressibiliteten, frostbeständighet, packningsegenskaperna, tjälfarligheten, hållfasthet och stabilitet) att det blir av vital betydelse att försöka utröna hur askan påverkas av fukt. Fukthalten påverkar även naturliga material men inte alls i samma utsträckning som för askor. Vid utvärderingen av en aska för ett visst konstruktionsändamål bör man därför prioritera bedömningen dels om askan kommer att ta upp fukt, dels på vilket sätt askan påverkas av detta. Om askan tar upp fukt men de övriga egenskaperna är relativt oberoende av fukthalten så har ju fukthalten mindre betydelse.

8.2 Heterogen materialgrupp

En annan observation är att trots att så få som tre olika askor har undersökt så har provningsresultaten varit mycket skiftande mellan askorna. Två av askorna gick t ex nästan inte att komprimera i torrt tillstånd, medan den tredje lät sig komprimeras betydligt i detta tillstånd. En av askorna hade så hög kapillär höjd att stigröret inte räckte till, medan de två andra hade betydligt lägre höjder. Slutsatsen av detta är att askor är en mycket heterogen grupp av material och det är svårt att på förhand bedöma askorna egenskaper innan någon provning skett.

8.3 Resultattolkning – den svåra biten

Som tidigare nämnts så fungerar de använda provningsmetoderna bra – svårigheten ligger i hur resultattolkningen skall gå till. Vad innebär det att man fått ett visst provningsresultat för en aska? Vad betyder detta för askans användbarhet i fält? För naturmaterial så har det under en lång tid vuxit fram en korrelation mellan egenskaper i fält och vilka provningsresultat i laboratoriet som krävs för att man skall erhålla de önskade egenskaperna i fält. Denna korrelation eller erfarenhetsåterkoppling börjar nu långsamt växa fram för de alternativa materialen. Det har gjorts många fältförsök med askor men utan att man noggrant karaktäriserat materialet i laboratorium innan fältförsöket, vilket medför att även om konstruktionen med en aska visar sig fungera bra så vet man inte vilka provresultat som detta motsvarar i laboratoriet för denna aska. Sålunda krävs framöver i kommande projekt att arbete i laboratorium och fält sker parallellt så att korrelationen mellan dessa stärks.

Det är också viktigt att de fältförsök som genomförs följs upp på ett genomtänkt sätt. Detta kräver att man redan i planeringsstadiet för fältförsöket avsätter medel i form av tid och pengar för att kunna genomföra en långtidsuppföljning av det byggda objektet.

8.4 Inverkan av organisk halt

Troligtvis påverkar den organiska halten fuktupptagningsförmågan och kanske också motståndskraften mot belastning. Även detta borde utredas vidare, eftersom den

organiska halten kan variera dels med bränsle och förbränningsprocess, men också med syrehalt, belastning och andra parametrar som kan variera inom samma panna. Det finns också anledning att tro att den organiska halten är olika för olika kornstorlek i samma askvolym.

9 Förslag till fortsatt arbete

Föreliggande projekt har lagt en god grund för att kunna säga att vissa askor troligen lämpar sig för väg- och anläggningsbyggnad, och har också visat på en rad provningsmetoder som passar för att undersöka askans egenskaper. Det är dock en bit kvar innan ett helt accepterat, standardmässigt provningsförfarande kan etableras så som för traditionell ballast. Detta projekt har, förutom att visa vägen mot framtida askanvändning, även ringat in ett antal områden som bör utvecklas ytterligare.

Fortsatt forskningsarbete kan delas i ett antal områden. Nedan har dessa områden delats in i två grupper där den förstnämnda har direkt koppling till genomfört projekt och den andra gruppen består av frågor som uppkommit under projektets gång. Gränsen är flytande. Resten av kapitlet är en genomgång av dessa två grupper av punkter.

- Förfining och utveckling av testmetoderna
- Vidareutveckling av kontrollordning och definition av gränser för olika parametrar kopplat till olika användningsområden
- Koppling mellan inneboende egenskaper och funktion
- Ökad koppling mellan laboratiemätningar och fältförsök
- Samband mellan askans ursprung och dess egenskaper
- Upparbetning och förädling
- Egenskapernas beroende av tid och andra faktorer
- Koppling till miljöegenskaper
- Hanterbarhet och utläggningsteknik

9.1 Frågor med direkt koppling till genomfört projekt

9.1.1 Förfining och utveckling av testmetoderna

De flesta testmetoderna fungerade mycket bra, men en del av testmetoderna kan behöva ytterligare metodutveckling.

Ett exempel på detta är frostbeständighetsprovningen. Här finns en rad frågetecken att rätta ut:

- Dels utförs provningen på en begränsad fraktion av materialet. Hur stor denna fraktion är, och vad resten består av, är säkert av betydelse
- Man kan också tänka sig att prova en annan fraktion, eller materialet i sin helhet.
- Det finns inte heller någon bra förklaring till varför det högre vattenupptaget resulterar i mindre sönderfrysning av materialet. Ett motsatt resultat hade förväntats. Tre prover är dock alldeles för lite för att frågan skall anses fullständigt utredd.
- Som för alla andra metoder behöver också sådant som antal delprover, mätosäkerhet mm slås fast.
- När alla dessa problem är lösta återstår också att definiera vilken nivå på resultatsiffran som kan anses vara godtagbar

Motsvarande diskussion kan föras också om den organiska halten. Det verkar luta åt att TOC används som mått på organisk halt, och denna metod förefaller också i detta projekt vara den bästa. Vilken koppling det finns till fältegenskaper är än så länge oklart, vilket gör det omöjligt att bestämma vad som är ”godkänt”.

Kapillär höjd är ett annat område som kan vara av intresse, eftersom erfarenheterna av byggnation med material som har en så hög kapillär höjd som de som erhöles i detta projekt är mycket begränsad.

9.1.2 Vidareutveckling av kontrollordning och definition av gränser för olika parametrar kopplat till olika användningsområden

För traditionella material finns en uppsättning riktvärden och vissa fall kravvärden för olika egenskaper för vissa applikationer. Det mest kända är naturligtvis Vägverkets ATB VÄG. För alternativa material saknas denna typ av riktvärden helt. Hur många egenskaper måste man prova och vilka värden skall man acceptera om man t ex vill använda en viss aska som skyddslager etc? Om man vill använda askan till lättfyllnad – vilka egenskaper skall då provas och vilka värden skall accepteras? Denna typ av kunskap saknas helt för de alternativa materialen.

9.1.3 Koppling mellan inneboende egenskaper och funktion

Här finns många exempel, och nedan nämns några

- Vad betyder den organiska halten för styvhet, stabilitet och beständighet? Vilken inverkan har den på vattenabsorption och därmed relaterade parametrar? Finns det någon koppling mellan det organiska materialet och kornstorleksfördelningen, dvs var på kornkurvan ligger det organiska materialet?
- Hur påverkas funktionen av kornstorleksfördelningen? Hur finkorniga material kan egentligen användas?
- Vad betyder fukthalten för olika funktionsparametrar och hur varierar den? Kan man bestämma hur torrt respektive fuktigt ett prov får vara för att det skall fungera, och hur rimmar det med tillståndet i vägen?
- Hur mycket varierar fukthalten i en konstruktion?

9.2 Frågor som uppkommit under projektets genomförande

9.2.1 Ökad koppling mellan laboriemätningar och fältförsök

Det behövs mycket arbete för att kunna bestämma sambandet mellan laboriemetoder och fältförsök. Detta arbete kan dock organiseras ganska enkelt genom att så många som möjligt, exempelvis de inom Värmeforsks askprogram finansierade projekten, låter göra en karakterisering av de askor som ingår i fältförsök. Likaså bör labförsök som undersöker andra parametrar, t ex åldring, utlakning mm, inkludera en grundläggande karakterisering av den aktuella askan. Vidare så finns möjligheten att använda accelererad provning i full skala. Denna typ av provning

används bäst vid nykonstruktion i laboratorier eller i fält och erbjuder vida möjligheter till instrumentering. På detta sätt kan man systematiskt bygga upp kunskap om hur olika egenskaper hänger samman och det blir möjligt att dra generella slutsatser.

9.2.2 Samband mellan askans ursprung och dess egenskaper

Idag vet vi lite om vilken skillnad det är mellan olika askor som kan tyckas vara likadana. Kan man säga något generellt om funktionen hos t ex rostereldade kolbottenaskor eller torvaska från pulverpannor? Det vore givetvis förträffligt om man kunde få fram ett sätt att förutsäga funktionen av en aska bara genom att ange lätt åtkomliga parametrar som t ex bränsle och panntyp. Även grova klassificeringar som visar att vissa askor ofta, eller nästan aldrig, kan användas till ett visst ändamål kan vara till hjälp. Det återstår dock en hel del tester för att kunna visa på något sådant.

9.2.3 Upparbetning och förädling

När väl kraven för olika applikationer, och hur man mäter dem, är fastslagna så har man ett bestämt mål att nå för vidareförädling av sin aska. Om exempelvis en viss kornstorleksfördelning visar sig ha betydligt bättre egenskaper än materialet i sin helhet kan det löna sig att sikta fram just denna fraktion. Kornstorleken förändras ju dessutom av krossning, men majoriteten av alla askor är, relativt traditionella väg- och anläggningsbyggnadsmaterial, relativt finkorniga, varför just krossning inte känns som det mest aktuella sättet att upparbeta askan.

Även före askutmatning finns förbättringspotential. I många pannor tas flera olika askfraktioner ut (bottenaska, vändschaktsaska, olika filterstoft etc) Var man tar ut aska och hur olika fraktioner blandas ihop har stor betydelse för användbarheten. Givetvis påverkas också askkvaliteten av bränsletyp, förbränningsförhållanden etc. Ingen kommer troligen att styra en panna för att maximera askkvaliteten, men kunskap om kopplingen mellan process och produkt kan ändå vara till nytta

När askan väl föreligger kan den förbättras genom t ex inblandning av bindemedel, t ex flygaska eller bitumen, granulering etc. Alla dessa nya produkter måste också testas för att deras prestanda skall kunna bestämmas.

9.2.4 Egenskapernas beroende av tid och andra faktorer

Det är väl känt att exempelvis slaggrus genomgår en mognadsprocess som delvis beror på tiden. Andra faktorer som kan påverka askans egenskaper är temperatur, syrehalt, pH, redoxpotential mm. Förändringen kan orsaka ändrade egenskaper på flera av de områden som testats i denna rapport. Vissa askor förändras säkerligen mer än andra, och de som förändras mest kan behöva testas både som färska och som åldrade för att prestandaintervallerna skall kunna bestämmas. En kontrollordning för en aska som förändras med tiden måste då innehålla uppgifter om hur man tar ut det åldrade provet och kan resultera i, inte typiska värden för produkten, utan intervall eller högsta- respektive lägsta-värden. Som exempel: om askan efterbinder och ökar hållfastheten i en konstruktion kan det värde som den färska askan uppvisar i vissa fall räknas som ett lägsta-värde

9.2.5 Koppling till miljöegenskaper

Miljöegenskaperna hos en aska mäts framför allt som utlakning av metaller och vissa lösliga joner som t ex klorid och sulfat. Även vissa organiska ämnen är av intresse, såsom fenoler, PAH mm.

Utlakningsegenskaperna kan mätas på ett antal olika sätt. Dessa har det gemensamt att kornstorleken har betydelse för lakningsresultatet. Även ytegenskaperna har inverkan. Dessa egenskaper förändras med tiden hos vissa askor. Att ytans ålder såväl som relativa storlek har betydelse innebär att de mekaniska egenskaperna påverkar miljöegenskaperna. Om man exempelvis har ett antal relativt stora korn med en mogen yta har man ett visst utlakningsmönster. När man utsätter dessa korn för belastning som orsakar brott tvärs igenom korn såväl som avnötning av hörn sker två saker. Dels ökar den relativa ytan, både genom att stora korn spräcks itu till två halvor och genom att andelen riktigt fina korn ökar. Den nya ytan är dessutom inte åldrad på samma sätt som den gamla, utan kan ha helt andra utlakningsegenskaper. Även frostsprängning kan ha liknande effekter.

Detta innebär att val av använd fraktion, val av testad fraktion och hur materialet påverkas i själva konstruktionen har inflytande på miljöegenskaperna. Dessa frågor kvarstår även då man beslutat sig för en standardiserad mätmetod för utlakning.

9.2.6 Hanterbarhet och utläggningsteknik

Vissa av askorna har egenskaper som skiljer dem från traditionella material också ur hanteringssynpunkt. Material som ligger på hög och utsätts för väta drar åt sig betydande mängder fukt, vilket påverkar t ex densiteten och packningsegenskaperna. Finkorniga material, särskilt om de är fuktiga, har en tendens att klumpa ihop sig och rinner inte som torra material. Damning kan vara ett betydande problem vid torrt väder. Om askorna i torrt tillstånd blir så lätta att de flyter på vatten ställer krav på utläggningen. Lättballast har en lägre densitet än vatten, varför erfarenheter kan dras därifrån.

Det finns alltså en mängd frågor som behöver belysas innan man kan säga att det är fritt fram att använda askor på samma sätt, och med samma maskinpark, som de traditionella materialen.

10 Litteraturreferenser

- [1] von Bahr, B, Ekvall, A, Schouenborg, B, Kvalitetskriterier för bottenaskor till väg- och anläggningsbyggnad. Etapp I – Inventering av provningsmetoder och funktionskrav, Värmeforsks askprogram Q4-143, Värmeforskrapport 867, 2004.
- [2] Provningsmetoder för alternativa material till vägunderbyggnad, Vägverket, Publikation 2001:34, ISSN 1401-9612
- [3] Arm, M, Uppföljning av befintliga slaggrusvägar, Q4-271, Värmeforskrapport 916, 2005
- [4] Håkansson, K, Wik, O, Bendz, D, Helgesson, H och Lind, B, Miljöriktlinjer för nyttiggörande av askor i anläggningsbyggande – del 1, Värmeforsks askprogram Q4-104, Värmeforskrapport 879, 2004
- [5] Bjurström, H, Berg, M, Arm, M, Suér, P och Håkansson, K, En förenklad testmetodik för kvalitetssäkring - Etapp 1, Q4-148, Värmeforskrapport 856, 2003
- [6] Mácsik, J, Svedberg, B, Lenströmer, S och Nilsson, T, FACE Flygaska i geotekniska anläggningar, Etapp1 Inventering/Tillämplighet, Q4-107, Värmeforskrapport 870, 2004
- [7] SS-EN 932-2, Ballast – Generella egenskaper – del 2: neddelning av laborieprov, fastställd 1999-07-30, SIS, Swedish Standard Institute
- [8] Wilhelmsson, A och Paijkull, M, Att bygga med avfall – Miljörättsliga möjligheter och begränsningar för återvinning av avfall i anläggningsändamål, Q4-144, Värmeforskrapport 839, 2003
- [9] van Moeffaert D, Bjurström H, Berg M, Svedberg B, Förutsättningar för att askor kommer till användning i vägar, Kärman E (uppdragsledare Scandiakonsult), Rapport Q4-207 inom Värmeforsks askprogram, Miljöriktig användning av askor, Värmeforsrapport 849, 2003
- [10] Pettersson, Roger, Suér, Pascal, Rogbeck, Jan, Pannsand som kringfyllnadsmaterial i fjärrvärmerörgravar – Kemisk och geoteknisk karakterisering av fluidbäddssand, Q4-220, Värmeforskrapport 852, 2004.
- [11] Arvidsson, H, Loorents, K-J, Askors materialtekniska funktion – VTIs materialdatabas, Q4-224, Värmeforskrapport 930
- [12] Gustafsson, M, Ekvall, A, von Bahr, B, Johansson, P, Wallman, S och Reuterhage, Å, Inledande laborieförsök projekt AIS 32, delrapport 1, VINNOVA 2003
- [13] Gustafsson, M, Inledande fältförsök projekt AIS 32, delrapport 2, VINNOVA 2002
- [14] Sundsten, M, Hydraulic Conductivity of Saturated Sand-Bentonite Mixtures, doktorsavhandling, inst för Geoteknik Chalmers Tekniska Högskola 2004
- [15] Ekvall, A och von Bahr, B, Sammanställning av genomförda kemiska analyser och tester för gjuterisand, bottenaska och stenmjöl, samt jämförelse med olika bedömningsgrunder, SP-rapport 2004:12, 2004
- [16] Carlson-Ekvall, A, von Bahr, B, Öberg-Högsta, A-L, Gustafsson, M, Foundry Sand as a Construction Material: Functional and Environmental Aspects, i

proceedings from Advances in Waste Management and Recycling, Dundee sept 2003.

- [17] Schouenborg B., Aurstad J., Hagnestål L., Petursson P., och Winblad J. Test methods adapted for alternative and recycled, porous aggregate materials, Part 3 – Water absorption, NORDTEST Project No. 1531-01, SP Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology, SP REPORT 2003:24
- [18] Stenberg F, Schouenborg B, Provningsmetoder anpassade för återvinningsmaterial, Kornstorleksfördelning,; NORDTEST Projekt nr 1292-96, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Byggnadsteknik, SP-rapport 1997:08
- [19] Ewertson C, Schouenborg B, Aurstad J, Provningsmetoder anpassade för återvinningsmaterial, Sprödhhet, NORDTEST Projekt nr 1393-97, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Byggnadsteknik, SP-rapport 2000:14
- [20] ATB VÄG 2003, Vägverket Publikation 2003:111, finns också på http://www.vv.se/publ_blank/bokhylla/ATB/atb_vag/lista.htm
- [21] VV Publikation 2001:101, Vägverkets metodbeskrivning för tjällyftning VVMB301, år 2001
- [22] Resultatrapport MinBaS Materialdatabas - deponier, Karin Johansson, NCC, MinBaS projekt nr 2,1, Nya användningsområden för material från MinBaS branscherna. Delprojekt 2,13, Deponier, rapport nr 2:12
- [23] Ekvall, A., von Bahr, B och Savukoski, M, Riktlinjer för kvalitet hos jord och angränsande material – en sammanställning av rådande internationellt läge, SP Rapport 2003:04.
- [24] Certifieringsregler för anläggningsjord, http://www.sp.se/cert/cert_prod/spcr/SPCR148.pdf
- [25] Certifieringsregler för Biogödsel, http://www.sp.se/cert/cert_prod/spcr/SPCR120-2004-11.pdf
- [26] SS-EN 933-1 Ballast - Geometrisk egenskaper - Del 1: Bestämning av kornstorleksfördelning – Siktning
- [27] SS-EN 1097-1, Ballast - Mekaniska och fysikaliska egenskaper – Del 1: Bestämning av nötningsmotstånd (micro-Deval)
- [28] SS-EN 1367-1, Ballast – Beständighetsegenskaper – Del 1: Bestämning av frostbeständighet genom frys/tö-växling
- [29] SS-EN 1097-6, Ballast - Mekaniska och fysikaliska egenskaper – Del 6: Bestämning av korndensitet och vattenabsorption
- [30] Bo Lind et al, Energiaska som vägbyggnadsmaterial - urlakning och miljöbelastning från en provväg, , SGI, Varia 557, 2005
- [31] Uppföljning av befintliga slaggrusvägar, Maria Arm, Värmeforsk rapport 916, 2005
- [32] Ecke, H, Mark och vatten i stadsmiljön – Bottom ash in road construction (BARC), Final report, (kolla fler data)
- [33] Provningsmetoder för alternativa material till vägunderbyggnad, Vägverket, Publikation 2001:34, ISSN 1401-9612

-
- [34] Allmän Teknisk Beskrivning Lättklinker i vägkonstruktioner, Vägverket publ 2003:1, www.vv.se
- [35] Allmän Teknisk Beskrivning Krossad betong i vägkonstruktioner, Vägverket publ 2004:11, www.vv.se
- [36] Värmekonduktivitet, SP Info 2000:15, 2000.
- [37] Allen, T., Particle Size Measurement, fourth edition, ISBN 0-412-35070, Chapman and Hall, London, 1990
- [38] Certifieringsregler för CE- och P-märkning av lättklinker SPCR 101, Sveriges Provnings- och forskningsinstitut, Borås, rev. juni 2005
- [39] Hermansson, Å., 2000, Frost modelling and pavement temperatures. Licentiate thesis 2000:18, Departement of Civil and Mining Engineering, Division of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Luleå University of Technology, Luleå
- [40] Fagerström och Wiesel, 1972, Permeabilitet och kapillaritet, Förslag till geotekniska laboratorieanvisningar, del 8, Byggforskningens informationsblad B7:1972, ISBN, 91-540-2050-6
- [41] Arm M; "San Remo: Ny dimensionering av överbyggnader i BYA på kort sikt", VTI notat V187 1992
- [42] SHRP protocol P46; "Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and subgrade soils", Department of Transportation, USA, November 23, 1992
- [43] Ydrevik K; "Dynamisk treaxiell provning av bär- och skyddslager", VTI Notat 58-1995
- [44] ALT-MAT (Alternative Materials in Road Construction) Projekthemsida med rapport: <http://www.trl.co.uk/altmat/index.htm> Projektledare: Dr J M Reid, Transport Research Laboratory, UK, projektet avslutat 1999.
- [45] Uppföljning av befintliga slaggrusvägar – fallviktsmätningar på provsträckor på Törringevägen i Malmö och Dåvamyran i Umeå, Värmeforskrapport nr 916, mars 2005, Värmeforsk Stockholm
- [46] Vägverket publikation 2005:39, "Luftkyld masugnsslagg - hyttsten - i vägkonstruktioner". Publiceras oktober 2005.
- [47] Lennart Hagnestål, pers komm maj 2005, lättklinkerexpert på SP, Sveriges provnings- och forskningsinstitut

Bilagor

Visuell bedömning av askorna

Bilaga A

A.1 Torvpulveraska

Se kapitel 4.1.1

A.2 Processaska

Se kapitel 4.1.1

A.3 Slaggrus

Som nämnts i kapitel 4.1.1 så innehåller slaggruset en del skrot. Dessa, ofta vassa, metallbitar genererar två problem:

Det första är att det är mycket svårt att dela ner provet i representativa delprov. De flesta provningar kan inte göras på prover som innehåller detta skrot och kemisk analys av t ex järn eller zink blir naturligtvis meningslös. Plockar man bort skrotet får man ett material som kan testas, men som inte återspeglar materialets verkliga egenskaper med skrotet inkluderat.

Tyvärr är det inte bara på laboratoriet som det uppstår problem. Att använda askor med vassa bitar är direkt olämpligt för många tillämpningar och ger dessutom upphov till problem vid utläggning.

Den vedertagna definitionen på slaggrus är bottenaska från avfallsförbränning som genomgått ett antal upparbetningssteg. Skrot som är magnetiskt kan tas bort med magnetavskiljare, andra metaller kan tas bort med virvelströmsmagnet och porslin, keramik och annat får siktas bort. Det material från Umeå som ingått i detta försök är alltså ett slaggrus, dvs har genomgått upparbetning (se kap 2.3). Dock kan konstateras att det även efter upparbetning finns en del partiklar kvar som kan orsaka problem.

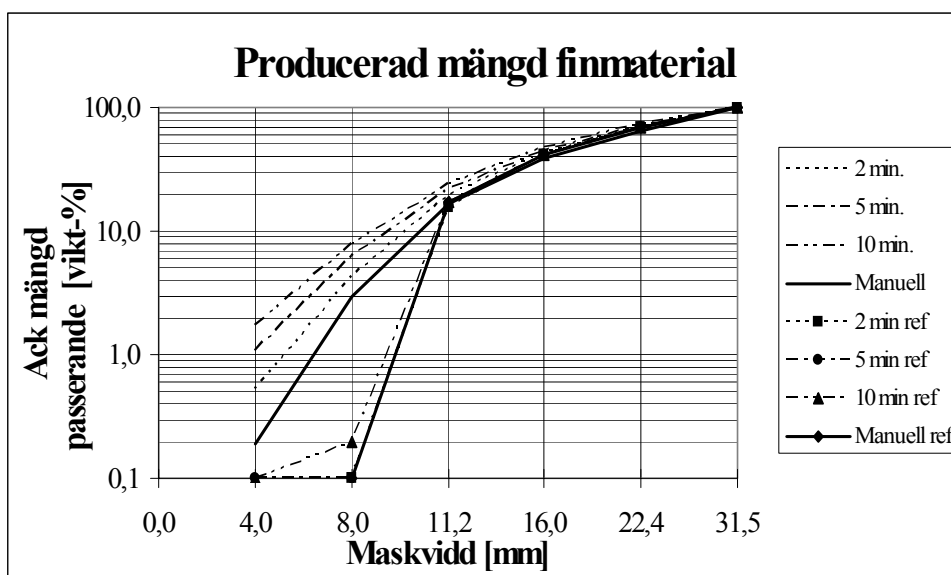
Ingen regelrätt plockanalys har gjorts av slaggruset, så problemets omfattning är inte känt. Upparbetning är dyrt och omständligt, men om man har en avsättning för en väldefinierad fraktion kan det vara värt besväret. Föreliggande projekt är ett led i denna utveckling. Producenten får sedan bedöma hur kostnadseffektiv den befintliga upparbetningen är och vilka krav som skall ställas på renhet för att uppnå funktionskraven.

Kornstorleksfördelning

Bilaga B

Eftersom alternativa material ofta har lägre nötningsbeständighet än naturliga material, så tillämpades skonsam siktning i projektet. Erfarenheter från detta finns bl a från Nordtest-projekt om siktning och kornstorleksfördelning [18]. Som vid all siktning så är det en balansgång mellan kravet på god rensiktning och kravet på att minimera nedbrytningen under själva siktningen. Detta är speciellt viktigt för bottenaskor eftersom de är känsligare för påverkan i samband med siktningen.

Nordtest-projektet visade att speciellt alternativa material påverkas mer av siktningen än naturliga ballastmaterial. De övre fyra kurvorna visar hur påverkan på en kolbottenaska ökar då siktapparat används vid olika tider. De nedre kurvorna (där linjen för 2 min och 4 min ligger på kurvan för manuell siktning) visar att påverkan på naturmaterial är betydligt mindre.



Figur 19. Erfarenheter från Nordtestprojekt om siktning.

Figure 19. Experience from the Nordtest project about sieving

I standard SS-EN 933-1 om siktning så finns det krav på maximalt kvarstannande mängd på varje sikt, vilket ges med formeln:

$$(A * \sqrt{d}) / 200$$

där A är siktarean i mm² och d är maskvidden i mm. Dvs ju större sikt och ju större maskvidd, desto mer material kan accepteras stanna på sikten. Standarden anger naturligtvis också en minsta tillåten vikt för hela provet.

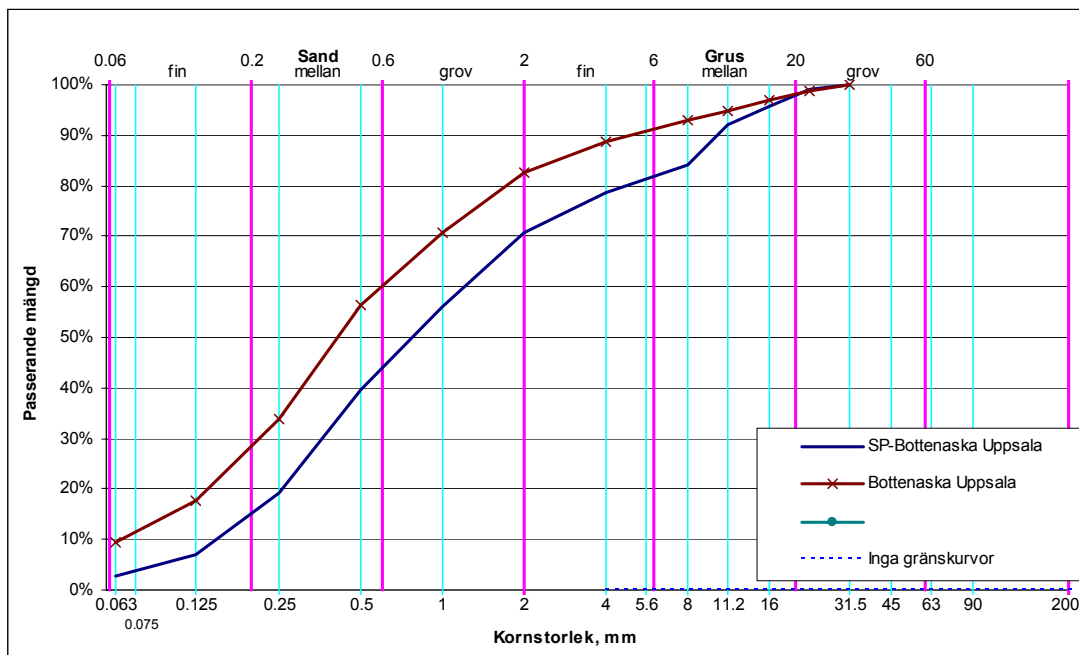
I vårt fall måste sikttiden minskas från standardtiden 10 minuter till en kortare tid för att minska nötningen. Sikttiden 2 minuter valdes, vilket också medför att den maximalt tillåtna kvarstannande mängden måste minskas. Efter en kontroll av adekvat litteratur på området [37] bestämdes att varje delprov skall delas upp i 2 delprov som siktas i respektive 2 minuter. Den maximalt tillåtna kvarstannande mängden fick högst vara 1/5 av standardmängden.

B.1 Provningserfarenheter

Både VTI och SP utförde siktnings enligt ovanstående instruktioner. Resultatet blev dock inte helt lika eftersom de båda laboratorierna inte gjorde på precis samma sätt eftersom den tekniska utrustningen inte var helt lika. Dessutom finns det förmodligen en viss variation mellan delproverna. Siktningsen fungerade dock att utföra på bottenaskarna med de förutsättningar som gavs.

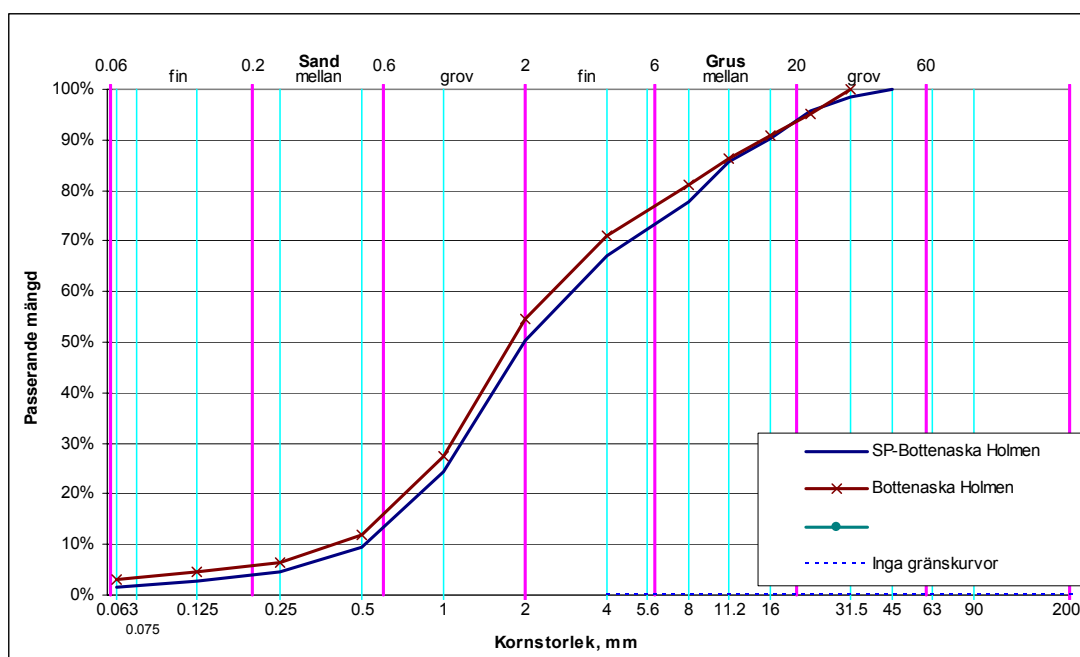
B.2 Resultat

Figur 20 till Figur 22 visar kornstorleksfördelning för de tre askorna.



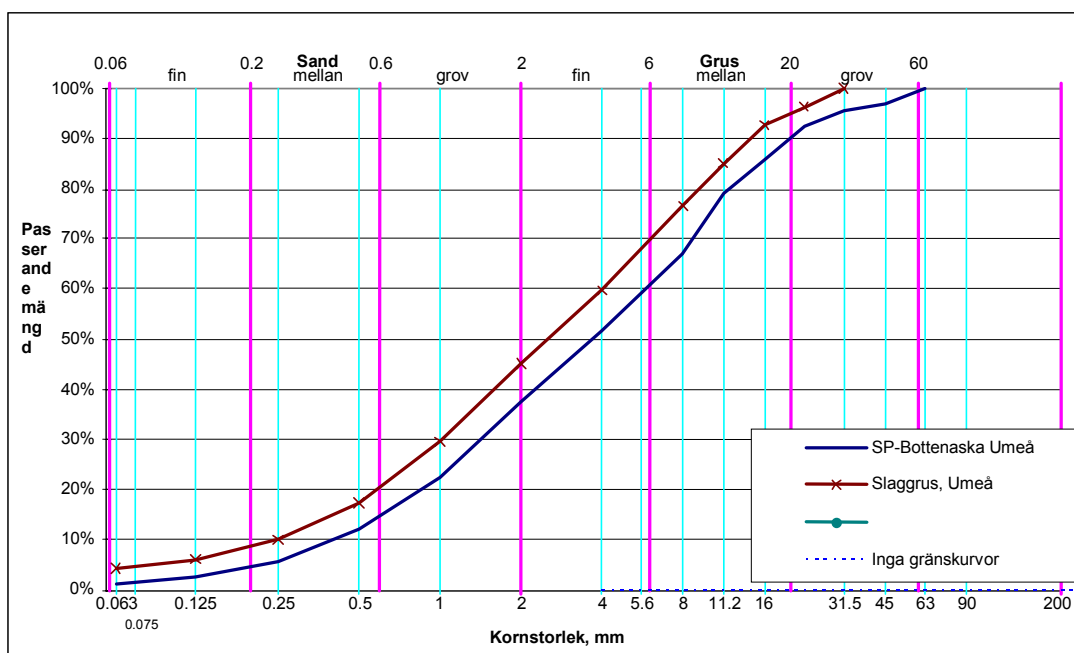
Figur 20. Kornstorleksfördelning för torvpulveraskan utförda av SP och VTI. Skillnaden beror på olika utförande på siktningsen på de respektive laboratorierna.

Figure 20. Grain size distribution for the peat ash, carried out by SP and VTI. The difference in the curves depends on differences in the executions of the sieving process at the laboratories



Figur 21. Kornstorleksfördelning för processbottenaskan utförda av SP och VTI. Skillnaden beror på olika utförande på siktningen på de respektive laboratorierna.

Figure 21. Grain size distribution for the process ash, carried out by SP and VTI. The difference in the curves depends on differences in the executions of the sieving process at the laboratories



Figur 22. Kornstorleksfördelning för slaggruset utförda av SP och VTI. Skillnaden beror på olika utförande på siktningen på de respektive laboratorierna.

Figure 22. Grain size distribution for the MSWI-ash, carried out by SP and VTI. The difference in the curves depends on differences in the executions of the sieving process at the laboratories

Som framgår av jämförelsen av kurvorna mellan de två laboratorierna så ligger SPs kurva en bit nedanför VTIs kurva. Orsaken till detta är att de två laboratorierna har utfört siktningen på något olika sätt. Båda laboratorierna har följt de i projektet uppställda riktlinjerna om maximal mängd kvarstannande mängd på varje sikt, samt sikttider. Den viktigaste skillnaden är att SP har siktat med handsiktning för maskvidden 8 mm och uppåt samt utfört siktningen för alla övriga maskvidder med en Pascal-siktapparat. Den tydliga ”knycken” som finns på SPs kurva beror alltså på övergången mellan handsiktning och maskinell siktnings.

VTI har däremot använt en Gilsonsikt för alla maskvidder över 1 mm och en Pascalsikt för alla maskvidder under och lika med 1 mm. Maskinsiktningen medför dels den jämna kurvan över hela kornstorleksfördelningen, samt förklarar att VTIs kurva ligger ovanför SPs kurva på de maskvidder där SP har handsiktat.

Skillnaden är ganska stor för torvpulveraskan, upp till 16 % -enheter mellan kurvorna. Skillnaderna är mindre för slaggruset (upp till 8 % -enheter), samt minst för processaskan (upp till 4 % -enheter).

Skrymdensitet (lös torr)

Bilaga C

Skrymdensiteten (lös torr) utfördes med standard SS-EN 1097-3, Bilaga D. Principen för skrymdensitet är att en behållare med en väl känd volym fylls med materialet för vilket skrymdensiteten skall bestämmas. Ingen packning förekommer annan än den som automatisk uppstår då materialet hålls i behållaren. Materialets massa bestäms genom att väga behållaren före och efter påfyllnad av materialet, och skrymdensiteten bestäms därefter. Bilaga D innebär att skrymdensiteten har bestämts för fuktig ballast samt att man samtidigt bestämt fukthalten.

C.1 Provningsförfarenheter

Provningsmetoden är i princip oberoende av vilken typ av ballastmaterial som provas. Dock är det viktigt att förhållandet mellan största kornstorlek och provkärlets volym är litet, dvs provkärlets volym måste vara tillräckligt stort i förhållande till största kornstorlek. Detta regleras i standarden och gäller oberoende om materialet är naturligt eller alternativt.

C.2 Resultat

Resultatet för skrymdensitet (vid två olika tillstånd) blev enligt Tabell 19 nedan.

Tabell 19. Skrymdensiteter vid leveranstillstånd och vid torrt tillstånd (lös torr), samt fukthalt för de tre bottenaskorna. Fukthalten definieras som kvoten mellan fuktens (vattnets) massa och provets totala massa.

Table 19. Bulk density when delivered and loose bulk density (dry), and moisture content for the three bottom ashes. The moisture content is defined as the ratio between the mass of the water and the total mass of the sample.

Asktyp	Torvpulveraska	Processaska	Slaggrus
Skrymdensitet vid leverans till SP, kg/m ³	1040	760	1270
Skrymdensitet (lös torr), kg/m ³	940	690	1180
Fukthalt, vikts-%	9	9	7

Organisk halt

Bilaga D

Den organiska halten är väsentlig ur flera synvinklar. Ursprungligen fanns kravet med i ATB-väg därför att rester från avbaningslagret, dvs matjord, förna och andra ytligt liggande organiska lager, fungerar som smörjmedel i en vägkonstruktion och minskar friktionen mellan partiklarna. Detta organiska material är ofta finkornigt och ligger på ytan av helt oorganiska partiklar. Materialet innehåller mycket annat än kol, t ex cellulosa, humussyror och liknande kemiska föreningar av framför allt kol, väte och syre, och är i varierande grad biologiskt nedbrytbart.

I askor är det ett annat organiskt material av ett helt annat ursprung. Här har man istället organiska ämnen integrerade i partiklarna. Dessutom är den organiska materien förbränd i varierande grad, vilket innebär att delar är helt förkolnade. Detta material innehåller betydligt högre halter av kol, eftersom andra beståndsdelar ofta har försvunnit i förbränningsprocessen. Följaktligen är materialet också betydligt mindre biologiskt nedbrytbart, eftersom energin som mikroorganismerna vill ta upp redan avgivits i förbränningen.

D.1 Provningserfarenheter

Slaggruset från Umeå Energi, innehöll metalledar (16 g av 172, dvs nästan en tiondel) som fick plockas bort före analysen. Denna aska fick också malas i en skivsvängskvarn. De andra två askorna behövde inte malas.

D.2 Resultat TOC, TIC, TC och glödförlust

I Tabell 20 redovisas resultatet från mätningen av oorganiskt (TIC) och organiskt (TOC) kol samt summan av dessa (TC). Alla resultat är i vikts-% på prov torkat vid 105°C.

Tabell 20. Mätning av organiskt material enligt SS-EN 13137

Table 20. Measurement of organic material according to SS-EN 13137

Provbeteckning	TC	TIC	TOC
Torvpulveraska	6,24	0,37	5,87
Processaska	1,54	1,10	0,44
Slaggrus	0,94	0,38	0,56

Vattenfalls torvpulveraska uppvisar en betydligt högre halt kol, varav det allra mesta är organiskt. Detta tyder på en ofullständig förbränning av bränslet. I Holmen Papers processaska är majoriteten av kolet oorganiskt, vilket skulle kunna vara exempelvis karbonater. Lägst organisk halt har Umeå, vilket är naturligt för ett slaggrus.

Avfallsförbränning ger i allmänhet betydligt större askmängder än t ex torvpulvereldning. Det eventuella oförbrända materialet är alltså utspädd i en betydligt större mängd aska. Värdena för Umeås slaggrus är räknade på den askmängd som återstod efter det att metallbitarna plockats bort, så egentligen är den totala halten kol av olika slag ännu lägre.

Glödförlust

Glödförlusten är ett sätt att uppskatta kolhalten. Den bygger dock på att allt kol oxideras till koldioxid som avgår i gasfas, och att inget annat händer med provet. Denna approximation är inte alltid korrekt. Resultaten visas i Tabell 21 nedan.

Tabell 21. Resultat av mätningar av glödförlust

Table 21. Measurements of loss of ignition

Provbeteckning	105°C-550°C	105°C-850°C	105°C-975°C
Torvpulveraska	8,36	10,0	10,1
Processaska	1,96	5,95	6,00
Slaggrus	2,54	3,01	2,82

Om man jämför glödförlusten med TC får man till resultat att glödförlusten i samtliga fall är högre. För Vattenfalls aska är glödförlusten ca 1,5 gånger så stor, medan för slaggruset är relationen en faktor 3. Resultatet för Holmen Papers processaska är likadant som för Vattenfalls torvpulver vid den lägsta temperaturen, men när temperaturen stiger blir glödförlusten en faktor 4 högre än TC. Detta innebär att dessa två metoder visar olika resultat och att relationen dem emellan varken är konstant för ett material eller för en temperatur. Det är alltså inte möjligt att räkna fram TC från glödförlusten med hjälp av någon omräkningsfaktor. Det enda som kan sägas är att glödförlusten oftast är högre.

Att siffrorna blir så olika för olika metoder beror naturligtvis på att materialen innehåller fler oxiderbara komponenter än kol. Om andra komponenter oxideras till flyktiga föreningar så avgår de till gasfas och provet lättar i vikt. Naturligtvis kan även andra föreningar som inte oxiderar förgasas. Exempelvis avgår metalliskt kvicksilver redan före 100°C, dvs redan vid torkningen. Många föreningar av t ex kadmium och bly förångas också långt före den högsta provtemperaturen.

Tabell 22. Kvoten mellan glödförlust vid olika temperaturer och TC, totalt kol, enligt EN 13137.

Table 22. The ration between loss of ignition for different temperatures and TC, according to SS-EN13137

Provbeteckning	105°C-550°C	105°C-850°C	105°C-975°C
Torvpulveraska	1,34	1,60	1,62
Processaska	1,27	3,86	3,90
Slaggrus	2,70	3,20	3,00

Man kan också konstatera att Umeås slaggrus ökar i vikt mellan 850 och 975°C. Detta beror på att syre reagerar med någon beståndsdel och bildar en förening som inte är flyktig vid aktuella temperaturer. Därmed binds syret till den fasta fasen som då ökar i vikt. Exempel på denna reaktion är oxidation av järn till järnoxid.

Vattenabsorption

Bilaga E

E.1 Bakgrund till provningen av vattenabsorption i detta projekt

I den första delrapporten nr 867 (Q4-242) påpekas att vattenabsorptionen bör ägnas speciell uppmärksamhet. Askor har erfarenhetsmässigt en relativt hög, men ganska långsam, vattenabsorption. Att korrekt vattenabsorption tillämpas är viktigt för provning av frostbeständighet, tjällyftningsbenägenhet samt värmekonduktivitet (motstånd mot frosthalka).

Det finns en praxis att kontrollera vattenabsorptionen för material som en indikator på om det kan vara frostbeständigt. Om vattenabsorptionen är mindre än 1 % så anses materialet vara frostbeständigt. Om vattenabsorptionen är > 1 % så kan man tillämpa ett frys-tö-försök med eller utan NaCl (1 %) i vattenlösningen. Tidigare projekt [2][17] har visat att vattenabsorptionen för de flesta askor är betydligt högre än 1 %, ibland uppemot 15 %.

SP avslutade nyligen ett samnordiskt projekt inom ramen för Nordtest som handlade om vattenabsorption [17]. Bakgrunden till projektet är observationer att ballast som är porös absorberar vatten under mycket lång tid, ibland under mer än ett år. Den relativt nya EN-standarden för vattenabsorption SS-EN1097-6 stipulerar 24 timmars absorption och fungerar alltså inte tillfredsställande för porösa material. Detta medför att, även då man följer SS-EN1097-6, så blir resultaten missvisande för alternativa material, om vattenmättat tillstånd krävs. Målet för det projektet var att noggrant utvärdera SS-EN1097-6 för traditionell porös ballast (porös basalt) och alternativa material. Ett delmål med projektet var att finna en generell metod som ger en fullständig och accelererad vattenabsorption för denna typ av material [17].

De tre undersökta materialen var krossad betong, kolbottenaska från Händelöverket, porös basalt (krossad lava från Island) och slutligen en lättballast från LECA. Enbart kornstorleken mellan 4 – 31,5 mm undersöktes i projektet. Material mindre än 4 mm behandlas på annat sätt i standarden och ingick ej i studien.

De metoder som undersöktes var:

- enligt standarden SS-EN 1097-6 med Pyknometer (24 timmar)
- Vakuumbehandling
- Kokning
- Långtidssugning i vattenbad i semipermeabla påsar (300 dagar)

Slutsatserna från projektet [17] var att:

- CEN-standarden EN1097-6 för vattenabsorption är olämplig för porös alternativ ballast och lättballast, eftersom den grovt underskattar den tid som det tar för dessa materialtyper att uppnå vattenmättnad. Alla material i studien sög vatten under minst en månad eller mer.

- Bottenaskan och krossad betong behöver cirka tre månaders vattenabsorption för att uppnå jämvikt. Lättballast och porös basalt behöver ibland mer än ett år för att uppnå jämvikt.
- Bland snabbtesterna så har vakuum-metoden visat sig ge repeterbara resultat för varje material. Bottenaska och krossad betong var de material som hade bäst överensstämmelse mellan vakuum-metoden och långtidsabsorptionen. Vakuum-metoden behöver dock ytterligare metodutveckling för att kunna rekommenderas som en allmängiltig metod.
- Resultatet av provningsmetoder som kräver vattenmättnad, t ex för frostbeständighet och tjälegenskaper, är inte helt relevanta för alternativa material om enbart vattensugning under 24 timmar tillämpas.
- Den fortsatta forskningen behövs för att validera vakuum-metoden genom att testa ett antal olika askor och krossad betong. Frostbeständighet och tjällyft bör kontrolleras och jämföras för materialen där den föregående vattenabsorptionen har skett enligt olika metoder (CEN-standard vs vakuum-metoden).

I föreliggande projekt har alltså tre metoder valts ut, långtidssugningen med de semi-permeabla påsarna (EN 1097-6 i 300 dagar), pyknometermetoden EN 1097-6, (300 dygn annex C pyknometer) och vakuum-metoden (EN 1097-6, modifierat enligt BMm ins 45) som tar några timmar.

E.2 Utförande av provningen

Provningen utfördes på tre olika sätt:

1. SS-EN 1097-6, Bilaga C, pyknometrar 300 dygn
2. Semipermeabla påsar, 300 dygn
3. Pyknometrar under vakuum enligt BMm-INS-45

All provning av vattenabsorption utfördes på fraktionen 4-31,5 mm vilket föreskrivs i standard SS-EN1097-6, Bilaga C för lättballast. Eftersom porösa material absorberar vatten under längre tid än 24 timmar (vilket föreskrivs i standarden) så utfördes (och kommer att utföras) mätningar även efter 7, 14, 30, 90, 180 och 300 dygn. Den accelererade metoden med vakuum är dock klar efter 24 timmar.

Principen för den förstnämnda metoden är att pyknometrar (glasflaskor med noggrant bestämd volym) fylls med bottenaskan 4-31,5 mm, se Figur 23. Bottenaskan har innan påfyllningen torkats i 110°C tills allt fukt har försvunnit. Vatten fylls på upp till ett märke på pyknometern och pyknometern med allt innehåll (ballast och vatten) vägs. Varefter bottenaskan suger upp vatten så kommer nivån att sjunka under märket. Med jämna mellanrum fylls vatten på upp till märket samtidigt som pyknometern vägs. Vid slutet av provet hålls allt vatten bort och provet torkas yttorr och vägs. Den vikten ger då den slutgiltiga vattenabsorptionen då man jämför med torrvikten.



Figur 23. Pyknometer fylld med bottenaska 4-31,5 och vatten. Den vita pilen markerar den rits upp till vilken vatten fylls på.

Figure 23. A pycnometer filled with bottom ash 4-31,5 and water. The white arrow marks the scribed line up to which water is filled.

Principen för vattenabsorption i de semipermeabla (påsar som kan släppa igenom vatten men ändå håller kvar innehållet) påsarna är ungefär som ovanstående beskrivning av pyknometerprovningen. Fraktionen 4-31,5 mm av bottenaskan läggs i påsar som därefter läggs i en plasttunna med vatten, se Figur 24. Påsarna vägs vid bestämda tidpunkter utan att de tas upp ur vattnet med hjälp av en speciell laborativåg försedd med en krok på undersidan.



Figur 24. En semipermeabel påse fylld med bottenaska för provning av vattenabsorption.

Figure 24. A semipermeabel bag filled with bottom ash for testing of water absorption

Den tredje provningsmetoden för vattenabsorption med vakuum inleds på samma sätt som provningen med pyknometrarna. Då pyknometrarna är påfyllda med ballast och vatten ställs de istället i vakuum för att suga ut all luft för att detta skall ersättas med vatten, se Figur 25. På kort tid får man då en förväntad maximal vattenabsorption.

En avsevärd nackdel med de två förstnämnda metoderna är just tidsåtgången. Därför är målet att på sikt ersätta dessa med snabbare metoder, t ex vakuum-metoden BMm-INS-45. Tidigare projekt [17] har visat att korrelationen mellan vanliga långtidstest för vattenabsorption och vakuum-metoden är mycket bra.



Figur 25. Vattenabsorption enligt vakuum-metoden. Trycket i glasbehållaren sänks till 50 mbar och hålls där i 24 timmar.

Figure 25. Water absorption according to the vacuum method. The pressure in the glass container is reduced to 50 mbar and is kept at that level for 24 hours.

E.3 Provningsförfarenheter

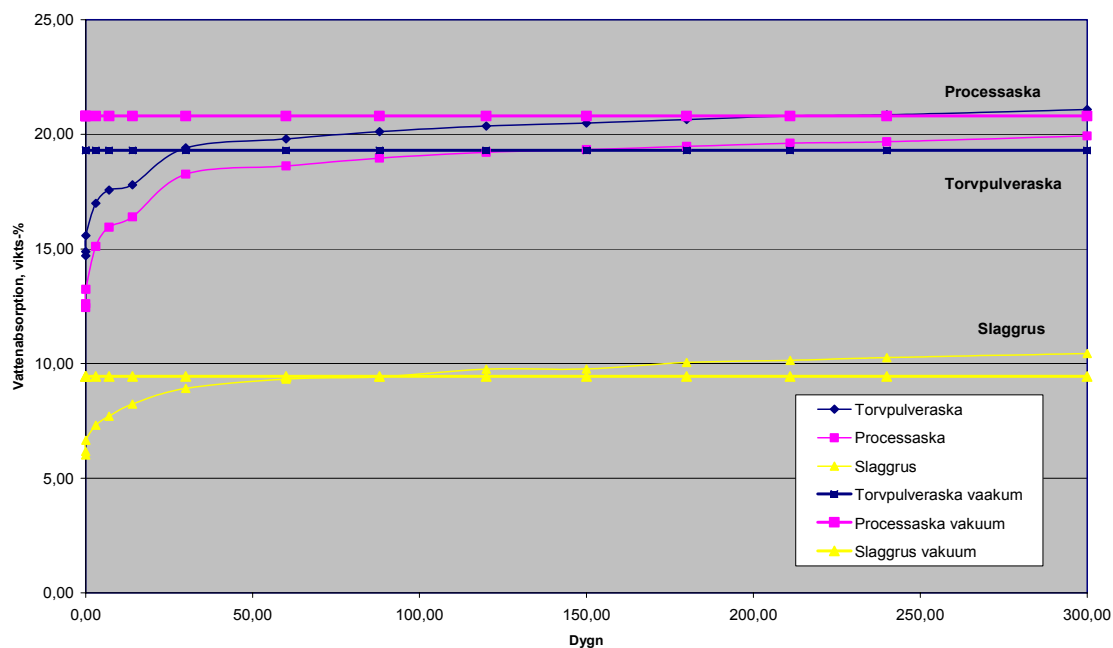
De två metoder som tar 300 dygn är utvecklade för material som är inerta och som alltså inte påverkas av att ligga i vatten på något annat sätt än att en del vatten tas upp av materialet, vilket inte alltid gäller. Vissa material kan lösas upp i vattnet. Antingen löses vissa delar av materialet upp helt och hållet och återfinns i vätskefas som lösta salter. Materialet vägs under försökstiden i de semipermeabla påsarna. I pyknometerprovet hålls vattnet av vid provningstidens slut och provet torkas och vägs. I båda dessa fall försvinner den materia som lösts i vattenfasen och kommer inte med i vägningen. Då lättar materialet i vikt och vattenabsorptionen underskattas. Denna felmarginal bedöms dock vara liten.

Man kan också tänka sig att delar av materialet löses upp och att små korn av olöst material som legat inbäddade i det lösliga mineralet då frigörs i vattnet. De semipermeabla påsarna hänger i vattnet och mycket fina partiklar sjunker då igenom påsen och lägger sig på botten i provkärlet. Inte heller dessa partiklar kommer med i vägningen, med underskattning av provets vikt som resultat. Denna felmarginal bedöms vara liten.

Samtliga prover skulle siktas för hand. Detta upplevdes som besvärligt. Särskilt slaggruset innehöll diverse större delar som metallbitar och annat, vilka måste tas bort manuellt. Provets inhomogenitet försvårar också neddelningen.

E.4 Resultat av provningen

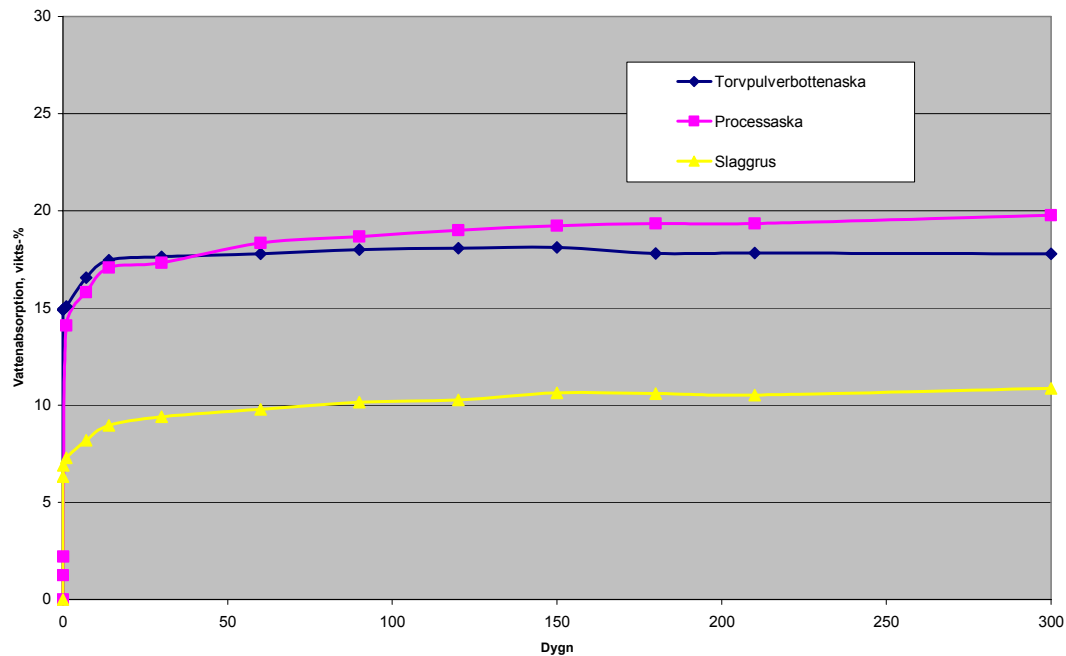
Figur 26 visar resultatet från provningen av 300 dygn i pyknometrar samt vakuum-metoden.



Figur 26. Vattenabsorption i pyknometer 300 dygn och med vakuum-metoden.

Figure 26. Water absorption in pycnometers 300 days with the vacuum method.

Figur 27 visar resultatet från provningen i 300 dygn i semipermeabla påsar.



Figur 27. Vattenabsorption i 300 dygn i semipermeabla påsar

Figure 27. Water absorption in semipermeable bags, 300 days

I analysen av vattenabsorptionen med vakuum-metoden får man även fram partikeldensiteter. Dessa redovisas i Tabell 23. Två olika typer av partikeldensiteter som fås fram vid provningen av vakuum-metoden. nedan.

Tabell 23. Två olika typer av partikeldensiteter som fås fram vid provningen av vakuum-metoden.

Table 23. Two different types of particle densities as a result of the testing with the vacuum-method

Asktyp	Torvpulver-bottenaska	Processaska	Slaggrus
Partikeldensitet (ugnstorr partikel)	1,83	1,65	2,17
Partikeldensitet (fuktig men yttorr partikel)	2,19	1,99	2,37

Kapillär höjd vid stigning och dränering

Bilaga F

Kapillär stighöjd mäts genom att man fyller ett 85 cm högt rör med askan, sätter botten i kontakt med en vattenyta och mäter hur högt materialet kan suga upp vatten. Vid dränering fyller man ett liknande rör med askan, och fyller vatten ända upp som sedan får stå i en vecka. Därefter öppnar man i botten och mäter hur högt kapillärkraften håller kvar vattnet vid dränering. Materialet fylls på 10 cm i taget och packas sedan med en trästav 10 gånger, varefter nästa skikt fylls på. Materialet får i båda fallen stå och suga vatten tills stabila förhållanden uppnåtts. I båda metoderna fastställs sedan höjden genom att materialet delas i 5 cm tjocka skikt. Fuktkvoten bestäms sedan för varje skikt.

Höjd och fuktkvot plottas och blir en s-formad kurva. Hygroskopisk fuktupptagning är den andel fukt som ställer in sig när materialet är i kontakt med fuktig luft. Det innebär att materialet ovanför den höjd som kapillärkraften orkar suga upp till inte är torrt, utan att ett viss mängd fukt finns ovanför denna höjd helt enkelt för att det finns vatten i luften omkring provet. Den hygroskopiska fuktupptagningen avläses som det värde som fuktkvoten stabiliseras kring när man kommer ovanför stighöjden. Den hygroskopiska fuktupptagningen läggs alltså in i kurvan och skärningspunkten mellan denna och den faktiska fuktkvotskurvan visar den kapillära höjden. Metoden för kapillär höjd är i grunden EN 1097-10. Dock måste man modifiera metoden något bl a genom att använda ett högre rör. Dräneringsprovning ingår inte i EN 1097-10, men det går att mäta även denna med stöd av en modifiering av metoden. Den hygroskopiska fuktupptagningen är samma oavsett om vattnet stiger upp nedifrån eller dräneras ut, varför denna inte behöver mätas igen.

F.1 Provningsserfarenheter

Vattenfalls torvpulveraska fylldes på som vanligt till 85 cm höjd. Efter vattenlagring i 1 vecka hade provet spontant kompakterats ca 30 mm i dräneringsprovet. Stigprovet kompakterades ca 10 mm. Slaggruset från Umeå uppvisade ett litet läckage i toppen vid dräneringsprovningen, eventuellt på grund av expansion i materialet. Dock visar materialet ingen expansion vid avslutad provning.

F.2 Resultat kapillär höjd vid stigning och dränering

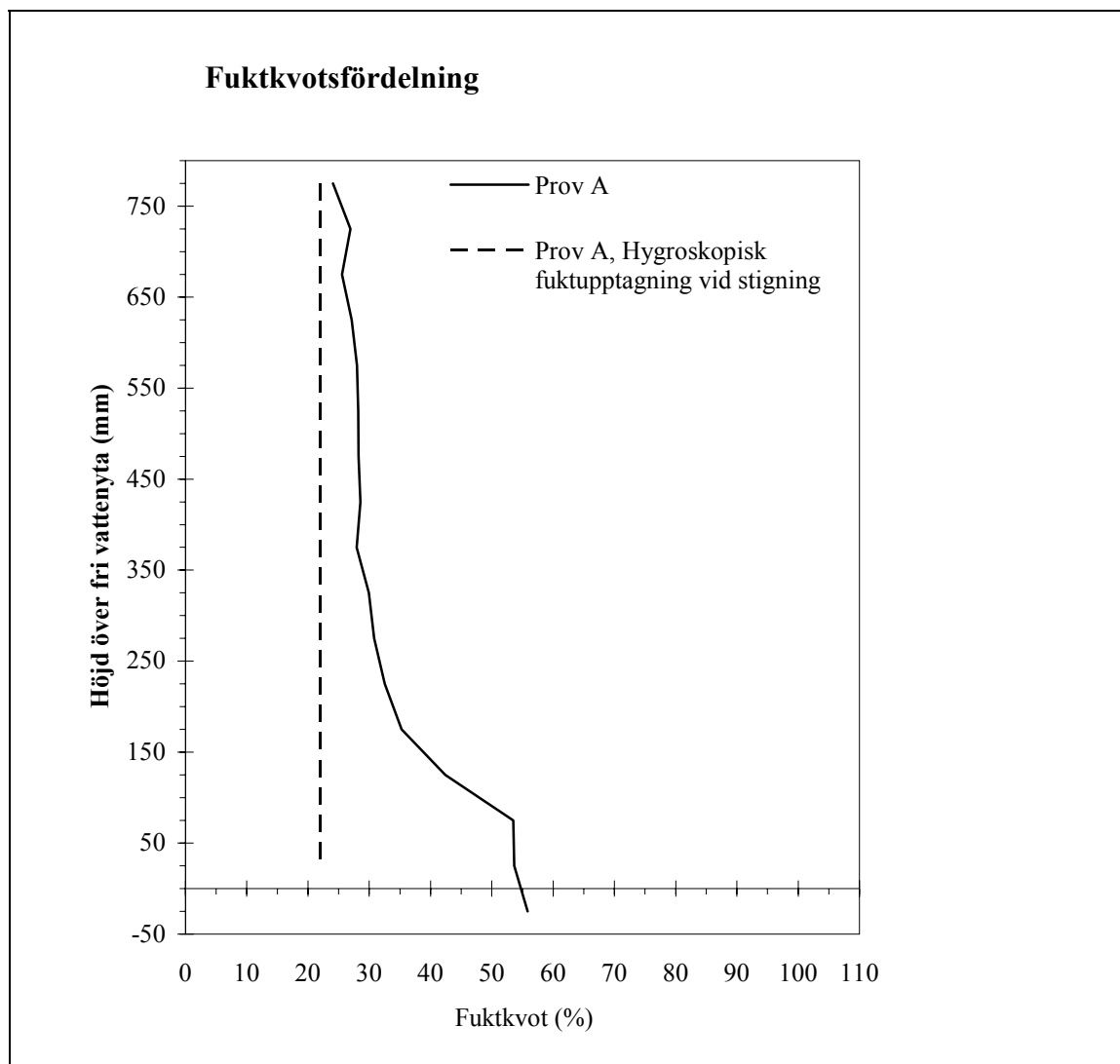
Nedan följer tabeller och diagram som från provningen av kapillär höjd vid stigning och dränering.

Tabell 24. Torvpulveraska, kapillär höjd vid stigning, Vikt vått och torrt prov i skikt samt fuktkvotsfördelning

Table 24. Peatash, capillary height when rising, wet and dry weight in layers and moisture ratio distribution

Höjd över fri vattenyta		Vikt vått prov	Vikt torrt prov	Fuktkvot
Skikt	Medelnivå	Prov A	Prov A	Prov A
(mm)	(mm)	(g)	(g)	(%)
750-800	775	690	555	24
700-750	725	1061	857	24
650-700	675	1143	923	24
600-650	625	959	773	24
550-600	575	1130	917	23
500-550	525	993	806	23
450-500	475	1035	837	24
400-450	425	1055	877	20
350-400	375	1028	800	28
300-350	325	689	553	25
250-300	275	1003	802	25
200-250	225	1120	892	25
150-200	175	1098	882	25
100-150	125	1050	812	29
50-100	75	846	610	39
0-50	25	1559	1029	51
(-50--0)	-25	940	571	65
Hygroskopisk fuktupptagning		537	440	22
Summa, prov i rör		17398	13496	

Kapillär höjd vid stigning (mm)	Prov A
Fuktkvotskurvans skärning av hygroskopisk fuktkvot	300
Övre nivån där fuktkvoten börjar bli konstant	300
Sammanvägt:	300



Figur 28. Kapillär höjd vid stigning, torvpulveraska

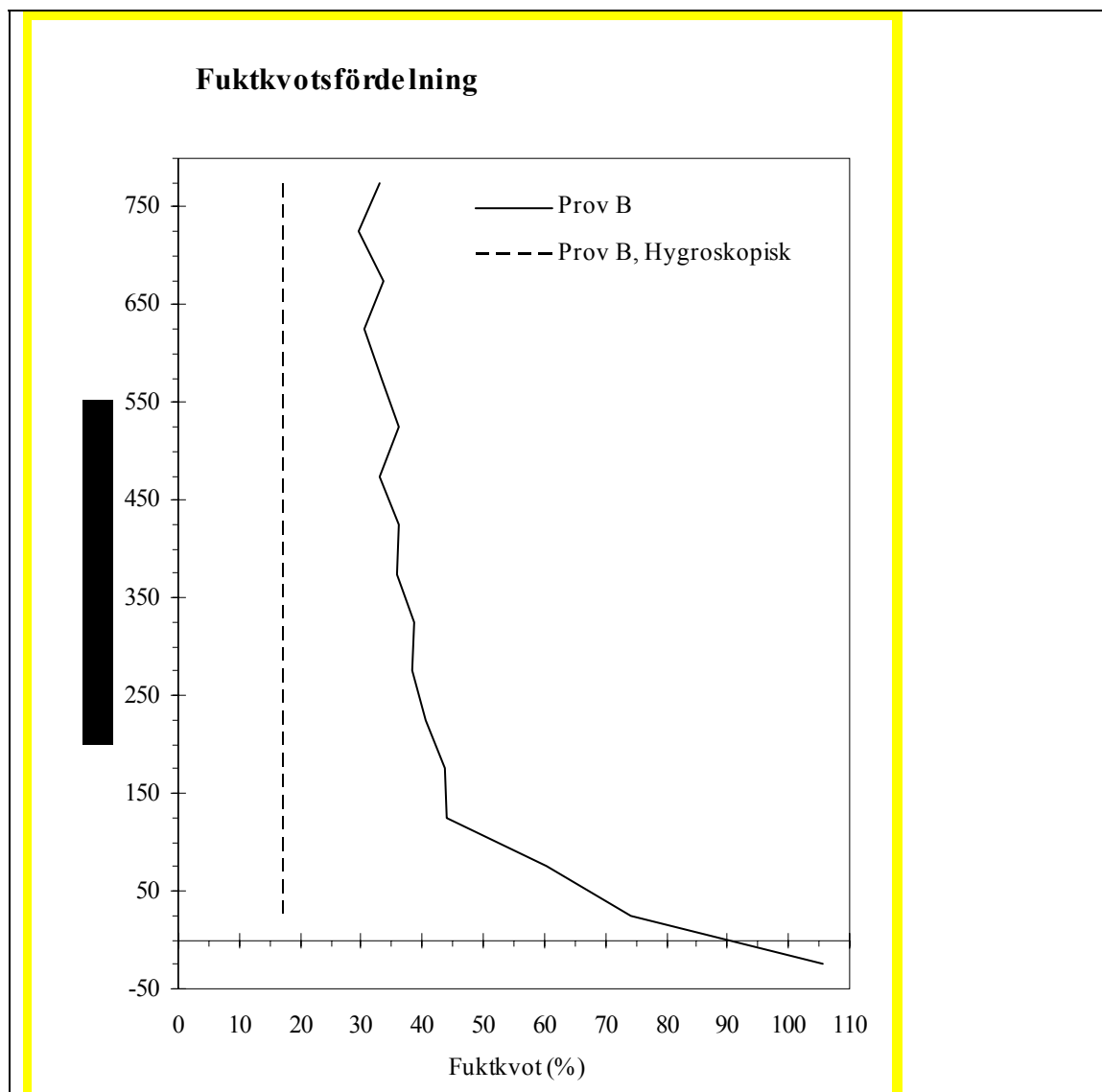
Figure 28. Capillary height when rising, peat ash

Tabell 25. Processaska, Vikt vått och torrt prov i skikt samt fuktkvotsfördelning

Table 25. Process ash, wet and dry weight in layers and moisture ratio distribution

Höjd över fri vattenyta Skikt	Medelnivå	Vikt vått prov Prov B	Vikt torrt prov Prov B	Fuktkvot Prov B
(mm)	(mm)	(g)	(g)	(%)
750-800	775	748	563	33
700-750	725	929	717	30
650-700	675	683	511	34
600-650	625	882	675	31
550-600	575	884	664	33
500-550	525	776	570	36
450-500	475	828	623	33
400-450	425	777	570	36
350-400	375	789	581	36
300-350	325	749	541	39
250-300	275	829	599	38
200-250	225	962	685	40
150-200	175	847	589	44
100-150	125	909	630	44
50-100	75	994	620	60
0-50	25	844	485	74
(-50--0)	-25	666	324	105
Hygroskopisk fuktupptagning		502	429	17
Summa, prov i rör		14098	9947	

Kapillär höjd vid stigning (mm)	Prov B
Fuktkvotskurvans skärning av hygroskopisk fuktkvot	> 800
Övre nivån där fuktkvoten börjar bli konstant	> 800
Sammanvägt:	> 800



Figur 29. Kapillär höjd vid stigning, processaska

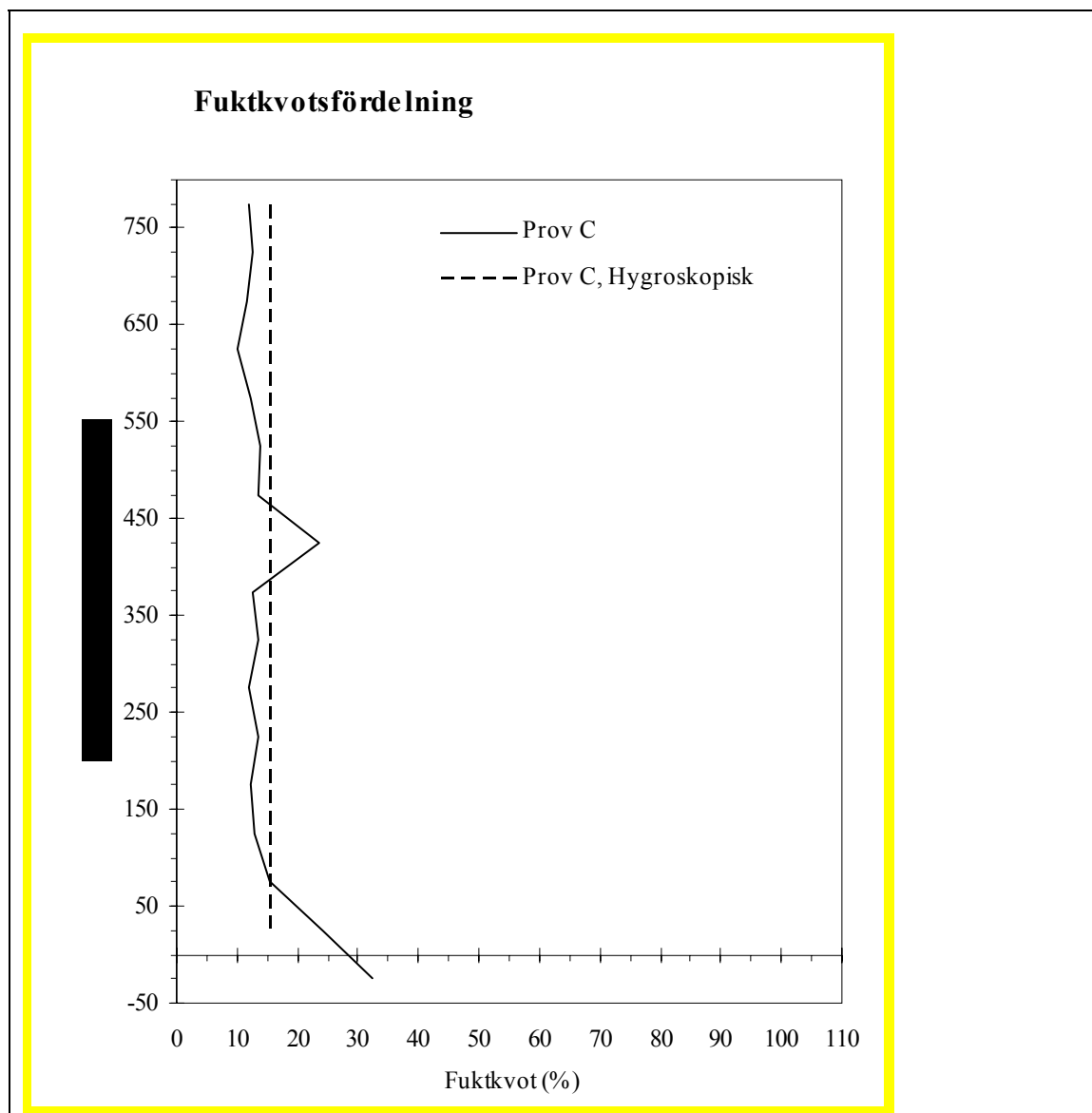
Figure 29. Capillary height when rising, process ash

Tabell 26. Slaggrus, vikt vått och torrt prov i skikt samt fuktkvotsfördelning

Table 26. MSWI bottom ash, wet and dry weight in layers and moisture ratio distribution

Höjd över fri vattenyta Skikt	Medelnivå	Vikt vått prov Prov C	Vikt torrt prov Prov C	Fuktkvot Prov C
(mm)	(mm)	(g)	(g)	(%)
750-800	775	863	772	12
700-750	725	1254	1114	13
650-700	675	1134	1017	12
600-650	625	1227	1115	10
550-600	575	1228	1093	12
500-550	525	1321	1161	14
450-500	475	1146	1009	14
400-450	425	1243	1006	24
350-400	375	1267	1125	13
300-350	325	1118	986	13
250-300	275	1180	1056	12
200-250	225	1088	960	13
150-200	175	1057	941	12
100-150	125	1113	987	13
50-100	75	1134	983	15
0-50	25	1251	1006	24
(-50--0)	-25	1329	1003	32
Hygroskopisk fuktupptagning		893	774	15
<i>Summa, prov i rör</i>		<i>19953</i>	<i>17332</i>	

Kapillär höjd vid stigning (mm)			Prov C
Fuktkvotskurvans skärning av hygroskopisk fuktkvot			75
Övre nivån där fuktkvoten börjar bli konstant			75
Sammanvägt:			75



Figur 30. Kapillär höjd vid stigning, slaggrus

Figure 30. Capillary height when rising, MWSI-bottom ash

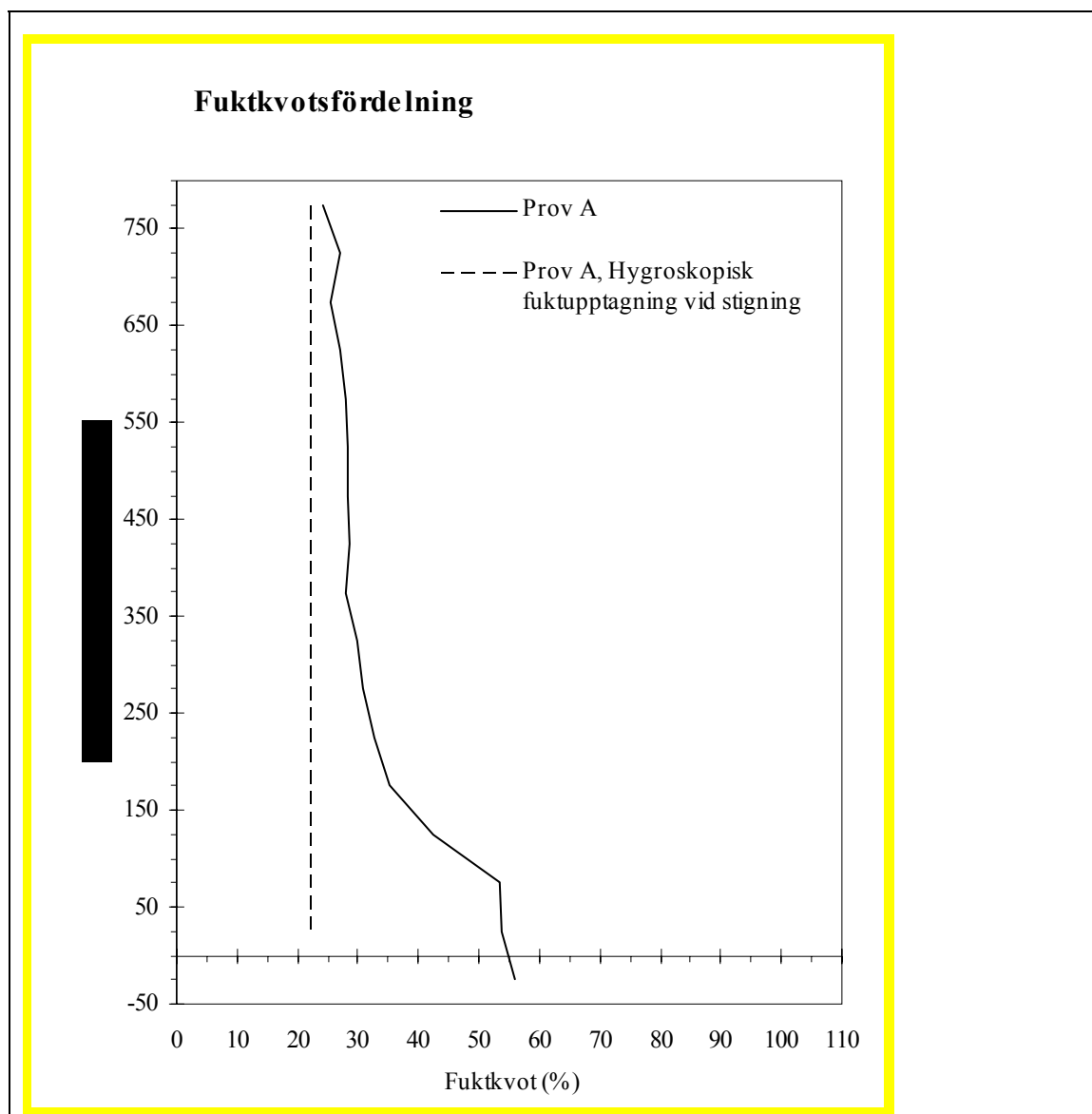
Tabell 27. Torvpulveraska, kapillär höjd vid dränering, Vikt vått och torrt prov i skikt samt fuktkvotsfördelning

Table 27. Peatash, capillary height when draining, wet and dry weight in layers and moisture ratio distribution

Höjd över fri vattenyta Skikt	Medelnivå	Vikt vått prov Prov A	Vikt torrt prov Prov A	Fuktkvot Prov A
(mm)	(mm)	(g)	(g)	(%)
750-800	775	515	415	24
700-750	725	1061	836	27
650-700	675	1078	859	26
600-650	625	1134	892	27
550-600	575	1151	899	28
500-550	525	1198	934	28
450-500	475	1090	850	28
400-450	425	1015	790	29
350-400	375	1106	864	28
300-350	325	1098	845	30
250-300	275	1089	832	31
200-250	225	789	595	33
150-200	175	1043	771	35
100-150	125	1360	955	42
50-100	75	1125	733	53
0-50	25	840	547	54
(-50--0)	-25	1209	776	56
Hygroskopisk fuktupptagning*		537	440	22
Summa, prov i rör		17900	13393	

* Avser hygroskopisk fuktupptagning vid stigning

Kapillär höjd vid dränering (mm)	Prov A
Övre nivån där fuktkvoten börjar bli konstant	350



Figur 31. Kapillär höjd vid dränering, torvpulveraska

Figure 31. Capillary height when draining, peat ash

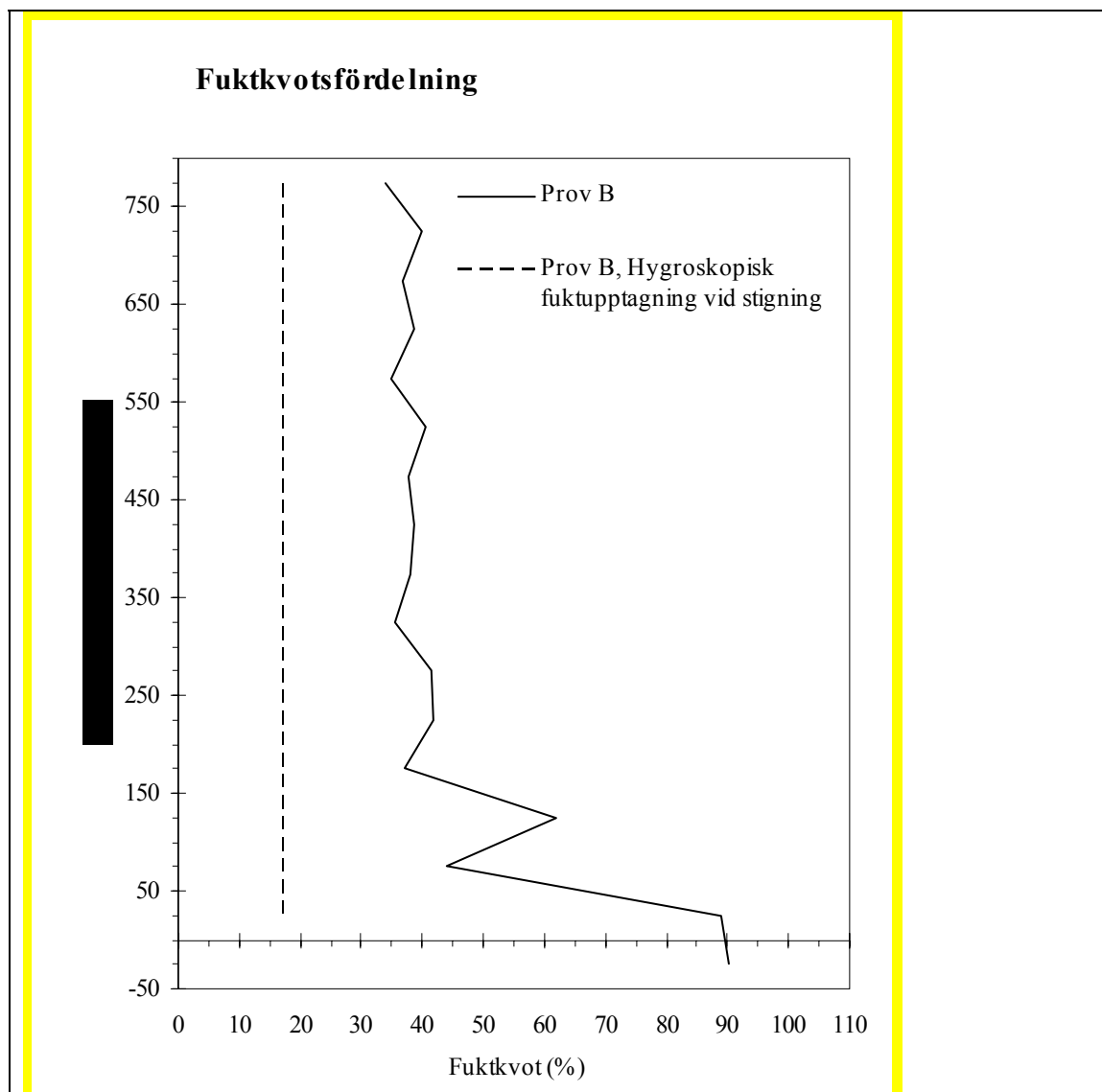
Tabell 28. Processaska, kapillär höjd vid dränering, Vikt vått och torrt prov i skikt samt fuktkvotsfördelning

Table 28. Process ash, capillary height when draining, wet and dry weight in layers and moisture ratio distribution

Höjd över fri vattenyta Skikt	Medelnivå	Vikt vått prov Prov B	Vikt torrt prov Prov B	Fuktkvot Prov B
(mm)	(mm)	(g)	(g)	(%)
750-800	775	653	487	34
700-750	725	836	598	40
650-700	675	809	592	37
600-650	625	857	618	39
550-600	575	748	554	35
500-550	525	829	590	40
450-500	475	825	598	38
400-450	425	872	629	39
350-400	375	748	541	38
300-350	325	871	642	36
250-300	275	852	603	41
200-250	225	846	597	42
150-200	175	877	639	37
100-150	125	927	572	62
50-100	75	806	560	44
0-50	25	937	496	89
(-50--0)	-25	711	374	90
Hygroskopisk fuktupptagning*		502	429	17
Summa, prov i rör		14004	9691	

* Avser hygroskopisk fuktupptagning vid stigning

Kapillär höjd vid dränering (mm)	Prov B
Övre nivån där fuktkvoten börjar bli konstant	> 800



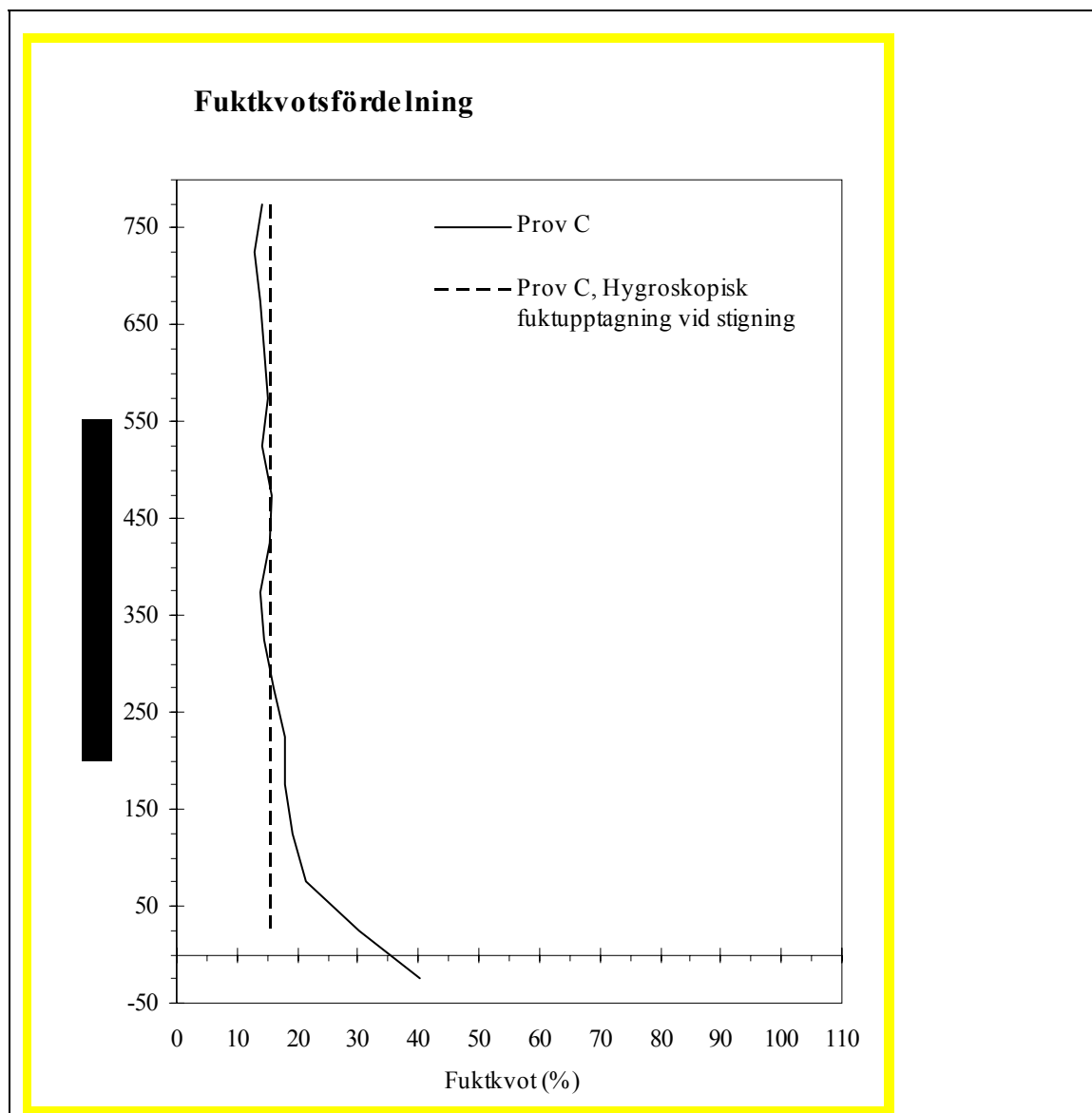
Figur 32. Kapillär höjd vid dränering, processaska

Figure 32. Capillary height when draining, process ash

Tabell 29. Slaggrus, kapillär höjd vid dränering, Vikt vått och torrt prov i skikt samt fuktkvotsfördelning

Table 29. MSWI bottom ash, capillary height when draining, wet and dry weight in layers and moisture ratio distribution

Höjd över fri vattenyta Skikt	Medelnivå	Vikt vått prov Prov C	Vikt torrt prov Prov C	Fuktkvot Prov C
(mm)	(mm)	(g)	(g)	(%)
750-800	775	1033	907	14
700-750	725	1331	1179	13
650-700	675	1010	888	14
600-650	625	1218	1065	14
550-600	575	1259	1096	15
500-550	525	1339	1172	14
450-500	475	1139	985	16
400-450	425	1106	959	15
350-400	375	876	770	14
300-350	325	1559	1360	15
250-300	275	1353	1167	16
200-250	225	1282	1088	18
150-200	175	1125	953	18
100-150	125	1226	1028	19
50-100	75	1209	997	21
0-50	25	1088	835	30
(-50--0)	-25	1081	771	40
Hygroskopisk fuktupptagning*		893	774	15
Summa, prov i rör		20234	17219	
* Avser hygroskopisk fuktupptagning vid stigning				
Kapillär höjd vid dränering (mm)				Prov C
Övre nivån där fuktkvoten börjar bli konstant				275



Figur 33. Kapillär höjd vid dränering, slaggrus

Figure 33. Capillary height when draining, MSWI-ash

Frostbeständighet

Bilaga G

Funktionskravet ”materialet måste vara frostbeständigt” innebär att det inte får brytas ned (mer än marginellt) av upprepade frys-tö-växlingar. Detta testas normalt med SS-EN 1367-1. Principen denna metod är att en fraktion siktas fram, t ex 8/16 mm, som utsättes för frys-tö-växling 10 ggr. Därefter kontrolleras hur mycket av materialet (procentandel) som passerar en sikt med halva maskvidden för den nedre fraktionsgränsen (i detta fall 4 mm). Denna procentandel utgör resultatet av testet.

Dessutom finns ett informativt annex (B) som ger möjlighet att prova med 1 % NaCl lösning istället för rent vatten. Detta har tidigare visat sig ge en bättre överensstämmelse med dokumenterad beständighet hos naturlig ballast. Sannolikt lämpar sig inte salttillägget för provning av askor eller andra mycket porösa material.

Det finns dock en frys-tö-metod speciellt framtagen för lättballast som heter prEN13055-1, Bilaga C. Principen är ungefär densamma som SS-EN1367-1 men provparametrarna är speciellt anpassade för lättballast. Det är framför allt två skillnader mellan metoderna. I SS-EN1367-1 ligger proverna i vatten hela tiden. Det betyder att man kan köra hela provningen automatiskt i frysar som varierar temperaturen enligt en förprogrammerad kurva. I lättballastmetoden, prEN13055-1, frysförvaras proverna dränerade. Sedan tinas de i vattenbad, varefter vattnet får rinna av igen innan de sätts tillbaka i frysen. Detta måste göras manuellt. Dessutom krävs 20 cykler i lättballastmetoden, mot normala 10. Eftersom askor påminner om lättballast både med avseende på skrymdensitet och på porositet, rekommenderas att prEN13055-1 används.

Tidigare projekt [2] har gett värden (med metod EN1367-1) på frostbeständigheten på 1,4 % (kolbottenaska), 3,9 % (slaggrus), 8,2 % (krossad betong) och 0,1 % (referensmaterial) då de undersöktes enligt EN1367-1, utan NaCl. Observera att materialet i dessa provningar inte var vattenmättat, varför resultaten kan vara missvisande.

I föreliggande försök har materialen testats enligt prEN13055-1, Bilaga C, dels med den traditionella vattenabsorptionstiden 1 dygn, dels med material som vattenmättats med vakuum-metoden som beskrivs under [17].

G.1 Resultat

Resultatet av de prover som vattenmättats enligt traditionella vattenabsorptionstiden 1 dygn redovisas i Tabell 30.

Tabell 30. Vattenmättning i 1 dygn

Table 30. Water absorption, 24 hours

Provbe- tecknin g	Invägning före provning, (före M ₁), g	Invägning efter provning (efter M ₂), g	Resultat, F, %	Medelvärde
A1	978,9	792,7	19,02	
A2	993,6	804,9	18,99	18,5
A3	976,4	805,3	17,52	
B1	900,9	800,2	11,18	
B2	912,5	819,2	10,22	10,1
B3	912,8	832,1	8,84	
C1	1147,4	1071,1	6,65	
C2	1188,9	1105,7	7,00	6,8
C3	1120,3	1045,6	6,67	

Resultatet av de prover som vattenmättats enligt vakuum-metoden [17] redovisas i Tabell 31 nedan.

Tabell 31. Vattenmättning enligt vakuum-metoden

Table 31. Water absorption according to the vacuum-method

Provbe- tecknin g	Invägning före provning, (före M ₁), g	Invägning efter provning (efter M ₂), g	Resultat, F, %	Medelvärde
A1	963,07	824,27	14,41	
A2	958,20	857,09	10,55	12,5
A3	976,43	853,04	12,64	
B1	980,62	930,47	5,11	
B2	1020,87	956,38	6,32	5,3
B3	1003,13	957,78	4,52	
C1	1119,95	1055,30	5,77	
C2	1151,75	1090,38	5,33	6,6
C3	1151,12	1050,54	8,74	

Tjällyftningsegenskaper

Bilaga H

Bestämning av tjällyftningshastighet har utförts för bottenaska ifrån Uppsala (torvpulverbottenaska) och Holmen (processaska). För slaggruset från Umeå har inte tjällyftningshastigheten bestämts på grundval av askans kornstorleksfördelning och permeabilitet samt att tidigare arbeten [2] har visat att slaggrus med jämförbara tekniska egenskaper inte är tjällyftande.

H.1 Sammanfattning av provningsmetoden

Vid bestämning av tjällyftningshastighet utförs ett frystest med det aktuella materialet. Ett 600 mm högt cylinderformat prov med värmeisolerad mantelyta fryses med hjälp av ett kylelement som placeras på provets topp. Frysningen sker med konstant tjälnedträngningshastighet. Utrustningen är så konstruerad att lyftningen sker utan motstånd från fastfrysning. Prov kan tas dels ostört i fält och därefter pressas in i den cylinder som används vid frysningen, och dels packas direkt i testcylinder. Frystestet avbryts efter tre dygn och lyftningshastigheten bestäms som medelvärdet under sista dygnet. Figur 34 visar den utrustning som används vid VTI.



Figur 34. Frysutrustningen vid VTI för att prova tjällyftningsegenskaper

Figure 34. The freezing equipment at VTI to test frost heave characteristics

H.2 Provberedning

Tillverkning av tjällyftningsprover går till så att ett fuktigt material packas i tjälcylindern. På en tom cylinder monteras en stålhatt. Cylinder och hatt vänds upp-och-ned. Materialet fylls på i lagom delmängder och packas med lämplig stamp, ofta en

Proctorstamp. Efter packning vägs provet och volymen bestäms (full cylinder ca 6,9 dm³). Vattenkvot bestäms på ett parallellt prov och torrdensitet/packningsgrad kan beräknas.

Frysning

Provet fryses uppifrån, med hjälp av kylelement, under tre dygn i omgivningstemperatur 4 – 5 °C med tjälnedträngningshastigheten 20 mm per dygn. Under frysningen är provet belastat motsvarande ungefär 0,5 m överbyggnad och isolerat i enlighet med figur 1. Tjällyftningen registreras varje timme.

H.3 Provningserfarenheter

Manuell packning av tjälprover är under utveckling och packning av askor är också speciellt som ju skiljer från konventionella material vad gäller densitet och vattenkvot. Materialmängder vägdes upp för motsvara 100 % packningsgrad och vatten för vattenkvot lika med den optimala. Cylindrarna för frys försök har volymen 6,9 dm³. Proverna packades för hand med stamp för modifierad Proctor (4,5 kg). Packningsgraderna 100 % uppnåddes inte.

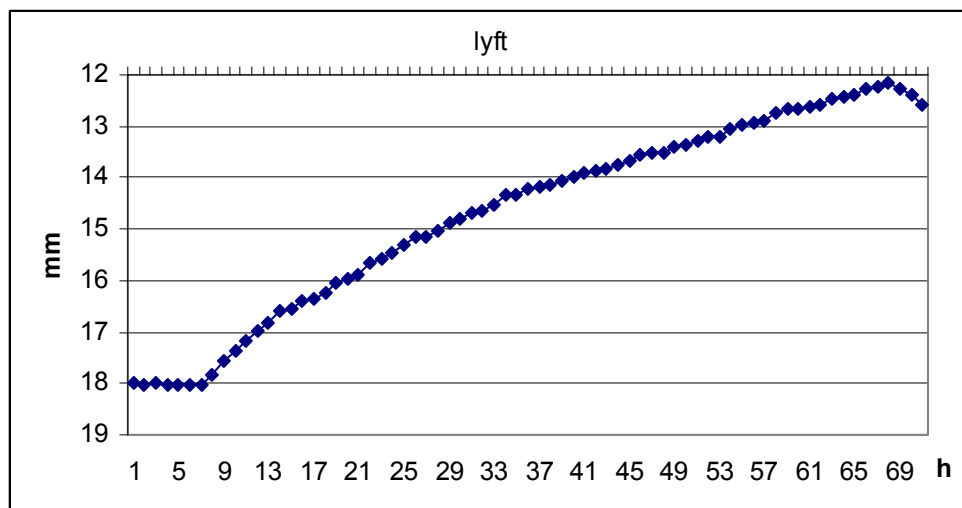
Tabell 32. Vattenkvot och uppnådd packningsgrad för torvpulveraskan och processaskan

Table 32. Water ratio and reached packing result for the peat ash and for the process ash

	Torvpulveraska Uppsala	Processaska Holmen "torr"	Processaska Holmen "våt"
Packningsgrad	84,3 %	83,3 %	83,3 %
Vattenkvot	28,4 %	28,4 %	40,4 %

H.4 Bestämning av tjällyftningshastighet för torvpulveraska och processaska

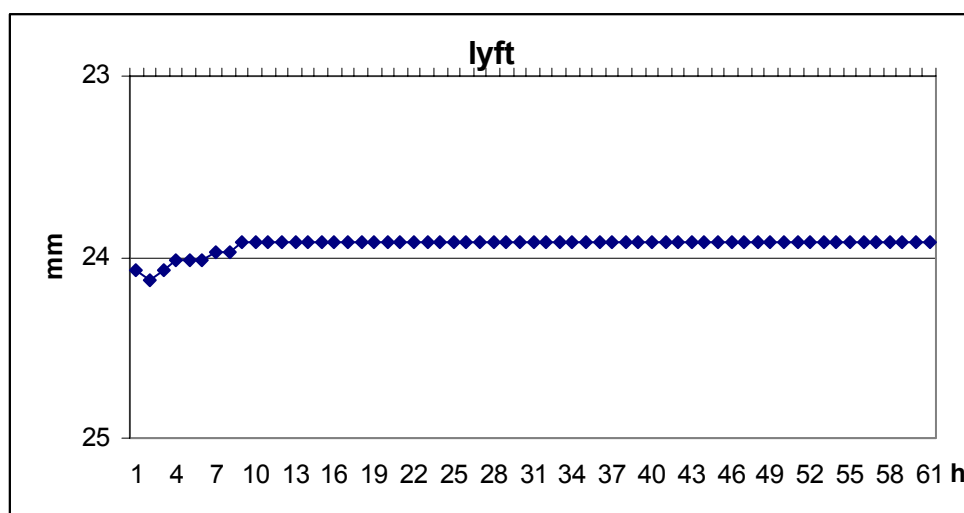
Torvpulveraskan från Uppsala har frystestats i enlighet med Vägverkets metodbeskrivning för bestämning av tjällyftningshastighet. Figur 35 visar att provet lyfte ungefär 6 mm under testets tre dygn. Tidigare har en stor mängd material tillhörande olika tjälfarlighetsklasser, enligt Vägverkets klassificering, testats vid VTI. Material tillhörande den högsta tjälfarlighetsklassen har då visat lyftningshastigheter ungefärligen i intervallet 0,04 – 0,25 mm/h. Det nu aktuella materialet lyfte 0,07 mm/h under testets sista dygn vilket innebär att det är jämförbart med de mindre tjälfarliga i klassen av mest tjälfarliga jordarter.



Figur 35. Lyftning för material från Uppsala under tre dygns frystest

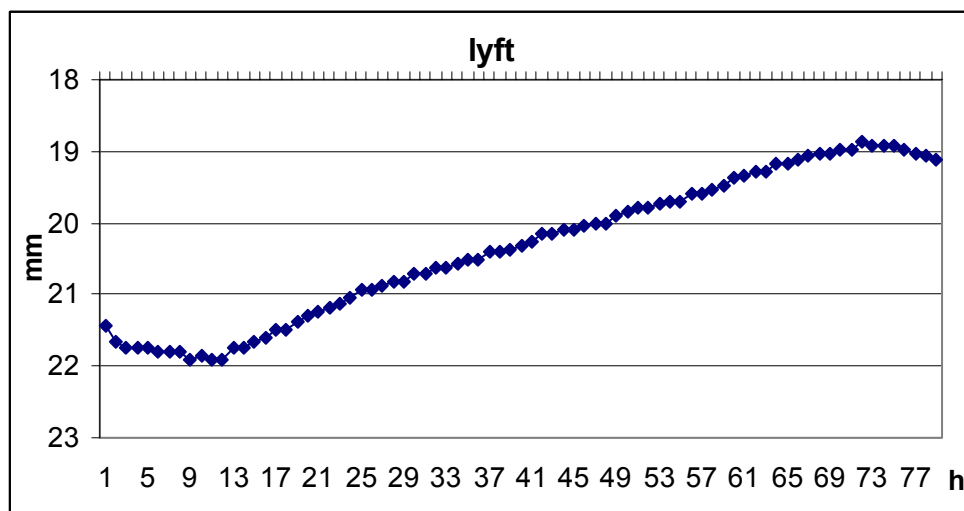
Figure 35. The heave for the Uppsala material during three days of freezing test

Material från Holmen testades först vid vattenkvot 28 % (optimal vattenkvot, se Bilaga K) och lyfte då obetydligt, se Figur 36. Utan ompackning dränktes sedan provet i vatten under 1 dygn och fick därefter stå upprätt och dränera under 3 dygn (över en helg). Provets vattenkvot hade då ökat till 40 %. Förfarandet kan tänkas efterlikna att materialet används i en väl-dränerad vägkonstruktion men utsätts för mycket vatten till exempel genom sprickor i beläggningen. Det följande frystestet gav en väsentlig lyftning, tre mm totalt under tre dygn och 0,05 mm/h i genomsnitt under det sista dygnet, se Figur 37. Även detta är jämförbart med lyfthastigheten hos vissa material i den mest tjälfarliga klassen enligt Vägverkets klassificering.



Figur 36. Lyftning för material från Holmen vid vattenkvot 28,4 % under tre dygns frystest

Figure 36. The heave for the process ash during three days of freezing test, water content 28,4 %



Figur 37. Lyftning för material från Holmen vid vattenkvot 40,4 % under tre dygns frystest

Figure 37. The heave for the Holmen ash during three days of freezing test, water content 40,4 %

Värmekonduktivitet

Bilaga I

Värmekonduktivitet är ett mått på hur väl värme leds igenom materialet. Detta har betydelse för hur väl materialet isolerar och alltså skyddar mot tjäle längre ner i konstruktionen.

Vatten har en betydligt högre värmekonduktivitet än luft. För porösa material är därför värmekonduktiviteten starkt beroende av fukthalten. Torra material isolerar bättre än fuktiga och vanligen är det ett linjärt förhållande mellan dessa tillstånd. Därför provas denna parameter både på torrt och fuktigt prov. Även kornstorleken och packningsgraden påverkar värmekonduktiviteten. Materialet packas därför på ett standardiserat sätt för att resultaten skall bli jämförbara.

I.1 Provningens utförande

Provningen utfördes enligt metod SS-EN 12664:2001 (De metoder som rekommenderas i ATB-Väg heter ISO 8301 och ISO 8302. Den aktuella metoden, SS-EN 12664-2001 bygger på ISO-standarderna och skall vid korrekt hantering ge helt och hållet likvärdiga resultat) Metoden för värmekonduktivitmätningar går till så att provkroppen placeras mellan en varm och en kall yta. Så småningom blir temperaturen i provkroppen konstant och temperaturen samt värmeflödet kan mätas.

Provningen påbörjas med att materialets fukthalt vid ankomsten bestäms och fukthalten justeras sedan genom vattentillsats så att optimal vattenkvot erhålls enligt packningsförsöken som redovisas på annan plats i denna rapport. Denna optimala vattenkvot är väsentlig för att få rätt packningsgrad. Materialet hålls ut i en plastinklädd låda och packas genom att en 7,7 kg tyngd får falla på provet från 1 dm höjd 20 ggr. Provet vibreras i 5 minuter, varefter ytan slätas till.

Det packade provet torkas sedan i 105°C i minst 3 dygn, varvid allt adsorberat vatten försvinner. Provet hanteras sedan i den plastinklädda lådan för att hindra fukthaltsförändringar. Värmekonduktiviteten bestäms därefter på det torra provet. Sedan bevattnas överytan med en bestämd mängd vatten så att önskad fuktkvot erhålls innan värmekonduktiviteten mäts igen.

I.2 Förslag till funktionskrav kontra verkliga provförhållanden

I.2.1 Metodval

ISO 8301 är en metod där man mäter värmeflödestäthet med kalibrerade värmeflödesmätare. Den andra metoden, ISO 8302 bygger på en delvis annan apparatur, där värmeflödet mäts för den tillförda elektriska effekten. Dessutom registreras i båda metoderna omgivningens temperatur, materialets tjocklek och temperaturskillnaden mellan provets kalla och varma sida. För bägge metoderna erhålls likvärdiga värden för värmekonduktivitet eller värmemotstånd med korrekt kalibrerade utrustningar [36].

I.2.2 Frysta provkroppar

I normala fall mäts värmekonduktivitet vid en omgivningstemperatur på 10°C i klimatkammare. Om provet skall frysas måste man sänka temperaturen, vilket kan vara praktiskt besvärligt.

För att få ett korrekt resultat måste provet packas och sedan hållas packat under hela mätningen. Frysta prover kan inte packas på samma sätt som prover som håller plusgrader. Om man packar först riskerar man att provet expanderar när det fryses. Det är mycket ovanligt att prova frysta provkroppar, men det har gjorts på cellplast. Detta material är dock betydligt enklare att hantera än en aska. Det suger mycket små mängder vatten och är tillräckligt poröst och stabilt för att behålla sin form. Hela cellplastskivor behöver dessutom inte packas på det sätt som kornformade lösviktsmaterial.

Dock kan man alltid komma runt praktiska problem, även om det kan bli besvärligare och mer tidsödande. Skall man prova frysta prover är följande den mest realistiska metoden:

1. Önskad fukthalten för packning bestäms.
2. Provet fuktas upp till denna fuktighet.
3. Packning.
4. Torkning.
5. Vatten tillförs sedan så att önskad fuktkvot erhålls.
6. Provet sätts in i apparaten (medeltemp 10°C, temperaturer 20/0°C) under 1-2dygn så att fukten fördelas jämnt i provet.
7. Temperaturen sänks sedan till medeltemp ca -5°C (temperaturer 0/-10°C)
8. Mätning av värmekonduktivitet som vanligt.

Sammanfattningsvis är det alltså fullt möjligt att prova frysta provkroppar. Dock kan det generera en del praktiska problem med att hålla kylan och packa provet. Vid expanderande prover insmyger sig också en felkälla som gör provningsresultatet mindre relevant. Expansionen vid frysning får då mätas i förväg. Dessutom får apparaturen kalibreras för kallare temperaturer, t ex -10°C.

1.2.3 Vattenmättnad

Även vattenmättnaden är ett litet bekymmer. För att vara säker på vilken vattenhalt man har är det enklast att torka provet och sedan tillsätta en bestämd mängd. Det packade provet suger upp vattnet och det fördelar sig självt i hela provmängden genom temperaturskillnaden över provet (ångdiffusion) och med hjälp av kapillärkrafterna. Om man skulle vattenmätta under mycket lång tid först riskerar man att pressa ut en del vatten i packningen, varvid man får en osäkerhet i vattenhalten. Att hålla provet packat under den tid som det tar att vattenmätta proverna genom t ex nedsänkning i vatten är också svårt. Snabbmetoder såsom vakuummetoden har större chanser att fungera. Här krävs eventuellt lite metodutveckling. Dock sker det mesta av vattenupptaget omedelbart, varför felet inte blir så stort. Dessutom är sambandet linjärt mellan vattenkvot och värmekonduktivitet om fukten är tillräckligt jämnt fördelad över provet.

Det som händer först när vatten sätts till ett torrt prov är att vattnet sprider sig emellan kornen. Därefter börjar det tränga in i porerna, och denna process är betydligt långsammare. Ett poröst material som hålls vid samma fuktkvot en längre tid blir alltså något torrare på partikelytorna med tiden allteftersom vattnet tränger in i partiklarna. Om och hur detta påverkar värmekonduktiviteten är inte utrett.

Ofta vill man inte ha helt vattenmättat prov utan vill mäta på t ex halva vattenmättnaden. Det finns i dagens läge inte något bättre sätt att åstadkomma det än den befintliga metoden för värmekonduktivitmätning. Snabbmetoderna såsom kokning eller vakuum är i praktiken omöjliga att stoppa innan total vattenmättnad uppnåtts. Den, förmodligen lilla, osäkerhet som kommer sig av att vattenabsorptionen inte sker momentant spelar förhoppningsvis inte något avgörande roll.

1.3 Resultat

Hur de aktuella askorna står sig gentemot andra material visas i Figur 16. Det visar sig att askorna i detta projekt stämmer mycket väl överens med Vägverkets resultat för kolbottenaska och slaggrus [2]. Askorna har en flackare kurva än krossad betong, och alla alternativa material har betydligt större isoleringsförmåga än den traditionella ballast som använts som referens. Man bör dock komma ihåg att traditionell ballast inte tar upp vatten lika lätt som porösare material. En traditionell ballast och en porös aska som ligger i samma väg under samma klimatbetingelser kan ha helt olika fuktkvot. Man kan dock konstatera att alla askorna isolerar betydligt bättre än både traditionell ballast och krossad betong vid alla fuktkvoter.

Permeabilitet

Bilaga J

J.1 Provningsförfarenheter

Provning av permeabilitet gjordes av SGI. Inga speciella avvikelser eller liknande har rapporterats från provningen, som utfördes med rörpermeameter enligt Nordtest Technical Report 254.

J.2 Resultat

Resultat för permeabilitet visas framgår Tabell 8 i kapitel 4.

Både processaskan och slaggruset har värden på permeabiliteten som är i storleksordning med andra material, alternativa så väl som konventionella (se Tabell 33. Referensvärden för permeabilitet nedan).

Tabell 33. Referensvärden för permeabilitet

Table 33. Reference values for permeability

Material	Permeabilitet	Metod	Källa och kommentar
Kolbottenaska	$2 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-5}$	Rörpermeameter	Provn.metoder alternativa mtrl VV [2]
Slaggrus	$9 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6}$	Rörpermeameter	Provn.metoder alternativa mtrl VV[2]
Betongkross	$1 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-6}$	Rörpermeameter	Provn.metoder alternativa mtrl VV[2]
Referensmaterial	$3 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-6}$	Rörpermeameter	Referensmaterialet bestod av ett sandigt grus [2]
Grusig morän	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-5}$	flera olika metoder	Fagerström och Wiesel 1972 [40]
Sandig morän	$1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-6}$	flera olika metoder	Fagerström och Wiesel 1972 [40]
Siltig morän	$1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-7}$	flera olika metoder	Fagerström och Wiesel 1972 [40]
Bottenaska Skärblacka (från bark(2/3)/olja(1/3) förbränning)	$> 1 \cdot 10^{-6}$	Celltrycks-permeameter	Gustafsson et al. [13]

Packningsegenskaper

Bilaga K

Packningsegenskaper har utförts enligt SS-EN 13286-2:2004 ”Provningsmetod för laboratoriemässig bestämning av referensdensitet och vatteninnehåll -Proctorinstampning”.

Proctormetoden innebär att man låter en stamp falla från en viss höjd, ett antal gånger för varje angivet packningslager, ner i en standardiserad provcylinder. En serie instampningar görs med olika vattenkvoter. Torr skrymdensitet beräknas för varje instampning. Den högsta torra skrymdensiteten anges som referensdensitet även kallat maximal torr skrymdensitet. Den vattenkvot som ger referensdensiteten anges som optimal vattenkvot.

SS-EN 13286-2 anger två packningsvarianter, (standard) Proctor och modifierad Proctor. Skillnaden mellan dessa är tillförd packningsenergi vilket regleras med stampens vikt, fallhöjd och antalet lager. I Sverige och på VTI är modifierad Proctor vanligast. I detta projekt har (standard) Proctor använts då modifierad Proctor kan orsaka stor nedkrossning av spröda partiklar vilket inte är osannolikt för askor. Stor nedkrossning ger för hög referensdensitet som kan leda till problem med att uppnå önskade packningsgrader i andra analyser och i fält.

Beroende på kornfördelning rekommenderas en av tre olika packningscylindrar. I detta projekt har packningscylinder ”B” valts med diameter 150 mm och höjd 120 mm vilket innebär en volym på ca 2,1 dm³. För packningscylinder B skall stampen ha en diameter på 50 mm och 56 slag per lager. I Tabell 34 anges övriga relevanta värden för både Proctor och modifierad Proctor.

Tabell 34 Jämförelse mellan Proctor och modifierad Proctor

Table 34. Comparison between Proctor and modified Proctor

Variant	Stampens vikt	Fallhöjd	Antal lager	Packningsenergi
Proctor	2,50 kg	305 mm	3	Ca 0,6 MJ/m ³
Modifierad Proctor	4,50 kg	457 mm	5	Ca 2,7 MJ/m ³

K.1 Provningserfarenheter

Det var vissa svårigheter med att gaffla in optimal vattenkvot och att få fram referensdensiteter då vattenkvoterna spände över ett stort område, och att de förväntade densiteterna var osäkra samt att (Standard) Proctor var en ny erfarenhet.

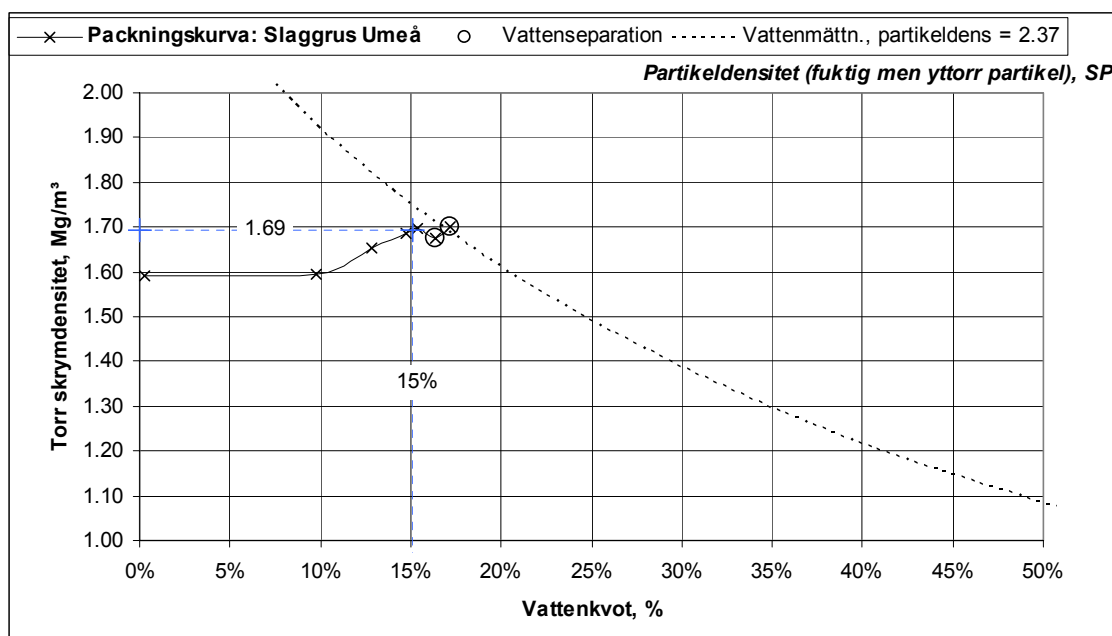
K.2 Resultat

Resultaten redovisas i Tabell 35 samt i Figur 33, Figur 34 och Figur 35. Vattenkvot anges som viktprocent dvs. andelen vatten i förhållande till torrsustans efter torkning i 105 °C till konstant vikt.

Tabell 35 Packningsegenskaper för de tre askorna

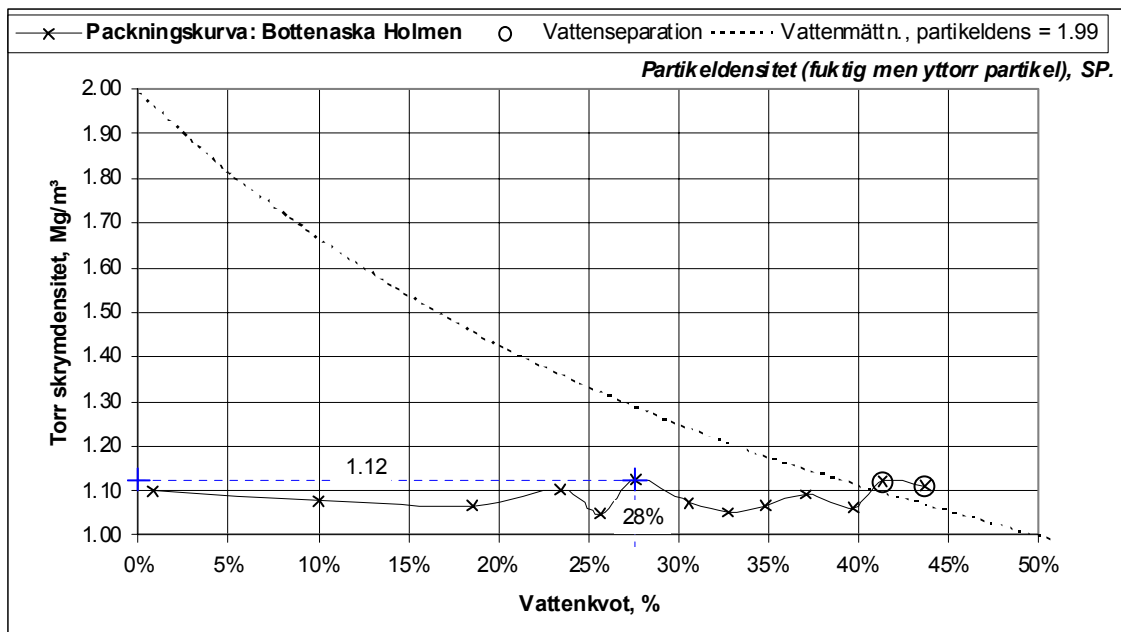
Table 35. Packing characteristics for the three ashes

Material	Optimal vattenkvot	Referensdensitet	Anmärkning
Slaggrus Umeå	15 %	1,69 Mg/m ³	Medelvärde för de två högsta densiteterna utan vattensep.
Processaska Holmen	28 %	1,12 Mg/m ³	-
Torvpulveraska Uppsala	24 %	1,46 Mg/m ³	-



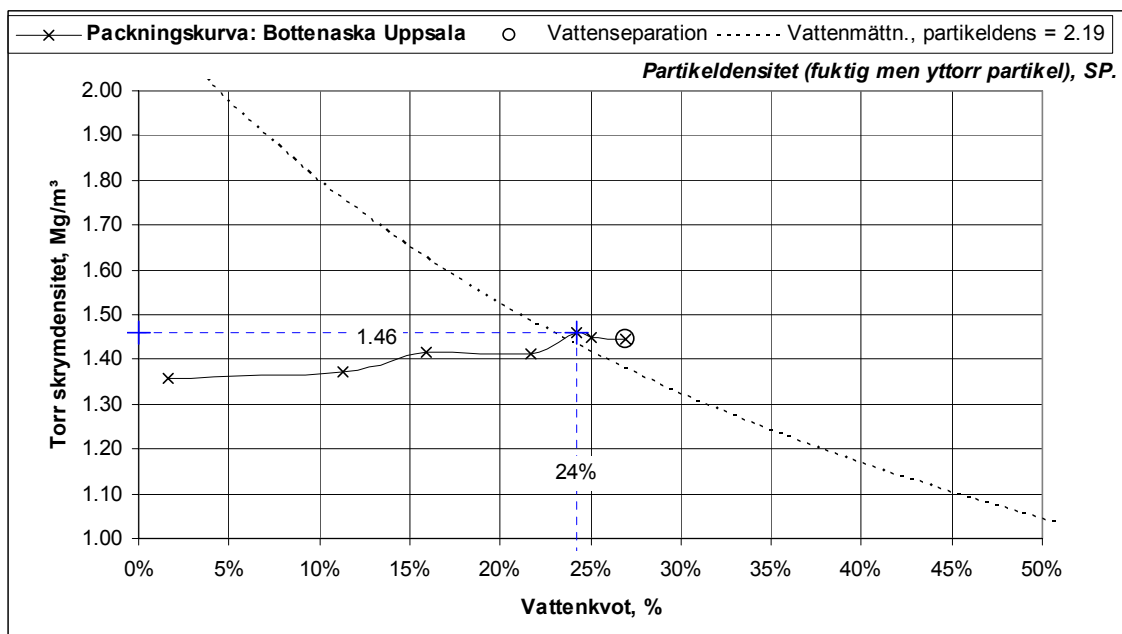
Figur 38. Packningskurva för slaggrus Umeå.

Figure 38. Packing curve for MSWI-ash from Umeå



Figur 39. Packningskurva för processaska från Holmen.

Figure 39. Packing curve for process ash from Holmen

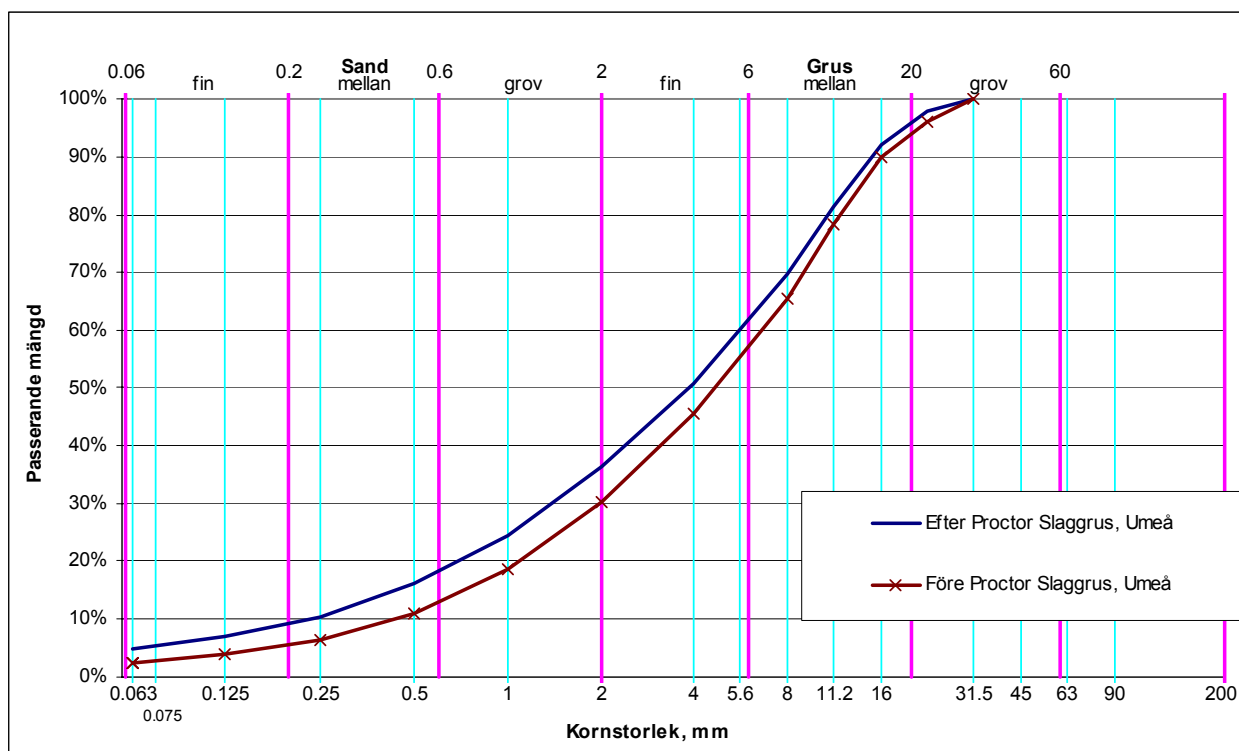


Figur 40. Packningskurva för torvpulveraska från Uppsala.

Figure 40. Packing curve for peat ash from Uppsala.

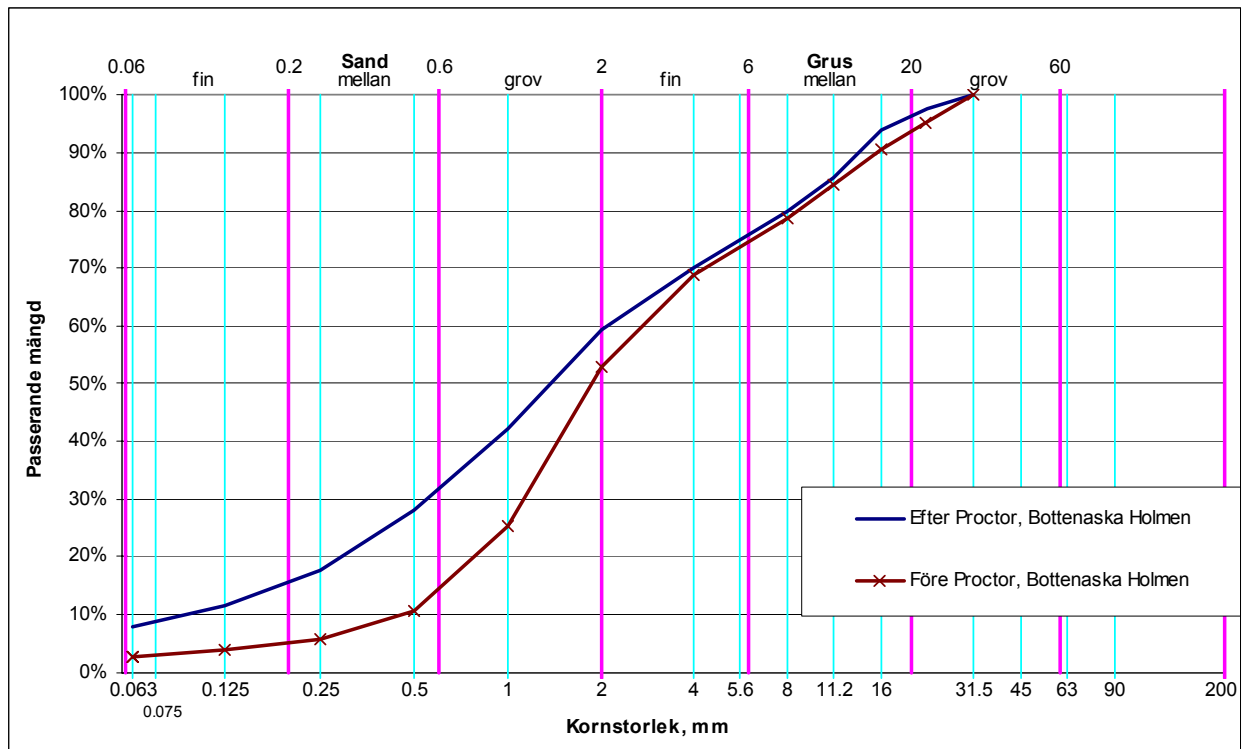
Kontroll av nedbrytning i Proctorinstampning

Kontroll av nedkrossningen har gjorts genom siktning enligt Bilaga B på ett slumpmässigt utvalt prov före och efter Proctorinstampning. Siktning innan packning utfördes enligt Gilsontsiktning ned till 1 mm, kurvan mindre än 1 mm är beräknad från materialbeskrivande kornstorleksfördelning. Siktning efter packning gjordes med Gilsontsiktning ned till 1 mm och material mindre än 1 mm tvättsiktades vid 0,063 mm och Pascalsiktades. Resultatet framgår av Figur 41 till Figur 43 nedan.



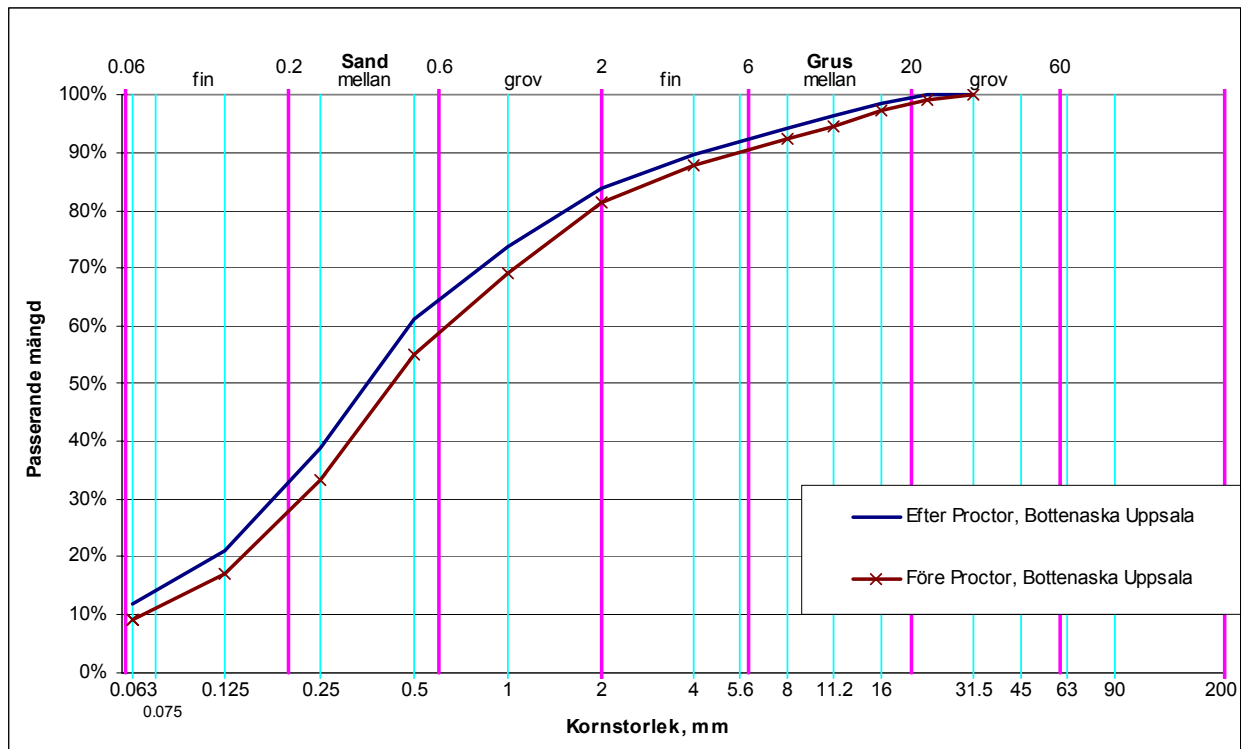
Figur 41. Kornkurva före och efter Proctorinstampning för slaggrus från Umeå. Maximalt skiljer 6 % vid 2 mm.

Figure 41. Grain size distribution before and after Proctor packing for MSWI-ash from Umeå. The maximum difference is 6 % at 2 mm.



Figur 42. Kornkurva före och efter Proctorinstampning för processaska från Holmen. Maximalt skiljer 17 % vid 0,5 mm.

Figure 42. Grain size distribution before and after Proctor packing for process ash from Holmen. The maximum difference is 17 % at 0,5 mm.



Figur 43. Kornkurva före och efter Proctorinstampning för torvpulveraska från Uppsala. Maximalt skiljer 6 % vid 0,5 mm.

Figure 43. Grain size distribution before and after Proctor packing for MSWI-ash from peat ash from Uppsala. The maximum difference is 6 % at 0,5 mm.

Dynamiskt treaxialtest

Bilaga L

Dynamiska treaxialförsök går till så att ett cylindriskt prov med ett horisontellt/radiellt sidostöd belastas vertikalt/axiellt med en pulserande last. Syftet är att simulera verkliga belastningsförhållanden vilka sker på t.ex. en vägkonstruktion under trafikering. Dynamiska treaxialförsök används för att bestämma de mekaniska egenskaperna styvhet och stabilitet. Styvheten, eller förmågan att fördela lasten, anges som ett värde –E-modul¹ (resilient modul). Ju högre E-modul desto styvare är materialet. Stabiliteten, eller förmågan att motstå omlagringar, anges som den ackumulerade permanenta töjningen². Ju mindre den permanenta töjningen är desto stabilare är materialet.

Sidostödet skapas genom att provet kläs in i ett gummimembran som tätas mot topp- och bottenplattor, provkroppen ställs in en provkammare i vilket ett övertryck anbringas, se Figur 44.



Figur 44. Prov med gummimembran

Figure 44. Test with rubber membrane

På VTI används tre typer av tester vilka är benämnda efter de obundna lagren i en vägkonstruktion; bärlagertest, förstärkningslagertest och skyddslagertest. Det finns också en europametod fastslagen under 2004, EN 13286-7 "Cyclic load triaxial test for

¹E -modul (MPa) = dynamisk vertikalspänning (kPa)/elastisk töjning (µm/mm)

² Permanent töjning (µstrain) = kvarvarande deformation (µm)/ursprunglig höjd (m)

unbound mixtures”. I europanormen finns flera varianter av dynamiska treaxialförsök. Askorna i föreliggande projekt testas enligt VTI:s skyddslagervariant och enligt EN 13286-7 ”Multi-stage loading”, ”low stress level” (flerstegsbelastning, låg spänningsnivå). Belastningsdata anges i Tabell 38.

För att beräkna provmängden bestäms en referensdensitet (maximal torr skrymdensitet) och optimal vattenkvot för materialet. För de tre bottenaskorna så har detta bestämts genom Proctormetoden, se Bilaga K om packningsegenskaper. Härfter blandas provmaterialet med vatten och den homogeniserade blandningen packas i en speciell packningscyliner.

Proverna har diameter 150 mm och höjden 300 mm. Provet packas i ett lager i en s.k. ”Vibrocompresseur”, en utrustning som packar under vertikalt tryck samtidigt som packningscylinern vibreras. Packningsarbetet fortsätter tills provhöjden är ca 300 mm. Uppnådd höjd och vikt på provet bestäms efter packning.

Provet instrumenteras med en lastcell som mäter de krafter provet utsätts för. En lägesgivare används för att mäta vertikala deformationer, elastiska och permanenta, över hela provkroppen (300 mm). Proverna instrumenteras också med tre (interna) lägesgivare som mäter deformationer över 100 mm mitt på provet i höjddled. VTI har mätning över hela provkroppen (extern givare) vilket inte anges i Europeanormen. På VTI beräknas resultat för både de interna givarna som medelvärde och för extern givare. Den externa givaren ger säkrare resultat men påverkas av randeffekter från packningen i botten och toppen av provet. De permanenta töjningarna brukar ofta vara relativt lika oavsett om man mäter med extern eller interna givare. Det ger uteslutande mindre resilienta töjningar (högre modul) för de interna givarna kontra extern givare. Kammartrycket mäts med en elektronisk tryckgivare. För att säkerställa att provet håller atmosfärstryck och att möjliggöra ev. dränering har provet kontakt med omkringliggande atmosfär via toppplattan genom ett plaströr som är anslutet genom cylinderväggen. Testerna styrs via datorprogram.

Proverna belastas statiskt i tre dimensioner³ av kammartrycket, horisontellt utmed hela höjden och vertikalt. Den dynamiska vertikallasten fås från en hydraulcylinder som regleras av en datorkontrollerad elektriskt styrd servoventil (se Figur 44). Dessutom belastas provet med en statisk vertikallast från hydraulcylindern (min. deviatorspänning), se Tabell 38.

Mätdata registreras med styrdatorn vid vissa bestämda intervall i visst antal lastpulser. Varje lastpuls består av 100 värden per givare. I varje lastpuls för varje givare beräknas relevanta värden för att kunna beräkna resilientmodul och permanenta deformationer. Därefter beräknas medelvärden. Mätdata som används är medelvärden av tio lastpulser för respektive givare. T.ex. resultat för lastpuls 1000 är egentligen medelvärden av pulserna 991-1000.

Försöken utförs som dubbelprov för att fånga in eventuella spridningar. För E-modulerna är det sällan någon stor spridning medan det är vanligare att de permanenta töjningarna sprider något. Efter test vägs provet och vattenkvoten bestäms.

³ tre dimensioner = tre-axiellt = treax (sv. förkortning) = triaxial (eng)

L.1 Sekvenser, belastningsnivåer

VTI-metoden har använt tre typer av testnivåer som beror på provstorlek och belastningsnivå ("Bärlagertest", "Förstärkningslagertest" och "Skyddslagertest"). I Tabell 36 finns de spänningsnivåer som använts till VTI:s tester.

Storleken på den dynamiska vertikalspänningen är vald efter kunskapsinsamling och metodöversyn [41] samt SHRP:s dokument P46 [42] och skall motsvara förväntade verkliga spänningsnivåer i ett bärlager beroende av lagertjocklekar och hjullast.

För förstärkningslager valdes samma lastnivåer som till bärlager men med max dynamisk last 600 kPa. Detta pga begränsningar i utrustningen då maximal kraft inte räcker till 800 kPa. En lastpuls (0,1 s) i testet för förstärkningslager följs en viloperiod på 0,1 s med enbart statisk last.

Storleken på den dynamiska vertikalspänningen är beräknad att motsvara förväntade verkliga spänningsnivåer i ett skyddslager beroende av lagertjocklekar och hjullast. Kontakttryck (20 kPa i samtliga sekvenser) är en extra vertikallast för att säkerställa att tryckstången hela tiden ligger an mot den övre tryckplattan utan att studsas eller slå [43].

Tabell 36. VTI-metoden för dynamiskt treaxialtest

Table 36. The VTI-method for dynamic three axial test

Typ av VTI-test	Bärlagertest	Förstärkningslagertest	Skyddslager-test
Största sten	32 mm	63 mm	32 mm
Packas i antal lager	1	6	1
Dimensioner, mm	Ø=150, h=300 ($V=5,3 \text{ dm}^3$)	Ø=300, h=600 ($V=42,4 \text{ dm}^3$)	Ø=150, h=300 ($V=5,3 \text{ dm}^3$)
Kammartryck, kPa	60 och 120	60 och 120	10 och 20
Statisk last, kPa	20	20	20
Dynamiska laster, kPa	100 - 1 200	100 - 600	10 - 150
Antal lastfall (sekvenser)	8 (2)	5 (2)	7 (2)
Totalt antal pulser	224 000	104 000	223 000
Lastpuls/vilopuls/frekvens	0,1s/0s/10Hz	0,1s/0,1s/5Hz	0,1s/0s/10Hz

I metodbeskrivningen för EN 13286-7 finns belastningsnivåerna i detalj, de sammanfattas i Tabell 37.

Tabell 37. Europeanormen EN 13286-7 för treaxialtest

Table 37. EN-13286-7 for three axial test

	Resilient behaviour		Permanent Deformation Multi-stage loading	
	High stress level	Low stress level	High stress level	Low stress level
Kammartryck, kPa	20 - 150	20 - 150	20 - 150	20 - 150
Min. deviatorspänning (statisk last), kPa	0*	0*	0*	0*
Max deviatorspänning (Dyn. last då min.dev =0), kPa	30 – 475	20 - 300	50 - 600	20 - 600
Antal lastfall (sekvenser)	29 (6)	29 (6)	28 (5)	30 (5)
Antal pulser per lastfall	100	100	10 000	10 000
Totalt antal pulser	2 900	2 900	280 000	300 000
Lastpuls/vilopuls/frekvens	0,1s/0s/10Hz	0,1s/0s/10Hz	0,1s/0s/10Hz	0,1s/0s/10Hz

*Av praktiska skäl har VTI min. deviatorspänning = 3 kPa. (då blir dynamisk last = max deviatorspänning – 3 kPa)

För Europeanormen och de resilienta egenskaperna skall provet först konditioneras i 20 000 pulser med kammartryck 70 kPa och max deviatorspänning 340 kPa för High stress level eller 200 kPa för Low stress level. Dessutom är det möjligt att bestämma permanenta deformationer med s.k. Single stage loading med minst 80 000 lastpulser vid lämplig (vald) belastningsnivå.

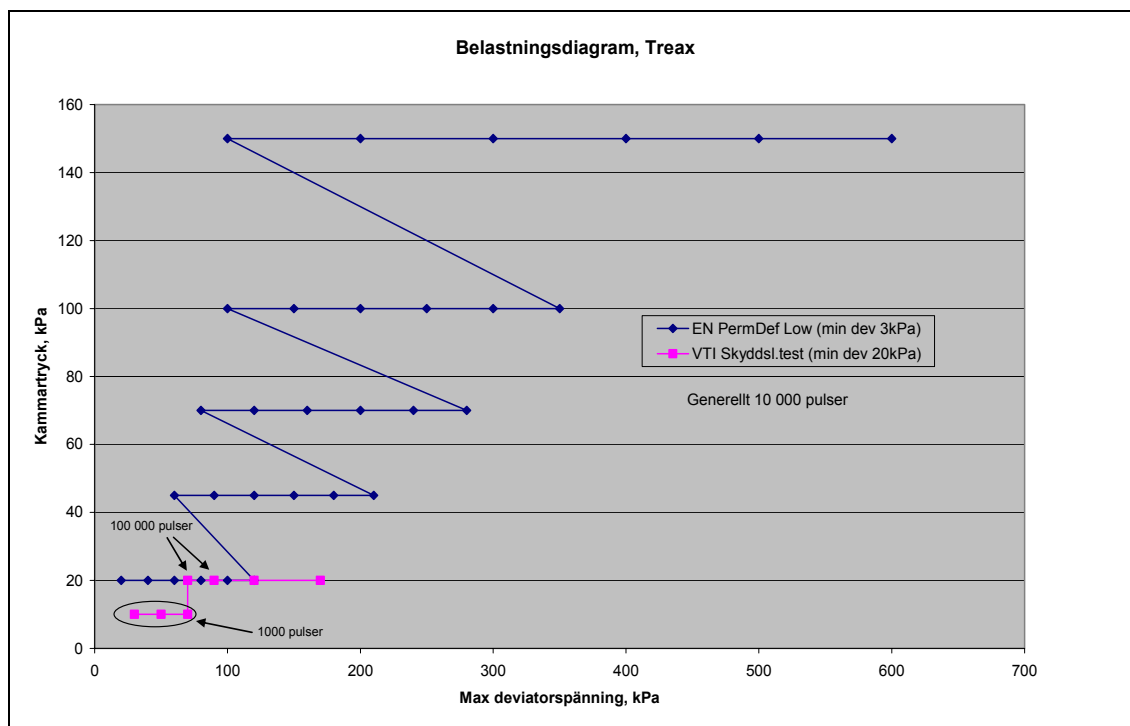
I Tabell 38 jämförs de testvarianter som utförts i detta projekt.

Tabell 38 Jämförelse mellan belastningar i VTI:s Skyddslagertest och EN 13286-7

Table 38. Comparison between loads in VTIs protection layer test and EN 13286-7

	VTI:s Skyddslagertest	EN, permanent deformation, flerstegbelastning, låg nivå
Kammartryck, kPa Konstant i varje sekvens (EN: CCP)	10 och 20	20 – 150
Min Deviatorspänning, kPa Statisk axiell last	20	3 (ska vara <5 helst 0)
Max Deviatorspänning, kPa Statisk + dynamisk axiell last	30 – 170	20 – 600
Summa huvudspänning, kPa 3x kammartrycket + Max Dev.spänning	60 – 230	80 – 1 050
Antal lastfall (sekvenser) Sekvens= en serie lastfall med samma kammartryck.	7 (2)	30 (5)
Antal pulser/lastfall	1 000 – 100 000	10 000

Totalt antal pulser	223 000	300 000
Lastpuls/vilopuls/frekvens	0,1s/0s/10Hz	0,1s/0s/10Hz



Figur 45. Belastningsdiagram för Europannormens test för permanent deformation, låg spänningsnivå och VTI: s skyddslagertest.

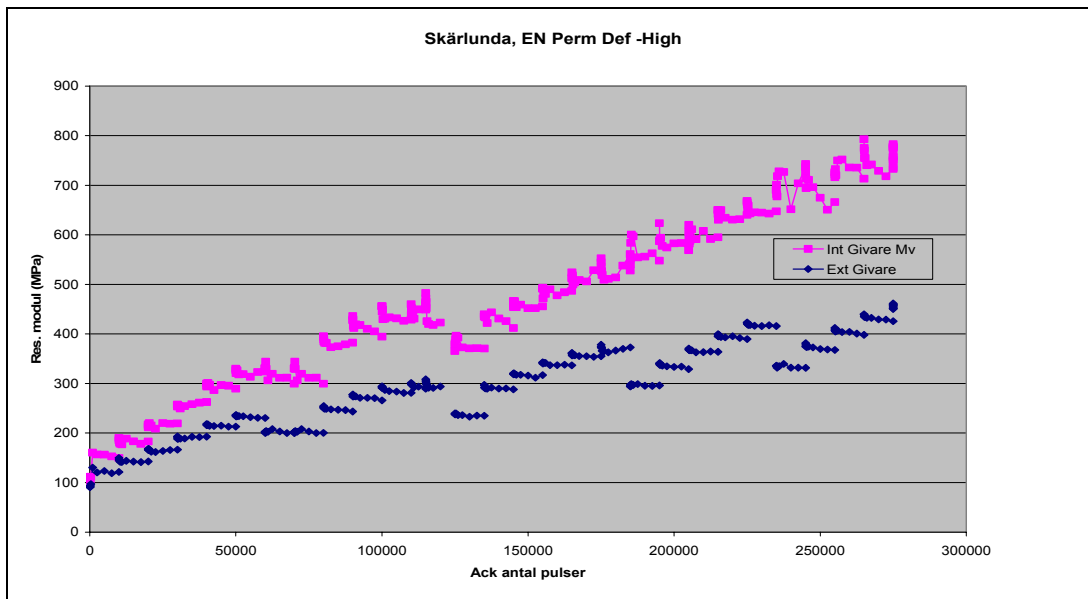
Figure 45. Loading chart. The European Standard (EN 13286-7), test for permanent deformation – low stress level and VTI:s capping layer test.

L.2 Jämförelse mellan VTI-metod och Europametod

Dynamiska treaxialförsök baserat på VTI:s metoder är en kombinationstest avsedda att både studera resilientmoduler vid olika belastningsnivåer och att studera permanenta deformationer. Däremot så har Europannormen varianter för olika huvudsyften, resilienta egenskaper och permanenta deformationer. Dessa olikheter och likheter mellan metoderna diskuteras nedan i en jämförelse mellan VTI-metoden och Europametoden.

Det är svårt att jämföra resultat mellan VTI:s sätt och Europannormen då proverna belastas på olika sätt och med olika antal belastningar. Resultat från varje ny lastpuls påverkas av testets tidigare belastningshistoria. Resilientmodul kan ge (ger ofta) likartade resultat oavsett metod.

Belastningsnivå påverkar mer än belastningshistoria för resilienta egenskaper (exempel i Figur 46), därför kan man jämföra resilientmoduler från olika tester utan att det blir allt för missvisande av t.ex. resilient modul som funktion av Summa huvudspänning eller Total axiell spänning.



Figur 46. Resilient modul mot ackumulerat antal pulser. Varje kluster av punkter innebär ett lastfall med 10 000 pulser.

Figure 46. Resilient modulus as a function of accumulated number of loadings. Each cluster means one loading case with 10 000 loadings.

Ett materials resilienta egenskaper redovisas som E-modul eller hellre benämnt Resilientmodul, E_r (se ovan).

E_r = dynamisk last / elastisk töjning, anges i MPa.

Dynamisk last = differensen mellan maximal och minimal kraft i lastpuls dividerat med tvärsnittsarean (= max deviatorspänning – min deviatorspänning).

Elastisk töjning, VTI-metod = differensen mellan max- och min-läge i lastpuls dividerat med ursprungshöjden av provkroppen. Bestäms som medelvärdet av de tio sista lastpulserna av de 1000 första lastpulserna per lastfall.

Elastisk töjning, EN = differensen mellan läget för maxlasten och slutet på lastpuls dividerat med ursprungshöjden. Bestäms som medelvärdet av de tio sista lastpulserna av de 100 första lastpulserna per lastfall.

Europannormen har en metod för att enbart bestämma Resilientmodul med två olika nivåer, hög och låg. Resilientmodulen kan naturligtvis även bestämmas från metodvarianten för permanenta deformationer.

Då de resilienta töjningarna beräknas lite annorlunda mellan VTI-metod och EN så får man lite olika resultat. I resultatbearbetningen av grundfilerna (.ats-samlingsfiler) efter EN-försök finns möjlighet att hitta råvärden (max- och min.deformation från varje

givare) så att den resilienta töjningen kan beräknas på "VTI-sätt". Europenormen beräknar resilientmodul efter 100 pulser i resilienttesterna medan VTI beräknar modulen efter 1 000 pulser.

I Tabell 39 kan man se att det i snitt skiljer ca 5 % mellan de olika metoderna. VTI metoden ger alltså 5 % större töjningar mätt på de interna givarna vilket innebär lika mycket mindre resilientmoduler. För de externa givarna skiljer endast 1 %.

I Tabell 39 finns exempel på material där jämförelser gjorts mellan olika sätt att räkna ut den resilienta töjningen dvs. hur mycket större blir töjningen enligt VTI-metod mot EN.

Skillnaden är beräknad enligt: $\text{Töjn.VTI} / \text{Töjn.EN} - 100 \%$ angiven i procent (%).

Där Töjn.VTI = Elastisk töjning, VTI-metod: differensen mellan max- och min.-läge i lastpulsen dividerat med ursprungshöjden.

Töjn.EN = Elastisk töjning, EN: differensen mellan läget för maxlasten och slutet på lastpulsen dividerat med ursprungshöjden.

Medelvärden från att samtliga belastningsfall i hela testet.

Tabell 39. Relativ skillnad av resilienttöjning mellan VTI och EN.

Table 39. Difference in resilient strain according to definitions for the VTI-method and the European Standard (EN).

Anmärkning	100 pulser		1 000 pulser	
	Ext givare	Int givare	Ext givare	Int givare
Skärlunda, perm def –low	1,6 %	7,3 %	1,8 %	6,9 %
Skärlunda, perm def –high	1,1 %	4,8 %	1,2 %	4,1 %
Skärlunda, res –lo	1,6 %	6,9 %	-	-
Bottenaska C, perm def –low	0,9 %	2,8 %	0,7 %	2,4 %
Kr berg 0/22, cond –high	0,5 %	1,4 %	0,6 %	2,0 %
Kr berg 0/22, res –high	1,6 %	4,7 %	-	-
Medelvärde för dessa exempel	1,2 %	4,6 %	1,1 %	3,8 %

Permanent deformationer är deformationer som kvarstår efter varje lastpuls. Redovisas vanligen som ackumulerade permanenta deformationer som en funktion av ackumulerat antal lastpulser.

Vid studier av (ackumulerade) permanenta deformationer kan även resilientmodul beräknas.

L.3 Provningsfarenheter

Slaggrusets (från Umeå) heterogenitet visade sig genom att provkropparna (VTI och EN) höll vatten i varierande grad och visade olika vattenseparation vid packning av proverna. Materialet var jämfört med bottenaskorna ifrån Uppsala och Holmen lätt att

packa och även uppnå önskad packningsgrad. Ett av proverna dränerades en del under provning.

För bottenaskan ifrån Holmen, jämfört övriga bottenaskor i föreliggande rapport, var det svårt att uppnå önskade packningsgrader.

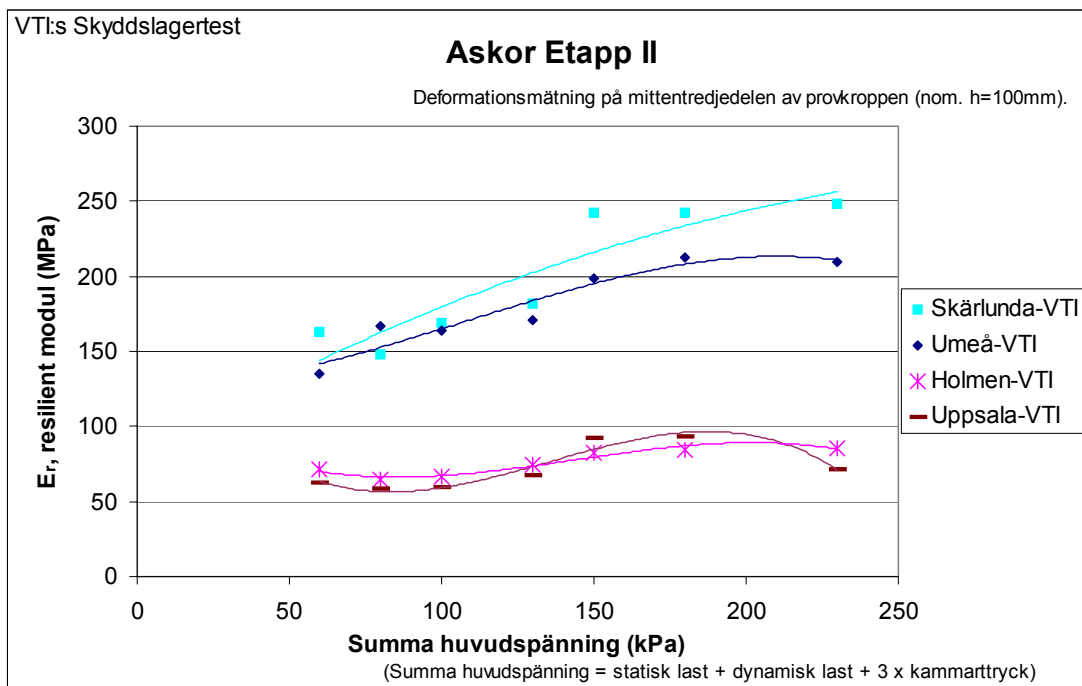
L.4 Resultat

Treaxialförsöken har utförts som dubbelprov. För Europeanormen har ett tredje prov körts för Umeå (slaggrus) och Uppsala (torvpulveraska) då viss skillnad förekommit mellan prov ett och två. Som referens redovisas i diagrammen ett material benämnt "Skärlunda" vilket är ett krossat berg som är proportionerat att ligga mitt i bärlagerzonen enligt VÄG 94. Provning av Skärlunda är utfört som enkelprov.

Deformationer, både permanenta och elastiska (resilienta), mäts i mikrometer (μm) och beräknas till töjningar genom att dividera med ursprunglig höjd (mm). Ursprunglig höjd är den mellersta tredjedelen av provet (100 mm). Mätningar är även gjorda över hela provkroppen (300 mm) men de redovisas inte här då de inte stöds av Europeanormen och innebär ingen praktisk skillnad för rangordning eller relativa jämförelser.

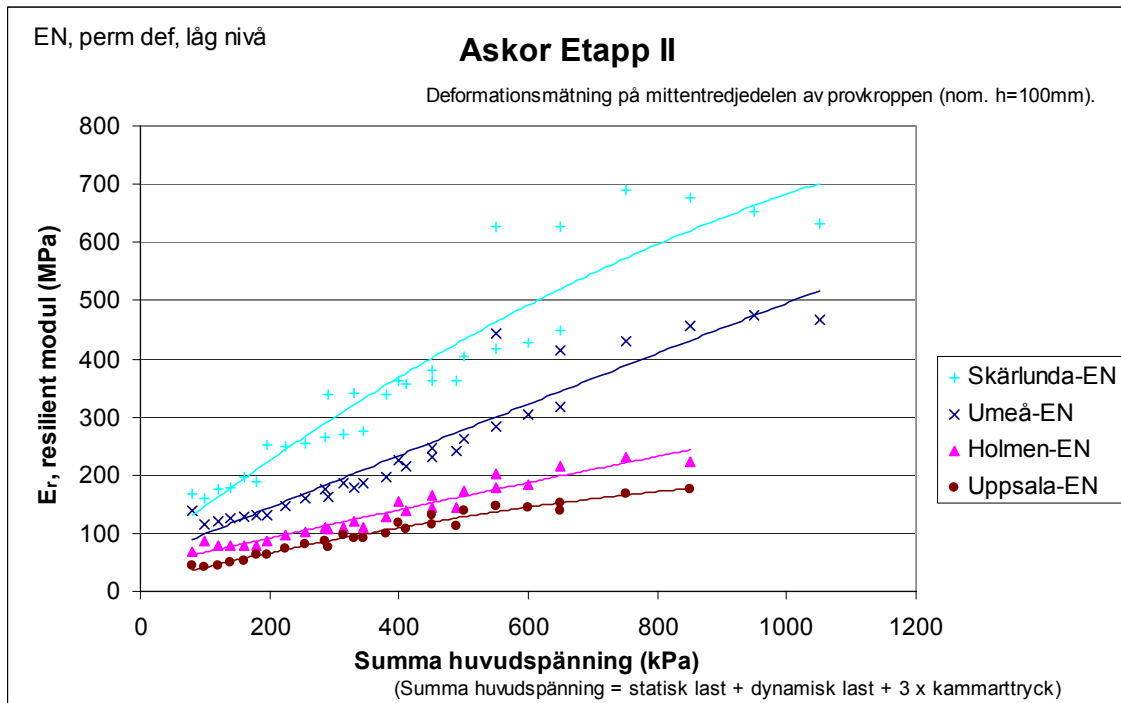
Resilient modul

Resilient modulen beräknas som den dynamiska lasten dividerat med den elastiska (resilienta) töjningen (dynamisk vertikalspänning (kPa)/elastisk töjning ($\mu\text{m}/\text{mm}$)) och anges i föreliggande rapport i MPa. I Figur 47 och i Figur 48 redogörs för resultat ifrån dynamisk treaxialförsök med avseende på resilient modul för torvpulveraska Uppsala, processaska från Holmen, slaggrus från Umeå samt bergkross Skärlunda.



Figur 47. Resilient modul som funktion av summa huvudspänning, från VTI:s skyddslagertest.

Figure 47. Resilient modulus as a function of total stress for VTI:s Capping layer test.



Figur 48. Resilient modul från Europeanormens test för permanent deformation, låg nivå.

Figure 48. Resilient modulus as a function of total stress for the European Standard (EN 13286-7). Test for permanent deformation –low stress level.

Permanent deformationer

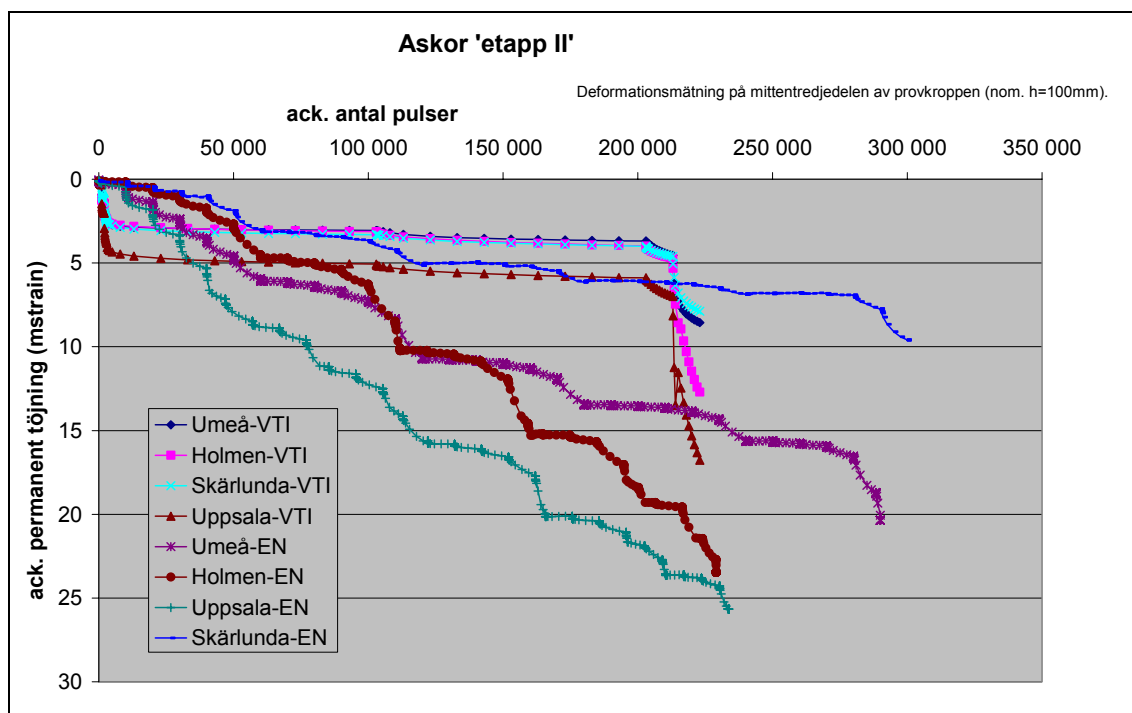
De permanenta deformationerna redovisas som ackumulerade permanenta töjningar som funktion av ackumulerat antal pulser.

Töjning redovisas som relativ deformation. Permanent, kvarvarande, deformation dividerat med ursprunglig höjd, i denna redovisning den mellersta tredjedelen, 100 mm (provets totalhöjd 300 mm).

Deformationer mäts i mikrometer(μm). Töjningen anges som millistrain (1 millistrain = 1 mstrain = $1 \mu\text{m}/\text{mm} = 0,1 \% = 1000 \mu\text{strain} = 1 \text{ mm}/\text{m} = 10^{-3}$).

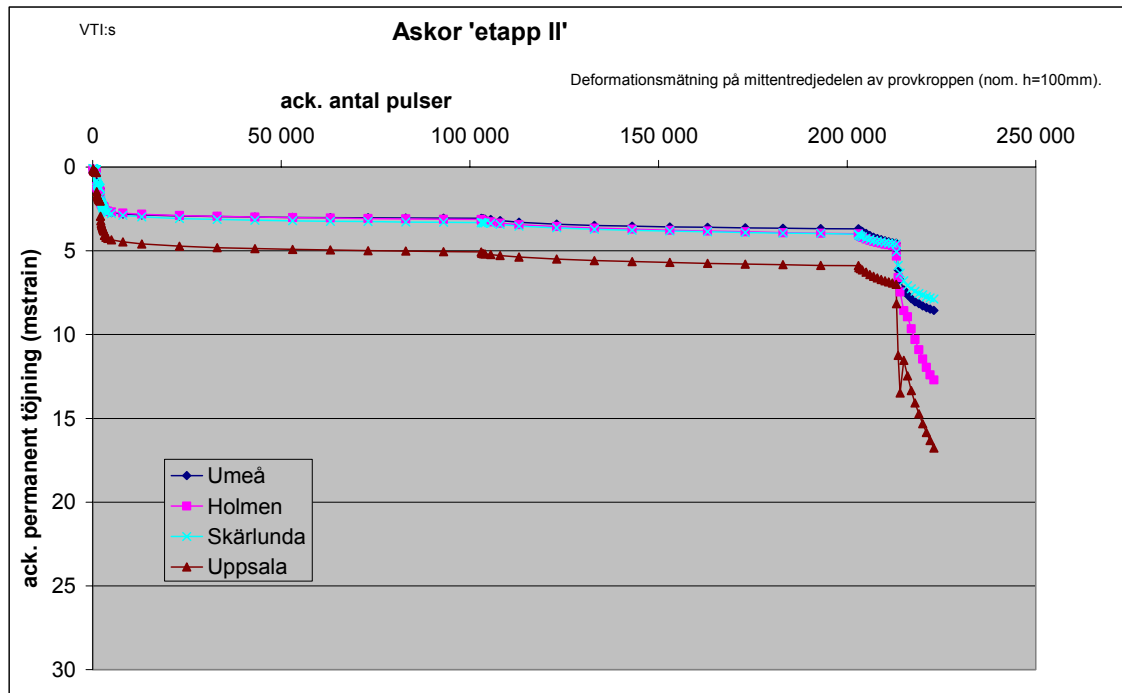
I varje nytt lastfall utvecklas de permanenta töjningarna snabbt i början för att sedan avta. Det som påverkar den permanenta töjningen är materialets stabilitet, förmåga att motstå omlagringar, deviatorspänningen gentemot sidostödet (axiell/vertikal spänning kontra radiell/horisontell spänning) och antalet tidigare pulser.

På kurvorna i figuren nedan kan man se de olika belastningsnivåerna som ”hack”.



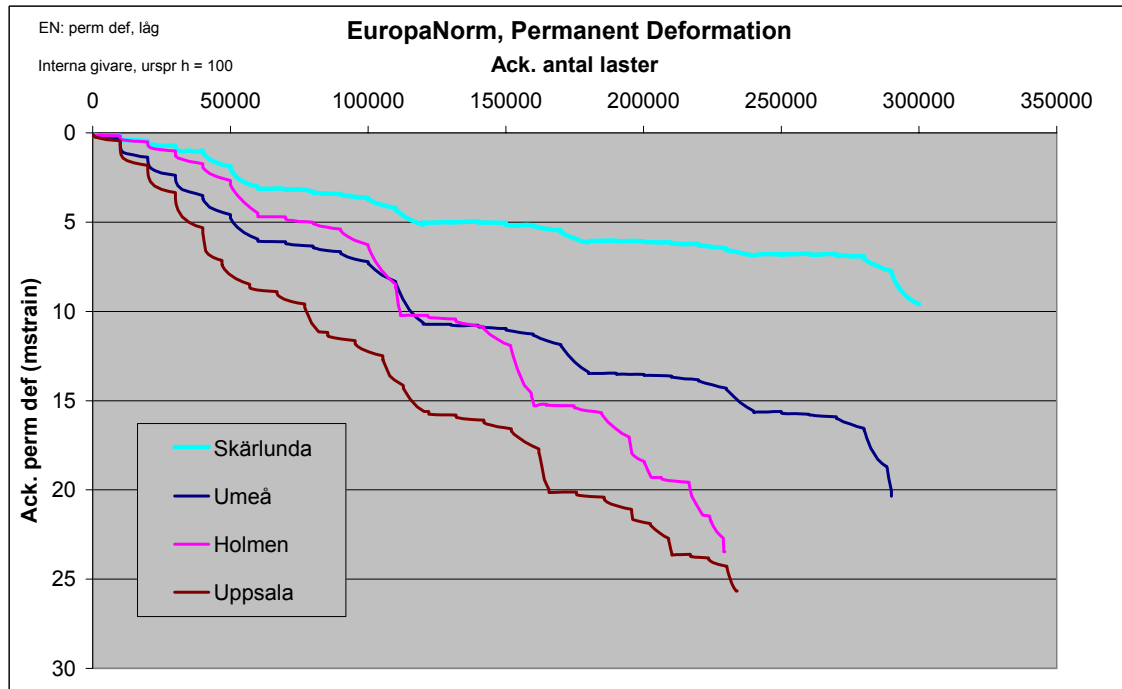
Figur 49. Permanent töjning som funktion av ackumulerat antal pulser för både VTI-test och Europeanormen

Figure 49. Accumulated permanent strain as a function of accumulated number of loadings, both for VTI-method and EN-method.



Figur 50. Permanent töjning som funktion av ackumulerat antal pulser från VTI:s skyddslagertest.

Figure 50. Accumulated permanent strain as a function of accumulated number of loadings for VTI:s Capping layer test.



Figur 51. Permanent töjning som funktion av ackumulerat antal pulser från Europannormens test permanent deformation, låg nivå.

Figure 51. Accumulated permanent strain as a function of accumulated number of loadings for EN, permanent deformation test – low stress level.

Packning av provkroppar

Provkropparna packades in med önskad packningsgrad 100 % (torr skrymdensitet i relation till referensdensiteten, standard Proctor) och en vattenkvot relativt den optimala på 100 %, se även Bilaga K och packningsegenskaper. Resultat av packningen av provkropparna redovisas i Tabell 40. Referensmaterialet från Skärlunda är inpackat med en packningsgrad = 97 % relativt modifierad Proctor och en vattenkvot relativt optimal på 60 %.

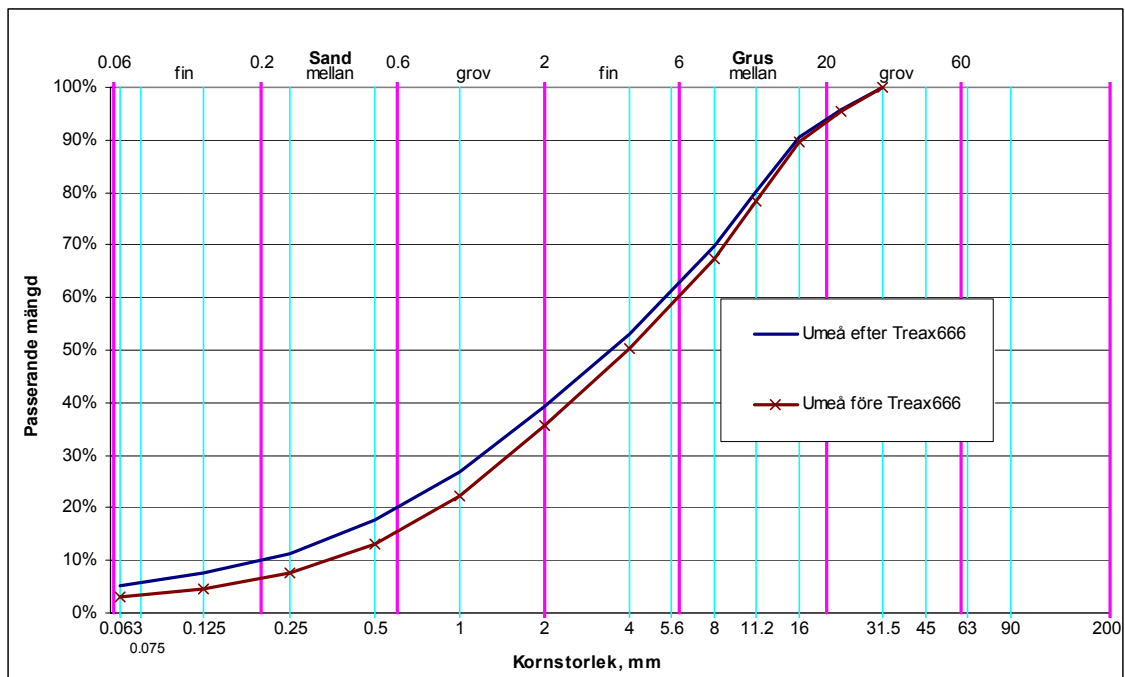
Tabell 40. Packningsgrader och vattenkvoter för treaxialtesterna. Medelvärden av enskilda försök.

Table 40. Degree of compaction and water content for three axial tests. Mean values.

Material och test.	Referens-densitet	Uppnådd packningsgr.	Vattenkvoter		
			Optimal	Rel. före	Rel. efter
	Mg/m ³	%	%	%	%
Umeå, Alla	1,69	99	15	98	93
Umeå, VTI-test	1,69	100	15	96	95
Umeå, EN-test	1,69	98	15	99	92
Holmen, Alla	1,12	87	28	101	99
Holmen, VTI-test	1,12	88	28	100	100
Holmen, EN-test	1,12	87	28	101	99
Uppsala, Alla	1,46	95	24	100	98
Uppsala, VTI-test	1,46	96	24	101	101
Uppsala, EN-test	1,46	94	24	101	97

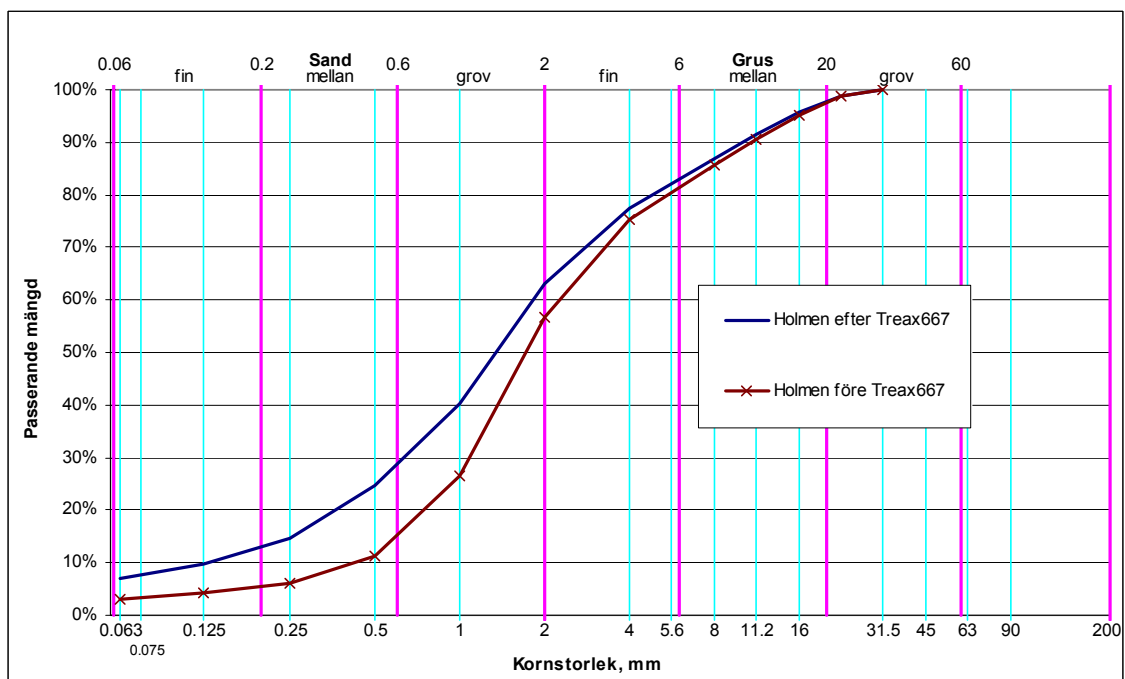
Kontroll av nedbrytning under treaxförsök

Kontroll av nedkrossningen har gjorts genom siktning enligt Bilaga K, packningsegenskaper, på ett slumpmässigt utvalt prov före och efter treaxialförsök. Siktning före försök gjordes med Gilsonsiktning ned till 1 mm, kurvan mindre än 1 mm är beräknad från siktning innan provning. Siktning efter provning gjordes med Gilsonsiktning ned till 1 mm och material mindre än 1 mm tvättsiktades vid 0,063 mm och Pascalsiktades. Resultatet framgår av Figur 52, Figur 53 och Figur 54. Nedbrytningen kan ha skett vid två olika stadier, dels vid packningen av provkroppen (troligtvis till största delen jmf Bilaga K packningsegenskaper) och dels vid det dynamiska treaxialförsöket.



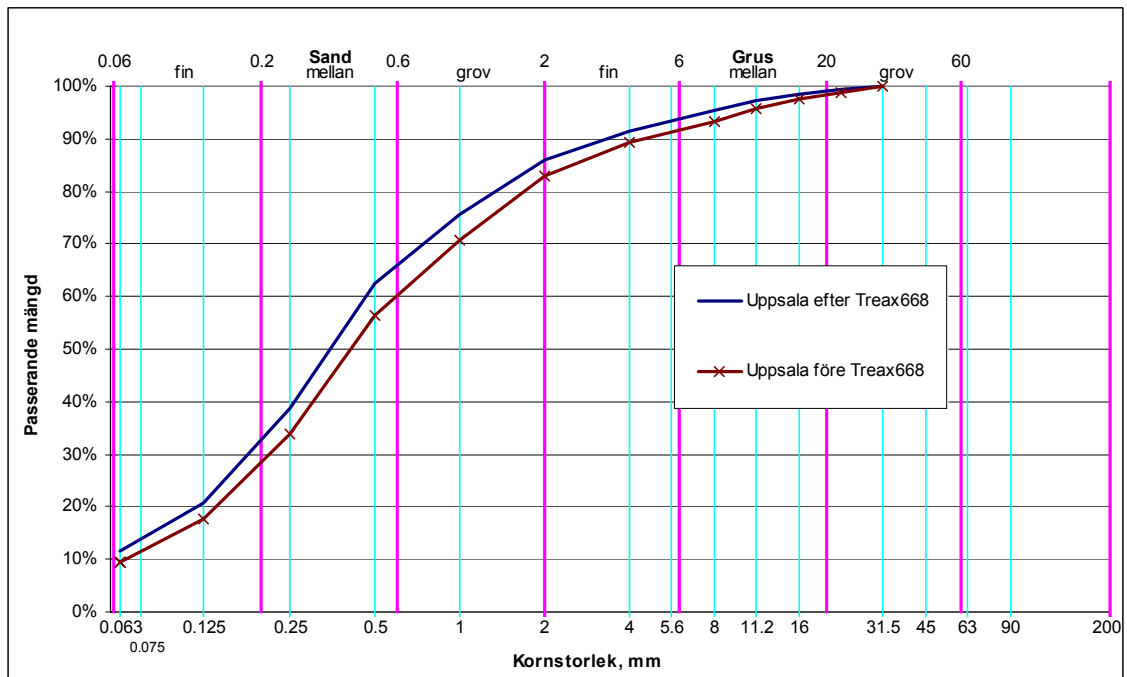
Figur 52 Kornkurva före och efter dynamisk treaxialförsök för slaggrus från Umeå. Maximalt skiljer det 4 % vid 0,5 mm.

Figure 52. Grain size distribution before and after dynamic three axis test for MSWI-ash from Umeå. The maximum difference is 4 % at 0,5 mm.



Figur 53. Kornkurva före och efter dynamiska treaxialförsök för processaska från Holmen. Maximalt skiljer 14 % vid 1 mm.

Figure 53. Grain size distribution before and after dynamic three axis test for process-ash from Holmen. The maximum difference is 14 % at 1 mm.



Figur 54. Kornkurva före och efter dynamiska treaxialförsök för torvpulveraska från Uppsala. Maximalt skiljer 6 % vid 0,5 mm.

Figure 54. Grain size distribution before and after dynamic three axis test for the peat ash from Uppsala. The maximum difference is 6 % at 0,5 mm.

Kompressibilitetstest

Bilaga M

För uppföljande provning kan man istället för treaxialtest eventuellt använda ett test som kallas för modifierad kompressibilitet. Båda testerna görs parallellt första gången, och om resultaten överensstämmer kan kompressibilitetstester användas för uppföljande provningar.

Kompressibilitetstestet utförs med en metod som heter SP-metod 2670. Provet hålls i en cylinder och ytan slätas till. En platta som applicerar ett tryck på 4,8 kPa läggs på och höjden på provet mäts. Provet vibreras i 3 min och höjden mäts igen. Därefter belastas provet med 0,31 MPa och en nollnivå sätts. Provet utsätts sedan för en belastning som kontinuerligt ökar med 0,06 kN/s och deformationen mäts tills dess att provet tryckts ihop minst 10 %.

Testet resulterar i två värden, dels kompressibiliteten och dels E-modulen. Kompressibiliteten definieras som deformation vid en viss belastning. Denna deformation varierar naturligtvis med belastningen. För lättklinker har man därför bestämt i certifieringsreglerna SPCR 101 [38] att deformationen vid lasten 0,2 MPa, som är ett realistiskt värde för belastningen på en fyllning av lättklinker i en vägbank, skall deklarerar för att underlätta jämförelser. I detta regelverk finns kravet att deformationen skall vara $\leq 1\%$ vid denna belastning.

Metoden SPCR 101 [38] anger att man skall belasta till minst 10 % deformation. Detta av historiska skäl, för att förenkla jämförelser med en äldre metod.

E-modulen är den kraft per ytenhet som krävs för att komprimera provet. E-modul, egentligen elasticitetsmodul, anger egentligen belastning i en dimension, t ex om man belastar en balk med en tyngd. I kompressibilitetstestet är detta inte riktigt situationen. Provet är inneslutet i en behållare vars väggar håller emot i sidled. Därför borde man egentligen kalla denna parameter för t ex enaxiell kompressionsmodul eller liknande.

M.1 Provningserfarenheter

Askor är betydligt stummare material än traditionell ballast och komprimeras inte alls lika mycket, särskilt i torrt tillstånd. Det är därför mycket svårt att nå en deformation på 10 %. Endast processaskan gick att deformera så mycket. För torvpulver och slaggruset fick försöket avbrytas vid ca 3 % deformation, eftersom krafterna blev för höga för att apparaturen skulle klara av det. Detta resultat innebär att materialet är relativt motståndskraftigt mot deformation. Vid provningen av aktuella material bör kanske metoden modifieras, eftersom det inte är nödvändigt att nå en deformation på 10 %. Tvärtom är man ofta ute efter en deformation som inte är så stor. Det väsentliga i sammanhanget är vilken konstruktion materialet skall ingå i och hur stor belastningen är på konstruktionen.

M.2 Resultat

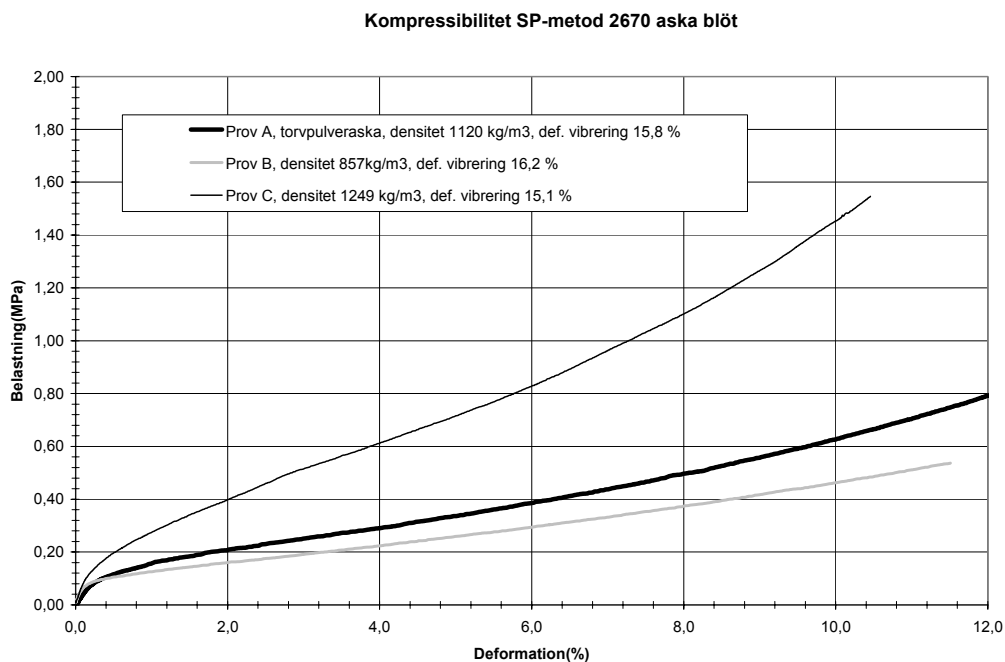
Resultaten av provningarna redovisas i figurerna nedan.

Deformation

Vid provning av den våta askan, dvs vid optimal vattenkvot, uppvisade prov Vattenfalls torvpulveraska och Holmens processaska mycket lika last-deformationskurvor, se Figur 55. Slaggruset behövde högre laster för att uppnå samma deformation, och var alltså motståndskraftigare mot belastning än de andra två.

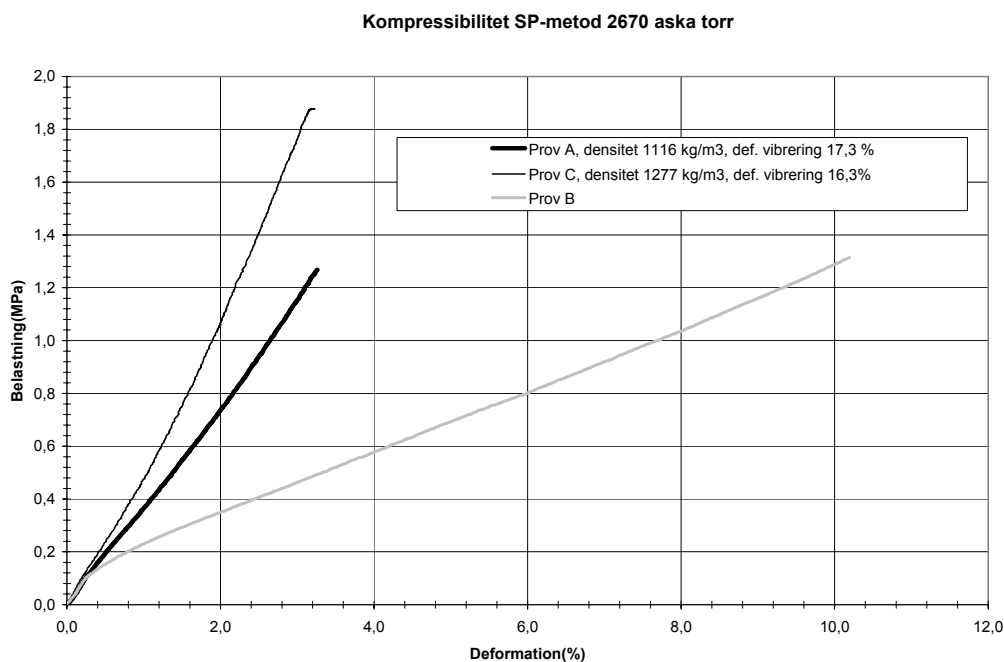
Provningen av de torra materialen uppvisade ett något annorlunda resultat. Här är det processaskan från Holmen, som också är det material som har lägst densitet, som skiljer ut sig, se Figur 56. Detta material var det enda som kunde belastas till en deformation på de 10 % som stipuleras i metoden. De andra två materialen, Vattenfalls torvpulveraska och Umeås slaggrus, uppvisade en sådan motståndskraft mot deformation att det inte går att komprimera dem så mycket som 10 % med befintlig utrustning.

Alla materialen är betydligt svårare att komprimera när de är torra än i vått tillstånd. Detta är ett väntat resultat som ligger i linje med resultaten från andra material.



Figur 55. Belastning och deformation för de tre askorna vid optimal vattenkvot.

Figure 55. Load and deformation for the three ashes at optimum water content.



Figur 56. Belastning och deformation för de tre askorna i torrt tillstånd.

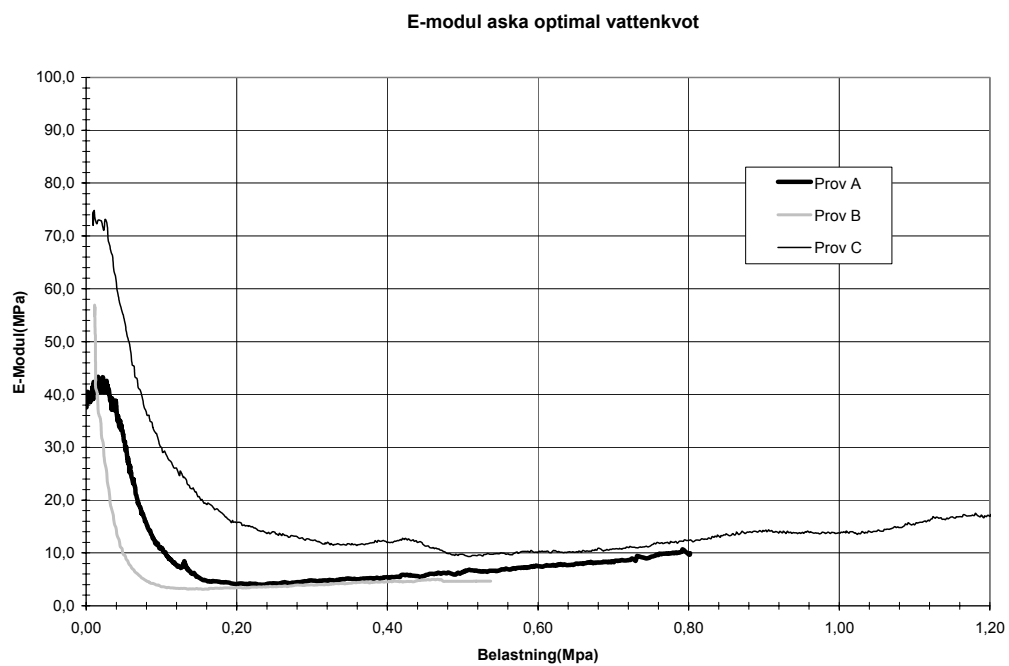
Figure 56. Load and deformation for the three ashes in dry condition

Resultaten av last-deformationsförsöken i figurerna ovan visar att askan från Holmen deformeras mest. För användning högt upp i en väg bör inte deformationen vid den aktuella lasten vara för hög, eftersom vägbanan t ex kan bli spårig. Längre ner i vägen kan däremot materialen mycket väl användas, eftersom lastspridningen gör att belastningen per ytenhet blir lägre. Då kan man kompensera kompressionen med att helt enkelt lägga ett tjockare lager. Material med högre deformation kan alltså användas längre ner i en väggropp, under förutsättning att last/deformationskurvan är känd och dimensioneringen tar hänsyn till detta.

E-modul

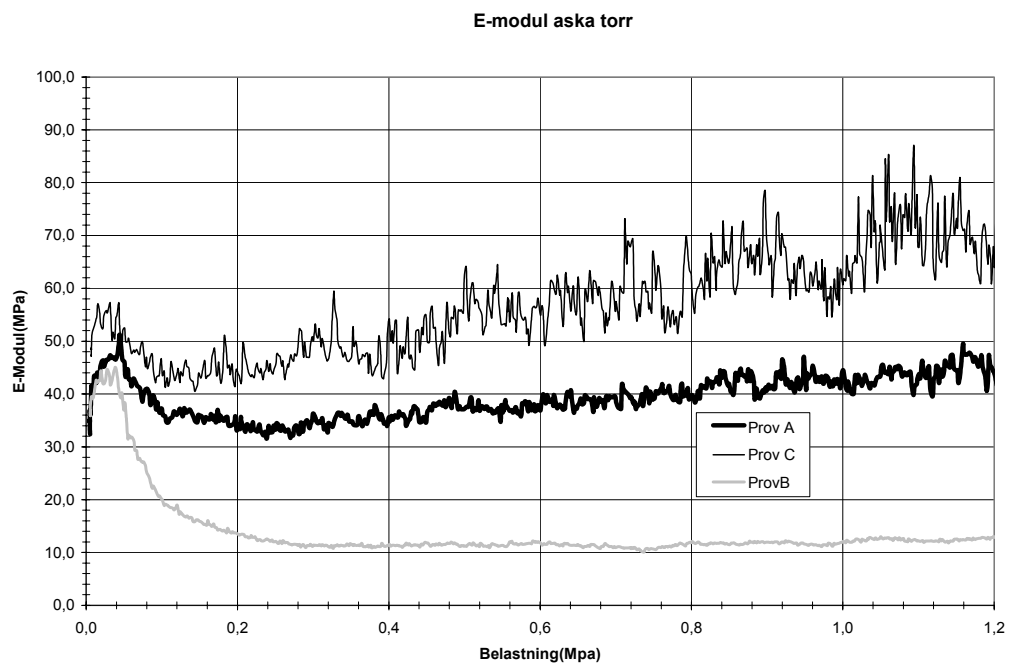
E-modulen varierar med belastningen. Den är normalt störst i början för att sedan stabilisera sig till ett svagt ökande värde. För den våta askan (optimal vattenkvot) ser alla kurvorna ungefär likadana ut och ligger mycket nära varandra vid högre belastning, se Figur 57. Endast i början skiljer de sig något, där slaggruset från Umeå ligger högst, Uppsalaaskan (torvpulver) uppvisar ett lägre värde och processaskan från Holmen har lägst E-modul när belastningen är lägst i början på provningen.

En låg E-modul betyder lägre motståndskraft mot belastning än en hög. Liksom för last-deformationskurvorna hänger önskad E-modul ihop med både aktuell belastning och konstruktionens utseende. Man kan alltså använda material med olika E-moduler, bara man känner värdet och avpassar konstruktionen därefter. Tvärtom kan man, om man har en konstruktion och vet vilken belastning som väntas, avgöra huruvida materialet kan användas eller inte genom att testa E-modulen.



Figur 57. E-modul för de tre askorna vid optimal vattenkvot

Figure 57. E-module for the three ashes at optimum water content



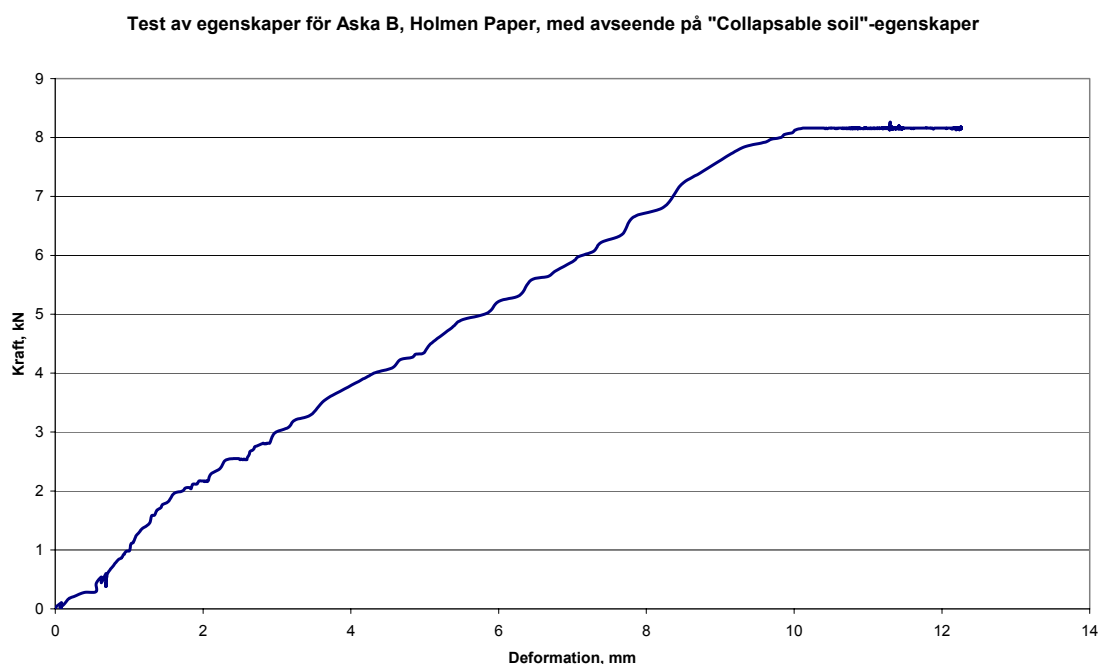
Figur 58. E-modul för de tre askorna i torrt tillstånd

Figure 58. E-module for the three ashes in dry condition

Den torra E-modulen däremot, uppvisar ett helt annat mönster. Umeås slaggrus är fortfarande högst och processaskan från Holmen ligger i botten, men kurvornas form är helt annorlunda. Här ökar E-modulen med ökande belastning redan tidigt för både Uppsalas aska och Umeås slaggrus, utan den klara sänkning som återfinns initialt för det våta provet. Endast processaskan från Holmen har ett mönster i torrt tillstånd som påminner om den våta askans. Holmens processaska har också en relativt samlad kurva, medan kurvorna för de andra två askorna är mycket taggiga.

M.3 Test av "collapsable soil"

Efter diskussion på ett referensgruppsmöte beslöts att komplettera kompressibilitetsprovningarna med ett prov huruvida en av askorna hade sk "collapsable soil"-egenskaper. Inledningen av provet gjordes på samma sätt som de tidigare utförda proven. En tryck på 0,31 Mpa (8,1 kN vid den använda arean på provburk) applicerades och provet deformerades. Efter ett par timmar hade deformationen blivit 10 mm varefter deformationen avstannade. Vatten tillsattes i riklig mängd till provet genom uppborrade hål i locket. Efter en par timmars bevattning och väntan tills nästa dag, hade provet komprimerats från 10 till 12 mm, och sålunda kan konstateras att processaskan inte hade "collapsible soil"-egenskaper.



Figur 59. Kraft-deformationssamband för processaskan då den utsätts för en stor mängd vatten.

Figure 59. Load-deformation for the process ash when exposed to a large amount of water

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGIMYNDIGHET

VÄRMEFORSK SERVICE AB
101 53 Stockholm
Tel 08-677 25 80
Fax 08-677 25 35
www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker
Fax 08-677 25 35

