

Gummiklipp som konstruktionsmaterial i mark- och anläggningstekniska tillämpningar



Tommy Edeskär

Luleå tekniska universitet
Institutionen för samhällsbyggnad, Avdelningen för geoteknik

**GUMMIKLIPP SOM
KONSTRUKTIONSMATERIAL I
MARK- OCH
ANLÄGGNINGSTEKNISKA
TILLÄMPNINGAR**

TOMMY EDESKÄR

Avdelningen för Geoteknik
Institutionen för Samhällsbyggnad
Luleå tekniska universitet

FÖRORD

För att ett material ska vara av intresse i mark- och anläggningstekniska tillämpningar bör ett antal kriterier vara uppfyllda. Materialet bör fylla en teknisk funktion, fungera rent produktionsmässigt, kunna användas på ett miljöriktigt sätt, finnas tillgängligt i tillräckliga volymer och vara ekonomiskt motiverat. I detta forskningsprojekt undersöks och utvärderas möjligheten för användning av gummiklipp som konstruktionsmaterial i mark- och anläggningsbyggande. Licentiatarbetet utgör en början avseende kunskapsuppbyggnad i Sverige och fokus i arbetet har varit gummiklipps tekniska och miljömässiga egenskaper

Arbetet med licentiatavhandlingen har bedrivits vid avdelningen för Geoteknik, Luleå tekniska universitet. Doktorandprojektet stöds ekonomiskt av SBUF, Ragn-Sells AB, Svensk Däckåtervinning AB, NCC, Vägverket, Banverket, Rambøll och Luleå tekniska universitet. Till doktorandprojektet är även Ecoloop, Skanska och Lundahl Project Management knutet. Till fullskaleprojektet har Vägverket Region Norr bidragit med finansiering av byggandet och uppföljningen av provsträckan, och Ragn-Sells AB med gummiklippsmaterialiet.

Vid avdelningen för Geoteknik vill jag tacka Tekn. Dr. Bo Westerberg, min handledare, för hans engagemang och stöd i projektet och arbetet med artiklarna och rapporterna och min examinator Professor Sven Knutsson för stöd och diskussioner och för att han givit mig möjligheten att jobba med projektet. Tack riktas till Fo. Ing. Thomas Forsberg och tekniker Ulf Stenman för hjälp med tillverkning och installation av mätutrustning. Jag vill också tacka alla medarbetare på avdelningen som delar intresset för forskning inom området.

I arbetet har jag mött och samarbetat med en rad andra människor. För viktiga bidrag till projektet skulle jag speciellt vilja tacka Lars Åman, SDAB, Ulf Håkansson, Ragn-Sells AB, Gunnar Zweifel och Johan Ullberg vid Vägverket Region Norr, Bo Svedberg och Josef Mácsik vid Ecoloop, samt examensarbetarna Martin Bergström och Mikael Östman.

Tommy Edeskär
September 2004

SAMMANFATTNING

I och med EG:s avfallsdirektiv från 1999 är det förbjudet att deponera hela däck från och med 2003 och förbjudet att deponera fragmenterade däck (gummiklipp) från och med 2006. Lagstiftningen syftar till ökad återanvändning eller återvinning av uttjänta däck. I Nordamerika, där liknande lagstiftning finns, har hela och fragmenterade däck använts i 30 år i vägbyggnadssammanhang som bland annat tjälisolerings- och lättfyllnadsmaterial.

Syftet med detta licentiatarbete är att samla ihop och värdera den idag tillgängliga kunskapen om gummiklipps tekniska och miljömässiga egenskaper samt skaffa praktisk erfarenhet av att använda materialet i mark- och anläggningstekniska tillämpningar. Med gummiklipp avses fragmenterade däck där de enskilda bitarna varierar från ca. 30×30 mm² till ca. 100×300 mm².

De övergripande målen med detta licentiatarbete är att: a) Identifiera, analysera och presentera den idag tillgängliga kunskapen om gummiklipps tekniska och miljömässiga egenskaper kopplat till mark- och anläggningstekniska tillämpningar. b) Genom egna fält- och laboratorieförsök skaffa praktisk erfarenhet av att använda materialet i vägkonstruktioner. c) Ge rekommendationer angående användande av materialet i mark- och anläggningstekniska tillämpningar.

En vägsträcka med gummiklipp som skyddslager har byggts och utvärderats. Utrustning har installerats i vägkonstruktionerna för mätning av temperaturer, tjälfronten, sättningar och lakvatten. Konstruktionernas styvhet har bestämts genom fallviktsmätning. Tekniska egenskaper och erhållet lakvatten har jämförts mellan provsträckor och referenssträckan.

Syftet med byggandet av provsträckan med gummiklipp som skyddslager är att: a) Erhålla kunskaper om att bygga med materialet. b) Studera funktionen av materialet ur tjälisoleringsynpunkt. c) Studera hur överbyggnaden ska dimensioneras för att kompensera för elasticiteten och styvheten i materialet. Målet med teststräckan är att kunna genomföra mätningar och utvärdering av sättningar av gummiklippslagret, temperaturer och tjälgränsen i vägkonstruktionen, konstruktionens styvhet (bärförmåga) och lakvatten från konstruktionen.

Litteraturstudien visar att de karakteristiska egenskaperna för gummiklipp, i jämförelse med friktionsjord, är att materialet är lätt (låg densitet), elastiskt, dränerande och värmeisolerande. Gummiklipp är ett relativt kompressibelt material och många tekniska egenskaper beror av aktuell belastning. Materialet blir styvare med ökad belastning.

Avseende tekniska egenskaper finns det mer att undersöka innan kunskapsnivån om materialet är likställd med konventionella anläggningsmaterial. Vissa undersökningar är enkla att utföra, som t.ex. bestämning av kapillär stighöjd och värmeledningstal enligt gällande standarder medan andra mer avancerade gäller exempelvis spänningsberoende materialparametrar och koppling till parametrar till materialmodeller för dimensionering.

De ämnesgrupper hos gummiklipp som främst är undersökta ur miljösynpunkt är metaller, PAH och i viss mån fenoler. I en anläggningsteknisk tillämpning är det normalt vattenburna föroreningar som är av intresse för vilken miljöpåverkan materialet kan ha på omgivningen. Lakförsök visar att metaller lakar ut från däcklipp, främst järn, koppar, mangan och zink. Metalläckaget är av samma storleksordning som för bergmaterial. Av

studerade organiska föreningar lakar PAH och fenoler ut, i låga koncentrationer. Det beror bl.a. på att lösligheten för PAH i vatten är låg. Toxikologiska studier visar att lakvatten från däckmaterial har påvisbar negativ effekt på organismer. Färskt däckmaterial uppvisar större negativ respons på organismer än äldre material.

Vägen med gummiklipp i skyddslager byggdes under perioden 2002-2003. Dimensioneringsarbetet med provsträckan visade att den uppskattade livslängden på konstruktionen inte påverkades nämnvärt av att styvhetsmodulen för skyddslaget varierades inom intervallet 0,25-2,0 MPa.

Gummiklipp kan hanteras med konventionell utrustning som används vid vägbyggande. I vissa avseenden är gummiklipp mer lätthanterligt än konventionella vägbyggnadsmaterial som bergkross och friktionsjord, exempelvis håller materialet ihop bättre. Till nackdelarna hör att när väl materialet har packats är det svårt att justera eftersom omkringliggande gummiklipp följer med som sjok. Det är svårt att i fält avgöra hur stor effekt packningsarbetet har på gummiklippen och att exakt bedöma hur tjocka de överlagrande materialen blir eftersom gummiklippen komprimeras då de belastas.

Utvärderingen av vägkonstruktionen fram till färdigställandet av vägen visade att: a) Den utvärderade bärförmågan hos gummiklippslaget var lägre än förväntat. b) Den primära kompressionen av gummiklippen skilde mycket i storlek mellan de två delsträckorna med olika material i förstärkningslaget. c) Gummiklipp har en tjälisolerande förmåga. d) Gummiklippen lakar ut små mängder metaller och PAH. PAH-halterna var något högre än förväntat.

Den färdigställda vägkonstruktionen kommer framlides att utvärderas fortlöpande dels för att jämföra dimensioneringsresultaten med verkliga konstruktionens egenskaper avseende bärförmåga och livslängd, och dels för att följa upp deformationer och tjälisoleringsförmåga samt bestämma lakvattnets sammansättning.

Utifrån kunskapsnivån avseende de tekniska parametrarna som redovisats i denna avhandling kan tillämpningar pekats ut där kunskapsläget är tillräckligt för att rent tekniskt kunna använda materialet och tillämpningar där forskningsbehovet är större. Tillämpningar där tillräcklig kunskap avseende tekniska egenskaper idag kan anses finnas är bankfyllningar, dräneringslager, tjälisolering och motfyllnad. De tekniska begränsningarna som idag finns när det gäller användning av gummiklipp rör främst de elastiska egenskaperna i materialet, främst avseende styvhet och kompressibilitet. Kompressibiliteten gör att det idag är tveksamt att använda gummiklipp under eller i konstruktioner där styvhet och kompressibilitet är kritiska faktorer.

Miljöaspekten måste beaktas vid användning av gummiklipp. Vid känsliga recipienter och där avrinningsvatten kan ansamlas i små volymer kan materialet i extremfallet innebära en negativ påverkan. Placerat i applikationer där perkolationen är liten och kontakttiden mellan vatten och gummiklipp är kort bör materialet inte innebära mer påverkan än andra material. Uppföljningsstudier av provobjekt där gummiklipp använts som skyddslager i vägar och bankfyllnader visar att metaller och organiska ämnen lakar ut i låga koncentrationer från konstruktionerna.

ABSTRACT

Due to the Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the Landfill of Waste it is banned to landfill whole tyres from 2003 and shredded tyres from 2006. The legislation encourage the re-use and recycling of post consumer tyres. In North America, with similar legislation in use, tyres and tyre shreds have been used as construction material in foundation engineering applications about 30 years, e.g. as embankment fill and thermal insulation material.

The aim with this licentiate thesis is to compile and evaluate the state-of-the-art knowledge about tyre shreds technical and environmental properties and to gain practical experience in using the material in ground and foundation engineering applications. Tyre shreds are in this work defined as pieces of shredded tyres ranging from $30 \times 30 \text{ mm}^2$ to $100 \times 300 \text{ mm}^2$.

The main objectives within this licentiate work are to: a) Identify, analyse and present the state-of-the-art knowledge about tyre shreds technical and environmental properties in a ground- and foundation engineering perspective. b) Through own field trials and laboratory experiments gain practical experience in using this material in road constructions. c) State recommendations regarding the use of the material in ground and foundation engineering applications.

A test section using tyre shreds as a capping layer has been built and evaluated. Monitoring equipment has been installed in the road construction in order to measure temperatures, freezing/thawing front, settlements and collect leachate for laboratory analyses. The stiffness of the construction has been evaluated using falling weight deflectometer equipment. Technical properties and collected leachate has been compared between the test and reference sections.

The aim of the work with the test section using tyre shreds as capping layer was to: a) Gain experience in using the material. b) Study the functionality of the material from a thermal insulation perspective. c) Study how to design the superstructure of the road in order to limit the implications of the elastic properties and weak stiffness in the material. The objective with the test section is to perform measurements and evaluations of settlements of the tyre shred layer, temperatures and freezing/thawing front, the stiffness of the construction (bearing capacity) and leachate of the construction.

The state-of-the-art study concludes that characteristic properties of tyre shreds, compared to granular soils, are that the material is light weight (low density), elastic, draining, and thermal insulative. Tyre shreds is a relatively compressible material and many technical properties are stress dependent. The stiffness increases with increasing stress level.

Considering the technical properties there is a need for more studies until the knowledge is comparable to conventional ground and foundation engineering materials. Some studies are easy to carry out such as e.g. capillarity rise capacity and thermal conductivity according to European standards. Others, however, are more advanced such as investigation of stress dependent technical properties and studies related to determine parameters for models for design purposes.

The most investigated substances in tyre shreds for environmental assessment purposes are metals, polycyclic aromatic compounds (PAH) and to some extent phenols. In a ground

and foundation engineering application normally exposure by leachate is of concern in environmental assessment. Leaching studies shows that metals leach from tyre shreds, mainly iron, copper, manganese and zinc. The amount of metal emissions is of the same order as for natural geological materials. Of studied organic compounds leaching of PAH and phenols is found, however the concentrations are low in the leachate. Toxicological studies show that leachate from tyre material has a negative effect on organisms. Fresh tyre material results in increased negative response compared to older tyre material.

The road with tyre shreds as capping layer was built during the period 2002-2003. The design work of the test section showed that the estimated service time of the road was not especially affected by varying the stiffness modulus of the capping layer within the range 0,25-2,0 MPa.

Tyre shreds may be handled using conventional constructing equipment used at road constructing sites. In some aspects it is easier to handle tyre shreds than conventional road construction materials such as granular soil and crushed rock. Disadvantages by using the material are problems to adjust layers after compaction since the material sticks together, estimate the effect of compaction work and to predict the compression of the material caused by the overlaying structure.

The evaluation of the road construction until the end of the construction work showed that: a) The evaluated stiffness in the capping layer was less than expected. b) The primary compression of the tyre shreds differed between the two test sections using different sub-base materials. c) Tyre shreds has a thermal insulation capacity. d) Tyre shreds leaches out small amounts of metals and PAH. The PAH-concentrations were slightly higher than expected.

The completed road construction will be evaluated continuously in order to compare the theoretical design results with the actual outcome of the construction. Studied features will be stiffness and service time, deformations, frost insulating capacity and also the composition of the leachate.

Based on the knowledge regarding the technical properties reviewed in this thesis, applications may be pointed out to be ready to be used and other where more studies and experience is needed. Applications with sufficient knowledge about technical properties are bank fill material in embankments, draining layers, thermal insulation, and backfill material. The technical knowledge limitations are mainly related to the elastic properties of tyre shreds, primary regarding stiffness and compressibility.

The environmental aspect must be considered when using tyre shreds. At sensitive recipients and where run-off water may be collected in small pools the material may in extreme cases have a negative influence. Used in applications where the percolation is small and the contact time between tyre shreds and water is short the influence of the material is likely to compare with other conventional materials. Follow up studies of constructions containing tyre shreds implies that metals and organic compounds leach out in small amounts.

AVHANDLINGENS OMFATTNING

Avhandlingen som helhet består av en sammanhållande del som sammanfattar en teknisk rapport, en forskningsrapport och två konferensartiklar, d.v.s. följande publikationer.

- Edeskär, T. & Westerberg, B. (2003). Tyre shreds used in a road construction as a lightweight and frost insulation material, *The Fifth International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials*. Ed. Oriz de Urbina, G., Guomans, H., San Sebastian. s. 293-302.
- Edeskär, T. (2004). *Technical and Environmental Properties of Tyre Shreds Focusing on Ground Engineering Applications*, Teknisk rapport 2004:05, Avdelningen för Geoteknik, Luleå tekniska universitet, Luleå.
- Edeskär, T. och Westerberg, B. (2004). Gummiklipp som tjälisolering i skyddslager i en vägkonstruktion, *XIV Nordiska Geotekniker Mötet*, Rapport 3:2004, Svenska Geotekniska Föreningen, Linköping. s. I15-I26.
- Edeskär, T. (2004). *Gummiklipp som skyddslager i en vägkonstruktion i ett fullskaleprojekt*, Forskningsrapport 2004:13, Avdelningen för Geoteknik, Luleå tekniska universitet, Luleå.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	i
SAMMANFATTNING	iii
ABSTRACT	v
AVHANDLINGENS OMFATTNING	vii
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	ix
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och mål	1
1.3 Metod/tillvägagångssätt	2
1.4 Avgränsning	3
2 TEKNISKA EGENSKAPER	5
2.1 Inledning	5
2.2 Gummiklipp	5
2.3 Densitet	6
2.4 Porositet/portal	7
2.5 Permeabilitet	8
2.6 Vattenkvot	8
2.7 Kompressionsegenskaper och spänning-töjningssamband	8
2.8 Styvhet	9
2.9 Tvärkontraktionstal	10
2.10 Hållfasthet	10
2.11 Vilojordtryckskoefficient	11
2.12 Värmeledningstal	12
2.13 Beständighet	12
2.14 Uppsummering tekniska egenskaper	13
3 EGENSKAPER FÖR MILJÖBEDÖMNING	15
3.1 Inledning	15
3.2 Innehåll	15
3.2.1 Kemisk sammansättning	15
3.2.2 Gummimaterial	16
3.2.3 Tillsatsmedel	17
3.2.4 Metaller och textila material	17
3.3 Emissioner	17
3.3.1 Inledning	17
3.3.2 Metaller	17
3.3.3 Organiska föreningar	18
3.3.4 Luftburen spridning	20
3.3.5 Biologisk spridning	21
3.4 Toxikologiska tester	21
3.5 Uppsummering av miljöegenskaper	21
4 ANVÄNDNING AV GUMMIKLIPP I VÄGBYGGNAD	23
4.1 Inledning	23
4.2 Vägkonstruktionens uppbyggnad	23
4.3 Dimensionering	24
4.3.1 Inledning	24
4.3.2 Metod	24
4.3.3 Resultat	25

4.4	Byggande.....	27
4.4.1	Inledning.....	27
4.5	Utvärdering.....	28
4.5.1	Inledning.....	28
4.5.2	Bärförmåga.....	28
4.5.3	Tjälisolering.....	29
4.5.4	Kompression.....	29
4.5.5	Lakvatten.....	30
4.6	Jämförelse med andra projekt.....	30
5	DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	33
5.1	Gummiklipp som konstruktionsmaterial.....	33
5.2	Tekniska egenskaper.....	33
5.2.1	Dimensionering och materialparametrar.....	33
5.2.2	Materialparametrar.....	33
5.3	Teknisk funktion.....	35
5.4	Miljöaspekter.....	36
5.4.1	Avgränsning.....	36
5.4.2	Metaller.....	36
5.4.3	Organiska föreningar.....	37
5.4.4	Toxikologiska undersökningar.....	37
5.4.5	Övergripande diskussion.....	37
5.5	Tillgänglighet av material.....	38
5.6	Ekonomi.....	38
5.7	Slutsatser.....	39
5.7.1	Gummiklipp som konstruktionsmaterial.....	39
5.7.2	Slutsatser från provsträckan.....	40
	REFERENSER.....	43

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Uttjänta däck betraktas idag som ett avfallsproblem i både den industriella världen och i utvecklingsländerna. För de industriella länderna består problemet främst i volymerna som alstras. Däck är inte en välkommet avfallsslag på deponier eftersom materialet är att betrakta som relativt inert och voluminöst. FN:s miljöorgan, UNEP, har uppmärksammat risker, främst brand och insektstillväxt i utvecklingsländer, som ett globalt problem om inte uttjänta däck tas omhand. En av de strategier som UNEP pekar på avseende att ta hand om de uttjänta bildäcken på, ur ett hälso- och miljöperspektiv, är som anläggningsmaterial.

I och med EG:s avfalldirektiv från 1999 är det förbjudet att deponera hela däck från och med 2003 och förbjudet att deponera fragmenterade däck från och med år 2006, Eurolex (2004). Lagstiftningen syftar till ökad återanvändning eller återvinning av uttjänta däck och nyttiggöra de värden som finns kvar i däcks materialet. I Nordamerika, där liknande lagstiftning finns, har hela och fragmenterade däck använts i vägbyggnadssammanhang som bland annat tjälisolerings- och lättfyllnadsmaterial, Edeskär (2004a).

I ungefär 30 år, främst i Nordamerika, har ett antal laboratoriestudier utförts och testobjekt byggts och utvärderats med avseende på gummiklipp. Utifrån dessa erfarenheter har det konstaterats att gummiklipp kan användas som ett mark- och anläggningsmaterial. Det finns dock fortfarande kunskapsluckor avseende vissa tekniska egenskaper, dimensioneringsmetoder och eventuell miljöeffekter.

Sveriges riksdag har fastslagit 15 miljömål som ska uppnås inom en generation för att lösa dagens stora miljöproblemen inför nästa generation. Miljömålen innebär bl.a. att deponeringen av avfall ska minska, uttaget av naturresurser minska och utsläppen av giftiga ämnen till naturen minska. Användning av gummiklipp som ersättningsmaterial för andra produkter skulle kunna bidra till miljömålen om miljöpåverkan är acceptabel.

I Europa har ett fåtal projekt med gummiklipp i mark- och anläggningsbyggande genomförts, främst i Finland och Norge. Mer erfarenheter och undersökningar behövs för att materialet ska kunna användas konventionellt.

1.2 Syfte och mål

Syftet med detta licentiatarbete är att samla ihop och värdera den idag tillgängliga kunskapen om gummiklipps tekniska och miljömässiga egenskaper samt att genom egna försök skaffa praktisk erfarenhet av att använda materialet i mark- och anläggningstekniska tillämpningar.

De övergripande målen med detta licentiatarbete är att:

- Identifiera, analysera och presentera den idag tillgängliga kunskapen om gummiklipps tekniska och miljömässiga egenskaper kopplat till mark- och anläggningstekniska tillämpningar.
- Genom egna fält- och laboratorieförsök skaffa praktisk erfarenhet av att använda materialet i vägkonstruktioner.
- Ge rekommendationer angående användande av materialet i mark- och anläggningstekniska tillämpningar.

Genom en litteraturinventering skall befintlig kunskap om gummiklipps tekniska och miljömässiga egenskaper identifieras. Fokus är på mark- och anläggningstekniska tillämpningar. Med tekniska egenskaper avses exempelvis densitet, vattenkvot, kapillaritet, kompressionsegenskaper, skjuvhållfasthet, packningsegenskaper, värmeledningsförmåga och beständighet. Miljöegenskaper studeras med avseende på sammansättning av ämnen i däckmaterial, tillgänglighet av ämnen i gummiklipp och erfarenheter från uppföljning av fältobjekt.

En sträcka av en befintlig väg skall byggas med gummiklipp som skyddslager och som jämförelse även en intilliggande referenssträcka utan skyddslager. Utrustning installeras i vägkonstruktionerna för mätning av temperaturer, tjälfronten, sättningar och lakvatten. Konstruktionernas styvhet skall bestämmas genom fallviktsmätning. Tekniska egenskaper och erhållet lakvatten skall jämföras mellan dessa delsträckor.

Syftet med byggandet av provsträckan av en väg med gummiklipp som skyddslager är att:

- Erhålla kunskaper om att bygga med materialet
- Studera funktionen av materialet ur tjälisoleringsynpunkt
- Studera hur överbyggnaden ska dimensioneras för att kompensera för elasticiteten och styvheten i materialet.

Målet med teststräckan är att:

- Kunna genomföra mätningar och utvärdering av sättningar i gummiklippslagret, temperaturer och tjälgränsen i vägkonstruktionen, konstruktionens styvhet (bärförmåga) och lakvatten från konstruktionen.
- Öka kunskapen om gummiklipp som konstruktionsmaterial i en vägkonstruktion.

1.3 Metod/tillvägagångssätt

En litteraturinventering genomförs för att sammanställa dagens kunskapsläge avseende gummiklipps tekniska och miljömässiga egenskaper och erfarenheter från byggande med materialet. Egna undersökningar av gummiklipps packningsegenskaper utförs i laboratorium och i fält, genom handledning av ett examensarbete. En provsträcka av en

väg med gummiklipp som skyddslager skall byggas, instrumenteras och utvärderas löpande.

1.4 Avgränsning

Uttjänta däck kan användas i många former i mark- och anläggningstekniska tillämpningar. Det finns exempel på användning av hela däck, speciella däckdelar, däckklipp och blandningar mellan däckklipp och jord. I detta arbete studeras endast gummiklipp utan inblandning av andra material. Med gummiklipp avses här fragmenterade bildäck där de enskilda bitarna varierar från ca. 30×30 mm² till ca. 100×300 mm².

I kunskapssammanställningen har publicerat material på svenska, engelska och norska använts. Materialet består av vetenskapliga tidskriftsartiklar och konferensbidrag och tekniska rapporter. I värdering av miljörelaterade egenskaper hänvisas till offentliga organ där experter värderat såväl industrins, miljömyndigheter och miljöorganisationers intressen, exempelvis EU:s miljödirektorat och FN:s miljöorgan UNEP.

Det praktiska arbetet som är utfört inkluderar handledning av ett examensarbete inom forskningsprojektet och utformandet, byggandet och utvärderandet av en provsträcka med gummiklipp som anläggningsmaterial. Vägprojektet har utvärderats t.o.m. färdigställandet av konstruktionen.

2 TEKNISKA EGENSKAPER

2.1 Inledning

I detta kapitel sammanställs undersökta tekniska egenskaper hos gummiklipp från publicerade studier. De tekniska egenskaperna relateras till typiska värden för friktionsjord vid uppsummering av de tekniska egenskaperna. I tillägg till de tekniska egenskaperna beskrivs i förekommande fall använd försöksmetodik, spann i rapporterade resultat och en kort diskussion om varför resultaten skiljer mellan olika författare. Underlaget till detta kapitel utgörs i huvudsak av den tekniska rapporten *Technical and Environmental Properties of Tyre Shreds Focusing on Ground Engineering Applications*, Edeskär (2004a), där samtliga referenser finns med.

De undersökningsmetoder som använts i de studier som sammanställts har i största möjliga mån följt amerikanska och europeiska standarder och laboratoriemetodik för jord- och vägmateriälprovning. Det finns dock viktiga skillnader mellan gummiklipp och jordmaterial som påverkar testmetodiken. Partikelstorleken hos gummiklipp är relativt stor vilket innebär att konventionell utrustning ofta inte kan användas och storleken faller utanför standardernas tillämpningsområden. Gummiklipp har utstickande stålkord som kan skada testutrustning som t.ex. gummimembranen i en triaxialcell. Vidhäftning mellan gummimaterialet och testutrustning medför svårigheter att erhålla representativa resultat, t.ex. kompression i ödometerförsök. Elasticiteten i materialet innebär att deformationer kan överstiga aktuell utrustnings möjliga mätområden.

2.2 Gummiklipp

Med gummiklipp avses gummibitar som kan innehålla textila material och stålkord i storlekar från $30 \times 30 \text{ mm}^2$ till $100 \times 300 \text{ mm}^2$, figur 2.1.



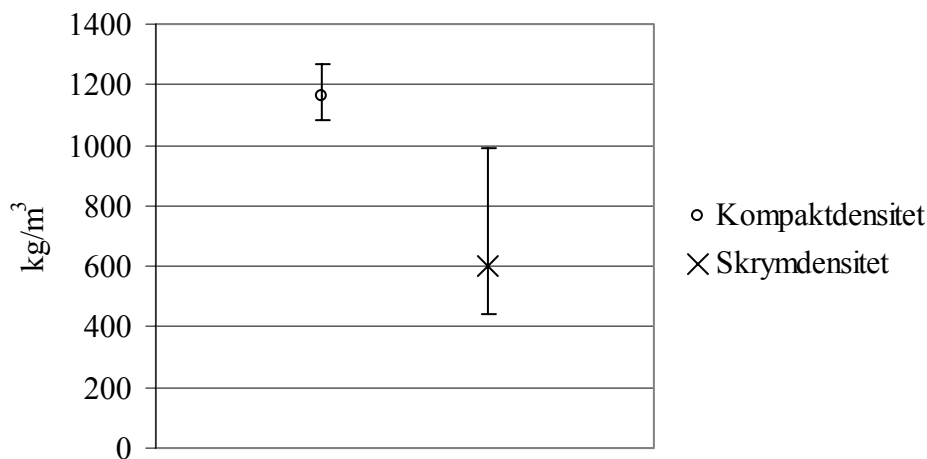
Figur 2.1 Gummiklipp av storleken $50 \times 50 \text{ mm}^2$.

Den mest undersökta fraktionen är $50 \times 50 \text{ mm}^2$. Materialet i gummiklipp består till största delen av fragmenterade uttjänta personbilsdäck. Utöver personbilsdäck kan materialet härröra från däck från lastbilar och anläggningsmaskiner samt från transportband.

Formen och storleken på gummiklippen beror på vilken typ av maskin som används för fragmenteringen samt i hur många steg de fragmenteras. För att minska storleken processas vanligtvis klippen en gång till i samma maskin. Ju större fraktion av gummiklipp desto mer diskformade i genomsnitt är de. Eftersom tjockleken varierar på ett personbilsdäck återspeglas detta även i utseendet på gummiklippen.

2.3 Densitet

Kompaktdensitet och skrymdensitet för gummiklipp presenteras i figur 2.2. Medelvärdet av kompaktdensiteten är $1,16 \text{ t/m}^3$ och spannet $1,08\text{-}1,27 \text{ t/m}^3$, Humphrey et al. (1993). I undersökningen har däck med glasfiberkord och stålkord ingått. Kompaktdensiteten hos gummiklipp med stålkord är högre än för gummiklipp med glasfiberkord. Eftersom majoriteten av däcken idag har stålkord i Europa, BLIC (2001), ligger kompaktdensiteten här i det övre spannet. Att kompaktdensiteten är högre än densiteten för vatten innebär att gummiklipp sjunker om det placeras i vatten.

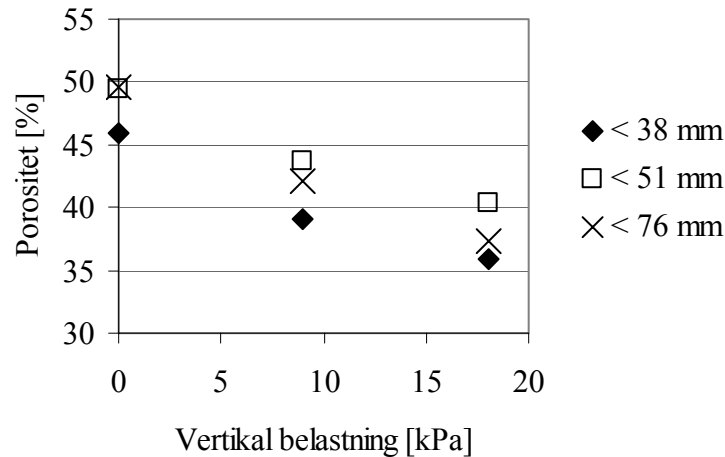


Figur 2.2 Kompaktdensitet och typiskt värde för skrymdensitet i anläggningstekniska tillämpningar. I figuren är spannet av rapporterade densitetsvärden inlagda.

Gummiklipp är ett kompressibelt material, vilket innebär att skrymdensiteten är beroende av den belastning som materialet utsätts för. Ett typiskt värde för en gummiklippsfyllning med 20 kPa överlast är 600 kg/m^3 . Skrymdensiteten varierar från ca. 450 kg/m^3 vid lös ifyllning till ca. 990 kg/m^3 vid 400 kPa överlast, se bl.a. Humphrey et al. (1997) och Westerberg och Mácsik (2001). Gummiklipp har en mycket högdränerande förmåga och absorberar små mängder vatten, se avsnitt 2.5 och 2.6. Därför är skillnaden mellan torrdensitet och skrymdensitet i regel försumbar vid en praktisk användning av materialet. Här redovisas endast värden på skrymdensiteten eftersom inga tillgängliga undersökningar finns explicit för torrdensitet, d.v.s. att materialet torkats vid 105 °C i 24 h innan provning. Utöver överlasten som verkar på gummiklippsfyllningen påverkas även erhållen skrymdensitet av packningsgraden innan belastning. Typ av gummiklipp och mängd utstickande stålkord har en förhållandevis liten betydelse när en gummiklippsfyllning belastas. Storleken har betydelse eftersom det av praktiska skäl kan vara svårt att packa gummiklipp om storleken blir för stor.

2.4 Porositet/portal

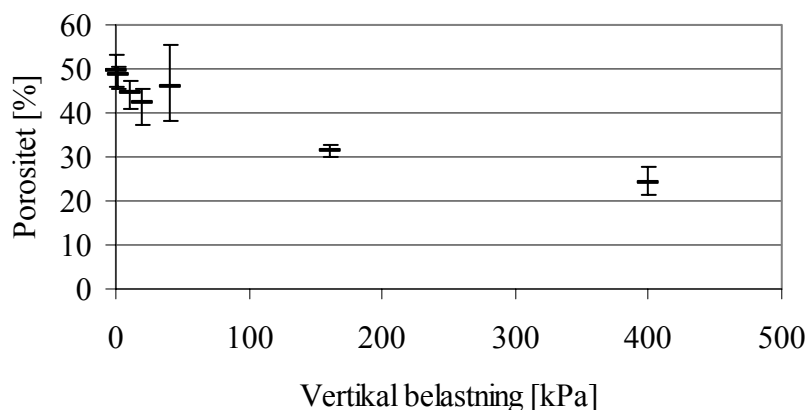
Porositeten hos gummiklipp beror främst av vilken belastning som materialet utsätts för och till viss del av gummiklippets storlek. I figur 2.3 visas hur porositeten varierar för olika fraktioner gummiklipp under låg vertikal belastning.



Figur 2.3 Variationen av porositet för tre olika storlekar av gummiklipp. Figuren baseras på data från en studie av Humphrey et al. (1997).

Vid lösa fyllningar av gummiklipp har storleken hos de individuella gummiklippet betydelse. Mindre klipp ger lägre porositet, Drescher och Newcomb (1994). Av figur 2.3 framgår det att porositeten ändras mycket vid ökande belastning i ett lågt spänningsintervall, 0-20 kPa.

Undersökningar visar att trots att materialet är mycket kompressibelt så behåller det en hög porositet även vid höga belastningar. Vid 400 kPa vertikal belastning har $50 \times 50 \text{ mm}^2$ gummiklipp en porositet på 25 %, Bergström och Östman (2004), figur 2.4.



Figur 2.4 Porositetens variation med vertikal belastning för $50 \times 50 \text{ mm}^2$ gummiklipp. Data är hämtade från Bergström och Östman (2004), Huhmarkangas och Lindell (2000) och Humphrey et al. (1993). I figuren är medelvärdet av porositeten samt spannet mellan högsta och lägsta värde för respektive vertikal belastning markerade.

Variationerna i porositet i figur 2.4 kan bl.a. bero på packningstillståndet hos gummiklippen vid provets start och när avläsningen av porositeten gjordes. Bergström och Östman (2004) noterade att krypning i provet pågick under ett par minuter efter det att laststeget lagts på.

2.5 Permeabilitet

Permeabiliteten i gummiklipp är hög. Då gummiklippsbitarna överstiger en storlek av 10 mm är permeabiliteten i storleksordningen 10^{-2} m/s. Trots att gummiklipp är förhållandevis kompressibelt material bibehåller det den höga permeabiliteten även vid höga vertikalbelastningar. Studier visar bl.a. att permeabiliteten överstiger 10^{-2} m/s vid 400 kPa vertikal belastning för 50×50 mm² gummiklipp, Westerberg och Mácsik (2001). Det finns indikationer på att diskformade gummiklipp tenderar att reorientera sig under belastning i en lagerstruktur, Drescher och Newcomb (1994). Det skulle kunna innebära en skillnad mellan vertikal och horisontell permeabilitet. I alla studier i sammanställningen har permeabiliteten mätts i vertikalled.

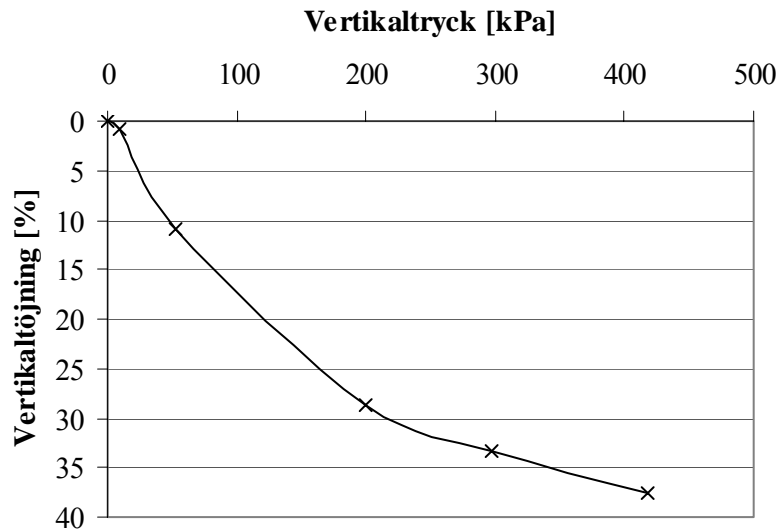
2.6 Vattenkvot

Humphrey et al. (1992) studerade vattenabsorptionsförmågan hos gummiklipp av olika ursprung. Vattenkvoten bestämdes efter det att gummiklippen placerats i vatten i 24 h och därefter torkats i 24 h i 105 °C. Den bestämda vattenkvoten varierade mellan 2,0-4,3 %. Inga samband har funnits som förklarar spridningen i resultaten avseende storlek eller typ av gummiklipp. En förklaring kan vara andelen exponerade textila material. Resultaten överensstämmer med en studie av däckmaterial som legat nedsänkt i vatten i 42 år, AB-Malek och Stevenson (1997), där vattenkvoten varierade mellan 1,8-4,7 % efter 300 dagar i rumstemperatur.

2.7 Kompressionsegenskaper och spännings-töjningssamband

Gummiklipps spännings-töjningssamband har undersökts i enaxliga kompressionsförsök och i triaxialförsök. Triaxialförsöken har dock utförts på mindre styckestorlekar där utstickande stålkord har avlägsnats för att inte punktera membranet som omger provet.

Gummiklipp är mer kompressibelt i jämförelse med friktionsjordar. Westerberg och Mácsik (2001) har uppmätt 45 % vertikal töjning vid 400 kPa vertikal belastning i ett enaxligt kompressionsförsök. Sambandet mellan pålagd belastning och resulterande kompression är icke-linjärt. Gummiklipp styvnar allt eftersom belastningen ökar vilket innebär att de relativt sett största vertikala deformationerna uppnås vid låg pålagd spänning, figur 2.5.



Figur 2.5 Spännings-töjningssambandet från kompressionsförsök för gummiklipp är icke-linjärt. Efter Westerberg och Mácsik (2001).

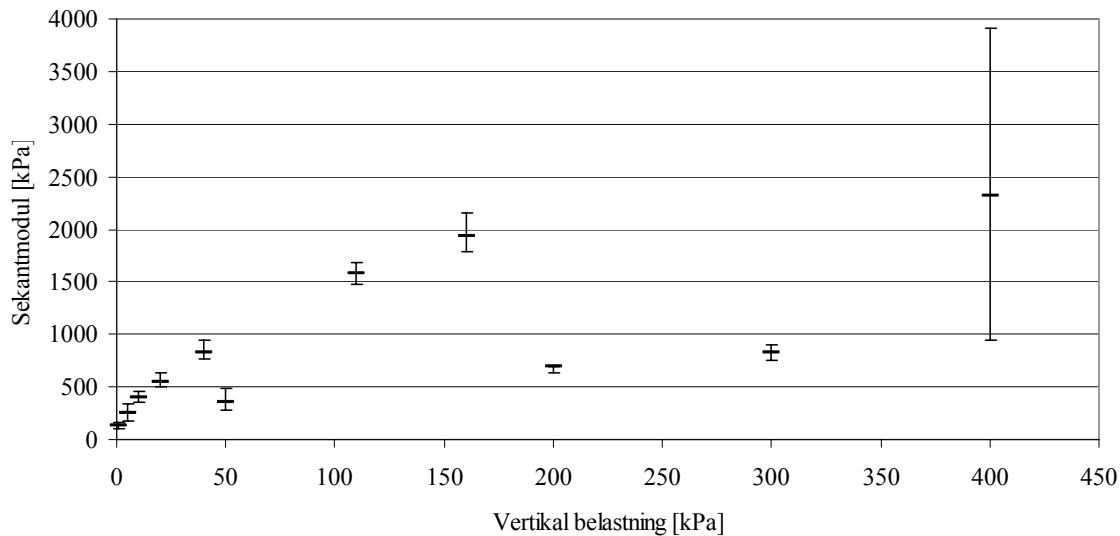
Triaxialförsöken, vilka är utförda med skjuvbelastning, visar att gummiklipp inte uppnår ett deviatorspänningsmaximum som friktionsjordar gör under dränerade förhållanden. Volymförändringen i proven är icke-linjär mot axiell töjning. Vid skjuvbelastning genomgår provet en formförändring. Triaxialförsöken visar att gummiklipp inte uppnår ett hållfasthetsmaxima utan genomgår i stället en formförändring. Det innebär att istället för att gå till brott kommer funktionen hos en gummiklippsfyllning istället att begränsas av hur stora deformationer som är acceptabla.

Kompressionsegenskaperna påverkas av materialets tillstånd då belastningen påbörjas. Deformationerna vid låga spänningar, upp till 40 kPa, kan reduceras upp till 20 % genom packning av materialet, Bergström och Östman (2004). Gummiklipp uppvisar stora kvarstående deformationer efter pålastning och avlastning om materialet varit dåligt packat.

Försök visar att materialet är krypbenäget. I försök har krypningar i materialet pågått i minst 400 dygn, Heimdahl och Drescher (1998). Skillnaden i krypningar är stor om fyllningen har möjlighet att expandera i horisontell riktning under belastning jämfört med om fyllningen är innesluten. Inom ca. 30 dagar förväntas en fyllning att krypa ca. 1,5-3 % under 49 kPa vertikal belastning, Heimdahl och Drescher (1998).

2.8 Styvhet

Styvheten för gummiklipp har bestämts i flera undersökningar, bl.a. Humphrey och Sandford (1993) och Yang et al. (2002). Styvheten är starkt spänningsberoende. Den vanligaste bestämmningsmetoden som använts i de publicerade studierna är ödometerförsök och utifrån ödometermodulen har olika styvhetsmoduler beräknats och redovisats. I figur 2.6 har ödometermodulen för gummiklipp sammanställts.



Figur 2.6 Sammanställning av ödometermoduler utvärderade som sekantmoduler.

För låga spänningsintervall, upp till ca. 40 kPa, är spridningen i resultat liten. För högre spänningar är det en större spridning i resultat mellan försöken. Spridningen i resultat kan förklaras med variation av typ av utrustning, utvärderingsprinciper och försöksförfarande. Belastningstiden är en sådan faktor eftersom materialet uppvisar tidsberoende deformation, se avsnitt 2.7.

2.9 Tvärkontraktionstal

De flesta bestämningar av tvärkontraktionstal som redovisats har använt en indirekt bestämmingsmetod. Genom att mäta de horisontella och vertikala spänningarna på en gummiklippsvolym beräknas tvärkontraktionstalet. Tvärkontraktionstalet bestämt med denna metod ligger i intervallet 0,20-0,30, bl.a. Humphrey et al. (1992) och Edil och Bosscher (1992). I en studie, Yang et al. (2002), har töjningarna direkt mätts i triaxialförsök. Beräknat tvärkontraktionstal hamnar då i det övre intervallet, 0,27-0,30. Rekommenderat dimensioneringsvärde utifrån de mätningarna är 0,28. Spänningsberoendet för tvärkontraktionstalet är inte utrett men sammanställs undersökningarna så är tendensen att det ökar med ökande belastning.

2.10 Hållfasthet

Skjuvhållfastheten hos gummiklipp har undersökts med direkta skjuvförsök och triaxialförsök. Resultaten visar att skjuvhållfastheten beror på spänningstillstånd, testmetod och brottkriterium. En sammanställning av resultat från direkta skjuvförsök presenteras i tabell 2.1.

För resultaten i tabell 2.1 för 10 och 20 % deformation har inte skjuvspänningsmaximum uppnåtts utan försöket har avbrutits vid denna deformation. Det förefaller som att skjuvhållfastheten i gummiklipp ökar med ökad deformation.

Tabell 2.1 Sammanställning av resultat från direkta skjuvförsök, Edeskär (2004a).

Brottskriterium	Kohesionsintercept, c' [kPa]	Friktionsvinkel, Φ' [°]
10 % Horisontell deformation	0-11,5	19-38
20 % Horisontell deformation	0-82	16-36,5
Skjuvspänningsmaximum	0	45-60

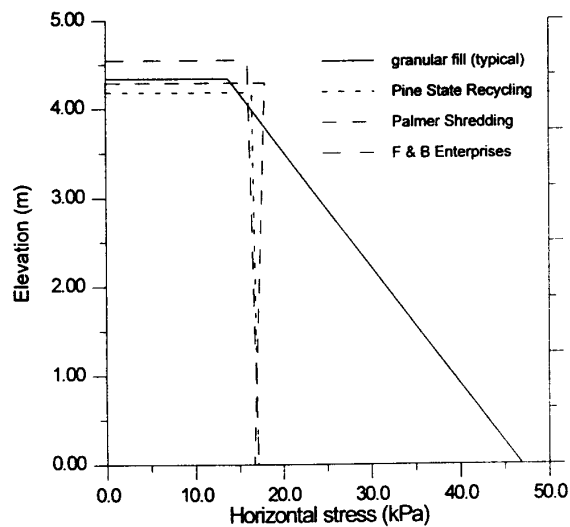
Resultat från triaxialförsök redovisas i tabell 2.2. Försöken har utförts på gummiklipp där stålorden avlägsnats för att skydda membranet som omger provet under försöken. Genomgående visar resultaten på högre friktionsvinklar än de direkta skjuvförsöken gör. Intressant att notera är att friktionsvinkeln ökar med ökad partikelstorlek samtidigt som den volumetriska töjningen minskar. Antalet genomförda triaxialförsök är för få för att dra allt för långtgående slutsatser av detta.

Tabell 2.2 Hållfasthetsparametrar bestämda med triaxialförsök för gummiklippsprodukter, efter Wu et al. (1997).

Utseende	Storlek [mm]	Volumetrisk töjning vid 55 kPa [%]	Friktionsvinkel Φ' [°]
Diskformade	38	27,0	57
Granulat	19	26,5	54
Avlånga	9,5	31,6	47
Granulat	9,5	25,4	47
Pulver	2	57,0	45

2.11 Vilojordtryckscoefficient

Vilojordtryckscoefficienten är av intresse för att beräkna det horisontella trycket som en gummiklippsfyllning verkar med mot en konstruktion. Försök har utförts där det horisontella trycket mot en betongvägg har mätts, Tweedie et al. (1998). Resultaten visas i figur 2.7. I figuren är även det teoretiska horisontella jordtrycket av en friktionsjord med densiteten $2,0 \text{ t/m}^3$ utritad. Utifrån försöken har vilojordtryckscoefficienten beräknats.



Figur 2.7 Uppmätt horisontellt tryck för 3 olika gummiklippsfraktioner från 38 mm till 76 mm med 35,9 kPa överlast, Tweedie et al. (1998). Som jämförelse visar den heldragna linjen det teoretiska horisontella jordtrycket för en friktionsjord med $\rho=2,0 \text{ t/m}^3$.

Av figuren framgår att det horisontella trycket mot konstruktionen är relativt konstant med djupet då gummiklippen appliceras som fyllning. För en gummiklippsfyllning utan överlast ökar det horisontella trycket mot djupet enligt det mönster som friktionsjorden i figur 2.7 visar. Vilojordtryckskoefficienten avtar med djup och pålagd belastning upp till 24 kPa vertikal spänning. Vid överlaster överstigande 24 kPa är K_0 konstant. Utifrån detta försök var typiska värden $K_0 \approx 0,35$ vid vertikalspänningen 12 kPa och $K_0 \approx 0,25$ vid vertikalspänningar över 24 kPa.

2.12 Värmeledningstal

Värmeledningstalet för gummiklipp har bestämts i laboratorium och genom utvärdering av fältobjekt, bl.a. Shao och Zarling (1995) och Humphrey et al. (1997). Medelvärdet på alla rapporterade värmeledningstal är 0,21 W/m,K.

Värmeledningstalet för gummiklipp ökar med ökad storlek, vatteninnehåll, andel stålkord och skrymdensitet. Skillnaderna är dock små.

Resultaten bör verifieras enligt den standard som Vägverket föreskriver för bestämning av värmeledningstal, ISO 8301 eller ISO 8302. Den metod som använts av Shao och Zarling (1995) överensstämmer i stort med ISO 8302 men är framtagen för att bestämma värmeledningstal för korkprodukter.

2.13 Beständighet

Beständigheten är beroende av miljön som gummiklippen är placerade i. Dokumenterade faktorer som bryter ner gummi från bildäck är främst UV-strålning, kemisk oxidation och värme.

UV-strålning och kemisk oxidation bryter ner gummit genom att bryta ner svavelbryggorna i den kemiska strukturen. Gummit i gummiklipp har ett inbyggt kemiskt skydd mot oxidation. En undersökning visar att i svagt alkaliska syrerika miljöer påverkades enbart ytskiktet, ca. 5 µm, av oxidation. Övrigt gummi, innanför ytskiktet, behöll de tekniska egenskaperna efter 42 år, AB-Malek och Stevenson (1986).

Värme kan dels resultera i kemisk nedbrytning av däck, vid temperaturer överstigande 70 °C, eller antända gummit vid temperaturer överstigande ca. 350 °C. Självantändning i gummiklippsfyllningar som överstiger 7 m har skett i USA orsakat av bakteriell oxidation av järn i kombination med de värmeisolationsegenskaperna gummiklipp besitter. Efter noggranna utredningar anses gummiklippsfyllningar som understiger 3 m inte utgöra någon risk för självantändning.

Det är oklart hur organiska lösningsmedel påverkar gummimatrisen och därmed de tekniska egenskaperna hos gummiklipp. De kemiska komponenterna i bildäck är olika resistenta mot petroleumprodukter. Studier om däckmaterials beständighet som kemisk blandning har inte hittats i litteraturgenomgången. Men lakförsök med hexan där PAH analyserats visar att ett organiskt lösningsmedel extraherar PAH-föreningar, Westerberg och Mácsik (2001). Det är inte klarlagt om detta påverkade de tekniska egenskaperna eller om det var ett resultat av att PAH är lösligt i opolära vätskor.

2.14 Uppsummering tekniska egenskaper

Typiska värden på materialparametrar för gummiklipp presenteras i tabell 2.3.

Tabell 2.3 Typiska värden på materialparametrar för gummiklipp, Edeskär (2004a).

Egenskap	Värde	Kommentar
Kompaktdensitet	1,16 t/m ³	
Skrymdensitet	450-990 kg/m ³	Lös fyllning till 400 kPa belastning
Porositet	50 %	Beror på spänningstillstånd
Permeabilitet	10 ⁻² m/s	
Styvhetsmodul	0,5-1 MPa	Beror på spänningstillstånd
Tvärkontraktionstal	0,28	
Skjuvhållfasthet	$c' = 0-11,5 \text{ kPa}$, $\Phi' = 19-38^\circ$	Vid 10 % deformation
— —	$c' = 0-82 \text{ kPa}$, $\Phi' = 15-36,5^\circ$	Vid 20% deformation
— —	$c' = 0 \text{ kPa}$, $\Phi' = 45-60^\circ$	Brottgräns
Värmeledningstal	0,20 W/m,K	

De karakteristiska egenskaperna för gummiklipp i jämförelse med friktionsjord är att materialet är lätt (låg densitet), elastiskt, dränerande och värmeisolerande. Skrymdensiteten för gummiklipp är ungefär 0,6 t/m³ att jämföra med ca. 2 t/m³ för friktionsjord. Gummiklipp är ett relativt kompressibelt material och flera egenskaper beror av aktuell belastning. Materialet blir styvare och skjuvhållfastheten ökar med ökad belastning.

Den yttre faktor som är av störst betydelse för gummiklipps tekniska egenskaper är överlasten. Materialet är kompressibelt vilket innebär att densiteten ökar och portalet minskar. Även om permeabiliteten påverkas av överlasten är den påverkan liten.

De egenskaper som kan påverkas av själva framställningen av gummiklipp är storleken och mängden utstickande stålkord. Större storlekar än $75 \times 75 \text{ mm}^2$ är ofullständigt undersökta avseende tekniska egenskaper.

Inga studier finns publicerade avseende den kapillära stighöjden. Det kan bero på att egenskaper som hög porositet, låg vattenabsorptionsförmåga och hög permeabilitet tyder på att den kapillära stighöjden är låg eller försumbar. Vidare är det svårt att bestämma p.g.a. färgen på gummiklippen. Värmeledningstalet för gummiklipp är väl undersökt i USA. Dock har ännu inte värmledningstalet bestämts enligt ISO 8301 eller ISO 8302 som Vägverket kräver i ATB VÄG, Vägverket (2004).

Det är tveksamt om materialet kan betraktas som linjärelastiskt i de spänningsintervall, t.ex. 10-50 kPa, som normalt används i anläggningstekniska sammanhang. En materialmodell som tar hänsyn till kopplingen mellan spänningsnivå och deformation, styvhet och skjuvhållfasthet bör tas fram.

De undersökningar som finns tillgängliga avseende beständighet visar att denna är god. Hur nedbrytningen på lång sikt, i tidsperspektiv över 40 år, påverkar de tekniska egenskaperna är ännu inte utrett. Eftersom den kemiska sammansättningen i däck förändras över tiden, t.ex. kommer PAH-innehållet i däck att minska p.g.a. lagstiftning, kan beständigheten i framtidens material påverkas både positivt och negativt beroende på vilka egenskaper för materialet som förändringarna i sammansättningen medför.

Avseende tekniska egenskaper finns det mer att undersöka innan kunskapsnivån om materialet är likställd med konventionella anläggningsmaterial. Vissa undersökningar är enkla att utföra, som t.ex. bestämning av kapillär stighöjd och värmeledningstal enligt gällande standarder medan andra mer svårbestämda rör spänningsberoende materialparametrar och materialmodeller för dimensionering.

3 EGENSKAPER FÖR MILJÖBEDÖMNING

3.1 Inledning

Utöver att gummiklipp ska fungera tekniskt i en konstruktion ska även materialets användning vara acceptabel ur miljösynpunkt. I detta kapitel behandlas det kemiska innehållet i däckmaterial från personbilsdäck, lakningsegenskaper för gummiklipp, toxikologiska tester på lakvatten från gummimaterial, exponeringsvägar från konstruktion till omgivning samt översiktligt effekter på omgivande miljö och organismer utifrån dessa exponeringsvägar. Underlaget till detta kapitel, med fullständiga referenser, är främst hämtat från Edeskär (2004a).

Innehållet av ämnen i däck har varit i fokus i samhället under en längre tid. Framförallt är det innehållet av polyaromatiska kolväten (PAH) som diskuterats, KemI (1994) och KemI (2003). Oro har uttryckts över ackumuleringen av däckslitagepartiklar i den urbana miljön och i omgivningarna kring vägar. Det är viktigt att komma ihåg att sammansättningen av däck successivt förändras vilket kan påverka de tekniska och miljömässiga egenskaperna över tiden. Exempel på det är den miljömärkning av bildäck som finns idag, SIS (2001) som verkar mot ett minskat innehåll av aromatiska oljor och den EU-lagstiftning som träder ikraft från och med 2009 där HA-oljor kommer att förbjudas i däck som säljs inom EU, BLIC (2003). Detta innebär att mängden PAH i gummiklipp successivt kommer att minska.

3.2 Innehåll

3.2.1 Kemisk sammansättning

Gummiklipp har samma kemiska sammansättning som råvaran bildäck. Ett genomsnittligt europeiskt sommardäck består av 83 % gummi, 12 % stålkord och 5 % textila material, baserat på vikt. BLIC (2001) har sammanställt innehållet i ett genomsnittligt europeiskt sommardäck, tabell 3.1.

Indelningen av komponenter i tabell 3.1 är baserad på huvudbeståndsdelar (gummityp, metaller, textila material) och funktionella tillsatser. I de funktionella tillsatserna används olika kemiska föreningar för olika däck. Enligt BLIC (2001) är dock kemiska egenskaperna, t.ex. reaktivt med syre och ozon, hos dessa kemiska föreningar likartade. Utifrån tabell 3.1 framgår det att baserat på denna indelning av däck är variationen av sammansättning liten mellan de studerade däcken, standardavvikelsen avseende totalvikt varierar mellan 0,22-0,38 % mellan de indelade komponentgrupperna.

Tabell 3.1 Sammansättning hos ett genomsnittligt europeiskt sommardäck med kimrök respektive kisel som fyllmaterial i slitbanan, BLIC (2001). För varje beståndsdel är standardavvikelsen angiven mellan de jämförda däckena.

Fyllmaterial	Kimrök	St.d.	Kisel	St.d.
Beståndsdel	[%] vikt	[%]	[%] vikt	[%]
Syntetiskt gummi	24.83	2.1	24.17	1.1
Naturgummi (NR)	16.91	2.8	18.21	1.3
Kimrök	26.91	1.7	19.00	3.0
Krita (Si)	0.57	1.5	9.65	2.8
Svavel	1.35	0.2	1.28	0.3
Zinkoxid	1.55	0.4	1.58	0.3
Aromatiska oljor	7.81	1.8	6.12	1.2
Stearinsyra	0.79	0.1	0.96	0.3
Acceleratorer	0.88	0.1	1.01	0.2
Antioxidanter	1.51	0.4	1.47	0.6
Återvunnet gummi	0.41	0.9	0.50	0.9
Belagd metallkord	11.7	1.7	11.4	1.3
Textila material	4.7	0.7	4.7	0.7
Totalt %	100.0		100.0	
Vikt (kg)	8.62	0.22	8.80	0.38

Det räcker inte med att studera de enskilda komponenterna som ingår i ett bildäck för att avgöra egenskaperna hos produkten, utan hänsyn måste även tas till kemiska reaktioner mellan beståndsdelarna och den kemiska strukturen där dessa komponenter sammanfogats i. Beskrivningen av innehåll ger en bild av vilka typer av material och kemiska föreningar som är aktuella att beakta.

3.2.2 Gummimaterial

Ett bildäck består av 83 % gummimaterial och ungefär 60 % av detta är syntetiskt gummi och ungefär 40 % naturgummi. I tabell 3.2 redovisas de syntetiska gummisorterna som används och respektive andel av syntetiskt gummi.

Tabell 3.2 Syntetiska gummisorter i bildäck och respektive andel, UNEP (2000).

Gummisort	Andel av syntetiskt gummi
	[%]
Styren-Butadiengummi (SBR)	74-81
Polybutadien, butadien (BR), isopren (IR)	15-21
Halogenerade co-polymerer	3-4
Klorbutylgummi	1

Gummimaterialen, inklusive naturgummi, som används i bildäck har lite olika fysiska egenskaper men generellt så är elasticitet och nötningsegenskaperna goda, Ciullo och Hewitt (1999). Gummisorternas tekniska användningsområde, d.v.s. de intervaller där de behåller sin elasticitet, slitstyrka och beständighet, ligger i temperaturintervallet -40 °C till +176 °C. Beständigheten mot vatten är god men resistensen mot mineraloljor och drivmedel är jämförelsevis låg jämfört med t.ex. halogenerade gummisorter. Undantaget är halogenerade copolymerer som uppvisar god beständighet även mot petroleumprodukter.

Klorbutylgummi är en halogenerad kemisk förening vars användning minskar inom däckindustrin.

3.2.3 *Tillsatsmedel*

I tillverkningen och för att få rätt egenskaper hos gummi används olika tillsatsmedel. Typerna av tillsatsmedel kan grovt delas upp i fyllmedel, åldringsskydd, mjukningsmedel och vulkaniseringsmedel, Trelleborg (2004). Fyllmedel används för att fylla ut strukturen i gummit. I däck används kimirök eller krita (kisel).

Som åldringsskydd används främst antioxidanter. Antioxidanter skyddar gummimaterialet från nedbrytning genom oxidation. Det är syre, ozon och UV-strålning som bryter ner svavelbindningarna i gummit. Olika ämnen används för att skydda mot olika oxidationsprocesser. Den förening som används i störst utsträckning är 6PPD (N-(dimetylbutyl)-N'-fenyl-p-fenylendiamin), BLIC (2001). Antioxidanterna är allergiframkallande och mycket giftiga för akvatiska organismer som kemiska ämnen. De skyddar gummit genom att brytas ner, d.v.s. de förbrukas. Fenolföreningar är exempel på nedbrytningsprodukter från antioxidanter.

Mjukningsmedel används för att ge produkten rätt hårdhet för att underlätta i tillverkningsprocessen samt för produktens slutliga hårdhet. I däck används bl.a. HA-oljor i detta syfte.

Till vulkaniseringsingredienser hör tillverkningsingredienser som svavel, zinkoxid, acceleratorer, aktivatorer etc. Den mest använda aktivatorn är CBS (N-cyklohexyl-2-bensotiosol sulfenamid), BLIC (2001). Vissa av dessa kemikalier kan förbrukas genom att de reagerar i tillverkningsprocessen.

3.2.4 *Metaller och textila material*

Med metaller avses här komponenter som består av metallstrukturer. Dessa utgör ca. 12 % av däckets vikt. Stålkorden består av zink eller bronsbelagd stålkord. Brons är en koppar-tenn legering. Även dubben i dubbdäck består av metall. I däck ingår det ca. 5 % textila material. Dessa utgörs främst av polyamid (nylon) och polyester.

3.3 **Emissioner**

3.3.1 *Inledning*

Det har utförts ett flertal studier avseende emissioner för gummiklipp i laboratoriemiljö och som uppföljning av fältobjekt, t.ex. Westerberg och Mácsik (2001) och Håøya (2002). Fokus i alla studier utom en har varit vattenburna emissioner. I en arbetsmiljöstudie har även damm från hantering av gummiklipp studerats, Ulfvarson et al. (1998). Här redovisas resultat uppdelade på vattenburna emissioner för metaller och organiska föreningar samt för luftburna emissioner följt av toxikologiska resultat på lakvatten från däckprodukter.

3.3.2 *Metaller*

Lakning har utförts i flera studier på gummigranulat och färre på gummiklipp som inkluderar utstickande stålkord. I tabell 3.3 presenteras resultat från lakförsök enligt

CEN/TC292 vid L/S-kvot 10 och destillerat vatten som lakmedium på 5 olika prover av gummiklipp inklusive utstickande stålkord. Analysmetod har varit ICP-MS.

Tabell 3.3 Resultat från lakning enligt CEN/TC292, L/S 10, på gummiklipp för metaller och arsenik. Markerade resultat med fet stil innebär att koncentrationerna låg under detektionsgränsen för den kemiska analysen. Efter Håøya (2002).

Grundämne	Koncentration µg/l	St.d.	Specifik lakning mg/kg TS	St.d.
Cd	< 0,52	0,04	5,2	0,45
Co	< 5	0	50	0
Cr	< 5	0	50	0
Cu	< 6,20	2,68	60	22,36
Fe	705,2	323,86	7040	3243,92
Mn	74,8	9,96	728	79,18
Ni	< 5	0	50	0
Pb	< 10	0	100	0
Zn	188,40	36,78	1900	353,55
As	< 1	0	6,40	4,93

Resultaten visar att vid neutrala förhållanden och med vatten som lakmedium är emissionerna av kadmium, kobolt, krom, koppar, nickel, bly och arsenik försumbara. Järn, mangan och zink lakar ut i påvisbara mängder.

En studie där pH-beroendet för lakning av metaller har undersökts visar att lakningen ökar då pH minskar, Engstrom och Lamb (1994). Kolonnförsök då gummiklipp blandats med jord visar på ett annat mönster, O'Shaughnessy och Garga (2000). Under sura förhållanden ökade utfällningen av järnhydroxider i kolonnen vilket minskade tillgängligt lakbart järn. Till järnhydroxider kan även andra metaller bindas. I kolonnförsöken var koncentrationerna av bl.a. järn och zink högre under basiska förhållanden jämfört med sura.

Resultaten är inte entydiga om hur pH påverkar lakning hos däckmaterial. En studie pekar på att PAH-lakningen ökar med pH från 3,5 till 8 samtidigt som det finns resultat som visar att PAH koncentrationerna i lakmediet blir lägre vid pH 13,6 jämfört med pH 7. Eftersom järn från lakvattnet kan fällas ut som järnhydroxider, som kan komplexbinda andra metalljoner, spelar det roll om analyserna av lakvattnet varit på filtrerade eller ofiltrerade prov.

3.3.3 Organiska föreningar

Det är främst polyaromatiska kolväten (PAH) som undersökts eftersom det är en grupp kemiska ämnen som varit i fokus gällande innehållet i däck. Andra ämnen är mindre undersökta. De data från undersökningar som presenteras är från dem som är utförda på däckmaterial från de nordiska länderna där metoderna är väl beskrivna. Resultat från andra lakförsök kommenteras översiktligt. I tabell 3.4 redovisas lakförsökresultat där PAH och fenoler ingår.

Tabell 3.4 Lakningsresultat från skakförsök m.a.p. PAH för gummigranulat Westerberg och Mácsik (2001) och gummiklipp, Håøya (2002), vid L/S 10. Som jämförelse redovisas befintliga kanadensiska riktlinjer för sötvatten NGSO (2004).

PAH-förening [ug/l]	Gummigranulat pH 7	Gummigranulat pH 10	Gummiklipp pH 6,9	Kanadensiska riktlinjer
Naftalen	11	< 0,29**	0,02**	1,1
Acenaftylen	< 0,14**	0,46	0,02**	
Acenaften	< 0,5**	< 0,5**	0,02**	
Fluoren	< 0,2*	2,8	0,02**	3,0
Fenantren	0,1	< 0,05**	0,02**	0,4
Antracen	< 0,01**	< 0,01**	0,02**	0,012
Fluoranten	< 0,01**	0,09	0,02**	
Pyren	< 0,05**	< 0,06**	0,02**	0,025
Bens(a)antracen*	0,03	< 0,01**	0,02**	0,018
Krysen*	< 0,01**	< 0,01**	0,02**	
Bens(b)fluoranten*	< 0,01**	< 0,04**	0,02**	
Bens(k)fluoranten	< 0,01**	< 0,01**	0,02**	
Bens(a)pyren*	< 0,01**	< 0,02**	0,02**	0,015
Dibenso(ah)antracen*	< 0,01**	< 0,01**	0,02**	
Benso(ghi)perylen	< 0,05**	< 0,06**	0,02**	
Indeno(123cd)pyren*	< 0,01**	< 0,01**	0,02**	
PAH Σ16 (EPA)	11	3,4	0,3	
PAH Σ16 (cancerogena)	0,03	< 0,05	< 0,02	

* = Cancerogena PAH

** = Nedre detektionsgräns för analysen.

Lakresultaten i tabell 3.3 visar att PAH lakar ut i små mängder och indikerar att storleken på klippen har en betydelse för utlakningen. Jämförs lakningsresultaten med analyser av innehållet av PAH i däck, Westerberg och Mácsik (2001), visar att det inte är de PAH-föreningar som innehållsmässigt dominerar i däckmaterialet som lakar ut i högst koncentrationer. Baserat på innehåll är de tre föreningarna med högst koncentration pyren, bens(a)antracen och krysen att jämföra med de tre föreningar som lakar ut mest, naftalen fenatren och bens(a)antracen. Det beror troligen på föreningarnas löslighet i lakmediet vatten. Lösligheten av PAH-föreningar i vatten är låg. Naftalen, som har högst löslighet i vatten av de studerade PAH-föreningarna, har en löslighet av 35 mg/l i vatten och Indeno(123cd)pyren, som har lägst löslighet av dessa föreningar, $2,2 \cdot 10^{-5}$ mg/l, Perhans (2001). Lösligheten kan delvis avspegla sig i lakresultaten i tabell 3.4 för gummigranulat där naftalen med den högsta vattenlösligheten är den dominerande föreningen. Dock är inte lösligheten begränsande efter 24 h kontakttid med lakmediumet eftersom inte koncentrationerna når upp till den maximala vattenlösligheten för ämnena. Jämfört med de kanadensiska riktlinjerna för sötvatten som baserar sig på påvisbara toxiska effekter på vattenorganismer behöver lakvattnet från gummigranulatet som mest spädas ut cirka 10 gånger för att inte överstiga riktlinjerna och lakvattnet från gummiklippen understiger riktvärdena.

Westerberg och Mácsik (2001) genomförde ett lakförsök på gummigranulat med hexan som lösningsmedel. Totalt lakades det ut 47 mg/l 16-EPA PAH. Dominerande utlakade föreningar var benso(ghi)perylen och pyren. Det är inte samma PAH-föreningar som dominerar lakningen med vatten, men pyren är den PAH-förening som samma studie fann

vara den av PAH-föreningarna som fanns i högst koncentrationer i granulatet. Att hexan extraherar PAH-föreningar kan vara en konsekvens av att lösligheten av PAH är hög i hexan medan den är låg i vatten.

Fenoler är lösliga i vatten i förhållande till PAH. I tabell 3.5 redovisas intervallet av koncentrationer för detekterade fenoler i en undersökning med skakförsök av 3 prov med gummiklipp och destillerat vatten som lakningsmedium och PNEC-concentrationer. PNEC (Predicted No Effect Concentration) är en koncentration för ett specifikt ämne där osäkerhetsfaktorer används för att väga samman effektkoncentrationer från försök på olika organismer för att generalisera resultaten för andra organismer. PNEC är förenklat att betrakta som den högsta koncentration av ämnet utan att negativ ekologisk effekt.

Tabell 3.4 Lakningsresultat från skakförsök m.a.p. fenol för gummiklipp 50×50 mm² vid L/S 10. Koncentrationerna är medelvärde av 3 försök. Som jämförelse redovisas PNEC-föreningar för sötvatten för de föreningar som finns, Håøya (2002).

Förening	Koncentration [µg/l]	PNEC [µg/l]
4-tert-Oktylfenol	3,22	0.12
4-n-Nonylfenol	0,0098	0.3
Iso-Nonylfenol	0,541	-
Bisfenol F	2,62	1.6
Bisfenol A	12,81	-

Fenolerna härrör främst från antioxidanter i gummiblandningarna. Fenoler är lösliga i vatten och därmed potentiellt mobila. Fenoler har toxiska effekter vid låga koncentrationer. Fenolerna har en nedbrytningstid kring 30 dygn i aerob nivå, Toxnet (2004).

EUs vetenskapliga kommitté, Committee on Toxicity, Ecotoxicity and the Environment (CSTEE), utvärderade hösten 2003 de vetenskapliga bevisen för hälso- och miljörisker orsakade av PAH i HA-oljor och däck, EC (2003). Utvärderingen genomfördes apropå bl.a. KemIs rapport 27 mars 2003, KemI (2003), om tillskottet av PAH till miljön från bildäck. CSTEE drar följande slutsatser avseende tillskotte av PAH från däckspartiklar till den akvatiska miljön:

- Exponering av PAH i löst form, d.v.s. utlakad PAH, från däckspartiklar till akvatiska organismer är mycket låg eftersom PAH är mycket svårlösliga.
- Exponeringsrisken oralt upptag av små däckspartiklar (däckslitage mot körbana) föreligger.

Spridning av partiklar kan minimeras genom att kapsla in materialet i materialavskiljande geotextil.

3.3.4 Luftburen spridning

Luftburen spridning kan delas in i två processer; avgång till gasfas och partikelspridning i damm. Det finns en studie, Ulfvarson et al. (1998), som behandlar dessa spridningsvägar som fokuserat på metaller och PAH. Ulfvarson et al. (1998) utesluter spridning av PAH i gasfas vid rumstemperatur eftersom temperaturen inomhus är för låg för att PAH ska avgå i gasfas. Det samma gäller metallavgång.

Vid byggande med gummiklipp kan omgivningen utsättas för viss spridning av däckpartiklar. Det finns en arbetsmiljöstudie där dammätningar utförts vid olika arbetsmoment, från fragmentering av däck till lossning och lastning i slutna utrymmen. Av oorganiska ämnen detekterades endast CaO. Uppmätta värden vid en hjullastare var 13,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vilket ska jämföras med arbetsmiljökravet på 2 mg/m^3 . Detekterade organiska föreningar var naftalen, acenaftylen, acenaften, fluoren, fenantren, flouranten och pyren. Av dessa föreningar anses fenantren, flouranten, pyren vara cancerframkallande. Koncentrationerna av dessa ämnena var dock låga 0,02-0,63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. I Sverige har vi inte gränsvärden för dessa ämnen för luft men de är 10000-100000 gånger lägre än gränsvärdena i USA, Ulfvarson et al. (1998).

3.3.5 Biologisk spridning

Undersökningar på gammalt däckmaterial visar att däck är svåra att bryta ner, AB-Malek och Stevenson (1986) Det pågår forskning på att finna bakterier för nedbrytning av däckmaterial men än har inga mikroorganismer hittats där det går att upprätthålla en livsmiljö där de kan användas för storskalig nedbrytning av däckmaterial, Bredberg (2003). Det förefaller därför som att däckmaterial inte kan anses som biologiskt nedbrytbart under normala förhållanden i jord.

3.4 Toxikologiska tester

Ett toxikologiskt test kan inte visa om det testade substratet inte medför negativa effekter på omgivande miljö utan kan bara påvisa negativa effekter. Det finns flera toxikologiska undersökningar på ett stort antal organismer. Eftersom undersökningarna skiljer sig åt avseende förutsättningar och responsvariabler är det svårt att dra generella slutsatser. Evans (1997) har genomfört en stor sammanställning av toxikologiska studier. De studierna visar att nytt däckmaterial ger mer uppmätt respons än gamla däckmaterial. Den mest känsliga arten, och levnadsstadiet, är fiskyngel från regnbågslax (*Oncorhynchus mykiss*) där lakvatten från nytt däckmaterial innebär dödlig respons för fiskynglen. Övriga undersökta fiskarter visade mindre respons.

UNEP (2000) granskade toxikologiska undersökningar på däckmaterial. Undersökta organismtyper var alger (*S. Capricornutum*), skaldjur (*Daphnia Magnia*) och fisk (*Brachydano Rerio*). De uppmätta responserna EC_{50} (effektkoncentration då 50 % av organismerna är oförmögna att simma efter provtiden) och LC_{50} (effektkoncentration där 50 % av de testade organismerna dör efter provtiden) uppträdde vid koncentrationer som är 130 gånger högre än de som EU använder för klassificering av att en kemisk produkt ska anses som skadlig för akvatiska organismer. Resultaten i UNEP (2000) överensstämde med resultaten som Evans (1997) sammanställt.

3.5 Uppsummering av miljöegenskaper

Även om däck kan ha varierande kemisk sammansättning visar sammanställningen av sammansättningen av ett genomsnittligt europeiskt sommardäck att skillnaderna är små och att sammansättningen väl kan beskrivas i funktionella kemiska grupper. Det är inte huvudelementen i däcken, gummi, metall och textil, som varit i fokus utan tillsatsmedel i gummiblandningarna som aromatiska kolväten, antioxidanter och acceleratorer.

De ämnesgrupper som främst är undersökta ur miljösynpunkt är metaller, PAH och i viss mån fenoler. Metallläckaget är av samma storleksordning som för bergmaterial. PAH lakar ut i låga koncentrationer. Det beror bl.a. på att lösligheten i vatten är låg. Det fokus på PAH-innehåll i däck rör en annan exponeringssituation än den som är aktuell i anläggningstekniska tillämpningar.

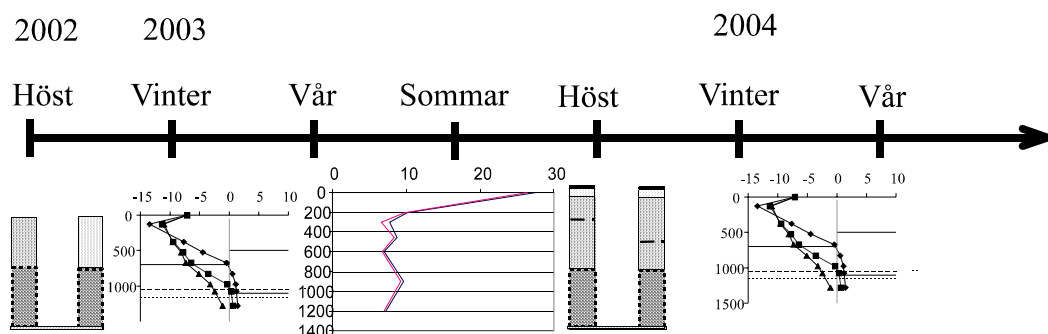
I en anläggningsteknisk tillämpning är det normalt vattenburna föroreningar som är av intresse för vilken miljöpåverkan materialet kan ha på omgivningen. Lakförsök visar att metaller lakar ut från däcklipp, främst järn, koppar mangan och zink. Av studerade organiska föreningar lakar PAH och fenoler ut i låga koncentrationer. Toxikologiska studier visar att organismer visar att lakvatten från däckmaterial har påvisbar negativ effekt på organismer. Nytt däckmaterial uppvisar större negativ respons på organismer än äldre material.

Påverkan av pH på lakningsegenskaperna för metaller hos gummiklipp är inte entydigt. Resultaten tyder på att metaller lakar ut vid låga pH-värden och organiska föreningar samt zink vid höga pH-värden. Eftersom järn är vanligt förekommande, men även mangan, i lakvatten behöver järn- och manganhydroxidkomplex beaktas då lakning från en konstruktion ska bedömas eftersom dessa komplex kan binda metalljoner, och om de upplöses avge desamma, från lakvattnet.

4 ANVÄNDNING AV GUMMIKLIPP I VÄGBYGGNAD

4.1 Inledning

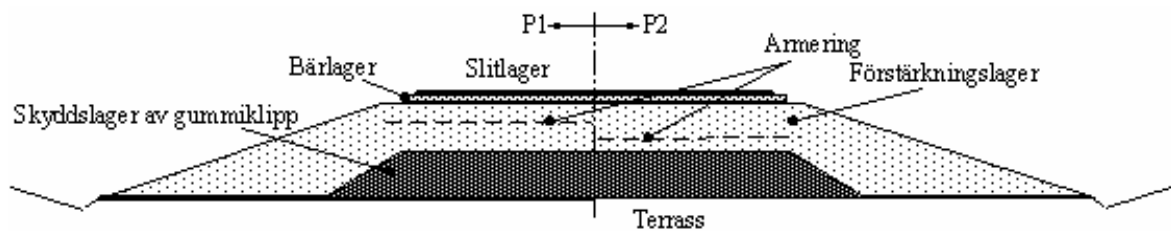
I detta kapitel redovisas kortfattat resultaten från byggandet av provsträckan på väg 686 i Bodens kommun med gummiklipp som skyddslager fram till våren 2004. Resultaten är hämtade från Edeskär (2004b). Dimensioneringsarbetet och godkännandet av verksamheten av miljö- och byggnämnden i Bodens kommun pågick under våren 2002. Arbetet i fält med teststräckan påbörjades hösten 2002. Teststräckan färdigställdes då t.o.m. förstärkningslagret, där halva sträckan hade ett förstärkningslager bestående av 500 mm bergkross och den andra halvan ett förstärkningslager av 500 mm hyttsten. Beläggningsarbetet var planerat till juni 2003. På grund av förseningar på andra delar av det vägprojekt som teststräckan ingick i och högre prioriterade projekt under sommaren återupptogs arbetet först på hösten 2003. Under sommaren 2003 utfördes bl.a. mätningar av teststräckans bärförmåga på förstärkningslagret och analyser på uppsamlat lakvatten genomfördes. Under hösten byttes den delen av teststräckan där förstärkningslagret bestod av hyttsten ut mot bergkross, armering lades ned i förstärkningslagret och förstärkningslagrets tjocklek ökades från 500 till 750 mm. Därefter lades bärlagret ut följt av beläggning. Arbetsgången åskådliggörs schematiskt i tidsaxeln i figur 4.1.



Figur 4.1 Tidsaxel med de olika momenten vid byggandet av teststräckan. Under 2002 färdigställdes vägen t.o.m. förstärkningslagret. Under 2003 utvärderades konstruktion och bl.a. ökades förstärkningslagret innan beläggning. Utvärderingen av vägen har fortsatt under 2004.

4.2 Vägkonstruktionens uppbyggnad

Terrassen består av en siltig morän som är tjälfarlig. Gummiklippet används som ett 600 mm skyddslager i vägkonstruktionen och är inkapslad i en materialavskiljande geotextil. Förstärkningslagret består av 750 mm bergkross 0-100 mm. I förstärkningslagret finns stålarmningsnät inlagda på två olika nivåer, i provsträcka P1 på 370 mm relativt vägytan och i provsträcka P2 på 620 mm relativt vägytan. Bärlagret är obundet och består av 0-80 mm bergkross och slitlagret består av 45 mm MJOG 16.



Figur 4.2 Uppbyggnad av vägkonstruktion. I provsträckorna P1 och P2 är armeringen placerad på två olika nivåer i förstärkningslagret.

I provsträckan ingår även en referenssträcka där förstärkningslagret består av 750 mm bergkross utan skyddslager, 80 mm obundet bärlager av bergkross 0-80 mm och slitlagret av 45 mm MJOG 16.

I provsträckorna P1 och P2 samt referenssträckan installerades mätutrustning för att följa upp vägen. För att studera tjälisoleringsförmågan används temperatursonder som mäter temperaturfördelningen i vägkonstruktionen samt tjälgränsmätare av Gandahl-typ. Även lufttemperaturen mäts, 1,5 m över markytan. För att mäta kompressionen i gummiklippslagret finns peglar och mätslangar för slangläggning installerade. Vattenburna emissioner studeras med lysimetrar som är installerade i terrassnivå. Bärförmågan på vägen mäts med tung fallviktsmätning.

4.3 Dimensionering

4.3.1 Inledning

Vid dimensioneringen av vägen har den metod som föreskrivs i ATB VÄG, Vägverket (2004), använts. Metoden bygger på en linjärelastisk materialmodell och semiempiriska samband mellan last och nedbrytning av beläggning och terrass. Valet av modell är inte baserat utifrån de egenskaper gummiklipp har utan för att studera om den metod som används i Sverige är tillämplig på gummiklipp som material. Utvärdering av den färdiga konstruktionen kommer att ske gentemot dimensioneringsresultaten.

En dimensionering av en vägbyggnad enligt ATB VÄG kan göras på två sätt. Dels genom att använda Vägverkets dataverktyg PMS OBJEKT eller genom att följa den beräkningsgång som ATB VÄG föreskriver och beräkna de töjningar som behövs som indata på annat sätt. I detta arbete har båda tillvägagångssätten använts, Vägverkets program PMS OBJEKT version 3.0, Vägverket (2002), och beräkningar enligt ATB VÄG, där töjningar i konstruktionen beräknats med programmet EVERSTRESS 5.11, WSDOT (1999). Resultaten har jämförts mellan de båda tillvägagångssätten.

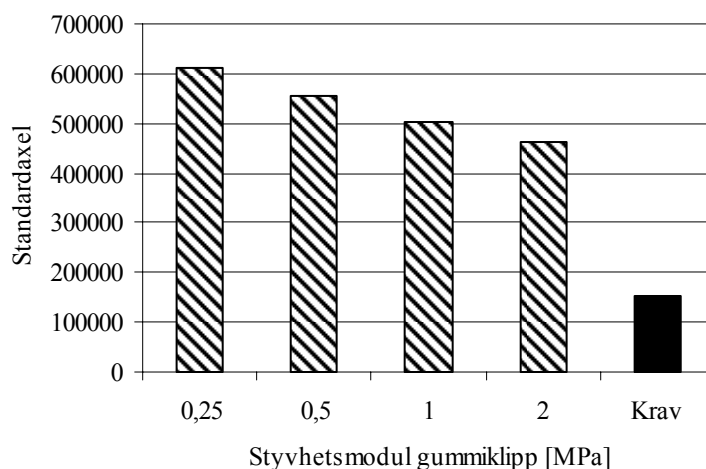
4.3.2 Metod

I litteraturstudien, Edeskär (2004a), inventerades publicerade resultat på laboratoriebestämda tekniska egenskaper. Utöver dessa resultat studerades även utvärderade tekniska egenskaper från fältobjekt, Edeskär och Westerberg (2003). Av de fältprojekt som studerats är det ett i Finland, Länsivaara et al. (2000), där förutsättningarna och utformning av vägkonstruktionen mest överensstämde med de aktuella förhållandena.

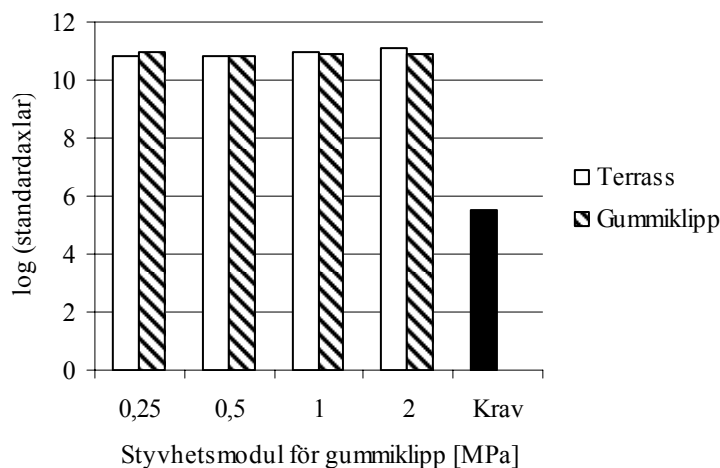
De materialdata som använts för undergrund och överbyggnadsmaterial är de som ATB VÄG föreskriver. För gummiklipp användes materialdata från publicerade studier baserat på Edeskär (2004a) och Länsivaara et al. (2000). Den utvärderade styvhetsmodulen från detta projekt användes bl.a. som ansatts vid dimensioneringsarbetet. Temperaturdata för tjälberäkning i PMS OBJEKT 3.0 har tagits från den av Vägverket närmast belägna VVIS-stationen, 2511 i Sävast, med uppgifter från vintern 1996/1997.

4.3.3 Resultat

Jämförelser mellan beräkningsresultaten och den faktiska konstruktionens egenskaper, d.v.s. efter det att förstärkningslagret ökades till 750 mm och vägen asfalterades, är inte ännu genomfört i arbetet. Utvärdering med fallviktsmätning på förstärkningslagret indikerade att den styvhetsmodul som Länsivaara et al. (2000) uppnått i deras konstruktion var högre än den aktuella. Därför beslöts att öka tjockleken för förstärkningslagret och konstruktionen ändrades genom att öka tjockleken på förstärkningslagret från 500 mm till 750 mm. Eftersom osäkerhet råder om den faktiska styvhetsmodulen utfördes beräkningar för flera styvhetsmoduler för gummiklippet. I figur 4.3 och 4.4 redovisas det förväntade antal standardaxlar för slitlager och terrass för den konstruktion som redovisas i figur 4.2 för styvhetsmoduler i intervallet 0,25-2 MPa. För jämförelse redovisas i figur 4.4 även resultaten där gummiklippet betraktas som en fiktiv terrassyta.



Figur 4.3 Beräknat antal standardaxlar för belägningens livslängd samt det dimensionerande antalet standardaxlar enligt ATB VÄG för den aktuella vägsträckan med styvhetsmodulerna 0,25, 0,5 1 och 2 MPa. Beräkningarna gäller mitt under innerhjulet på standardaxeln.



Figur 4.4 Beräknat antal standardaxlar för terrassens livslängd rakt under innerhjulet på standardaxeln samt det dimensionerande antalet standardaxlar enligt ATB VÄG för den aktuella vägsträckan. Staplarna benämnda gummiklipp är en fiktiv terrassyta representerad av gränsskiktet mellan förstärkningslager och gummiklipp. Notera att antalet standardaxlar är logaritmerade.

Resultaten som redovisas i figur 4.3 och 4.4 visar att skillnaden i resulterande antal standardaxlar inte är stor trots att största skillnaden i styvhetsmodul för gummiklippet är åtta gånger. I modellen blir det resulterande antalet standardaxlar större för en lägre styvhetsmodul vilket inte borde vara fallet. Det kan bero på att modellen eller beräkningsprogrammet har svårt att hantera de stora skillnaderna i styvhet mellan gummiklippet, med i sammanhanget mycket låg styvhet, och förstärknings- respektive undergrundsmaterialet. Gummiklipp är heller inte ett linjärelastiskt material som materialmodellen för dimensionering bygger på. För terrassen ökar antalet standardaxlar med ökad styvhetsmodul på gummiklippet.

Baserat på dimensioneringsarbetet som är genomfört i denna studie kan följande slutsatser dras:

- Livslängden på beläggningen är dimensionerande. Den nödvändiga tjockleken på vägöverbyggnaden för att motverka det mjuka skyddslagret medför en betydligt längre livslängd för terrassen än för beläggningen.
- Den beräknade livslängden varierar beroende på vilket program som används vid dimensionering enligt ATB VÄG. Beräkningarna med EVERSTRESS 5.11 gav en längre livslängd för beläggningen jämfört med PMS OBJEKT 3.0 vid samma förutsättningar. PMS OBJEKT 3.0 gav en längre livslängd för terrassen jämfört med EVERSTRESS 5.11. Resultaten för programmen borde givit samma resultat eftersom de använder samma beräkningssamband.
- Utvärdering av den färdigbyggda konstruktionen krävs för att bestämma en representativ styvhetsmodul som kan användas för dimensionering med de linjärelastiska materialmodeller som föreskrivs idag i ATB VÄG.

4.4 Byggande

4.4.1 Inledning

Byggandet av provsträckan utfördes i två steg. På hösten 2002, under oktober och en bit in i november, grävdes den tidigare vägkroppen bort, terrassen justerades och packades samt vägöverbyggnaden färdigställdes upp till och med förstärkningslagret. Vägarbetet avbröts på grund av vintern och avsikten var att vägen skulle beläggas under försommaren 2003. Eftersom andra delar av byggnationen av vägen dröjde och andra vägprojekt var mer prioriterade under sommaren 2003 sköts beläggningsarbetet upp till hösten 2003. Beslut fattades att förstärkningslagret skulle ändras till att bestå av 750 mm bergkross över hela teststräckan och att armering skulle läggas in på två nivåer i förstärkningslagret. Vägen färdigställdes under september 2003 då den delen av provsträckan där förstärkningslagret bestod av hyttsten byttes ut mot bergkross 0-100 mm, förstärkningslagret ökades till 750 mm och armerades, bärlager och beläggning lades ut.

All hantering av gummiklippet utfördes med befintlig anläggningsutrustning. Materialet transporterades till byggplatsen med flisbilar. För utläggning och avjämning användes en hjullastare, figur 4.5. För packningen användes en vält med 11,5 tons statisk linjelast. Det fanns en risk att stålkorden i gummiklippet punkterar däcken på anläggningsmaskinerna. Under hela bygget punkterades ett lastbilsdäck vilket inte bedömdes vara var mer än normalt av platschefen. I vissa avseenden var gummiklipp mer lätthanterligt än konventionella vägbyggnadsmaterial som bergkross och friktionsjord. Till exempel så höll materialet ihop bättre. Till nackdelarna hörde att när väl materialet har packats är det svårt att justera eftersom omkringliggande gummiklipp följer med som sjök.



Figur 4.5 Lossning av gummiklipp från flisbil samt utläggning och justering med hjullastare.

Det arbetsmoment som försvårades vid användningen av gummiklipp var att bestämma tjockleken på ovanliggande lager. Eftersom materialet är kompressibelt minskar tjockleken alltmer som överbyggnaden byggs på. Den metod som vanligen används, att med avvägning på ytan avgöra lagrets slutliga tjocklek, fungerar bara om gummiklippets kompression vid varje påfört lager beaktas.

4.5 Utvärdering

4.5.1 Inledning

Utvärderingen omfattar resultat fram till färdigställandet av vägsträckan samt inledande observationer av slitlagret. Bärförmågan utvärderades på förstärkningslagret med fallviktsmätning, de tjälisolerande egenskaperna genom att studera temperaturfördelningen och tjälgränsens läge i vägkonstruktionen, kompressionen i gummiklippslagret med peglar och vattenburna emissioner genom att analysera lakvattnet.

4.5.2 Bärförmåga

Bärförmågan utvärderades genom fallviktsmätning med FWD-apparat (Falling Weight Deflectometer) enligt Vägverkets metodbeskrivning 114:2000, Vägverket (2000). Fallviktsapparaten mäter vägytans deflektion (nedsjunkning) under belastning motsvarande en överfart av ett hjul, normalt motsvarande ett tungt fordon.

Vägens bärförmåga (styvhet) utvärderades under sommaren 2003 direkt på förstärkningslagret som vid tidpunkten bestod av 500 mm bergkross (P1) respektive 500 mm hyttsten (P2). Bärförmågan, d.v.s. hela konstruktionens styvhet (ytmodulen), utvärderades för att få ett underlag om tjockleken på förstärkningslagret var tillräcklig inför beläggningsarbetet på hösten och för att erhålla deflektionsdata för att iterera fram styvheten i gummiklippslagret. De uppmätta deflektionerna, deformationerna vid belastning, användes även som underlag för dimensionering med programmet ELSYM 5, FHA (1985). Vidare har även utseendet på den s.k. deflektionskurvan studerats.

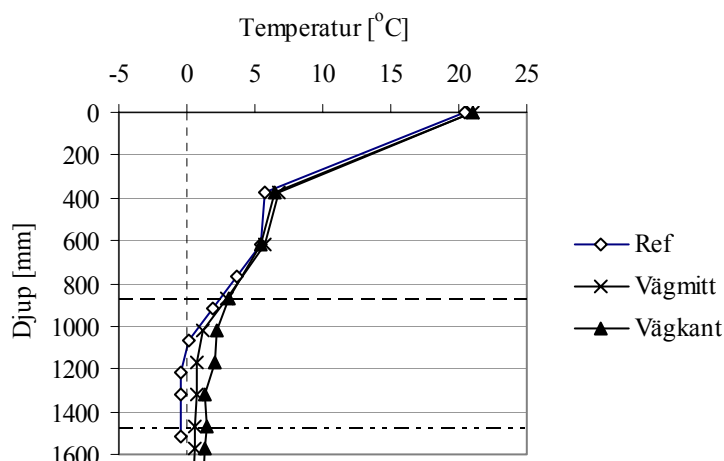
Baserat på de fallviktsmätningar som utfördes på konstruktionen med 600 mm gummiklipp överlagrat av 500 mm förstärkningslager med 26, 38 och 50 kN slaghöjd kan följande konstateras:

- Responsen vid belastning av 26 kN, deflektionen på vägytan från belastningscentrum och utåt, överensstämde med responsmodellen för utvärdering av fallviktsmätning vilket inte var fallet för 38 och 50 kN slaghöjd. De uppmätta deflektionerna för 50 kN slaghöjd låg utanför deflektionssensornernas mätområde.
- De utvärderade medelstyvhetsmodulerna för gummiklippslagret varierade mellan 5-10 MPa för slaghöjderna 28, 38 och 50 kN. Medelstyvhetsmodulen är låg och variationen mellan högsta och lägsta styvhetsmodulen är liten jämfört med konventionella vägöverbyggnadsmaterial.
- Fallviktsmätningarna visade ingen skillnad i styvhet mellan hyttsten och bergkross som förstärkningslager men okulära observationer indikerar att överbyggnaden av bergkross var styvare.
- Styvhetsmodulen för gummiklipppet beräknades med en 4-lagers responsmodell. Resultaten visar att utifrån de fallviktsdata som är tillgängliga låg styvhetsmodulen i gummiklippslagret mellan 2-300 kPa beroende på antagna styvhetsmoduler för de övriga lagren i modellen.

4.5.3 Tjälisolering

Temperatur- och tjälgränsmätningar har utförts på hösten 2003 samt våren och försommaren 2004 för att studera tjälnedträngning och upptining.

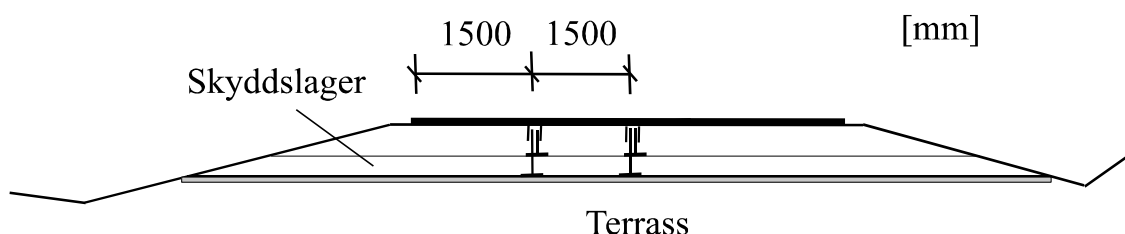
Mätningar av temperaturer och tjälfronten i vägkonstruktionen under vinter och tjällossning visar att gummiklippslagret, i jämförelse med referenssträckan, har en tjälisolerande effekt, figur 4.6.



Figur 4.6 Temperaturprofil i sektion 2/420 (P1) och i referenssektionen 2/330 vid tjällossningen 2004. I figuren är gränsen mellan förstärkningslager och terrass i sektion 2/330 angiven med streckad linje och mellan skyddslagret och terrassen i P1 med streckad och prickad linje samt 0°C-isotermen som streckad vertikal linje. I referenssträckan är terrassen frusen 2 dm under terrassytan vid mättillfället och i gummiklipposträckan är terrassen ofrusen.

4.5.4 Kompression

Sättningar har studerats genom avvägning av pglar och ytor. Slangsättningsmätningar planeras att genomföras under hösten 2004. Peglarna är installerade i två sektioner. Peglarna är placerade ovan och under skyddslagret av gummiklipp i vägens mitt och i körbanans mitt, se figur 4.7.



Figur 4.7 Placering av pglar i vägsektion.

De s.k. primära sättningarna (kompressionen) i konstruktionen, orsakade av belastningen av 500 mm förstärkningslager, uppgick i genomsnitt till ca. 40 % för P1 med bergkross som förstärkningslager och ca. 14 % för P2 med hyttsten som förstärkningslager. De s.k.

sekundära sättningarna, sättningar efter 2 månaders belastning av 500 mm förstärkningslager och trafik, uppgick i genomsnitt till 4,5 % för delsträcka P1 och 2,1 % för delsträcka P2.

4.5.5 Lakvatten

Provtagning på lakvattnet genomfördes i juni 2003. Avsikten var att analysera halten grundämnen, främst metaller och svavel, och PAH i lakvattnet från de tre teststräckorna, d.v.s. referenssträckan, och provsträckorna P1 med bergkross och P2 med hyttsten. Vägen var obelagd vilket innebar att lysimetrarna förväntades vara fyllda med vatten. Lakvattnet från lysimetrarna i referenssträckan räckte dock inte till för en PAH-analys som kräver ett prov om minst 1 liter, utan enbart till en grundämnesanalys. Det beror möjligen på att stenmjöl i bergkrossmaterialet satt igen geotextilen som avskiljer förstärkningslagermaterialet från lysimetern. Grundämnesanalysen utfördes på uppslutna prov (inkluderat partikelfasen) med ICP-MS (atom absorptionspektroskopi) och PAH-analyserna med HPLC (högtrycksgaskromatograf).

Lakvattenanalyserna visar att vissa grundämnen anrikas i lakvattnet jämfört med referenssträckan. De ämnen som anrikas mest i P1 med bergkross som förstärkningslager var järn (9 ggr), aluminium (8 ggr) och bly (5 ggr). För P2 med hyttsten som förstärkningslager anrikades bl.a. koppar (267 ggr), bly (71 ggr), kalium (52 ggr), zink (36 ggr) och svavel (17 ggr). Av PAH-föreningar detekterades naftalen, acenaften, fluoren och fenantren i lakvattnet. Lakvattnet i referenssträckan räckte inte till för analys av PAH som jämförelse. Inga av de detekterade PAH-föreningarna räknas till de cancerogena av de sk. 16 EPA PAH-föreningarna. Dominerande PAH-förening var naftalen, 17 µg/l i P1 med bergkross som förstärkningslager och 12 µg/l i P2 med hyttsten som förstärkningslager. Övriga detekterade PAH-föreningar var under 0,5 µg/l. Fler undersökningar behöver göras på lakvattensammansättningen för att se om emissionerna är representativa under en längre tidsrymd eller om de antar andra nivåer efter det att konstruktionen färdigställts.

4.6 Jämförelse med andra projekt

Provsträckan utformades baserat på resultat från Humphrey och Nickels (1997). Beräkningar baserade på deras erfarenheter visade att det skulle kunna vara tillräckligt med 500 mm förstärkningslager för provsträckan. För dimensionering och byggande har erfarenheter från andra studier, bl.a. Länsivaara et al. (2000), använts.

Dimensionering efter linjärelastisk materialmodell har utförts av Länsivaara et al. (2000). Ingen rapportering på svenska eller engelska har hittats om hur väl dimensioneringen stämde överens med utvärderingen av den färdiga konstruktionen. De utvärderade resultaten från denna studie användes som ansats vid dimensioneringen av aktuell provsträcka.

Bärförmågan (styvheten) i gummiklippet då konstruktionen överlagraades av 500 mm förstärkningslager var låg enligt fallviktsresultaten. Andra utvärderingsmetoder än fallviktsmätning på förstärkningslagret skulle möjligen kunnat ha givit annat resultat. Humphrey och Nickels (1997) förespråkar statisk plattbelastning istället. Utifrån denna studies resultat valdes att prova ett så pass tunt förstärkningslager som 500 mm. Efter det

att provsträckan justerats till 750 mm förstärkningslager är konstruktionen jämförbar med Länsivaara et al. (2000). Deras utvärderade styvhet för gummiklippslagret är 1,5-2 MPa.

Den uppmätta kompressionen i delsträcka P2 med hyttsten som förstärkningslager är jämförbar med resultat från andra undersökningar, Heimdahl och Drescher (1998). Den uppmätta kompressionen i delsträcka P1 är ungefär dubbelt stor. Det förefaller troligt att peglarna där inte ger tillförlitliga resultat. Slangsättningsmätare kommer i fortsättningen att användas för utvärdering av kompression.

Tjälisoleringseffekten är väl dokumenterad i andra fältprojekt, bl.a. Humphrey och Eaton (1995) och Shalaby och Kahn (2002). Hittills har projektet visat att gummiklippen verkar tjälisolerande dels då överbyggnaden bestod av 500 mm förstärkningslager och dels när vägen är färdigställd.

Metallhalterna i analyserna var genomgående högre i P2 med hyttsten som förstärkningslager jämfört med P1 med bergkross som förstärkningslager. Jämfört med referenssträckan med samma förstärkningslager av bergkross som i P1 anrikades framförallt järn och aluminium i P1. Koncentrationerna är dock måttliga. Förväntade lakbara ämnen som zink och koppar anrikades 2-3 ggr. De uppmätta halterna ligger i nivå med tidigare studier, Humphrey och Katz (2000). Jämfört med lakvattenstudier i laboratorium är metallhalterna i lakvatten från provsträckan P1 2-10 ggr lägre än för däckklipp, Håøya (2002), och ca. 50 ggr jämfört med gummigranulat, Westerberg och Mácsik (2001), för t.ex. zink. I lakvattenkoncentrationerna från provsträckan återfinns då även ett visst tillskott från förstärkningslagret. Halterna PAH var något högre än förväntat i lakvattnet. Naftalen, som är den dominerande PAH-föreningen i lakvattnet var högst i P1. Koncentrationen av naftalen var av samma storleksordning som lakresultat för gummigranulat, Westerberg och Mácsik (2001) och betydligt högre än för lakresultat för gummiklipp, Håøya (2002), där koncentrationen var ca. 100 gånger lägre. Det erhållna lakvattnet från referenssträckan räckte inte till för en PAH-analys. Om inte så varit fallet hade det varit möjligt att jämföra om eventuellt bidrag av naftalen från avgaser eller andra källor kan ha bidragit till den höga koncentrationen.

5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

5.1 Gummiklipp som konstruktionsmaterial

För att ett material ska vara intressant att använda i mark- och anläggningstekniska tillämpningar bör det uppfylla följande kriterier:

- Ha kända tekniska egenskaper.
- Fylla en teknisk funktion.
- Miljömässigt acceptabel användning.
- Finnas tillgängligt.
- Ekonomiskt motiverat.

I detta kapitel kommer gummiklipp att diskuteras utifrån ovanstående kriterier.

5.2 Tekniska egenskaper

5.2.1 Dimensionering och materialparametrar

Under övervägande delen av den 30-års period som gummiklipp använts i mark- och anläggningstekniska tillämpningar har fokus på forskningen inom området varit på att ta fram kunskap för att kunna använda materialet i konstruktioner. Materialparametrar har bestämts med de metoder som är praxis baserat på den dimensioneringsmetodik som används vid mark- och anläggningstekniska konstruktioner och som är avsedda för främst bergmaterial. Det mynnade i USA ut i en materialstandard för användning av gummiklipp, ASTM (1998). Under senare år har även mer avancerade studier, som triaxialförsök, genomförts. Det finns riktlinjer i USA om användning av gummiklipp som konstruktionsmaterial i mark- och anläggningstekniska tillämpningar och dessa bygger huvudsakligen på empiriska erfarenheter. Att ta steget till metoder för analytisk dimensionering kräver mer forskning. Den fortsatta utvärderingen av provsträckan med gummiklipp utanför Boden kommer att ge mer kunskap och erfarenhet avseende modeller och dimensioneringsparametrar för dimensionering av vägar i Sverige.

5.2.2 Materialparametrar

Kompaktdensiteten är väl undersökt i en studie i USA. Motsvarande försök bör även utföras i Europa men resultaten kommer med stor sannolikhet att överensstämma väl med de amerikanska resultaten eftersom däckens innehåll inte skiljer sig nämnvärt mellan USA och Europa. Skrymdensiteten för gummiklipp är framförallt beroende av pålagt tryck och tillfört packningsarbete, medan storleken på gummiklipp spelar en mindre roll. Det behövs mer studier för att ta fram bättre metoder för att i förhand mer exakt kunna beräkna slutlig densitet och lagertjocklek i en konstruktion.

Porositet och portal är undersökt i flera studier. I de flesta utvärderingar finns dock ett underliggande antagande om att de individuella gummiklippen inte genomgår någon

volymförändring. Vid låga spänningar, upp till 50 kPa, är det troligen en god approximation men det bör verifieras för försök där porositeten har studerats upp till 400 kPa. Porositeten är kopplad till skrymdensiteten, och även för porositeten är det idag svårt att exakt bedöma hur stor den blir vid en viss belastning i fält. Det är dock verifierat att porositeten är hög och uppgår som lägst till ca. 30 % vid höga spänningar som 150 kPa.

Permeabiliteten är väl undersökt, även upp till höga spänningsnivåer. Den har dock varit svårbestämd i många försök eftersom den är så hög att den blir svår att mäta. Vid trycket 400 kPa är förväntad permeabilitet i storleksordningen 10^{-2} m/s. Det saknas försök där permeabiliteten studerats i horisontell riktning. Kapillariteten är inte bestämd genom försök men utifrån den höga permeabiliteten och den vattenavvisande förmågan i gummimaterialet antas den vara låg eller försumbar.

Vattenkvoten i ett enskilt gummiklipp har utförligt bestämts i en studie. I en annan studie har vattenabsorptionen i däckmaterial bestämts efter drygt 40 års nedsänkning i vatten. De båda studierna visar att vattenkvoten i gummiklippen understiger 5 %. För gummiklipp som inte utsatts för vatten är innehållet av vatten nära noll.

Eftersom gummiklipp är ett relativt kompressibelt material är kompressionsegenskaperna viktiga att känna till. Dessa har studerats i flera studier, både genom ödometerförsök och i triaxialförsök. Ödometerförsöken visar att den vertikala kompressionen är icke-linjär mot vertikal spänning. Vid belastning erhålls största ökningen av kompression vid lägre tryck och i takt med att spänningen ökar styvnar materialet och därmed minskar successivt tillskottet av deformationer. Triaxialförsöken visar att provkropparna med gummiklipp genomgår en förändring vid belastning istället för att utveckla tydliga brottplan. Skillnaderna i resultat i studierna av kompressionsegenskaper beror bl.a. på testmetodik, framförallt vidhäftning mellan gummiklipp och testutrustning, belastningsfall och initieell packningsgrad hos provkropparna. Kompressionsegenskaperna behöver utredas mer.

Styvheten är undersökt i flera studier, framförallt i ödometerförsök. I låga spänningsintervall, upp till 40 kPa, överensstämmer resultaten väl mellan undersökningarna. Över 50 kPa varierar resultaten mycket. Styvheten är spänningsberoende, d.v.s. ju högre tryck desto styvare respons. Eftersom styvheten är låg för gummiklipp jämfört med friktionsjordar är det i många fall en kritisk parameter och behöver vara väl känd. Det behövs mer kunskap för att bättre kunna beskriva styvhetens spänningsberoende men även styvhetens storlek.

Tvärkontraktionstalet är dels indirekt bestämt genom att mäta horisontell och vertikal spänning på provkroppar och dels direkt uppmätt i triaxialförsök genom att mäta töjningar. Rapporterade resultat återfinns i ett snävt intervall för låga spänningar upp till 40 kPa. Mer studier behövs för att studera hur tvärkontraktionstalet påverkas över ett större spänningsintervall.

Hållfasthetsegenskaper har studerats med direkta skjuvförsök och triaxialförsök. Skillnaderna i resultat, friktionsvinkel och kohesionsintercept, beror huvudsakligen på typ av försök och val av kriterium för utvärdering av hållfasthetsparametrarna. Triaxialförsök visar att gummiklipp inte går till något egentligt brott som friktionsjordar gör utan provkropparna genomgår istället en förändring. Den utvärderade hållfastheten beror därför på hur stora deformationer som accepteras. Med ökande deformation ökar utvärderad hållfasthet.

Det horisontella jordtrycket som en gummiklippsfyllning skapar mot en konstruktion är konstant med djupet då vertikalspänningen överstiger 12 kPa. Det innebär att vilojordtryckskoefficienten minskar vid ökad vertikalspänning. Försök under aktiva jordtrycksförhållanden visar att en gummiklippsfyllning inte rasar, utan står kvar, om det horisontella stödet tas bort om fyllningen överlagras av en last överstigande 12 kPa.

Värmeledningstalet är väl undersökt men inte enligt de standarder som Vägverket föreskriver i ATB VÄG. Det saknas också laborativt bestämda värden på specifik värmekapacitet, vilken dock kan skattas teoretiskt utifrån beståndsdelarna i gummiklipp.

Beständigheten är relativt väl utredd. Kritiska faktorer är identifierade. Det återstår att undersöka om de tekniska egenskaperna påverkas av åldrande och specifika undersökningar för de förhållanden som råder i en konstruktion.

5.3 Teknisk funktion

Utifrån de tekniska egenskaper som presenterats i kap 2 är speciellt nedanstående tillämpningar intressanta för gummiklipp i mark- och anläggningstekniska sammanhang.

- Lättfyllnad. Skrymdensiteten är ungefär en tredjedel jämfört med friktionsjord.
- Dränering. Permeabiliteten är hög, även under hög vertikalbelastning och stor kompression. Kapillariteten är låg eller försumbar.
- Värmeisolering. Värmeledningstalet är lågt.
- Motfyllnad. Förutom materialets låga densitet så ökar inte jordtrycket med djupet som det gör för friktionsjordar.

De tekniska funktionerna och egenskaperna som listats ovan kräver allmänt, d.v.s. om inte gummiklipp används, antingen konstruktionsmässiga speciallösningar och/eller att andra material än bergmaterial används. I många sammanhang är det kombinationen av egenskaper som gör gummiklipp intressant. Mot tjälproblem är det önskvärt med lågt värmeledningstal, hög permeabilitet och låg kapillaritet. Vid motfyllnad där jordtrycket skall minimeras är kombinationen av låg densitet och ett lågt jordtryck mot konstruktionen och ibland även god dränerings- och värmeisoleringsförmåga intressant. För dränering på sättningsbenägna underlag, som t.ex. vid sluttäckning av deponier, är hög dränerade förmåga i kombination med låg vikt önskvärt.

Det finns även begränsningar i den tekniska funktionen. Gummiklipp är ett elastiskt och relativt kompressibelt material vilket måste beaktas i samverkan med de övriga delarna av konstruktionen. Bärförmåga och stabilitet för konstruktioner kan vara svåra att bedöma och beräkna men är med rätt design normalt inte något problem. Den relativt låga styvheten och höga elasticiteten hos gummiklipp kan vara gynnsam då ett något sviktande lager är önskvärt. Utifrån risken med brand finns det rekommendationer i USA att inte använda tjockare gummiklippsfyllningar än 3 m.

I ASTM (1998) finns rekommendationer för överbyggnadstjocklekar för vägar då gummiklipp används. Det rekommenderas att minst en 3 fot, ca. 0,9 m, tjock överbyggnad

mellan beläggning och gummiklipp används för att motverka allt för stora töjningar i underkant slitlager. Denna rekommendation baseras på erfarenhet och tar inte hänsyn till belastning eller beläggningstyp. Under svenska förhållanden innebär en så tjock överbyggnad att ett gummiklippslager mer blir att betrakta som ett bankfyllnadsmaterial än ett skyddslager.

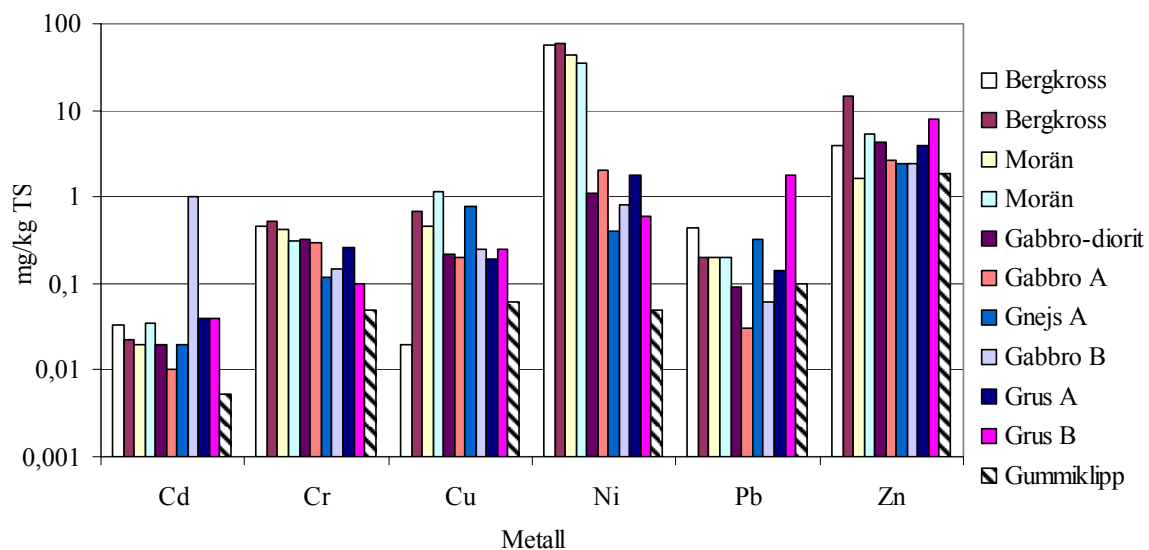
5.4 Miljöaspekter

5.4.1 Avgränsning

Det är omöjligt att fullständigt utreda vilken påverkan på miljön användning av ett material i en konstruktion har. Systemgränserna i diskussionen i detta avsnitt är emissionerna från gummiklipp i en markkonstruktion. Vid en övergripande jämförelse med andra material avseende miljöpåverkan måste hänsyn tas till anläggningsplatsens miljö, miljöpåverkan från tillverkning av materialet, transporter, skillnader i utförande, konstruktionens livslängd, etc. En sådan analys är platspecifik och kan svårligen generaliseras.

5.4.2 Metaller

Lakresultaten för gummiklipp avseende metaller har jämförts med tillgänglighetstester på metaller för naturliga material, figur 5.1. Eftersom inte samma metoder har använts vid tillgänglighetstesterna för de olika naturmaterialen och gummiklipp är inte resultaten direkt jämförbara. Resultaten i figuren indikerar dock att metallemissioner från gummiklipp, åtminstone för de metaller som jämförts, sannolikt inte bör vara ett problem i de flesta anläggningssituationer förutsatt att nivåerna är acceptabla under lång sikt.



Figur 5.1 Jämförelse i tillgänglighet mellan bergmaterial och gummiklipp (stapeln längst till höger). Notera att skalan är logaritmisk. Efter Tossavainen (2000), Jansson (2002) och Håöya (2002).

Lakningsförsök visar att gummiklipp lakar ut små mängder metaller. De totala mängderna tillgängliga metaller är jämförbara med bergmaterial som används konventionellt i anläggningsbyggande utan miljögranskning. Densiteten för gummiklipp är ungefär en tredjedel av bergmaterial vilket innebär att per kubikmeter använt material är den

tillgängliga mängden metall lägre än för bergmaterial.

Det är svårt att bedöma vilken metallbelastning en gummiklippskonstruktion har på miljön. Eftersom gummiklipp innehåller stålkord innebär det att järnhydroxider kan fällas ut i konstruktionen. Dessa laddade komplex kan binda andra metalljoner från gummiklippen som zink, bly och koppar. Detta har visats i kolonnförsök. Emissionerna blir då beroende av hur mycket järnhydroxidkomplex som bildats och hur stabila dessa är. Om de löses upp innebär det att ackumulerade metaller frigörs.

5.4.3 Organiska föreningar

Det kemiska innehållet i gummiklipp är inte avpassat till mark- och anläggningstekniska tillämpningar utan för att fungera som bildäck. Utöver huvudbeståndsdelarna, gummisorter, stearinsyra och fillermaterial finns det tillsatser av tillverkningskäl och åldringsskydd. Dessa ämnen, t.ex. acceleratorer och antioxidanter, finns i mindre mängder i däck. Det har visats att däckmaterial från nya däck är betydligt mer toxiskt än äldre däckmaterial. Det har inte visats att det beror på just de ämnen som är associerade med tillverkningen men det är sannolikt.

Av undersökta organiska föreningar som kan laka ut är det främst PAH som undersökts, men även fenoler i mindre utsträckning. Från däckklipp lakar det ut relativt små mängder PAH och fenoler. Av PAH är det naftalen som förekommer i mängder som normalt överstiger detektionsgränserna för de använda laboratorieanalyserna. Naftalen räknas inte till de cancerogena PAH-föreningarna. PAH har låg löslighet i vatten och binds effektivt till organiskt material i jord vilket innebär att spridningen av naftalen är mycket begränsad i löst form. Fenoler förekommer i låga halter i lakförsök nära analysernas detektionsgränser. Fenoler kan utgöra ett problem om de ackumuleras i begränsade vattenvolymer. Erfarenheter från fältförsök visar dock att halterna fenoler från gummiklipp som utsatts för fri perkolations är lägre än halterna i dikesvatten vid en större vanlig väg, Håøya et al. (2004).

5.4.4 Toxikologiska undersökningar

De toxikologiska studier som finns tillgängliga visar att lakvatten från däckmaterial ger en respons för de testade organismerna. Känsligast är regnbågslaxyngel. Studierna visar att färskt däckmaterial ger en betydligt allvarligare respons än äldre däckmaterial. Äldre däckmaterial verkar hämmande för de testade organismerna.

5.4.5 Övergripande diskussion

När emissioner från en mark- och anläggningsteknisk konstruktion, som t.ex. en väg, ska bedömas måste hänsyn tas till spridningsförutsättningarna. Om gummiklippen inte placeras i ständig kontakt med vatten kommer kontakttiden mellan gummiklipp och vatten att vara kort vilket minskar koncentrationen av eventuella föroreningar i lakvattnet. I skakförsök är kontakttiden mellan lakmedium och, här, gummiklipp vanligtvis 24 h. Koncentrationerna i en recipient blir betydligt lägre än de som är i lakvattnet p.g.a. utspädning. Frågeställningen för en miljöbedömning kan vara om recipienten tål ett tillskott av dessa ämnen eller inte. Det finns redan en naturlig belastning av metaller, PAH och fenoler och andra ämnen från både naturliga och antropogena källor.

För metaller finns ett forskningsbehov gällande hur lakningen påverkas av olika kombinationer av pH och redox samt hur mycket som totalt kan lakas ut ur gummimaterialet. PAH är väl studerat och är en ämnesgrupp som kommer att minska i däckmaterial vilket medför att denna ämnesgrupp bör prioriteras ner ur forskningssynpunkt. Fenoler är ännu bara beaktat i ett fåtal studier och bör studeras närmare avseende totalt lakbara mängder. EU:s vattendirektiv listar fenol som en av de föreningar som ska följas upp i ytvatten vilket måste beaktas vid en miljögeoteknisk bedömning. Eftersom toxikologiska tester visar att färskt gummimaterial är mer toxiskt än gammalt vore det önskvärt att utreda hur gammalt ett gummimaterial behöver vara för att den toxiska effekten ska vara minimerad.

5.5 Tillgänglighet av material

Gummiklipp är ett material vars tillgång begränsas till däckanvändningen. I Sverige samlades det år 2003 in drygt 70 000 ton däck, SDAB (2004), vilket motsvarar ca. 115 000 m³ gummiklipp i en fyllning med densiteten 600 kg/m³. Uppkomsten av material styrs inte av bygg- och anläggningsindustrins behov utan av den omfattning som bilparken förnyar däcken. Returdäcken hamnar på uppsamlingsställen runt om i landet och fragmenteras på plats för att reducera transportvolymen. Fördelningen av uppkomst av gummiklipp är kopplad till befolkningsstrukturen i landet. Det innebär att uppkomsten är större i tätbefolkade delar än i glesbygd och att materialet finns tillgängligt över hela landet. Idag förekommer ett visst utbyte av gummiklipp mellan Sverige och Finland vilket visar att det är möjligt att genom transporter, åtminstone delvis, tillgodose ett materialbehov för ett byggnadsobjekt.

5.6 Ekonomi

För alternativa material finns ett ekonomiskt incitament som konventionella material oftast saknar, en kostnad som materialägaren får betala för annan avsättning av materialet. EU-lagstiftningen innebär att deponering inte längre är ett alternativ för kvittblivning av bildäck. Alternativ till att använda gummiklipp som anläggningsmaterial är idag energiåtervinning för stora volymer material och tillverkning av gummigranulat av mindre mängder. Eftersom en allt högre andel av avfallet politiskt styrts mot förbränning råder det idag brist på förbränningskapacitet.

Utifrån de egenskaper gummiklipp har kan gummiklipp i vissa tillämpningar som lättfyllnad, tjälisolering och dränering ersätta i mark- och anläggningstekniska sammanhang dyra material. Eftersom gummiklipp som material finns utspritt över landet kan en användning av gummiklipp, förutom att minska materialkostnaderna, även minska transportkostnaderna i jämförelse med en del andra material. Produktionstekniskt är det inte svårare att hantera gummiklipp än andra material.

Eftersom gummiklipp idag inte betingar något materialpris på en öppen marknad är det svårt att i Sverige bedöma ekonomin av att använda materialet. Förutsättningarna för att det ska vara ekonomiskt lönsamt att använda gummiklipp bedöms vara goda.

5.7 Slutsatser

5.7.1 Gummiklipp som konstruktionsmaterial

Det finns många exempel internationellt där gummiklipp används på ett funktionellt sätt; som skyddslager i vägar, dräneringsmaterial i deponier, motfyllnad mot brokonstruktioner, lättfyllnad i bankfyllnader. Uttjänta bildäck har använts som konstruktionsmaterial i åtminstone 30 år i Nordamerika. År 1998 gavs en materialstandard ut i USA som stöd för användning av gummiklipp i mark- och anläggningstekniska tillämpningar, ASTM (1998). Den standarden summerar erfarenheterna från USA. I Europa håller ett arbete på med en motsvarande CEN-standard. Underlaget till den är en CWA-standard, en europeisk branschstandard.

Utifrån kunskapsnivån avseende de tekniska parametrarna som redovisats i denna avhandling kan tillämpningar pekats ut där kunskapsläget är tillräckligt och tillämpningar där forskningsbehovet är större. Tillämpningar där tillräcklig kunskap idag avseende tekniska egenskaper räcker till är:

- Bankfyllningar, t.ex. bullervallar, Smura och Uotinen (2000) och Synnøve (2002), och vägbankfyllningar, t.ex. Gacke et al. (1995).
- Dräneringslager, t.ex. Reddy och Saichek (1998).
- Motfyllnad, t.ex. Humphrey et al. (1997).

De tekniska begränsningarna som idag finns när det gäller användning av gummiklipp rör främst de elastiska egenskaperna i materialet, främst avseende styvhet och kompressibilitet. Kompressibiliteten gör att det idag är tveksamt att använda gummiklipp under eller i konstruktioner där styvhet och kompressibilitet är kritiska faktorer för .

Det finns begränsningar i användningen av gummiklipp. Miljöaspekten måste beaktas. Vid känsliga recipienter och där avrinningsvatten kan ansamlas i små volymer kan materialet innebära en negativ påverkan. Placerat i applikationer där perkolationen är liten och kontakttiden mellan vatten och gummiklipp är kort bör materialet inte innebära mer påverkan än andra material. Fyllningar är av brandriskskäl begränsade till 3 m höga.

Det finns ett forskningsbehov gällande förbättrade kunskaper avseende materialets elasticitet och styvhet, speciellt kopplat till spänningsnivåer, samt hållfasthetsparametrar för materialmodellering. Tekniska långtidsegenskaper bör även undersökas, t.ex. genom att testa gummiklippsmaterial som varit i bruk i 30 år i konstruktioner.

Gummiklipp har egenskaper som i vissa specialapplikationer är fördyrande. Genom att använda gummiklipp som konstruktionsmaterial finns en potential att minska materialkostnaderna och transportererna i jämförelse med en del andra material. De tillämpningar som är intressanta utifrån de karakteristiska tekniska egenskaperna låg densitet, hög permeabilitet och lågt värmeledningstal, är som lättfyllnad-, motfyllnads- och tjälisoleringsmaterial.

Vid användning av gummiklipp i konstruktioner ovan grundvattenytan kommer kontakttiden med vatten att vara låg eftersom materialet är nästan fritt dränerande. Det

innebär att de utgående koncentrationerna av föroreningar som kan emitteras från gummiklippet kommer att vara lägre än de som konstaterats i lakförsök.

Uppföljningsstudier av provobjekt där gummiklipp använts som skyddslagret i vägar och bankfyllnader visar att metaller och organiska ämnen lakar ut från konstruktionerna men att koncentrationerna är låga, eller t.o.m. lägre än i omgivande ytvatten som inte varit i kontakt med gummiklippet.

5.7.2 *Slutsatser från provsträckan*

Dimensioneringsarbetet med provsträckan visade att den uppskattade livslängden på konstruktionen inte påverkades nämnvärt av att styvhetsmodulen för skyddslagret varierades inom intervallet 0,25-2,0 MPa. Den kommande utvärderingen av bärförmågan kommer att ge mer kunskap om använda styvhetsmoduler var anpassade för dimensioneringsmodellen.

Gummiklipp kan hanteras med konventionell utrustning som används vid vägbyggnad. Banddrivna fordon är dock att föredra för utläggning och justering av utlagda lager på grund av punkteringsrisken. I vissa avseenden är gummiklipp mer lätthanterligt än konventionella vägbyggnadsmaterial som bergkross och friktionsjord, exempelvis håller materialet ihop bättre. Till nackdelarna hör att när väl materialet har packats är det svårt att justera eftersom omkringliggande gummiklipp följer med som sjök. Det är svårt att i fält avgöra hur stor effekt packningsarbetet har på gummiklippet och att exakt bedöma hur tjocka de överlagrande materialen blir eftersom gummiklippet komprimeras då det belastas.

Den utvärderade bärförmågan hos gummiklippslagret med fallviktsmätning på förstärkningslagret var lägre än förväntat, 3-300 kPa. Baserat på laboratoriestudier borde styvhetsmodulen varit i storleksordningen 500 kPa enbart med den belastning som skyddslagret utgör baserat på resultat från laboratoriestudier och ökat ytterligare när den belastats av fallviktsapparaten. Utifrån storleken på de uppmätta deflektionerna och den uppmätta responsen i ytan av förstärkningslagret kan utvärderingsmetoden för fallviktsmätning ifrågasättas för att studera styvhet på en så tunn överbyggnad ovanpå ett gummiklippslagret.

De omedelbara sättningarna (kompressionen) i konstruktionen, orsakade av belastningen av 500 mm förstärkningslager, uppgick i genomsnitt till ca. 40 % för delsträckan P1 med bergkross som förstärkningslager och ca. 14 % för delsträckan P2 med hyttsten som förstärkningslager. Långtidssättningarna efter 2 månaders belastning av 500 mm förstärkningslager och trafik, uppgick i genomsnitt till 4,5 % för delsträcka P1 och 2,1 % för delsträcka P2.

Mätningar av temperaturer och tjälfronten i vägkonstruktionen under vinter och tjällossning visar att gummiklippslagret, i jämförelse med referenssträckan, har en tjälisolerande effekt.

Lakvattenanalyserna visar att vissa grundämnen anrikas i lakvattnet jämfört med referenssträckan. De ämnen som anrikas mest i P1 med bergkross som förstärkningslager är järn (9 ggr), aluminium (8 ggr) och bly (5 ggr). För P2 med hyttsten som förstärkningslager anrikades bl.a. koppar (267 ggr), bly (71 ggr), kalium (52 ggr), zink (36 ggr) och svavel (17 ggr). Av PAH-föreningar detekterades naftalen, acenaften, fluoren och

fenantren i lakvattnet. Lakvattnet i referenssträckan räckte inte till för analys av PAH som jämförelse. Inga av de detekterade PAH-föreningarna räknas till de cancerogena av de s.k. 16 EPA PAH-föreningarna. Dominerande PAH-förening var naftalen, 17 µg/l i P1 med bergkross som förstärkningslager och 12 µg/l i P2 med hyttsten som förstärkningslager. Övriga detekterade PAH-föreningar var under 0,5 µg/l. Fler undersökningar behöver göras på lakvattensammansättningen för att se om emissionerna är representativa under en längre tidsrymd eller om de antar andra nivåer efter det att konstruktionen färdigställts.

REFERENSER

- AB-Malek, K. och Stevenson, A. (1986). The effects of 42 years immersion in sea water on natural rubber. *Journal of Materials Science*, Vol. 21, s. 147-154.
- ASTM. (1998). ASTM Standard Practise for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications. *ASTM standard D 6270-98*, American Society for Testing and Materials, Washington D.C.
- BLIC. (2001). *Life cycle assessment on an average European car tyre*. Bureau de Liaison des Industries du Caoutchouc (BLIC), Bryssel.
- BLIC (2003). <http://www.blic.be>. Bureau de Liaison des Industries du Caoutchouc (BLIC), Bryssel.
- Bergström, M. och Östman, M. (2004). *Däckklipps packningsegenskaper – En laboratorie- och fältstudie*. Examensarbete 2004:127 CIV, Institutionen för Väg- och vattenbyggnad, Luleå tekniska universitet, Luleå.
- Bredberg, K. (2003). *Sulphur-Utilizing Microorganisms in Biotechnological Applications - Rubber Recycling and Vanadium Reduction*, Doktorsavhandling 2003:16, Institutionen för Bioteknologi, Lunds universitet, Lund.
- Ciullo, P. A. och Hewitt, N. (1999). *The Rubber Formulary*, Noyes Publications, New York.
- Drescher, D. och Newcomb, D. (1994). *Development of design guidelines for use of shredded tyres as a lightweight fill in road subgrade and retaining walls*, Final report No. MN/RC-94/04, Department of Civil and Mineral Engineering, University of Minnesota, Minneapolis.
- Edeskär, T. (2004a). *Technical and Environmental Properties of Tyre Shreds Focusing on Ground Engineering Applications*, Teknisk rapport 2004:05, Avdelningen för Geoteknik, Luleå tekniska universitet, Luleå.
- Edeskär, T. (2004b). *Gummiklipp som skyddslager i en vägkonstruktion i ett fullskaleprojekt*, Forskningsrapport 2004:13, Avdelningen för Geoteknik, Luleå tekniska universitet, Luleå
- Edeskär, T. och Westerberg, B. (2003). Tyre shreds used in a road construction as a lightweight and frost insulation material, *The Fifth International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials*. Ed. Oriz de Urbina, G., Guomans, H., San Sebastian, s. 293-302.
- Edeskär, T. och Westerberg, B. (2004). Gummiklipp som tjälisolering i ett skyddslager i en vägkonstruktion, *XIV Nordiska Geotekniker Mötet*, Rapport 3:2004, Svenska Geotekniska Föreningen, Linköping, s. 115-126.
- Edil, T.B. och Bosscher, P.J. (1992). *Development of Engineering Criteria for Shredded or Whole Tires in Highway Applications.*, Department of Civil and Environmental Engineering, Report No. WI 14-92, University of Wisconsin, Madison.

- EC. (2003). *Questions to the CSTEE relating to scientific evidence of risk to health and the environment from polycyclic aromatic hydrocarbons in extender oils and tyres*, Opinion of the Scientific Committee on Toxicity, Ecotoxicity and the Environment (CSTEE), Document C7/GF/csteeop/PAHs/12-131 103 D(03), European Commission – Health & Consumer Protection Directorate, Bryssel.
- Engstrom, G.M., och Lamb, R. (1994). *Using shredded Waste Tires as a Lightweight Fill Material for Road Subgrades*. Minnesota Department of Transportation, Report MN/RD - 94/10, Maplewood.
- Eurolex. (2004). *The Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the Landfill of Waste*. <http://europa.eu.int/eur-lex/>, Bryssel.
- Evans, J.J. (1997). Rubber Tire Leachates in the Aquatic Environment, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Springer-Verlag Publishers. New-York, Springer-Verlag, 151 s. 69-115.
- FHA. (1985). *ELSYM 5*. Version 1.0, Datorprogram, Federal Highway Administration, Washington.
- Gacke, S., Lee, M., Boyd, N. 1995, Field Performance and Mitigation of Shredded Tire Embankment, Transportation Research Record 1577, Washington D.C.
- Garga, V.K. och O'Shaughnessy, V. (2000). Tire-reinforced earthfill. Part 3: Environmental assessment. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, s. 117-131.
- Heimdahl, T.C. och Drescher, A. (1998). Deformability Parameters of Shredded Tire Lightweight Fills. *Proceedings of the Conference on Cold Regions Impact on Civil Works*, ASCE, s. 524-535.
- Huhmarkangas, H. och Lindell, F. (2000). *Däckklipp som konstruktionsmaterial tillämpat som dränerande lager i en bottenskonstruktion under en askdeponi vid Högbytorp*, Examensarbete 2000:320, Avdelningen för Geoteknik, Luleå tekniska universitet, Luleå
- Humphrey, D.N., Chen, L.H. och Eaton, R.A. (1997). Laboratory and Field Measurement of the Thermal conductivity of Tire Chips for Use as Subgrade Insulation. *Transportation Research Board, 76th Annual Meeting*, January 12-16, 1997 Washington, D.C.
- Humphrey, D.N., och Eaton, R.A. 1995, "Field Performance of Tire Chips as Subgrade Insulation for Rural Roads," *Proceedings of the Sixth International Conference on Low-Volume Roads*, Transportation Research Board, Washington, D.C., Vol. 2, s. 77-86.
- Humphrey, D. N. och Katz, L.E. (2000). Five-Year Field Study of the Water Quality Effects of Tire Shreds Placed Above the Water Table, *79th Annual Meeting*, Transportation Research Board, Washington D.C.
- Humphrey, D.N. och Nickels, W.L. (1997). Effect of tire chips as lightweight fill on pavement performance. *Proceedings of the XIV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, A. A. Balkema, Rotterdam.

- Humphrey D. N., Sandford, T. C. (1993). *Tire Chips as Lightweight Subgrade Fill and Retaining Wall Backfill*, Recycling Ahead, Symposium proceedings, October 19-22, Denver.
- Humphrey, D.N., Sandford, T.C., Cribbs, M.M., Chearegrat, H.G. och Manion W. P. (1992) *Tire Chips as Lightweight Backfill for retaining Walls – Phase I*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maine, Orno.
- Humphrey, D.N., Sandford, T.C., Michelle M., Cribbs, M. och Manion W. P. (1993). Shear Strength and Compressibility of Tire chips for Use as Retaining Wall Backfill, *Transportation Research Record 1422*, TRB, National Research Council, Washington. D. C., s. 29-35 .
- Håøya, A.O. (2002). *E6 Rygge Kommune – Miljørisikovurdering ved bruk av kvernet dekk i støyvoll*. Report 1. Vegkontoret i Østfold, Statens Vegvesen, Moss.
- Håøya, A.O., Edeskär, T. och Aabøe, R. (2004). Leaching of phenol from tire shreds in a noise barrier, *International Conference on Sustainable Waste Management*, September 2004, Kingston University, London. (In press)
- Jansson, Å. (2002). *Riktlinjer för slagganvändning*, Serie D nr 781, Jernkontoret Forskning, Jernkontoret, Stockholm.
- KemI. (2003). *HA oils in automotive tyres – prospects of a national ban*. Report on a government commission, Kemikalieinspektionen 27 mars 2003, Stockholm.
- KemI. (1994). *Nya hjulspår – en produktstudie av gummidäck*, Rapport 6/94, Kemikalieinspektionen, Stockholm.
- Länsivaara, T., Tanska, T., Forsman, J., Talola, M. och Ilander, A. (2000). Shredded car tyres yard embankment, test site at Saramäki, Turku, *XIII Nordiska Geoteknikermötet*, Finlands Geotekniska Förening, Helsingfors, s. 539-544.
- NGSO. (2004). *Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*, http://www.ccme.ca/assets/pdf/e1_06.pdf, The National Guidelines and Standards Office, Ottawa.
- Perhans, A. (2003). *Utlakning av polycykliska aromatiska kolväten (PAH) ur asfalt och förorenad mark*. Report B1532, IVL Swedish Environmental Institute Ltd., Stockholm.
- Reddy, K.R., Saichek, R.E. (1998). Assesment of Damage to Geomembrane Liners by Shredded Scrap Tires, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 21, No 4, s 307-316.
- SDAB. (2004). <http://www.svdab.se/>, Stockholm.
- Shalaby, A., Khan, R. A., 2002, A Case Study on the Monitoring of a Lightweight Shredded Tire Road Embankment, Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials, March 26-27, Tokyo, s. 229-236.
- Shao, J. och Zarling, J.P. (1995). *Thermal Conductivity of Recycled Tire Rubber to be Used as Insulating Fill Beneath Roadways*, Report No. INE/TRC 94.12 SPR-UAF-93-09A, University of Fairbanks, Fairbanks.

- SIS. (2001). *Ecolabelling of Vehicle tyres*. Criteria document Version 2.1, Nordic Ecolabelling Board, SIS Ecolabelling. Stockholm.
- Smura, M. A., Uotinen, V.-M., 2000, Using Shredded tire chips in road structures, XIII Nordiska Geoteknikermötet, Finlands Geotekniska förening, Helsingfors.
- Synnøve, K. (2002). *Bruk av bildekk i støyvoller – livsløpsevurdering*, Prosjektrapport 2 Gjennbruksprosjektet, Intern rapport nr. 2310, Vegdirektoratet, Statens Vegvesen, Oslo.
- Tossavainen, M. (2000). *Leaching behaviour of rock materials and a comparison with slag used in road construction*, Licentiatsavhandling 2000:23 LIC, Avdelningen för mineralteknik, Luleå tekniska universitetet, Luleå.
- Trelleborg. (2004). *Polymerskolan*, <http://www.trelleborg.com/>, Trelleborg AB, Trelleborg.
- Toxnet. (2004). *Hazardous Substances Database*. <http://toxnet.nlm.nih.gov/>, National Library of Medicine, Bethesda.
- Tweedie, J.J., Humphrey, D.N., och Sandford, T.C. (1998). Full Scale Field Trials of Tire Chips as Lightweight Retaining Wall Backfill, At-Rest Conditions, *Transportation Research Record No. 1619*, Transportation Research Board, Washington, D.C., s. 64-71.
- Ulfvarson, U., Ekholm, U. och Bergström, B. (1998). Däckåtervinning – En pilotstudie, Rapport KTH/IEO/R-98/5-SE, Institutionen för Industriell Ekonomi och organisation, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- UNEP. (2000). *Technical guidelines on the identification and management of used tyres*. Report. Basel Convention series/SBC No. 02/10, Secretariat of the Basel Convention, Châtelaine.
- Vägverket. (2000). *Bearbetning av deflektionsdata, erhållna vid provbelastning av väg med FWD-apparat*, Metodbeskrivning 114:2000, Publilation 2000:29, Borlänge.
- Vägverket (2002c). *PMS 3.0*, Dimensioneringsprogram, <http://www.vv.se>, Borlänge.
- Vägverket. (2004). *Allmän teknisk beskrivning väg*. VV Publikation 2001:111, Borlänge.
- Westerberg, B. och Mácsik, J. (2001). *Laboratorieprovning av gummiklipps miljögeotekniska egenskaper*. Teknisk rapport 2001:02, Avd. För Geoteknik, Luleå tekniska universitet, Luleå.
- WSDOT. (1999). *EVERSTRESS 5.11*, Layered Elastic Analysis Program Version 5.11, Materials Laboratory, Washington State Department of Transportation, Washington D.C.
- Wu, Y.W, Benda, C.C. och Cauly, R.F. (1997). Triaxial Determination of Shear Strength of Tire Chips. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, May 1997, s. 479-482.
- Yang, S., Lohnes, R.A., Kjartanson, B.H. (2002). Mechanical Properties of Shredded Tires, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 25, No. 1, March 2002, s. 44-52.